

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Побудова мереж промислового Інтернету речей на базі
технології 5G»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

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

_____ Олександр ЄВПАК
(підпис) Ім'я, ПРИЗВИЩЕ здобувача

Виконав:
здобувач вищої освіти
група ІСДМ-64

Олександр ЄВПАК

Керівник:
*науковий ступінь,
вчене звання*

_____ К.Т.Н., доцент

Рецензент:
*науковий ступінь,
вчене звання*

_____ Ім'я, ПРИЗВИЩЕ

Київ 2023

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

Кафедра Інженерії програмного забезпечення автоматизованих систем

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ІПЗАС

_____ Каміла СТОРЧАК

«_____» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

_____ Євпак Олександр Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Побудова мереж промислового Інтернету речей на базі технології 5G

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

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

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «19» 10.2023р. №145

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «29» грудня 2023р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література, параметри мережі 5G, вимоги до ПоТ.

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

1. Аналіз вимог до мереж ПоТ та співставлено їх з можливостями мереж 5G.

2. Дослідження моделей побудови неpubлічних мереж 5G для промислових застосувань.

3. Дослідження практичної реалізація IoT на базі технології 5G.

5. Перелік графічного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «19» жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз наявної науково-технічної літератури	19.10-05.11.23	
2	Аналіз вимог до мереж IoT та співставлено їх з можливостями мереж 5G	05.11-12.11.23	
3	Дослідження моделей побудови неpubлічних мереж 5G для промислових застосувань	13.11-19.11.23	
4	Приватні 5G для мереж IoT	20.11-25.11.23	
5	Дослідження можливості використання 5G Sidelink для розумного виробництва.	27.11-03.12.23	
6	Реалізація мережі IoT на базі 5G	04.12-10.12.23	
7	Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат	11.12-20.12.23	
8	Розробка демонстраційних матеріалів	21.12-29.12.23	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Олександр ЄВПАК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 69 стор., 3 табл., 20 рис., 19 джерел.

Мета роботи – дослідження можливостей побудови мереж ІоТ при використанні технології 5G при різних вимогах та розмірах виробництва.

Об'єкт дослідження – процес побудови мереж 5G для ІоТ.

Предмет дослідження – архітектура ІоТ при використанні для розгортання мереж 5G.

Короткий зміст роботи: У роботі проаналізовані вимоги до мереж ІоТ та можливості мереж 5G їх забезпечити. Розглянуто функції промислової мережі, моделі розгортання та параметри спектру. Проведено дослідження можливості використання 5G Sidelink для розумного виробництва. Також, представлено опис різних варіантів побудови приватної мережі 5G, та зроблено аналіз доцільності вибора кожного з варіантів в залежності від специфіки і розміру підприємства. Для практичного прикладу представлено модель розгортання приватної мережі 5G для інтелектуального виробництва.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІоТ, ПРОМИСЛОВИЙ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, АРХІТЕКТУРА ІоТ, 5G, ПРИВАТНА МЕРЕЖА 5G, ВИМОГИ ДО МЕРЕЖ ІоТ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 69 pages, 20 pictures, 3 table, 19 sources.

The purpose of the work is to study the possibilities of building an IIoT network using 5G technology at different requirements and production sizes.

Object of research is the process of building a 5G network for IIoT.

Subject of the study is the architecture of IIoT when used for the deployment of the 5G network.

Summary of the work: The work analyzes the requirements for IIoT networks and the possibilities of 5G networks to provide them. Industrial network functions, deployment models, and spectrum parameters are considered. A study of the possibility of using 5G Sidelink for smart manufacturing was conducted. Also, a description of various options for building a private 5G network is presented, and an analysis of the feasibility of choosing each of the options is made, depending on the specifics and size of the enterprise. For a practical example, a 5G private network deployment model for intelligent manufacturing is presented.

KEYWORDS: IIoT, INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS, IIoT ARCHITECTURE, 5G, 5G PRIVATE NETWORK, IIoT NETWORK REQUIREMENTS

ВСТУП

Актуальність теми. За останні кілька років використання рішень IoT на промислових підприємствах зросло в багатьох секторах, включаючи фінансові послуги, страхування, виробництво, транспорт, охорону здоров'я, енергетику, уряд, нерухомість тощо. Очікується, що збільшення IoT створить надзвичайні можливості для економічного зростання та конкурентні переваги в галузі шляхом проведення цифрової трансформації для створення високоінтелектуальних індустріальних підприємств. IoT кардинально змінює спосіб роботи галузей, об'єднуючи об'єкти, системи та створюючи нові бізнес-моделі. Платформи IoT здатні надавати галузевим секторам зв'язок, інтелектуальну аналітику великих даних, крайові та хмарні обчислення та розробку додатків. Використовуючи нові та передові технології, IoT обіцяє змінити існуючу процедуру промислового виробництва шляхом оптимізації процедури виробництва, покращення досвіду клієнтів, зниження витрат.

Промисловий IoT має особливі вимоги до зв'язку, зокрема високу надійність, низьку затримку, гнучкість і безпеку. Вони інстинктивно надаються мобільною технологією 5G, що робить її успішним кандидатом для підтримки сценаріїв промислового Інтернету речей (IIoT).

Незважаючи на те, що останнім часом було розроблено численні додатки IIoT, технологія все ще перебуває на початковій стадії. Крім того, багато досліджень зосереджувалися лише на поточному застосуванні та викликах, не згадуючи можливості, які ця технологія відкриває для промислового зростання та підвищення задоволеності споживачів. Таким чином, ця магістрська робота має на меті надати розуміння технологій та інфраструктури з підтримкою IIoT на базі технології 5G, зосередившись на їх важливості для стимулювання глобального промислового зростання, їх застосуванні, викликах і майбутніх рекомендаціях щодо вирішення поточних проблем і відкриття нових можливостей.

Мета роботи – дослідження можливостей побудови мереж ІоТ при використанні технології 5G при різних вимогах та розмірах виробництва.

Для виконання поставленої мети, у магістрській роботі розроблено та виконано наступні завдання:

- аналіз вимог до мереж ІоТ та співставлено їх з можливостями мереж 5G;
- аналіз технології 5G як основи для побудови мереж ІоТ;
- дослідження моделей побудови непублічних мереж 5G для промислових застосувань;
- дослідження можливості використання 5G Sidelink для розумного виробництва;
- дослідження практичної реалізація ІоТ на базі технології 5G.

Об'єкт дослідження – процес побудови мереж 5G для ІоТ.

Предмет дослідження – архітектура ІоТ при використанні для розгортання мереж 5G.

Методи дослідження. Під час виконання завдань магістерської кваліфікаційної роботи були використані методи елементів системного аналізу, методи теоретичного дослідження, імітаційне моделювання.

Джерела дослідження:

- <https://5g-acia.org/whitepapers/5g-for-industrial-internet-of-things>;
- <https://www.embedded.com/5g-fits-needs-of-industrial-iiot>;
- <https://futureiiot.tech/5g-integration-in-iiot-systems-hastens-industry-4-0-goal>;

Наукова новизна одержаних результатів. У магістрській роботі систематизовано відомості щодо побудови мереж ІоТ та зроблено практичні рекомендації по побудові мереж ІоТ на базі технології 5G.

Практична значущість одержаних результатів. Отримані в магістрській роботі результати можуть бути використані при побудові мереж ІоТ на базі 5G для різних варіантів використання.

Апробація результатів магістерської роботи. Базові результати магістерської роботи опубліковано в збірнику тез I Всеукраїнській науково-технічній конференції "Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу".

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Поняття та особливості ІоТ

Розвиток бездротових технологій призвів до появи Інтернету речей (ІоТ), який останніми роками набув великого розповсюдження. В той час, як технології ІоТ досягають інтелектуальних цілей без участі людини, за рахунок підключення додатків реального світу, промисловий ІоТ (ІоТ) вносить значні еволюційні вдосконалення у виробничий процес, витримуючи критично значучі вимоги у порівнянні з ІоТ.

Промисловий Інтернет речей — це вдосконалений підтип Інтернету речей, який поєднує мережеві пристрої та технології з додатками механізації, призначеними спеціально для промислового зв'язку. [1] Промисловий Інтернет речей (ІоТ) визнаний четвертою промисловою революцією, завдяки її внеску в розвиток ІоТ, безпроводових технологій, доповненої реальності, систем автоматизації, хмарних обчислень, інтеграції кіберфізичних систем (СРС), концентричних обчислення та інше. Поняття «Індустрія 4.0» синонім поняття «Фабрика майбутнього» або «Розумна фабрика». Вона створює бізнес-екосистему, яка допомагає об'єднати активи, ресурси, інфраструктуру та інші комерційні стратегії різних компаній, щоб вони могли взаємодіяти один з одним децентралізованим способом. Ця промислова революція замінила традиційну систему виробництва інтелектуальним виробництвом, і в результаті національні економіки досягають значного прогресу за рахунок інтеграції високотехнологічних гаджетів. На рис.1.1 представлено елементи Індустрії 4.0.

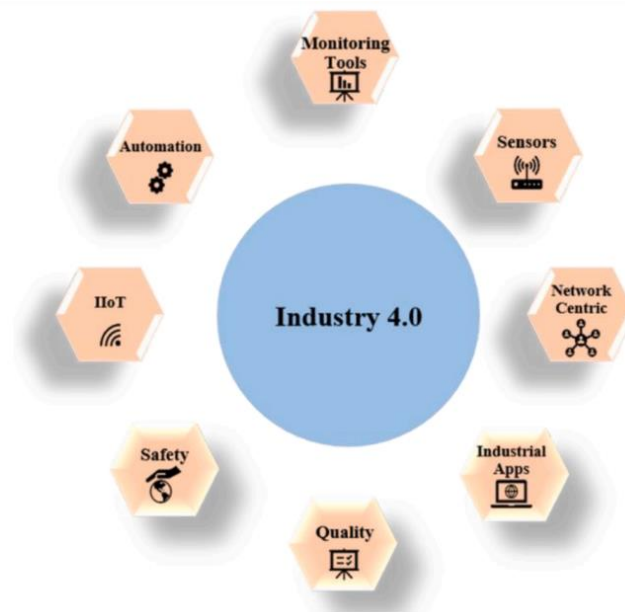


Рис.1.1. Елементи Індустрії 4.0

Як описано в [2], оскільки Індустрія 4.0 перейшла до децентралізованих мереж, її основним рушійним засобом стала технологія ІоТ, яка і була розроблена для розгортання обладнання на базі децентралізованого інтелекту. Саме тому стає очевидним, що зараз ІоТ визнано найбільш ідеальним підходом для досягнення максимальної виробничої продуктивності. Таку високу оцінку ІоТ отримав за можливість зниження експлуатаційних витрат та підвищення актуальності зв'язку між машинами. Зниження витрат може бути досягнуто в промислових застосуваннях, таких як виробництво промислового обладнання та операційні системи розподілу енергії. Програми ІоТ дозволяють будувати розумні фабрики, які через мережу Інтернет здатні з'єднувати усі пристрої з вбудованими датчиками, що дозволяє забезпечити розширену діяльність через доступ до даних у реальному часі. Крім того, технології ІоТ можуть забезпечити на виробництві моніторинг навколишнього середовища, виявляючи можливість витоку газу, наявність у повітрі диму чи забруднюючих речовин, які небезпечні для персоналу на виробництві. Тобто, така технологія дозволяє підтримувати здорове робоче середовище. Інтелектуальна мережа, промислова автоматизація, інтелектуальна електрика та інтелектуальний

зв'язок – це деякі інші можливості ІоТ які ефективно працюють з великими обсягами даних для підвищення продуктивності за умови зниження витрат виробництва.

На рис.1.2 показано, чим ІоТ та ІІоТ відрізняються один від одного з точки зору цільових програм і вимог.

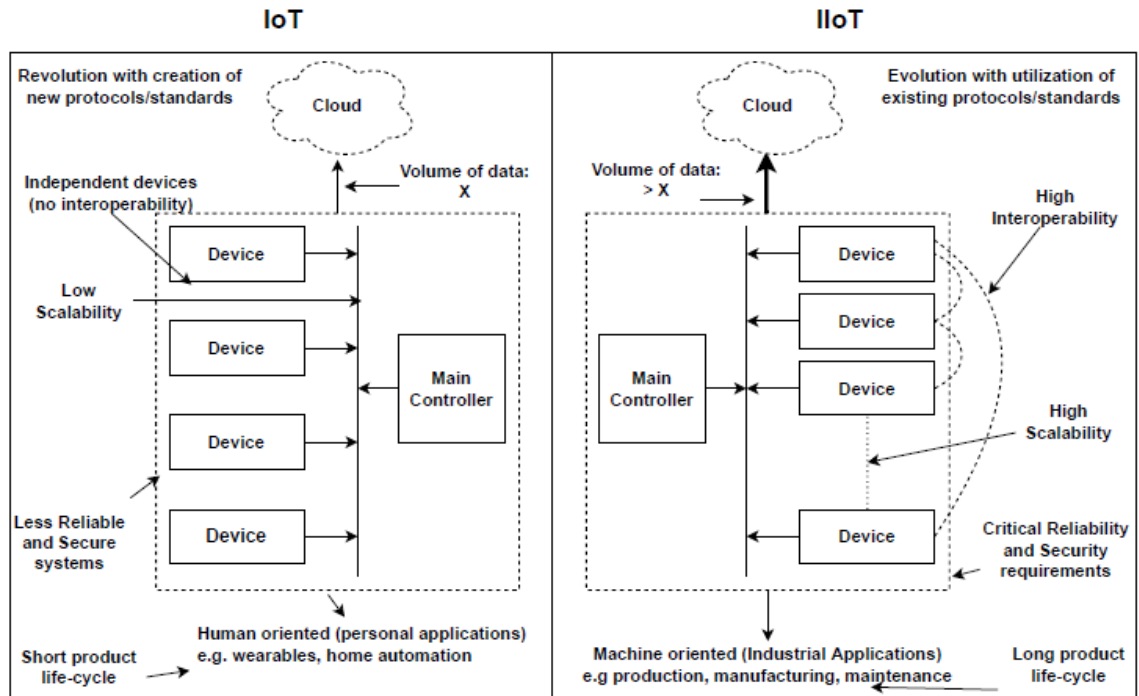


Рис.1.2. Основні відмінності між ІоТ та ІІоТ [3].

ІІоТ працює шляхом з'єднання промислових машин і пристроїв із датчиками та програмним забезпеченням, які збирають дані. Потім ці дані надсилаються до центральних систем для аналізу, де можна отримати інформацію для прийняття обґрунтованих рішень.

Збір даних є фундаментальною відправною точкою для промислових мереж ІоТ. Датчики та пристрої інтегруються в різноманітне промислове обладнання, починаючи від високоточних великих машин і закінчуючи невеличкими приладами. Ці пристрої здатні збирати масив інформації, включаючи різні параметри навколишнього середовища (коливання температури, рівень вологості, вібрацію, показники тиску та багато іншого). Деталізація та точність цих даних залежать від типу використовуваних

датчиків і конкретних галузевих вимог. Мета полягає в тому, щоб зібрати актуальну інформацію в реальному часі, яка може надати розуміння функціонування та стану обладнання.

Після збору даних вони будуть передаватися до централізованої системи, де її можна обробити та проаналізувати. На цьому етапі відбувається складний процес агрегації та транспортування даних, що, в свою чергу вимагає перетворення необроблених даних у формат, придатний для передачі. Можна використовувати різні методи зв'язку, як проводові, так і безпроводові мережі.

Центральна система отримавши дані починає процеси їх обробки та аналізу. Початковий процес – очищення даних, тобто фільтрація даних та відкидання нерелевантної інформації та шуму. Очищені дані підлягають трансформації та завантаженню в аналітичну систему. Аналітична система використовує найсучасніші алгоритми, такі як алгоритми штучного інтелекту і машинного навчання. Мета даного процесу полягає у виявленні закономірностей та отриманні значущої інформації, яка відображатиме продуктивність промислового обладнання чи умови експлуатації даного обладнання.

Останній етап роботи системи ІоТ є перетворення інформації, яка отримана на етапі аналізу, у конкретні дії в рамках промислової системи. Залежно від висновків можуть відбуватися активація дій по налаштуванню параметрів обладнання, з метою оптимізації чи підвищення продуктивності. Також, можливе налаштування системи на відправку сповіщень операторам про необхідність технічного втручання. Також, визначивши критичні значення певних параметрів система може активувати запуск профілактичних процесів.

До основних компонентів мережі ІоТ можна віднести:

1. Датчики. Це основні елементи, які виявляють зміни у фізичних умовах, таких як температура, тиск, світло. Для зручності користувача на ринку представлено широкий спектр датчиків, кожен з яких придатний для різних застосувань залежно від конкретних потреб галузі.

2. Мережа зв'язку виконує функцію каналу для потоку даних між пристроями. Вона може бути як проводовою, так і безпроводовою і розгорнута на базі різних технологій зв'язку.

3. Мозком системи ПоТ можна назвати інструментарій обробки та аналізу даних. Вони можуть включати хмарні або локальні сервери, які використовують штучний інтелект і алгоритми машинного навчання для виявлення шаблонів, тенденцій і аномалій у даних. Ці технології більш детально будуть описані у наступному підрозділі.

4. Для забезпечення можливості взаємодії людини та обладнання використовується людино-машинний інтерфейс. Він може бути реалізований у вигляді інформаційної панелі, на якій відображаються дані в реальному часі, або елементи керування, які дозволяють налаштовувати вручну.

Складність і функціональність мережі Industrial IoT роблять її потужним інструментом для сучасних промислових застосувань. Розуміючи його різні компоненти та програми, галузі можуть використовувати ПоТ для стимулювання інновацій, ефективності та зростання.

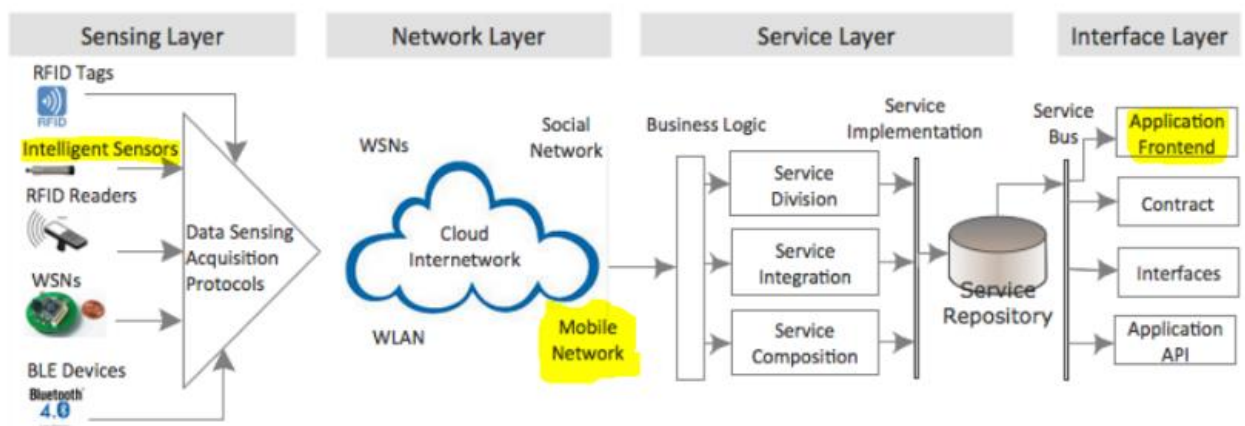


Рис.1.3. Основні складові ПоТ [4]

Проаналізувавши технічну літератури по тематиці, виділено наступні виклики, з якими стикається ІоТ:

1. Інтероперабельність, це найбільший виклик у взаємопов'язаних системах ІоТ. Прагнення до бездоганного з'єднання між операційними та інформаційними технологіями може бути перешкоджено як технологічними проблемами, так і відсутністю спільних програмних інтерфейсів, стандартних форматів даних.

2. Надійність і довговічність пристроїв, для пристроїв у важких промислових умовах (таких як виробництво, енергетика та комунальні послуги, транспорт і роздрібна торгівля тощо), надійність і довговічність обладнання є дуже важливими. Це включає віддалений контроль доступу, надійність, підключення та надійне надання послуг.

3. Питання безпеки та конфіденційності, включаючи автентифікацію та контроль доступу в системі безпеки, захисту даних та збереження конфіденційності згідно з правилами захисту даних, а також захист і безпека людей, промислових активів і критичної інфраструктури.

4. Набуття нових навичок персоналом, які забезпечать можливість працювати з сучасними технологіями, може стати проблемою. У той час як нові технології дозволяють вищий рівень масштабованості, технологічності та автономно співпрацюють з іншими системами, брак відповідних навичок та розуміння використання ІоТ та великих даних створить проблеми.

5. Масштабованість і затримка (тобто швидкість перевірки) є двома головними проблемами в технологіях блокчейн.

7. Відсутність стандартів також є основною проблемою в блокчейні, наприклад, наявність нечіткої законодавчої та нормативної бази.

1.2 Короткий огляд існуючих промислових проводових/безпроводових мереж зв'язку

У багатьох галузях промисловості (наприклад, комунальні послуги, гірничодобувна промисловість, промислова автоматизація) автоматизація в реальному часі використовує проводові комунікаційні мережі, які зазвичай базуються на розширеннях реального часу IEEE 802.3 Ethernet. Розширення часто несумісні зі стандартом Ethernet, а конвергенція з корпоративними IT-мережами є складною, хоча й дуже необхідною для реалізації бачення Industry 4.0. Нещодавно з'явився відкритий набір стандартів IEEE 802.1 TSN, який забезпечує справді конвергентні мережі як для детермінованого трафіку, так і для найкращого трафіку через Ethernet.

Мережа, чутлива до часу (TSN) — це розширення стандартного протоколу Ethernet, яке забезпечує синхронізацію в реальному часі та детермінований зв'язок із малою затримкою [7]. TSN додає кілька важливих функцій для додатків, які вимагають високої доступності, стійкості та надійності. Ці функції включають формувачі з урахуванням часу, планувальники та захисні смуги, які забезпечують детерміновану та обмежену затримку зв'язку. TSN також підтримує механізми резервування та відновлення після збоїв для забезпечення високої доступності. Нарешті, TSN включає правила формування черги та алгоритми планування трафіку, які дають змогу визначати пріоритети критичного трафіку. Більше того, TSN допомагає скоротити загальні витрати на систему IoT, усуваючи необхідність у спеціалізованих апаратних та програмних рішеннях.

При виборі мережного протоколу для IoT слід враховувати різні фактори. Однак, якщо миттєва передача даних має вирішальне значення, TSN має бути основним вибором.

Переваги використання TSN:

- Завдяки синхронізації даних на декількох пристроях TSN ефективно мінімізує затримки, гарантуючи своєчасну доставку життєво важливої інформації без будь-яких затримок.

- Підвищена надійність. Протоколи TSN призначені для забезпечення надійного детермінованого зв'язку. Це важливо для програм, де простої неприпустимі, наприклад, для автоматизації виробництва або потокового відео.

- Підвищена безпека: TSN використовує низку методів підвищення безпеки, включаючи шифрування, автентифікацію та авторизацію. TSN також використовує унікальний механізм синхронізації, щоб гарантувати своєчасну доставку пакетів.

- Дозволяючи пристроям ефективно спільно використовувати ресурси, TSN сприяє підвищенню ефективності, що призводить до зниження витрат та оптимального використання ресурсів.

З іншого боку, існуючі бездротові технології, спеціально призначені для промислового зв'язку, включають:

- Стандарти ISA100.11a та WirelessHART для автоматизації процесів, які базуються на стандарті IEEE 802.15.4 для сітчастого підключення короткої дії.

- IO-Link Wireless для бездротової мережі, через Bluetooth, між датчиками, приводами та контролерами в системах керування заводською автоматизацією. IO-Link Wireless є розширенням стандарту IO-Link IEC 61131-9.

- Промислова бездротова локальна мережа (IWLAN) від Siemens, яка наразі використовується для автоматизації виробництва, автомобілів, транспорту тощо.

Стимулами до використання цих стандартів є енергоефективність і робота в неліцензованих діапазонах частот. В іншому випадку їх сфера застосування обмежена низькошвидкісними або локалізованими додатками ІоТ з низькою мобільністю. І навпаки, нещодавні технології глобальної мережі з низьким енергоспоживанням (LWPAN), такі як LoRa, вузькосмугова мережа 4G (NB)-ІоТ, корисні для підтримки програм з низькою мобільністю в більш широкій території.

Розглянемо перераховані технології більш детально.

Протокол WirelessHART був розроблений у 2004 році, на ринок запусканий у 2007 році і зарекомендував себе в багатьох галузях промисловості у багатьох країнах світу. WirelessHART працює на частоті 2,4 ГГц, використовуючи TDMA (механізм множинного доступу з розділенням частот) для синхронізації всіх пристроїв в мережі, кожен з яких спілкується в мережі зі шлюзом. Пр цьому пристрої або мають вбудований WirelessHART, або оснащуються адаптерами WirelessHART. Адаптер може працювати як від батареї, так і отримувати енергію від контуру живлення пристрою.

Також, WirelessHART працює з сітчастою мережею на основі IEEE 802.15.4. Це дає змогу поєднати в собі два методи, які забезпечують надійну та безпечну мережу: розширений спектр прямої послідовності (DSSS) та розширений спектр із стрибками частоти (FHSS).

O-Link Wireless був розроблений як глобальний стандарт бездротового зв'язку, призначений для заміни кабелів у дистанційному управлінні датчиками та приводами та моніторингу для автоматизації виробництва. Заснований на стандарті IO-Link IEC 61131-9, це системне розширення вже створеної технології IO-Link. [8]

Подібно до оригінального протоколу IO-Link, бездротова технологія IO-Link Wireless забезпечує високу надійність, низьку затримку, масштабованість, детермінований зв'язок, високу щільність клієнтської ємності та надійність у безпроводовому форматі. Вона унікально підходить для задоволення вимог Industry 4.0 і вже впроваджується деякими з найбільших світових виробників обладнання для автоматизації та машинобудування.

IO-Link служить стандартизованим інтерфейсом між датчиками, приводами та контролерами, що забезпечує безперебійний обмін даними та інтелектуальний двосторонній зв'язок у промислових умовах. Ключова перевага IO-Link полягає в його здатності сприяти двонаправленому зв'язку, дозволяючи не тільки передавати дані процесу, але й повторювати налаштування та діагностику підключених пристроїв. Ця двонаправлена здатність оптимізує інтеграцію пристроїв, спрощує обслуговування та

скорочує час простою. Крім того, IO-Link сумісний з різними системами польових шин і промисловими протоколами Ethernet.

Щоб запропонувати промисловості найкращу можливу інфраструктуру для обміну всіма типами даних, Siemens розробив спеціальні продукти промислової бездротової локальної мережі (IWLAN). Вони мають унікальні додаткові функції, які відповідають особливим вимогам Wi-Fi у промисловості, всередині шафи керування, у приміщенні та на вулиці. [9]

Спеціально створена для додатків IoT LoRa відповідає життєво важливим технічним вимогам, таким як двонаправлений зв'язок, наскрізна безпека, мобільність і служби локалізації. LoRa зазвичай працює в безліцензійних радіодіапазонах субгігагерцового діапазону, що дає будь-кому свободу створювати LoRaWAN мережі. Технологія LoRa забезпечує дуже довгі передачі з надзвичайно низьким енергоспоживанням. [10] До основних переваг використання LoRa можна віднести:

- Велика відстань передачі та глибоке проникнення. Датчики можуть розташовуватися всередині, на відкритому повітрі чи під землею та все одно обмінюватися даними безпосередньо зі шлюзом у межах діапазону до 50 км на відкритих територіях і до 10 км у міських умовах. Немає потреби в надто складному аналізі покриття.

- Низька потужність. Сенсори розроблено для надсилання невеликих бітів даних у разі потреби, незалежно від того, керуються подіями чи за розкладом, і час роботи батареї може тривати до 10 років.

- Висока ємність мережі. Адаптивна швидкість передачі даних і багатоканальний багатомодемний трансивер у шлюзі дозволяють одночасно передавати повідомлення на кількох каналах. Це надає мережі LoRaWAN дуже високу пропускну здатність і масштабованість.

- Відкритий стандарт. Неліцензований діапазон. Специфікація LoRaWAN підтримується та підтримується LoRa Alliance, що забезпечує плавне та швидке

масштабування. Технологія LoRa зазвичай працює в неліцензійному спектрі та ідеально підходить для публічних і приватних мереж.

- Вбудована безпека. Безпека мережевого сервера гарантує автентичність пристроїв у мережі, а безпечні програми забезпечують захист і конфіденційність даних кінцевих користувачів. LoRa® має вбудоване шифрування AES-128 стандарт.

- Простота налаштування. Протокол LoRaWAN використовує зіркоподібну топологію. Шлюзи можуть забезпечувати покриття дуже великої території, а тому немає потреби в проводці джерела живлення чи постійному технічному обслуговуванні.

- Низька вартість. Шлюзи LoRa не мають статусу, і їм не потрібно встановлювати сеанс для зв'язку з датчиком. У результаті надання шлюзів і датчиків є ефективним і зменшує витрати на розгортання. Крім того, неліцензовані діапазони частот LoRaWAN можна використовувати безкоштовно.

Тим часом, останній WiFi 6 (IEEE 801.11ax) також націлений на програми з низькою затримкою на підприємствах. Завдяки швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с із вісьмома антенами, смугою пропускання 160 МГц і 1024 QAM ця технологія може обслуговувати енергоємні пристрої з великими акумуляторами, такі як мобільні телефони, планшети та ноутбуки. Це швидко та надійно, не споживаючи надто багато енергії. Але він також може обслуговувати пристрої зі зниженими характеристиками, наприклад ті, що досягають 230 Мбіт/с лише з однією антеною, 40 МГц і 256 QAM. Це дозволяє меншим пристроям із меншою потужністю також користуватися перевагами Wi-Fi 6.

Працюючи на частоті 5 ГГц, Wi-Fi 6 уникає дуже перевантаженого діапазону частот 2,4 ГГц. Він був розроблений з нуля, щоб покращити пропускну здатність даних, підвищити надійність і зменшити енергоспоживання без зниження продуктивності.

Wi-Fi 6 також оснащений множинним доступом з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA), що покращує продуктивність у середовищах з високою щільністю. Це дає змогу сегментувати смугу пропускання в каналах, дозволяючи кільком пристроям отримувати дані в той самий проміжок часу.

Як і інші функції Wi-Fi 6, OFDMA зменшує енергоспоживання. Переваги тут подвійні. З меншим енергоспоживанням розробники можуть створювати менші датчики з ще меншими батареями. Крім того, вони можуть просто залишити батарею як є, використовуючи переваги зниження споживання електроенергії, покращуючи довговічність датчика.

Дослідження широко використовують SDN у поєднанні з іншими технологіями, що виникають в архітектурах. Характеристики централізованого керування мережею SDN дозволяють йому забезпечувати надійність, масштабованість і низьку затримку, тоді як у деяких літературних джерелах також використовувався SDN для вирішення питань сумісності та безпеки. Впровадження технології 5G в архітектурах ПоТ забезпечує високошвидкісні функції з мінімальною затримкою порівняно з іншими технологіями. 5G також вирішує проблеми масштабованості та надійності в архітектурах ПоТ. Інтеграція технології бездротових сенсорних мереж (WSN) в архітектурні рішення ПоТ вирішує три проблеми: низьку затримку, надійність і масштабованість. WSN широко відповідає вимогам масштабованості порівняно з іншими функціями. Використання машинного навчання (ML) в архітектурах ПоТ зберігає конфіденційність даних від несанкціонованого доступу та забезпечує безпеку мережі.

WI-FI 7 (802.11be)

Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be, який також називається Wi-Fi з надзвичайно високою пропускнуою здатністю (EHT)) — це нова поправка до стандарту Wi-Fi, яка обіцяє збільшити номінальну пропускну здатність до 40 Гбіт/с. Це досягається в основному шляхом вдосконалення рівня PHY (EHT PHY): подвоєння смуги пропускання до 320 МГц, збільшення модуляції до 4096-QAM і збільшення кількості просторових потоків

до 16×16 MU-MIMO. На додаток до цієї основної мети, Wi-Fi 7 також має на меті досягти вищої ефективності спектру, кращого пом'якшення перешкод і підтримки додатків у реальному часі (RTA). Однак лише ЕНТ PHY не може забезпечити збільшення пропускну здатності та затримки для досягнення всіх цілей. Ось чому обговорюються інші інновації для Wi-Fi 7: модифіковані EDCA та OFDMA, багатоканальна робота для рознесення каналів, мінімізація накладних витрат на озвучування каналу, розширені підходи PHY (HARQ, NOMA та повний дуплекс) і взаємодія кількох точок доступу.

Для підтримки RTA пропонуються модифікації розширеного доступу до розподіленого каналу (EDCA). Багато рішень MAC, які обговорюються, спочатку були запропоновані для дротових чутливих до часу мереж (TSN), наприклад, переривання пакетної передачі, стійкої до тривалої затримки, для визначення пріоритету термінового пакету та планування передачі. Інші запропоновані рішення включають введення нової черги категорії доступу для трафіку RTA, що прискорює період відстрочки трафіку RTA. Пропонуються також модифікації кадру OFDMA, оскільки він дозволяє точці доступу централізовано керувати передачею по низхідній і висхідній лінії зв'язку, і, таким чином, це може бути потужним інструментом для підтримки RTA. Необхідний оптимальний розподіл одиниць ресурсу (RU) для клієнта RTA, враховуючи, наприклад, знання параметрів трафіку та залишкового ресурсу пакетів.

Завдяки підтримці мобільності Wi-Fi 7 буде більш вигідним для деяких випадків, ніж Wi-Fi 6, особливо у випадках, коли є щільне розгортання точок доступу та рухаються роботизовані інструменти та автономні інтелектуальні транспортні засоби. Щойно рухливі роботи зможуть безперервно переміщатися, продуктивність можна підвищити, дозволивши роботам виконувати складні та небезпечні завдання.

Ці завдання можуть вимагати високої швидкості передачі даних, наднизької затримки та мобільності для підтримки синхронізації та керування виробничим

процесом, перевантажуючи потенційно велике обчислювальне навантаження на периферійні сервери.

6G. Стільникові мережі шостого покоління (6G) передбачають повну інтеграцію розширених функцій, які лише частково потрібні в технології 5G, включаючи штучний інтелект, автономні транспортні засоби, технології змішаної реальності та тактильний інтерфейс, які вимагають зв'язку з низькою затримкою, які також є ключовими функціями для Industry 4.0. і далі. Щоб досягти такої інтеграції, бездротові системи 6G справді потребуватимуть додаткових удосконалень щодо пропускної здатності (до 1 Тбіт/с), пропускної здатності мережі ($\times 1000$ потужностей 5G), енергоефективності, перевантаженості мережі транзитного зв'язку та доступу та безпеки даних. Наступні ключові технології забезпечують виконання цих вимог:

1. Штучний інтелект: найважливішою технологією, запровадженою для систем 6G, є інтеграція штучного інтелекту в протоколи зв'язку майбутнього. AI відіграватиме важливу роль в автоматизації складних і трудомістких мережевих завдань, таких як передача, вибір мережі та доступ до каналу. Таким чином, це підвищить ефективність і зменшить затримки в спілкуванні.

2. Терагерцовий спектр: розподіл смуг ТГц збільшить доступну пропускну здатність для підтримки дуже високих швидкостей передачі даних. Висока частота призведе до великих втрат на шляху, і ймовірно знадобляться антени з дуже вузьким променем.

3. Оптичний бездротовий зв'язок: на додаток до різноманітності доступних радіочастотних комунікацій, технології OWC, такі як зв'язок у видимому світлі (VLC), оптичний зв'язок камери та оптичний зв'язок у вільному просторі (FSO), розглядаються як можливі пристрої до пристроїв, і мережі fronthaul/backhaul.

4. Блокчейн: керування величезною кількістю даних може бути вузьким місцем у мережі, якщо воно здійснюється на централізованому вузлі. Блокчейн є формою розподіленого управління даними, що забезпечує взаємодію, безпеку, конфіденційність, надійність і масштабованість. Отже, підходить технологія блокчейн

будуть корисними в управлінні масивними та безпечними промисловими мережами IoT.

5. Бездротова передача інформації та енергії: WIET дозволяє системі передавати бездротову енергію під час зв'язку за допомогою тієї самої електромагнітної хвилі. Таким чином, під час передачі даних можна заряджати датчики, що живляться від батареї, що подовжує термін служби пристроїв. Також можуть підтримуватися мережеві пристрої без батарей.

6. Інші ключові сприятливі технології включають: інтегровані бортові мережі (БПЛА, супутники), квантовий зв'язок, інтегроване зондування та зв'язок, вдосконалені методи MIMO.

Незважаючи на те, що перехід до Industry 4.0 буде забезпечений безпечним бездротовим зв'язком із малою затримкою та автоматизацією за допомогою використання 5g та інших описаних протоколів, майбутні випадки промислового використання з набагато більш екстремальними вимогами виграють від досягнень, пов'язаних із 6G:

- Використання доповненої/віртуальної реальності в промислових завданнях може виграти від вищої роздільної здатності та мультисенсорних дизайнів.

- Масове розгортання роїв мобільних роботів і дронів, які виконують широкий спектр завдань, може виграти від збільшення потужності та надійності зв'язку та розподілених обчислень.

- Динамічні цифрові двійники можуть виграти від підвищеної точності для синхронних оновлень із фізичного світу та вищої роздільної здатності відображення та візуалізації в реальному часі.

Однак промислові варіанти використання пред'являють надзвичайно різноманітні вимоги, починаючи від низької вартості, високої енергоефективності до високої мобільності та надійного підключення. В таких умовах, стільникові мережі 5G з різними вдосконаленнями радіозв'язку, уніфікованим підключенням і широким

покриттям, має перевагу перед іншими фрагментованими рішеннями. Більш детально переваги 5G для IIoT будуть розглянуті у другому розділі даної магістрської роботи.

1.3 Аналіз технологій для IIoT

Максимізуючи цінність IIoT можна використовуючи дані та знання в режимі реального часу за допомогою декількох технологій (представлені на рис.1.4), до яких відносять аналітику та моделювання даних, блокчейн, технології машинного навчання, периферійні та туманні обчислення.

Технологія блокчейн.

Складним є питання забезпечення надійного обміну між компонентами мережі IIoT. Нова технологія blockchain демонструє багатообіцяючий потенціал для вдосконалення промислових систем та Інтернету речей (IoT), надаючи додаткам резервування, незмінне зберігання та шифрування.

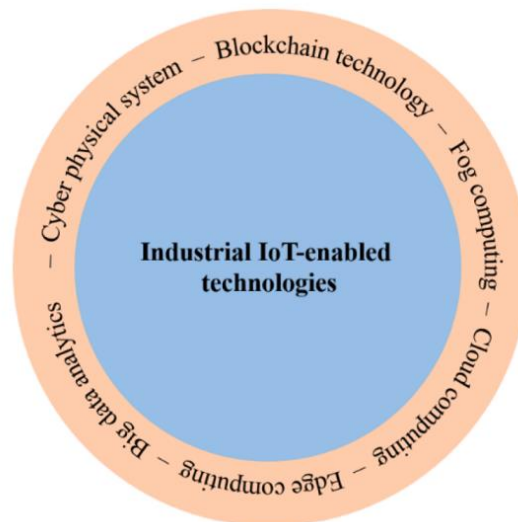


Рис.1.4. Технології для IIoT

Технологія блокчейн - це система запису та передачі інформації, що дозволяє зберігати дані у вигляді ланцюжка блоків. Кожен блок містить інформацію про певну

кількість транзакцій та хеш попереднього блоку. Таким чином, кожен блок забезпечує взаємозв'язок з попереднім блоком, що утворює ланцюжок.

Запровадження блокчейну значно збільшить економіку спільного використання даних IoT. IoT з підтримкою блокчейну надасть світові величезні бізнес-можливості для безпечної та надійної економіки обміну даними.

Причини того, що технології IoT можуть бути добре доповнені блокчейном, такі:

1) У IoT децентралізована природа технології блокчейну відіграватиме ключову роль у спілкуванні між ненадійними пристроями для збереження інформації про їх взаємодію, стан і перетравлення обмінюваних даних.

2) Блокчейн може значно зменшити ризики, з якими стикаються клієнти, і заощадити витрати на бізнес-процеси.

3) Блокчейн для IoT має бути розроблений як основа для додатків, які включають транзакції та взаємодію, включаючи смарт-контракти тощо.

Основною перешкодою для впровадження технології блокчейн є її нездатність до масштабування, яка лише погіршуватиметься у міру зростання кількості гаджетів IoT. Як наслідок, також можуть виникнути конфлікти транзакцій. Через те, що кожна транзакція блокчейну потребує схвалення від кожного вузла спільного доступу в мережі, транзакцій буде більше, ніж у централізованій системі баз даних, що призводить до більшої затримки. Крім того, підтримка хеш-кодів і ключів шифрування є трудомісткою операцією.

Хмарні обчислення.

Для обробки, аналізу та зберігання величезної кількості даних, які генеруються IoT, потрібні високошвидкісні комп'ютерні системи, які, як правило, дуже розосереджені. Застосування технологій хмарних обчислень вирішують це питання, пропонуючи обчислення, мережеві можливості та можливості зберігання в усіх компонентах систем IoT.

Варіанти хмарних служб включають:

- приватні - хмари, які належать і обслуговуються певним органом;
- публічні – хмари, які належать і обслуговуються постачальниками хма;
- гібридні – хмари, які є своєю «сумішшю» публічних і приватних.

Приватна хмара не є реалістичним вибором для новостворених і малих/середніх підприємств, оскільки створення центрів обробки даних і найм персоналу вимагають значних інвестицій. Однак, щоб забезпечити безпеку, безпеку та конфіденційність своїх користувачів, а також боротися з промисловим шпигунством заради конкурентної переваги, великі та визнані компанії вибирають створення приватної хмари. Для керування потоком завдань у хмарній мережі також пропонують використовувати рекурентні нейронні мережі (RNN), які в контексті хмарних обчислень прогнозують майбутні робочі навантаження та надають необхідні ресурси для підтримки балансу робочого процесу. Весь процес прогнозування залежить від швидкості надходження даних із пристроїв ІоТ.

Туманні обчислення.

Туманні обчислення вважаються розширенням хмарних обчислень, що дозволяє більшості комерційних програм і операцій взаємодіяти з ІоТ. Туманне обчислення стосується ситуації, коли бездротові та децентралізовані гаджети взаємодіють із мережею для виконання необхідних операцій у промислових програмах без впливу сторонніх осіб.

Туманні обчислення — це модель, яка забезпечує обчислення та зберігання даних між кінцевими пристроями та традиційними центрами хмарних обчислень. Основними частинами обчислень є туманні вузли, які містять пристрої, які забезпечують зберігання, обчислювальну потужність і підключення до віртуальної мережі. Ці вузли можна використовувати для експериментів на основі машинного навчання, оптимізації системи та прогнозування збоїв системи. Для багатьох промислових застосувань обчислення в тумані служить сполучною ланкою між статичними та динамічними середовищами обчислень. Туманні обчислення, як нова

обчислювальна парадигма, можуть стати потужним інструментом для захисту різноманітних пов'язаних промислових контекстів.

Периферійні обчислення.

Використовуючи обчислення, сховище та мережеві джерела, розкидані по каналах між ресурсами даних і хмарними обчислювальними центрами, периферійні обчислення є новою ідеєю, яка аналізує та обробляє дані. Щоб виконати локальну обробку джерел даних, зробити кілька швидких суджень і завантажити результати обчислень або попередньо оброблені дані в центр, периферійні обчислення використовують периферійні пристрої з достатніми обчислювальними можливостями. Периферійні обчислення ефективно знижують загальну затримку системи та потребу в пропускній здатності, а також підвищують загальну продуктивність системи. Використання периферійних обчислень у розумній індустрії дозволяє компаніям впроваджувати ефективні заходи безпеки, знижуючи ймовірність витоку даних під час зв'язку та зменшуючи обсяги даних, що зберігаються в хмарному центрі. Периферійні обчислення мають переваги, але є й ризик. Щоб запобігти втраті даних, систему необхідно ретельно спроектувати та налаштувати перед впровадженням. Багато периферійних обчислювальних пристроїв видаляють непотрібні дані після збору, що є доречним, але якщо дані корисні та втрачені, аналіз хмари буде неточним.

Аналітика великих даних.

Системи та пристрої ПоТ створюють масивні потоки даних, що вимагає використання надзвичайно складних високопродуктивних обчислювальних платформ для аналізу великих даних. Істотно збільшені обсяги даних IoT зробили нереальним використання традиційних методів обробки даних.

Простими словами, Big Data, або “великі дані”, – це просто велика кількість інформації, яка збирається з різних джерел і обробляється за допомогою спеціальних інструментів. Основні особливості Big Data можна порівняти з трьома “V”: обсяг

(Volume- кількість зібраної інформації), різноманітність (Variety- це різні типи даних) та швидкість (Velocity- наскільки швидко ми можемо збирати та обробляти ці дані).

На відміну від типових проблем з великими даними, великі дані IoT мають унікальні характеристики. Системи IoT дають змогу використовувати багато технологій/методів для збору масивних даних, зберігання, керування, обробки, аналізу та аналітики великих даних. Технології збору даних пропонують підключення до широкого спектру джерел даних, датчиків, цифрових пристроїв і взаємодії людини і машини в системі IoT. Величезна кількість даних може оброблятися поблизу датчиків, периферійних серверів і в хмарних центрах за допомогою технології керування та обробки даних. Технології аналізу даних пропонують різноманітні методи інтелектуального аналізу даних, ML, DL та статистичного аналізу на різних рівнях системи IoT. Зв'язок між гаджетами IoT та їх оточенням стає можливим завдяки технології активації.

Технології обробки та аналізу великих даних є ключовим компонентом майбутнього покоління систем IoT, незважаючи на їхню складність. Процес, наприклад, може виглядати так. Датчики IoT збирають інформацію всередині приміщення промислового виробництва про умови навколишнього середовища, наприклад вібрацію, температуру, вологість тощо. Дані про стан є ключовим компонентом, який дає змогу IoT запровадити інтелектуальне та масштабоване виробництво. Ці дані про стан збираються для більш глибокого аналізу та вивчення, і вони можуть попередити адміністраторів заводу про майбутню появу будь-якої несправності. Разом із сигналом про можливі несправності, система також включає прогнозований аналіз відсотка дефектних елементів, які створить виробнича машина.

Кіберфізична система

Кіберфізична система (КС) є однією з фундаментальних технологій Індустрії 4.0, яка використовує вбудовані інтелектуальні системи у виробниче обладнання для підключення виробничих секторів до реального середовища. Вона поєднується з IoT, щоб зв'язати реальний світ виробництва з віртуальним. Завдяки інтеграції мереж,

обчислень і зберігання КС створює розумні фабрики створюючи інтерактивне промислове середовище. З цієї точки зору розумні продукти стають дедалі легшими для ідентифікації та відстеження.

Кіберфізична система – це автоматизовані розподілені системи, які з’єднують комунікаційні мережі та обчислювальну інфраструктуру з фізичною реальністю. Вони відрізняються від звичайних вбудованих систем тим, що приділяють більшу увагу мережевим мережам пристроїв Industry 4.0. Як наслідок, вони містять блок керування, який може керувати датчиком і приводом, який створює взаємодію з фізичним середовищем. Потім вони обробляють зібрані дані та обмінюються ними з іншими програмами та службами через канал зв’язку. Ці системи повинні бути стабільними, надійними, безпечними та ефективними під час обслуговування. З цією метою одна з цілей Industry 4.0 — запропонувати оптимальну підтримку безпеки на всіх рівнях мережі КС, захищаючи конфіденційні дані, забезпечуючи при цьому анонімність даних.

Таблиця 1.1.

Узагальнення технологій для ІоТ та мета їх застосування

Технологія	Мета застосування в ІоТ
Блокчейн	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="727 1329 1464 1623">1. У ІоТ децентралізована природа технології блокчейну відіграватиме ключову роль у спілкуванні між ненадійними пристроями для збереження інформації про їх взаємодію, стан і перетравлення обмінюваних даних. <li data-bbox="727 1644 1464 1806">2. Блокчейн може значно зменшити ризики, з якими стикаються клієнти, і заощадити витрати на бізнес-процеси.

	3. Блокчейн для ПоТ має бути розроблений як основа для додатків, які включають транзакції та взаємодію, включаючи смарт-контракти тощо.
Туманні обчислення	Для багатьох промислових застосувань обчислення в тумані служить сполучною ланкою між статичними та динамічними середовищами обчислень.
Хмарні обчислення	Хмарні обчислення пропонують обчислення, мережеві можливості та можливості зберігання в усіх компонентах систем ПоТ.
Периферійні обчислення	Використання периферійних обчислень у розумній індустрії дозволяє компаніям впроваджувати ефективні заходи безпеки, знижуючи ймовірність витоку даних під час зв'язку та зменшуючи обсяги даних, що зберігаються в хмарному центрі.
Аналітика великих даних	Забезпечити аналіз величезних масивів даних, які генеруються пристроями і ПоТ.
Кіберфізична система	Забезпечити підключення виробничих секторів до реального середовища. Вона поєднується з IoT, щоб зв'язати реальний світ виробництва з віртуальним

2 ДОСЛІДЖЕННЯ 5G ЯК БАЗИ ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ ПОТ

2.1 Аналіз потенціалу технології 5G для промислових застосувань

Ринок промислового Інтернету речей 5G швидко зростає, оскільки промисловість усвідомлює потенційні переваги поєднання мереж 5G із технологією Інтернету речей. Завдяки високій пропускній здатності 5G і низькій затримці рішення ПоТ можуть надавати дані в реальному часі та аналітику для програм промислової автоматизації та моніторингу. Очікується, що це призведе до підвищення ефективності, зниження операційних витрат і підвищення продуктивності для підприємств у різних галузях, включаючи виробництво, транспорт і охорону здоров'я.

Одним із ключових факторів розвитку ринку 5G ПоТ є попит на передові технології, які може підтримати зростаючу тенденцію Індустрії 4.0. Це включає використання цифрових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання та блокчейн, які вимагають високошвидкісного надійного підключення для ефективного функціонування. Оскільки мережі 5G забезпечують швидший і надійніший зв'язок, ніж стільникові мережі попередніх поколінь, очікується, що ринок рішень 5G ПоТ продовжить зростати в найближчі роки, оскільки компанії прагнуть використовувати ці технології, щоб отримати конкурентну перевагу.

Одним з головних вкладів 5G є надзвичайно надійний зв'язок, який прокладає шлях для бездротового ізохронного керування рухом у реальному часі, сенсорних систем для моніторингу критичних процесів і програм AR/VR. І все це обслуговується єдиною системою бездротового зв'язку. Однак це не єдина функція, яка робить 5G придатним для додатків ПоТ. Завдяки випадкам використання, опублікованим 5G-ASIA, технологія 5G суттєво еволюціонувала протягом послідовних випусків, щоб забезпечити все більш широку підтримку для програм такого типу. Окрім можливостей радіозв'язку, 5G надає можливості які стосуються додатків ПоТ,

зокрема підтримку інтеграції Ethernet, чутливу до часу мережу (TSN) і безпеку в непублічних мережах.

Технічними критеріями, які є важливими для оцінки бездротових систем для випадків використання промислового Інтернету речей (IIoT), є[6]:

- масштабовані параметри розгортання;
- підтримка строгих вимог до продуктивності Інтернету речей із мобільністю та керованою зоною покриття;
- можливість використовувати різні моделі ліцензування спектру;
- можливість надавати можливості додаткам їх використання;
- підтримка технологій QoS і Ethernet загалом і TSN зокрема;
- специфікація та тестування позиціонування, безпеки та відповідності.

Щоб задовольнити вимоги підключення в промислових вертикалях, 3GPP заклав основу мережі радіодоступу 5G (RAN) і архітектури базової мережі (Core) у Release-15 з розширеним мобільним широкопasmовим зв'язком високої пропускної здатності (eMBB), масивним зв'язком машинного типу (mMTC), а також послуги наднадійного зв'язку з малою затримкою (URLLC). Ці базові послуги можна використовувати для підтримки різноманітних і різнорідних варіантів використання IIoT за допомогою уніфікованого рішення для підключення 5G.

eMBB дозволить забезпечити швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с і 20 Гбіт/с відповідно. mMTC надасть автономне середовище в промисловості, яке зробить можливим взаємодію між мільйоном пристроїв, які розташовані на одному квадратному кілометрі. URLLC забезпечить передачу від пристрою даних за 1 мс - час проходження по повітрю (RTT) і 99,999% надійності, що необхідно для критичних до часу програм керування. Співвідношення між вищезазначеними послугами та сценаріями використання інтелектуального виробництва зображено на рис. 2.1.

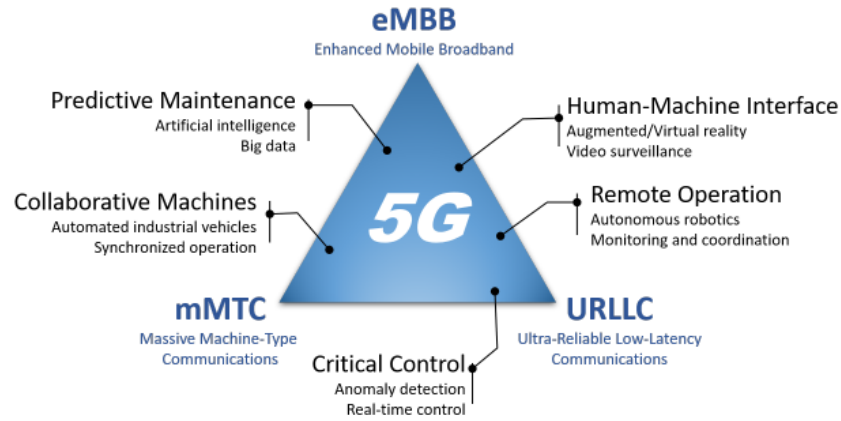


Рис.2.1. Категорії 5G для інтелектуального виробництва.

5G може підтримувати суворі потреби в затримці, які є критичними для послуг ІоТ. Затримка радіозв'язку менше 1 мс із надійністю пакетів понад 99,9999% (до 0,5 мс при 99,999% із оптимізацією) підтримується із затримкою E2E 1–2 мс і надійністю 99,999% (залежно від реалізації ядра).

Синхронізація часу (наприклад, з UTC) через радіоінтерфейс підтримується з точністю до мс. Все це можливо в мультисервісній мережі 5G, яка може бути оптимізована для необхідного типу послуг і потужності.

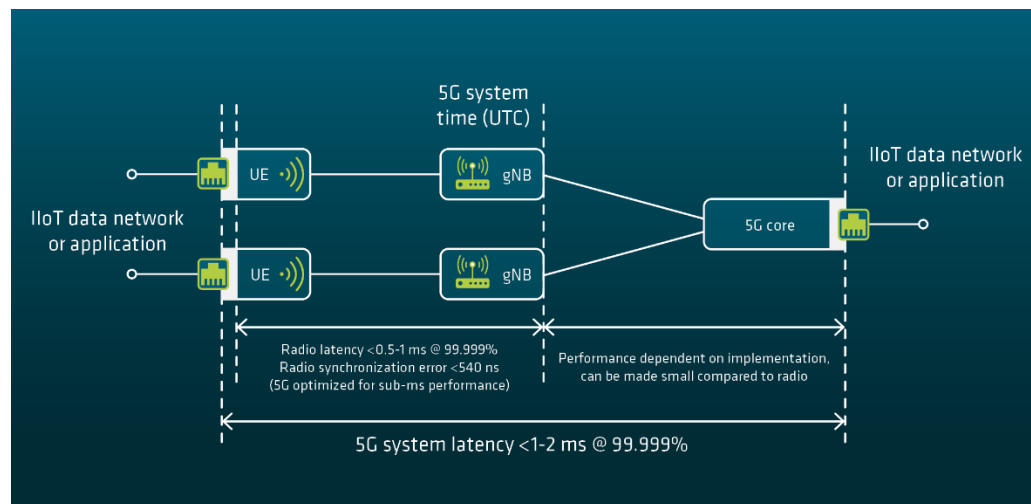


Рис.2.2. Затримка радіозв'язку в мережах 5G

5G підтримує передачу стандартного трафіку Ethernet IEEE 802.3 і являє собою «віртуальний міст», готовий для інтеграції з існуючими системами керування мережею. Це забезпечує базові можливості для використання 5G із системами на основі Ethernet. Платформа 5G QoS дозволяє налаштовувати потоки QoS, які є логічно розділеними, і разом із можливостями URLLC 5G підтримує критичний трафік, наприклад TSN, де система 5G моделюється як мережевий міст Ethernet, що підтримує TSN.

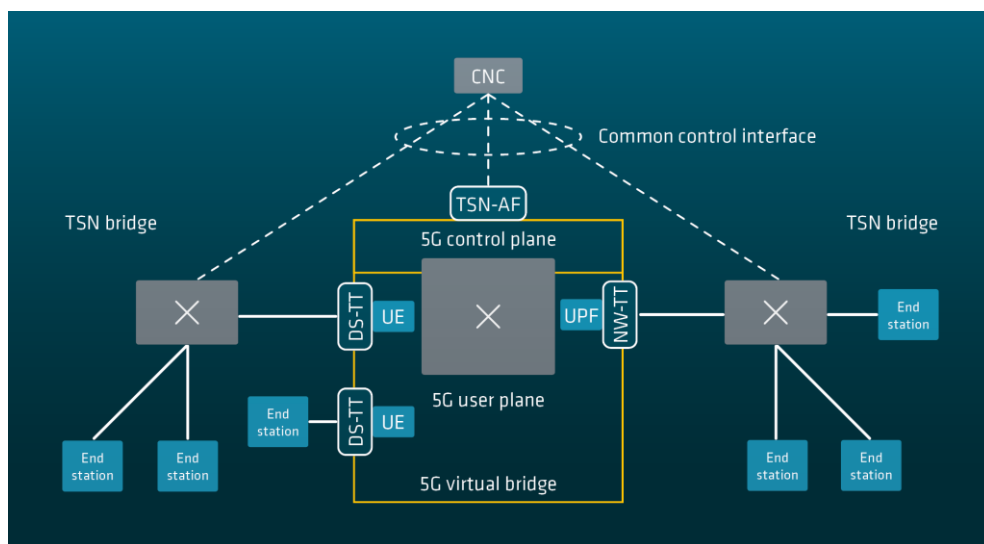


Рис 2.3. 5G моделюється як мережевий міст Ethernet, що підтримує TSN

Розгортання мережі 5G можна масштабувати залежно від необхідних послуг, кількості користувачів і території, яку потрібно охопити, і доступні як ліцензовані, так і неліцензійні режими роботи спектру. Граничні обчислення доступні для оптимізації використання мережі та ресурсів у кожному сценарії, а роботу мережі можна високо автоматизувати.

Сучасні технологічні можливості 5G надають можливість підтримки в рази більшої кількості пристроїв IoT, якщо проводити порівняння з мережами попереднього покоління. Це стало можливим за рахунок підходу множинного доступу

з розрідженим кодом (SCMA), який реалізовано у 5G. Це спектральна схема, яка об'єднує існуючі підходи CDMA з кодовим поділом і OFDM з ортогональним частотним поділом. SCMA, тобто множинний доступ з розрідженим кодом, підвищить спектральну ефективність бездротового радіодоступу.

За допомогою SCMA різні вхідні потоки даних безпосередньо відображаються на кодові слова, кожне з яких представляє розширений рівень передачі, так що кілька рівнів спільно використовують однакові частотно-часові ресурси OFDMA. Об'єднання користувачів, регулювання швидкості та алгоритми планування використовуються для покращення пропускну здатності низхідної лінії зв'язку у сильно завантаженій мережі.

5G також передбачає можливість прямого підключення бездротових пристроїв M2M. Це використовуватиметься для спеціальних з'єднань між вузлами, а також для забезпечення прямої передачі даних назад на смартфон 5G, дозволяючи користувачеві опитувати вузол напряму без необхідності проходити через стільникову мережу, подібно тому, як реалізовано Bluetooth у деяких промислових мережах IoT.

Зворотня негативна сторона цього - проблеми з безпекою. 5G передбачає, що прямі M2M-з'єднання будуть під мережевим контролем для забезпечення авторизації. Це потенційно може збільшити складність ПЗ бездротової мережі.

Для успішного розгортання 5G у промисловому середовищі необхідна тісна взаємодія між усіма системами, що охоплюють корпоративні ІКТ і виробничі операційні технології, щоб максимізувати можливості, які надають мережі 5G. Бачення полягає в тому, що промисловість зможе створити кіберфізичні системи, які забезпечать точне керування майже в реальному часі практично з будь-якої точки світу. Типові сценарії розгортання промислових рішень передбачають:

1. Можливість віддаленого управління обладнанням, наприклад, робототехнікою виробничої лінії на підприємстві. Типовими застосуваннями є зварювання, переміщення та складання.

2. Дистанційне керування обладнанням ланцюга постачання, наприклад, оператор може віддалено керувати обладнанням, наприклад роботами. Типові програми включають автономні наземні транспортні засоби (AGV) або вилкові навантажувачі.

3. Дистанційний моніторинг обладнання, наприклад, передача діагностичної інформації. Це надає змогу проводити контроль справності обладнання і попереджати його вихід з ладу. Також, передана діагностична інформація дозволяє технікам з обслуговування прибувають підготовленими для успішного ремонту та оновлення, коли це необхідно.

4. Зв'язок між машинами: замкнений зв'язок між машинами для оптимізації виробничих процесів.

5. Підтримка доповненої реальності в проектуванні, технічному обслуговуванні та ремонті. Кожне розгортання галузі має розглядати численні обмеження та визначати рішення, яке забезпечить оптимальне рішення для задоволення бізнес-вимог кінцевого користувача або корпоративних потреб.

На ряду з перевагами, впровадження 5G робить і певні виклики для промисловості. Перш за все, це вартість такого рішення. Виробнича промисловість має високі вимоги до скорочення витрат і впроваджуватиме нові програми, лише якщо буде доведено, що вони в кінцевому підсумку зменшать витрати. Друге важливе питання, яке слід враховувати – безпека промислового середовища. Сотні підключених автоматизованих пристроїв на заводі можуть створити небезпечне середовище для людей. Перш ніж впроваджувати таке рішення на виробництві, слід забезпечити гідний рівень безпеки персоналу, який буде працювати поряд з роботизованим виробництвом.

2.2 Непублічні (приватні) мережі 5G для промислових сценаріїв

На відміну від мережі, яка пропонує послуги мобільної мережі для широкого загалу, непублічна мережа 5G (NPN, приватна мережа) надає послуги мережі 5G чітко визначеній організації або групі організацій. Вони пропонують уніфіковане підключення з рядом переваг та оптимізованими послугами. Передбачається, що непублічна мережа, створена для підприємств, матиме всі функції загальнодоступних мереж 5G, включаючи зменшену затримку та вищу швидкість.

Непублічна мережа 5G розгортається в певних приміщеннях підприємства, таких як кампус або фабрика.

Переваги розгортання непублічної мережі:

1. Забезпечує високі вимоги до якості обслуговування
2. Високий рівень інформаційної безпеки.
3. Ізоляція від інших мереж, як форма захисту від збоїв у загальнодоступній мобільній мережі. Крім того, ізоляція може бути бажаною з міркувань продуктивності та конфіденційності.
4. Підзвітність. Непублічна мережа полегшує визначення відповідальності за доступність, обслуговування та роботу.

Приватні мережі 4G вже є комерційними та широковикористовуваними, розгортання непублічних мереж 5G є очікуванням, яке забезпечить виробникам можливість прибрати обмеження прив'язаних кабелів Ethernet, які обтяжують їхні виробничі цехи. Непублічні мережі п'ятого покоління дозволять підключити машини безпроводовим способом до хмари. Пропускна здатність мережі через кількість IoT і різноманітних бездротових пристроїв, які підключаються до мережі, буде в рази вищою після розгортання мережі 5G через вищу пропускну здатність мереж п'ятого покоління.

Виділяють два основних типи приватних мереж 5G.

Перший тип - інтегрована приватна мережа 5G. Їх ще називають гібридними приватними мережа 5G. Цей тип мереж працює з використанням інфраструктури (RAN/Core), спектру або послуг загальнодоступної мережі 5G на основі спільного використання, зберігаючи ізоляцію своїх приватних пристроїв. Прикладом галузей, де доцільно використовувати даний тип мереж є нафтова та газова промисловість, мережі кампусів, аеропорти та стадіони.

Другий тип - незалежна приватна мережа 5G. Незалежна приватна мережа 5G розгортається для одного підприємства, яке володіє інфраструктурою (RAN, Core, Edge Computing Nodes) і безпроводовим спектром, який зарезервованій для її використання. Він керує та контролює всю мережу, а пристрої, які він підключає, повністю ізолювані від загальнодоступних мереж MNO. Прикладом галузей, де доцільно використовувати даний тип мереж є охорона здоров'я, виробництво (ІоТ/TSN) і майнінг.

Таблиця 2.1.

Особливості приватних мереж для різних масштабів підприємств

Малі підприємства	Малі та середні підприємства	Великі підприємства
Приватна лінія 5G від оператора мобільного зв'язку з усіма її послугами надається в оренду	Віртуальна приватна мережа — це ще один тип інтегрованої приватної мережі, де загальнодоступна мережа 5G повністю використовується за допомогою наскрізного нарізання	Мережа 5G, у якій MEC і UPF загальнодоступної мережі 5G окремо розгорнуті для приватного використання, коли приватні дані обробляються локальною мережею

2.2.1 Автономні непублічні мережі (ізольоване розгортання)

У цьому варіанті передбачається незалежне, автономне розгортання мережі (рис.2.4). В даному випадку усі функції мережі розташовані всередині логічного периметра визначеного приміщення (наприклад, фабрики), а NPN відокремлена від загальнодоступної мережі.

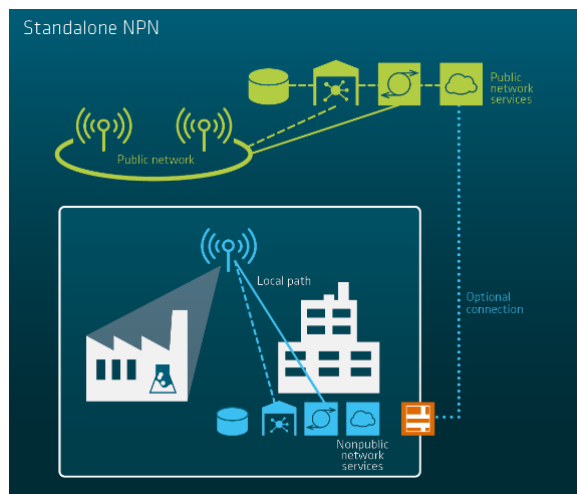


Рис. 2.4. Ізольоване розгортання непублічної мережі

Єдиний шлях зв'язку між NPN і загальнодоступною мережею – це брандмауер. Брандмауер — це чітко визначена та ідентифікована точка розмежування. Додаткове підключення до загальнодоступних мережевих служб через брандмауер, як показано на рис.2.4, може використовуватися для забезпечення доступу до публічних мережевих служб, таких як голос, у межах покриття NPN.

Крім того, пристрої NPN можуть підписатися безпосередньо на публічну мережу для доступу до її послуг (подвійна підписка). При бажанні додаткове підключення можна використовувати для доступу до послуг NPN через загальнодоступну мережу.

Крім того, оператор NPN може укладати угоди про роумінг з одним або декількома операторами загальнодоступних мереж, і для цієї мети також може

використовуватися додаткове підключення. Угоди про роумінг із мережами загального користування можуть мати технічні обмеження. Це залежатиме від конкретного випадку.

2.2.2 Непублічна мережа в поєднанні з публічними мережами

Цей варіант розгортання є своєрідним поєднанням загальнодоступних і непублічних мереж. Припускається, що певні випадки використання у визначених приміщеннях можуть повністю підтримуватися загальнодоступною мережею, тоді як інші вимагають спеціального NPN. Умовно, мережа складається з двох частин - одна загальнодоступна, інша непублічна, з трафіком, призначеним відповідній частині.

У цих сценаріях непублічна і загальнодоступна мережа спільно використовують частину мережі радіодоступу, тоді як інші функції мережі залишаються розділеними. Усі потоки даних, пов'язані з частиною трафіку непублічної мережі, знаходяться в межах логічного периметра визначеного виробничого приміщення і частина трафіку загальнодоступної мережі передається до загальнодоступної мережі. Специфікації 3GPP включають функціональні можливості, які дозволяють спільно використовувати RAN.

Для прикладу, на рис.2.5 показана лише одна спільна БС для RAN у визначених приміщеннях. Можна налаштувати додаткові базові станції, які доступні лише користувачам непублічної мережі. Непублічна мережа базується на технологіях, визначених 3GPP, і має власний ідентифікатор. Однак існує угода про спільне використання RAN з оператором загальнодоступної мережі.

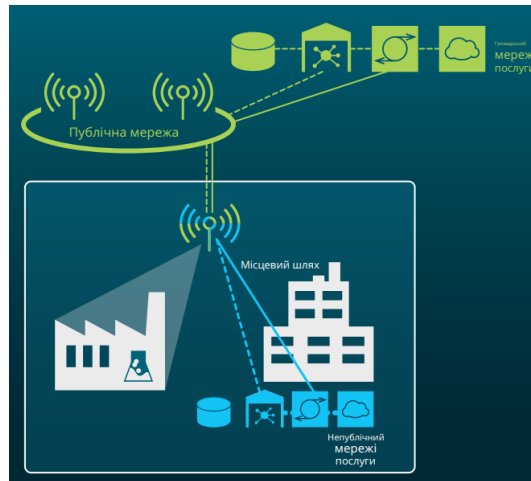


Рис.2.5. Непублічна мережа в поєднанні з публічними мережами

2.2.3 Спільна мережа радіодоступу та площина управління

При такому розгортанні непублічна мережа і мережа загального користування спільно використовують мережу радіодоступу для визначених приміщень, а завдання керування мережею завжди виконуються в мережі загального користування. Незважаючи на це, усі потоки трафіку непублічної мережі залишаються в межах логічного периметра визначених приміщень, тоді як частина трафіку загальнодоступної мережі передається до загальнодоступної мережі. Можливість такої реалізації відкривається за рахунок нарізки мережі, тобто створення логічно незалежних мереж у межах єдиної спільної фізичної інфраструктури. Розділення загальнодоступних і приватних мереж досягається використанням різних ідентифікаторів сегментів мережі. Другий шлях такої реалізації - використання функції точки доступу (APN). APN позначає кінцеву цільову мережу (куди направляти трафік), дозволяючи диференціювати частини трафіку.

На рис.2.6 показано одну спільну БС для заводської RAN, але також можна налаштувати додаткові БС, доступні лише для користувачів NPN.

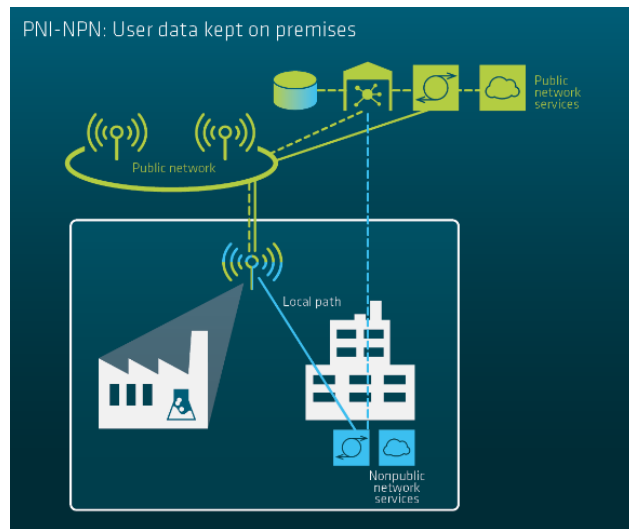


Рис.2.6. Спільна мережа радіодоступу та площина управління

У цьому сценарії приватна мережа розміщується в загальнодоступній мережі, а пристрої приватної мережі є абонентами загальнодоступної мережі. Це робить договірні відносини між приватною мережею і оператором загальнодоступної мережі більш простими. Це дозволяє пристроям приватної мережі підключатися безпосередньо до загальнодоступної мережі та її послуг, включаючи роумінг.

Також може існувати додаткове підключення служб приватної мережі до служб загальнодоступної мережі. Це додаткове з'єднання можна використовувати для підключення пристроїв приватної мережі до послуг приватної мережі через загальнодоступну мережу, коли пристрій перебуває поза зоною покриття приватної мережі, але в зоні покриття загальнодоступної мережі. Якщо доступ до загальнодоступних мережевих послуг здійснюється безпосередньо через загальнодоступну мережу, додаткове підключення для цієї мети не потрібне.

2.2.4 Непублічна мережа розміщена у загальнодоступній мережі

У цьому сценарії як частина трафіку загальнодоступної мережі, так і частина трафіку непублічної мережі є зовнішніми по відношенню до визначених приміщень, але розглядаються як частини абсолютно різних мереж. Це досягається завдяки використанню технологій віртуалізації мережевих функцій у (загальному) хмарному середовищі. Потім ці функції можна використовувати як для загальнодоступних, так і для приватних мережевих цілей. Цей сценарій можна реалізувати за допомогою нарізки мережі або функції APN (ім'я точки доступу). У цьому сценарії абоненти непублічної мережі, за замовчуванням, також є абонентами загальнодоступної мережі. Оскільки всі дані направляються через загальнодоступну мережу, доступ до загальнодоступних мережевих послуг і можливість роумінгу можна легко реалізувати відповідно до угоди між NPN і оператором загальнодоступної мережі.

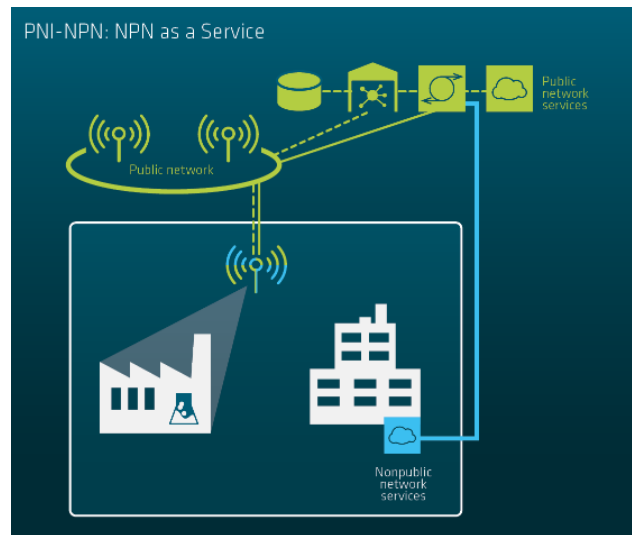


Рис.2.7. Непублічна мережа розміщена у загальнодоступній мережі

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ IIoT ЧЕРЕЗ 5G ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ

3.1 Аналіз концепції розумного виробництва

Дослідження постійно показують покращення вартості, продуктивності, якості, безпека та зростання доходів завдяки розгортанню технологій розумної фабрики, які поєднують можливості промислового Інтернету речей (IIoT), хмарних і периферійних обчислень, роботизованої автоматизації процесів (RPA), штучного інтелекту (AI) і машинного навчання, систем зору, а також системи доповненої та віртуальної реальності, серед іншого.

Власники виробництва мають широкий спектр вибору та можливостей щодо інтелектуальних трансформацій фабрик, як щодо того, які технології використовувати, так і щодо того, як їх розгорнути.

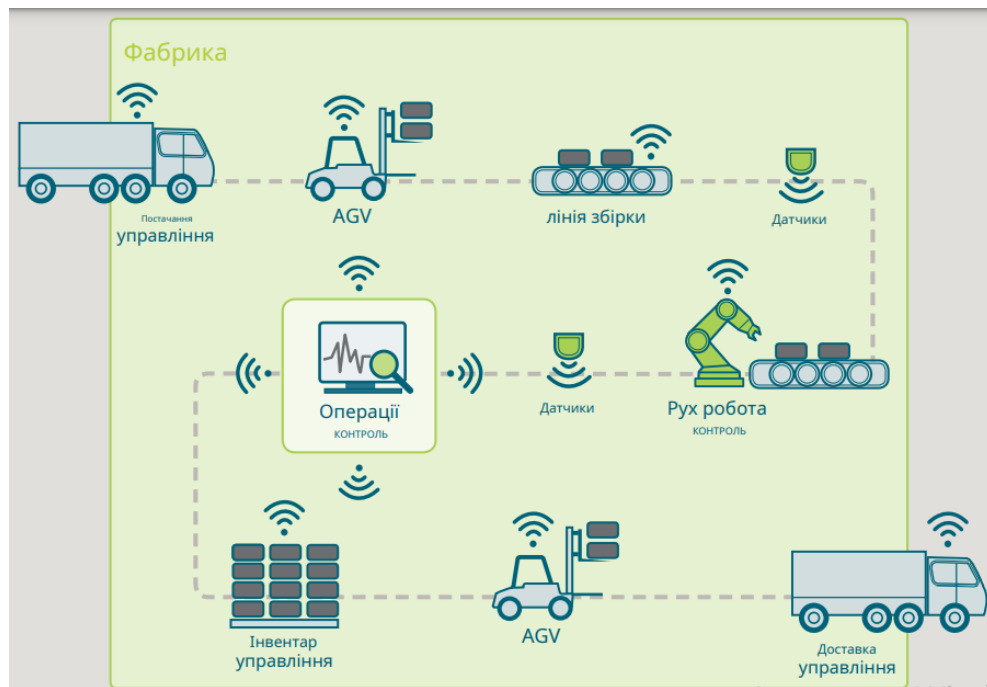


Рис.3.1. Приклади областей застосування 5G на фабриці майбутнього

Інтеграція 5G до існуючої мережевої архітектури вимагатиме додавання локальної мережі 5G, що складається з макро- або малих стільників, які повинні мати повну підтримку IP. Якщо наявна приватна мережа 4G знаходиться на місці, мережу зворотного зв'язку 4G можна повторно використовувати, коли це доступно та можливо, але пропускну здатність, ймовірно, потрібно буде оновити, оскільки мережа 5G передає набагато більше трафіку, ніж будь-яка стільникова мережа раніше. Мобільні мережі 5G суттєво вплинуть як на бездротову, так і на дротову сторону вимог до мережевої інфраструктури через збільшення передачі даних до дротових і бездротових мереж і з них.

Розумна фабрика представлена нижче на рис.3.2, розділена на кілька рівнів з різними виборами мережі на кожному рівні; кожна мережа має різні вимоги та по-різному оцінює важливість різних властивостей.

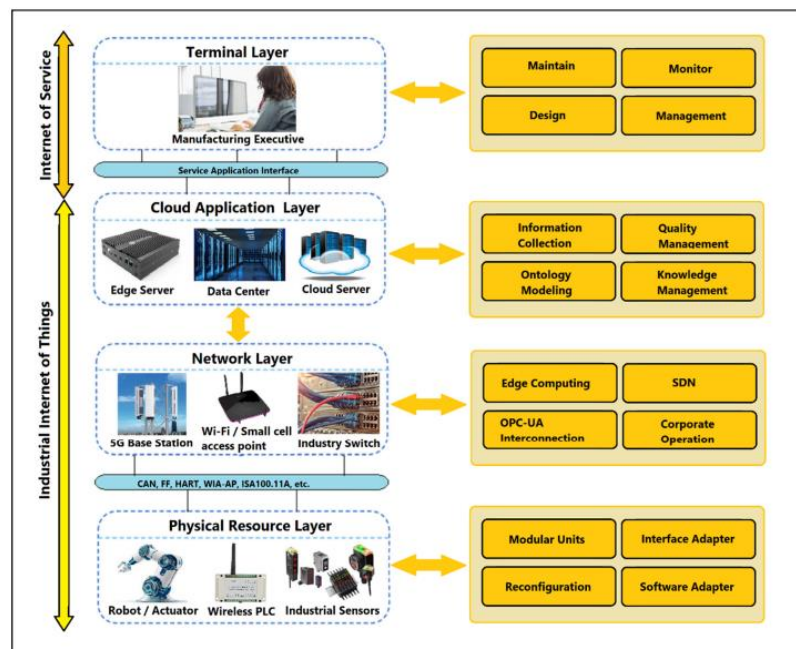


Рис. 3.2. Ієрархічна архітектура розумної фабрики [13].

Саме рішення на кожному з цих рівнів визначатимуть рівень інтеграції, який 5G може принести у виробництво. Ключова нова концепція нарізки мережі в 5G

дозволить орендарям отримати різні рівні зв'язку від свого постачальника послуг для різних випадків використання. Щоб досягти такого розрізання мережі, 5G буде повністю хмарною архітектурою, і це, зрештою, вимагатиме використання програмно визначеної мережі (SDN) і віртуалізації мережевих функцій (NFV) [14].

Майбутні мережі 5G повинні будуть забезпечувати значно більшу пропускну здатність системи, ніж сьогодні, і вирішити очікувану кризу спектра. Для забезпечення мережі 5G у виробничому середовищі буде потрібно багато вдосконалень інфраструктури. Вимоги будуть варіюватися від модернізації магістральної інфраструктури в організації до управління використанням наступного:

- прийняття спектру;
- внутрішнє розгортання оптоволокна (мінімум 10 Гб);
- високошвидкісні комутатори та маршрутизатори;
- обчислення на місці;
- високошвидкісне висхідне з'єднання з хмарними обчислювальними засобами;
- розгортання периферійних пристроїв.

Особливим завданням буде аналіз розміщення мережевого інтелекту на межі, в тумані або в приватній/загальнодоступній хмарі. Точне визначення місцезнаходження периферійної аналітики в будь-якому місці від межі мережі до межі хмарних обчислень стане проблемою для багатьох секторів. Для розвитку цифрової фабрики потрібна надійна бездротова мережа, яка може швидко передавати великі обсяги даних. Надійна низька затримка та висока швидкість передачі даних мають вирішальне значення для підключення інтелектуальних пристроїв в Industry 4.0. Перспектива швидкості завантаження від 1 Гбіт/с до 10 Гбіт/с і швидкості завантаження або затримки лише в 1 мілісекунду робить перспективу мережі 5G захоплюючою для промисловості, але реальність така, що зазвичай користувачі 5G не досягнуть нічого близького до теоретичних максимальних швидкостей. Фактична швидкість з'єднання 5G залежатиме від багатьох факторів, включаючи місцезнаходження, тип підключення до мережі, кількість інших пристроїв, які

підключаються, і характеристики пристрою, що використовується. Метою виробництва має бути досягнення мінімальної швидкості завантаження 50 Мбіт/с і затримки 10 мс у масштабований спосіб, що буде суттєвим покращенням порівняно з поточними показниками.

Таблиця 3.1.

Аналіз можливостей технології 5G при різних варіантах використання для розумного виробництва

Випадок використання	Опис і переваги	Ключові можливості 5G
Прогнозне обслуговування виробничих активів на заводі (з використанням великої мережі датчиків)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 5G дозволяє безперервно збирати дані з великої кількості датчиків 2. 5G дозволяє обробляти дані в периферійній хмарі 3. Доступ до більшої кількості даних у поєднанні з меншою затримкою та покращеною обробкою даних забезпечує більш точне та швидке прогнозне технічне обслуговування 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість підключення та передачі даних від одного мільйона датчиків на км² 2. Низька затримка: 1-10 мс. 3. Можливість Edge Cloud
Моніторинг активів, що використовуються під час виробничого процесу, для покращення енергоспоживання, безпеки, якості (нульовий брак)	<ol style="list-style-type: none"> 1. У масштабі з використанням датчиків і штучного інтелекту (алгоритму машинного навчання), а не перевірки лише людиною — потенційно доповненого доповненою реальністю 2. AR-дисплей (HUD) покращує безпеку, оскільки дозволяє працівнику використовувати обидві руки під час читання та взаємодії з дисплеєм і залишатися на зв'язку з експертами, які можуть дистанційно надавати зворотний зв'язок. 3. Граничні хмарні обчислення обмежують потребу в обчислювальній потужності гарнітури. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість підключення та передачі даних від одного мільйона датчиків на км² 2. Висока пропускна здатність. 3. 5G забезпечує взаємодію в реальному часі з активами, процесами та людей, які неможливі з гарнітурами на основі WiFi

Продовження таблиці 3.1

Аналіз можливостей технології 5G при різних варіантах використання для розумного виробництва

Виявлення небезпек, критичне за часом (за допомогою потокового відео високої роздільної здатності, датчиків IoT)	<p>1. Потокове відео високої роздільної здатності в поєднанні з алгоритмами машинного навчання для виявлення потенційних небезпек, таких як розливи, падіння предметів і небезпека спіткнутися</p> <p>2. Прямий бездротовий доступ до хмари в поєднанні зі штучним інтелектом може викликати миттєві сповіщення та ініціювати дії.</p>	<p>1. Надзвичайна надійність 5G і низька затримка (1-10 мс) дозволяють використовувати її для критично важливих систем.</p> <p>2. Висока пропускна здатність означає, що можна використовувати потокове відео високої роздільної здатності.</p>
Віддалений моніторинг і дистанційне обслуговування виробничих активів (наприклад, у а небезпечне середовище)	<p>1. — Віддалений моніторинг можна здійснювати за допомогою стаціонарних камер високої роздільної здатності (де дротові камери не можуть бути розміщені) і мобільних камер високої роздільної здатності (розміщених, наприклад, на роботі).</p> <p>2. Усуває необхідність для працівників безпосередньо взаємодіяти з активами, іноді в небезпечних місцях, заощаджуючи час і кошти та знижуючи ризики.</p>	<p>1. Можливість підключення та передачі даних від одного мільйона датчиків на км²</p> <p>2. Подовжений час автономної роботи пристроїв</p> <p>3. Оновлення програмного забезпечення та мікропрограми доставляються по повітрю.</p>
Хмарна робототехніка (обчислювальна потужність у хмарі, що призводить до менших і дешевших роботів)	<p>Обчислювальна потужність у хмарі:</p> <p>1. У поєднанні з бездротовим підключенням роботи можуть бути маленькими та дуже мобільними.</p> <p>2. Усуває потребу в керуючому обладнанні та досвіді для його використання.</p> <p>3. Хмарний доступ дозволяє оновлювати прошивку та програмне забезпечення по повітрю.</p>	<p>1. Гранична хмара</p> <p>2. Низька затримка – 1-10 мс</p> <p>3. Можливість обробляти великі об'єми даних бездротовим способом</p>

Продовження таблиці 3.1

Аналіз можливостей технології 5G при різних варіантах використання для розумного виробництва

Автоматизація в управлінні запасами або на заводі	<p>1. Автоматизований склад або вуличний майданчик з використанням автономних транспортних засобів, підключених до процесингового центру в периферійній хмарі.</p> <p>2. Оптимізований інвентар:</p> <ul style="list-style-type: none"> • кращий розподіл ресурсів • доставка «точно вчасно» • краща організація інвентаризації 	<p>1. Низька затримка та надійне підключення</p> <p>2. Висока швидкість передачі даних.</p> <p>3. Подовжений термін служби акумулятора.</p> <p>4. Можливість підключення до мільйона пристроїв IoT на км².</p> <p>5. Краща підтримка автоматизації за допомогою нарізки мережі (якість обслуговування).</p>
Навігація та допоміжна навігація всередині підприємства або за його межами за допомогою доповненої реальності	<p>1. Оператори оснащені пристроями доповненої реальності 5G, які надають їм інформацію в реальному часі про те, де і як знайти певні предмети.</p> <p>2. Економія часу</p> <p>3. Покращує безпеку</p>	<p>1. Висока швидкість передачі даних</p> <p>2. Низька затримка</p> <p>3. Гранична хмара: 5G дозволяє більшу частину обчислень, пов'язаних із навчанням у віртуальній реальності (VR), проводити в хмарі.</p>
Навчання на місці з використанням бездротового середовища VR/AR	<p>1. Дозволяє слухачам занурюватися в реалістичне середовище виробництва без пов'язаних із цим ризиків.</p> <p>2. Краща безпека та менше збоїв на виробничій лінії під час навчання.</p> <p>3. Більш гнучкі сценарії навчання з можливістю повного вивчення будь-якого сценарію.</p>	<p>1. Низька затримка та крайова хмара</p> <p>2. 5G дозволяє більшу частину обчислень, пов'язаних із навчанням VR, проводити в хмарі</p>

3.2 Використання Sidelink 5G у промислових заводських застосуваннях

3.1.1 Sidelink 5G

Sidelink — це пряма топологія «пристрій-пристрій» і «пристрій-мережа», стандартизована 3GPP, яка підтримує прямий зв'язок між двома чи більше пристроями, навіть якщо покриття стільникової мережі відсутнє. Технологія підтримує два основних режими роботи:

1. Базова станція активує ресурси бічної лінії зв'язку з налаштованими дозволами для періодичного трафіку або динамічними дозволами для аперіодичного трафіку.

2. Мобільний пристрій (МП) автономно використовує сенсорні механізми, щоб керувати інформацією каналу з найближчих мобільних пристроїв і вибирає ресурси для її передачі.

Sidelink 5G дає змогу напряму надсилати дані користувача між пристроями (через інтерфейс NR-PC5), а не маршрутизувати їх через базову станцію (gNB), що вимагає проходження через інтерфейс NR-Uu двічі (рис.3.3)

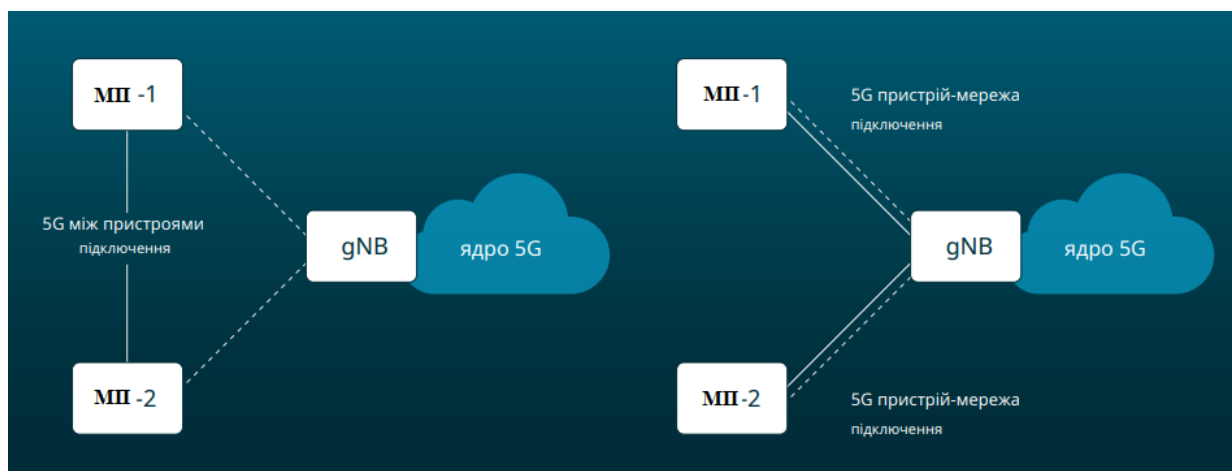


Рис.3.3. Підключення пристрій-пристрій (ліворуч) і пристрій-мережа (праворуч)

Зв'язок Sidelink 5G можна використовувати в IoT, коли пристрої знаходяться поблизу один від одного. МП таких типів, як мобільні роботи, як правило, зберігають лінію видимості з невеликим або без відносного руху. Для передачі даних користувача між пристроями один безпроводовий сеанс зв'язку 5G sidelink (NR-PC5) може принести переваги у вигляді зменшення затримки, оскільки в мережі існує лише один безпроводовий сеанс замість двох. Ступінь, до якого затримка зменшується за допомогою зв'язку 5G, залежить і від відстані між МП.

Для промислових рішень 5G sidelink може підвищити надійність, забезпечуючи додатковий шлях передачі. Це збільшує надмірність, наприклад, у випадку використання керування рухом, у якому збій одного шляху зв'язку можна компенсувати шляхом перемикання на інший. Однак це не стандартизовано в 3GPP і вимагає рішення із залученням подвійних модемних пристроїв над радіорівнями.

Sidelink 5G може розширити зону покриття шляхом ретрансляції передачі даних у райони, де немає або є лише часткове покриття RAN.

Дальність і позиціонування Sidelink 5G можуть зробити можливим визначення відстані між двома МП та обчислити їх відносне розташування незалежно від доступного покриття мережі.

Проаналізуємо основні сценарії розгортання Sidelink 5G у заводських умовах:

1. Кероване базовою станцією 5G з'єднання між пристроями. При цьому дані передаються через Sidelink 5G, а базова станція планує ресурси для передачі/повторної передачі по Sidelink.

2. Багатошляхове підключення, при якому передача даних від пристрою до мережі та від пристрою до пристрою відбувається одночасно для більшої надійності.

3. Мережевий ретранслятор для розширення зони покриття, у якому зв'язок між пристроями 5G допомагає базовій станції досягати МП, які знаходяться за межами зони покриття мережі.

4. Режим автономного розподілу ресурсів. При цьому режимі пристрої Sidelink 5G обмінюються даними без підтримки базової станції, а ресурси Sidelink автономно вибираються з (попередньо) налаштованого пулу ресурсів МП передавача (наприклад, за допомогою датчика).

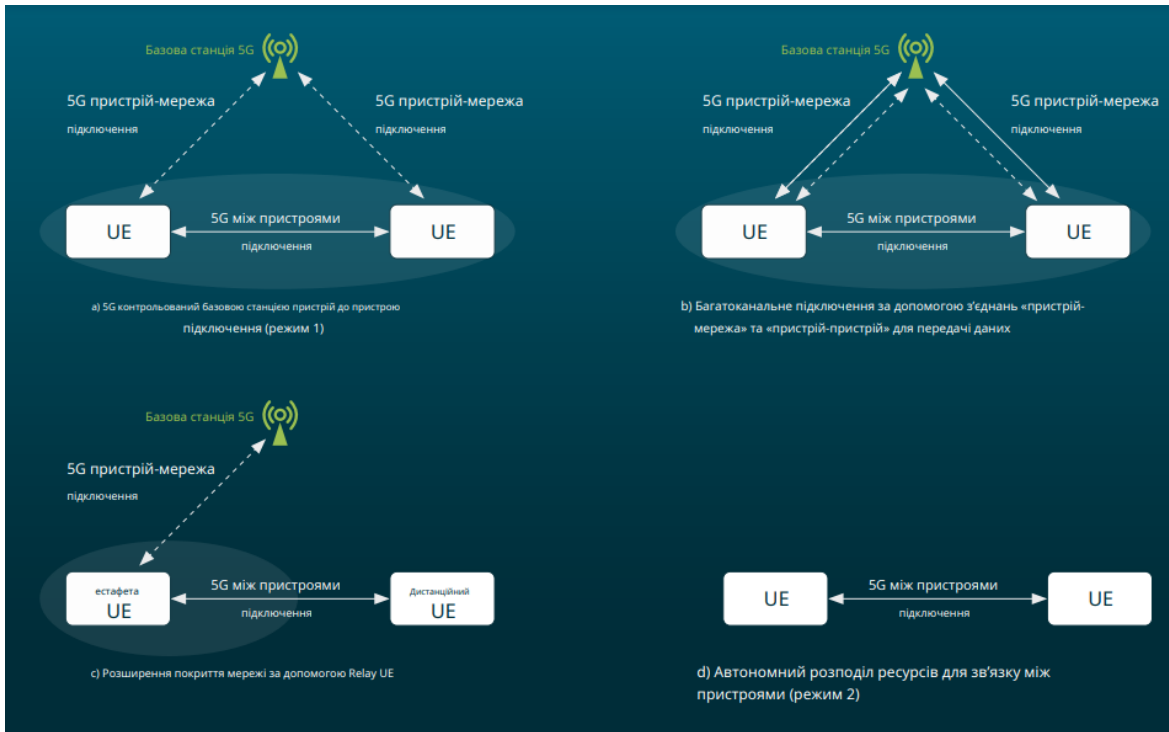


Рис. 3.4. Різні технічно можливі варіанти розгортання 5G між пристроями [11]

3.1.2 Варіанти використання 5G Sidelink у автоматизації виробництва

Перш ніж розглянути можливі варіанти використання, слід визначити вимоги до використання 5G Sidelink у заводських програмах.

1. Наднадійний зв'язок із малою затримкою. Це основна з вимог. Зв'язок детермінований і може бути періодичним із фіксованими інтервалами передачі.

2. Підтримка синхронізації часу та чутливого до часу зв'язку підтримує обмін періодичними/аперіодичними детермінованими повідомленнями, для яких група МП повинна бути синхронізована із загальним робочим годинником.

3. Ресурси повинні бути ефективно розподілені для 5G-зв'язку. Трафік сигналізації має бути мінімальним і не заважати поточному детермінованому зв'язку.

4. Необхідно оцінити досяжні межі з точки зору низької затримки та високої надійності у зв'язку з використанням зв'язку 5G sidelink на заводах, враховуючи при цьому відстані між пристроями 5G sidelink (наприклад, 10 метрів, 25 метрів, 50 метрів тощо) і як розподіляються та плануються ресурси.

Один із найпростіших варіантів використання 5G Sidelink для автоматизації виробництва, це контроль руху. Система керування рухом контролює рухомі та/або обертові частини машин чітко визначеним чином. Це може бути використано у друкарських машинах, верстатах або пакувальних машинах.

У цих сценаріях використання проводового підключення до шлюзу (що містить один або кілька мобільних пристроїв) у обертовій частині руки робота може бути неможливим. З'єднання 5G Sidelink між контролером руху, підключеним до МП, і одним або декількома приводами може зменшити затримку зв'язку або споживання ресурсів.

Зв'язок між промисловими контролерами вже використовується сьогодні для різних випадків використання, включаючи зв'язок між елементами керування між підсистемами руху. Приклади включають великі друкарські верстати, для яких неможливо або бажано, щоб один контролер руху керував усіма приводами, окремі машини, які співпрацюють для досягнення певного результату (наприклад, машини на складальній лінії), і окрема машина, яка сприяє до спільного завдання, контролюючи та координуючи передачу заготовок від одного верстата до іншого.

Ще один варіант використання - перенесення мобільних роботів.

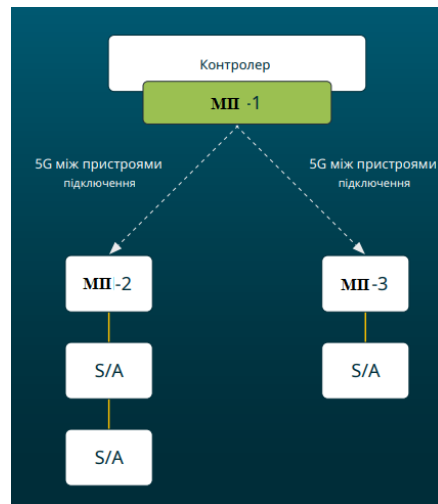


Рис.3.5.Приклад розгортання 5G Sidelink для контролера, підключеного до МП

На інтелектуальному заводі група мобільних роботів або AGV може співпрацювати як одна команда. Це може знадобитися, наприклад, для переміщення великогабаритних та важких елементів виробництва в межах цеху, чи погрузки вантажу. Для реалізації такої співпраці, програма керування повинна забезпечити максимальний контроль та можливість керування їхніми приводами та рухами. Sidelink 5G підходить для підтримки стабільного бездротового з'єднання між мобільними роботами або AGV, які працюють досить близько один від одного. Мобільні роботи/AGV інтегрують 5G МП для 5G-зв'язку. Додаток автоматизації на мобільних роботах/AGV, які співпрацюють, встановлює зв'язок 5G Sidelink. Коли мобільні роботи збираються навколо заготовки(вантаж), вони формують групу для співпраці, використовуючи базову інформацію про такі речі, як формування групи, конфігурація радіо 5G і робочий домен годинника для синхронізації часу та детермінованого зв'язку. Найпростіша реалізація цього сценарію використання для підйому та переміщення важких, але крихких заготовок — це два AGV у режимі віртуального з'єднання з необхідними KPI синхронності та періодичного детермінованого зв'язку.

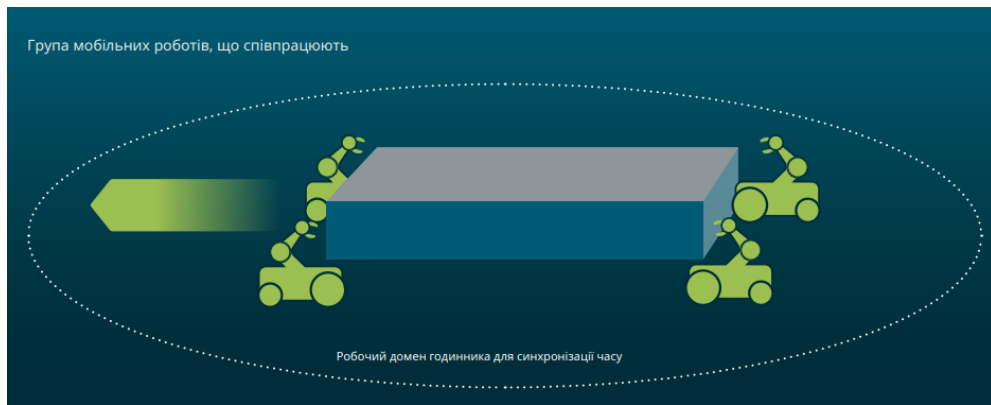


Рис. 3.6. Група мобільних роботів, які співпрацюють.

Мобільні роботи/AGV є частиною неpubлічної автономної або інтегрованої мережі 5G. Висока доступність служби зв'язку та наднизька затримка (зв'язок URLLC) є передумовами для спілкування мобільних роботів/AGV один з одним. Обмін командами керування та зворотним зв'язком здійснюється за допомогою періодичного детермінованого зв'язку та чутливої до часу мережі. Це відбувається через з'єднання 5G. IEEE 802.1AS може бути застосований для розподілу годинника та синхронізації часу по каналу бічної лінії зв'язку 5G. Важливо, щоб усі мобільні роботи/AGV отримували інформацію про програму одночасно, точніше, протягом певного інтервалу часу. Мобільні роботи/AGV можуть обмінюватися необхідною інформацією, такою як інформація про стан, зворотній зв'язок керування та команди керування, а також інформацією про локалізацію через групову або одноадресну передачу. Конкретні вимоги програми керування щодо KPI зв'язку також залежать від роботи структури та властивості виробу; наприклад, він може бути більш еластичним або крихким, ніж зазвичай.

Розподіл ресурсів для зв'язку 5G має бути ефективним і уникати перешкод для постійного періодичного детермінованого зв'язку між мобільними роботами. Інформацію про локалізацію, яка може бути абсолютною або відносною, можна обмінювати разом із даними зв'язку.

Діапазон передачі, у якому мобільні роботи повинні підтримувати Sidelink 5G, залежить від розміру заготовки. Для великих заготовок може бути достатньо діапазону до 50 метрів. Заготовки меншого розміру можна транспортувати разом із меншим діапазоном передачі, наприклад 10 або 25 метрів. Для більших заготовок діапазон зв'язку 100 метрів може бути реалізований за допомогою проміжного мобільного робота/AGV, який діє як реле.

Відносно позиціонування в розумних фабриках є ще одним поширеним способом використання.

Позиціонування є високоцінним потенціалом у підключених галузях промисловості та автоматизації; його можна використовувати для AGV, AMR, вилкових навантажувачів і відстеження цінних активів. Широкий спектр рішень для локалізації транспортних засобів на основі датчиків, таких як локалізація на основі лазерного сканера для відстеження маршруту та автоматичне оброблення піддонів, вимагає відносного позиціонування з точністю до сантиметра. На відкритих відкритих майданчиках (наприклад, у заводському дворі) AGV з позиціонуванням LiDAR не дає хороших результатів позиціонування. Тому для досягнення оптимальної локалізації необхідно використовувати супутникове позиціонування за допомогою GNSS та/або 5G.

У вузьких проходах усередині заводу позиціонування 5G може не забезпечувати достатньої точності через відбиття, а позиціонування GNSS недоступне; у цих випадках позиціонування LiDAR у поєднанні з позиціонуванням 5G із середньою точністю дає хороші результати. Найкраще рішення залежить від випадку використання та ситуації. Гібридні підходи до позиціонування можна застосовувати для досягнення необхідної надійності та точності в різних випадках використання та ситуаціях, поєднуючи стільниковий зв'язок, UWB, GNSS-RTK, камери, LiDAR, IMU тощо.

3.2 Практична реалізацію IIoT через 5G

У цьому розділі буде представлено практичну реалізацію IIoT через 5G, що складається з різних компонентів інфраструктури та додатків. З точки зору інфраструктури, реалізація включає кінцевий пристрій 5G Інтернет речей (IIoT), який збирає дані зондування з активів цеху та навколишнього середовища та робить ці дані доступними через промислову мережу 5G.

Виробничі приміщення становлять складну систему, що включає різні технології, розподілені по всьому кампусу. Підключивши різні активи (наприклад, датчики, пристрої, машини), наявні на цеху, до промислової мережі, можна збирати широкий спектр заводських даних (наприклад, якість повітря, маршрути руху транспортних засобів, шум, рухи, енергія). споживання, розташування тощо). Потім зібрані дані обробляються для отримання інформації, яку керівний персонал заводу може використовувати для прийняття обґрунтованих рішень. Ці рішення можуть підвищити ефективність, безпеку та захист промислових операцій, зробити їх економічно ефективнішими та підвищити загальну продуктивність. Весь цей процес підключення промислових активів на цеху називається Industrial IIoT (IIoT).

Типові програми IIoT включають прогнозне технічне обслуговування, відстеження активів і управління енергією. Протягом усієї еволюції промислових мереж більшість комунікаційних рішень розроблялися як спеціалізовані програми без особливого акценту на сумісності. Відсутність сумісності є важливою проблемою, яка загрожує прогнозованій економічній цінності IIoT у промислових умовах. Це також залишає можливість для розробки рішень, які з'єднують усі активи промислового середовища з однією мережею. Удосконалений кінцевий пристрій 5G IIoT має на меті реалізувати це відкриття, надаючи модернізовані, неінтрузивні можливості зондування та активації, орієнтуючись на різні вимоги випадків використання в промисловому середовищі.

Крім того, п'яте покоління мобільного широкосмугового зв'язку розглядається як засіб розвитку ІоТ і додатково заохочує його впровадження, оскільки 5G дозволяє передавати великі обсяги даних із меншою затримкою та вищою надійністю через безпечні канали зв'язку, а також має гнучкість, необхідна для адаптації його комунікаційних характеристик відповідно до промислових вимог. Оскільки галузеві комунікації часто мають вирішальне значення для правильної роботи промислових приміщень в цілому, до них висуваються суворі вимоги щодо безпеки та ізоляції, і неопублічна мережа 5G (NPN) може відповідати цим вимогам під час розгортання промислової мережі 5G. Однак через витрати, регулювання чи досвід персоналу очікується, що кожна галузь має різні вимоги до розгортання промислової мережі 5G.

Таким чином, були розроблені різні стратегії розгортання NPN, які обмінювали витрати на розгортання та обслуговування на безпеку, ізоляцію та контроль над мережею. Розроблені розгортання варіюються від автономної неопублічної мережі (SNPN) до PNI-NPN з різним рівнем виділених ресурсів. Детально ці моделі описано у розділі 2.

Передбачається, що промислова мережа 5G для прикладу буде розгорнута окремо віддалено та налаштована для відтворення мережі PNI-NPN із спільною площиною радіозв'язку та керування. Для досягнення цієї мети ядро автономної мережі 5G (5G SA), розгорнуте віддалено від виробництва слугувало базовою мережею оператора.

Промислова мережа використовує радіообладнання, розгорнуте на заводі, яке підключено до фабричного периферійного комп'ютера з множинним доступом (MEC) із функцією площини користувача (UPF) локального прориву (LBO). MEC логічно відокремлює промисловий трафік від громадського трафіку, пересилаючи промисловий трафік до промислової NPN, а громадський трафік до мережі ІТАV. З точки зору застосування, як кінцевий пристрій 5G ІоТ, так і промислова мережа 5G можуть використовуватися для різних цілей. Наприклад, ці компоненти інфраструктури доповнюються прикладним компонентом, інтелектуальним

помічником. Цей помічник використовує дані з цеху, зібрані за допомогою системи керування даними, щоб робити прогнози та, як наслідок, виявляти аномалії на основі цих прогнозів. Завдяки можливостям мережі 5G цей помічник може використовувати дані, зібрані відповідно до певного ключового показника ефективності (KPI) (наприклад, низька затримка, висока надійність) і може давати прогнози, що дозволяє нам зрозуміти поведінку різних активів у цеху.

Кінцевий пристрій 5G IoT, який можна модифікувати та надає засоби для плавного та ненав'язливого керування та визначення різних аспектів різноманітних промислових активів, а також навколишнього середовища.

Мережа 5G, розгорнута на цеху, підтримує промисловий NPN, тоді як продуктивність зв'язку адаптована до конкретних потреб цільового промислового використання. Інтелектуальний помічник, який збирає та обробляє дані в реальному часі з метою прогнозування майбутньої поведінки та виявлення аномалій.

Практична реалізація даної інфраструктури та прикладних компонентів, яка служить базовою лінією та надає уроки для майбутнього розгортання IIoT через 5G NPN.

Кінцеві пристрої, які виявляють і активують на виробництві, є важливими компонентами реалізації IIoT з підтримкою 5G. Однак, незважаючи на потенціал 5G, більшість пропозицій для промислових кінцевих пристроїв або покладаються на інші протоколи бездротового зв'язку, або використовують переваги 5G через мережі доступу, що не входять до проекту партнерства третього покоління (3GPP).

Випадок використання модернізації та прогнозованого технічного обслуговування.

Цей сценарій використання зосереджений на застарілих активах, встановлених на території клієнта (наприклад, котел) та/або промислових активах у цеху (наприклад, повітряні компресори). Пристрій, підключений до активу, здатний сприймати та активувати такий актив і передавати отримані дані в мережу виробника. Датчик не повинен заважати (тобто бути неутручальним) у роботу активів і не

повинен споживати занадто багато енергії. Дані використовуються для розуміння функціонування активу та можуть служити для прогнозування процесу обслуговування. Враховуючи це, датчик має бути модульним і мати інтерфейси для підтримки різних датчиків, які допомагають діагностувати стан працездатності машини. Температура, тиск, вологість, вібрація, енергія та витік повітря є прикладами показань таких датчиків.

Потім отримані дані надсилаються за допомогою телеметричного транспорту з чергою повідомлень (MQTT) до сховища даних і обробляються для визначення поведінки, яка може призвести до майбутніх збоїв машини. У таких ситуаціях слід генерувати автоматичні сигнали тривоги, щоб запускати профілактичні процедури технічного обслуговування активів, таким чином зменшуючи час простою технічного обслуговування та пов'язані з ним витрати.

Для розгортання цього сценарію використання мережа повинна забезпечити передачу даних датчика в сховище даних, одночасно забезпечуючи надійний та енергоефективний зв'язок.

Мережа також повинна бути здатна передавати великі обсяги даних і гарантувати, що отримані дані не повинні залишати приміщення виробника.

Випадок використання енергоменеджменту

Цей сценарій використання спрямований на створення профілів енергоспоживання промислових активів (тобто повітряних компресорів) на основі даних, зібраних із приєднаних сенсорних пристроїв. Враховуючи це, такі пристрої повинні мати можливість збору різних даних, пов'язаних із споживанням енергії активами. Дані датчиків надсилаються до сховища, де вони зберігаються та обробляються. Мета полягає в тому, щоб допомогти запускати команди (тобто активацію) і сповіщення, коли споживання енергії аномальне або виходить за бажані межі.

Оскільки кількість промислових активів, які слід контролювати на цехах, є великою, цей варіант використання вимагає мережі з надійним зв'язком для

підтримки багатьох з'єднань, що справляється з великим обсягом виробленого трафіку даних, що йде від цеху до сховища даних. З упором на управління енергією, усі компоненти, які використовуються в цьому варіанті використання, повинні будуватися з урахуванням енергоефективності.

Враховуючи перелічені вимоги, можна зробити висновок, що варіанти використання мають спільну мету та неконфліктні вимоги, що дозволяє створювати їх на одній системній інфраструктурі. Обидва варіанти використання розглядають цеховий сенсорний пристрій з інтерфейсом 5G NR, який збирає різні дані про промислові активи. Пристрій має бути ненав'язливим за допомогою модульної та модернізованої конструкції, що супроводжується адаптивним корпусом, який має відкривати роз'єми та датчики пристрою, щоб гарантувати доступ до портів розширення та надійні показання датчиків. Крім того, це не повинно додавати тягар споживання енергії до активів. Обмін даними здійснюється через надійну та енергоефективну мережу 5G між цехом і серверними операціями. Потрапивши на сервер, дані обробляються за допомогою механізму прогнозування несправностей, щоб передбачити поведінку, виявити аномалії в цехових активах і викликати попередження або ініціювати команди, які спонукають до проактивного технічного обслуговування та процедур управління енергією. Запропоноване рішення містить інфраструктуру та прикладні компоненти, які збирають, транспортують і обробляють цехові дані та керують датчиками.

На рис.3.7 представлено схематичне зображення всієї екосистеми ІоТ, що працює через 5G. Він ілюструє, як інфраструктура та прикладні компоненти працюють разом для практичного рішення ІоТ, розгорнутого на основі реалізації 5G NPN, спрямованого на створення розумніших, екологічніших та екологічно чистих заводів. Кінцевий пристрій ІоТ для збору даних із промислових активів у цехах, оскільки ми зацікавлені в розумінні поведінки такої чистої системи 5G у промисловому середовищі, яка характеризуватиме повноцінну систему, яку ще належить розгорнути у виробництві.

З точки зору інфраструктури, різні пристрої Інтернету речей сприймають активи цехів і впливають на них. Інше обладнання користувача (UE) (наприклад, смартфон) також може бути присутнім у цеху. Дані датчиків, команди активації та трафік UE надсилаються через мережу 5G.

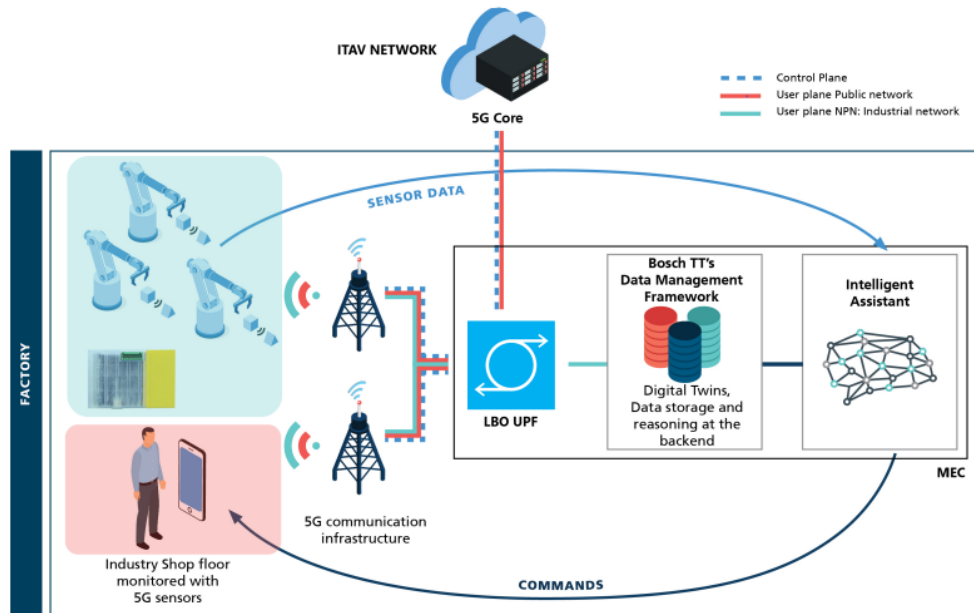


Рис. 3.7. Екосистема ІоТ на базі технології 5G.

Промислова частина цієї мережі розгорнута на заводі та підключена до базової мережі ITAV. Ця архітектура базується на розгортанні NPN, що забезпечує бажану ізоляцію, не дозволяючи промисловим даним залишати приміщення фабрики. MEC з LBO UPF перенаправляє трафік таким чином, щоб гарантувати, що UE, як загальнодоступний користувач, має доступ лише до загальнодоступної мережі (безперервна червона лінія), тоді як промислові дані надсилаються лише до промислової мережі (безперервна зелена лінія). Що стосується застосування, екосистема дозволяє інтелектуальному помічнику виробляти відповідну інформацію про управління енергією та технічне обслуговування на основі отриманих даних, що дозволяє приймати розумні рішення на основі даних.

Кінцевий пристрій 5G ІоТ. Головна мета кінцевого пристрою – збирати дані з промислових активів і навколишнього середовища та надсилати їх на головний

сервер, підключений через 5G NR. На рисунку 3.8 представлена високорівнева архітектура його апаратних компонентів. Процесором є платформа Kallisto® IoT, яка оснащена nRF52840 від Nordic під керуванням ОС Zephyr. Kallisto® також поставляється з набором датчиків, корисних для збору даних у промислових середовищах, а саме: температури, вологості, тиску, газу та впливу світла.

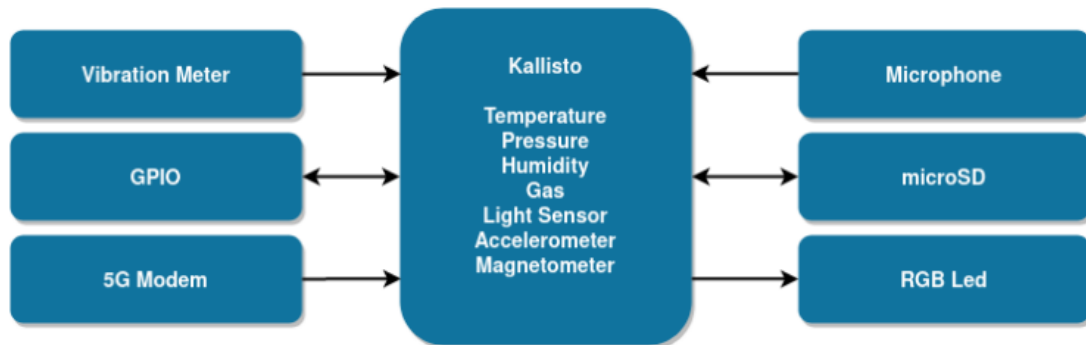


Рис. 3.8. Високорівнева апаратна архітектура кінцевого пристрою 5G IoT

Для подальшого узгодження з варіантами використання, визначеними в додано до кінцевого пристрою вимірювач вібрації та мікрофон для вимірювання рівня шуму, а також два вхідні порти та два вихідні порти для активації зовнішніх пристроїв. Також доступний набір вводу/виводу загального призначення (GPIO), який дозволяє створювати екземпляри як послідовного периферійного інтерфейсу (SPI), так і інтерфейсу інтегрованої схеми (I2C) для підключення зовнішніх компонентів (наприклад, датчиків наближення, інфрачервоного випромінювання та датчиків рН або навіть інший датчик температури для вимірювання даних про температуру в іншому місці, ніж пристрій).

Світлодіод RGB також доступний для вказівки стану кінцевого пристрою під час роботи. Кінцевий пристрій може отримувати живлення від універсальної послідовної шини типу C (USB-C) або від акумулятора. Він має схему керування зарядом акумулятора, що дозволяє заряджати акумулятор, коли універсальна послідовна шина (USB) і акумулятор підключені до плати, а також підтримує карту

microSD для резервного копіювання та енергонезалежного зберігання. Підтримка 5G додається за допомогою модему 5G, підключеного до Kallisto® через універсальний асинхронний приймач-передавач (UART). Вибір цього модему та антени 5G був одним із основних етапів процесу розробки, оскільки це визначає якість з'єднання.

Промислова мережа 5G

Промислова мережа 5G, для прикладу, була розгорнута на заводі, і була підключена до ядра 5G, розгорнутого іншої країні. Для розгортання цієї мережі 5G мережа повинна відповідати всім вимогам безпеки та ізоляції виробника, а також відповідати нормам країни де розгортається. Припустимо, що розгорнути мережу 5G PNI-NPN на заводі.

На рис.3.9 представлено загальну архітектуру 5G, ідентифікуючи різні ресурси та їхні взаємозв'язки. Сайт підприємства представлений ліворуч, включаючи рішення для радіо та MEC. Було налаштовано автоматичні сусідські відносини, щоб забезпечити безперебійну передачу в усьому цеху. З правого боку ядро мережі розгортається в приміщеннях ITAV разом із допоміжною мережевою структурою, яка забезпечує комунікаційну підтримку інфраструктури NFV (NFVI), де реалізуються функції 5G. Моніторинг NFVI здійснюється через платформу керування мережею 5G, яка організовує та керує всією мережею 5G.

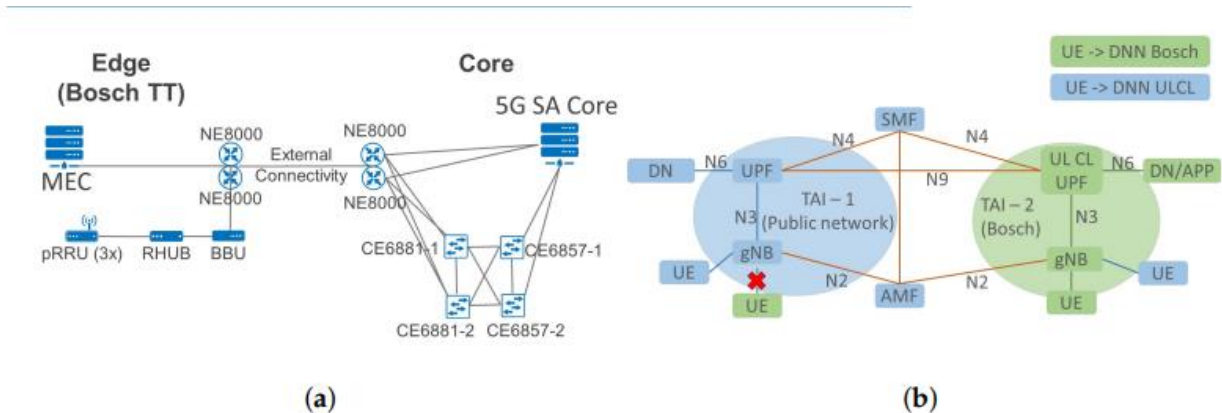


Рис.3.9. Огляд промислової мережі 5G. (a) Огляд архітектури 5G. (b) Схема розгортання краю на підприємстві

На рис.3.9 детально описана взаємодія між різними функціями 5G. Сині елементи представляють основні розгортання, а зелені – розгортання підприємства. Функція локального прориву базується на розгортанні класифікатора висхідної лінії зв'язку (ULCL), який допомагає керувати трафіком у приміщеннях підприємства. ULCL — це функція UPF, яка спрямована на перенаправлення трафіку висхідної лінії зв'язку на основі правил фільтрації, наданих функцією керування сеансом (SMF), до мережі передачі даних. Для цього розгортання інша локальна область мережі передачі даних (LADN) використовувалася для MEC з чіткою назвою мережі передачі даних (DNN) і областю відстеження (TA). LADN і TA поділяють радіомережу на секції, і в поєднанні з DNN лише дозволені UE можуть отримати доступ до мережі в секції радіомережі підприємства. Таким чином, мережа MEC ідентифікується за допомогою іншого DNN та ідентифікатора зони відстеження (TAI), ніж ті, що використовуються в базовій мережі, що забезпечує повну ізоляцію мережі в площині даних між обома сайтами. DNN і TAI використовуються для вибору UPF, що обслуговує даний UE. Таким чином, ця конфігурація гарантує, що лише ITAV UE можуть отримати доступ до ITAV UPF і що Bosch TT UE можуть отримати доступ до UPF підприємства, не дозволяючи ITAV UE отримати доступ до TT UPF підприємства (лише можливість використовувати площину керування), а TT UE підприємства не можуть отримати доступ до мережі ITAV взагалі.

Інфраструктура 5GAIner була розроблена з урахуванням вимог передбачуваних варіантів використання, які мають підтримуватися. Ми розгорнули в інфраструктурі такі мережеві функції (NF): функцію сервера автентифікації (AUSF), функцію керування доступом і мобільністю (AMF), SMF, функцію мережевого сховища (NRF), функцію вибору фрагмента мережі (NSSF) і уніфіковане керування даними. (UDM) в площині керування. Два UPF були розгорнуті в площині користувача, один розгорнутий у ядрі 5G на ITAV, а інший у MEC на заводі.

ВИСНОВКИ

В роботі проведено глибокий аналіз вимог до мереж ІоТ та співставлено їх з можливостями мереж 5G. Це дозволило зробити висновок, що саме цей стандарт стільникового зв'язку має потенціал для революції у промисловості та з часом в разі підвищить продуктивність.

Було досліджено можливості використання 5G Sidelink для розумного виробництва. Визначено, що такий тип взаємодії підходить для таких випадків використання, як контролер руху, контролер-контролер, кооперативні роботи-переноски та взаємне позиціонування. Зв'язок 5G Sidelink для додатків на близькій відстані є привабливим для заводського розгортання та може принести значні переваги. Однак проблеми та обмеження також були виявлені у зв'язку з доступністю, надійністю та радіусом дії 5G Sidelink.

У цій роботі описано кілька варіантів реалізації мережі для приватних мереж на основі специфікацій 3GPP. Вони варіюються від повністю самостійних автономних, які не мають підключення до загальнодоступної мережі, до приватних мереж, які повністю розміщені операторами загальнодоступних мереж. Зроблено аналіз доцільності вибору кожного з варіантів в залежності від специфіки і розміру підприємства.

Представлено та описано екосистема ІоТ на базі технології 5G, яка дозволяють збирати та зберігати великі обсяги заводських даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Shams Forruque Ahmeda,*, Md. Sakib Bin Alamb, Mahfara Hoquea, Aiman Lameesab, Shaila Afrina, Tasfia Faraha, Maliha Kabira, GM Shafiullahc, S.M. Muyeend « Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions» Computers and ElectricalEngineering110(2023)108847
2. Gebremichael T, Ledwaba LPI, Eldefrawy MH, Hancke GP, Pereira N, Gidlund M, et al. Безпека та конфіденційність у промисловому Інтернеті речей: поточні стандарти та майбутні виклики. IEEE Access 2020; 8:152351–66.
3. Anitha, T.; Manimurugan, S.; Sridhar, S.; Mathupriya, S.; Latha, G.C.P. A Review on Communication Protocols of Industrial Internet of Things. In Proceedings of 2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology, ICCIT 2022, Tabuk, Saudi Arabia, 25–27 January 2022; pp. 418–423.
4. L.D.Xu,W.He,andS.Li,“Internetof things inindustries: Asurvey,” IEEE Transactions on Industrial Informatics,vol.10,no.4,pp.22332243,Nov2014.
5. George, A. Shaji & Fernando, Sagayarajan. (2023). Exploring the Potential and Limitations of 5G Technology: A Unique Perspective. 01. 160-174. 10.5281/zenodo.7869011.
6. Електронний ресурс: <http://surl.li/olwmw>
7. Електронний ресурс: <https://tsn-network.com/>
8. Електронний ресурс: <https://www.coretigo.com/technology/>
9. Електронний ресурс: <http://surl.li/olwmr>
10. Електронний ресурс: <https://www.loriot.io/lorawan.html>
11. 5G-ACIA/ZVEI e. B
12. 3GPP ETSI TS 23.501. System Architecture for the 5G System (5GS). V16.6.0, 2020-10. Електронний ресурс: <http://surl.li/olwni>.

13. Chen, B.; Wan, J.; Shu, L.; Li, P.; Mukherjee, M.; Yin, B. Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access* 2018, 6, 6505–6519.
14. Barakabitze, A.A.; Ahmad, A.; Mijumbi, R.; Hines, A. 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Comput. Netw.* 2020, 167
15. Ruili, J.; Haocong, W.; Han, W.; O’Connell, E.; McGrath, S. Smart Parking System Using Image Processing and Artificial Intelligence. In Proceedings of the 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), Limerick, Ireland, 3–6 December 2018; pp. 232–235.
16. 5G ACIA, “5G non-public networks for industrial scenarios,” Jul. 2019
17. S. F. Abedin et al., “Data freshness and energy-efficient UAV navigation optimization: A deep reinforcement learning approach,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 9, pp. 5994–6006, 2021.
18. 3GPP TS 23.251, “Network sharing; Architecture and functional description,” Jul. 2020.
19. Nokia. ‘LTE/5G pervasive industrial wireless and the digital transformation of port terminals’. https://wpassets.porttechnology.org/wp-content/uploads/2021/11/18194220/Nokia_LTE_5G_for_port_terminals_White_Paper_EN.pdf