

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

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра електронних комунікацій та Інтернету речей

«До захисту допущено»

ВО завідувача кафедри

_____ В'ячеслав НОСКОВ

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Застосування хмарних технологій в Інтернеті речей»

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-12

Скиба Віктор Васильович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕКІР, к.т.н.,

Максимов Володимир Васильович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ, к.т.н.,

Правило Валерій Володимирович _____

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

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ В'ячеслав НОСКОВ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Скибі Віктору Васильовичу

1. Тема роботи «Застосування хмарних технологій в Інтернеті речей», керівник роботи Максимов Володимир Васильович, кандидат наук, доцент кафедри ЕКІР НН ІТС, затверджені наказом по університету від 26 травня 2025 р. №1755 – с.

2. Термін подання студентом роботи на перевірку 10 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- Y Suppl. 32 (07/2020) ITU-T Y.4000 series – Smart sustainable cities - A guide for city leaders
- Y Suppl. 33 (07/2020) ITU-T Y.4000 series – Smart sustainable cities – Master plan
- Y Suppl. 53 (12/2018) ITU-T Y.4000 series – Internet of Thing use cases
- T-REC-Y.4903-202203-I!!PDF-E
- Технології Інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
- Пулеко І. В. Єфіменко А. А. Архітектура та технології Інтернету речей: навч. посіб. / І.В. Пулеко, А.А. Єфіменко. – Електронні дані. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. – 234 с.
- Ли П. Архитектура интернета вещей / пер. с англ. М. А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 454 с.: ил.
- Заїка В.Ф., Варфоломеєва О.Г., Домрачева К.О., Гринкевич Г.О. ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ. -Київ – 2019. – 315

4. Зміст роботи:

1. Хмарні технології, Інтернет речей
2. Застосування хмарних технологій в IoT
3. Перспективи розвитку хмарних технологій в IoT
4. Аналіз прикладів застосування хмарних технологій в IoT
5. Аналіз ефективності застосування хмарних технологій в IoT для розумних міст
6. Економічний аналіз показника продуктивності у контексті розумних міст

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Електронна презентація PowerPoint (в обсязі 15 слайдів):

Слайд №1 Тема роботи;

Слайд №2 Мета роботи, об'єкт, предмет та актуальність дослідження;

Слайд №3 Хмарні обчислення;

Слайд №4 Моделі хмарних обчислень;

Слайд №5 Хмарні сервіси;

Слайд №6 Інтернет речей;

Слайд №7 Архітектура IoT-систем;

Слайд №8 Взаємодія хмарних технологій та Інтернету речей;

Слайд №9 Переваги та недоліки застосування хмарних технологій в Інтернеті речей;

Слайд №10 Тенденції розвитку хмарних технологій в Інтернеті речей;

Слайд №11 Приклади застосування хмарних технологій в Інтернеті речей;

Слайд №12 Аналіз показників продуктивності з застосуванням ІКТ технологій для розумних міст;

Слайд №13 Економічна ефективність застосування хмарних рішень для Інтернету речей;

Слайд №14-15 Висновки;

6. Дата видачі завдання 11.11.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	11.11.2024	Виконано
2	Огляд літератури	11.12.2024	Виконано
3	Вступ	29.12.2024	Виконано
4	Огляд хмарних технологій та Інтернету речей	23.03.2025	Виконано
5	Дослідження перспектив розвитку хмарних технологій в Інтернеті речей	6.04.2025	Виконано
6	Аналіз прикладів застосування хмарних технологій в Інтернеті речей	11.05.2025	Виконано
7	Оформлення дипломної роботи	18.05.2025	Виконано

Студент

Віктор СКИБА

Керівник роботи

Володимир МАКСИМОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему «Застосування хмарних технологій в Інтернеті речей» складається з переліку умовних скорочень, вступу, основної частини, що містить три розділи, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг текстової частини роботи містить: 87 сторінок, 4 рисунки, 4 таблиці та 81 джерело.

Під час виконання роботи було комплексно розглянуто теоретичні питання стосовно хмарних технологій та Інтернету речей, а саме архітектуру, моделі хмарних обчислень, історію розвитку, принцип їх інтеграції, переваги, виклики та недоліки. Також було досліджено перспективи хмарних технологій в Інтернеті речей. Особлива увага була приділена аналізу прикладів застосування хмарних технологій в Інтернеті речей, зокрема в розумних містах.

Мета роботи – дослідження та аналіз інтеграції хмарних технологій та Інтернету речей (IoT), зокрема переваг та викликів їх інтеграції, впливу на управління даними, безпеку, інновації та перспективи подальшого розвитку.

Ключові слова та словосполучення: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, IoT, ХМАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ХМАРНІ СЕРВІСИ, SaaS, PaaS, IaaS, ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ, ХМАРНІ ПЛАТФОРМИ, ХМАРНА ІНФРАСТРУКТУРА, АРХІТЕКТУРА IoT, ПРОТОКОЛИ IoT, ВЗАЄМОДІЯ ХМАРИ ТА IoT, ВІРТУАЛІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ХМАРНІ IoT СИСТЕМИ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ОБРОБКА ДАНИХ, МАСШТАБОВАНІСТЬ, БЕЗПКА IoT, ГРАНИЧНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ТУМАННІ ОБЧИСЛЕННЯ, РОЗУМНІ МІСТА.

ABSTRACT

The thesis on the topic “Application of Cloud Technologies in the Internet of Things” consists of a list of abbreviations, an introduction, a main part containing three chapters, conclusions and a list of references. The total volume of the text part of the work includes: 87 pages, 4 figures, 4 tables, and 81 references. The theoretical issues related to cloud technologies and the Internet of Things, namely architecture, cloud computing models, history of development, the principle of their integration, advantages, challenges and disadvantages, were comprehensively considered in the course of the work. The prospects of cloud technologies in the Internet of Things were also explored. Particular attention was paid to the analysis of examples of cloud technologies in the Internet of Things, in particular in smart cities.

The purpose of the work is to study and analyze the integration of cloud technologies and the Internet of Things (IoT), in particular, the benefits and challenges of their integration, the impact on data management, security, innovation, and prospects for further development.

KEYWORDS: INTERNET OF THINGS, IoT, CLOUD TECHNOLOGIES, CLOUD COMPUTING, CLOUD SERVICES, SAAS, PAAS, IAAS, DEVELOPMENT TRENDS, CLOUD PLATFORMS, CLOUD INFRASTRUCTURE, IoT ARCHITECTURE, IoT PROTOCOLS, INEGRATION OF CLOUD AND IoT, VIRTUALIZATION, AUTOMATION, CLOUD IoT SYSTEMS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, MACHINE LEARNING, DATA PROCESSING, SCALABILIZABILITY, IoT SECURITY, EDGE COMPUTING, FOG COMPUTING, SMART CITIES.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ...	9
ВСТУП.....	13
1 ХМАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ	15
1.1 Хмарні технології.....	15
1.1.1 Що таке хмарні обчислення?	15
1.1.2 Історія хмарних технологій.....	16
1.1.3 Моделі хмарних обчислень	19
1.1.4 Хмарні сервіси.....	20
1.1.5 Застосування хмарних технологій.....	23
1.1.6 Переваги хмарних технологій.....	24
1.1.7 Виклики та обмеження	25
1.2 Інтернет речей	26
1.2.1 Концепція Інтернету речей	26
1.2.2 Архітектура IoT	27
1.2.3 Історія Інтернету речей.....	31
1.2.4 Застосування Інтернету речей	32
1.2.5 Проблеми безпеки та конфіденційності IoT.....	35
1.3 Застосування хмарних технологій в IoT	36
1.3.1 Як IoT та хмарні технології працюють разом?	36
1.3.2 Хмарні платформи для IoT.....	38
1.3.3 Переваги застосування хмарних технологій в IoT	40
1.3.4 Складнощі застосування хмарних технологій в IoT	42
1.4 Висновки з розділу 1	44
2 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІОТ.....	45
2.1 Тенденції розвитку та інновації.....	45
2.2 Виклики та методи їх вирішення.....	47
2.3 Висновки з розділу 2.....	50
3 АНАЛІЗ ПРИКЛАДІВ ЗАСТОСУВАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІОТ.....	52
3.1 Вибір технології для обробки IoT-трафіку та їх економічна оцінка.....	52
3.2 Приклади реального застосування	59
3.2.1 Розумні міста	59
3.2.2 Промисловість	61

3.2.3 Охорона здоров'я	63
3.3 Аналіз застосування хмарних технологій в IoT для Розумних міст	65
3.3.1 Аналіз ефективності застосування хмарних технологій в IoT для Розумних міст	65
3.3.2 Економічний аналіз показника продуктивності у контексті розумних міст.....	73
3.4 Висновки з розділу 3.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

«e-government»	Модель державного управління, яка заснована на використанні сучасних інформаційних та комунікаційних технологій
3G	Третє покоління технології мобільного зв'язку
4G	Четверте покоління технології мобільного зв'язку
5G	П'яте покоління технології мобільного зв'язку
AES	Симетричний алгоритм блочного шифрування (Advanced Encryption Standard)
AMQP	Відкритий стандарт протоколу прикладного рівня для проміжного програмного забезпечення (Advanced Message Queuing Protocol)
API	Інтерфейс програмування застосунків (Application Programming Interface)
ARPANET	Мережа передових досліджень (Advanced Research Projects Agency Network)
ATSAC	Удосконалена транспортна система та координація (Advanced Transportation System and Coordination)
AWS	Amazon Web Services
CO ₂	Діоксид вуглецю
CoAP	Спеціалізований протокол інтернет-додатків на основі UDP для пристроїв з обмеженими можливостями (Constrained Application Protocol)
CPU	Центральний процесор (Central Processing Unit)
CRM	Управління відносинами з клієнтами
DDoS	Атака на відмову в обслуговуванні, розподілена атака на відмову в обслуговуванні (Distributed Denial-of-Service)
DevOps	Методологія розробки програмного забезпечення, що об'єднує процеси розробки (Dev) і експлуатації (Ops)

E2EE	Наскрізне шифрування (End-to-end encryption)
EC2	Amazon Elastic Compute Cloud
GDPR	Загальний регламент про захист даних (General Data Protection Regulation)
GPS	Система глобального позиціювання (Global Positioning System)
HIPAA	Закон про переносимість та підзвітність медичного страхування (Health Insurance Portability and Accountability Act)
HR	Людські ресурси
HTTP	Протокол передачі даних, що використовується в комп'ютерних мережах (Hypertext Transfer Protocol)
HTTPS	Розширення протоколу передачі гіпертексту (HTTP), що використовує шифрування для безпечного спілкування через комп'ютерну мережу
IaaS	Інфраструктура як послуга (Infrastructure as a Service)
IDPS	Системи виявлення та запобігання вторгнень
IEEE	Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IIoT	Промисловий Інтернет речей (Industrial Internet Of Things)
IoT	Інтернет речей (Internet of Things)
IT	Інформаційні технології (Information Technology)
ITU	Міжнародний союз електрозв'язку (International Telecommunication Union)
LAN	Локальна мережа (Local area network)
LoRaWAN	Бездротовий мережевий протокол, який використовується для побудови мереж Інтернету речей на великі відстані (Long Range Wide Area Network)
LPWAN	Енергоефективна мережа дальнього радіусу дії (Low-power wide-area network)

MAC-адреса	Унікальний ідентифікатор, що зіставляється з різними типами устаткування для комп'ютерних мереж (Media Access Control)
MFA	Багатофакторна аутентифікація (Multi-Factor Authentication)
MQTT	Спрощений мережевий протокол, що працює на TCP/IP (Message Queue Telemetry Transport)
NIST	Національний інститут стандартів і технології (National Institute of Standards and Technology)
OAuth 2.0	Відкритий стандарт авторизації (Open Authorization)
PaaS	Платформа як послуга (Platform as a Service)
PAN	Персональна мережа (Personal Area Network)
RFID	Радіочастотна ідентифікація (Radio Frequency Identification)
RSA	Криптографічний алгоритм з відкритим ключем, що базується на обчислювальній складності задачі факторизації великих цілих чисел (Rivest-Shamir-Adleman)
SaaS	Програмне забезпечення як послуга (Software as a service)
SCADA	Диспетчерське управління і збір даних (Supervisory Control And Data Acquisition)
SCATS	Координована адаптивна система дорожнього руху в Сіднеї (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)
SCOOT	Техніка оптимізації роздільного циклу та зсуву (Split Cycle Offset Optimization Technique)
SNA	Системна мережева архітектура (Systems Network Architecture)
SNMP	Простий протокол керування мережею (Simple Network Management Protocol)
SSL	Рівень захищених сокетів (Secure Sockets Layer)
STP	Рівень провадження розумних технологій (Smart Technology Penetration)
TCP/IP	Набір протоколів мережі Інтернет (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)
TLS	Захист на транспортному рівні (Transport Layer Security)

VPN	Віртуальна приватна мережа (Virtual private network)
WAN	Глобальна мережа (Wide area network)
Wi-Fi	Технологія бездротового доступу до інтернету (Wireless Fidelity)
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
ВВП	Валовий внутрішній продукт
ГБ	Гігабайт
ЄС	Європейський Союз
ІКТ	Інформаційно-комунікаційні технології
КБ	Кілобайт
КМ	Кілометр
КТ	Комп'ютерна томографія
МБ	Мегабайт
МН	Машинне навчання (Machine Learning)
МРТ	Магнітно-резонансна томографія
ПЗ	Програмне забезпечення
ТБ	Терабайт

ВСТУП

Хмарні технології відіграють ключову роль в Інтернеті речей (IoT). Вони надають хмарну інфраструктуру, що полегшує менеджмент, зберігання та обробку великих обсягів даних, які генерується пристроями IoT.

Інтернет речей або IoT називають мережу пристроїв підключених до інтернету, які мають здатність приймати, передавати та обмінюватися інформацією. IoT пристрої збирають інформацію за допомогою різноманітних сенсорів та датчиків. [10] До IoT пристроїв входить майже все, починаючи від пристроїв розумного будинку (термостатів, розумних помічників, дверних замків, сигналізації), розумних годинників, смартфонів, комп'ютерів і закінчуючи автомобілями та складними індустріальними машинами. Наразі у світі налічується близько 18.8 мільярдів IoT пристроїв, а їх кількість продовжує збільшуватися з кожним днем. [9]

Хмарні технології - це модель, що надає спільний пул обчислювальних ресурсів, таких як сервери, сховища, мережі, сервіси, бази даних та іншу IT інфраструктуру через Інтернет на основі оплати за використання. [8] Це допомагає бізнесу всіх розмірів, від стартапів до великих компаній, пропонуючи рівні умови для інновацій, масштабування та оптимізації витрат. Ці технології також суттєво спрощують наше повсякденне життя. Наприклад, дозволяючи нам зберігати фото, відео та інші файли в хмарному сховищі, як Google Drive з віртуально необмеженим обсягом пам'яті та доступу до цих даних з будь-якого пристрою, що має доступ до Інтернету.

Обґрунтування актуальності теми

Хмарні технології та Інтернет речей – це дві різні технології, які стали нерозривною частиною повсякденного життя. Кількість IoT пристроїв та обсяги даних, що вони генерують швидко зростають та потребують ефективного управління даними. Оскільки IoT пристрої генерують величезну кількість даних, які потребують обробки, з'являється багато труднощів, адже вони мають обмежені можливості в обчислювальній потужності та місткості сховища, в той час, як повинні забезпечувати високу продуктивність, низьку затримку, безпеку,

конфіденційність та надійність. [10] Для вирішення цих проблем найкращим способом є інтеграція хмарних технологій з Інтернетом речей. В результаті хмарні технології забезпечать обробку даних та доступ до них в реальному часі, а також сховище для зберігання даних. Інтеграція цих технологій не тільки підвищує ефективність, а й сприяє інноваціям в різних сферах, від охорони здоров'я до розумних міст. Дослідження інтеграції цих технологій є дуже важливим для подальшого розвитку не лише окремих галузей, але й суспільства в цілому.

Мета роботи та об'єкт дослідження

Метою роботи є дослідження та аналіз інтеграції хмарних технологій та Інтернету речей (IoT), зокрема переваг та викликів їх інтеграції, впливу на управління даними, безпеку, інновації та перспективи подальшого розвитку.

Об'єктом дослідження є взаємодія між хмарними технологіями та Інтернетом речей.

1 ХМАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

1.1 Хмарні технології

1.1.1 Що таке хмарні обчислення?

Хмарні обчислення являють собою інноваційну інформаційну технологію, яка змінила підхід як організацій, так і окремих людей в керуванні та використанні обчислювальних ресурсів.

Найкраще визначення терміну хмарні обчислення було сформовано Національним інститутом стандартів і технологій (NIST), технологічним агентством, яке є частиною Міністерства торгівлі США. Відповідно до їхнього визначення: «Хмарні обчислення – це модель для забезпечення зручного мережевого доступу до спільного пулу сконфігурованих обчислювальних ресурсів (наприклад, мереж, серверів, сховищ, додатків та послуг) на вимогу, які можуть швидко бути надані та звільнені з мінімальними зусиллями управління або взаємодії з постачальниками послуг.» [13] Ця парадигма не лише дозволяє оптимізувати витрати на обчислення, зберігання та обмін даних, а й забезпечує динамічне масштабування інфраструктури. Крім того, хмарні обчислення активно застосовуються для сучасних інновацій, таких як штучний інтелект, Інтернет речей та аналітика великих даних.

Термін «хмара» представляє окреме ІТ-середовище, для віддаленого надання масштабованих ресурсів. Термін виник як метафора Інтернету, який є мережею, що надає віддалений доступ до децентралізованих ІТ-ресурсів. До того, як хмарні обчислення стали окремим формалізованим сегментом ІТ-індустрії, символ хмари зазвичай використовувався для представлення Інтернету в різноманітних специфікаціях та основній документації архітектури вебзастосунків. [13]

NIST виділяє 5 ключових характеристик хмарних обчислень: [13]

1. Самообслуговування на вимогу. Споживач може самостійно отримувати та змінювати обчислювальні можливості, при необхідності автоматично без необхідності взаємодіяти з кожним постачальником послуг;

2. Універсальний доступ до мережі. Послуги доступні споживачам через мережу передачі даних незалежно від кінцевого пристрою;
3. Об'єднання ресурсів. Обчислювальні ресурси провайдера об'єднуються для обслуговування декількох споживачів за моделлю мультиорендаря, при цьому різні фізичні та віртуальні ресурси динамічно надаються відповідно до попиту споживачів;
4. Швидка гнучкість. Ресурси можуть гнучко надаватися і вивільнятися в будь-який момент часу, без додаткових витрат на взаємодію з постачальником, як правило, в автоматичному режимі;
5. Облік використання. Хмарні системи автоматично обчислюють спожиті ресурси на певному рівні абстракції (наприклад, обсяг збережених даних, пропускна здатність, кількість користувачів, кількість транзакцій). Використання ресурсів можна відстежувати та контролювати, забезпечуючи прозорість як для постачальника, так і для споживача послуги, що використовується.

1.1.2 Історія хмарних технологій

Попри те, що хмарні обчислення є досить новим технологічним терміном, їх історія охоплює декілька десятиліть, а ідея, що лежить в основі з'явилася ще в 60-х роках минулого століття на початку комп'ютерної ери.

Історія концепції хмарних обчислень починається в 1960-і роки, коли популярні мейнфреймові комп'ютери, відомі своїми величезними розмірами та цінами, а необхідність їх спільного використання для зменшення вартості була актуальною темою. В 1961 році професор John McCarthy запропонував ідею «computing as utility», коли кожен абонент платить лише за ті ресурси, які він використовує. [12]

В 1969 році J.C.R. Licklider, Larry Roberts та Bob Taylor започаткували мережу Агентства передових дослідницьких проєктів (ARPANET) на замовлення Пентагону. Просуваючи бачення під назвою «Міжгалактична комп'ютерна мережа», в якій всі на планеті будуть пов'язані між собою за допомогою

комп'ютерів і зможуть отримати доступ до інформації з будь-якого місця у світі. Згодом вони запустили ARPANET – першу комп'ютерну мережу загального призначення, що з'єднує різні типи комп'ютерів разом у великих масштабах.

У 1972 році компанія IBM популяризувала концепцію віртуалізації та віртуальних машин. Віртуалізація дозволила на одній хост-машині запускати декілька віртуальних машин, кожна з яких обробляла різні обчислювальні завдання незалежно. В результаті використання обчислювальних ресурсів стало більш ефективним та економічно вигідним.

В 1974 році компанія IBM анонсувала Systems Network Architecture (SNA) для розв'язання проблеми з'єднання різних типів мереж. SNA являв собою набір протоколів, розроблених для підтримки менш централізованих мереж.

Великий крок для розвитку хмарних технологій відбувся в 90-і роки, з запуском всесвітньої павутини в 1991 році, яка з'єднала понад мільйон комп'ютерів по всьому світу. Ця інновація революціонізувала методи отримання доступу даних та їх обмін, а також сприяла розвитку вебсайтів, що зробило електронну комерцію мейнстримом. Була створена модель клієнт-сервер для розподілу обчислювальних ресурсів, в якій вебсайти слугували як інтерфейси для користувача, а внутрішня логіка розміщувалася на серверах всесвітньої павутини.

В 1999 році компанія Salesforce вперше запропонувала ідею доставлення програмного забезпечення кінцевим користувачам через Інтернет, що стало початком ранньої форми хмарної моделі доставлення програмного забезпечення як послуги (SaaS).

У 2002 році Amazon представили свій веб сервіс хмарних сховищ та обчислювальних ресурсів. Вони надавали розв'язання технічних проблем та менеджменту для малих та середніх підприємств. У 2006 році з розвитком моделі вебсервісів Amazon запустили Amazon Web Services (AWS), що пропонував послуги оренди хмарної інфраструктури, яка усувала необхідність для підприємств мати власні центри обробки даних. AWS представила такі сервіси, як Amazon S3 для зберігання даних, EC2 для обчислень на вимогу та RDS для структурованих баз даних, що ознаменувало початок ери Infrastructure-as-a-Service (IaaS). В той же рік Google запустили свій хмарний вебсервіс.

Концепція гібридних хмар була представлена у 2011 році. Це зробило взаємосумісними приватні та публічні хмари та надало можливість для переміщення робочого навантаження між двома хмарами. В той же рік Apple запустили свій сервіс хмарного сховища iCloud для зберігання більш особистої інформації (фото, музика, відео тощо). У 2012 році був запущений Google Drive, що поєднав різні хмарні сервіси в один.

Мультихмари отримали популярність у 2013-2014 роках, коли організації почали використовувати Software as a service (SaaS) для надання таких послуг, як HR, CRM та управління ланцюгами постачання.

Протягом 2019 - 2022 роках пандемія Covid-19 призвела до швидкого впровадження хмарних обчислень, оскільки компанії все більше переходили на віддалену роботу.

На сьогодні впровадження хмарних сервісів продовжується у всіх індустріях. За даними американської технологічної дослідницької та консалтингової фірми Gartner витрати кінцевих користувачів на публічні хмари зростають, а сума, витрачена кінцевими користувачами на публічні хмарні сервіси в усьому світі, перевищить 675 мільярдів доларів у 2024 році. Це на 20,4% більше, ніж у 2023 році, коли глобальні витрати становили 561 мільярд доларів. [11]

	2023 Spending	2023 Growth (%)	2024 Spending	2024 Growth (%)	2025 Spending	2025 Growth (%)
Cloud Application Infrastructure Services (PaaS)	142,934	19.5	172,449	20.6	211,589	22.7
Cloud Application Services (SaaS)	205,998	18.1	247,203	20.0	295,083	19.4
Cloud Business Process Services (BPaaS)	66,162	7.5	72,675	9.8	82,262	13.2
Cloud Desktop-as-a-Service (DaaS)	2,708	11.4	3,062	13.1	3,437	12.3
Cloud System Infrastructure Services (IaaS)	143,302	19.1	180,044	25.6	232,391	29.1
Total Market	561,104	17.3	675,433	20.4	824,763	22.1

Рисунок 1.1 - Прогноз витрат кінцевих користувачів публічних хмарних сервісів у світі, мільйони доларів США (джерело: Gartner, травень 2024)

1.1.3 Моделі хмарних обчислень

Моделі хмарних обчислень описують різні підходи в управлінні та налаштуванні ресурсів. Хмари поділяють на чотири основні типи залежно від моделі розгортання: публічні, приватні, гібридні та мультихмари [5].

Публічна хмара – це модель в якій постачальник робить всі ресурси загальнодоступними, а користувачі спільно використовують інфраструктуру центру обробки даних та інші ресурси хмарного провайдера. Доступ до цієї моделі може бути як безоплатним, так і платним за підпискою або моделлю «pay-per-usage» (оплати за використання). Цей тип хмари надає можливість легко масштабувати ресурси, оскільки достатньо лише купити додаткову потужність за потреби, а також позбавляє витрат на обслуговування обладнання, оскільки за це відповідає провайдер хмарних послуг. З недоліків публічних хмар є нижча безпека в порівнянні з іншими моделями. Ця модель зазвичай використовується компаніями або користувачами яким потрібен швидкий доступ до обчислювальних ресурсів без значних початкових витрат. Серед провідних постачальників послуг публічних хмар є Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, IBM Cloud та Google Cloud Platform.

Приватна хмара – це хмарне середовище, в якому вся хмарна інфраструктура та обчислювальні ресурси призначені лише для однієї організації. Зазвичай такі хмари розміщуються локально на базі власних дата-центрів, але також можуть бути розміщені на інфраструктурі іншого хмарного провайдера або побудовані на орендованій інфраструктурі. Перевагою цієї моделі є вища безпека, конфіденційність та повний контроль над інфраструктурою, оскільки доступ до хмарної інфраструктури мають лише авторизовані співробітники організації. Недоліком є висока ціна таких хмар, оскільки це потребує покупки, встановлення та налаштування обладнання, що пов'язано зі значними капітальними витратами. Це також вимагає постійних витрат на управління та обслуговування інфраструктури. Приватні хмари зазвичай обирають такі організації, як державні установи, організації охорони здоров'я та фінансові установи, оскільки вони працюють з конфіденційними документами, персональною інформацією,

інтелектуальною власністю, медичними записами, фінансовими даними та іншими конфіденційними даними, що потребують особливого захисту.

Гібридна хмара - це модель, що поєднує переваги публічних та приватних хмар дозволяючи передавати дані між ними. Це допомагає компаніям легко масштабувати ресурси між власною інфраструктурою та публічними хмарами. Наприклад, гібридне хмарне середовище ідеально підходить для DevOps та інших команд, які займаються розробкою та тестуванням вебзастосунків. Це звільняє організації від потреби купувати та розширювати локальне фізичне обладнання, необхідне для тестування застосунків та скорочує час виходу продукту на ринок. Після того, як команда розробила застосунок у публічній хмарі, вона може перенести його в приватне хмарне середовище. Також комбінація з публічної хмарою дозволяє компаніям швидко масштабувати ресурси у відповідь на непередбачене збільшення трафіку, не впливаючи на навантаження в приватній хмарі, ця функція має назву «cloud bursting» (хмарний вибух). Поточкові канали, такі як Amazon, використовують цю функцію для підтримки трафіка в піковий час навантаження, коли вони запускають нові шоу.

За даними IBM Transformation Index: State of Cloud понад 77% компаній та ІТ-спеціалістів використовують гібридний підхід в хмарних сервісах. [5]

Мультихмара – це підхід у використанні двох або більше хмар від різних хмарних провайдерів. Організації використовують мультихмари, щоб уникнути прив'язки до одного постачальника та бути більш гнучкими в виборі інновацій. Це також надає можливість обирати та налаштовувати унікальний набір хмарних функцій і сервісів відповідно до своїх потреб. Наприклад, організація може обрати AWS для глобального доступу до вебхостингу, IBM Cloud для аналізу даних і машинного навчання, а Microsoft Azure для функції безпеки.

1.1.4 Хмарні сервіси

Хмара незалежно від того, чи вона приватна або публічна, може використовуватися для різних цілей. Вона може замінити апаратне або програмне забезпечення, обчислювальну інфраструктуру та інші ІТ-ресурси. Хмарні сервіси

поділені на три основні типи: IaaS (Infrastructure-as-a-Service), PaaS (Platform-as-a-Service) та SaaS (Software-as-a-Service). Співвідношення між цими сервісами може бути представлене у вигляді піраміди, що демонструє різний ступінь контролю доступу над інформацією. [15]

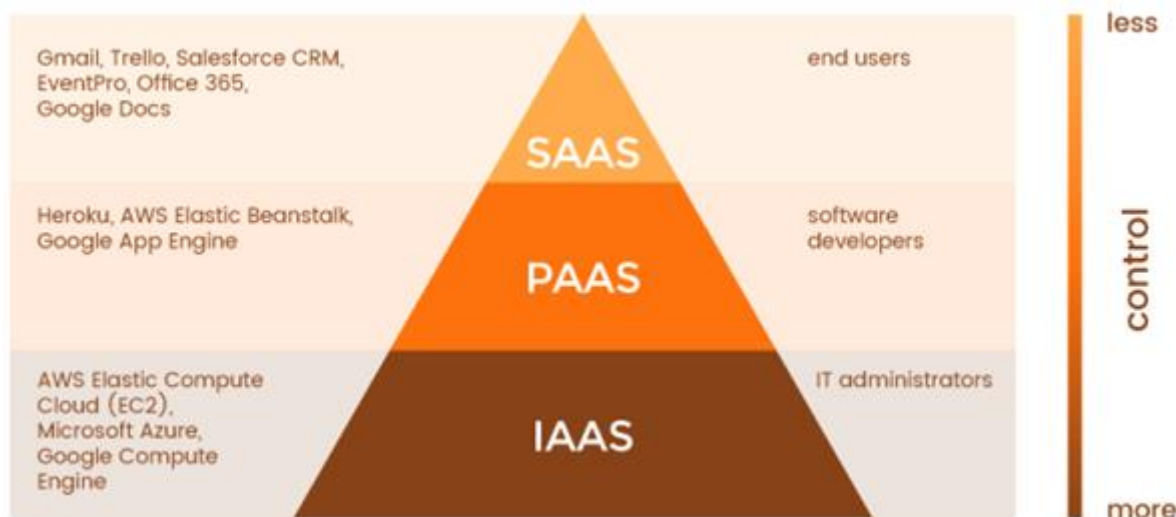


Рисунок 1.2 - Хмарна піраміда: IaaS, PaaS і SaaS (джерело: <https://gigacloud.ua/articles/hmarna-piramida-iaas-paas-i-saas/>)

На вершині піраміди розташований кінцевий користувач, що взаємодіє з персональними даними через застосунок зі зручним інтерфейсом. Посередині знаходиться платформа, яка використовується для розгортання застосунків. В основі піраміди знаходиться інфраструктура, яка являє собою фізичні та віртуальні сервери, обчислювальні потужності, накопичувачі та інші ресурси.

IaaS (Інфраструктура як сервіс) надає доступ до основних обчислювальних ресурсів, таких як фізичні та віртуальні сервери, мережі та сховища через інтернет, де розробник може розгорнути та запускати будь-яке програмне забезпечення, що може включати операційні системи або застосунки. Користувач не має контролю над внутрішньою хмарною інфраструктурою, але має контроль над операційними системами, сховищем і встановленими застосунками. IaaS надає змогу користувачам масштабувати та скорочувати кількість виділених ресурсів за потребою, зменшуючи необхідність у високих капітальних витратах або

непотрібній локальній чи віддаленій інфраструктурі, а також збільшуючи ресурси в період пікового навантаження, щоб впоратися з надмірним навантаженням.

За даними звіту компанії Business Research, ринок IaaS буде швидко зростати в найближчі декілька років, збільшившись до 212,34 мільярдів доларів у 2028 році, при середньорічному темпі зростання 14,2%. [14]

PaaS (Платформа як сервіс) це платформу для розробників програмного забезпечення, що дозволяє створювати, розгортати та керувати програмами. В PaaS постачальник хмарних послуг розміщує все необхідне в дата-центрі. Він надає апаратне забезпечення, інфраструктуру та інструменти розробки, позбавляючи розробників від витрат та складнощів пов'язаних з підтримкою платформи в локальному середовищі. Користувач не керує та не контролює внутрішню хмарну інфраструктуру, що включає мережу, сервери, операційні системи або сховища, але має контроль над розміщеними застосунками та налаштуваннями конфігурації для середовища хостингу застосунків. Приклади PaaS: Google App Engine, IBM Cloud, Microsoft Azure.

Сьогодні PaaS формується навколо контейнерів - віртуалізованих обчислювальних моделей віддалених від віртуальних серверів. Контейнери віртуалізують операційну систему, дозволяючи розробникам комплектувати застосунок лише з тими службами операційної системи, які необхідні для запуску на будь-якій платформі, без модифікації та потреби у проміжному програмному забезпеченні.

SaaS (Програмне забезпечення як сервіс) - це підхід в якому розробник програмного забезпечення розташовує свій застосунок в дата-центрі. Управлінням та обслуговуванням програм займається провайдер. Такі застосунки доступні для кінцевих користувачів через веб-браузер або десктопні програми. Постачальники хмарних послуг надають SaaS на основі місячної або річної підписки, за моделлю оплати за використання або навіть безоплатно. Прикладом таких сервісів є Google Docs, Gmail, Microsoft Office 365.

Переваги SaaS:

- легкий для використання та не потребує встановлення та обслуговування;

- дозволяє отримати доступ з будь-якого пристрою, що має доступ до інтернету;
- автоматично оновлюється та захищає дані від втрати шляхом резервування;
- легко масштабується відповідно до потреб з можливістю обрати зручний варіант оплати.

SaaS є основною та найпопулярнішою моделлю розповсюдження програмного забезпечення для більшості комерційних застосунків.

1.1.5 Застосування хмарних технологій

Використання хмарних технологій збільшує функціональність IoT пристроїв, надаючи інструменти для ефективного менеджменту, обробки та аналізу даних в реальному часі.

Використання хмарних технологій [5]:

- Хмарні технології надають централізовану платформу, що має практично необмежену обчислювальну потужність для зберігання та обробки даних. Це є дуже важливим, оскільки пристрої Інтернету речей генерують величезні обсяги даних, якими необхідно ефективно управляти та обробляти.
- Хмарні технології дозволяють ефективно управляти даними з IoT пристроїв в реальному часі зменшуючи витрати на обробку.
- Хмарні технології дозволяють проводити віддалений моніторинг стану IoT пристроїв, а також керувати ними. Користувач може бачити дані, які надсилають пристрої та змінювати їхні налаштування з будь-якої точки світу через вебінтерфейс або мобільний застосунок.
- Хмарні технології дозволяють віддалено оновлювати програмне забезпечення для IoT пристроїв без необхідності фізичного втручання, що підвищує безпеку та функціональність.
- Використання штучного інтелекту та машинного навчання у поєднанні з хмарними технологіями дозволяє ефективно аналізувати велику кількість

даних отриманих від IoT пристроїв, що зберігаються в хмарі для підвищення ефективності та автоматизації різноманітних процесів.

Сфери застосування хмарних технологій: [5]

- В охороні здоров'я для віддаленого моніторингу стану пацієнтів за допомогою носимих IoT пристроїв, які в реальному часі передають дані до хмари для зберігання та аналізу як алгоритмами, так і лікарями.
- В промисловості для моніторингу стану обладнання та прогнозування неполадок за допомогою сенсорів та датчиків в реальному часі.
- В розумних містах для моніторингу трафіку та управління дорожнім рухом, якості повітря або освітлення.
- В розумних будинках для управління різноманітними побутовими пристроями, освітленням, безпекою або моніторингом повітря через Wi-Fi або Bluetooth за допомогою голосових помічників, таких як Amazon Alexa чи Google Home.

1.1.6 Переваги хмарних технологій

Зниження витрат

Хмарні технології пропонують користувачам віртуально необмежені можливості, для зберігання або обробки даних, допомагаючи знизити витрати на локальне обладнання, шляхом оренди необхідних хмарних ресурсів за потреби, на основі моделі «pay-per-usage», тобто оплати лише за використані ресурси. Це позбавляє необхідності великим організаціям інвестувати значні кошти у потужне локальне обладнання та його технічне обслуговування. [5]

Автоматичне оновлення програмного забезпечення

Програмне забезпечення потребує постійного оновлення для боротьби з різноманітними загрозами, і перевага хмарних обчислень полягає в можливості віддаленого та автоматичного оновлення ПЗ. Організації більше не потрібно буде турбуватися про будь-які оновлення, а також витратити додаткові кошти, коли необхідне нове оновлення.

Висока продуктивність та гнучкість

Оскільки хмарні обчислення мають віртуально необмежені обчислювальні можливості та можуть бути швидко збільшені або зменшені відповідно до робочого навантаження або запитів користувачів, це робить їх ідеальними для аналізу та зберігання даних величезних обсягів даних.

Безпека даних

При зберіганні даних в хмарі, постачальник послуг гарантує регулярне створення резервних копій, та їх збереження в різних місцях, на різних серверах, щоб знизити ймовірність втрати цієї резервної копії, якщо станеться збій диска або інша поломка. [74]

Доступність

Хмарні сервіси забезпечують доступ до даних в реальному часі і з будь-якого місця в світі при використанні пристрою, що має підключення до інтернету.

1.1.7 Виклики та обмеження

Попри на велику кількість переваг хмарних технологій, їх використання супроводжується значною кількістю недоліків. Серед основних недоліків виділяють проблему безпеки та конфіденційності, залежності від інтернету, а також питання продуктивності та мережевої затримки. [8]

Забезпечення безпеки та конфіденційності даних є основною задачею при використанні хмарних технологій. Зберігання та передача інформації в хмару робить дані більш вразливими до злому, витоку даних чи несанкціонованого доступу. Крім того, необхідно забезпечити дотримання законів про захист даних та конфіденційної інформації. Для розв'язання цих проблем рекомендується застосовувати такі заходи безпеки, як шифрування та контроль доступу для збереження даних у хмарі та зменшення ризиків їх витоку.

Використання хмарних технологій в IoT, зокрема для роботи в режимі реально часу потребує постійного доступу до швидкісного інтернету для надсилання та отримання величезних обсягів даних. Раптові перебої в інтернет-з'єднанні призводять до зниження пропускної здатності, що може спричинити сповільнення або навіть повну зупинки роботи бізнесу, а також підвищує ризик

витоку даних. При використанні декількох каналів інтернет-з'єднання, що забезпечують високу пропускну здатність, а також впровадження рішень для локальної обробки даних дозволяє мінімізувати проблему залежності від інтернету.

Забезпечення високої пропускну здатності, доступності та низької затримки при використанні хмарних технологій є ключовими для ефективної роботи IoT-системи, та організації в цілому. Затримки при передачі даних між IoT пристроями та хмарними серверами негативно впливають на обробку інформації в реальному часі, що особливо важливо для автономних транспортних засобів, де миттєва реакція є необхідною. Крім того, продуктивність всієї компанії може залежати від надійності провайдера хмарних послуг. Якщо провайдер стикається з перебоями, це безпосередньо впливає на бізнес. Для зменшення затримки необхідно використовувати граничні обчислення, тобто здійснювати обробку даних ближче до джерела, або безпосередньо на самому IoT пристрої, що дозволить знизити час передачі та покращити продуктивність.

1.2 Інтернет речей

1.2.1 Концепція Інтернету речей

Інтернет речей (IoT) представляє мережу фізичних пристроїв, що мають вбудовані сенсори та технології для взаємозв'язку та обміну даними з іншими пристроями, системами та хмарами через Інтернет. Пристрої Інтернету речей охоплюють майже все - від повсякденних предметів (термостатів, вимикачів, кухонних приладів, розумних годинників) до складних промислових машин. Сенсори IoT пристроїв здатні до моніторингу різноманітних параметрів, таких як температура, вологість, якість повітря, споживання енергії та продуктивність. Організації можуть використовувати ці дані для аналізу в режимі реального часу, щоб виявити закономірності, тенденції та аномалії, які можуть допомогти бізнесу оптимізувати свою діяльність та покращити фінансові показники. [6]

За останні роки, IoT стало однією з найважливіших технологій, і все це стало можливим завдяки:

Розвитку технологій бездротового зв'язку, що дало змогу передавати дані від IoT сенсорів до хмар та інших IoT пристроїв через Інтернет. Прикладом таких технологій є Wi-Fi, Bluetooth, стільниковий зв'язок, Zigbee і LoRaWAN.

Появі доступних та енергоефективних сенсорів і приводів, оскільки вони лежать в основі IoT пристроїв та дозволяють машинам і пристроям взаємодіяти з фізичним світом, впроваджувати автоматизовані рішення без втручання людини.

Хмарним обчисленням, які дозволили розширити межі IoT, надаючи потужності для зберігання, обробки та аналізу величезних обсягів даних, які генеруються пристроями IoT. Платформи хмарних обчислень також надають інфраструктуру та інструменти, для створення та розгортання додатків Інтернету речей.

Інструментам для аналітики Big Data, які надали більше можливостей для аналізу величезних обсягів даних за допомогою алгоритмів машинного навчання, інструментів візуалізації даних, моделі предикативної аналітики та Штучного інтелекту.

1.2.2 Архітектура IoT

Архітектура Інтернету речей представляє структуру, яка визначає, як різні елементи Інтернету речей, такі як сенсори, приводи, мережі та додатки взаємодіють в IoT-середовищі. Як правило, архітектура IoT складається з декількох рівнів та компонентів, які виконують різні функції: від фізичних пристроїв і систем для збору даних, до мережевих пристроїв, що передають дані до IoT платформ для обробки та зберігання даних.

Попри те, що не існує універсального рішення, яке підходить для всіх проєктів, існує узагальнена еталонна архітектура Інтернету речей на основі рекомендацій ITU-T Y.2060, що складається з чотирьох рівнів: [16]

- Рівень IoT-пристроїв
- Рівень мережі
- Рівень сервісної та програмної підтримки
- Рівень додатків

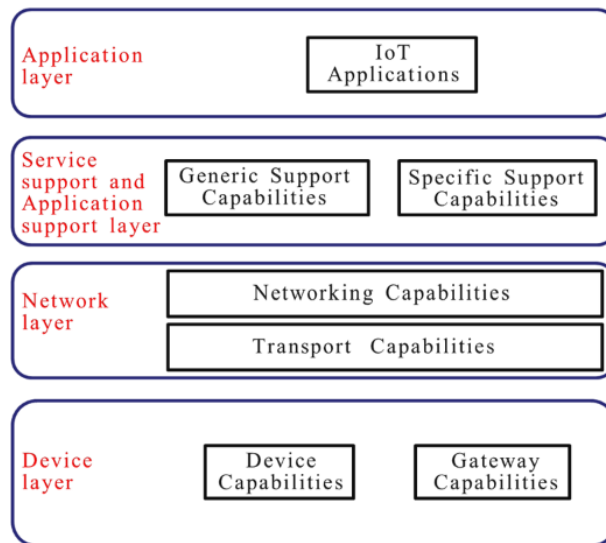


Рисунок 1.3 - Чотирирівнева архітектура IoT (джерело: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=11559>)

На основі стандартів та рекомендацій ITU-T та IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things, можна визначити розширену еталонну архітектуру Інтернету речей, що складається з 7 рівнів, сенсорів, приводів, мереж зв'язку, шлюзу IoT, додатків, менеджменту та безпеки. [18]

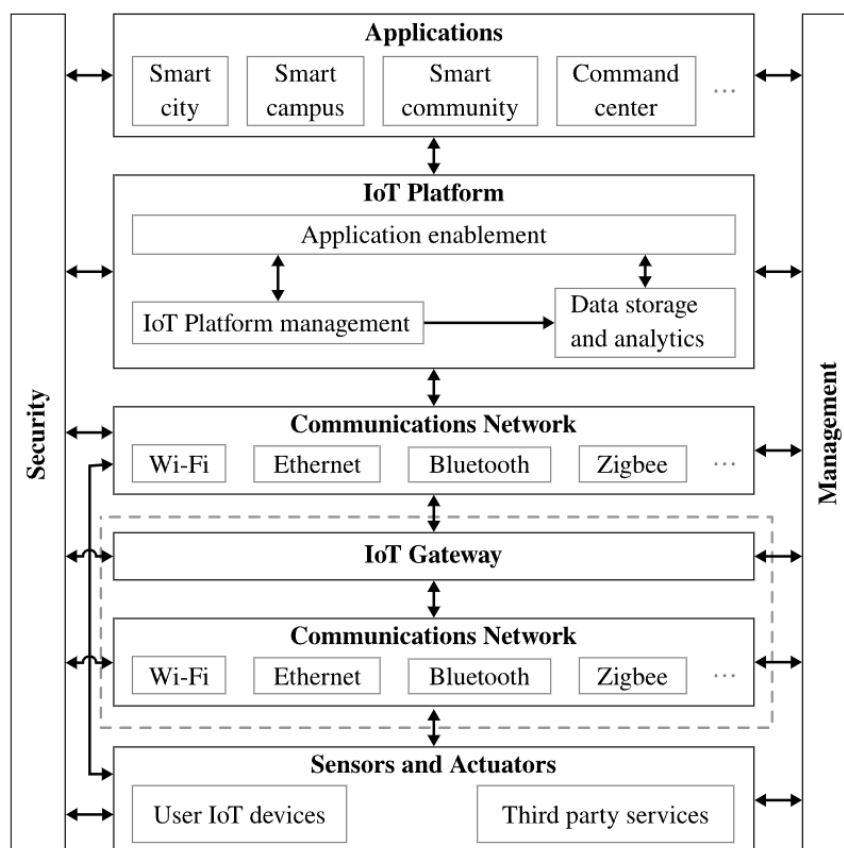


Рисунок 1.4 - Семирівнева архітектура IoT (джерело:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254266052200107X?via%3Dihub#sec1>)

1. Рівень IoT-пристроїв

На рівні IoT-пристроїв, знаходяться сенсори та приводи. Сенсори є апаратними пристроями, що збирають параметри з навколишнього середовища, наприклад, датчики температури або вологості. Приводи є апаратними пристроями, що здатні виконувати різні дії, на основі IoT запитів, наприклад увімкнення або вимкнення пристроїв.

2. Рівень мережі

Рівень мережі забезпечує з'єднання та передачу даних від IoT пристроїв до IoT шлюзу та IoT платформи через різні дротові або бездротові комунікаційні протоколи, такі як Wi-Fi, Ethernet, Bluetooth, Zigbee, мобільний зв'язок та інші.

3. Рівень IoT-шлюзу

Рівень IoT шлюзу необхідний для забезпечення спільної мережі зв'язку, протоколу рівня даних і формату даних з платформою IoT, оскільки різні IoT

пристрої можуть використовувати різні комунікаційні мережі, протоколи рівня даних, формати даних, і в багатьох випадках платформа IoT може не мати прямої підтримки деяких з них.

4. Рівень IoT-платформи

Платформа IoT є центральним вузлом системи IoT, що дозволяє керувати та контролювати підключеними датчиками та приводами за допомогою додатків.

IoT-платформа повинна забезпечувати три фундаментальні блоки:

- Менеджмент IoT-платформи, а саме:
 - створення та налаштування акаунтів для користувачів;
 - інтеграцію та управління пристроями;
 - управління даними та системою;
 - управління інтерфейсом.
- Зберігання та обробку даних.
- Підтримку застосунків.

5. Рівень застосунків

Рівень додатків представляє програмне забезпечення, що охоплює графічний інтерфейс, інформаційні панелі, системи управління та аналітичні програми, які дозволяють користувачам відстежувати, контролювати та взаємодіяти з пристроями Інтернету речей.

6. Рівень безпеки

Рівень безпеки відповідає за забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних, за допомогою використання таких функцій, як аутентифікація користувачів, конфіденційність користувачів, контроль доступу, моніторинг та аудит безпекових подій, а також управління ключами та сертифікатами.

7. Рівень менеджменту

На рівні менеджменту виконується загальне управління та виконання завдань в IoT системі. До таких завдань відносяться: управління неполадками, управління продуктивністю системи, управління мережею, віддалене конфігурування та оновлення пристроїв.

1.2.3 Історія Інтернету речей

Таблиця 1.1 - Історія Інтернету речей

Рік / Діапазон років	Подія
1950-ті - 1960-ті	Створення мережі ARPANET, попередника сучасного Інтернету. Мережа розроблена і введена в експлуатацію, агентством передових оборонних дослідницьких проєктів США та є фундаментальним компонентом для сучасного Інтернету речей. [27]
1973	Створення набору протоколів TCP/IP, що дозволили наскрізну передачу даних між двома пристроями, підключеними до мережі, визначаючи, як дані повинні бути упаковані, адресовані, передані, маршрутизовані та отримані.
1980-ті	Вперше обговорювалась концепція додавання сенсорів та інтелекту до фізичних об'єктів, коли студенти університету Карнегі-Меллона вирішили модифікувати автомат з продажу кока-коли, щоб віддалено відстежувати його вміст. [28]
1990	Перший IoT пристрій. Джон Ромкі вперше під'єднав тостер до Інтернету за допомогою протоколу TCP/IP. Це дозволило вмикати та вимикати пристрій за допомогою протоколу мережевого керування SNMP (Simple Network Management Protocol). [28]
1999	Поява терміну «Інтернет речей». Кевін Ештон, керівник лабораторії автоматичної ідентифікації в Массачусетському технологічному інституті, використав термін «Інтернет речей» в презентації для керівників Proctor&Gamble, де він описав IoT як технологію, що з'єднує кілька пристроїв за допомогою RFID-міток для управління ланцюгами постачання. [27]
2000	Компанія LG створила перший розумний холодильник, що мав вбудовані екрани та трекери, які дозволяли відстежувати, що є в холодильнику.
2000-й - 2005-й	Розвиток бездротових мереж, таких як Wi-Fi та стільниковий зв'язок, що дозволили підключати більше пристроїв до інтернету.

Продовження таблиці 1.1

2006	Запуск Amazon Web Services (AWS), що полегшив розробникам створення та масштабування додатків Інтернету речей.
2007	Перший iPhone з'являється на ринку, пропонуючи абсолютно новий спосіб для широкої публіки взаємодіяти зі світом і пристроями, підключеними до Інтернету.
2008	Перша міжнародна конференція з Інтернету речей, а також перший рік, коли кількість пристроїв, підключених до Інтернету, перевищила кількість людей на Землі.
2009	Google почав тестувати безпілотні автомобілі.
2010-ті	Впровадження протоколу IPV6 для збільшення адресного простору в глобальній мережі Інтернет. Світові технологічні гіганти, такі як Apple, Samsung, Google, Cisco та General Motors, зосереджують свої зусилля на виробництві датчиків та пристроїв Інтернету речей.
2015-й - наш час	З розвитком Інтернету речей наступна хвиля інновацій стала можливою з інтеграцією хмарних обчислень, аналітики великих даних та мобільних мереж. Поява хмарних платформ дозволила масштабувати, зберігати та обробляти величезні обсяги даних, що генеруються взаємопов'язаними пристроями. Водночас розповсюдження смартфонів та впровадження стандарту зв'язку 5G стало величезним поштовхом у підвищенні якості всіх процесів, пов'язаних з передачею даних та перетворили Інтернет речей на повсюдну технологію, що уможливила широкий спектр застосувань - від «розумних міст» та промислової автоматизації до охорони здоров'я.

1.2.4 Застосування Інтернету речей

IoT трансформує різні сектори, від побутових рішень до складних промислових машин. Сучасні IoT системи базуються на хмарних технологіях, що забезпечує масштабованість, економічну ефективність та аналіз даних у реальному часі.

Сфери застосування Інтернету речей:

- Транспорт

У транспортній галузі пристрої Інтернету речей використовують для моніторингу продуктивності транспортних засобів, оптимізації маршрутів і відстеження вантажів. Наприклад, компанія Zubie пропонує GPS в режимі реального часу для відстеження орендних автомобілів, одночасно відстежуючи стан транспортного засобу та продуктивність водія. Якщо водій має звичку різко гальмувати або швидко розганятися, ця інформація може бути використана для відстеження технічного обслуговування та уникнення потенційних аварій, а також для ефективності використання палива. [29]

- Охорона здоров'я

У галузі охорони здоров'я пристрої Інтернету речей використовують для дистанційного моніторингу стану пацієнтів та збору даних про їхні життєво важливі показники, такі як частота серцевих скорочень, артеріальний тиск та насичення киснем, в режимі реального часу. Дані з датчиків можна аналізувати, щоб виявити закономірності та визначити потенційні проблеми зі здоров'ям, перш ніж вони стануть більш серйозними. Прикладом таких IoT-пристроїв є система діагностики серцевої недостатності Endotronix від компанії Cordella. Endotronix об'єднує пацієнтів і лікарів за допомогою проактивного моніторингу, що дозволяє виявляти ознаки серцевої недостатності на ранніх стадіях та підвищити ефективність лікування. [29]

- Промисловість

Промислові пристрої Інтернету речей використовують на виробництві для моніторингу продуктивності машин, виявлення несправностей обладнання та оптимізації виробничих процесів. Такі сенсори використовують для моніторингу температури та вологості у виробничому приміщенні, забезпечуючи оптимальні умови для виробництва чутливої продукції, або для відстеження запасів, управління ланцюгами постачання та контролю якості готової продукції. Прикладом, промислових IoT систем є система моніторингу виробництва Amper, що використовує машинне навчання та IoT датчики для вдосконалення виробничого процесу. Сенсори дозволяють реєструвати

різноманітні фактори, зокрема споживання енергії та час простою, допомагаючи керівникам заводів краще планувати графіки та оптимізувати витрати. [29]

- Торгівля

У сфері торгівлі пристрої Інтернету речей використовуються для відстеження поведінки покупців, моніторингу рівня запасів та ланцюгів постачання, відстеження відправлень та оптимізації планування магазинів. Це дозволяє керівникам торгівельних об'єктів оптимізувати роботу магазину, розміщення товарів та покращити клієнтський досвід. Платформа AMIE від компанії Spectralink є прикладом комплексного рішення для управління роботою персоналу. Вона забезпечує працівників, таких як водії служб доставлення, пристроями та додатками, підключеними, що забезпечує центральне місце для управління розгортанням, аналітикою та діагностикою, а також для сповіщення користувачів про виникнення проблем, що допомагає працівникам покращити обслуговування клієнтів, операційну ефективність, рівень продажі та знання продавців. [29]

- Сільське господарство

Пристрої Інтернету речей використовують в сільському господарстві для моніторингу стану ґрунту, погодних умов та росту сільськогосподарських культур. Датчики можуть використовуватися для вимірювання вологості ґрунту, забезпечуючи зрошення культур в оптимальний час або для моніторингу здоров'я худоби чи стану обладнання. Наприклад, компанія John Deere розробила IoT обладнання, що дозволяє відстежувати важливі сільськогосподарські фактори, такі як рівень вологості, температура повітря та ґрунту, швидкість вітру, і передає зібрані дані фермерам. Трактори та інше обладнання компанії оснащені супутниковими системами навігації та відстеження, які збирають дані, що дозволяють здійснювати «точне землеробство», що значно підвищує ефективність використання добрив та пестицидів. [29]

1.2.5 Проблеми безпеки та конфіденційності IoT

Застосування пристроїв Інтернету речей має багато переваг, в тому числі можливість автоматизації, оптимізації процесів та створення нових сервісів, але водночас підвищує ризики пов'язані з безпекою та конфіденційністю. Проблема безпеки та конфіденційності в IoT охоплює вразливості на рівні пристроїв, мережі та даних.

На рівні IoT-пристроїв основною проблемою є обмеження в обчислювальних ресурсах, що ускладнює впровадження надійних методів шифрування даних. Зокрема:

- IoT-пристрої зазвичай мають обмежені обчислювальні можливості, що ускладнює застосування сучасних алгоритмів шифрування. Це підвищує ризик перехоплення чи модифікації даних під час передачі між пристроями, шлюзами чи хмарою;
- слабкі методи аутентифікації та авторизації у багатьох IoT-пристроях, значно полегшують зловмисникам процес отримання несанкціонованого доступу до системи.

На рівні мережі:

- використання незахищених мережевих інтерфейсів стає легкою точкою входу для зловмисників, оскільки, багато пристроїв Інтернету речей мають підключені до Інтернету через Wi-Fi, Bluetooth або стільниковий зв'язок;
- при розміщенні всіх IoT-пристроїв в єдиній мережі без розподілу на окремі ізольовані сегменти. В результаті, якщо зловмиснику вдасться отримати контроль над одним із пристроїв, він зможе легко отримати переміщатися мережею, та відповідно отримати доступ до інших пристроїв та критично важливих компонентів системи;
- IoT-пристрої можуть бути швидко заражені шкідливим програмним забезпеченням та перетворені на «зомбі», для організації ботнет-атак. Ці атаки можуть призводити до масштабних DDoS-атаки та порушення роботи критичних сервісів.

На рівні даних:

- відсутність ефективних методів анонімізації даних під час аналізу чи обробки інформації, що може призвести до розкриття особистих даних користувачів, оскільки IoT-пристрої можуть збирати чутливі дані, наприклад про стан здоров'я, геопозицію та іншу інформацію;
- відсутність чіткої політики доступу та визначення прав користувачів може створити ситуації, коли користувачі зможуть отримати доступ до даних інших користувачів без їх згоди;
- оскільки IoT-пристрої є частиною взаємопов'язаної мережі, де дані зібрані одним пристроєм можуть передаватися між платформами в разі неналежного захисту, це створює ризики розкрити дані третім особам, включаючи виробників, рекламодавців чи користувачів.

1.3 Застосування хмарних технологій в IoT

1.3.1 Як IoT та хмарні технології працюють разом?

Хмарні технології та IoT працюють разом за допомогою різноманітних мережевих технологій, що дозволяють використовувати переваги один одного та забезпечувати передачу даних від IoT-пристроїв до хмарних платформ та кінцевих користувачів.

Пристрої Інтернету речей збирають дані з навколишнього світу за допомогою сенсорів, які перетворюють фізичні величини на електричний сигнал, що за допомогою АЦП в цифровий код який може бути оброблений та корегуватися мікроконтролером. При використанні крайових обчислень обробка даних відбувається безпосередньо на IoT пристрої, або на периферії мережі, що дозволяє виконувати обробку та фільтрацію даних, знизити затримки та навантаження як на мережу, так і на хмарну інфраструктуру. Після збору та часткової обробки, дані з IoT пристроїв передаються до мережі (шлюзу) через різні мережеві технології та протоколи. На шлюзі відбувається агрегація, фільтрація даних та їх обробка з використанням туманних обчислень (Fog Computing). На етапі передачі даних до мережі, важливо зазначити, що кожен IoT-пристрій має унікальний ідентифікатор. Для пристроїв, безпосередньо підключених до мережі

Інтернет, традиційним ідентифікатором є MAC-адреса мережевого адаптера, що дозволяє ідентифікувати пристрій на каналному рівні, при цьому діапазон доступних адрес є практично необмеженим (248 адрес в просторі MAC-48). Використання протоколу IPv6 дає ширші можливості для ідентифікації пристроїв, а також забезпечує унікальними адресами мережевого рівня, що становить не менше 300 млн пристроїв на одного жителя в світі. Вибір технологій передачі даних від IoT до хмари залежить від початкових потреб, обраних на основі дальності дії, мережевої затримки, енергоспоживання, пропускної здатності та вимог застосунків.

В IoT використовуються 3 основні типи мережі за територією охоплення:

- PAN (Personal Area Network) - персональна мережа, що побудована «навколо» людини та об'єднує всі персональні пристрої користувача, такі як смартфони, ноутбуки та інші.
- LAN (Local Area Network) - локальна мережа, що покриває відносно невелику територію або невелику групу будівель.
- WAN (Wide Area Network) - глобальна мережа, що пов'язує користувачів та мережі на відстані сотень та тисяч кілометрів.

При використанні бездротових мереж малого радіуса дії, тобто Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee чи Z-Wave дані від IoT пристроїв спочатку передаються до IoT-шлюзу, що виконує роль посередника між локальною мережею IoT пристроїв та зовнішньою мережею.

При використанні бездротових мереж великого радіуса дії, комунікація реалізуються з урахуванням можливостей різних стільникових мереж (3G, 4G, 5G), LoRaWAN або мережі позиціонування GPS.

Наступним кроком є вибір IoT протоколу передачі даних до хмари, наприклад HTTP, MQTT, AMQP, CoAP та інші. Забезпечення безпеки передачі даних є критично важливим, і для цього необхідно використовувати різні методи забезпечення безпеки, такі як шифрування (TLS, SSL), аутентифікація та авторизація, брандмауери та VPN.

При надходженні даних отриманих з IoT-пристроїв у хмару, вони можуть лише зберігатися або проходити обробку за допомогою масштабованих

обчислювальних потужностей з використанням різних алгоритмів чи штучного інтелекту. При обробці даних в хмарі, вони спочатку зберігаються та формуються для подальшого аналізу, а потім за допомогою алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту чи Big Data аналітики відбувається їх обробка. На основі результатів аналізу або дій користувачів, можна надсилати команди або інструкцій у зворотному напрямку до IoT пристроїв для виконання певних дій, наприклад, зміни конфігурації або керування їхньою роботою. Для виконання таких дій хмарні платформи забезпечують механізми двостороннього зв'язку з IoT пристроями.

1.3.2 Хмарні платформи для IoT

Хмарна IoT платформа це інфраструктура, яка дозволяє користувачам взаємодіяти з розумними IoT пристроями. Вона діє як проміжне програмне забезпечення між прикладними рівнем та апаратним забезпеченням, та керує всіма взаємодіями між застосунками користувачів і віддаленими пристроями. Хмарна платформа керує потоком даних між IoT застосунками та IoT пристроями, надаючи кінцевим користувачам можливість комунікації з IoT системою.

Хмарні IoT платформи:

Amazon Web Services (AWS) є найбільш комплексною та широко розповсюдженою хмарною платформою у світі, що займає близько 30% світового ринку хмарної інфраструктури та пропонує понад 240 сервісів з центрами обробки даних по всьому світу. [31] Послуги AWS включають програмне забезпечення, управління та аналітику для використання в різних цілях, включаючи промисловість, комерцію та інші.

Приклади сервісів AWS: [32]

- Elastic Compute Cloud (EC2) - це безпечні обчислювальні потужності з можливістю масштабування. Її мета - забезпечити розробникам легкий доступ та зручність використання хмарних обчислень у вебмасштабі, дозволяючи при цьому повністю контролювати свої обчислювальні ресурси.

- AWS IoT Core - надає безпечну та відкриту архітектуру для з'єднання IoT пристроїв з хмарними застосунками та іншими пристроями без обмежень на кількість підключених пристроїв.
- AWS IoT Analytics - повністю керований сервіс, який дозволяє користувачам збирати, обробляти, зберігати та аналізувати великі обсяги даних завдяки вбудованій інтеграції з іншими сервісами, такими як AWS IoT Core та Amazon S3.

Microsoft Azure це загальнодоступна платформа хмарних обчислень, що пропонує широкі можливості, які виходять за рамки спрощення управління інфраструктурою. Завдяки комплексним службам ІІІ, даних та застосунків, які працюють разом, Azure забезпечує уніфікований підхід до хмарних обчислень, який є унікальним у сфері хмарних платформ. Azure надає понад 200 сервісів, розділених на 18 категорій, що включають обчислення, мережі, зберігання, Інтернет речей, міграцію, мобільний зв'язок, аналітику, контейнери, штучний інтелект, машинне навчання, інструменти управління, інструменти для розробників, безпеку, бази даних та вебсервіси.

Приклади сервісів Microsoft Azure: [33]

- Azure Blob Storage – це сервіс, що допомагає створювати так звані «озера даних» для аналітики, а також надає сховище для хмарних та мобільних застосунків, що допомагає оптимізувати витрати з використанням багаторівневого сховища для довготривалого зберігання даних.
- Azure Content Delivery Network призначений для швидкого та надійного надсилання відео, аудіо, програм, фотографій та інших файлів за допомогою серверів, розташованих як найближче до кожного користувача.
- Azure SQL Database – це повністю керований сервіс реляційних баз даних, що створений для хмари Azure, з вбудованими можливостями штучного інтелекту, автоматичного масштабування та резервного копіювання.

Google Cloud Platform - це набір послуг хмарного обчислення, який надає велику кількість модульних хмарних сервісів, включаючи обчислення, зберігання даних, аналіз даних, машинне навчання, а також набір інструментів управління. Платформа складається з безлічі фізичних активів, таких як комп'ютери та жорсткі

диски, і віртуальних ресурсів, таких як віртуальні машини, які розташовані в дата-центрах Google у різних куточках світу. Загалом Google Cloud Platform об'єднує понад 100 різних сервісів, розділених на низку категорій, серед яких штучний інтелект і машинне навчання, управління API, хмарні обчислення, контейнери, аналітика даних, бази даних, інструменти для розробників, охорона здоров'я та медико-біологічні науки, гібридні та мультихмарні технології, Інтернет речей, інструменти управління, мережеві технології, міграція, медіа та ігри, сховища, безпека та інші. [30]

Приклади сервісів Google Cloud: [34]

- Google Cloud IoT Core це повністю керований сервіс, який дозволяє користувачам підключати, керувати та отримувати дані з мільйонів пристроїв Інтернету речей у простий та безпечний спосіб. В поєднанні з іншими сервісами Google Cloud надає комплексне рішення для збору, обробки, аналізу та візуалізації даних Інтернету речей в режимі реального часу, що сприяє підвищенню операційної ефективності, прогнозуванню проблем і побудові складних віртуальних моделей для оптимізації бізнесу та інших цілей.
- Google Assistant Smart Home - це додатковий сервіс на платформи Google Smart Home, що дозволяє користувачам керувати своїми підключеними IoT пристроями за допомогою застосунку Google Home та Google Assistant, які доступні для більш ніж мільярда пристроїв, включаючи смартколонки, телефони, автомобілі, телевізори, навушники, годинники та інші.

1.3.3 Переваги застосування хмарних технологій в IoT

Хмарні технології відіграють ключову роль в IoT, дозволяючи ефективно обробляти та зберігати дані, що надходять від безлічі підключених пристроїв. Серед основних переваг можна виділити: покращену масштабованість, зменшення операційних витрат, спрощене керування пристроями, просунута аналітика даних, резервування та відновлення даних та глобальна доступність. [35]

Масштабованість, яку забезпечують хмарні платформи, дозволяє пристроям Інтернету речей бути простішими та ефективнішими, адже їм не потрібно зберігати дані чи виконувати складний аналіз локально, достатньо лише передавати інформацію до хмари, що відкриває широкі можливості для масштабування системи. Завдяки хмарним обчисленням обробка великих обсягів даних відбувається централізовано, що знімає навантаження з пристроїв і підтримує їхню роботу навіть при значному збільшенні кількості підключень. Гнучкість хмар також дає організаціям змогу легко додавати чи видаляти IoT-пристрої та регулювати обсяг необхідних ресурсів, не переймаючись обмеженнями фізичної інфраструктури, що забезпечує адаптивність до змін навантаження без втрати продуктивності.

Зменшення операційних витрат є суттєвою перевагою впровадження хмарних технологій в IoT, оскільки це дозволяє компаніям уникнути значних інвестиційних вкладень у створення та обслуговування фізичної інфраструктури. Модель «pay-per-usage» (оплати за використання) дозволяє організаціям платити лише за фактично використані ресурси, що знижує витрати та підвищує економічну ефективність. Це особливо важливо для розумних міст, де бюджетні обмеження часто є ключовим фактором.

Спрощене керування пристроями Інтернету речей, за допомогою хмарних платформ дозволяє використовувати централізований підхід для моніторингу, управління та обслуговування великої кількості пристроїв. Це забезпечує віддалений доступ до пристроїв, дозволяючи оновлювати прошивку, програмне забезпечення та усувати неполадки без фізичного втручання. Такий функціонал підвищує операційну гнучкість та скорочує час на підтримку систем.

Просунута аналітика даних набуває критичного значення в умовах масового поширення пристроїв Інтернету речей, які генерують величезні обсяги даних. Використовуючи можливості хмарних технологій, ці дані можна обробляти та аналізувати більш ефективно, зокрема за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання, які допомагають в прогнозованому аналізі, виявленні аномалій, а також керуванні та прийнятті правильних бізнес-рішень.

Резервування та відновлення даних дозволяє покращити безпеку даних, оскільки хмарні платформи зазвичай мають відмінні протоколи резервування та відновлення даних. Резервні копії даних зберігаються в декількох географічно розподілених локаціях, що гарантує їхню доступність навіть у разі збоїв чи втрат.

Глобальна доступність є однією з ключових особливостей хмарних сервісів, що дозволяє керувати IoT-системи з будь-якої точки світу за наявності підключення до Інтернету. Це забезпечує віддалений моніторинг і керування пристроями Інтернету речей, що дає змогу реагувати в режимі реального часу незалежно від географічного розташування.

1.3.4 Складнощі застосування хмарних технологій в IoT

Одним з основних складнощів є забезпечення безпеки та конфіденційності, що також регулюється законодавством. Оскільки при інтеграції хмарних технологій в IoT дані передаються мережею бездротового доступу, це створює додаткові ризики витоку даних, через DDoS або Man-in-the-Middle атаки. Наприклад, організації охорони здоров'я повинні дотримуватися суворих правил щодо конфіденційності та безпеки даних. Для забезпечення відповідності регіональним і міждержавним законам, таким як HIPAA, GDPR та іншим, потрібен надійний підхід для інтеграції периферійних комунікацій і хмарного Інтернету речей, де безпека знаходиться на першому місці.[10] Для розв'язання проблем з безпекою дослідниками було проведено опитування для виявлення загальних проблем безпеки, та в результаті запропоновано моделі алгоритмів для розв'язання цих проблем, що включають методи шифрування, такі як Rivest-Shamir-Adleman (RSA) і Advanced Encryption Standard (AES). [36]

Забезпечення надійної мережі, що здатна передавати великі обсяги даних в реальному часі з мінімальною затримкою є критично важливим аспектом для ефективного функціонування хмарної IoT системи. Оскільки дані та додатки зберігаються в хмарі в різних місцях, віддалених від кінцевого користувача, при передачі, мережа може страждати від перебоїв, недостатнього рівня сигналу або перевантаження, що збільшує ризик затримки або навіть повного відключення.

Для мінімізації ризиків пов'язаних з мережею необхідно використовувати периферійні обчислення. Інтеграція периферійних обчислень з хмарним Інтернетом речей дозволяє зменшити затримки передачі даних, а також мінімізувати затримки мережі, що особливо важливо в чутливих до часу випадках, таких як віддалений моніторинг пацієнтів або передача даних з медичних пристроїв, де навіть мілісекунди можуть мати велике значення.

Складність інтеграції хмарних технологій в IoT також значно ускладнює перехід до хмар, оскільки це потребує підключення до хмарної платформи безлічі пристроїв, кожен з яких має унікальне апаратне забезпечення, прошивку та протоколи зв'язку, що також вимагає складного проміжного програмного забезпечення та розробки системної архітектури. Це призводить до тривалого часу розгортання та підвищує ризик неполадок. Забезпечення сумісності систем, також значною мірою ускладнює цей процес, через величезну кількість пристроїв і технологій, які є частиною IoT. Сумісність систем у хмарі дозволяє користувачам використовувати одні й ті ж технології, сервери та інші додатки в декількох постачальників хмарних послуг та на різних платформах.

Перехід до хмари та використання хмарних технологій для IoT пристроїв потребує значних початкових витрат, що робить перехід досить дорогим. Особливо це стосується великих організацій, які часто потребують відокремленого дата-центру, що забезпечує високий рівень безпеки та конфіденційності для роботи з чутливою інформацією. На подальших етапах впровадження поточні витрати зазвичай зменшуються, оскільки хмарні рішення дозволяють оптимізувати використання ресурсів та знижувати експлуатаційні витрати. Однак високі початкові інвестиції можуть стати бар'єром для переходу до хмарних технологій, особливо для малих та середніх підприємств, що обмежені фінансовими ресурсами.

Значними складнощами може стати необхідність навчання або найму кваліфікованих фахівців, що часто є дорогим та займає багато часу, що також створює бар'єр для багатьох організацій. Саме працівники є ключовими в успішній роботі системи, та відповідають за проєктування, створення та обслуговування хмарної IoT системи, тому нестача кваліфікованих кадрів може затримати

впровадження, збільшити залежність від інших постачальників та поставити під загрозу працездатність та ефективність системи.

1.4 Висновки з розділу 1

В першому розділі було детально розглянуто хмарні технології та концепцію Інтернету речей, їх інтеграцію, переваги та недоліки, історію розвитку, семирівневу архітектуру, моделі розгортання (публічна, приватна, гібридна, мільтихмара), а також типи хмарних сервісів (IaaS, PaaS, SaaS). Це дозволило визначити хмарні технології, як фундаментальну інфраструктуру для підвищення ефективності використання пристроїв Інтернету речей.

Ключовою частиною даного розділу було дослідження інтеграції хмарних технологій в Інтернеті речей. Було розглянуто принцип їх спільної роботи, який показав, що хмарні технології забезпечували зберігання, обробку та аналіз даних, згенерованих IoT пристроями. Було визначено переваги та складнощі інтеграції, а також розглянуто основні платформи Інтернету речей, такі як AWS IoT, Microsoft Azure IoT, Google Cloud IoT та їх основні сервіси.

2 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІОТ

2.1 Тенденції розвитку та інновації

Штучний інтелект і машинне навчання вважаються одними з найпопулярніших тенденцій хмарних обчислень. Світовий ринок хмарного ШІ для ІоТ оцінюється в 87,51 млрд доларів США на 2024 рік, що за прогнозами, збільшиться до 93,12 мільярда доларів США у 2025 році, а у 2034 році до приблизно 161,93 мільярда доларів США, розширюючись на 6,35% в середньорічному обчисленні в період з 2025 по 2034 рік. [61] З розвитком цих технологій, що існують вже кілька десятиліть, але лише нещодавно отримали підтримку високопродуктивних обчислень, організації отримали змогу легше обробляти величезні масиви даних та навчати складні моделі ШІ та МН. Машинне навчання дозволяє комп'ютерам та пристроям Інтернету речей навчатися на основі даних, зокрема від ІоТ-пристроїв, виявляти закономірності та прогнозування події. Використання цих технологій у хмарі дозволяє організаціям швидко отримувати цінну інформацію зі зібраних даних, автоматизувати процеси та скоротити час, на прийняття важливих рішень. Крім того, це відкриває нові хмарні інновації, зокрема персоналізацію хмарних послуг, підвищення безпеки даних та самоавтоматизація, яка дозволяє повністю передати управління комп'ютером до ШІ.

Впровадження розподілених моделей обчислення, таких як Edge та Fog computing в сучасних ІоТ системах стає все більше необхідним зі збільшенням обсягів генерації даних та підвищенню вимог до мережевої затримки. Ця тенденція передбачає інтеграцію систем обробки даних ближче до джерела, тобто ІоТ-пристрою, що є ключовим для економічно вигідного та ефективного функціонування систем, забезпечуючи високу пропускну здатність та низьку затримку в реальному часі. Світовий ринок граничних обчислень оцінюється в 18.02 млрд доларів США на 2025 рік і очікується, що досягне 37,2 млрд доларів США до 2030 року при середньорічному темпі зростання 15,6% протягом прогнозованого періоду 2025 - 2030 років. [62]

Розвиток бездротових мережевих технологій, таких як 5G, Wi-Fi 6, LPWAN є одними з ключових інновацій для досягнення ефективної передачі даних, шляхом підвищення пропускної здатності та зменшення затримки для стрімко зростаючої кількості IoT-пристроїв. Впровадження мереж 5G дозволяє значно підвищити швидкість отримання даних від IoT-пристроїв, а також управляти ними в реальному часі з мінімальними затримками. Це особливо актуально в автоматизації та роботизації для наближення епохи автономного транспорту, який дозволить об'єднаним автомобілям обмінюватися даними між один одним та світлофорами у реальному часі, що значно підвищить надійність систем та знизить аварійність на дорогах. Світовий ринок мережі 5G в IoT оцінюється в 7.78 млрд доларів США на 2024 рік. На 2025 рік прогнозується зріст до 11,69 млрд доларів США, а до 2034 року, за прогнозами, перевищить 455,67 млрд доларів США, що свідчить про здоровий середньорічний темп приросту на рівні 50,23% у період з 2024 по 2034 рік. [63]

Serverless computing (Безсерверні обчислення) набувають все більшої популярності, оскільки вони забезпечують автоматичне виділення ресурсів залежно від завдань, полегшуючи розробникам процес створення та запуску застосунків, позбавляючи необхідності управляти серверною інфраструктурою. В цій моделі провайдери хмарних послуг займаються забезпеченням, обслуговуванням та масштабуванням серверів, що дає можливість розробникам зосередитися виключно на розробці та розгортанні програм. Світовий ринок безсерверних обчислень оцінюється у 24.51 млрд доларів на 2025 рік, що за прогнозами зростатиме на 14,1% щороку з 2025 по 2030 рік. [64]

Безпека хмарних технологій стрімко розвивається завдяки технологічним прогресом. Одним з найбільших проривів у сфері безпеки став штучний інтелект та машинне навчання. Ці технології дозволяють аналізувати величезні обсяги даних для виявлення потенційних загроз у режимі реального часу. ШІ допомагає розпізнавати незвичайні моделі поведінки та попереджує команду безпеки про можливі порушення, що дозволяє швидше реагувати на них. Крім того, все більшої популярності набуває модель нульовою довірою, яка означає, що нікому не можна довіряти, поки не буде доведено протилежне. На відміну від традиційних методів

забезпечення безпеки, де користувачі всередині мережі мають довіру, нульова довіра передбачає перевірку кожного користувача, пристрою або програми перед тим, як надати доступ. Впровадження цієї моделі допомагає знизити ризики як від внутрішніх, так і від зовнішніх загроз, а також підвищити загальний рівень безпеки в хмарному середовищі.

Інтеграція блокчейну та хмарних технологій дозволяє створити розподілений реєстр, що забезпечує цілісність даних, копіюючи їх на різні вузли мережі. При передачі даних від IoT-пристроїв до мережі блокчейн створюються захищені від підробки записи спільних транзакцій, якими можна ділитися з іншими користувачами без необхідності централізованого контролю та управління. Кожен блок має унікальний криптографічний хеш для створення ланцюжка блоків, пов'язаних між собою, який гарантує, що ніхто не зможе змінити дані. Кожна транзакція в блоці може бути перевірена. [65]

Квантові обчислення - це одна з найбільш очікуваних та найперспективніших інновацій, яка все ще знаходиться на етапі створення. З розвитком хмарні квантові обчислення дозволять надавати віддалений доступ до ресурсів та обладнання для квантових обчислень (Quantum as a service). [66] Поєднання квантових надпотужних обчислень з можливостями хмарних платформ відкриває шлях до революційних змін, зокрема і для Інтернету речей. Крім того, підвищить рівень безпеки та конфіденційності, оптимізує процес, зокрема розробки IoT та хмарних застосунків, а також полегшить обробку та аналіз величезних обсягів даних з використанням різноманітних квантових алгоритмів в реальному часі.

2.2 Виклики та методи їх вирішення

Безпека

Безпека даних від Інтернету речей потребує захисних заходів та протоколів, для захисту підключених пристроїв та мереж в екосистемі Інтернету речей. Ці заходи допомагають запобігти несанкціонованому доступу, витоку даних та атакам на системи, які підключають пристрої Інтернету речей, такі як датчики,

прилади та інші гаджети, до Інтернету. Ефективна стратегія безпеки Інтернету речей охоплює кілька рівнів, включаючи безпеку фізичних пристроїв, мережі, застосунків та даних, що обробляються або зберігаються цими пристроями.

Для покращення безпеки необхідно:

- використовувати передові методи шифрування даних, такі як AES-256 для зберігання даних, та TLS для передачі даних. Шифрування діє як критичний бар'єр, роблячи дані нерозбірливими для сторонніх осіб, навіть якщо їм вдасться їх перехопити. Для мінімізації ризику перехоплення або несанкціонованого втручання варто використовувати наскрізне шифрування E2EE, що шифрує дані від точки відправлення до кінцевого пункту призначення.
- впроваджувати методи автентифікації та контроль доступу, що гарантують, що лише авторизовані суб'єкти можуть отримати доступ до системних ресурсів та даних. Завдяки розгортанню методів багатофакторної автентифікації, таких як MFA, системи вимагають від користувачів пройти кілька форм перевірки перед отриманням доступу, що дозволяє значно знизити ризики несанкціонованого входу, оскільки отримання одного фактору, наприклад, пароля недостатньо для злому системи.
- використовувати безпечний дизайн, що включає надійні протоколи автентифікації та шифрування для API, що слугують шлюзами для обміну даними. Для авторизації рекомендовано використання HTTPS та OAuth 2.0, які гарантують, що дані, при передачі через API, будуть зашифровані та доступні лише авторизованим користувачам.
- використовувати просунуті методи безпеки мережі, такі як IDPS, що дозволяють виявляти та запобігати вторгненням, здійснюючи моніторинг та аналіз мережевого трафіку в режимі реального часу.

З'єднання та покриття

Забезпечення надійного та стабільного зв'язку є важливим аспектом успішного функціонування хмарної IoT системи. Це особливо важливо у віддалених або важкодоступних місцях. Значна кількість пристроїв Інтернету речей працює в місцях, де традиційні варіанти підключення, такі як Wi-Fi або стільникові мережі, або недоступні, або ненадійні. Відсутність стабільного

з'єднання перешкоджає передачі даних, значно погіршуючи стабільність системи та призводячи до затримок, прогалин у моніторингу та потенційних збоїв у роботі системи.

Для розв'язання цієї проблеми важливо використовувати правильні технології, що відповідають конкретним потребам бізнесу.

- технології LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), наприклад, LoRaWAN або Sigfox, найкраще використовувати для випадків, які потребують низької пропускної здатності та працюють у віддалених місцях. Ці мережі є енергоефективними, що робить їх придатними для пристроїв з живленням від батареї, таких як датчики навколишнього середовища або сільськогосподарські монітори;

- супутникові мережі забезпечують глобальне покриття, що робить їх незамінними для пристроїв, які працюють у надзвичайно віддалених районах, таких як морські нафтові вежі або морська логістика. Хоча супутниковий зв'язок коштує значно дорожче, його глобальне покриття не має конкурентів, забезпечуючи надійний зв'язок там.

Стандартизація та взаємосумісність

Нестача стандартизованих рішень, несумісність протоколів, форматів даних та API різних виробників створює виклики безперешкодній інтеграції, збільшуючи складність та витрати.

Для розв'язання цих проблем розробникам необхідно:

- використовувати IoT платформи, такі як OpenIoT, ThingSpeak або Eclipse IoT, що працюються на основі відкритого коду, а також пропонують гнучкі, стандартизовані рішення та інструменти для зв'язку між пристроями Інтернету речей, обробки даних та інтеграції;

- використовувати фреймворки для спільної роботи, такі як Open Connectivity Foundation або стандарти, такі як MQTT або CoAP, що допомагають покращити уніфікацію в розробці IoT застосунків;

- дотримуватися загальних API структур, які спростять обмін даними між IoT пристроями та їх обробку, а також інтеграцію з іншими рішеннями;

- створювати універсальні міжнародні стандарти, шляхом співпраці з іншими розробниками, в тому числі з інших країн, що допоможе забезпечити узгодженість між пристроями та платформами.

Мережеві затримки

Мережеві затримки при передачі даних між IoT пристроями або до хмари є суттєвою проблемою при інтеграції Інтернету речей та хмарних обчислень. Проблеми затримок можуть виникати, коли до мережі підключена велика кількість IoT пристроїв, які генерують великі обсяги даних. Хоча сервіси для хмарних обчислень дозволяють покращити швидкість обробки та зберігання даних, однак якщо хмарний сервер розташований на великій відстані від IoT пристрою це може значно погіршувати затримку в мережі. Проблеми затримок можна вирішити за допомогою периферійних обчислень (Edge computing) або туманних обчислень (Fog computing) які обробляють дані поблизу або безпосередньо на самому пристрою Інтернету речей.

2.3 Висновки з розділу 2

У другому розділі було розглянуто перспективи розвитку хмарних технологій в Інтернеті речей, зокрема ключові тенденції та інновації, а також виклики та методи їх вирішення. Аналіз тенденцій та інновацій показав значне зростання об'ємів ринку для більшості технологій, а також збільшення ефективності функціонування системи при їх впровадженні. Ринок хмарного III демонструє зростання до 161,93 млрд доларів США до 2034 року. Граничні та туманні обчислення допомагають знизити мережеві затримки та підвищити ефективність обробки даних. Впровадження мереж 5G, Wi-Fi 6, LPWAN та супутникових технологій дозволяє значно підвищити пропускну здатність та забезпечити надійне підключення для віддалених місць, що є критично важливим для автономних систем. Впровадження безсерверних обчислень допомагає спростити розробку застосунків та прискорити їх вихід на ринок. Впровадження штучного інтелекту, моделей нульової довіри та блокчейн технологій допомагає значно покращити безпеку даних. Квантові обчислення є перспективною

технологією, що обіцяє революційні зміни в обробці даних та покращення безпеки, зокрема для хмарних IoT систем.

Серед основних викликів було розглянуто питання безпеки, надійного з'єднання та покриття, стандартизації та взаємосумісності, а також мережеві затримки. Було визначено ефективне рішення для подолання цих проблем шляхом використання сучасних протоколів захисту та шифрування, таких як AES-256 та TLS, E2EE, багатофакторної автентифікації, наприклад, MFA, відкритих стандартів, систем виявлення вторгнень, наприклад, IDPS та інтеграції технологій локальної обробки даних для мінімізації мережевої затримки, таких як граничні та туманні обчислення.

3 АНАЛІЗ ПРИКЛАДІВ ЗАСТОСУВАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ІОТ

3.1 Вибір технології для обробки IoT-трафіку та їх економічна оцінка

Економічна та технічна ефективність IoT-системи залежить від правильного вибору архітектури для обробки, зберігання та аналізу даних. Вибір між технологіями: Edge computing (для обробки даних на рівні пристрою), Fog computing (для обробки даних на рівні шлюзу), Cloud computing (для обробки даних в хмарі) залежить від типу трафіку, зокрема вимог до затримки, пропускної здатності, масштабованості і обсягу оброблюваної інформації.

Порівняння цих технологій наведено у таблиці 1, де визначено їх основні характеристики за критеріями пропускної здатності, затримки, масштабованості, обробки даних, мережевої залежності, безпеки та складності впровадження. [53] [54] [55] [57]

Таблиця 3.1 - Порівняння технологій обробки даних для IoT

Критерії	Edge computing	Fog computing	Cloud computing
Пропускна здатність	Низька, оскільки більшість даних обробляється локально. (дозволяє значно зменшити обсяг даних, що передаються)	Середня (дані передаються між пристроями, Fog-вузлами та хмарою, що також дозволяє оптимізувати трафік)	Висока (залежить від обсягу даних, оскільки потребує передачі великих обсягів даних до віддалених серверів)
Затримка	Дуже низька (мілісекунди, обробка відбувається на пристрої)	Низька (десятки мілісекунд, обробка відбувається ближче до пристроїв, на рівні мережі)	Висока (сотні мілісекунд, обробка відбувається на великій відстані від IoT-пристрою)

Продовження таблиці 3.1

Масштабованість	Низька (залежить від апаратного забезпечення)	Масштабованість в рамках мережі, що дозволяє додавати Fog-вузли	Віртуально необмежене масштабування
Обробка даних	Відбувається безпосередньо на локальних пристроях, забезпечує обробку в реальному часі	Використовується в локальній мережі, на маршрутизаторах, для більшої обробки ніж на рівні пристроїв	Використовує датацентри для обробки даних та BigData аналітики.
Мережева залежність	Низька (призначений для роботи незалежно від мережі)	Середня (краще обробляє непостійне підключення, ніж Cloud)	Висока (сильно залежить від стабільного підключення до Інтернету)
Безпека	Середня (локальна обробка знижує ризик перехоплення даних, але пристрої можуть бути вразливими до фізичних атак)	Середня (Fog-вузли додають шар захисту, але потребують безпечної інтеграції з хмарою)	Залежить від методів шифрування, оскільки існує ризик витоку даних через передачу)
Складність впровадження	Висока (потребує налаштування локального обладнання та програмного забезпечення для кожного пристрою)	Середня (вимагає інтеграції Fog-вузлів із пристроями та хмарою, що спрощує розгортання порівняно з Edge)	Низька (хмарні платформи дозволяють значно спростити розгортання)

Для правильного вибору технологій, також необхідно враховувати типи даних, що генерують IoT-пристрої. Вони генерують та передають різні дані, від простих числових значень до великих обсягів мультимедійної інформації.

Класифікація даних важлива для правильного вибору технології обробки, та визначенню що буде більш доцільніше, обробляти дані на пристрої, передавати на Fog-вузол або у хмару. Класифікація типів даних IoT-пристроїв: [50] [52]

- Дані сенсорів (температура, вологість, тиск) зазвичай формують невеликі структуровані набори значень, до 1 МБ в день.
- Дані подій це сповіщення про події, тобто тривоги, стан пристроїв, що генеруються у випадку нестандартних умов.
- Дані прискорення та геопозиції, такі як акселерометри, гіроскопи або GPS у носимих пристроях генерують потоки даних про рух та місцезнаходження, звичайні GPS трекери, генерують близько 60 МБ на місяць. [58]
- Мультимедіа, зображення або відео з IoT-камер, що створюють великі обсяги даних та вимагають високої пропускної здатності. Камера відеоспостереження якістю 1080p з частотою кадрів 15, генерує 6-10 гігабайт в день, а при розширенні 4K близько 50-100 гігабайт. [59]
- Логи, журнали роботи пристроїв, що передаються з заданою частотою, наприклад, статистика або діагностика.
- Керуючі команди, команди з хмари до пристроїв, такі як оновлення ПЗ, сигнали управління ті інші невеликі повідомлення.
- Дуже критичні до часу дані, наприклад в системах контролю польотів, сфері охорони здоров'я, та інших напрямках, де необхідна дуже низька затримка, тобто обробка даних на пристрої, або близько до нього. Автономні транспортні засоби генерують 1 ГБ інформації в секунду, а літак Boeing 787 - 5 ГБ в секунду. [51]

Тип даних і вимоги до них визначають підхід до їх обробки. Якщо дані критично чутливі до затримки, тобто необхідна дуже швидка реакція на події, наприклад для розумних автомобілів, систем керування польотом або сфери охорони здоров'я, то їх опрацьовують ближче до пристрою, за допомогою Edge або Fog computing, що дозволяє мінімізувати час передачі. Для таких випадків важлива швидкий локальний аналіз та відповідна дія. Для великих даних, що не мають жорстких вимог до затримки, наприклад агрегація даних ефективніше використовувати Cloud computing, що має необхідну обчислювальну потужність та сховище.

Методика вибору технології залежить від:

- Вимог до затримки, при необхідності обробки даних в реальному часі з мінімальними затримками необхідно використовувати – Edge/Fog.
- Обсягу даних, що генерується, при дуже великих потокових даних (відео, аналітика), необхідно виконати попередню обробку на вузлі Fog, а потім передавати до хмари, при невеликих об'ємах даних можна відправляти безпосередньо до хмари.
- Пропускної здатності, при обмеженій пропускній здатності необхідно фільтрувати дані на рівні Edge/Fog, щоб зменшити об'єм трафік, а лише потім передавати у хмару.

Отже, вибір технології є індивідуальним залежно від характеру даних. На практиці зазвичай застосовується комбінований підхід, тобто критичні до часу та об'ємні дані обробляються на рівні пристроїв/мережі, тобто Edge/Fog, а результати або вибірккові дані надсилаються до хмари для детального аналізу або зберігання.

Основні витрати для кожної технології:

Edge computing передбачає обробку даних безпосередньо на IoT-пристрої, що вимагає початкових інвестицій у обладнання, але знижує операційні витрати. Капітальні витрати на обладнання включають покупку сенсорів, шлюзів, промислових комп'ютерів або серверів для обробки на краю. Операційні витрати включають електропостачання, обслуговування обладнання та оновлення програмного забезпечення.

Fog computing передбачає обробку даних на проміжних вузлах між IoT-пристроями та хмарою, що також вимагає початкових інвестицій у обладнання та забезпечує баланс між локальною обробкою і хмарною обробкою, знижуючи операційні витрати порівняно з хмарою. Капітальні витрати на обладнання включають покупку серверів, мережевого обладнання та модулів зв'язку. Операційні витрати включають електропостачання, обслуговування обладнання та оновлення програмного забезпечення.

Cloud computing передбачає обробку даних на віддалених серверах хмарних провайдерів, що мінімізує початкові інвестиції в обладнання, але значно підвищує операційні витрати через регулярні платежі за сервіси. Капітальні витрати

мінімальні, на інтеграцію та налаштування системи. Операційні витрати включають оренду серверів, хмарну обробку, аналіз, зберігання та передачу даних.

Для економічної оцінки впровадження різних технологій обробки даних в IoT-системі відеоспостереження можна виконати спрощений розрахунок витрат моніторингу автомобільного трафіку. Розрахунок проводиться для двох сценаріїв: при використанні 10 та 100 IoT-пристроїв. Цей підхід дозволяє на практиці побачити, як змінюються капітальні та операційні витрати, враховуючи обсяг даних, кількість пристроїв та вимоги до швидкості обробки інформації в залежності від масштабу системи та обраної архітектури обробки даних.

У розрахунку враховуються основні витрат, зокрема вартість обладнання для обробки даних (локального, проміжного або віддаленого), витрати на передачу трафіку, оренду хмарних сервісів та обслуговування інфраструктури. Для перерахунку цін з доларів США на гривні було використано обмінний курс 41,76 грн за 1 долар США, для євро – 47,31 грн за 1 євро.

Основним та спільним для всіх технологій компонентом є IoT-пристрій, що буде здійснювати збір даних. Для цього було обрано IP-відеокамеру Hikvision DS-2CD2T46G2-ISU/SL, що здатна записувати високоякісне зображення з роздільною здатністю 4 мегапікселі (2688x1520 пікселів) при 25 кадрах на секунду, що дозволяє отримувати детальне зображення. Ціна відеокамери становить 7704 гривні. [49]

За допомогою сервісу Westerndigital було виконано розрахунок кількості даних, які відеокамера створює протягом 24 годин, що становить 98 ГБ. [48]

При використанні Edge computing обробка даних здійснюється безпосередньо на IoT-камері або поблизу, для цього було обрано Jetson Orin Nano 8GB вартістю 249 доларів США, або близько 10 398 гривень. Цей мінікомп'ютер дозволить ефективно обробляти відеопотік в реальному часі за допомогою алгоритмів обробки зображень та відео, таких як виявлення руху або системи візуального моніторингу. Для зберігання зібраних даних протягом 24 годин було обрано сховище типу microSD, виробника Kingston об'ємом 256 гігабайт, що коштує 950 гривень. Загальна вартість обладнання для одного IoT-пристрою складатиме:

$$7704 + 950 + 10\,398 = 19\,052 \text{ грн}$$

Також варто врахувати витрати на обслуговування в 10% на рік: 1905 грн.

При використанні Fog computing обробка даних здійснюється на Fog-вузлах між IoT-пристроєм та хмарою. Для обробки даних від IoT-пристрою на Fog-вузлі та його обслуговування. Було обрано Jetson AGX Orin 64GB Developer Kit, що зможе обробляти дані з 16 IoT-відеокамер та має компактний розмір, велику кількість роз'ємів та продуктивність ШІ до 275 TOPS (Trillion Operations Per Second) для створення прототипів передових роботів та інших автономних машин зі штучним інтелектом. Ціна такого комп'ютера з AI можливостями становить 1999 доларів США, або близько 83 478 гривень.

Також варто врахувати витрати на обслуговування в 10% на рік: 8347 грн.

При використанні Cloud computing для обробки даних на віддаленій хмарній платформі, системи моніторингу трафіку, дані зазвичай передаються за допомогою кабельного підключення до локальних комутаторів або шлюзів, розташованих поблизу, з подальшою передачею до хмари. Основними витратами є передача даних від IoT-пристрою до хмари, оренда необхідних хмарних сервісів для обробки, аналізу та зберігання даних.

При передачі даних від IoT-пристрою до хмари необхідна підписка на інтернет провайдера, що зможе забезпечити передачу даних 3 ТБ даних в місяць, при швидкості передачі 1 мегабайт на секунду. Враховуючи початкові умови було обрано пакет вартістю 44 євро на місяць, або близько 2081 гривень, що відповідає заданим умовам. [60] На рік для однієї IoT-камери це буде коштувати:

$$2081 * 12 = 24\,972 \text{ грн}$$

Обробка та аналіз даних від IoT-пристрою буде здійснюватися за допомогою хмарної платформи Google Cloud Platform (CGP). Для розрахунку витрат було використано калькулятор Compute Engine [56], який дозволяє розрахувати вартість використання віртуальних машин із заданими параметрами. При роботі 720 годин на місяць, для 10 IoT відеокамер було обрано:

- 16 віртуальних ядер CPU,
- 32 ГБ оперативної пам'яті,
- 1 графічний процесор NVIDIA T4,

- 1 віртуальна машина.

Щомісячна вартість цієї конфігурації 467.09 доларів США, або близько 19 505 гривень, що на рік становить 234 060 гривень.

Для 100 IoT-відеокамер було обрано:

- 32 віртуальних ядра CPU,
- 120 ГБ оперативної пам'яті,
- 2 графічних процесора NVIDIA T4,
- 3 віртуальні машини.

На місяць така конфігурація коштує 3063.66 доларів США, або близько 127 939 гривень, що на рік становить 1 535 268.

Зберігання даних від IoT-пристрою за допомогою сервісу Google Cloud Platform (GCP) коштує 0.023 доларів США за 1 ГБ на місяць, при умові стандартного зберігання. [47] Враховуючи, що одна камера генерує 98 ГБ даних за 24 години, які мають бути збережені ще протягом як мінімум одного дня, на рік це буде коштувати:

$$0.023 * 98 * 12 = 27.048 \text{ доларів США, або близько 1129 гривень}$$

Таблиця 3.2 - Порівняння витрат на обробку даних для різних технологій, за 1 рік

10 IoT-пристроїв	Edge	Fog	Cloud
Капітальні витрати, грн	190 520	160 518	77 040
Операційні витрати, грн	19 052	16 051	495 070
100 IoT-пристроїв			
Капітальні витрати, грн	1 905 200	1 354 746	770 400
Операційні витрати, грн	190 520	135 474	4 145 368

Таблиця 3.3 - Порівняння витрат на обробку даних при комбінуванні технологій, за 1 рік

10 IoT-пристроїв	Edge	Fog	Cloud	Загальні витрати
Капітальні витрати, грн	77 040	83 478	0	160 518
Операційні витрати, грн	7704	8347	11 290	27 341
100 IoT-пристроїв				
Капітальні витрати, грн	770 400	584 346	0	1 354 746
Операційні витрати, грн	77 040	58 434	112 900	248 374

Аналіз трьох технологій обробки даних від IoT-пристроїв показав, що вибір оптимальної технології залежить від типу даних, вимог до затримки, обсягів генерації даних і масштабу системи. Розрахунок витрат підтвердив, що при зростанні кількості пристроїв та об'ємів генерації даних найкраще використовувати комбінований підхід, тобто Edge, Fog і Cloud для оптимізації вартості та підвищення продуктивності системи.

3.2 Приклади реального застосування

3.2.1 Розумні міста

Розумні міста є однією з ключових сфер застосування хмарних технологій в IoT, що революціонізує взаємодію з міським середовищем, автоматизуючи та покращуючи функціонування міської інфраструктури. Хмарні IoT-системи збирають, зберігають та обробляють дані в реальному часі з різноманітних датчиків, систем відеоспостереження, датчиків якості повітря, транспортних систем та енергомереж з різних точок міста, та передаються до хмарних платформ, що забезпечують зберігання, аналіз, та можливість оперативно приймати рішення керівництвом міста або повідомляти служби реагування.

Управління освітленням є одним з поширених застосувань Інтернету речей для розумних міст, що дозволяє ефективно управляти ресурсами, знизити витрати на електроенергію та підтримувати сталий розвиток. Наприклад, вуличні ліхтарі з підтримкою Інтернету речей можуть регулювати яскравість освітлення залежно

від кількості пішоходів, а хмарні системи дозволяють відстежувати використання енергії по всьому місту.

Громадська транспортна інфраструктура є важливою частиною розумного міста, що швидко розвивається. Застосування хмарних IoT-технологій дозволяє відстежувати громадський та приватний транспорт. Моніторинг транспортних засобів охоплює стан двигуна, витік газу або палива, коливання температури, виявлення пожежі та моніторинг швидкості. Відстеження в реальному часі охоплює визначення геопозиції і положення транспортних засобів, стан доріг, моніторинг поведінки та навичок водія.

Управління водопостачанням та газопостачанням у розумному місті є однією з життєво важливих послуг на рівні з управлінням електроенергією та енергопостачанням. Такі системи за допомогою вбудованих датчиків Інтернету речей забезпечують двосторонній зв'язок між постачальником та споживачами. Інформація про потреби будь-якої ділянки, будинку, будівлі та міста в режимі реального часу може оброблятися пристроями Інтернету речей. У розумному будинку втрати води або газу зменшуються шляхом автоматичного контролю та закриття клапанів плити та обігрівачів.

Забезпечення безпечного міського середовища є важливою складовою розумних міст. Хмарні IoT технології допомагають запобігти злочинам та прискорити реагування на надзвичайні ситуації, що дозволяє створити безпечніші вулиці для мешканців. За допомогою пристроїв Інтернету речей та даних, які вони збирають, розумні міста можуть проводити моніторинг за районами, розробляти алгоритми, які виявляють незвичну активність, та негайно повідомляти про це відповідні служби.

Моніторинг дорожнього руху та управління перехрестями дозволяє покращити транспортну мережу, оптимізувати транспортні потоки, зменшити затори та підвищити безпеку дорожнього руху. За допомогою датчиків та відеокамер Інтернету речей встановлених на світлофорах, дорогах і транспортних засобах, дані збираються та передаються в хмару, де вони обробляються для оптимізації роботи світлофорів, прогнозування часу пікових заторів та генерування альтернативних маршрутів для водіїв. Хмарні системи управління

дорожнім рухом допомагають зменшити затори, скоротити час у дорозі та покращити якість повітря, шляхом зменшення викидів CO₂.

3.2.2 Промисловість

Промисловий Інтернет речей (IIoT) це об'єднані інтелектуальні пристрої, які застосовуються в сферах виробництва (Індустрія 4.0), логістики, нафтогазової галузі, енергетики та інших напрямків. IIoT об'єднує людей, продукти та процеси для забезпечення цифрової трансформації. Це дозволяє компаніям отримувати довгострокову вигоду від своїх операцій, зменшити залучення людей, відходи, підвищити ефективність, гнучкість та продуктивності промислових процесів.

За допомогою промислового IIoT компанії можуть оцифровувати процеси, трансформувати бізнес-моделі та підвищувати ефективність та продуктивність, зменшуючи при цьому кількість відходів. На промислових об'єктах зазвичай встановлені тисячі датчиків, які генерують дані. За допомогою IIoT виробники можуть об'єднувати дані машин з однієї лінії, заводу або мережі об'єктів, такі як виробничі підприємства, складальні цехи та нафтопереробні заводи, щоб проактивно підвищувати продуктивність, виявляючи та усувати потенційні вузькі місця, збої, прогалини у виробничих процесах та проблеми з якістю до того, як вони трапляться.

Основні напрямки застосування IIoT: [40] [41]

Прогнозна аналітика якості (Predictive Quality) дозволяє оптимізувати якість продукції за допомогою контролю виробничих процесів в режимі реального часу, виявленні аномалії та передачі інформації для своєчасного усунення недоліків, отримуючи дані про стан промислових машин, умови навколишнього середовища та спостереження робітників.

Моніторинг стану об'єктів (Asset Condition Monitoring) фіксує стан машин та обладнання для визначення їх продуктивності. Це дозволяє збирати всі дані IIoT-пристроїв, такі як температура, вібрація та коди помилок, які показують, чи працює обладнання оптимально та максимізувати використання об'єктів на виробництві.

Прогнозоване обслуговування (Predictive Maintenance) в реальному часі пристроїв Інтернету речей, дозволяють виробництву, ланцюжкам поставок, заводам та іншим підприємствам відстежувати стан обладнання, запобігати перебоям, виявляти неефективність, а також прогнозувати та усувати ризики.

Промислова автоматизація (Industrial automation) один з ключових напрямків, що дозволяє за допомогою використання цифрового логічного програмування та механізованого обладнання для управління машинами автоматизувати виробництво та мінімізувати необхідність втручання людини у прийняття рішень.

Об'єднані транспортні засоби (Connected vehicles) дозволяють відстежувати температуру, тиск, вологість та інші параметри всередині транспортних засобів, які перевозять вантажі, а також контролювати та автоматично запускати регулювання умов, щоб захистити цілісність вантажу.

Аналітика даних (Data analytics) дозволяє виявляти аномалії в роботі обладнання та складні закономірності для прогнозування проблем і запобігання їхньому розвитку. Фокусується на безперервному зборі даних відповідно до встановлених критеріїв, наприклад, якості кінцевого продукту, роботи обладнання, споживання енергії та інших необхідних вам показників.

Harley Davidson, що виробляє мотоцикли є прикладом ефективного застосування промислового IoT для трансформації традиційного виробництва в сучасну, гнучку систему. Для вирішення проблем повільної реакції на запити споживачів в умовах високої конкуренції й обмеженої можливості кастомізації, компанія провела масштабну реконструкцію своїх виробничих майданчиків у період з 2009 по 2011 рік. В результаті було створено єдиний складальний майданчик, що випускає мотоцикли всіх п'яти моделей з можливістю їх кастомізації, при цьому замовнику пропонується вибір з понад 1300 варіантів. Було використано, датчики, керовані системою класу MES, де кожен верстат та деталь мають унікальну радіомітку, яка ідентифікує виріб та його виробничий маршрут. Зібрані з датчиків дані надходять до платформи обробки даних, яка об'єднує дані як з внутрішніх виробничих і бізнес-систем компанії, так і з інформаційних систем її партнерів.

Це дозволило компанії Harley Davidson: [42]

- скоротити виробничий цикл з 21 дня до 6 годин (кожні 89 секунд з конвеєра сходять мотоцикл, повністю налаштований під свого майбутнього власника);
- реалізувати наскрізне управління виробом (мотоцикл) на всьому його життєвому циклі;
- збільшити вартість акцій компанії в більш ніж в 7 разів, з рівня 10 доларів у 2009 році до 70 доларів у 2015 році.

3.2.3 Охорона здоров'я

Хмарні IoT-технології відіграють важливу роль у сфері охорони здоров'я, забезпечуючи безперервний моніторинг стану пацієнтів, як у лікарнях, так і поза їх межами. Медичні пристрої, підключені до Інтернету (фітнес-браслети, кардіомонітори, глюкометри), передають дані до хмарних платформ, де вони обробляються в режимі реального часу. Це дозволяє лікарям оперативно отримувати інформації про зміни в стані здоров'я пацієнта, своєчасно виявляти загрози та призначати лікування. Завдяки зберіганню даних в хмарі, вони доступні з будь-якого місця, що спрощує дистанційні консультації.

Застосування Інтернету речей у сфері охорони здоров'я є одним з найбільших секторів ринку IoT, що за прогнозами досягне 289.2 мільярдів доларів США до 2028 року. [43]

Основні напрямки застосування хмарних IoT технологій у сфері охорони здоров'я: [44] [45]

Дистанційний моніторинг стану пацієнтів є одним з найпоширеніших варіантів використання Інтернету речей в охороні здоров'я. Віддалений моніторинг дозволяють підвищити ефективність та результативність лікування, з'єднуючи пацієнтів з лікарями в режимі реального часу. Такий моніторинг здійснюється за допомогою носимих пристроїв, які відстежують життєво важливі показники, такі як частота серцевих скорочень, артеріальний тиск і рівень цукру в крові, розумні пляшечки з таблетками, які нагадують пацієнтам про час приймання ліків і відстежують дотримання режиму та підключені інгалятори, які

відстежують використання ліків і надсилають сповіщення лікарям, коли пацієнт потребує дозаправлення або надмірно використовує свій інгалятор

Відстеження ресурсів лікарні за допомогою IoT дозволяє ефективно управляти ресурсами лікарні. Медичні організації можуть використовувати підключені пристрої для моніторингу обладнання та використаних матеріалів за допомогою RFID-міток, щоб зменшити кількість відходів, підвищити ефективність та заощадити гроші.

Обстеження та лікування з допомогою ШІ є важливим для сфери охорони здоров'я, оскільки дозволяє значно покращити виявлення та лікування хвороби. Завдяки алгоритмам машинного навчання штучний інтелект здатний з високою точністю аналізувати медичні знімки, наприклад, МРТ, КТ або рентген. Також ШІ допомагає розшифровувати результати лабораторних досліджень, виявляти патології на ранніх стадіях та прогнозувати розвиток хвороби.

Моніторинг частоти серцевих скорочень може бути складним завданням навіть для пацієнтів, які перебувають у медичних закладах. Періодична перевірка частоти серцевих скорочень не захищає від різких коливань пульсу, а звичайні пристрої для безперервного моніторингу серцебиття, що використовуються в лікарнях, вимагають, щоб пацієнти були постійно підключені до дротових апаратів, що обмежує їхню мобільність. Для моніторингу частоти серцевих скорочень використовуються невеликі IoT пристрої, які дозволяють пацієнтам залишатися мобільними, забезпечуючи при цьому безперервний моніторинг серцебиття.

Моніторинг рівня глюкози є значною проблемою, лише в США близько 30 мільйонів людей хворих на діабет, що потребують постійної перевірки рівня глюкози. Пристрої Інтернету речей дозволяють допомогти вирішити ці проблеми, забезпечуючи безперервний автоматичний моніторинг рівня глюкози. Пристрої для моніторингу рівня глюкози усувають необхідність вести записи вручну та можуть сповіщати пацієнтів, коли рівень глюкози виходить з норми.

Інтернет речей дозволяє пацієнтам отримувати медичну допомогу з будь-якого місця світу, використовуючи телемедицину, що дозволяє з'єднати пацієнтів з лікарями дистанційно. Телемедицина особливо цінна у віддалених районах або в

ситуаціях, коли пацієнти не можуть отримати консультацію особисто. Також це дозволяє ефективніше керувати персоналом та взаємодіяти з більшою кількістю пацієнтів протягом дня шляхом проведення відеоконференцій та отримання даних віддалено через підключені медичні пристрої.

3.3 Аналіз застосування хмарних технологій в IoT для Розумних міст

3.3.1 Аналіз ефективності застосування хмарних технологій в IoT для Розумних міст

В умовах стрімкої урбанізації світу на міста припадає понад половина світового ВВП і 70% споживання енергії, а враховуючи, що з 2000 року понад мільярд людей переїхали до міст, стає очевидно, що в майбутньому міське планування та формування політики повинно зосереджуватися на ролі, яку можуть відіграти цифрові технології для трансформації міст і гарантуванні придатності для життя та сталого розвитку в довгостроковій перспективі.

Концепція «розумних міст» стрімко трансформує те, як ми живемо, працюємо та взаємодіємо з міським середовищем. Сучасні «розумні» міста використовують дані, технології та цифрову інфраструктуру для покращення всього - від транспорту та енергоефективності до збору відходів, моніторингу довкілля та забезпеченню громадської безпеки. Вбудовуючи датчики та пристрої Інтернету речей по всьому місту, вони генерують величезну кількість даних, які можна проаналізувати, щоб отримати практичні висновки. Ці дані допомагають міським адміністраціям оптимізувати ресурси, зменшити операційні витрати та підвищити якість послуг для мешканців.

Однак управління величезною кількістю даних, що генеруються «розумними містами», а також забезпечення зв'язку і швидкості реагування всіх систем вимагає надійного і масштабованого рішення. Централізовані хмарні обчислення є ключовим елементом, що дозволяє містам ефективно обробляти дані, зменшуючи навантаження на локальні системи та забезпечуючи безперебійне оновлення та управління послугами. Крім того, хмара підтримує прийняття рішень у режимі реального часу, забезпечуючи оперативне реагування

міст на різноманітні виклики, такі як проблеми з трафіком та заторами, а також проблеми з безпекою та злочинністю.

Аналіз ефективності впровадження хмарних технологій в IoT в розумних містах є важливим для обґрунтування інвестицій, оптимізації ресурсів та покращення якості життя громадян. У контексті розумних міст ефективність застосування хмарних технологій в Інтернеті речей можна визначити як ступінь досягнення поставлених цілей з використанням мінімальних ресурсів та з максимальним позитивним впливом на якість життя громадян. Це включає як економічні аспекти (зниження витрат, підвищення доходів), так і соціальні та екологічні (покращення якості послуг, зменшення забруднення навколишнього середовища, або покращення безпеки).

Вибір показників для аналізу ефективності застосування хмарних технологій в Інтернеті речей для розумних міст виконано на основі документа ITU-T Y.4903 (03/2022) "Key performance indicators for smart sustainable cities to assess the achievement of sustainable development goals" розробленого Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU), що пропонує методологію для оцінки розвитку розумних міст. Спираючись на цей документ було обрано показники, що відображають ключові аспекти продуктивності функціонування міської інфраструктури, рівень цифровізації сервісів та їх вплив на життя громадян. Обрані показники базуються на загальних принципах цього документу та були адаптовані до теми дослідження.

Показники продуктивності розумних міст на основі документа ITU-T Y.4903:

Категорія: ІКТ інфраструктура

«Покриття бездротового широкопasmового доступу» визначає рівень територіального охоплення міста бездротовими мережами (3G, 4G, 5G). Високошвидкісний мобільний Інтернет необхідний для ефективного використання застосунків розумного міста. Покриття високошвидкісного мобільного інтернету від провайдерів є ключовим для забезпечення цих можливостей. Принаймні для мереж 3G слід мати до 100% покриття.

Розраховується як відсоток площі міста вкритої мобільним Інтернетом (км²) від загальної площі міста (км²).

$$STP = \frac{\text{Площа міста вкрита мобільним Інтернетом (км}^2\text{)}}{\text{Загальна площа міста (км}^2\text{)}} \times 100\% \quad (3.1)$$

В США відсоток населення США, охопленого щонайменше мобільною мережею 3G складає 99.9%. [39]

Категорія: водопостачання та санітарія

«Розумні лічильники води» вимірює рівень впровадження цифрових лічильників води, які використовують IoT-технології для автоматизованого вимірювання споживання води в режимі реального часу і передачі цих даних постачальникам і споживачам. Вони дозволяють у режимі реального часу контролювати обсяги споживання, виявляти несанкціоноване використання або витоки, а також оптимізувати розподіл водних ресурсів. Розраховується як відсоток встановлених розумних лічильників води від загальної кількості встановлених лічильників води.

$$STP = \frac{\text{Кількість встановлених розумних лічильників води}}{\text{Загальна кількість встановлених лічильників води}} \times 100\% \quad (3.2)$$

«ІКТ-моніторинг водопостачання» вимірює ефективність застосування систем моніторингу водопостачання, що використовують інформаційно-комунікаційні технології для збору, аналізу та візуалізації даних про стан мережі водопостачання. Завдяки такому моніторингу, місто може швидко реагувати на аварійні ситуації, своєчасно проводити технічне обслуговування та мінімізувати втрати води. Розраховується як відсоток довжини системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA Supervisory Control and Data Acquisition) водопостачання, яка контролюється ІКТ (км) від загальної довжини системи водопостачання (км).

$$\begin{aligned}
 STP &= \frac{\text{Довжина системи диспетчерського контролю та збору даних (км)}}{\text{Загальна довжина системи водопостачання (км)}} \times 100\% \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Використання цих показників надає можливість розумним містам досягти цілі сталого розвитку в категорії водопостачання, а саме: до 2030 року суттєво підвищити ефективність використання води в усіх секторах і забезпечити сталий забір і постачання прісної води для вирішення проблеми дефіциту води та суттєвого зменшення кількості людей, які страждають від нестачі води. Слід також відзначити, що впровадження хмарних IoT-технологій в сфері «розумного» водопостачання вже довело свою ефективність на прикладі Барселони, дозволивши зекономити 58 мільйонів євро на рік. [19]

Категорія: електропостачання

«Розумні лічильники електроенергії» визначає рівень впровадження «розумних» лічильників, що дозволяє в режимі реального часу вимірювати навантаження на електромережу, що дозволяє забезпечити точний облік споживання, виявлення аномалій та оперативне реагування на збої чи аварійні ситуації. Розумний лічильник електроенергії це електронний пристрій, який забезпечує вимірювання споживання електроенергії в режимі реального часу і передає ці вимірювання безпосередньо постачальникам електроенергії та споживачам. Завдяки цьому можна зменшити втрати електроенергії, оптимізувати тарифи та знизити експлуатаційні витрати як для постачальників, так і для споживачів. Розраховується як відсоток встановлених розумних лічильників електроенергії від загальної кількості встановлених лічильників електроенергії.

$$\begin{aligned}
 STP &= \frac{\text{Кількість встановлених розумних лічильників електроенергії}}{\text{Загальна кількість встановлених лічильників електроенергії}} \times 100\% \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

«ІКТ-моніторинг електропостачання» визначає рівень використання систем моніторингу SCADA, IoT та хмарних технологій для централізованого збору,

аналізу та обробки даних з електромереж в режимі реального часу. Такий моніторинг дає змогу у режимі реального часу відстежувати як стан мережі, так і енергоспоживання всього міста, надаючи детальну інформацію про кількість енергії, необхідної для різних служб (громадське освітлення, транспорт, світлофори, камери спостереження, опалення/охолодження громадських будівель), прогнозувати потенційні аварійні ситуації та забезпечувати своєчасне технічне обслуговування. Використання таких систем покращує надійність, скорочує тривалість відключень і забезпечує економічно ефективну роботу мережі. Розраховується як відсоток довжини системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) електропостачання, яка контролюється ІКТ (км) від загальної довжини системи електропостачання (км).

$$STP = \frac{\text{Довжина системи диспетчерського контролю та збору даних (км)}}{\text{Загальна довжина системи електропостачання (км)}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Впровадження хмарних IoT-систем широко застосовується розумними містами для ефективного використання електроенергії. Застосування розумних датчиків освітлення не тільки надає нову світлодіодну технологію для зменшення споживання, але й виявляти відсутність пішоходів, щоб зменшити інтенсивність світла або вимірювати якість повітря. Для Барселони таке впровадження призвело до 30% економії електроенергії, або близько 37 мільйонів євро щороку. [21]

На прикладі Единбургу це дозволило скоротити річні витрати на електроенергію на 1,6 мільйона фунтів стерлінгів або 50% на рік. [20] Проект Smartcity Malaga в перші 5 років досягнув 25% економії загального споживання електроенергії та скоротив викид CO₂ на 4500 тон на рік, що становить 20% скорочення викидів, завдяки впровадженню концепту «Smart Grid» розумних IoT-систем моніторингу електроспоживання. [22]

«Динамічна інформація про громадський транспорт» визначає здатність міста надавати пасажирам актуальну інформацію про стан та рух громадського транспорту у режимі реального часу. Затори на дорогах стають головною проблемою в багатьох містах світу, і міста інвестують в громадський транспорт як один з найефективніших способів пересування людей по місту. Завдяки інтеграції IoT пристроїв, GPS трекінгу та хмарних технологій, динамічна інформація про стан системи, а також час прибуття та час у дорозі дозволяє не лише покращити досвід користувачів, але й допомагає операторам коригувати розклади, оптимізувати маршрути та управляти ресурсами більш ефективно. Розраховується як відсоток кількості зупинок і станцій з доступною динамічною інформацією від загальної кількості зупинок і станцій.

$$STP = \frac{\text{Кількість зупинок і станцій з доступною динамічною інформацією}}{\text{Загальна кількість зупинок і станцій}} \times 100\% \quad (3.6)$$

Впровадження технологій надання динамічної інформації про громадський транспорт в Гаазі дозволило скоротити час очікування на 20% та підвищити ефективність використання транспортної мережі. [23]

«Моніторинг дорожнього руху» визначає здатність системи в режимі реального часу збирати та аналізувати дані про рух транспортних засобів на головних вулицях. Цей показник охоплює вимірювання швидкості руху, інтенсивності трафіку, виявлення заторів та різних аварійних ситуацій. Завдяки інтеграції IoT пристроїв, відеокамер, GPS трекінгу та хмарних технологій, система дозволяє оперативно коригувати налаштування світлофорів, перенаправляти потоки транспорту та інформувати громадян про поточну ситуацію на дорогах. Це сприяє зменшенню заторів, скороченню часу в дорозі і підвищенню рівня безпеки мешканців. [24] Розраховується як відсоток кількості довжини основних вулиць, які контролюються ІКТ (км) від загальної протяжності основних вулиць (км).

$$STP = \frac{\text{Довжина основних вулиць, які контролюються ІКТ(км)}}{\text{Загальна протяжність основних вулиць (км)}} \times 100\% \quad (3.7)$$

«Контроль перехресть» вимірює ефективність адаптивного управління дорожнім рухом або визначення пріоритетів на перехрестях за допомогою світлофорів у розумному місті. За допомогою інтеграції IoT-датчиків, камер відеоспостереження, GPS-систем та хмарних технологій, система збирає дані в режимі реального часу про інтенсивність трафіку, середній час затримки, довжину автомобільних потоків та інші параметри роботи перехрестя. На основі цих даних адаптивні системи, такі як SCATS, SCOOT або ATSAC автоматично коригують тривалість зеленого, жовтого та червоного сигналів, оптимізують розподіл потоку транспортних засобів, що сприяє зниженню заторів, скороченню часу перебування автомобілів на перехрестях та підвищенню рівня безпеки. Розраховується як відсоток кількості перехресть з адаптивним регулюванням руху від загальної кількості регульованих перехресть.

$$STP = \frac{\text{Кількість перехресть з адаптивним регулюванням руху}}{\text{Загальна кількість регульованих перехресть}} \times 100\% \quad (3.8)$$

Використання цих показників надає можливість розумним містам досягти цілі сталого розвитку в категорії транспорту, а саме: до 2030 року забезпечити доступ до безпечних, недорогих, доступних і стійких транспортних систем для всіх, покращуючи безпеку дорожнього руху, зокрема шляхом розширення громадського транспорту, приділяючи особливу увагу потребам тих, хто перебуває в уразливих ситуаціях, жінок, дітей, людей з обмеженими можливостями та людей похилого віку. Впровадження системи автоматичного контролю трафіку на перехрестях (ATSAC) в Лос-Анджелес дозволило скоротити затримки трафіку на 32%, а також зменшити викиди шкідливих газів від транспортних засобів на 3%. [25]

Категорія: державний сектор

«Відкриті дані» вимірює рівень доступності, якості та використання даних, що публікуються міською владою, в тому числі зібраних за допомогою IoT-пристроїв і оброблених хмарними технологіями. Відкриті дані можна розглядати

як структуровані дані, які є машино-зчитуваними, вільно поширюються, використовуються та розвиваються без обмежень. Високий рівень відкритих даних сприяє підвищенню прозорості роботи державних органів, залученню громадськості до аналізу та контролю за діяльністю влади, а також стимулює розвиток інноваційних додатків і послуг у громадському секторі. Розраховується як відсоток загальної кількості опублікованих наборів відкритих даних від загальної кількості наборів даних.

$$STP = \frac{\text{Загальна кількість опублікованих наборів відкритих даних}}{\text{Загальна кількість наборів даних}} \times 100\% \quad (3.9)$$

Лідером у використанні відкритих даних є місто Нью-Йорк завдяки порталу NYC Open Data, що налічує близько 2,6 тисяч наборів даних, та 6 мільярдів рядків даних, відкритих для кожного бажаючого. Завдяки цьому проекту розробники та громадські організації можуть створювати безліч інноваційних рішень, зокрема додатки для аналізу трафіку, оптимізації використання ресурсів та моніторингу ефективності міських послуг. [26]

«Електронне урядування» або «e-government» оцінює рівень впровадження електронних державних послуг у розумних містах, що забезпечують зручний доступ громадян до адміністративних послуг. Цей індикатор зосереджується на кількості доступних послуг і може включати веб-сайти, мобільні застосунки або текстові повідомлення. Завдяки інтеграції IoT-пристроїв та хмарних технологій дані від громадян і державних систем (наприклад, заявки на послуги чи моніторинг інфраструктури) передаються до хмарних платформ для обробки та аналізу в реальному часі. Це підвищує ефективність управління та доступність послуг. Розраховується як кількість публічних послуг, що доступні для громадян через онлайн сервіси.

$$STP = \text{Кількість публічних послуг,} \quad (3.10)$$

що доступні для громадян через онлайн сервіси

В Європі лідером в категорії «e-government» є Естонія, що надає 99% усіх державних послуг онлайн, що дозволяє заощаджувати 2% ВВП на рік. [38]

Загалом, поєднання хмарних технологій та IoT є ключовим кроком у розвитку розумних міст, забезпечуючи централізоване управління, зберігання та обчислень, підвищуючи надійність і ефективність послуг, а також створюючи підґрунтя для інновацій. Аналіз розглянутих показників продуктивності демонструє потенціал впровадження хмарних IoT-систем для суттєвого покращення ключових показників ефективності в таких сферах, як управління енергоспоживанням та водопостачанням, оптимізація транспортних потоків та покращення якості надання комунальних послуг. Це формує нову парадигму функціонування міського середовища, орієнтовану на потреби користувачів, що сприяє створенню більш комфортних, безпечних та сталих урбаністичних міст.

3.3.2 Економічний аналіз показника продуктивності у контексті розумних міст

Для економічного аналізу продуктивності розумних міст було обрано показник «розумні лічильники електроенергії», а саме приклад Естонії, якій вдалося досягти STP в 100%, що дозволить як найкраще показати вплив застосування хмарних технологій та Інтернету речей для досягнення цілей сталого розвитку розумних міст, зокрема в категорії електропостачання.

Розумний лічильник електроенергії це пристрій Інтернету речей, що встановлюється в будинках для відстеження споживання та виконує автоматичну передачу показників, а також інформацію про аварії, перевантаження мережі, втрати та несправність приладу. [75] Після того, як дані про використання енергії надійшли до хмари вони стають доступними в реальному часі споживачам та постачальникам, що дозволяє отримувати точні та регулярні вимірювання енергоспоживання, та виставляти рахунки лише за ту електроенергію, яку було фактично використано. Для Естонії, що має одну з найрозвиненіших інфраструктур розумного обліку енергії в ЄС, що доповнюється низькою ціною на електроенергію та великою кількістю різних контрактів для споживачів,

включаючи контракти з динамічною ціною, розумні системи обліку дозволяють споживачам краще управляти своїм споживанням, економити енергію, а також зменшувати свої рахунки, шляхом адаптації свого енергоспоживання до різних цін на енергоресурси протягом доби. Крім того, це дозволяє споживачам, які виробляють власну енергію, наприклад, за допомогою сонячних панелей на даху, продавати її назад в мережу.

В Естонії протягом 2013 - 2017 років було впроваджено систему розумних лічильників електроенергії, що забезпечила близько 709 тисяч споживачів, при загальній ціні проекту 110 мільйонів євро та ціні одно лічильника 155 євро. [77] На 2022 рік в Естонії 100% споживачів було забезпечено розумними системами обліку електроенергії, при загальній кількості в 756 164 споживачів, включаючи 654 362 побутових та 101 802 комерційних. [76] Це впровадження допомогло зберегти близько 6% енергії для споживачів [78], а також зменшити втрати на мережі з 6,12% у 2010 році до 4,75% у 2015 році, що дозволило зменшити мережеві збори на 18,5 мільйонів євро для всіх споживачів щороку [79] та прибрати витрати на ручну перевірку показників. За розрахунками Європейської комісії при тривалості служби одного лічильника 15 років, вигода на один лічильник складатиме 269 євро, що загалом становить 191 мільйона євро для всього проекту. [77]

Чиста вигода після впровадження системи розумного обліку електроенергії для постачальника послуги становить:

$$191 \text{ млн євро} - 110 \text{ млн євро} = 81 \text{ млн євро}$$

Для розрахунку середнього споживання за рік на одну точку обліку, було взято середньорічне споживання всієї країни, що становить 7,48 млрд кВт*год, що при 756 164 споживачах становить:

$$7,48 \text{ млрд кВт-год} / 756 \text{ 164 споживачів} = 9892 \text{ кВт-год}$$

При ціні 0,087 євро центів за 1 кВт-год [80], річна ціна електроенергії для одного споживача буде становити:

$$9892 \text{ кВт-год} * 0,087 \text{ євро центів} = 860,6 \text{ євро}$$

При економії електроенергії в 6% щороку, для споживачів це призведе до економії в:

$$860,6 \text{ євро} * 6\% = 51,6 \text{ євро}$$

Загальне заощадження для всіх споживачів на рік, враховуючи знижені мережеві збори, становитиме:

$$756\,164 * 51,6 + 18,5 \text{ млн євро} = 57\,518\,062 \text{ євро}$$

Впровадження розумних лічильників електроенергії в Естонії є успішним прикладом ефективного застосування хмарних технологій та пристроїв Інтернету речей для досягнення цілей сталого розвитку розумних міст в категорії електропостачання. Це дозволило зменшити витрати на обладнання та його обслуговування, заощадивши кошти як для постачальників, так і для споживачів, а також покращити точність обліку та зручність сервісу.

3.4 Висновки з розділу 3

В третьому розділі було проведено детальний аналіз прикладів застосування хмарних технологій в Інтернеті речей, а також надано економічну та технічну ефективність вибору технологій обробки даних залежно від типу трафіку, обсягів даних, затримок та масштабованості системи. Було розглянуто особливості та визначено методи оптимального використання трьох технологій: Edge computing, Fog computing та Cloud computing.

На основі порівняльного аналізу було визначено, що:

Edge computing найкраще підходить для обробки даних у реальному часі, що чутливі до мережевих затримок та для зменшення навантаження на мережу, але може потребувати значних капітальних витрат на обладнання.

Fog computing забезпечує баланс між швидкістю обробки та економічною ефективністю при роботі з великими обсягами даних на рівні мережі, шляхом агрегації та обробки даних між IoT пристроями та хмарию.

Cloud computing є незамінним майже в будь-якій сфері, але його вплив не повинен бути переоціненим, оскільки при великих обсягах генерації передача даних супроводжується високими операційними витратами, тому для ефективного функціонування системи найкраще використовувати комбінований підхід.

Аналіз прикладів застосування IoT в реальних прикладах показав, що:

В розумних містах хмарні IoT системи забезпечують збір, зберігання та обробки даних, допомагаючи значно покращити міську інфраструктуру та добробут жителів. Впровадження цих технологій дозволяє оптимізувати такі напрямки, як управління освітленням, громадським та приватним транспортом, водо- та газопостачанням, підвищити безпеку та якість моніторингу дорожнього руху, а також приймати оперативні рішення на основі аналізу даних у реальному часі.

В промисловості Інтернет речей (IIoT) допомагає трансформувати виробництво, підвищуючи ефективність, зменшуючи відходи та оптимізуючи наявні ресурси. Основні напрямки застосування IIoT включають прогнозоване обслуговування, моніторинг стану об'єктів та аналітику даних. Приклад компанії Harley Davidson показує, що впровадження IIoT дозволяє скоротити у кілька разів виробничий цикл та значно покращити фінансові показники.

У сфері охорони здоров'я хмарні IoT-рішення забезпечують безперервний та дистанційний моніторинг пацієнтів. Дистанційний моніторинг життєво важливих показників та впровадження телемедицини роблять медичні послуги доступнішими та ефективнішими.

Також було проведено аналіз показників продуктивності розумних міст, та економічну оцінку одного з них, на основі документа ITU-T Y.4903, що демонструє значний потенціал хмарних IoT-технологій у розумних містах. Показники, такі як покриття бездротових мереж, що становить 99.9% у США для мережі 3G, розумні лічильники води та електроенергії, IIoT моніторинг водо- та електропостачання, динамічна інформація про транспорт, моніторинг дорожнього руху та контроль перехресть, дозволяють визначити рівень впровадження IIoT в розумних містах. Наприклад, Лос-Анджелес, було скорочено затримки трафіку на 32% завдяки системі ATISAC, а в місті Малага зменшено викиди CO₂ на 20% в результаті впровадження проєкту Smart Grid Malaga. Портал відкритих даних NYC Open Data та електронне урядування підвищують прозорість влади та доступність міських сервісів, в Естонії рівень послуг, що надаються онлайн досяг 99%.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена дослідженню застосування хмарних технологій в Інтернеті речей, що є однією з найактуальніших тем сучасної цифрової трансформації. Під час виконання дослідження було опрацьовано низку джерел, серед яких навчальні посібники, наукові публікації, стандарти ITU-T та NIST, рекомендації IEEE, дослідження провідних фахівців, різноманітні статті та аналітичні звіти, що дозволило надати детальну оцінку технічних та економічних аспектів роботи.

У теоретичній частині дослідження було детально розглянуто хмарні обчислення та Інтернет речей. Було визначено роль хмарних технологій як ефективний та ключовий інструмент підтримки IoT систем та забезпечення обробки, зберігання і аналізу даних в реальному часі, які можуть бути інтегровані в різні сфери, від розумного будинку до медицини, промисловості, розумних міст та автономного транспорту. Розглянуто моделі хмарних обчислень (IaaS, PaaS, SaaS), типи хмар (публічна, приватна, гібридна, мультихмара), історію розвитку та сфери застосування Інтернету речей і хмарних технологій, семирівневу архітектуру IoT систем, переваги та складнощі як окремо цих технологій, так і під час їх інтеграції, хмарні платформи (AWS, Microsoft Azure, Google Cloud) для Інтернету речей та їх можливості, завдяки яким реалізується робота масштабних IoT систем. Проаналізовано проблему безпеки, конфіденційності, мережових затримок та залежності від стабільного інтернет-з'єднання, які залишаються викликами для впровадження хмарних технологій та Інтернету речей.

У другому розділі було розглянуто перспективи розвитку хмарних технологій в Інтернеті речей. Було проаналізовано тенденції розвитку та інновації, що показали стрімке зростання світового ринку та впровадження розглянутих технологій, а саме штучного інтелекту і машинного навчання, розподілених моделей обчислення (граничні та туманні обчислення), технологій бездротових мереж (5G, Wi-Fi 6, LPWAN), технологію блокчейн та квантові обчислення. Також було проаналізовано та надано методи вирішення основних проблем при інтеграції хмарних технологій та Інтернету речей, а саме запропоновано

використовувати граничні та туманні обчислення, просунуті алгоритми шифрування даних, створювати ізольовані мережеві сегменти, впроваджувати багаторівневу аутентифікацію та вводити політику нульової довіри.

У практичній частині роботи було проаналізовано приклади застосування хмарних технологій в Інтернеті речей, а саме проведено детальний аналіз даних від IoT пристроїв, порівняння граничних, туманних та хмарних технологій, запропоновано методику вибору технологій для ефективної обробки трафіку від IoT пристроїв, для забезпечення високої продуктивності, економії ресурсів та можливості централізованого та віддаленого керування, а також проведено економічний розрахунок системи відеоспостереження для аналізу автомобільного трафіку для трьох технологій, що підтвердив необхідність комбінування технологій при розробці IoT систем.

Проведено аналіз застосування хмарних технологій в Інтернеті речей на прикладі реального застосування. В розумних містах хмарні IoT системи забезпечують ефективне управління інфраструктурою та покращують міські сервіси, на прикладі Барселони скоротивши щорічні витрати на освітлення на 37 млн євро. В промисловості допомагають оптимізувати виробничі процеси та на прикладі компанії Harley Davidson довели ефективність, скоротивши виробничий цикл з 21 дня до 6 годин. У сфері охорони здоров'я IoT забезпечує дистанційний моніторинг стану пацієнтів.

Виконано комплексний аналіз показників продуктивності для розумних міст на основі документа ITU-T Y.4903, а саме економічний сектор та категорії: ІКТ інфраструктура, водопостачання та санітарія, електропостачання, транспорт та державний сектор., що підтвердило високу ефективність впровадження хмарних IoT систем для досягнення цілей сталого розвитку.

Економічний аналіз на прикладі показника продуктивності «розумні лічильники електроенергії» у контексті розумних міст в Естонії показав, що впровадження хмарних технологій та Інтернету речей є економічно доцільним. При інвестиціях у 110 млн євро протягом 4 років було замінено понад 700 тисяч лічильників. Розрахунки показали, що таке впровадження принесло вигоду в 81

млн євро для постачальника послуги, а також заощадити близько 57,5 млн євро щороку для споживачів.

В результаті виконання дипломної роботи було виконано всі поставлені завдання та досягнуто її мети, а саме дослідження та аналіз інтеграції хмарних технологій та Інтернету речей (IoT), зокрема переваг та викликів їх інтеграції, впливу на управління даними, безпеку, інновації, перспективи подальшого розвитку, а також взаємодії між хмарними технологіями та Інтернетом речей. Було набуто комплексні знання у темі хмарних технологій та Інтернету речей, що можуть бути використані для подальшого розвитку та застосовані для реалізації рішень хмарних IoT систем у різних сферах. Дослідження підтвердило актуальність застосування хмарних технологій в Інтернеті речей, та довело перспективність та ефективність їх інтеграції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технології Інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
2. Пулеко І. В. Єфіменко А. А. Архітектура та технології Інтернету речей: навч. посіб. / І.В. Пулеко, А.А. Єфіменко. – Електронні дані. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. – 234 с.
3. Ли П. Архитектура интернета вещей / пер. с англ. М. А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 454 с.: ил.
4. Заїка В.Ф., Варфоломеева О.Г., Домрачева К.О., Гринкевич Г.О. ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ. -Київ – 2019. - 315 с.
5. Stephanie Susnjara, Ian Smalley. What is cloud computing? [електронний ресурс] // IBM. URL: <https://www.ibm.com/topics/cloud-computing>
6. What is the IoT? [електронний ресурс] // IBM. URL: <https://www.ibm.com/topics/internet-of-things>
7. Samuel Greengard. The Internet of Things. – [електронний ресурс] // URL: <https://books-library.net/files/books-library.net-10072224Wp1Q5.pdf>, 2015.
8. Thomas Erl, Eric Barcelo. Cloud Computing Concepts, Technology, Security, and Architecture. – [електронний ресурс] 2023. URL: <https://drive.google.com/file/d/1IVuN1TXe2Z8NTrxkz95Nu-z4vrxUjv3j/view>
9. Satyajit Sinha. State of IoT 2024. – [електронний ресурс] URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
10. Mohit Angurala, Prabh Deep Singh. Integration of Cloud Computing and IoT. 2024 – [електронний ресурс] URL: <https://drive.google.com/file/d/1WNoRWIMKyvLjpricYmjZHI3L7QM0H8zF/view>
11. Gartner Forecasts Worldwide Public Cloud End-User Spending 2024 – [електронний ресурс] URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press->

[releases/2024-05-20-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-surpass-675-billion-in-2024](https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-05-20-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-surpass-675-billion-in-2024)

12. Cody Slingerland. The History Of The Cloud. – [електронний ресурс] 2023
URL: <https://www.cloudzero.com/blog/history-of-the-cloud/>

13. Peter Mell, Timothy Grance. The NIST Definition of Cloud Computing. – [електронний ресурс] URL:
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf>

14. Infrastructure as a service (IaaS) Global Market Report 2024. – [електронний ресурс] URL:
<https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/infrastructure-as-a-service-global-market-report>

15. Хмарна піраміда: IaaS, PaaS і SaaS. 2021 – [електронний ресурс] URL:
<https://gigacloud.ua/blog/navchannja/hmarna-piramida-iaas-paas-i-saas>

16. International Telecommunication Union. (06/2012). Overview of the Internet of things. ITU-T Recommendation Y.4000/Y.2060. – [електронний ресурс] URL:
<https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=11559>

17. International Telecommunication Union. (03/2022). Key performance indicators for smart sustainable cities to assess the achievement of sustainable development goals. ITU-T Recommendation Y.4903. – [електронний ресурс] URL:
<https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=14173>

18. An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects. 2022 – [електронний ресурс] URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254266052200107X?via%3Dihub#sec1>

19. Cisco. Розумне місто Барселона. 2014 – [електронний ресурс] URL:
https://www.cisco.com/c/dam/m/es_la/ioe/public_sector/pdfs/Jurisdictions/Barcelona_Jurisdiction_Profile_final.pdf

20. Smart streetlights in Smart City: a case study of Sheffield. 2022 – [електронний ресурс] URL:
https://www.researchgate.net/publication/349587224_Smart_streetlights_in_Smart_City_a_case_study_of_Sheffield

21. Maria Gorini. Smart Cities in Action. Barcelona. – [электронный ресурс]
URL: <https://blog.bismart.com/en/why-barcelona-is-a-smart-city>
22. Malaga Smart-City: A Smart Grid Project Demonstration. 2009 –
[электронный ресурс] URL:
https://www.researchgate.net/publication/332471607_Title_Malaga_Smart-City_A_Smart_Grid_Project_Demonstration_2009
23. Dynamic at-stop real-time information displays for public transport: effects on customers. 2007 – [электронный ресурс] URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856406001431>
24. Performance Measures for Traffic Signal Systems: An Outcome-Oriented Approach. 2014 – [электронный ресурс] URL:
https://www.researchgate.net/publication/263962649_Performance_Measures_for_Traffic_Signal_Systems_An_Outcome-Oriented_Approach#pf7f
25. LADOT. ATSAC. 2020 – [электронный ресурс] URL:
<https://ladot.lacity.gov/projects/transportation-technology/atsac>
26. NYC Open Data. – [электронный ресурс] URL:
<https://opendata.cityofnewyork.us/dashboard/>
27. Keith D. Foote. A Brief History of the Internet of Things. 2022 –
[электронный ресурс] URL: <https://www.dataversity.net/brief-history-internet-things/>
28. Sandra K. The IoT history and future. 2019 – [электронный ресурс] URL:
<https://www.itransition.com/blog/iot-history>
29. Mike Thomas, Matthew Urwin. 30 Internet of Things Examples You Should Know. 2024 – [электронный ресурс] URL: <https://www.itransition.com/blog/iot-history>
30. GCP IoT (Google Cloud Platform) [электронный ресурс] URL:
<https://www.clarify.io/integrations-browse/gcp-iot-google-cloud-platform>
31. Felix Richter. Amazon and Microsoft Stay Ahead in Global Cloud Market. 2025 – [электронный ресурс] URL <https://www.statista.com/chart/18819/worldwide-market-share-of-leading-cloud-infrastructure-service-providers/>
32. Amazon Web Services. [электронный ресурс] URL:
<https://aws.amazon.com/>

33. Microsoft Azure. [электронный ресурс] URL:
<https://azure.microsoft.com/en-us/>
34. Google Cloud Platform. [электронный ресурс] URL:
<https://cloud.google.com/?hl=en>
35. IoT in the Cloud: 8 Key Benefits and How to Get Started. 2023.
[электронный ресурс] URL: <https://www.emqx.com/en/blog/iot-in-the-cloud-8-key-benefits-and-how-to-get-started>
36. Heorhii Kuchuk, Eduard Malokhvii. INTEGRATION OF IOT WITH CLOUD, FOG, AND EDGE COMPUTING: A REVIEW. [электронный ресурс] URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/98c2c750-1de1-49cc-a749-79216f65e61a/content>
37. Alam, T. Cloud-Based IoT Applications and Their Roles in Smart Cities. 2021. [электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities4030064>
38. Estonia is at the top of the United Nations e-government ranking. 2024
[электронный ресурс] URL:
<https://e-estonia.com/estonia-is-at-the-top-of-the-un-e-government-ranking/>
39. Percentage of the U.S. population covered by at least a 3G mobile network. 2016 [электронный ресурс] URL:
<https://sdg.data.gov/9-c-1/#:~:text=Indicator%209.,For%20The%20Sustainable%20Development%20Goals>
40. AWS Industrial Internet of Things [электронный ресурс] URL:
<https://aws.amazon.com/iot/solutions/industrial-iot/>
41. Mykhaylo Kohut Industrial. IoT: best practices and key use cases
[электронный ресурс] URL: <https://www.n-ix.com/industrial-iot-best-practices-use-cases/>
42. Industrial Internet of Things, IIoT [электронный ресурс] URL:
<https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/promyshlennyj-internet-veschej>
43. IoT in Healthcare Market by Component, End User and Region - Global Forecast to 2028. [электронный ресурс]

URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/iot-healthcare-market-160082804.html>

44. Li, C., Wang, J., Wang, S., & Zhang, Y. A Review of IoT Applications in Healthcare. 2023. [електронний ресурс] URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231223011402>

45. Pete Christianson, IoT in healthcare: Use cases and real-world examples. 2023 [електронний ресурс] URL: <https://telnyx.com/resources/iot-healthcare#asset-tracking-and-management>

46. How To Reduce Cloud Data Transfer Costs. 2024 [електронний ресурс] URL: <https://granica.ai/blog/cloud-data-transfer-costs-grc>

47. Cloud Storage pricing [електронний ресурс] URL: <https://cloud.google.com/storage/pricing#europe>

48. Surveillance Storage Capacity Estimator Tool [електронний ресурс] URL: <https://www.westerndigital.com/en-ap/tools/surveillance-capacity-calculator>

49. IP відеокамера Hikvision DS-2CD2T46G2-ISU/SL [електронний ресурс] URL: <https://hikvision.biz.ua/ua-4-mp-ip-videokamera-hikvision-ds-2cd2t46g2-isu-sl/>

50. Data Types and Data Structures. 2024 [електронний ресурс] URL: <https://www.bigdataframework.org/knowledge/data-types-and-data-structures/>

51. Li Yang, Abdallah Shami. IoT Data Analytics in Dynamic Environments: From An Automated Machine Learning Perspective. 2022 [електронний ресурс] URL: <https://arxiv.org/pdf/2209.08018>

52. Anna Gerber, Satwik Kansal. Making sense of IoT data [електронний ресурс] URL: <https://developer.ibm.com/tutorials/iot-lp301-iot-manage-data/>

53. Fog Computing vs Edge Computing: Which is the Better Approach? 2025 [електронний ресурс] URL: <https://cyberpanel.net/blog/fog-computing-vs-edge-computing>

54. Cloud Computing or Edge Computing: Cost Comparison [електронний ресурс] URL: <https://www.azion.com/en/blog/cloud-computing-or-edge-computing-cost/>

55. Edge, Fog, And Cloud Computing: Key Comparisons. 2024 [электронный ресурс] URL: <https://eastgate-software.com/edge-fog-and-cloud-computing-key-comparisons/>

56. Compute Engine pricing [электронный ресурс] URL: <https://cloud.google.com/compute/all-pricing?hl=en>

57. Difference between Cloud, Fog and Edge Computing in IoT. 2022 [электронный ресурс] URL: <https://www.digiteum.com/cloud-fog-edge-computing-iot/>

58. Morgan Hightower. How Much Data Does a GPS Tracker Use. 2024 [электронный ресурс] URL: <https://trackhawkgps.com/blog/how-much-data-does-a-gps-tracker-use#:~:text=Average%20Data%20Consumption,to%20over%2020%20MB%20monthly>

59. How much data does a security camera use per day? [электронный ресурс] URL: <https://solink.com/resources/industry-insights/how-much-data-does-a-security-camera-use-per-day/>

60. Internet subscriptions [электронный ресурс] URL: <https://www.fullcompass.com/prod/640599-miri-technologies-s3tbyrly-speedify-3tb-month-year-plan>

61. AI in IoT Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. [электронный ресурс] URL: <https://www.precedenceresearch.com/ai-in-iot-market>

62. Edge Computing Market Size - Industry Report on Share, Growth Trends & Forecasts Analysis (2025 - 2030) [электронный ресурс] URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/edge-computing-market>

63. 5G IoT Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034 [электронный ресурс] URL: <https://www.precedenceresearch.com/5g-iot-market>

64. Serverless Computing Market Size, Share, & Trends Analysis Report By Service Model

[электронный ресурс] URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/serverless-computing-market-report>

65. Delladetsimas, A.P.; Papangelou, S.; Iosif, E.; Giaglis, G. Integrating Blockchains with the IoT: A Review of Architectures and Marine Use Cases. *Computers* 2024, 329 p. [электронный ресурс] URL:

<https://doi.org/10.3390/computers13120329>

66. Hossain, M. I., Sumon, S. A., Hasan, H. Md., Akter, F., Badhon, Md. B., & Islam, M. N. U. 2024. Quantum-Edge Cloud Computing: A Future Paradigm for IoT Applications. [электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2405.04824>

67. Cloud computing future: 12 Trends & predictions about cloud. 2025 [электронный ресурс] URL: <https://www.tatacommunications.com/knowledge-base/cloud-computing-future-trends-predictions/>

68. Shraddha S. Future of Cloud Computing - 8 Trends & Predictions [электронный ресурс] URL: <https://www.cloudpanel.io/blog/future-of-cloud-computing/>

69. Matt P. Exploring The Latest Cloud Computing Innovation Trends. 2024 [электронный ресурс] URL: <https://www.tierpoint.com/blog/cloud-computing-innovation/>

70. Tóth, A. Cloud of Things Security Challenges and Solutions. 2021 [электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.1109/kit52904.2021.9583760>

71. Vijayalakshmi P., Arulmozhi S., Dharani V. Internet of Things in Cloud Computing: Benefits, Challenges and Future Trends. 2025 [электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/388534298_Internet_of_Things_in_Cloud_Computing_Benefits_Challenges_and_Future_Trends

72. Bronwyn H. 6 common IoT challenges and how to solve them. 2024 [электронный ресурс] URL: <https://www.emnify.com/blog/iot-challenges>

73. The Top Challenges of Cloud Computing & How to Overcome Them. [электронный ресурс] URL: <https://cloud.folio3.com/blog/challenges-of-cloud-computing/>

74. Khan, H. U., Ali, F., Alshehri, Y., & Nazir, S. Towards Enhancing the Capability of IoT Applications by Utilizing Cloud Computing Concept. 2022 [электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.1155/2022/2335313>

75. Smart metering: Helping customers reduce consumption. 2022 [електронний ресурс] URL: <https://www.sap.com/estonia/resources/smart-metering-helping-customers-reduce-consumption>

76. Implementation Plan of Estonia. Regulatory distortions and market failures. 2024 [електронний ресурс] URL: https://energy.ec.europa.eu/document/download/355ff80a-9719-4998-b712-d122f10705de_en?filename=EE_Implementation+Plan.pdf

77. EUROPEAN COMMISSION. Benchmarking smart metering deployment in the EU-27 with a focus on electricity. 2014 [електронний ресурс] URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014SC0188>

78. EUROPEAN COMMISSION. Benchmarking smart metering deployment in the EU-28. 2019 [електронний ресурс] URL: https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/content/mj0220176enn.en_.pdf

79. Märt Ots. ELECTRICITY and GAS MARKETS in ESTONIA REPORT. 2018 [електронний ресурс] URL: https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2024/04/C18_NR_Estonia-EN.pdf

80. Valner Väino, Marcus Turovski. Already soaring electricity price to grow by 50 percent in Estonia Saturday. 2025 [електронний ресурс] URL: <https://news.err.ee/1609605785/already-soaring-electricity-price-to-grow-by-50-percent-in-estonia-saturday>

81. Максимов В. В., Скиба В.В. Показники ефективності застосування хмарних технологій та інтернету речей для розумних міст // XIX Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2025: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – с.91-94.