

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

**Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Аналіз телекомунікаційних стандартів NB-IoT та LTE-M для
використання у сфері охорони здоров'я»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ТС-21

Бурлачук Анастасія Сергіївна

Керівник:

Завідувач кафедри, д.т.н., професор,

Макаренко Анатолій Олександрович

Рецензент:

Доцент кафедри Університету Грінченка,

к.т.н., доцент, Іваніченко Євген Вікторович

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Бурлачук Анастасії Сергіївній

1. Тема роботи «Аналіз телекомунікаційних стандартів NB-IoT та LTE-M для використання у сфері охорони здоров'я», керівник роботи Анатолій Макаренко, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: матеріали статей та наукових видань, інформаційні ресурси мережі Інтернет, навчально-методичні матеріали. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи: обґрунтувати актуальність теми дослідження. Виконати огляд вимог до телекомунікаційної інфраструктури систем дистанційного моніторингу стану здоров'я. Дослідити архітектурні та технічні особливості стандартів NB-IoT та LTE-M. Визначити критерії вибору бездротових технологій для медичних IoT-систем. Виконати порівняльний аналіз стандартів NB-IoT та LTE-M. Провести аналітичне моделювання трьох медичних IoT-сценаріїв з кількісними розрахунками терміну роботи від батареї та затримки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
 - 1) Тема, мета, об'єкт та предмет дослідження

- 2) Вимоги до телекомунікаційної інфраструктури медичних IoT-систем
- 3) Архітектурні та технічні особливості стандарту NB-IoT
- 4) Архітектурні та технічні особливості стандарту LTE-M
- 5) Порівняльний аналіз параметрів енергоспоживання та затримки
- 6) Порівняльний аналіз покриття, мобільності та пропускну здатності
- 7) Аналітична модель медичної IoT-системи: три сценарії
- 8) Результати моделювання: термін роботи батареї та затримка доставки
- 9) Матриця вибору стандарту для медичних IoT-сценаріїв
- 10) Висновки

6. Дата видачі завдання 25.02.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання та ознайомлення з темою дипломної роботи	25.02–07.03.2026	Виконано
2	Огляд наукової літератури та нормативних документів (3GPP, GSMA, NIST, FDA, EHDS)	08.03–22.03.2026	Виконано
3	Написання розділу 1: науково-практичні передумови застосування стільникових IoT-технологій у медичних системах	23.03–06.04.2026	Виконано
4	Написання розділу 2: порівняльна характеристика стандартів NB-IoT та LTE-M за ключовими параметрами	07.04–25.04.2026	Виконано
5	Написання розділу 3: аналітичне моделювання медичної IoT-системи та обґрунтування вибору стандарту	26.04–15.05.2026	Виконано
6	Вступ, висновки, список використаних джерел	16.05–04.06.2026	Виконано

Студент

Анастасія БУРЛАЧУК

Керівник роботи

Анатолій МАКАРЕНКО

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 73 с., 7 рис., 10 табл., 28 джерел.

Мета роботи: проаналізувати ефективність стандартів NB-IoT та LTE-M для використання у медичних IoT-системах.

Об'єкт дослідження: процес передавання даних у системах медичного IoT.

Предмет дослідження: методи оцінювання ефективності стандартів NB-IoT та LTE-M у системах віддаленого моніторингу стану здоров'я.

У роботі досліджено вимоги до телекомунікаційної інфраструктури систем дистанційного моніторингу стану здоров'я пацієнтів та розглянуто напрями застосування IoT-технологій у медицині. Виконано порівняльний аналіз стандартів NB-IoT та LTE-M за ключовими параметрами: затримкою передавання, енергоспоживанням, покриттям (MCL), підтримкою мобільності та пропускну здатністю. Проведено аналітичне моделювання трьох медичних IoT-сценаріїв — стаціонарного домашнього сенсора, носимого пристрою пацієнта та системи екстреного сповіщення — з кількісними розрахунками терміну роботи від батареї та затримки доставки повідомлень. Сформовано матрицю вибору стандарту для шести типових медичних сценаріїв та розроблено практичні рекомендації щодо застосування NB-IoT і LTE-M у комплексній медичній IoT-інфраструктурі з урахуванням критеріїв якості обслуговування, енергоефективності та вартості розгортання.

Ключові слова: NB-IoT, LTE-M, інтернет речей, охорона здоров'я, телекомунікаційні стандарти, медичний моніторинг, енергоефективність, стільниковий зв'язок, якість обслуговування, віддалений моніторинг пацієнтів.

ABSTRACT

Main text of the thesis: 73 pages, 7 figures, 10 tables, 28 references.

Objective: To analyze the effectiveness of the NB-IoT and LTE-M standards for use in medical IoT systems.

Object of study: The data transmission process in medical IoT systems.

Subject of study: Methods for evaluating the effectiveness of the NB-IoT and LTE-M standards in remote health monitoring systems.

This paper examines the requirements for the telecommunications infrastructure of remote patient health monitoring systems and explores areas of application for IoT technologies in medicine. A comparative analysis of the NB-IoT and LTE-M standards was performed based on key parameters: transmission latency, power consumption, coverage (MCL), mobility support, and throughput. Analytical modeling of three medical IoT scenarios—a stationary home sensor, a patient wearable device, and an emergency alert system—was conducted, including quantitative calculations of battery life and message delivery latency. A standard selection matrix was developed for six typical medical scenarios, and practical recommendations were formulated for the application of NB-IoT and LTE-M in a comprehensive medical IoT infrastructure, taking into account service quality, energy efficiency, and deployment cost criteria.

Keywords: NB-IoT, LTE-M, Internet of Things, healthcare, telecommunications standards, medical monitoring, energy efficiency, cellular communication, quality of service, remote patient monitoring.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	9
1 НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ СТІЛЬНИКОВИХ IoT-ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	11
1.1 Вимоги до телекомунікаційної інфраструктури систем віддаленого моніторингу стану здоров'я	11
1.2 Архітектурні та технічні особливості стандартів NB-IoT та LTE-M	16
1.3 Застосування IoT-технологій у сфері охорони здоров'я.....	20
1.4 Критерії вибору бездротових технологій для медичних IoT-систем	23
Висновки до 1 розділу	27
2 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА NB-IoT ТА LTE-M У ЗАДАЧАХ МЕДИЧНОГО IoT	29
2.1 Порівняння параметрів енергоспоживання, затримки передавання та пропускної здатності.....	29
2.2 Оцінка покриття, надійності з'єднання та підтримки мобільності в умовах медичного застосування	35
2.3 Вибір оптимального стандарту для різних сценаріїв медичного IoT.....	43
Висновки до 2 розділу	49
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТІВ У СИСТЕМАХ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я	51
3.1 Моделювання роботи медичної IoT-системи на основі NB-IoT та LTE-M ...	51
3.2 Обґрунтування вибору стандарту з урахуванням критеріїв якості обслуговування та енергоефективності	60
Висновки до 3 розділу	66
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

3GPP	3rd Generation Partnership Project — Проект партнерства третього покоління, міжнародна організація зі стандартизації мобільних мереж.
ACK	Acknowledgement — сигнал підтвердження доставки повідомлення.
CoAP	Constrained Application Protocol — обмежений протокол застосувань для IoT-пристроїв.
eDRX	extended Discontinuous Reception — розширений переривчастий прийом, механізм енергозбереження IoT-пристроїв.
EHDS	European Health Data Space — Європейський простір охорони здоров'я.
EPC	Evolved Packet Core — еволюційне пакетне ядро мережі LTE.
eNodeB	Evolved Node B — еволюційна базова станція мережі LTE.
FDA	Food and Drug Administration — Управління з контролю якості харчових продуктів і медикаментів США.
GDPR	General Data Protection Regulation — Загальний регламент захисту персональних даних ЄС.
GSMA	GSM Association — Глобальна асоціація операторів мобільного зв'язку.
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request — гібридний автоматичний запит повторної передачі.
HL7	Health Level 7 — стандарт обміну медичними даними між інформаційними системами.
IoT	Internet of Things — Інтернет речей.
LTE	Long-Term Evolution — стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління.
LTE-M	LTE for Machine-Type Communications — стільниковий IoT-стандарт 3GPP Release 13 для машинних комунікацій.

MCL	Maximum Coupling Loss — максимальні допустимі втрати на трасі розповсюдження сигналу.
MDR	Medical Device Regulation (EU) 2017/745 — Регламент ЄС щодо медичних виробів.
MIC	Медична інформаційна система.
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport — транспортний протокол для телеметрії IoT-пристроїв.
NB-IoT	Narrowband Internet of Things — вузькосмуговий Інтернет речей, стільниковий IoT-стандарт 3GPP Release 13.
NIST	National Institute of Standards and Technology — Національний інститут стандартів і технологій США.
OTDOA	Observed Time Difference of Arrival — метод позиціювання пристроїв у мережі LTE.
PSM	Power Saving Mode — режим збереження енергії IoT-пристрою (глибокий сон між сеансами передавання).
QoS	Quality of Service — якість обслуговування мережею.
RPM	Remote Patient Monitoring — дистанційний моніторинг стану здоров'я пацієнта.
SNR	Signal-to-Noise Ratio — відношення сигнал/шум.
SpO ₂	Peripheral oxygen saturation — сатурація (насиченість) крові киснем.
TLS	Transport Layer Security — протокол захисту транспортного рівня.
VoLTE	Voice over LTE — передавання голосу через мережу LTE.
BOOZ	Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO — World Health Organization).

ВСТУП

Розвиток цифрових технологій у сфері охорони здоров'я зумовив активне впровадження концепції медичного Інтернету речей (IoT), яка передбачає використання підключених сенсорів, носимих пристроїв та систем дистанційного моніторингу для підвищення доступності та якості медичної допомоги. За оцінками GSMA, глобальна кількість підключених IoT-пристроїв перевищила 15 мільярдів одиниць, і медичний сегмент є одним із найдинамічніших [1]. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) визначила цифрове здоров'я стратегічним пріоритетом та закликала держави-члени до впровадження електронних медичних рішень, зокрема систем дистанційного моніторингу пацієнтів [2].

Системи дистанційного моніторингу (Remote Patient Monitoring, RPM) забезпечують безперервне або періодичне спостереження за фізіологічними показниками пацієнтів поза межами медичних закладів. FDA відносить RPM-пристрої до класу регульованих медичних виробів і встановлює вимоги до їх безпеки, ефективності та кібербезпеки. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від якості бездротової телекомунікаційної інфраструктури, що забезпечує передавання медичних даних [3].

Серед сучасних рішень для підключення IoT-пристроїв у медичній сфері особливе місце займають стільникові стандарти NB-IoT та LTE-M, розроблені в рамках специфікацій 3GPP Release 13 [4, 5]. Ці технології створено спеціально для масових IoT-застосувань із низьким енергоспоживанням та широким покриттям. NB-IoT (Narrowband IoT) орієнтований на стаціонарні сенсори з максимальними втратами на трасі 164 дБ та терміном роботи батареї понад три роки. LTE-M (LTE for Machine-Type Communications) забезпечує затримку 10–15 мс, підтримку мобільності та функцію голосового зв'язку VoLTE, що робить цей стандарт придатним для носимих пристроїв і систем екстреного сповіщення.

Незважаючи на схожість призначення, NB-IoT та LTE-M мають суттєві відмінності в технічних характеристиках, що зумовлює принципово різну сферу їх медичного застосування. Проте у науковій літературі досі відсутній

систематизований порівняльний аналіз цих стандартів з урахуванням специфічних вимог медичного IoT: суворих вимог до затримки для екстрених сповіщень, тривалої автономної роботи батарейних сенсорів, підтримки мобільності для носимих пристроїв та покриття в умовах закритих приміщень. Відповідь на питання, який стандарт є оптимальним для конкретного медичного сценарію, є актуальною науково-практичною задачею.

На рівні Європейського Союзу питання захисту та обміну медичними даними регулюються Загальним регламентом захисту персональних даних (GDPR) [6] та Регламентом щодо медичних виробів (MDR 2017/745) [7], а Європейський простір охорони здоров'я (EHDS) формує правову основу для розвитку цифрової медицини [8]. В Україні активно розвивається електронна охорона здоров'я (e-Health), що підсилює актуальність дослідження телекомунікаційної інфраструктури для медичних IoT-систем.

Отже, науково обґрунтований вибір між стандартами NB-IoT та LTE-M при проектуванні медичних IoT-систем різного призначення має як теоретичне, так і практичне значення для розвитку вітчизняної та міжнародної телемедицини.

Мета роботи: аналіз телекомунікаційних стандартів NB-IoT та LTE-M з метою визначення доцільності їх використання у системах охорони здоров'я відповідно до вимог конкретних медичних сценаріїв.

Об'єкт дослідження: телекомунікаційні стандарти стільникового Інтернету речей (Cellular IoT) у медичних системах, зокрема стандарти NB-IoT та LTE-M.

Предмет дослідження: порівняльні технічні характеристики стандартів NB-IoT та LTE-M, критерії їх вибору та придатність до використання в системах охорони здоров'я залежно від медичного сценарію застосування.

1 НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ СТІЛЬНИКОВИХ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Вимоги до телекомунікаційної інфраструктури систем віддаленого моніторингу стану здоров'я

Системи віддаленого моніторингу стану здоров'я є одним із ключових напрямів розвитку цифрової медицини, оскільки дають змогу здійснювати безперервне або періодичне спостереження за фізіологічними показниками пацієнта поза межами лікарні. Всесвітня організація охорони здоров'я розглядає цифрове здоров'я як інструмент підвищення доступності, якості та стійкості медичних послуг і прямо підкреслює важливість стандартів інтеперабельності та обміну даними [2]. Європейські цифрові ініціативи у сфері охорони здоров'я також пов'язують розвиток дистанційного моніторингу із розширенням доступу до медичної допомоги, особливо для пацієнтів, які потребують тривалого спостереження або проживають поза великими медичними центрами.

Типова система віддаленого моніторингу включає медичні сенсори або носимі пристрої, засоби локального збирання даних, канал бездротового передавання, серверну або хмарну платформу, а також інформаційну систему лікаря чи медичного закладу. Узагальнену структуру системи віддаленого моніторингу стану здоров'я наведено на рисунку 1.1.

У такій архітектурі телекомунікаційна інфраструктура виконує не лише транспортну функцію, а й фактично визначає придатність системи до реального клінічного використання. Вона має забезпечувати стабільне передавання як регулярних телеметричних даних, так і термінових повідомлень про критичні відхилення показників. Для сучасних цифрових медичних сервісів важливими є можливості мобільного зв'язку, що дозволяють передавати дані під час домашнього догляду, амбулаторного спостереження та супроводу пацієнтів поза стаціонаром.



Рисунок 1.1 – Узагальнена архітектура системи віддаленого моніторингу стану здоров'я пацієнта

Однією з базових вимог до такої інфраструктури є висока надійність і достатня зона покриття. Медичні IoT-пристрої часто працюють у житлових будинках, палатах, реабілітаційних центрах, сільській місцевості або в приміщеннях зі складними умовами радіопоширення. Саме тому для систем моніторингу стану здоров'я особливе значення мають технології стільникового IoT, що використовують ліцензований спектр і, відповідно, забезпечують вищий рівень контрольованості та якості обслуговування, ніж багато рішень у неліцензованих діапазонах. За даними 3GPP, LTE-M підтримує захищений зв'язок, широке покриття та високу ємність мережі, а NB-IoT орієнтований на енергоефективну роботу, дуже низьку складність пристроїв, гнучке використання спектра та широке покриття для масових IoT-застосувань [4, 5].

Не менш важливою є відповідність мережових характеристик типу медичного трафіку. У системах віддаленого моніторингу переважає передавання невеликих пакетів даних — показників пульсу, температури, сатурації,

артеріального тиску, рівня глюкози тощо. Для таких задач критичними є не стільки великі швидкості, скільки енергоефективність, стабільність з'єднання та гарантована доставка повідомлень [9]. Водночас окремі сценарії — наприклад, мобільні медичні пристрої, голосовий сервіс, позиціювання пацієнта або швидка передача тривожних сповіщень — висувають жорсткіші вимоги до затримки, мобільності та пропускну здатності. 3GPP зазначає, що LTE-M завдяки більшій смузі та повнодуплексній роботі забезпечує нижчу затримку і вищу швидкість передавання, ніж NB-IoT, а також може підтримувати голосові сервіси, зокрема VoLTE. У Release 14 для LTE-M було передбачено підтримку позиціювання, міжчастотної мобільності, вищих швидкостей і VoLTE, тоді як для NB-IoT були визначені покращення щодо затримки, енергоспоживання, позиціювання та безперервності сервісу [10].

Для медичних систем, особливо персональних пристроїв і сенсорів тривалого носіння, критичною вимогою є низьке енергоспоживання та довгий автономний термін роботи. Часте заряджання або заміна елементів живлення знижує зручність користування, збільшує ризик втрати даних і ускладнює масштабне розгортання системи. Саме тому телекомунікаційна інфраструктура має підтримувати режими енергозбереження, які дозволяють сенсорам довго залишатися в мережі без постійної активності радіоінтерфейсу. У матеріалах 3GPP щодо стандартів IoT вказано підтримку розширених циклів eDRX для eMTC та NB-IoT: до приблизно 44 хвилин для eMTC і до близько 3 годин для NB-IoT в idle-режимі, що безпосередньо сприяє зменшенню енергоспоживання кінцевих пристроїв [4].

Окремий блок вимог стосується безпеки, конфіденційності та цілісності медичних даних. У сфері охорони здоров'я передаються чутливі персональні відомості, тому будь-яка втрата доступності, спотворення або несанкціоноване розкриття інформації може створити ризики не лише для приватності пацієнта, а й для його безпеки. NIST у рекомендаціях щодо екосистеми telehealth remote patient monitoring наголошує, що без належних заходів кібербезпеки та захисту приватності сторонні особи можуть отримати доступ до чутливих даних або

порушити роботу сервісів моніторингу, а також підкреслює необхідність забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних [11]. FDA, своєю чергою, виділяє кібербезпеку та інтероперабельність як ключові вимоги до цифрових медичних технологій і вказує на значущість стандартів серії IEEE ISO 11073 для взаємодії персональних медичних пристроїв [3, 12].

На рівні міжнародних стандартів кібербезпека медичних IoT-систем регулюється серією IEC 62443, яка визначає вимоги до безпеки промислових систем управління та Інтернету речей [13]. Стандарт виділяє чотири рівні безпеки (Security Level, SL 1–4) залежно від потенційних наслідків порушення: для медичних IoT-пристроїв, що передають персональні дані пацієнтів, рекомендованим є рівень SL 2 (захист від навмисного несанкціонованого доступу з обмеженими ресурсами) або SL 3 (захист від sophisticated атак). Обидва стандарти NB-IoT та LTE-M забезпечують автентифікацію на рівні стільникової мережі через механізм AKA (Authentication and Key Agreement), однак IEC 62443 і рекомендації NIST вимагають додаткового наскрізного захисту на прикладному рівні — шифрування TLS 1.3 або DTLS 1.3 для передавання медичних даних незалежно від обраного бездротового стандарту [11, 13].

Окремого розгляду потребує питання сумісності та інтероперабельності медичних IoT-пристроїв. Стандарт IEEE 11073 PHD (Personal Health Device) визначає протоколи комунікації між персональними медичними пристроями (глюкометри, тонометри, пульсоксиметри) та інформаційними системами, включаючи формати даних і профілі для конкретних типів пристроїв [12]. Протокол HL7 FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) визначає формати обміну медичними даними між різними інформаційними системами охорони здоров'я через RESTful API [14]. Для медичної IoT-системи на базі NB-IoT або LTE-M це означає, що дані, зібрані сенсором, повинні бути закодовані відповідно до профілів IEEE 11073, передані захищеним каналом (TLS/DTLS), отримані сервером, конвертовані у формат HL7 FHIR і надіслані до медичної інформаційної системи (MIS). Вибір між NB-IoT та LTE-M не впливає на

сумісність із цими стандартами — вони реалізуються на прикладному рівні незалежно від фізичного рівня передавання.

Ще однією принциповою вимогою є інтероперабельність телекомунікаційної інфраструктури з медичними інформаційними системами. Дані, отримані від сенсорів і пристроїв моніторингу, повинні не просто доставлятися до сервера, а бути придатними для подальшої інтеграції з електронними медичними записами, клінічними платформами, системами підтримки прийняття рішень і аналітичними сервісами. HL7 визначає FHIR як стандарт електронного обміну медичною інформацією, орієнтований на структуровані та зрозумілі для машинної обробки дані [14]. На рівні європейського регулювання EHDS формує гармонізовану правову та технічну основу для електронних медичних записів, безпечного обміну медичними даними та інтероперабельності цифрових медичних рішень [8]. Отже, телекомунікаційна складова системи віддаленого моніторингу має розглядатися як частина ширшої цифрової екосистеми охорони здоров'я, а не як ізольований канал передачі даних.

Телекомунікаційна інфраструктура систем віддаленого моніторингу стану здоров'я повинна відповідати сукупності вимог, серед яких ключовими є широка зона покриття, надійність з'єднання, підтримка енергоощадних режимів, достатня пропускна здатність і прийнятний рівень затримки, високий рівень кібербезпеки, захист персональних даних та сумісність із медичними інформаційними стандартами. Саме ці вимоги використано як основу для подальшого порівняльного аналізу стандартів NB-IoT та LTE-M у контексті їх застосування в медичних системах.

1.2 Архітектурні та технічні особливості стандартів NB-IoT та LTE-M

Для системного розуміння відмінностей між стандартами наведемо зведену таблицю ключових технічних параметрів NB-IoT та LTE-M відповідно до специфікацій 3GPP Release 13/14 [4, 5, 10].

Таблиця 1.1 – Ключові технічні параметри стандартів NB-IoT та LTE-M (3GPP Release 13/14)

Параметр	NB-IoT Rel.13	LTE-M Rel.13
Смуга частот	180 кГц	1,4 МГц
Пікова швидкість DL	26 кбіт/с (Rel.13) / 250 кбіт/с (Rel.14)	1 Мбіт/с (Rel.13) / 4 Мбіт/с (Rel.14)
Пікова швидкість UL	62 кбіт/с	1 Мбіт/с
MCL	164 дБ	156 дБ
Затримка (активний режим)	1,4–10 с	10–15 мс
Макс. повторів HARQ	128	8
Макс. цикл PSM	~413 днів	~413 днів
Макс. цикл eDRX	~2,9 год	~44 хв
Мобільність	Cell Reselection	Повний Handover (<50 мс)
VoLTE	Ні	Так (Rel.13)
Позиціювання	Обмежено	OTDOA (Rel.14)
Струм в PSM	2–5 мкА	3–8 мкА
Вартість модуля	3–5 USD	8–15 USD

Стандарти NB-IoT (Narrowband Internet of Things) та LTE-M (LTE for Machines, Cat-M1) є ключовими технологіями стільникового Інтернету речей, розробленими в рамках специфікацій організації 3GPP. Вони були впроваджені у релізах Release 13 і наступних як оптимізовані рішення для підтримки великої кількості IoT-пристроїв із низьким енергоспоживанням та широким покриттям.

Архітектурно NB-IoT та LTE-M інтегруються в існуючу інфраструктуру мереж LTE, використовуючи стандартні елементи, такі як базові станції (eNodeB)

та ядро мережі (EPC). Це дозволяє операторам зв'язку розгорнути IoT-сервіси без необхідності створення нових мереж, що суттєво знижує витрати та підвищує масштабованість рішень [15]. У системах дистанційного моніторингу стану здоров'я передача даних здійснюється за послідовністю: сенсори → мережа доступу → базова станція → сервер → медичний інформаційний центр, де саме NB-IoT або LTE-M забезпечують бездротовий сегмент зв'язку. Порівняльну схему застосування стандартів NB-IoT та LTE-M у таких системах наведено на рисунку 1.2.

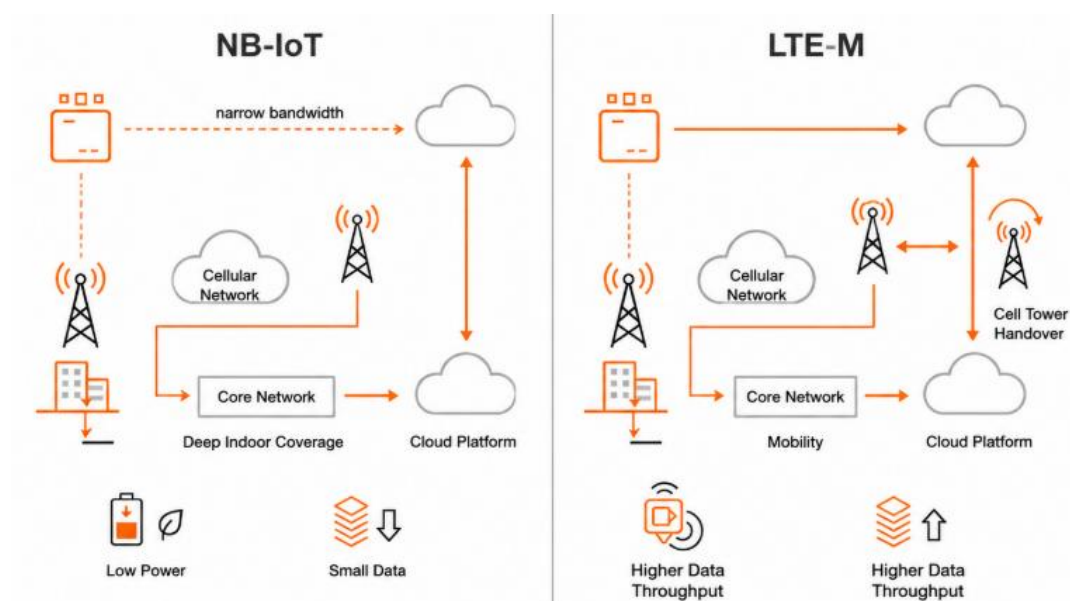


Рисунок 1.2 – Порівняльна схема застосування стандартів NB-IoT та LTE-M у системах IoT

NB-IoT підтримує три режими розгортання в стільниковій мережі, що надає операторам значну гнучкість при впровадженні. Режим *in-band* передбачає використання одного ресурсного блоку (PRB) всередині стандартної LTE-смуги — оператор не потребує додаткового частотного ресурсу і може розгорнути NB-IoT поверх наявної LTE-інфраструктури. Режим *guard-band* дозволяє використовувати захисну смугу між LTE-каналами, яка в стандартному LTE не задіяна, — таким чином частотний ресурс використовується більш ефективно. Режим *standalone* передбачає виділення незалежного частотного ресурсу, наприклад, каналу GSM 200 кГц після ребандингу, і дозволяє розгорнути NB-IoT

навіть без наявної LTE-інфраструктури — що є важливим для покриття сільських регіонів, де можуть розташовуватися медичні пункти з потребою у віддаленому моніторингу пацієнтів. LTE-M, натомість, розгортається виключно у межах існуючої LTE-смуги і вимагає підтримки з боку eNodeB.

На фізичному рівні NB-IoT визначає окремий набір каналів передавання. У напрямку downlink основним каналом передавання даних є NPDSCH (Narrowband Physical Downlink Shared Channel), а для управляючої інформації — NPDCCH (Narrowband Physical Downlink Control Channel). У напрямку uplink дані передаються через NPUSCH (Narrowband Physical Uplink Shared Channel) у двох форматах: формат 1 — для передавання даних, формат 2 — для підтвердження доставки (ACK/NACK у рамках HARQ). LTE-M використовує стандартні LTE-канали у зменшеній смузі 1,4 МГц: MPDCCH замінює PDCCH для управління пристроями з низьким споживанням, а PDSCH та PUSCH задіяні для передавання даних. Для медичного застосування розуміння цієї архітектури є практично важливим: розмір типового медичного пакету (30–250 байт) визначає кількість ресурсних одиниць за один сеанс, а отже — тривалість активного стану радіомодуля і спожиту енергію за сеанс передавання.

Технологія NB-IoT характеризується вузькосмуговою передачею даних із використанням смуги частот близько 180 кГц. Вона підтримує три режими розгортання — in-band, guard-band та standalone, що забезпечує гнучкість використання спектра. Основною особливістю NB-IoT є його орієнтація на передачу малих обсягів даних із мінімальним енергоспоживанням. Крім того, технологія забезпечує значне покращення покриття — до 20 дБ у порівнянні зі стандартним LTE, що дозволяє ефективно працювати в умовах складного радіосередовища, зокрема в приміщеннях або підвальних приміщеннях.

Важливою архітектурною особливістю NB-IoT є обмежена підтримка мобільності. На відміну від класичних LTE-з'єднань, NB-IoT не підтримує повноцінний механізм handover між базовими станціями, а використовує процедуру повторного підключення. Це робить його оптимальним для

стаціонарних або малорухомих пристроїв, таких як домашні медичні сенсори або системи моніторингу пацієнтів.

На відміну від NB-IoT, технологія LTE-M використовує ширшу смугу частот — до 1,4 МГц, що забезпечує вищу швидкість передачі даних і меншу затримку. LTE-M зберігає значну частину функціональності LTE, включаючи підтримку мобільності (handover), що дозволяє пристроям переміщатися між зонами покриття без втрати з'єднання. Крім того, LTE-M може підтримувати передачу голосу за допомогою технології VoLTE, що може бути важливим для деяких медичних застосувань, наприклад, систем екстреного зв'язку.

З технічної точки зору NB-IoT та LTE-M також відрізняються за швидкістю передачі даних і затримкою. NB-IoT забезпечує швидкість передачі до приблизно 250 кбіт/с, тоді як LTE-M може досягати швидкості близько 1 Мбіт/с. Затримка в NB-IoT є більшою і може досягати кількох секунд у режимах енергозбереження, тоді як LTE-M забезпечує значно меншу затримку, що є критичним для застосувань, де важлива швидка реакція системи.

Обидві технології підтримують механізми енергозбереження, такі як Power Saving Mode (PSM) та extended Discontinuous Reception (eDRX), які дозволяють суттєво зменшити енергоспоживання пристроїв і забезпечити їх автономну роботу протягом тривалого часу. Це є особливо важливим для медичних пристроїв, які повинні працювати без частого обслуговування або заміни батареї.

У контексті систем віддаленого моніторингу стану здоров'я вибір між NB-IoT та LTE-M визначається характером переданих даних і вимогами до функціональності. NB-IoT доцільно використовувати для стаціонарних сенсорів із невеликою кількістю переданих даних і пріоритетом енергоефективності. LTE-M, у свою чергу, є більш придатним для мобільних і носимих пристроїв, де необхідні вища швидкість передачі даних, менша затримка та підтримка мобільності.

NB-IoT та LTE-M є взаємодоповнюючими технологіями, що дозволяють реалізувати широкий спектр медичних IoT-систем залежно від вимог до енергоспоживання, покриття, мобільності та швидкості передачі даних. Для

узагальнення їх характеристик доцільно використати порівняльну таблицю (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика стандартів NB-IoT та LTE-M

Параметр	NB-IoT	LTE-M
Стандарт	3GPP Release 13+	3GPP Release 13+
Ширина смуги	180 кГц	До 1,4 МГц
Швидкість передачі даних	До 250 кбіт/с	До 1 Мбіт/с
Затримка	Висока (до кількох секунд)	Нижча, залежить від конфігурації мережі
Покриття	Дуже широке (+20 дБ до LTE)	Широке (краще за LTE, але менше ніж NB-IoT)
Підтримка мобільності	Обмежена, без повноцінного handover	Повна (handover підтримується)
Підтримка голосу	Відсутня	Можлива підтримка VoLTE
Енергоспоживання	Дуже низьке	Низьке
Час автономної роботи	До 10 років за умов низької активності пристрою	До 5–10 років за умов низької активності пристрою
Ємність мережі	Дуже висока (десятки тисяч пристроїв/cota)	Висока
Складність пристрою	Низька	Середня
Вартість модулів	Нижча	Вища
Тип передачі даних	Невеликі пакети, періодично	Частіша передача, більші обсяги
Типові застосування в медицині	Стаціонарні сенсори, домашній моніторинг	Носимі пристрої, трекінг пацієнтів

1.3 Застосування IoT-технологій у сфері охорони здоров'я

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій сприяв активному впровадженню концепції Інтернету речей (IoT) у різні сфери діяльності, зокрема в охорону здоров'я. ВООЗ визначає цифрове здоров'я як

стратегічний пріоритет і розглядає IoT-рішення як інструмент підвищення доступності, якості та стійкості медичних послуг, особливо в умовах зростання навантаження на системи охорони здоров'я через поширення хронічних захворювань [2]. У сучасних умовах IoT розглядається як один із ключових інструментів цифровізації медицини, що дозволяє автоматизувати процеси збору, передачі та обробки медичних даних, а також забезпечити безперервний моніторинг стану пацієнтів [16].

Одним із найважливіших напрямів використання IoT у медицині є системи віддаленого моніторингу стану здоров'я (Remote Patient Monitoring, RPM). FDA відносить пристрої для дистанційного моніторингу пацієнтів до класу регульованих медичних виробів і встановлює вимоги до їх безпеки, ефективності та кібербезпеки [3, 7]. Такі системи передбачають використання сенсорів або носимих пристроїв (wearable devices), які здатні вимірювати різні фізіологічні параметри пацієнта [17]. До таких параметрів належать частота серцевих скорочень, рівень кисню в крові (SpO_2), температура тіла, артеріальний тиск, рівень глюкози та інші показники.

Зібрані дані передаються через бездротові мережі до серверів або хмарних платформ, де вони зберігаються, обробляються та аналізуються. Лікар або медичний персонал отримує доступ до цих даних у режимі реального часу або з певною періодичністю, що дозволяє оцінювати стан пацієнта та своєчасно реагувати на будь-які відхилення.

Застосування систем віддаленого моніторингу має особливе значення для пацієнтів із хронічними захворюваннями. За даними ВООЗ, хронічні неінфекційні захворювання є причиною понад 70% смертей у світі, що підкреслює необхідність систем тривалого спостереження за станом пацієнтів [2]. У таких випадках постійний контроль показників дозволяє уникнути ускладнень та зменшити кількість госпіталізацій. Крім того, це значно підвищує якість життя пацієнтів, оскільки вони можуть перебувати вдома, не відвідуючи регулярно медичні установи.

Ще одним важливим напрямом є використання IoT у телемедицині. На рівні Європейського Союзу EHDS формує правову та технічну основу для безпечного обміну медичними даними та розвитку телемедичних сервісів, що безпосередньо стимулює впровадження IoT-рішень у дистанційну медичну допомогу [8]. Сучасні телемедичні системи дозволяють здійснювати дистанційні консультації, діагностику та контроль лікування пацієнтів. Завдяки IoT-пристроєм лікар може отримувати актуальні дані про стан пацієнта та приймати обґрунтовані рішення без необхідності фізичної присутності. Це особливо актуально для віддалених регіонів, де доступ до медичних послуг обмежений.

IoT також активно використовується у стаціонарних медичних закладах. Зокрема, такі технології застосовуються для моніторингу стану пацієнтів у лікарнях, контролю роботи медичного обладнання, управління лікарняною інфраструктурою та оптимізації внутрішніх процесів. Наприклад, сенсори можуть відстежувати температуру та вологість у приміщеннях, стан обладнання або місцезнаходження медичних інструментів.

Окремо слід виділити носимі пристрої (wearable devices), які стали невід'ємною частиною сучасних медичних IoT-систем. Взаємодія таких пристроїв із медичними системами регулюється стандартами серії IEEE 11073, які визначають протоколи комунікації персональних медичних пристроїв та забезпечують їх сумісність із різними платформами збору й обробки даних. До носимих пристроїв належать фітнес-браслети, смарт-годинники та спеціалізовані медичні пристрої, які забезпечують зручний і постійний моніторинг стану організму та можуть передавати дані безпосередньо до мобільних застосунків або серверів.

З розвитком IoT у медицині з'являється можливість переходу від традиційної реактивної моделі лікування до більш проактивного підходу. Замість реагування на вже наявні проблеми система дозволяє виявляти потенційні ризики на ранніх стадіях та запобігати розвитку захворювань. Це відкриває нові можливості для підвищення ефективності медичних послуг.

Разом із тим впровадження IoT у сфері охорони здоров'я висуває ряд вимог до телекомунікаційної інфраструктури. Оскільки медичні дані часто є критично важливими, необхідно забезпечити їх надійну та своєчасну передачу. Особливу роль відіграють такі характеристики, як затримка передачі, стабільність з'єднання, покриття мережі та енергоефективність пристроїв. У багатьох випадках IoT-пристрої працюють від автономних джерел живлення, тому важливо забезпечити мінімальне енергоспоживання. Крім того, пристрої можуть використовуватись як у приміщеннях, так і на відкритій місцевості, що вимагає широкого покриття мережі.

IoT-технології відіграють важливу роль у розвитку сучасної медицини, забезпечуючи нові можливості для моніторингу, діагностики та лікування [16, 18]. Водночас ефективність їх використання значною мірою залежить від характеристик телекомунікаційних технологій, що забезпечують передачу даних, — зокрема стандартів NB-IoT та LTE-M, які розглядаються у подальших розділах роботи.

1.4 Критерії вибору бездротових технологій для медичних IoT-систем

Ефективність медичних IoT-систем залежить не лише від наявності бездротового зв'язку, а й від правильного вибору технології передавання даних відповідно до конкретного сценарію використання. У медичних системах можуть застосовуватися різні типи пристроїв: стаціонарні сенсори, носимі пристрої, мобільні трекери пацієнтів, системи екстреного сповіщення, а також засоби моніторингу медичного обладнання. Кожен із цих сценаріїв має власні технічні вимоги, тому вибір бездротової технології повинен здійснюватися за сукупністю критеріїв.

Першим критерієм є тип медичного сценарію, для якого використовується IoT-система. Якщо пристрій працює стаціонарно, передає невеликі обсяги даних і не потребує постійного з'єднання, пріоритетними стають енергоефективність, широке покриття та здатність працювати в умовах слабого сигналу. До таких

систем можна віднести домашні сенсори контролю температури тіла, артеріального тиску, рівня глюкози або інших показників, які передаються з певною періодичністю. Якщо ж пристрій використовується для моніторингу пацієнта в русі, важливішими стають підтримка мобільності, стабільність з'єднання під час переміщення та менша затримка передавання даних.

Другим важливим критерієм є характер передаваного трафіку. У більшості медичних IoT-систем дані мають невеликий обсяг і передаються періодично. Наприклад, сенсор може надсилати показники раз на кілька хвилин або лише у випадку відхилення параметрів від допустимого діапазону. Для таких задач не потрібна висока пропускна здатність, однак важливо забезпечити гарантовану доставку повідомлення. Водночас у системах із частішим обміном даними, передаванням кількох параметрів одночасно або формуванням тривожних повідомлень вимоги до швидкості та затримки зростають.

Третім критерієм є допустимий рівень затримки. Для частини медичних застосувань затримка не є критичною, оскільки дані використовуються для довгострокового спостереження та аналізу динаміки стану пацієнта. Наприклад, якщо система фіксує зміну температури або періодично передає значення артеріального тиску, затримка в кілька секунд може бути прийнятною. Однак для систем тривожного сповіщення, контролю серцевої активності або моніторингу пацієнтів із високим ризиком затримка має бути мінімальною, оскільки від швидкості передавання інформації може залежати оперативність реагування медичного персоналу.

Четвертим критерієм є автономність роботи кінцевого пристрою. Багато медичних IoT-пристроїв працюють від батарей і повинні функціонувати тривалий час без обслуговування. Це особливо важливо для сенсорів, які встановлюються у домашніх умовах або використовуються пацієнтами похилого віку. Якщо пристрій потребує частого заряджання або заміни батареї, це знижує зручність його використання та може призвести до втрати даних. Тому при виборі технології необхідно враховувати не лише швидкість передавання, а й те, скільки

енергії витрачається на встановлення з'єднання, передавання пакета та перебування пристрою в режимі очікування.

П'ятим критерієм є умови експлуатації та якість покриття. Медичні пристрої можуть працювати не лише в лікарнях, а й у житлових будинках, сільській місцевості, підвальних або напівпідвальних приміщеннях, де рівень сигналу може бути недостатнім. Тому для частини сценаріїв важливою є здатність технології забезпечувати стабільне з'єднання в умовах складного радіосередовища. Це особливо актуально для систем домашнього моніторингу, де користувач не завжди може самостійно оцінити якість зв'язку або змінити місце розташування пристрою.

Шостим критерієм є підтримка мобільності. Для стаціонарних медичних сенсорів цей параметр не є визначальним, оскільки пристрій зазвичай працює в межах одного місця. Проте для носимих пристроїв, трекерів пацієнтів або систем спостереження за людьми, які переміщуються між різними зонами покриття, підтримка мобільності має суттєве значення. У таких випадках технологія повинна забезпечувати стабільність з'єднання під час переміщення пристрою та мінімізувати ризик втрати даних.

Сьомим критерієм є масштабованість. У медичному закладі або системі масового дистанційного моніторингу одночасно можуть працювати сотні або тисячі пристроїв. Тому бездротова технологія повинна підтримувати велику кількість підключень без суттєвого зниження якості обслуговування. Це особливо важливо для великих лікарень, мереж амбулаторного спостереження або регіональних систем моніторингу пацієнтів.

Окремо необхідно враховувати безпеку передавання даних. Медична інформація належить до чутливих персональних даних, тому технологія зв'язку має забезпечувати механізми захисту від несанкціонованого доступу, перехоплення або спотворення інформації. При цьому безпека не повинна розглядатися окремо від інших параметрів, оскільки додаткові механізми захисту можуть впливати на енергоспоживання, затримку та складність пристрою.

Важливим критерієм є також сумісність із наявною інфраструктурою. Для практичного впровадження медичних IoT-систем значення має не лише технічна ефективність технології, а й можливість її використання в уже розгорнутих мережах. Технології, які можуть працювати на базі існуючої інфраструктури мобільних операторів, мають перевагу, оскільки не потребують створення окремої мережі з нуля. Це зменшує витрати на впровадження та спрощує масштабування системи.

Вибір бездротової технології для медичної IoT-системи повинен здійснюватися не за одним параметром, а за сукупністю критеріїв. Для одних сценаріїв вирішальними є енергоефективність і покриття, для інших — затримка, мобільність і швидкість передавання даних. Саме тому NB-IoT та LTE-M доцільно розглядати не як взаємозамінні, а як технології, що можуть бути ефективними в різних умовах застосування. Спрощену модель робочого циклу медичного IoT-пристрою з позначенням етапів, що відрізняються за поведінкою NB-IoT та LTE-M, наведено на рисунку 1.3.

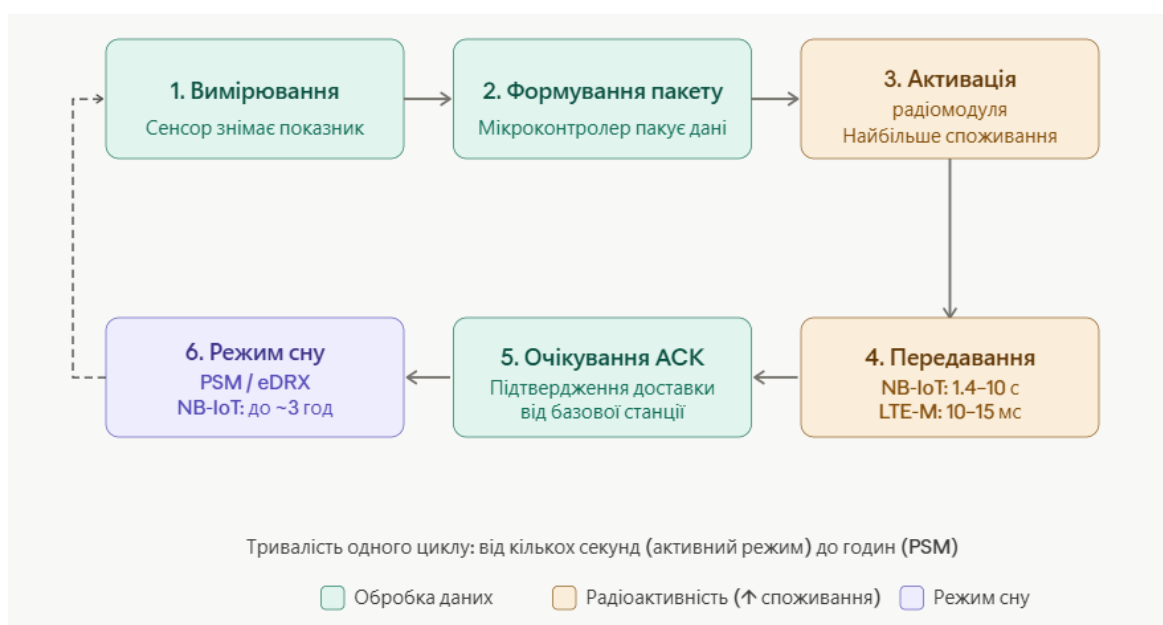


Рисунок 1.3 – Спрощена модель робочого циклу медичного IoT-пристрою (NB-IoT та LTE-M)

У подальшому саме ці критерії доцільно використовувати як основу для порівняння стандартів NB-IoT та LTE-M. Для медичних IoT-систем важливо не лише визначити технічні характеристики кожної технології, а й оцінити їх відповідність конкретним сценаріям використання: стаціонарному моніторингу, носимим пристроям, передаванню тривожних повідомлень, роботі в умовах слабого покриття та довготривалій автономній експлуатації пристроїв. Це створює логічну основу для подальшого аналізу енергоспоживання, затримки, пропускну здатності, покриття, надійності з'єднання та мобільності у наступному розділі роботи.

Висновки до 1 розділу

У першому розділі розглянуто науково-практичні передумови застосування стільникових IoT-технологій у медичних системах. Визначено, що системи віддаленого моніторингу здоров'я є важливим напрямом цифрової медицини, оскільки забезпечують контроль фізіологічних показників пацієнтів поза межами медичного закладу.

Встановлено, що телекомунікаційна інфраструктура є ключовим елементом таких систем, адже забезпечує передавання даних від сенсорів і носимих пристроїв до серверних платформ та медичних інформаційних центрів. Для медичних IoT-систем важливими є надійність з'єднання, покриття, затримка передавання, енергоефективність, масштабованість, безпека даних та інтеграція з медичними інформаційними системами.

Проаналізовано архітектурні й технічні особливості NB-IoT та LTE-M. Обидві технології належать до стільникового Інтернету речей і можуть використовувати LTE-інфраструктуру, однак орієнтовані на різні сценарії. NB-IoT доцільна для пристроїв із невеликими обсягами даних, тривалою автономною роботою та потребою в широкому покритті. LTE-M більше підходить для мобільних і носимих пристроїв, де важливі вища швидкість, менша затримка та підтримка мобільності.

Також розглянуто застосування IoT у медицині: віддалений моніторинг пацієнтів, телемедичні сервіси, носимі пристрої, контроль медичного обладнання та автоматизацію процесів у медичних закладах. Показано, що такі рішення потребують бездротових технологій, здатних забезпечити стабільну передачу даних у різних умовах експлуатації.

Систематизовано критерії вибору бездротових технологій для медичних IoT-систем: тип медичного сценарію, характер трафіку, допустима затримка, автономність пристрою, умови експлуатації, мобільність, масштабованість, безпека та сумісність з інфраструктурою. Визначено, що вибір технології має здійснюватися комплексно, оскільки різні медичні сценарії висувають різні вимоги до зв'язку.

Отже, результати першого розділу підтверджують доцільність подальшого порівняння NB-IoT та LTE-M у задачах медичного IoT. У наступному розділі варто зосередитися на енергоспоживанні, затримці, пропускній здатності, покритті, надійності з'єднання та підтримці мобільності, адже саме ці параметри визначають придатність кожної технології для конкретних медичних сценаріїв.

2 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА NB-IoT ТА LTE-M У ЗАДАЧАХ МЕДИЧНОГО IoT

2.1 Порівняння параметрів енергоспоживання, затримки передавання та пропускної здатності

У медичних IoT-системах вибір телекомунікаційної технології значною мірою визначається трьома групами параметрів: енергоспоживанням кінцевого пристрою, затримкою передавання даних та пропускною здатністю каналу зв'язку. NB-IoT (смуга 180 кГц, пікова швидкість до 250 кбіт/с у Rel. 14) та LTE-M (смуга до 1,4 МГц, швидкість до 1 Мбіт/с у Rel. 13) суттєво відрізняються за цими параметрами, що безпосередньо визначає їх придатність для конкретних медичних сценаріїв [19, 20].

Для медичного IoT ці параметри мають безпосереднє практичне значення. Типовий пакет даних від сенсора артеріального тиску або рівня глюкози становить лише кілька десятків байт, тому для таких пристроїв пропускна здатність 26 кбіт/с (NB-IoT Rel. 13) є повністю достатньою. Натомість носимий пристрій, що одночасно передає ЕКГ, SpO₂, частоту пульсу та дані акселерометра, може генерувати потік даних від кількох сотень кбіт/с, де перевага LTE-M із його вищою швидкістю стає визначальною [17, 21].

Енергоефективність обох технологій забезпечується механізмами PSM (Power Saving Mode) та eDRX (extended Discontinuous Reception). У режимі PSM пристрій повністю вимикає радіоінтерфейс між сеансами передавання і споживає лише кілька мкА (мікроампер). Режим eDRX дозволяє пристрою “прокидатися” для перевірки вхідних повідомлень із заданою періодичністю: для NB-IoT – до 2,9 год, для LTE-M – до 44 хв (3GPP Rel. 13) [4, 22]. NB-IoT орієнтований на мінімізацію складності пристрою і тривале перебування в PSM, тоді як LTE-M забезпечує більшу функціональність ціною дещо вищого споживання в активному режимі.

Енергоспоживання є критичним параметром для автономних медичних IoT-пристроїв. Сенсор NB-IoT у режимі PSM із передаванням даних раз на годину і

батареєю ємністю 5 Вт·год теоретично може працювати понад 10 років – саме таке значення наводить 3GPP як орієнтир для масових IoT-застосувань [4, 22]. LTE-M за аналогічних умов забезпечує до 5–10 років, оскільки його радіоінтерфейс складніший. Для носимих пристроїв із частішим обміном даними (раз на хвилину) цей термін скорочується до кількох місяців для обох технологій, що вже вимагає регулярного заряджання.

У NB-IoT енергоефективність досягається завдяки вузькій смузі частот, спрощеній структурі протоколів і глибокому режиму PSM. Струм споживання модуля NB-IoT у режимі сну становить зазвичай 2–5 мкА, а під час активної передачі – до 220 мА. Оскільки час активного з'єднання для передавання пакету розміром 50 байт складає лічені секунди, і пристрій повертається у PSM-режим, середнє споживання за добу виявляється надзвичайно малим. Саме тому NB-IoT є природним вибором для сенсорів із батарейним живленням, що передають дані нечасто.

LTE-M також підтримує PSM та eDRX, однак струм активної передачі у нього вищий – до 300 мА і більше через ширшу смугу та складніший радіоблок. Водночас ширша смуга означає коротший час передавання того самого пакету, що частково компенсує різницю. На практиці носимий медичний пристрій на LTE-M, що передає ЕКГ із частотою 1 раз на хвилину (3 кБайт/запис), споживатиме значно більше за добу, ніж NB-IoT-сенсор тиску, але забезпечуватиме вищу функціональність – підтримку мобільності, нижчу затримку і можливість VoLTE.

Практичний приклад: глюкометр, що передає вимірювання 4 рази на добу пакетом 30 байт, витрачає за сеанс 0,01 мАгод енергії на NB-IoT і менше 0,015 мАгод на LTE-M. При батареї 2000 мАгод NB-IoT-модуль забезпечить роботу понад 5 років, LTE-M – близько 3–4 років. Для стаціонарного сенсора різниця суттєва. Однак носимий трекер пацієнта, що оновлює дані раз на хвилину, витратиме значно більше незалежно від технології – і тут перевага у функціональності LTE-M переважає різницю в енергоспоживанні.

Для точного розуміння різниці в енергоспоживанні між NB-IoT та LTE-M наведемо типові значення струму в різних режимах роботи радіомодуля [22, 23].

У режимі глибокого сну (PSM) обидва стандарти споживають мінімальний струм: NB-IoT-модуль — близько 2–5 мкА, LTE-M-модуль — 3–8 мкА, що є практично ідентичними значеннями і визначається не стандартом, а апаратурою мікроконтролера. Під час отримання даних у вікні eDRX NB-IoT споживає 3–6 мА (прослуховування вузької смуги 180 кГц), LTE-M — 8–15 мА (прослуховування смуги 1,4 МГц). Під час активного передавання даних NB-IoT-модуль споживає 120–220 мА залежно від потужності передавача і кількості повторів HARQ; LTE-M-модуль споживає 180–300 мА. Ключова відмінність полягає не в потужності споживання в активному стані (різниця 30–40%), а в тривалості активного стану: NB-IoT через вузьку смугу і більшу кількість повторів перебуває в активному режимі довше при передаванні того самого пакету, тоді як LTE-M передає швидко, але з більшим миттєвим споживанням.

Таблиця 2.1 — Типові значення струму споживання NB-IoT та LTE-M у різних режимах

Режим роботи	NB-IoT	LTE-M
Глибокий сон (PSM)	2–5 мкА	3–8 мкА
Прослуховування (eDRX)	3–6 мА	8–15 мА
Активне отримання даних (DL)	10–20 мА	15–30 мА
Активне передавання даних (UL)	120–220 мА	180–300 мА
Тривалість активного передавання (50 байт)	0,3–10 с	0,05–0,5 с
Енергія за сеанс передавання 50 байт	0,01–0,61 мАгод	0,003–0,042 мАгод

Для систем моніторингу хронічних пацієнтів важливо також враховувати, що більшість таких пристроїв не потребує миттєвої доставки: затримка 1–5 секунд при передаванні показника тиску чи глюкози є абсолютно прийнятною. Тому ані більша затримка NB-IoT, ані його нижча швидкість не є обмеженням – а от мала витрата батареї і стабільна робота в приміщенні є вирішальними перевагами для цього сценарію.

Водночас для носимого медичного пристрою, наприклад браслета з ЕКГ-монітором або трекера пацієнта з деменцією, першочерговими є підтримка мобільності, безперервність з'єднання та можливість екстреного сповіщення. У таких пристроях зазвичай передбачено зарядку раз на добу або кожні кілька днів, тому підвищене енергоспоживання LTE-M не є вирішальним недоліком – натомість вирішальними стають функціональні можливості, недоступні в NB-IoT.

Другим важливим параметром є затримка передавання даних – час від формування пакету на пристрої до його отримання сервером. Для NB-IoT типова затримка в активному режимі становить 1,4–10 с, а в режимі eDRX вона може сягати кількох десятків секунд (залежно від конфігурації циклу eDRX). Для LTE-M затримка в активному режимі складає 10–15 мс, а при використанні eDRX – до кількох секунд [19, 23]. Різниця у два-три порядки величини є суттєвою при визначенні придатності технології для конкретного медичного застосування [19, 20].

Для більшості сценаріїв планового моніторингу (добовий контроль тиску, вимірювання глюкози 4 рази на день, фіксація температури раз на годину) затримка 1–5 секунд є абсолютно прийнятною. Однак для систем екстреного сповіщення ситуація кардинально інша. Пристрій, що фіксує раптову фібриляцію шлуночків або різке падіння SpO_2 нижче 85%, повинен доставити тривожне повідомлення якомога швидше – затримка в 10 с може бути критичною для прийняття рішення медичним персоналом. У таких сценаріях LTE-M із затримкою 10–15 мс є єдиною прийнятним вибором.

Велика затримка NB-IoT пояснюється кількома технічними причинами: вузькосмугова передача потребує більше часових слотів для передавання того самого пакету; механізм HARQ (гібридне автоматичне повторення) у NB-IoT може виконувати до 128 повторів для покращення покриття, кожен із яких займає час; а режим eDRX робить пристрій недоступним між “вікнами” прийому.

LTE-M забезпечує нижчу затримку завдяки ширшій смузі (1,4 МГц), скороченій кількості повторів HARQ (до 8) та кращій інтеграції з ядром LTE-мережі. Час передавання пакету в активному режимі складає 10–15 мс, що робить

LTE-M практично рівноцінним стандартному LTE за реакцією на критичні події. Саме ця характеристика визначає вибір LTE-M для систем екстреного сповіщення, пристроїв моніторингу серцевої аритмії та носимих трекерів пацієнтів із підвищеним ризиком.

Затримка є параметром, що розмежовує сценарії застосування двох технологій чіткіше за інші: якщо критичність даних не вимагає реакції швидше ніж за 5–10 секунд, NB-IoT є цілком придатним. Якщо ж від моменту події до отримання сигналу медичним персоналом повинно пройти менше 1 секунди – LTE-M є єдино прийнятним вибором серед двох розглянутих технологій.

Третім ключовим параметром є пропускна здатність. Медичні IoT-пристрої суттєво різняться за обсягом даних, що передаються. Простий сенсор температури генерує 4 байти за вимірювання, пульсоксиметр – 8 байт, тонометр – 12 байт. Натомість одноквилинний фрагмент ЕКГ при частоті дискретизації 250 Гц і 12-бітному АЦП займає 45 кБайт, а поточкові дані акселерометра для виявлення падіння – від кількох кБайт/с. Цей діапазон у тисячі разів визначає принципово різні вимоги до пропускної здатності каналу.

NB-IoT у базовій конфігурації (Rel. 13) забезпечує пікову швидкість 26 кбіт/с DL / 62 кбіт/с UL, що у Rel. 14 з multicarrier зростає до 250 кбіт/с [4, 24]. Цього достатньо для передавання всіх простих фізіологічних показників, включно з короткими серіями ЕКГ невисокої роздільної здатності. Наприклад, добова статистика глюкозометра (48 записів $\times$ 30 байт = 1440 байт) передається за NB-IoT менш ніж за 0,5 с, що є повністю прийнятним для клінічного використання.

LTE-M у Rel. 13 забезпечує до 1 Мбіт/с DL / 1 Мбіт/с UL, а у Rel. 14 – до 4 Мбіт/с [5, 10]. Це відкриває можливість для передавання повноформатних ЕКГ (45 кБайт/хв), відеопотоків із телемедичних консультацій або масивів даних від кількох датчиків одночасно. Практичний приклад: носимий кардіомонітор, що безперервно передає ЕКГ у 12 відведеннях із частотою 500 Гц, генерує потік 90 кбіт/с, що в межах можливостей LTE-M але перевищує стійку пропускну здатність NB-IoT.

Водночас вибір технології з більшою пропускнуою здатністю не завжди є доцільним з економічної точки зору. Вартість NB-IoT-модуля у 2024 році становить приблизно 3–5 USD, тоді як LTE-M-модуль – 8–15 USD. При масовому розгортанні (наприклад, 1000 домашніх сенсорів для регіональної програми моніторингу) різниця у вартості модулів може сягати десятків тисяч доларів – і якщо сценарій не потребує можливостей LTE-M, вибір NB-IoT є не лише технічно, а й економічно обґрунтованим [15, 19].

Для кращого узагальнення взаємозв'язку між енергоспоживанням, затримкою та пропускнуою здатністю доцільно використати порівняльну схему, наведену на рисунку 2.1.

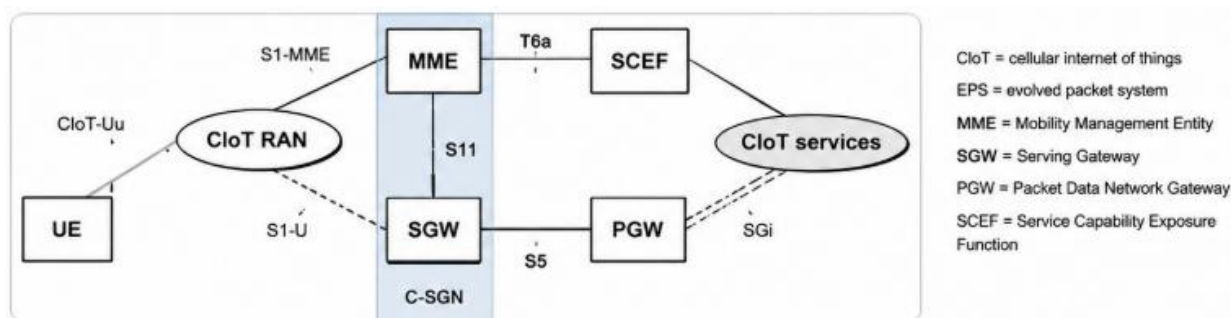


Рисунок 2.1 – Багаторівнева архітектура медичної IoT-системи на основі NB-IoT та LTE-M

Як видно з рисунка 2.1, NB-IoT має перевагу за енергоефективністю та придатністю до передавання невеликих пакетів даних, тоді як LTE-M має перевагу за меншою затримкою та вищою пропускнуою здатністю. Це підтверджує, що вибір технології залежить не від одного окремого параметра, а від сукупності вимог конкретного медичного сценарію.

Узагальнюючи порівняння, можна зазначити, що NB-IoT є більш доцільним для задач, у яких основними вимогами є довготривала автономна робота, низька частота передавання та невеликий обсяг даних. До таких задач належать стаціонарний домашній моніторинг, періодичне передавання показників хронічних пацієнтів, сенсори стану медичного обладнання або системи, що не потребують миттєвої реакції.

LTE-M є більш придатним для сценаріїв, де важливими є нижча затримка, вища швидкість передавання та більша гнучкість у роботі з даними. До таких сценаріїв можна віднести носимі медичні пристрої, трекери пацієнтів, системи екстреного сповіщення та рішення, у яких пристрій повинен передавати дані частіше або з меншою затримкою.

Порівняння енергоспоживання, затримки передавання та пропускної здатності показує, що NB-IoT і LTE-M не слід розглядати як повністю взаємозамінні технології. Кожна з них має власну область доцільного застосування: NB-IoT краще відповідає вимогам енергоефективних і стаціонарних медичних сенсорів, тоді як LTE-M є більш ефективним для мобільних, носимих і критичних за часом медичних IoT-рішень.

2.2 Оцінка покриття, надійності з'єднання та підтримки мобільності в умовах медичного застосування

У задачах медичного IoT характеристики покриття, надійності з'єднання та підтримки мобільності мають не менше значення, ніж енергоспоживання чи пропускна здатність. Медичні сенсори та носимі пристрої можуть працювати в різних умовах: у лікарнях, житлових приміщеннях, сільській місцевості, підвальних або напівпідвальних приміщеннях, а також під час переміщення пацієнта. Тому при виборі між NB-IoT та LTE-M важливо оцінювати не лише технічні характеристики стандартів, а й умови, у яких буде працювати конкретна медична система.

Покриття є одним із ключових параметрів для систем віддаленого моніторингу стану здоров'я. Якщо пристрій втрачає з'єднання з мережею, медичні дані можуть передаватися із затримкою або не передаватися взагалі. Для звичайних побутових IoT-систем це може бути не критично, однак у медичних застосуваннях втрата зв'язку може призвести до несвоєчасного отримання інформації про стан пацієнта. Саме тому технологія зв'язку повинна

забезпечувати стабільну роботу не лише в ідеальних умовах, а й у складному радіосередовищі.

NB-IoT має суттєву перевагу за покриттям завдяки покращеному значенню максимальних втрат на трасі (MCL – Maximum Coupling Loss). Для стандартного LTE MCL становить 140 дБ, для NB-IoT – 164 дБ, тобто на 24 дБ більше [4, 24]. На практиці це означає, що NB-IoT може підтримувати зв'язок у місцях, де сигнал LTE вже недостатній: підвальні приміщення, товстостінні будівлі, сільська місцевість із рідкою мережею базових станцій. Для порівняння: кожні 6 дБ приблизно відповідають подвоєнню відстані або проникненню крізь додаткову стіну середньої щільності.

Для медичних систем це означає, що NB-IoT може бути доцільним у випадках, коли пристрої розміщені у важкодоступних для сигналу місцях. Наприклад, домашні сенсори пацієнтів можуть працювати в квартирах із товстими стінами, приватних будинках, підвальних приміщеннях або в населених пунктах із менш щільною інфраструктурою мобільного зв'язку. У таких умовах здатність технології забезпечувати стабільне підключення при слабшому сигналі є важливою перевагою.

LTE-M має MCL 156 дБ – на 16 дБ вище за стандартний LTE, але на 8 дБ нижче за NB-IoT. Це означає, що LTE-M також суттєво розширює зону покриття порівняно з класичним LTE, проте в умовах дуже слабкого сигналу NB-IoT залишається більш стійким. GSMA визначає LTE-M як технологію, що підтримує тривалу роботу від батареї та широкий спектр сценаріїв із підтримкою мобільності – перевага, яку NB-IoT у повному обсязі не забезпечує [1, 25].

У контексті медичного застосування LTE-M може бути ефективним для носимих пристроїв, трекерів пацієнтів, систем спостереження за людьми похилого віку або пацієнтами, які можуть переміщатися за межами дому чи медичного закладу. Наприклад, якщо пацієнт носить пристрій моніторингу серцевого ритму або трекер екстреного сповіщення, важливо, щоб пристрій залишався підключеним під час руху. У цьому випадку вимога до мобільності може бути важливішою, ніж максимальне покриття в одному фіксованому місці.

Різниця в MCL має пряме практичне значення для медичних IoT-систем. Наприклад, сенсор NB-IoT у підвальному архіві лікарні або у квартирі з бетонними стінами старої будівлі, де рівень сигналу може становити лише -130 дБм, все одно зберігатиме з'єднання. Пристрій на LTE-M у тих самих умовах може втратити зв'язок. Водночас для носимого пристрою, що використовується на вулиці та в приміщеннях із нормальним покриттям, цієї різниці практично не відчуватиметься – і перевага LTE-M за мобільністю та затримкою стає важливішою.

Надійність з'єднання у медичних IoT-системах забезпечується як на рівні фізичного каналу, так і на рівні протоколів. На фізичному рівні обидві технології використовують механізм HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) – до 8 повторів у LTE-M і до 128 у NB-IoT [4, 5]. Більша кількість повторів у NB-IoT суттєво підвищує ймовірність успішної доставки навіть при дуже поганих умовах каналу (низькому SNR), що безпосередньо корелює з кращим MCL. На прикладному рівні надійність додатково забезпечується механізмами підтвердження, буферизації та повторного надсилання – незалежно від обраної технології передавання.

Для стаціонарних медичних сенсорів завдяки до 128 HARQ-повторам NB-IoT здатний підтримувати з'єднання у місцях, де інші технології відмовляють. Практичний приклад: сенсор глюкометра у квартирі на цокольному поверсі панельного будинку з рівнем сигналу -135 дБм (що нижче порогу стандартного LTE) залишатиметься в мережі NB-IoT, тоді як пристрій LTE-M у тих самих умовах може не встановити з'єднання. Для пацієнта це означає різницю між отриманням медичних даних і їх відсутністю.

LTE-M забезпечує вищу практичну надійність у мобільних сценаріях завдяки підтримці повноцінного handover між базовими станціями. Handover у LTE-M виконується без переривання сесії передавання: пристрій переключається між базовими станціями за час менше 50 мс, що є непомітним для прикладного рівня. NB-IoT handover не підтримує – при виході за зону однієї БС пристрій повторно встановлює з'єднання, що може займати від кількох секунд до хвилини. Для

носимого трекера пацієнта, що виходить із дому або переміщується між відділеннями лікарні, втрата з'єднання на цей час може бути неприйнятною.

Важливим аспектом надійності є використання ліцензованого спектра. На відміну від LoRaWAN або Zigbee, що працюють у неліцензованих ISM-діапазонах (868 МГц / 2,4 ГГц) і схильні до інтерференції від сусідніх пристроїв, NB-IoT та LTE-M функціонують у ліцензованих смугах LTE під контролем оператора [1, 26]. Це гарантує QoS (Quality of Service) – оператор може пріоритизувати медичний трафік, а регулятор забезпечує захист від несанкціонованого використання спектра. Для медичних систем, де надійність доставки є вимогою безпеки пацієнта, це є суттєвою перевагою над альтернативними LPWAN-технологіями.

Надійність на рівні мережі є необхідною, але не достатньою умовою для медичних систем [27]. Практична реалізація повинна передбачати механізми прикладного рівня: CoAP або MQTT із підтвердженням доставки (QoS 1/2), локальне буферизування даних у flash-пам'яті пристрою при тимчасовій втраті зв'язку (типово від 8 до 512 МБ залежно від пристрою), та синхронізацію накопичених даних після відновлення підключення. Без цих механізмів навіть найнадійніша мережа не гарантує цілісності медичних даних при короткочасних перебоях.

Підтримка мобільності у стільникових IoT-стандартах реалізується по-різному. LTE-M підтримує повноцінний handover (Cell Handover) – безперервне переключення між базовими станціями під управлінням мережі, аналогічно до класичного LTE. NB-IoT натомість використовує Cell Reselection – процедуру, при якій пристрій самостійно виявляє кращу соту і повторно реєструється в мережі. Ця відмінність є принциповою: handover займає <50 мс і непомітний для користувача, тоді як Cell Reselection може тривати 5–60 с, протягом яких з'єднання переривається.

NB-IoT з Cell Reselection є прийнятним для пристроїв, які рідко змінюють зону покриття або роблять це у нечутливі до затримки моменти. Наприклад, домашній тонометр, що вимірює тиск раз на день, і при цьому пацієнт ніколи не

виносить його за межі квартири, ніколи не зустрінеється з ситуацією Cell Reselection. Але той самий пристрій, якщо пацієнт переїздить до родичів або потрапляє до лікарні – може тимчасово втратити зв'язок при зміні соти, що загалом прийнятно для даного сценарію.

LTE-M із повноцінним handover є природним вибором для мобільних медичних пристроїв. У 3GPP Release 14 для LTE-M додатково передбачено підтримку позиціювання (OTDOA та E-CID з точністю до кількох десятків метрів), що дозволяє відстежувати місцезнаходження пацієнта, а також VoLTE для голосового екстреного зв'язку. Ці функції принципово недоступні в NB-IoT Release 13/14 і роблять LTE-M значно функціональнішим для сценаріїв із переміщенням пацієнта [10, 15].

Практичний приклад: трекер для літнього пацієнта з деменцією повинен безперервно передавати геолокацію та дані серцевого ритму, підтримувати кнопку екстреного виклику (VoLTE) і зберігати з'єднання під час пересування містом. Усе це вимагає саме LTE-M. Якби той самий пристрій використовував NB-IoT, він міг би передавати координати лише з великою затримкою, не підтримував би голосовий виклик і губив би з'єднання при зміні соти – що для даного сценарію є неприйнятним.

За трьома ключовими параметрами розділу складається чітка картина: NB-IoT перевершує за покриттям (MCL 164 дБ проти 156 дБ) і надійністю в умовах слабого сигналу (до 128 HARQ-повторів), тоді як LTE-M перевершує за мобільністю (handover <50 мс проти Cell Reselection 5–60 с) і функціональністю (позиціювання, VoLTE). Для стаціонарних медичних сенсорів у складних умовах покриття – NB-IoT. Для носимих і мобільних медичних пристроїв, де важлива безперервність з'єднання під час руху – LTE-M.

Механізм максимальних втрат на трасі (MCL) є ключовим параметром, що визначає здатність технології забезпечувати зв'язок в умовах перешкод. MCL розраховується як сума потужності передавача, підсилення антен і максимально допустимого загасання сигналу. Для NB-IoT MCL становить 164 дБ, для LTE-M — 156 дБ, тоді як для базового LTE — 140 дБ [4, 19]. Різниця у 8 дБ між NB-IoT

та LTE-M означає, що NB-IoT може підтримувати стабільне з'єднання ще за двох додаткових бетонних стін середньої щільності або приблизно вдвічі на більшій відстані у відкритому просторі. Для медичних систем це означає, що сенсор NB-IoT залишається в мережі у підвальних архівах лікарні, у палатах із значною товщиною перекриттів або у старих панельних будівлях, де рівень сигналу опускається до -130 дБм і нижче — умови, за яких LTE-M-пристрій може втратити з'єднання.

Надійність передавання на фізичному рівні забезпечується механізмом HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request). У NB-IoT максимальна кількість повторних передавань одного пакету становить до 128, тоді як у LTE-M — до 8. Ця різниця є принциповою: більша кількість повторів у NB-IoT гарантує доставку пакету навіть за дуже низького відношення сигнал/шум (SNR), проте безпосередньо збільшує затримку передавання. За умов нормального покриття (MCL 120–140 дБ) NB-IoT використовує лише кілька повторів і затримка залишається прийнятною. Проте у граничних умовах (MCL 155–164 дБ) кількість повторів зростає до максимуму, і затримка одного пакету може сягати 10–30 секунд. LTE-M за тих самих умов або втратить з'єднання (якщо MCL перевищить 156 дБ), або забезпечить доставку з мінімальними повторами і затримкою 10–50 мс. Це підтверджує, що NB-IoT і LTE-M мають принципово різні стратегії надійності: NB-IoT жертвує швидкістю заради покриття, LTE-M — покриттям заради швидкості.

Підтримка мобільності реалізована в NB-IoT та LTE-M принципово по-різному. LTE-M підтримує повноцінний handover — процедуру безперервного переключення між базовими станціями під управлінням мережі, аналогічну класичному LTE. Час виконання handover становить менше 50 мс і є непомітним для прикладного рівня. NB-IoT натомість використовує Cell Reselection — процедуру, при якій пристрій самостійно виявляє кращу соту і повторно реєструється в мережі. Ця процедура може тривати від 5 до 60 секунд, протягом яких з'єднання переривається.

Таблиця 2.2 — Порівняння параметрів покриття та надійності NB-IoT і LTE-M

Параметр	NB-IoT	LTE-M
MCL	164 дБ	156 дБ
Перевага над базовим LTE	+24 дБ	+16 дБ
Максимальна кількість повторів HARQ	128	8
Поведінка при слабкому сигналі	Більше повторів → вища затримка	Можлива втрата з'єднання
Стійкість у підвалах / товстостінних будівлях	Висока	Середня
Стійкість у сільській місцевості	Висока	Середня
Залежність затримки від якості покриття	Сильна (до 30 с при граничному MCL)	Слабка (10–50 мс)

Для носимого медичного пристрою, що переміщується разом із пацієнтом між відділеннями лікарні або виходить на вулицю, переривання з'єднання на 5–60 секунд є неприйнятним. Для стаціонарного домашнього сенсора, що ніколи не змінює зону покриття, ця характеристика не має значення. Для практичної ілюстрації розглянемо два медичні кейси. Перший — стаціонарний сенсор температури у підвальному складі медикаментів лікарні. Приміщення знаходиться на двох рівнях нижче землі, рівень сигналу LTE близько -133 дБм, що є нижчим за MCL LTE-M (156 дБ) але вищим за MCL NB-IoT (164 дБ). У такому приміщенні пристрій на NB-IoT впевнено підтримує з'єднання з 64–128 повторами HARQ і затримкою 5–15 с на пакет, тоді як LTE-M-пристрій перебуває за межею покриття. Оскільки сенсор стаціонарний і передає дані раз на годину, підвищена затримка NB-IoT не є проблемою — NB-IoT є єдиним практичним вибором. Другий кейс — носимий GPS-трекер для пацієнта з деменцією, який може виходити за межі медичного закладу. Пристрій повинен безперервно

передавати геолокацію та серцевий ритм, підтримувати кнопку екстреного виклику з функцією VoLTE і зберігати з'єднання при переміщенні між кількома базовими станціями. Усі ці вимоги задовольняє виключно LTE-M: handover забезпечує безперервність, затримка 10–15 мс є достатньою для голосового зв'язку, а позиціонування OTDOA дозволяє визначати місцезнаходження пацієнта з точністю кількох десятків метрів.

Для узагальнення відмінностей між NB-IoT та LTE-M за параметрами покриття, надійності з'єднання та мобільності доцільно використати схему, наведену на рисунку 2.2.

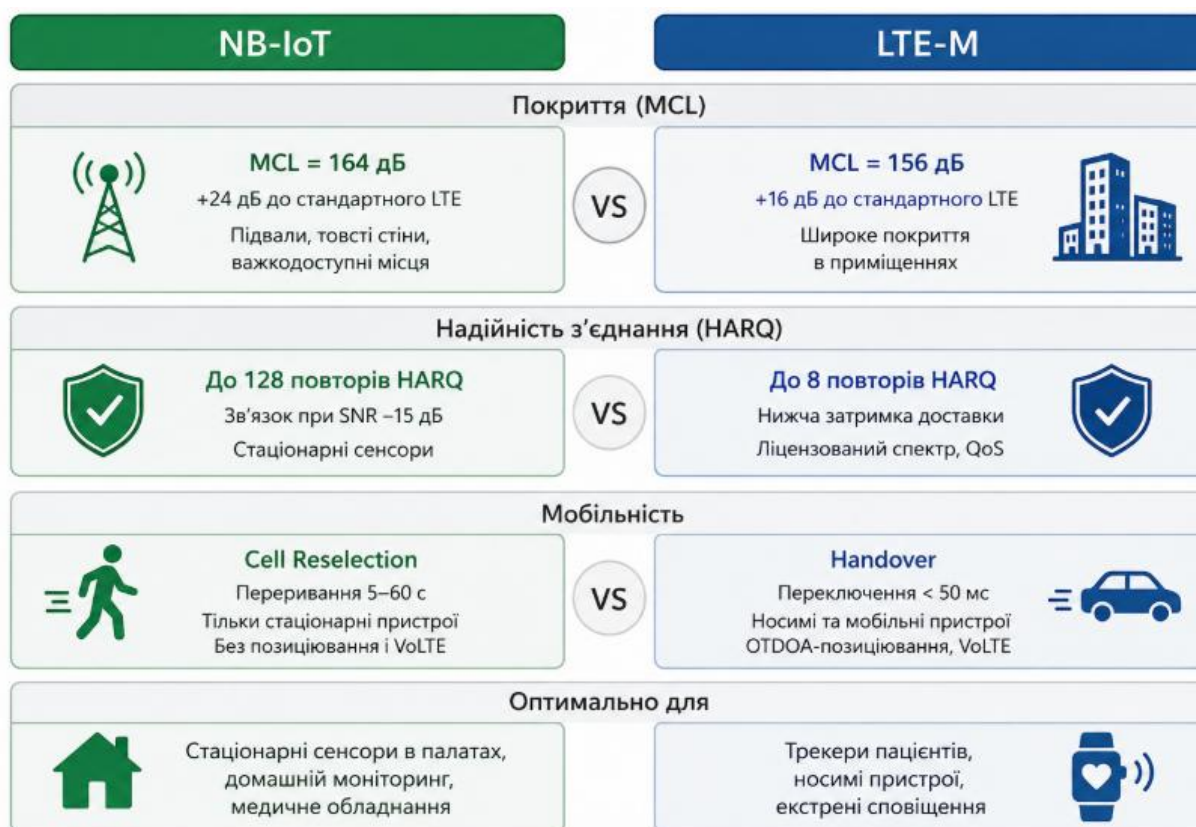


Рисунок 2.2 – Порівняння покриття, надійності з'єднання та мобільності стандартів NB-IoT та LTE-M

NB-IoT доцільно розглядати для стационарних пристроїв, які потребують широкого покриття та стабільної роботи в умовах слабого сигналу. LTE-M є більш придатним для пристроїв, що працюють у русі, потребують кращої підтримки мобільності та мають вищі вимоги до безперервності з'єднання. При

цьому надійність обох технологій залежить не лише від стандарту, а й від реальної конфігурації мережі оператора, умов покриття та архітектури прикладної системи.

У практичному медичному застосуванні можна виділити кілька типових сценаріїв. Для стаціонарного домашнього моніторингу, де пристрій передає невеликі обсяги даних і працює в одному місці, більш доцільним є NB-IoT. Для носимих медичних пристроїв, які супроводжують пацієнта протягом дня, кращим вибором може бути LTE-M. Для систем тривожного сповіщення перевагу також має LTE-M, оскільки важливо забезпечити не лише доставку даних, а й меншу затримку та підтримку рухомого користувача. Для моніторингу обладнання в лікарнях можливі обидва варіанти, залежно від того, чи обладнання є стаціонарним, чи переміщується між приміщеннями.

Оцінка покриття, надійності з'єднання та мобільності підтверджує, що NB-IoT і LTE-M мають різні сильні сторони в умовах медичного застосування. NB-IoT є більш доцільним для стаціонарних або малорухомих пристроїв, які працюють у складних умовах покриття та передають невеликі обсяги даних. LTE-M краще підходить для носимих і мобільних медичних пристроїв, де важливими є підтримка переміщення, стабільність з'єднання під час руху та можливість швидшого передавання інформації. Остаточний вибір технології повинен здійснюватися з урахуванням конкретного медичного сценарію, умов експлуатації та вимог до безперервності передавання даних.

2.3 Вибір оптимального стандарту для різних сценаріїв медичного IoT

На основі порівняння технічних параметрів NB-IoT та LTE-M, розглянутих у підпунктах 2.1 та 2.2, доцільно перейти до оцінки їх придатності для конкретних сценаріїв медичного IoT. Ключові числові орієнтири для прийняття рішення: NB-IoT – MCL 164 дБ, затримка 1,4–10 с, швидкість до 250 кбіт/с, Cell Reselection; LTE-M – MCL 156 дБ, затримка 10–15 мс, швидкість до 1 Мбіт/с, handover,

VoLTE, позиціювання. Саме ці параметри визначають придатність кожної технології залежно від умов і вимог конкретного медичного застосування.

NB-IoT і LTE-M належать до стільникових LPWA-технологій, стандартизованих 3GPP для IoT-застосувань. GSMA визначає NB-IoT як стандартизовану LPWA-технологію для підключення широкого кола IoT-пристроїв, а LTE-M як LPWA-стандарт 3GPP Release 13, орієнтований на IoT-пристрої з підтримкою мобільного зв'язку та тривалої роботи від батареї [1, 25]. Тому під час вибору технології для медичної системи важливо враховувати не лише загальні технічні характеристики, а й конкретну задачу, яку має виконувати пристрій.

Одним із найтипівіших сценаріїв є домашній моніторинг пацієнтів із хронічними захворюваннями. Типовий пристрій для такого сценарію передає 4–12 коротких пакетів даних на добу (30–100 байт кожен), розміщується стаціонарно в одній квартирі, часто у будівлях зі складними умовами покриття, і повинен працювати від батареї 1–3 роки без обслуговування. Вимога до затримки – не більше 5–10 секунд. За сукупністю цих вимог NB-IoT є оптимальним вибором: MCL 164 дБ забезпечує покриття навіть у підвалах, PSM-режим дозволяє досягти терміну служби батареї понад 5 років, а затримка 1,4–10 с є цілком прийнятною для планового моніторингу.

Іншим важливим сценарієм є використання носимих медичних пристроїв – браслетів ЕКГ-моніторингу, пульсоксиметрів із безперервним записом, трекерів пацієнтів або спеціалізованих медичних пристроїв класу MDR. Такі пристрої передають дані значно частіше (від 1 разу на хвилину до безперервного потоку), переміщуються разом із пацієнтом і вимагають handover при зміні соти. Затримка доставки повинна бути мінімальною для своєчасного реагування. Для цього сценарію LTE-M є єдиним прийнятним вибором серед двох розглянутих технологій: він забезпечує handover <50 мс, затримку 10–15 мс та швидкість до 1 Мбіт/с для передавання ЕКГ у 12 відведеннях або інших об'ємних даних.

Системи екстреного сповіщення є найбільш вимогливими до затримки серед усіх медичних IoT-сценаріїв. Пристрій типу “тривожна кнопка” або автоматичний

детектор падіння повинен доставити сигнал протягом 1–2 секунд від моменту події. При затримці NB-IoT у 1,4–10 с у PSM-режимі пристрій може взагалі не встигнути “прокинутися” і передати сигнал вчасно. LTE-M із затримкою 10–15 мс і підтримкою VoLTE (для голосового виклику) відповідає цим вимогам повністю. Крім того, підтримка позиціювання OTDOA у LTE-M (3GPP Rel. 14) дозволяє автоматично визначати місцезнаходження пацієнта під час екстреного виклику – критично важлива функція для сервісів допомоги літнім людям.

Моніторинг медичного обладнання в лікарні є прикладом сценарію, де обидві технології можуть застосовуватися паралельно. Стаціонарне обладнання – ШВЛ, інфузійні насоси, холодильники для зберігання медикаментів, датчики температури та вологості у складах – передає службові пакети даних раз на кілька хвилин і не потребує мобільності. Для таких пристроїв NB-IoT є оптимальним: низька вартість модуля (3–5 USD), тривала робота від батареї та MCL 164 дБ для роботи в складних умовах приміщень. Переносне обладнання – каталки з пацієнтами, мобільні монітори вітальних функцій, ультразвукові апарати на колесах – потребує handover при переміщенні між відділеннями і має заряджатися щодня, тому для них LTE-M є доцільнішим.

Телемедицина і дистанційні консультації є ще одним важливим сценарієм. Якщо пристрій під час відеоконсультації лікаря передає не лише відео (що потребує широкосмугового підключення, зазвичай Wi-Fi або 4G), а лише фізіологічні дані – ЕКГ, SpO₂, тиск – то для передавання цих даних цілком достатньо LTE-M. NB-IoT у даному сценарії може виявитися недостатнім через нижчу швидкість, якщо потрібне одночасне передавання кількох потоків даних із частим оновленням.

Моніторинг пацієнтів у віддалених або слабо покритих зонах – сільська місцевість, малі міста, підвальні приміщення – є одним із сценаріїв, де NB-IoT має беззаперечну технічну перевагу. Завдяки MCL 164 дБ та підтримці трьох режимів розгортання (in-band, guard-band, standalone) оператори можуть забезпечити покриття NB-IoT там, де LTE-M вже не отримує достатнього сигналу. Для стаціонарного сенсора в такій зоні – наприклад, пристрою моніторингу хворого на

ЦД у віддаленому селі – NB-IoT може бути єдиною реалістичною стільниковою IoT-опцією.

У реальних медичних системах нерідко доцільно застосовувати обидві технології одночасно. Наприклад, районна лікарня може розгортати мережу NB-IoT-сенсорів для моніторингу середовища, обладнання та стаціонарних пацієнтів (сотні пристроїв, низькі витрати) і паралельно видавати виписаним пацієнтам LTE-M-трекери для моніторингу під час реабілітації вдома та поза домом. Такий гібридний підхід дозволяє оптимізувати як технічні характеристики, так і вартість системи загалом.

Окремо варто розглянути питання сумісності обох стандартів з існуючою мережевою інфраструктурою. Оскільки NB-IoT та LTE-M розгортаються на базі наявних мереж LTE мобільних операторів, їх впровадження не вимагає побудови окремої інфраструктури. Це суттєво знижує поріг входу для медичних закладів і дозволяє використовувати вже наявне покриття операторів. В Україні провідні оператори забезпечують покриття NB-IoT та LTE-M у більшості обласних центрів та великих містах, що робить обидві технології практично доступними для розгортання медичних IoT-систем у міському середовищі.

З точки зору регуляторних вимог, вибір між NB-IoT та LTE-M не впливає на відповідність медичного пристрою вимогам GDPR чи MDR 2017/745. Обидві технології забезпечують автентифікацію на рівні стільникової мережі через механізм 3GPP AKA, однак регуляторні вимоги щодо захисту медичних даних реалізуються на прикладному рівні — шляхом наскрізного шифрування TLS 1.3 або DTLS 1.3 — незалежно від обраного радіостандарту. Таким чином, вибір між NB-IoT та LTE-M є суто технічним і визначається вимогами конкретного медичного сценарію, а не регуляторними обмеженнями.

Узагальнену оцінку придатності NB-IoT та LTE-M для розглянутих сценаріїв медичного IoT з урахуванням ключових технічних параметрів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Доцільність використання NB-IoT та LTE-M у різних сценаріях медичного IoT

Медичний сценарій	Ключові вимоги	Придатність NB-IoT	Придатність LTE-M	Доцільніша технологія
Домашній моніторинг хронічних пацієнтів	Низьке енергоспоживання, стабільне покриття, передавання малих пакетів даних	Висока	Середня	NB-IoT
Періодична передача показників здоров'я	Автономність, невеликий обсяг даних, робота з перервами	Висока	Середня / висока	NB-IoT
Носимі медичні пристрої	Мобільність, частіше оновлення даних, нижча затримка	Середня	Висока	LTE-M
Система екстреного сповіщення	Мінімальна затримка, стабільне з'єднання, можливість роботи в русі	Середня	Висока	LTE-M
Моніторинг пацієнта в русі	Підтримка мобільності, стабільність під час переміщення	Обмежена	Висока	LTE-M
Моніторинг обладнання в лікарні	Надійність, масштабованість, передавання службових даних	Висока	Висока	Залежить від рухомості обладнання
Сенсори в зонах слабого покриття	Розширене покриття, стабільність сигналу, низький трафік	Висока	Середня	NB-IoT
Медична IoT-система з частим оновленням показників	Вища пропускну здатність, нижча затримка, активний режим роботи	Середня	Висока	LTE-M

Як видно з таблиці 2.3, NB-IoT є оптимальним для сценаріїв, де визначальними є покриття (MCL 164 дБ), автономність (понад 5 років від батареї за умови рідкісного передавання) та низька вартість модуля (3–5 USD). Це сценарії з невеликим і нечастим трафіком, стаціонарним розміщенням і відсутністю вимоги до миттєвого реагування. Затримка 1,4–10 с є прийнятною для більшості задач планового моніторингу.

LTE-M є оптимальним для сценаріїв, де критичними є мобільність (handover <50 мс), низька затримка (10–15 мс) та розширена функціональність (VoLTE, позиціювання OTDOA). Вища вартість модуля (8–15 USD) і дещо більше енергоспоживання є прийнятним компромісом для пристроїв, що заряджаються щодня або кілька разів на тиждень. До таких пристроїв належать носимі кардіомонітори, трекери пацієнтів із деменцією, тривожні кнопки для літніх людей і мобільні монітори вітальних функцій.

Важливо підкреслити, що у складних медичних системах не обов'язково обирати лише одну технологію. Наприклад, районна лікарня може одночасно використовувати NB-IoT для мережі стаціонарних сенсорів (сотні пристроїв, мінімальні витрати на обслуговування) і LTE-M для носимих пристроїв пацієнтів під час реабілітації поза стаціонаром. Сучасні мобільні мережі операторів підтримують обидва стандарти на одній інфраструктурі, що не потребує розгортання окремих мереж.

Для практичного впровадження важливо також враховувати наявність покриття оператора. У багатьох країнах NB-IoT та LTE-M впроваджуються мобільними операторами, однак фактична доступність залежить від конкретної країни, оператора та регіону покриття. У деяких регіонах покриття LTE-M може бути ширшим або навпаки – що вимагає перевірки на конкретній території розгортання. Крім того, вартість SIM-карт і тарифних планів для NB-IoT і LTE-M у різних операторів може суттєво відрізнятися, що є додатковим практичним критерієм вибору.

Отже, вибір між NB-IoT та LTE-M у медичних IoT-системах є не питанням “яка технологія краща”, а питанням “яка технологія відповідає конкретному

сценарію”. NB-IoT (MCL 164 дБ, затримка 1,4–10 с, ціна 3–5 USD/модуль, термін роботи понад 5 років) є оптимальним для масових стаціонарних сенсорів планового моніторингу. LTE-M (handover <50 мс, затримка 10–15 мс, VoLTE, позиціонування, ціна 8–15 USD/модуль) є оптимальним для мобільних, носимих і критичних за часом медичних пристроїв. Ці стандарти не конкурують, а доповнюють один одного, і їх спільне застосування у рамках єдиної медичної IoT-інфраструктури є найбільш ефективним підходом.

Висновки до 2 розділу

У другому розділі виконано порівняльну характеристику стандартів NB-IoT та LTE-M у задачах медичного IoT. Основну увагу приділено параметрам, важливим для систем віддаленого моніторингу здоров'я: енергоспоживанню, затримці передавання, пропускній здатності, покриттю, надійності з'єднання та підтримці мобільності.

Порівняння показало, що NB-IoT є доцільним для стаціонарних або малорухомих медичних пристроїв, які передають невеликі обсяги даних і потребують тривалої автономної роботи. До таких сценаріїв належать домашній моніторинг хронічних пацієнтів, періодичне передавання показників здоров'я, контроль медичного обладнання та робота сенсорів у зонах слабого покриття. Перевагами NB-IoT є низьке енергоспоживання, передавання малих пакетів даних і робота в складному радіосередовищі.

LTE-M краще підходить для сценаріїв, де важливі менша затримка, вища пропускна здатність і підтримка мобільності. Ця технологія є придатною для носимих медичних пристроїв, систем екстреного сповіщення, моніторингу пацієнтів у русі та IoT-систем із частим оновленням показників. Завдяки підтримці мобільності LTE-M забезпечує стабільніше передавання даних під час переміщення пристрою між зонами покриття.

Встановлено, що надійність з'єднання залежить не лише від вибраного стандарту, а й від умов покриття, конфігурації мережі оператора, частоти

передавання даних, режимів енергозбереження та архітектури прикладної системи. Тому під час впровадження слід враховувати як характеристики NB-IoT та LTE-M, так і конкретні умови експлуатації пристроїв.

Отже, NB-IoT та LTE-M не є повністю взаємозамінними технологіями. Вони мають різні сфери застосування й можуть доповнювати одна одну в медичній IoT-інфраструктурі. NB-IoT оптимальний для автономних стаціонарних сенсорів із малим трафіком, тоді як LTE-M є кращим вибором для мобільних, носимих і критичних за часом медичних пристроїв.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТІВ У СИСТЕМАХ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

3.1 Моделювання роботи медичної IoT-системи на основі NB-IoT та LTE-M

Для дослідження ефективності використання стандартів NB-IoT та LTE-M у сфері охорони здоров'я доцільно розглянути узагальнену модель медичної IoT-системи віддаленого моніторингу стану здоров'я пацієнтів. Така модель дозволяє оцінити, як вибір телекомунікаційного стандарту впливає на передавання медичних даних, автономність кінцевих пристроїв, затримку, стабільність з'єднання та придатність системи до різних сценаріїв використання.

У межах цього підрозділу моделювання виконується аналітичним способом. Це означає, що дослідження не передбачає побудову повноцінної фізичної мережі або складної симуляції стільникового зв'язку, а базується на заданих вихідних параметрах системи, розрахунку обсягу переданих даних і порівнянні вимог до роботи пристроїв у різних умовах. Такий підхід є доцільним для оцінювання придатності NB-IoT та LTE-M у типових медичних IoT-сценаріях.

У загальному вигляді медична IoT-система віддаленого моніторингу складається з кінцевих медичних пристроїв, мережі доступу, базової станції мобільного оператора, серверної частини, бази даних та медичної інформаційної системи. Кінцевими пристроями можуть бути медичні сенсори або носимі пристрої, які вимірюють показники стану здоров'я пацієнта. До таких показників можуть належати пульс, температура тіла, сатурація кисню, артеріальний тиск або інші параметри, які потребують регулярного контролю.

Передавання даних у такій системі здійснюється за послідовністю: медичний сенсор або носимий пристрій → мережа доступу NB-IoT або LTE-M → базова станція → сервер → база даних → медичний інформаційний центр.

Узагальнену модель роботи медичної IoT-системи на основі NB-IoT та LTE-M доцільно подати на рисунку 3.1.

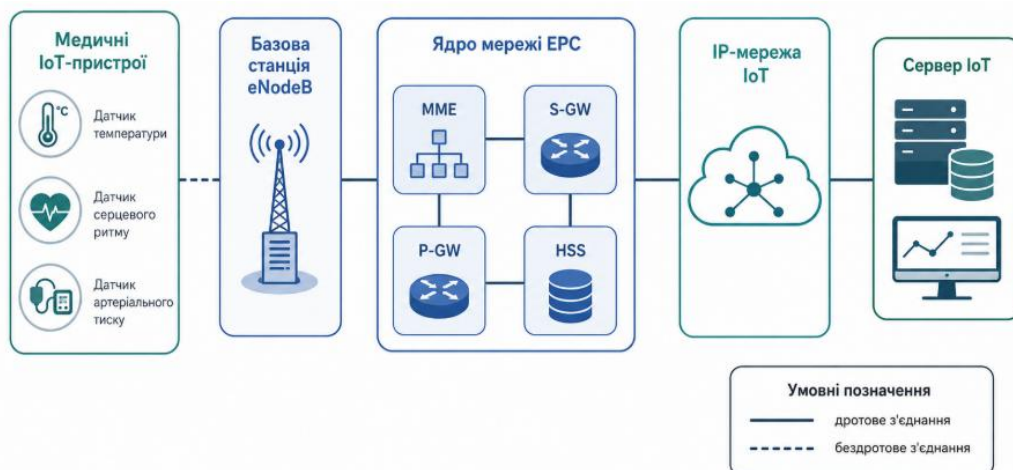


Рисунок 3.1 – Узагальнена архітектура передавання медичних IoT-даних через стільникову мережу

Основна мета моделювання полягає в тому, щоб порівняти роботу NB-IoT та LTE-M не лише за окремими технічними характеристиками, а в межах конкретних медичних сценаріїв. Для цього розглядаються два типові варіанти використання медичних IoT-пристроїв.

Перший сценарій – стаціонарний домашній медичний сенсор. Такий пристрій може використовуватися для періодичного моніторингу пацієнта, який перебуває вдома, наприклад після виписки зі стаціонару або під час тривалого спостереження за хронічним захворюванням. У цьому випадку пристрій переважно перебуває в одному місці, передає невеликі обсяги даних і не потребує постійної підтримки мобільності. Основними вимогами для такого сценарію є тривала автономна робота, стабільне покриття, низьке енергоспоживання та надійне передавання малих пакетів даних.

Другий сценарій – носимий медичний пристрій для пацієнта, який переміщується. Такий пристрій може використовуватися для моніторингу стану людини під час повсякденної активності, пересування містом або амбулаторного спостереження. У цьому випадку важливішими стають підтримка мобільності, менша затримка передавання, швидше встановлення з'єднання та можливість передавання даних частіше або з більшим обсягом. Для такого сценарію LTE-M

може мати перевагу порівняно з NB-IoT, оскільки краще підтримує рух пристрою між зонами покриття.

Для проведення моделювання задаються вихідні параметри системи. Вони мають умовний характер, однак відображають типову логіку роботи медичних IoT-пристроїв у системах віддаленого моніторингу.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри моделювання медичної IoT-системи

Параметр	Сценарій 1: стаціонарний домашній сенсор	Сценарій 2: носимий пристрій пацієнта
Кількість пацієнтів	100	100
Тип пристрою	Стаціонарний медичний сенсор	Носимий медичний пристрій
Основні показники	Температура, пульс, сатурація	Пульс, сатурація, активність, аварійні повідомлення
Орієнтовний розмір одного повідомлення	120 байт	250 байт
Періодичність передавання	1 раз на 5 хвилин	1 раз на 1 хвилину
Основний критерій	Автономність і покриття	Мобільність і менша затримка
Доцільний стандарт для перевірки	NB-IoT	LTE-M

До таблиці 3.1 додається третій сценарій – пристрій екстреного сповіщення (“тривожна кнопка”), для якого критичним є не обсяг даних, а затримка доставки. Параметри трьох сценаріїв наведено в таблиці 3.1 вище. Нижче виконуються розрахунки для кожного сценарію за такими показниками: добова кількість повідомлень, добовий обсяг даних, розрахунковий термін роботи від батареї та максимально допустима затримка.

Основними показниками, що оцінюються в межах моделювання, є: затримка передавання повідомлення (час від формування пакету до отримання сервером); витрати енергії на один цикл роботи пристрою; кількість успішно доставлених

повідомлень за добу; розрахунковий час автономної роботи пристрою від батареї; придатність технології до роботи в умовах слабого покриття.

Для розуміння логіки розрахунків розглянемо спрощену модель одного робочого циклу медичного IoT-пристрою. Цикл складається з таких етапів: 1) вимірювання медичного параметра (сенсор знімає показник і формує числове значення); 2) формування пакету даних (мікроконтролер упаковує дані у повідомлення заданого розміру); 3) активація радіомодуля (перехід із режиму сну до активного режиму, найбільш енергозатратний момент); 4) передавання повідомлення на базову станцію; 5) очікування підтвердження доставки (ACK); 6) перехід у режим енергозбереження (PSM або eDRX) до наступного циклу. Саме на кроках 3–5 принципово різниться поведінка NB-IoT та LTE-M: NB-IoT витрачає більше часу на передавання (через повтори HARQ), але швидше повертається у глибокий PSM, тоді як LTE-M передає швидко, але підтримує коротший цикл eDRX для збереження мобільності.

Під час моделювання враховується загальна логіка робочого циклу медичного IoT-пристрою, наведена на рисунку 1.3. У розділі 3 ця логіка використовується як основа для розрахунку кількості повідомлень, обсягу переданих даних і оцінювання придатності стандартів NB-IoT та LTE-M для різних сценаріїв медичного

Сценарій 1. Стаціонарний домашній сенсор (NB-IoT)

Кількість повідомлень від одного сенсора за добу ($T = 300$ с):

$$N_1 = 86400 / 300 = 288 \text{ повідомлень/добу.}$$

Для 100 пристроїв: $N_{12} = 288 \times 100 = 28\,800$ повідомлень/добу.

Добовий обсяг переданих даних ($S = 120$ байт, $K = 100$):

$$V_1 = 288 \times 120 \times 100 = 3\,456\,000 \text{ байт} \approx 3,46 \text{ МБ/добу.}$$

Розрахунок терміну роботи від батареї. Типовий NB-IoT модуль споживає під час активної передачі $I_a = 220$ мА, тривалість одного сеансу $t_a = 1$ с. Споживання за один сеанс: $E_1 = 220 \times (1/3600) = 0,061$ мАгод. За 288 сеансів на добу: $E_7 = 0,061 \times 288 = 17,6$ мАгод/добу. При ємності батареї $C = 2000$ мАгод термін роботи: $T_a = 2000 / 17,6 \approx 114$ діб $\approx 3,8$ місяця. З оптимізованим PSM (час

активності $t_a = 100$ мс): $E_1 = 220 \times (0,1/3600) = 0,006$ мАгод, $E_7 = 0,006 \times 288 = 1,7$ мАгод/добу, $T_a = 2000 / 1,7 \approx 1176$ діб $\approx 3,2$ роки.

Аналіз затримки для сценарію 1. У режимі PSM із циклом eDRX = 10 хв (600 с) аварійне повідомлення від NB-IoT пристрою може бути доставлено із затримкою до 600 с. Це є прийнятним для планового моніторингу, проте неприйнятним для екстреного сповіщення. Для сценарію 1 NB-IoT повністю відповідає вимогам: обсяг даних мінімальний (3,46 МБ/добу), термін батареї з PSM-оптимізацією – понад 3 роки, затримка в межах допустимого для планового моніторингу [9, 22].

Сценарій 2. Носимий пристрій пацієнта (LTE-M)

Кількість повідомлень від одного пристрою за добу ($T = 60$ с):

$$N_2 = 86400 / 60 = 1440 \text{ повідомлень/добу.}$$

Для 100 пристроїв: $N_{22} = 1440 \times 100 = 144\,000$ повідомлень/добу.

Добовий обсяг ($S = 250$ байт, $K = 100$):

$$V_2 = 1440 \times 250 \times 100 = 36\,000\,000 \text{ байт} \approx 36 \text{ МБ/добу.}$$

Розрахунок терміну роботи від батареї. Типовий LTE-M модуль: $I_a = 300$ мА, $t_a = 0,5$ с. Споживання за сеанс: $E_1 = 300 \times (0,5/3600) = 0,042$ мАгод. За 1440 сеансів: $E_7 = 0,042 \times 1440 = 60,5$ мАгод/добу. При $C = 500$ мАгод (тонкий браслет): $T_a = 500 / 60,5 \approx 8,3$ доби. При $C = 2000$ мАгод: $T_a = 2000 / 60,5 \approx 33$ доби. Це підтверджує, що носимий LTE-M пристрій потребує зарядки щотижня або частіше, що є прийнятним для носимих медичних пристроїв, які звично заряджають щовечора.

Аналіз затримки для сценарію 2. LTE-M в активному режимі забезпечує затримку 10–15 мс, підтримує handover <50 мс при зміні базової станції. При передаванні 1 разу на хвилину пристрій більшу частину часу перебуває в режимі eDRX (цикл ≈ 5 с для LTE-M), тому затримка відповіді на аварійний сигнал – до 5 с, що є прийнятним. Для сценарію 2 LTE-M відповідає всім вимогам: обсяг даних 36 МБ/добу в межах пропускної здатності, термін батареї – кілька тижнів при щоденному заряджанні, затримка мінімальна [17, 23].

Детальний розбір сценарію 3 дозволяє кількісно довести, чому NB-IoT у режимі PSM принципово не придатний для систем екстреного сповіщення. Розглянемо послідовність подій при натисканні тривожної кнопки пристроєм, що перебуває в режимі PSM із циклом eDRX = 600 с (10 хв): крок 1 — мікроконтролер реєструє подію (≈ 1 мс); крок 2 — пробудження радіомодуля з PSM (250–500 мс); крок 3 — очікування наступного вікна eDRX для реєстрації в мережі (від 0 до 600 с, у середньому 300 с); крок 4 — процедура реєстрації та підключення до мережі (2–5 с); крок 5 — передавання пакету з урахуванням HARQ-повторів (0,5–10 с залежно від якості покриття). Сумарна затримка від події до доставки становить від ~ 3 с (оптимістичний сценарій — пристрій щойно прокинувся) до ~ 615 с (пристрій щойно перейшов у сон), у середньому близько 305 с (≈ 5 хвилин). При вимозі ≤ 2 с NB-IoT у режимі PSM/eDRX є технічно непридатним незалежно від якості покриття.

Для LTE-M той самий ланцюжок подій виглядає принципово інакше. При мінімальному циклі eDRX = 5 с: крок 1 — подія (1 мс); крок 2 — пробудження радіомодуля LTE-M (50–100 мс); крок 3 — очікування вікна eDRX (від 0 до 5 с); крок 4 — пристрій вже приєднаний до мережі (Connected стан); крок 5 — передавання (10–15 мс). Сумарна затримка: 60–200 мс без eDRX або до 5,1 с при eDRX = 5 с. При відключеному eDRX (пристрій у активному режимі) затримка становить 10–200 мс — повністю задовольняє вимогу ≤ 2 с. Додатково, лише LTE-M підтримує VoLTE, що дозволяє пацієнту встановити голосовий зв'язок із диспетчером після натискання кнопки — функція, принципово недоступна в NB-IoT.

Вплив якості покриття на затримку є важливим аспектом для медичних систем у реальних умовах розгортання. За умов нормального покриття (MCL 120–140 дБ) NB-IoT використовує 1–4 повтори HARQ, і затримка активного передавання становить 0,3–1 с. За умов середнього покриття (MCL 140–155 дБ) кількість повторів зростає до 8–32, затримка — до 2–5 с. За граничних умов покриття (MCL 155–164 дБ), характерних для підвалів або товстостінних будівель, NB-IoT використовує 64–128 повторів і затримка одного пакету може

сягати 10–30 с. Для медичних систем планового моніторингу (сенсор тиску або глюкози з передаванням раз на годину) затримка навіть 30 с є цілком прийнятною. Але цей факт необхідно враховувати при проектуванні: якщо система моніторингу розрахована на граничні умови покриття, її алгоритм обробки даних повинен допускати затримки до 30 с без генерації помилкових тривог.

Таблиця 3.2 — Зведені результати аналітичного моделювання медичної IoT-системи

Показник	Сценарій 1 (NB-IoT)	Сценарій 2 (LTE-M)	Сценарій 3 (LTE-M)
Тип пристрою	Стаціонарний сенсор	Носимий пристрій	Тривожна кнопка
Період передавання	300 с	60 с	За подією
Передавань / пристрій / добу	288	1440	≤ 10
Передавань / 100 пристроїв / добу	28 800	144 000	$\leq 1\,000$
Добовий обсяг (100 пристроїв)	3,46 МБ	36 МБ	≤ 50 кБ
Термін батареї (PSM опт., 2000 мАгод)	3+ роки	~33 доби	2+ роки
Затримка доставки	1,4–10 с	10–15 мс	10–200 мс
Вимога до затримки	≤ 10 с	≤ 100 мс	≤ 2 с
Вимога виконується?	Так	Так	Так (LTE-M без eDRX)
Рекомендований стандарт	NB-IoT	LTE-M	LTE-M

Сценарій 3. Пристрій екстреного сповіщення (“тривожна кнопка”)

Параметри: розмір пакету $S_3 = 50$ байт (сигнал + GPS-координати), передавання за запитом (не більше 10 разів/добу в нормальному режимі та 1 раз при натисканні кнопки). Вимога до затримки: $T - t_{aa} \leq 2$ с від натискання кнопки до отримання сигналу сервером.

Аналіз для NB-IoT. Якщо пристрій перебуває в PSM із циклом eDRX = 10 хв (типове значення для енергоощадного режиму), сигнал при натисканні кнопки може бути затриманий до 600 с = 10 хв. Навіть при зменшеному циклі eDRX = 20 с затримка складе до 20 с – що перевищує вимогу 2 с. Отже, NB-IoT у режимі глибокого PSM не відповідає вимозі затримки для сценарію 3. Виняток: якщо пристрій постійно підключений (без PSM), затримка NB-IoT складе 1,4–10 с – на межі допустимого, але за рахунок різкого скорочення терміну батареї.

Аналіз для LTE-M. У режимі eDRX із циклом 5 с затримка при натисканні кнопки складе до 5 с – на межі вимоги. У режимі без eDRX затримка 10–15 мс повністю задовольняє вимогу 2 с. LTE-M також підтримує VoLTE – можливість голосового виклику, що є додатковою перевагою для тривожної кнопки. Добовий трафік мінімальний: $V_3 = 10 \times 50 = 500$ байт/добу (планові), тому пропускна здатність не є обмеженням. Розрахунковий термін батареї при $C = 2000$ мАгод і мінімальній кількості сеансів: $T_a > 2$ років. Висновок: для сценарію 3 LTE-M є єдиним прийнятним варіантом серед двох розглянутих стандартів [15, 23].

Детальний розбір сценарію 3 дозволяє кількісно підтвердити, чому конфігурація режиму енергозбереження є визначальним фактором для систем екстреного сповіщення. При налаштуванні NB-IoT-пристрою з циклом eDRX = 60 с (компромісний варіант між автономністю та доступністю) середня затримка відповіді на подію становить 30 с, що у 15 разів перевищує допустиму межу. Навіть при мінімально можливому циклі eDRX для NB-IoT (2,048 с згідно з 3GPP) середня затримка складе близько 1 с, однак пікова затримка при найгіршому збігу обставин досягає 2 с — що вже знаходиться на межі вимоги. У реальних умовах із урахуванням часу реєстрації в мережі та HARQ-повторів за поганого покриття ця межа буде систематично перевищуватися.

Зведені результати аналітичного моделювання за трьома сценаріями наведено в таблиці 3.3. Порівняння здійснювалось за чотирма показниками: добова кількість повідомлень від 100 пристроїв, добовий обсяг даних, розрахунковий термін роботи від батареї та виконання вимоги до затримки.

Таблиця 3.3 – Зведені результати аналітичного моделювання медичної IoT-системи

Сценарій	Доцільний стандарт	Кількість повідомлень за добу (100 пристроїв)	Добовий обсяг даних	Основний результат моделювання
Стаціонарний домашній сенсор	NB-IoT	28 800 повідомлень/добу	$\approx 3,46$ МБ/добу	Малий обсяг трафіку та пріоритет автономності. За оптимізованого PSM можливий термін роботи понад 3 роки; затримка прийнятна для планового моніторингу.
Носимий пристрій пацієнта	LTE-M	144 000 повідомлень/добу	≈ 36 МБ/добу	Потрібні частіше передавання, менша затримка та підтримка мобільності. Термін автономної роботи нижчий, однак регулярне заряджання є прийнятним для носимого пристрою.
Пристрій екстреного сповіщення («тривожна кнопка»)	LTE-M	до 1 000 повідомлень/добу	$\approx 0,05$ МБ/добу	Критичною є затримка доставки до 2 с. NB-IoT у режимах PSM/eDRX не забезпечує потрібної оперативності, тоді як LTE-M підтримує малу затримку, VoLTE та позиціонування.

Отже, аналітичне моделювання трьох медичних IoT-сценаріїв підтверджує та конкретизує висновки попередніх розділів числовими результатами. Стационарний домашній сенсор на NB-IoT забезпечує термін роботи до 3–4 років при добовому трафіку 3,46 МБ/100 пристроїв – оптимально для масового розгортання. Носимий пристрій на LTE-M передає 36 МБ/добу з затримкою 10–15 мс і підтримкою мобільності – оптимально для активних пацієнтів. Пристрій екстреного сповіщення вимагає LTE-M через жорстку вимогу до затримки ≤ 2 с, яку NB-IoT у режимі PSM/eDRX не здатен забезпечити. Три сценарії охоплюють принципово різні медичні потреби і демонструють, що NB-IoT та LTE-M є взаємодоповнювальними, а не конкуруючими технологіями в медичній IoT-інфраструктурі.

Результати моделювання підтверджують, що вибір телекомунікаційного стандарту в медичній IoT-системі має базуватися на кількісних критеріях: розрахованому терміні роботи батареї, допустимій затримці для конкретного медичного сценарію та добовому обсязі даних. Виконані розрахунки є основою для практичних рекомендацій щодо проектування медичних IoT-систем на основі NB-IoT та LTE-M.

3.2 Обґрунтування вибору стандарту з урахуванням критеріїв якості обслуговування та енергоефективності

На основі аналітичного моделювання, виконаного у підрозділі 3.1, доцільно перейти до обґрунтування вибору стандарту для різних медичних IoT-сценаріїв. Якщо в 3.1 досліджувалась поведінка NB-IoT та LTE-M у конкретних умовних сценаріях і виконувались кількісні розрахунки, то в цьому підрозділі формулюються практичні рекомендації: який стандарт і за яких умов є доцільнішим для медичного IoT-застосування.

Вибір стандарту для медичної IoT-системи не може обмежуватися лише технічними характеристиками, він має враховувати сукупність критеріїв, що визначають ефективність роботи системи в реальних умовах. Основними

критеріями оцінювання є: якість обслуговування (QoS), що включає своєчасність доставки повідомлень, стабільність з'єднання та надійність передавання; затримка передавання особливо критична для систем екстреного сповіщення; надійність доставки повідомлень, зокрема збереження даних при тимчасовій втраті зв'язку; підтримка мобільності для пристроїв, що переміщуються разом із пацієнтом; покриття мережі – здатність забезпечити з'єднання у будівлях, підвальних приміщеннях та віддалених зонах; пропускна здатність – достатність для типового медичного трафіку; енергоспоживання та автономність – критично для батарейних пристроїв без щоденного заряджання; вартість модуля та складність реалізації; придатність до масштабування при розгортанні великої кількості пристроїв.

Важливо підкреслити, що якість обслуговування для медичних IoT-систем не зводиться лише до швидкості передавання даних. У медичному контексті першочерговими є своєчасність доставки повідомлення (особливо аварійного), стабільність роботи без втрати даних, можливість передавання критичних сповіщень у реальному часі, збереження накопичених даних при тимчасовому відключенні та відповідність технології типу медичного застосування. Тому оцінювання QoS у медичних IoT-системах завжди має виконуватися з прив'язкою до конкретного медичного сценарію.

На основі розглянутих критеріїв сформовано матрицю вибору стандарту для шести типових медичних IoT-сценаріїв. Матриця наведена в таблиці 3.4.

Матриця показує чіткий розподіл сценаріїв між двома стандартами: NB-IoT охоплює стаціонарні сценарії з пріоритетом автономності та покриття, LTE-M – мобільні та критичні за часом сценарії. При цьому жоден стандарт не є домінуючим у всіх випадках, що підтверджує необхідність вибору на основі конкретних вимог системи. Узагальнену схему вибору стандарту для медичних IoT-сценаріїв за критеріями якості обслуговування та енергоефективності наведено на рисунку 3.2.

Розглянемо детальніше критерій енергоефективності. NB-IoT має очевидну перевагу для пристроїв, які більшу частину часу перебувають у режимі

очікування і лише періодично передають невеликі пакети даних. Як показано в розрахунках підрозділу 3.1, стаціонарний сенсор на NB-IoT із оптимізованим PSM забезпечує термін роботи від батареї понад 3 роки, тоді як аналогічний пристрій на LTE-M – близько 1–2 років за тих самих умов.

Таблиця 3.4 – Матриця вибору стандарту для медичних IoT-сценаріїв

Медичний сценарій	Доцільний стандарт	Обґрунтування
Домашній моніторинг хронічного пацієнта	NB-IoT	Малі пакети, низька частота передавання, автономність понад 3 роки за умови використання PSM.
Сенсор температури, тиску або глюкози	NB-IoT	Пріоритетними є енергоефективність і стабільне покриття, зокрема MCL 164 дБ.
Носимий пристрій пацієнта	LTE-M	Потрібні мобільність, handover менше 50 мс і затримка передавання 10–15 мс.
Система екстреного сповіщення	LTE-M	Критичною є затримка до 2 с, а також підтримка VoLTE та позиціювання OTDOA.
Моніторинг стаціонарного медичного обладнання	NB-IoT	Стаціонарна робота, малий трафік, низька вартість модуля та тривала автономність.
Трекінг пацієнта в межах або за межами медичного закладу	LTE-M	Потрібні підтримка переміщення, безперервне з'єднання та стабільна робота під час зміни зони покриття.

Для носимого пристрою з передаванням даних раз на хвилину різниця між технологіями зменшується, оскільки часте виведення з режиму сну нівелює перевагу глибокого PSM. Крім того, NB-IoT-модуль коштує 3–5 USD порівняно з 8–15 USD для LTE-M, що суттєво при масовому розгортанні. Щодо критерію якості обслуговування, перевага здебільшого переходить до LTE-M у сценаріях, де система потребує меншої затримки, стабільного з'єднання під час руху,

частішого передавання даних або підтримки тривожних повідомлень. Затримка NB-IoT у режимі PSM може досягати кількох хвилин, що для критичних медичних застосувань є неприйнятним. LTE-M із затримкою 10–15 мс в активному режимі та handover менше 50 мс забезпечує рівень QoS, порівнянний зі стандартним LTE, що є достатнім для всіх розглянутих медичних сценаріїв. Підтримка VoLTE додатково забезпечує можливість голосового екстреного зв'язку – функцію, принципово недоступну в NB-IoT.

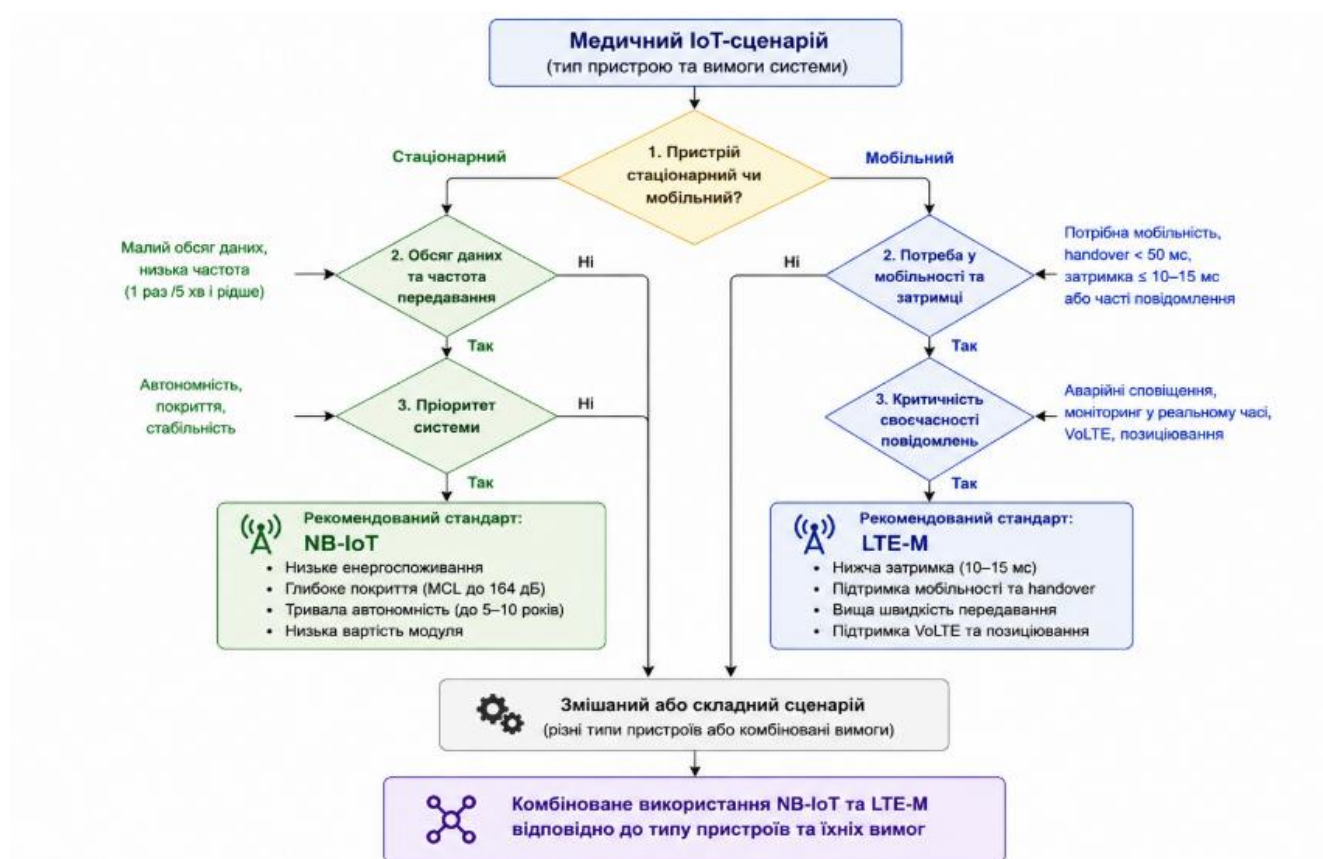


Рисунок 3.2 – Схема вибору стандарту для медичних IoT-сценаріїв за критеріями QoS та енергоефективності

Окремо слід розглянути питання надійності передавання медичних даних. Оскільки обидва стандарти використовують ліцензований спектр і стільникову інфраструктуру мобільного оператора, вони природно забезпечують вищий рівень QoS порівняно з альтернативними LPWAN-технологіями, що працюють у неліцензованих діапазонах (LoRaWAN, Sigfox) [26, 28]. Це означає, що оператор

може пріоритизувати медичний трафік і гарантувати захист від інтерференції. Однак рівень надійності між NB-IoT та LTE-M суттєво різниться залежно від сценарію: NB-IoT завдяки до 128 повторів HARQ та MCL 164 дБ є стійкішим в умовах слабого покриття, тоді як LTE-M забезпечує вищу надійність доставки у сценаріях із частим передаванням та мобільністю завдяки handover і коротшому циклу eDRX.

Важливим практичним аспектом є також масштабованість системи. При розгортанні медичної IoT-мережі масштабу регіону або міста кількість пристроїв може сягати десятків тисяч. За таких умов перевага NB-IoT у вартості модуля (3–5 USD проти 8–15 USD для LTE-M) стає критичним економічним фактором. Наприклад, розгортання 10 000 стаціонарних сенсорів на NB-IoT замість LTE-M дозволяє заощадити від 50 000 до 120 000 USD лише на вартості модулів, не враховуючи зниження витрат на обслуговування завдяки тривалішому терміну роботи батареї. Для носимих пристроїв, де функціональність LTE-M є обов'язковою, ця різниця у вартості є прийнятним компромісом.

Слід також врахувати регуляторний та інфраструктурний аспект. Розгортання медичних IoT-систем в Україні та ЄС підпадає під вимоги Загального регламенту захисту даних (GDPR) [6] та Регламенту ЄС щодо медичних виробів (MDR 2017/745) [7], які встановлюють вимоги до захисту персональних медичних даних та безпеки пристроїв. Обидва стандарти, NB-IoT та LTE-M, підтримують шифрування на рівні стільникової мережі (3GPP АКА-автентифікація), що є необхідною, але недостатньою умовою — додаткове наскрізне шифрування на прикладному рівні (TLS/DTLS) є обов'язковим для медичних застосувань незалежно від обраного стандарту. Вибір між NB-IoT та LTE-M не впливає на рівень відповідності регуляторним вимогам — він визначається архітектурою прикладного рівня системи.

На основі матриці вибору та узагальненої оцінки сформульовано такі практичні рекомендації. Для стаціонарних медичних сенсорів, систем домашнього моніторингу хронічних пацієнтів та моніторингу стаціонарного медичного обладнання доцільно обирати NB-IoT. Ця технологія забезпечує оптимальне

поєднання тривалої автономної роботи (понад 3 роки при оптимізованому PSM), широкого покриття (MCL 164 дБ) та низької вартості модуля (3–5 USD), що є вирішальними перевагами для масового розгортання батарейних сенсорів у домашніх умовах і в будівлях зі складними умовами покриття.

Таблиця 3.5 – Узагальнена оцінка NB-IoT та LTE-M за критеріями якості обслуговування та енергоефективності

Критерій	NB-IoT	LTE-M	Доцільний вибір
Енергоефективність	Вища; PSM може забезпечувати автономність понад 3 роки	Нижча; за частого передавання термін роботи становить тижні або місяці	NB-IoT
Затримка	1,4–10 с; у PSM/eDRX може зростати до хвилин	10–15 мс в активному режимі	LTE-M
Покриття (MCL)	164 дБ; дуже широке покриття	156 дБ; широке покриття	NB-IoT
Мобільність	Cell Reselection; можливе переривання 5–60 с	Handover менше 50 мс	LTE-M
Пропускна здатність	До 250 кбіт/с	До 1 Мбіт/с	LTE-M
Вартість модуля	Орієнтовно 3–5 USD	Орієнтовно 8–15 USD	NB-IoT
Стаціонарні сенсори	Оптимально	Можливо, але часто надлишково	NB-IoT
Носимі пристрої	Обмежено через відсутність повноцінного handover	Оптимально	LTE-M
Підтримка VoLTE	Немає	Є	LTE-M для екстрених сценаріїв

Для носимих медичних пристроїв, систем мобільного та амбулаторного моніторингу, трекінгу пацієнтів і систем екстреного сповіщення доцільніше використовувати LTE-M. Ця технологія забезпечує затримку 10–15 мс,

безперервний handover при переміщенні, підтримку VoLTE для голосового екстреного зв'язку та позиціювання OTDOA – функції, критично важливі для медичних сценаріїв із мобільними або потенційно небезпечними ситуаціями.

Отже, підрозділ 3.2 підводить до висновку, що універсального стандарту для всіх медичних IoT-сценаріїв не існує. NB-IoT та LTE-M є взаємодоповнювальними технологіями, кожна з яких займає свою нішу в медичній IoT-інфраструктурі. Якщо пріоритетом є енергоефективність, автономність і широке покриття за мінімальної вартості, то оптимальним є NB-IoT. Якщо ключовими вимогами є якість обслуговування, мінімальна затримка, підтримка мобільності та розширена функціональність (VoLTE, позиціювання) – доцільнішим є LTE-M. Вибір між стандартами повинен здійснюватися не за принципом “яка технологія краща”, а за сукупністю кількісних критеріїв, визначених вимогами конкретної медичної системи. У складних медичних IoT-інфраструктурах найефективнішим рішенням є спільне застосування обох стандартів – NB-IoT для стаціонарних сенсорів і LTE-M для мобільних та критичних пристроїв.

Висновки до 3 розділу

У третьому розділі виконано аналітичне моделювання роботи медичної IoT-системи на основі стандартів NB-IoT та LTE-M та обґрунтовано вибір стандарту з урахуванням критеріїв якості обслуговування й енергоефективності.

У підрозділі 3.1 побудовано узагальнену модель медичної IoT-системи та розглянуто три сценарії її роботи: стаціонарний домашній сенсор, носимий пристрій пацієнта і пристрій екстреного сповіщення. Для кожного сценарію виконано кількісні розрахунки. Для сценарію 1 (NB-IoT, $T = 300$ с, $S = 120$ байт) кількість повідомлень від 100 пристроїв становить 28 800 за добу, добовий обсяг — 3,46 МБ. Розрахунковий термін роботи від батареї 2000 мАгод при оптимізованому PSM ($t = 100$ мс) перевищує 3 роки. Для сценарію 2 (LTE-M, $T = 60$ с, $S = 250$ байт) кількість повідомлень становить 144 000 за добу, добовий

обсяг — 36 МБ, термін роботи — близько 33 діб при $C = 2000$ мАгод. Для сценарію 3 (тривожна кнопка, LTE-M) встановлено, що NB-IoT у режимі PSM не здатен забезпечити вимогу затримки ≤ 2 с, тоді як LTE-M в активному режимі забезпечує затримку 10–15 мс і додатково підтримує VoLTE та позиціювання OTDOA.

У підрозділі 3.2 на основі дев'яти критеріїв (QoS, затримка, покриття, мобільність, пропускна здатність, енергоефективність, вартість модуля, надійність, масштабованість) сформовано матрицю вибору стандарту для шести медичних сценаріїв. Встановлено, що NB-IoT є оптимальним для стаціонарних сенсорів та систем домашнього моніторингу, де вирішальними є покриття MCL 164 дБ, автономність понад 3 роки та низька вартість модуля (3–5 USD). LTE-M є доцільним для носимих пристроїв, трекерів пацієнтів і систем екстреного сповіщення, де критичними є handover < 50 мс, затримка 10–15 мс і підтримка VoLTE. Розглянуто також питання надійності, масштабованості та відповідності регуляторним вимогам GDPR і MDR 2017/745. Показано, що вибір між стандартами не впливає на рівень регуляторної відповідності, яка визначається архітектурою прикладного рівня системи.

Результати третього розділу підтверджують головний висновок роботи: NB-IoT та LTE-M є не конкуруючими, а взаємодоповнювальними стандартами, кожен з яких займає чітко визначену нішу в медичній IoT-інфраструктурі. Найефективнішим підходом при проектуванні комплексних медичних IoT-систем є спільне застосування обох стандартів: NB-IoT — для масового розгортання стаціонарних батарейних сенсорів, LTE-M — для мобільних, носимих та критичних за часом пристроїв. Вибір між ними у кожному конкретному сценарії має здійснюватися на основі кількісних розрахункових критеріїв, визначених вимогами відповідного медичного застосування.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи на тему «Аналіз телекомунікаційних стандартів NB-IoT та LTE-M для використання у сфері охорони здоров'я» було досліджено теоретичні засади стільникових IoT-технологій та виконано порівняльний аналіз стандартів NB-IoT і LTE-M з метою визначення їх придатності для різних медичних сценаріїв застосування.

У першому розділі було проаналізовано науково-практичні передумови застосування стільникових IoT-технологій у медичних системах. Розглянуто вимоги до телекомунікаційної інфраструктури систем дистанційного моніторингу пацієнтів, досліджено архітектурні та технічні особливості стандартів NB-IoT і LTE-M відповідно до специфікацій 3GPP Release 13/14, а також систематизовано критерії вибору бездротової технології для медичних IoT-застосувань. Встановлено, що різні медичні сценарії — плановий моніторинг хронічних захворювань, носимі пристрої та екстрене сповіщення — висувають принципово відмінні вимоги до затримки, автономності та мобільності, що унеможливорює вибір єдиного універсального стандарту для всіх випадків.

У другому розділі здійснено порівняльну характеристику NB-IoT та LTE-M за п'ятьма ключовими параметрами. Показано, що NB-IoT забезпечує максимальні втрати на трасі 164 дБ проти 156 дБ у LTE-M, що на практиці дозволяє підтримувати стійкий сигнал у підвальних приміщеннях лікарень і будівлях зі складними умовами покриття. LTE-M забезпечує затримку 10–15 мс та підтримує безперервний handover між базовими станціями за час менше 50 мс, тоді як NB-IoT у режимі PSM може затримувати доставку повідомлення до декількох хвилин. На основі порівняльного аналізу сформовано матрицю вибору стандарту для шести типових медичних сценаріїв.

У третьому розділі проведено аналітичне моделювання роботи медичної IoT-системи та обґрунтовано вибір стандарту з урахуванням критеріїв якості обслуговування й енергоефективності. Розрахунки показали, що стаціонарний сенсор на базі NB-IoT з оптимізованим режимом PSM забезпечує термін роботи

від батареї ємністю 2000 мАгод понад три роки, тоді як носимий пристрій на LTE-M з передаванням даних раз на хвилину потребує заряджання кожні 33 доби. Для системи екстреного сповіщення встановлено, що NB-IoT принципово не здатен виконати вимогу затримки ≤ 2 секунди в режимі енергозбереження, тоді як LTE-M повністю задовольняє цю вимогу та додатково забезпечує голосовий зв'язок VoLTE і визначення геолокації пацієнта.

Проведене дослідження підтверджує, що NB-IoT та LTE-M є взаємодоповнювальними, а не конкуруючими стандартами. NB-IoT є оптимальним для масового розгортання стаціонарних батарейних сенсорів моніторингу хронічних пацієнтів і медичного обладнання, де вирішальними є покриття та автономність. LTE-M є єдиним прийнятним вибором для носимих пристроїв, трекерів пацієнтів і систем екстреного сповіщення, де критичними є мобільність і мінімальна затримка. Отримані результати та розроблена матриця вибору стандарту можуть бути безпосередньо використані проектувальниками медичних IoT-систем, операторами мобільного зв'язку та закладами охорони здоров'я при формуванні технічних вимог до телекомунікаційної інфраструктури систем дистанційного моніторингу пацієнтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. GSMA. Mobile IoT Deployment Guide. London : GSMA, 2022. URL: <https://www.gsma.com/iot/resources/mobile-iot-deployment-guide/>
2. World Health Organization. Global Strategy on Digital Health 2020–2025. Geneva : WHO, 2021. 66 p. ISBN 978-92-4-002092-4. URL: <https://www.who.int/docs/default-source/documents/gd4dhdaa2a9f352b0445bafbc79ca799dce4d.pdf>
3. U.S. Food and Drug Administration. Cybersecurity in Medical Devices: Quality Management System Considerations and Content of Premarket Submissions. Guidance for Industry and FDA Staff. Silver Spring : FDA, 2023. URL: <https://www.fda.gov/media/119933/download>
4. 3GPP. Technical Specification 36.211: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation. Release 13. Sophia Antipolis : 3GPP, 2016. URL: https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.211/
5. 3GPP. Technical Specification 36.321: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification. Release 13. Sophia Antipolis : 3GPP, 2016. URL: <https://www.3gpp.org/dynareport/36321.htm>
6. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April[2016 (General Data Protection Regulation — GDPR). Official Journal of the European Union. L 119. 4 May 2016. P. 1–88. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>
7. Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices. Official Journal of the European Union. L 117. 5 May 2017. P. 1–175. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745>
8. Regulation (EU) 2025/327 of the European Parliament and of the Council of 11 February 2025 on the European Health Data Space and amending Directive 2011/24/EU and Regulation (EU) 2024/2847. Official Journal of the European Union. 2025. L 2025/327. 5 March 2025.

9. Sultana N., Huq F., Razzaque M. A., Rahman M. M. User Utility Maximization in Narrowband Internet of Things for Prioritized Healthcare Applications. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 3. Article 1192. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031192>
10. 3GPP. Release 14 Description; Summary of Rel-14 Work Items. 2017. URL: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-14>
11. Cawthra J., Grayson N., Pulivarti R. et al. Securing Telehealth Remote Patient Monitoring Ecosystem. NIST Special Publication 1800-30. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2022. URL: <https://www.nccoe.nist.gov/publication/1800-30/>
12. ISO/IEEE 11073-20601:2022. Health informatics — Personal health device communication — Part 20601: Application profile — Optimized Exchange Protocol. New York : IEEE, 2022.
13. IEC 62443 Series. Security for Industrial Automation and Control Systems. Geneva : International Electrotechnical Commission. URL: <https://www.iec.ch/technical-committee/iec-tc65>
14. HL7 International. HL7 Fast Healthcare Interoperability Resources (FHIR) Release 4 (v4.0.1). Ann Arbor : Health Level Seven International, 2019. URL: <https://hl7.org/fhir/R4/>
15. Ericsson. NB-IoT and LTE-M in the Context of 5G: Industry White Paper. Stockholm : Ericsson, 2019. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/nb-iot-and-lte-m-in-the-context-of-5g-industry-white-paper>
16. Islam S. M. R., Kwak D., Kabir M. H., Hossain M., Kwak K.-S. The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2015. Vol. 3. P. 678–708. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2437951>
17. Wu J.-Y., Wang Y., Ching C. T. S., Wang H.-M. D., Liao L.-D. IoT-based wearable health monitoring device and its validation for potential critical and emergency applications. *Frontiers in Public Health*. 2023. Vol. 11. Article 1188304. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1188304>

18. Bhatt Y., Bhatt C. Internet of Things in HealthCare. Internet of Things and Big Data Technologies for Next Generation Healthcare. Studies in Big Data. Springer, Cham, 2017. Vol. 23. P. 13–33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49736-5_2
19. Almotiri S. Q., Khan M. A., Alghamdi M. A. Performance Comparison of the LPWAN Standards NB-IoT and LTE-M Based on Protocols and Message Volumes. Proceedings of IEEE International Conference on IoT. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/MITP.2024.10880509>
20. Benkhelifa F., Ahmad A., Hassan M. M. A comparative study on LPWAN standards: NB-IoT and LTE-M. ITM Web of Conferences. 2023. Vol. 52. Article 01007. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20235201007>
21. Jaber M. M., Alameri T., Ali M. H. et al. Remotely Monitoring COVID-19 Patient Health Condition Using Metaheuristics Convolute Networks from IoT-Based Wearable Device Health Data. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 3. Article 1205. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031205>
22. Ayvaz S., Ah Kun Lee A. Modelling and Experimental Validation for Battery Lifetime Estimation in NB-IoT and LTE-M. arXiv preprint. 2021. arXiv:2106.13286. URL: <https://arxiv.org/pdf/2106.13286>
23. Sanchez-Iborra R., Cano M.-D. NB-IoT vs. LTE-M: Measurement Study of the Energy Consumption of LPWAN Technologies. Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCN57023.2023.10283595>
24. Martinez B., Adelantado F., Bartoli A., Vilajosana X. Exploring the Performance Boundaries of NB-IoT. IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, No. 3. P. 5702–5712. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2911003>
25. GSMA. NB-IoT and LTE-M: September 2023 Summary Report. London : GSA/GSMA, 2023. URL: <https://gsacom.com/paper/nb-iot-lte-m-september-2023-summary/>
26. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>

27. Daraghmi Y.-A., Daraghmi E. Y., Daraghma R., Fouchal H., Ayaida M. Edge–Fog–Cloud Computing Hierarchy for Improving Performance and Security of NB-IoT-Based Health Monitoring Systems. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 22. Article 8646. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228646>
28. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment. *ICT Express*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>