

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ  
ПРОДУКТИВНОСТІ МЕРЕЖІ NB-IOT»

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

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти гр.  
Олександр Улітко  
\_\_\_\_\_ (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Ольга ПОЛОНЕВИЧ  
К.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент: \_\_\_\_\_ (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)  
науковий ступінь,  
вчене звання

Київ 2023

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра Кафедра Інженерії програмного забезпечення автоматизованих систем  
Ступінь вищої освіти «Магістр»  
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології  
Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедру ПЗАС  
Каміла СТОРЧАК  
*(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Олександр Улітко

*(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)*

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження методів підвищення продуктивності мережі NB-IoT

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

*(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)*

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “19” 10 2023 р. №145

2. Строк подання кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

Інтернет речей

Розумні мережі зв'язку

Енергоефективні схеми кодування

Науково-технічна література

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

1. Аналіз стану розвитку, особливості реалізації та функціонування NB-IoT;

2. Огляд шляхів ефективності керування ресурсами вузькосмугового інтернету речей;

3. Оптимізація розгортання NB-IoT для розумних мереж розподілу енергії.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання “ ” \_\_\_\_\_ 2023р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір технічної літератури	20.10.2023р. 27.10.2023р.	Виконано
2.	Аналіз сучасного стану розвитку NB-ІоТ	27.10.2023р. 04.11.2023р.	Виконано
3.	Огляд особливостей реалізації та функціонування NB-ІоТ	04.11.2023р. 14.11.2023р.	Виконано
4.	Дослідження ефективності керування ресурсами узькосмугового інтернету речей	14.11.2023р. 22.11.2023р.	Виконано
5.	Оптимізація розгортання NB-ІоТ для розумних мереж розподілу енергії	22.11.2023р. 02.12.2023р.	Виконано
6.	Розробка демонстраційних матеріалів, доповідь.	02.12.2023р. 10.12.2023р.	Виконано
7.	Оформлення магістерської роботи	10.12.2023р. 15.12.2023р.	Виконано

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр УЛІТКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Ольга ПОЛОНЕВИЧ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступня магістр: 72 стор., 30 рис., 7 табл., 32 джерел.

*Мета роботи* - підвищення показників якості мережі зв'язку на базі технології NB-IoT.

*Об'єкт дослідження* - процес підвищення енергоефективності мережі зв'язку.

*Предмет дослідження* – мережа NB-IoT.

*Короткий зміст роботи:* У магістерській кваліфікаційній роботі виконано дослідження тенденцій розвитку, поширення та сфери застосування технології IoT. Основна увага приділяється сучасній технології інтернету речей яка реалізується на базі технології LTE.

У другому розділі проаналізовано інтеграція NB-IoT в мережах мобільного зв'язку, описано технічні аспекти та наведені зміни в архітектурі. Виконано дослідження особливостей побудови мережі, та шляхи підвищення енергоефективності NB-IoT.

У практичній частині було представлено оцінку придатності та оптимізацію продуктивності мережі NB-IoT для підтримки розумних мереж розподілу енергії.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** NB-IOT, РОЗУМНІ МЕРЕЖІ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ, РОЗУМНІ МЕРЕЖІ, ВІДНОВЛЕННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЗБОЯМИ, НАДІЙНІСТЬ, ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ, РЕСУРСИ, МАСШТАБОВАНІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ.

## **ABSTRACT**

The text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 72 pages, 30 figures, 7 tables, 32 sources.

The purpose of the work is to improve the quality indicators of the communication network based on NB-IoT technology.

The object of research is the process of increasing the energy efficiency of the communication network.

The subject of research is the NB-IoT network.

Brief content of the work: In the master's qualification work, a study of trends in the development, distribution and scope of application of IoT technology was carried out. The main attention is paid to modern Internet of Things technology, which is implemented on the basis of LTE technology.

The second chapter analyzes the integration of NB-IoT in mobile communication networks, describes the technical aspects and shows the changes in the architecture. A study of the features of network construction and ways to improve the energy efficiency of NB-IoT was carried out.

In the practical part, the suitability assessment and performance optimization of the NB-IoT network to support smart energy distribution networks were presented.

**KEY WORDS: NB-IOT, SMART POWER DISTRIBUTION GRIDS, SMART GRIDS, FAILURE RECOVERY AND MANAGEMENT, RELIABILITY, PERFORMANCE EVALUATION, RESOURCES, SCALABILITY, RELIABILITY.**

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) є однією з провідних ліцензованих глобальних мереж низької потужності (LPWAN), яка, як очікується, відіграватиме дуже важливу роль у підключенні експоненціально зростаючої кількості підключених пристроїв, які складають Інтернет речей (IoT). Щоб забезпечити масштабованість мережі, NB-IoT вимагає більш ефективного використання обмеженої енергії, пропускної здатності каналу та мережевих ресурсів спектру. Ці характеристики накладають різноманітні обмеження на дизайн кодування фізичного (PHY) каналу та доступу до спектру, а також на протокол мережевого рівня для NB-IoT.

*Мета роботи* - підвищення показників якості мережі зв'язку на базі технології NB-IoT.

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

- аналіз стану розвитку, особливості реалізації та функціонування NB-IoT;
- огляд шляхів ефективності керування ресурсами вузькосмугово інтернету речей;
- оптимізація розгортання NB-IoT для розумних мереж розподілу енергії.

*Об'єкт дослідження* - процес підвищення енергоефективності мережі зв'язку.

*Предмет дослідження* – мережа NB-IoT.

*Методи дослідження.* Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися методи теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування і теорії телетрафіка, імітаційного і натурного моделювання.

*Джерела дослідження:*

- <https://rb.ua/howto/chto-takoe-big-data>;
- <https://devopedia.org/nb-iot>;
- <https://www.technavio.com/report/narrowband-internet-of-things-nb-iot>;
- <https://www.brunelco.nl/internet-of-things-waar-staan-we-nu>.

*Наукова новизна одержаних результатів.* Отримані результати магістерської кваліфікаційної роботи сприяють зниженню енергоспоживання, мінімізації затримок у черзі, що дозволяє знизити вартість зв'язку.

*Практична значущість одержаних результатів.* Отримані результати показують, що дійсно технологія NB-IoT, якщо її правильно налаштовано, підходить для належної підтримки ORM та інших інтелектуальних мереж розподілу енергії з подібними або меншими вимогами до продуктивності.

*Апробація результатів магістерської роботи.* Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи доповідались і обговорювались на двох науково-практичних конференціях.

# РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ, ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ NB-IOT

## 1.1 Дослідження напрямків розвитку безпроводового зв'язку

NB-IoT і LTE-M – це дві технології, які були обрані як зв'язок «Massive Machine Type» у стандарті 5G. Обидва стандарти визначені як LPWAN і мають велике значення для зв'язку між машинами, маючи різні переваги та недоліки. Термін служби батареї можна збільшити, мінімізувавши зв'язок між пристроєм і мережею. Інший аспект полягає в тому, що пристрої можуть переходити в режим енергозбереження або підключатися до мережі рідше. LTE-M і NB-IoT пропонують краще покриття, ніж 4G, наприклад, у приміщеннях і віддалених місцях. Однак це компроміс між терміном служби батареї, охопленням і швидкістю відгуку там, де стандарти відрізняються. LTE-M можна використовувати відносно відразу в мобільних мережах, але для того, щоб скористатися перевагами специфічних для LPWAN особливостей стандартів, потрібно реалізувати нові функції в мережі, такі як PSM і eDRX.

LTE-M і NB-IoT використовують спрощені версії загального стандарту 4G/5G, що зменшує складність апаратного забезпечення та вартість, оскільки технологія розгортається у більших масштабах.

**Основи NB-IoT.** NB-IoT (Narrowband IoT) характеризується хорошим покриттям у приміщенні, низькою вартістю, тривалим часом автономної роботи та підтримкою великої кількості пристроїв на одну базову станцію. NB-IoT розроблено для великомасштабного IoT. Широкий IoT зазвичай називається. Особливістю NB-IoT є те, що він повинен бути оптимізований для повільної передачі даних, максимального часу автономної роботи та забезпечення хорошого покриття навіть у приміщенні. NB-IoT було розроблено з урахуванням стаціонарних малопотужних датчиків. NB-IoT ідеально підходить для стаціонарних датчиків вимірювань і звітів, яким потрібно надсилати лише невеликі обсяги даних і вони не підключені постійно. Вони добре підходять як для



віддалених місць, так і для територій з великою кількістю пристроїв, де потрібне безперешкодне підключення. Він має дизайн, який робить його ідеальним для всього: від лічильників, датчиків, паркувальних місць, датчиків тиску тощо. Хороший радіус дії, низька швидкість і рідкісні оновлення дозволяють працювати від батареї 10 і більше років. Затримка висока, ми говоримо від 1,5 до 10 секунд.

NB-IoT дозволяє використовувати в областях, які раніше не могли бути підключені, тоді як NB-IoT надає можливість для більш високої частоти оновлення порівняно, наприклад, з LoRaWAN. Оскільки технологія відносно дешева, ви знайдете її у великих обсягах. Менш ніж за п'ять можна виготовити модуль NB-IoT.

Усі переваги NB-IoT мають свою ціну, з високою затримкою та максимальною швидкістю 127 кбіт/с (станом на випуск 14), ви не можете використовувати його для спілкування в режимі реального часу чи голосового зв'язку. Тому NB-IoT найкраще підходить для датчиків. Одна з найперших версій стандарту NB-IoT, випуск 13, не підтримує роумінг. Випуск 14, також відомий як NB2, підтримує режим енергозбереження та передачу між базовими станціями. Випуск 14 також має розширену підтримку позиціонування через інфраструктуру базових станцій. Для тих із вас, хто справді хоче глибше зануритися в NB-IoT, у нас є ретельне глибоке занурення в цю тему.

**Покриття та глобальне розгортання.** Сьогодні статус LTE-M та NB-IoT полягає в тому, що обидва вони доступні локально через різних операторів. На глобальному рівні існують доступні стандарти, які використовуються у багатьох частинах світу. Протягом кількох років очікується, що LTE-M і NB-IoT будуть локально доступні в усіх країнах, а також LTE-M і NB-IoT будуть доступні протягом усього життєвого циклу 5G і далі.

LTE-M та NB-IoT є стандартизованими, надійними та керованими операторами, які мають ліцензію на певний діапазон частот. Вони розроблені для недорогих додатків Інтернету речей, використовують низькі швидкості передачі даних, мають тривалий час автономної роботи та часто можуть використовуватися у віддалених місцях.

LTE-M і NB-IoT стають очевидним вибором для галузей, які шукають заміну 2G і 3G, але вони також будуть технологіями для тих, хто хоче підключати пристрої з тривалим терміном служби, яким потрібен тривалий час автономної роботи та добре покриття [9].

Як згадувалося раніше, однією з головних особливостей технологій LPWA є розширена здатність охоплення, що сприяє максимальним втратам зв'язку (MCL), які визначаються як максимальні втрати каналу між UE (обладнанням користувача), у цьому прикладі пристрій LPWA та eNodeB, на якому сигнал може витримувати або терпіти в навколишньому середовищі та все ще передаватись на хорошому рівні приймача. Іншими словами, чим вище MCL, тим надійнішою є технологія і тим далі її можна передати. Для LTE-M MCL має розрахований приріст 10 дБ у порівнянні зі старим LTE, тоді як у випадку NB-IoT він має приріст 20 дБ. Це забезпечує глибоке покриття за допомогою LTE-M і екстремальне покриття в підземних і віддалених районах для NB-IoT.

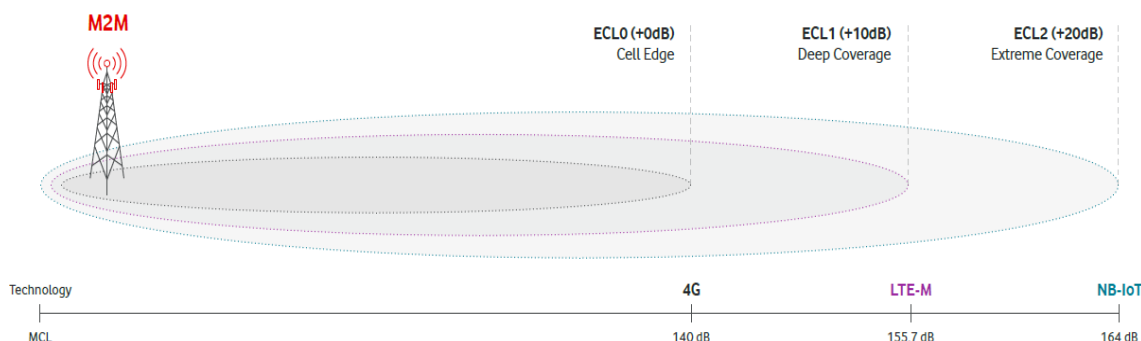


Рисунок 1.1 – Дальність дії технологій

**Різниця між можливостями NB-IoT і LTE-M.** LTE-M і NB-IoT — це дві нові технології для стільникового зв'язку з низькою пропускну здатністю. Незважаючи на те, що обидві ці технології мають низьку пропускну здатність, є важливі відмінності, які слід враховувати при виборі правильного стільникового протоколу для ваших промислових додатків IoT.

NB-IoT. Він підтримує дуже вузьку смугу пропускання, 200 кГц, тому максимальна швидкість передачі даних становить близько 250 Кбіт/с. Крім того,

його можна розгорнути навіть у захисній смузі оператора LTE, щоб використовувати спектр, який інакше не використовується. Додаткову інформацію про те, що таке NB-IoT, можна знайти тут.

LTE-M. LTE-M вважається другим поколінням чіпів LTE, створених для програм IoT. Він надає недорогі LTE-пристрої, придатні для Massive Machine-Type Communications (MTC) та Інтернету речей (IoT) із розширеним покриттям порівняно зі звичайними LTE-пристроями.

Говорячи про LTE-M, слід звернути увагу на три основні функції:

1. Швидкість UL і швидкість DL: до 1 Мбіт/с, що значно більше, ніж NB-IoT.
2. VoLTE: Ця технологія підтримує голосову службу.
3. Мобільність. LTE-M ідеально підходить для мобільних пристроїв.

Він працює зі смугою пропускання 1,4 МГц із вищою складністю/вартістю пристрою, ніж NB-IoT. Більша пропускна здатність дозволяє Cat-M1 досягати швидкості передачі даних (до 1 Мбіт/с), меншої затримки та більш точного позиціонування. LTE-M підтримує голосові дзвінки та мобільність у режимі підключення [4].

Таблиця 1.1- Порівняння технологій

	LTE-M	NB-IoT
Максимальна пропускна здатність системи	1.4 MHz	2000 KHz
Пікова швидкість передачі даних	1 Mbit	200 kbps
Затримка	50-100 msec	1.5-10 seconds
Споживання енергії	Найкраще на середній швидкості передачі даних	Найкраще на низькій швидкості передачі даних
Мобільність	Так	Ні, лише стаціонарні
Голос	Так	Ні
Антенa	1	1
Початкові регіони	Північна Америка	Європа

## 1.2 Архітектура радіопротоколу та режим роботи технології NB-ІоТ

**Архітектура радіопротоколу.** Стек мережевих протоколів — це набір правил, розроблений у багаторівневій архітектурі для передачі та отримання даних або повідомлень. Ця багаторівнева архітектура обмінюється повідомленнями, пакетами або блоками протокольних даних (PDU) як на верхньому, так і на нижньому рівнях, щоб забезпечити та використовувати функції та послуги. Рівнева архітектура є еталонною моделлю взаємозв'язку відкритих систем (OSI), розробленою міжнародною організацією зі стандартизації (ISO) як міжнародний стандарт [7].

Фізичний рівень (PHY) і рівні керування доступом до середовища (MAC) OSI називаються шаром доступу (AS) для NB-ІоТ. У випадку NB-ІоТ рівень доступу та методи та протоколи повітряного доступу залишаються на рівнях MAC і PHY моделі OSI, визначеної 3GPP. Обидва рівні відповідають за обробку та обробку фізичної передачі чи прийому. Фізичні носії NB-ІоТ використовують бездротові канали. Таким чином, прикладний, сеансовий, презентаційний, транспортний і мережевий рівні називаються шаром без доступу (NAS), незмінним у NB-ІоТ щодо LTE, визначеного 3GPP. З іншого боку, протоколи транспортного та мережевого рівнів, такі як протокол керування передачею (TCP) або Інтернет-протокол (IP), можуть використовуватися в NB-ІоТ, оскільки вони існують у протоколах та рівнях 3GPP [7, 8]. Рівнева архітектура розділена на дві площини: площину користувача та площину керування. Управління радіоресурсами (RRC) також визначається на додатковому підрівні площини керування, показаному на ри.1.2., де RRC виконує деякі функції, такі як керування з'єднанням RRC, керування блоком ресурсів (RB), функції мобільності, звітування про вимірювання UE та контроль [7, 12].

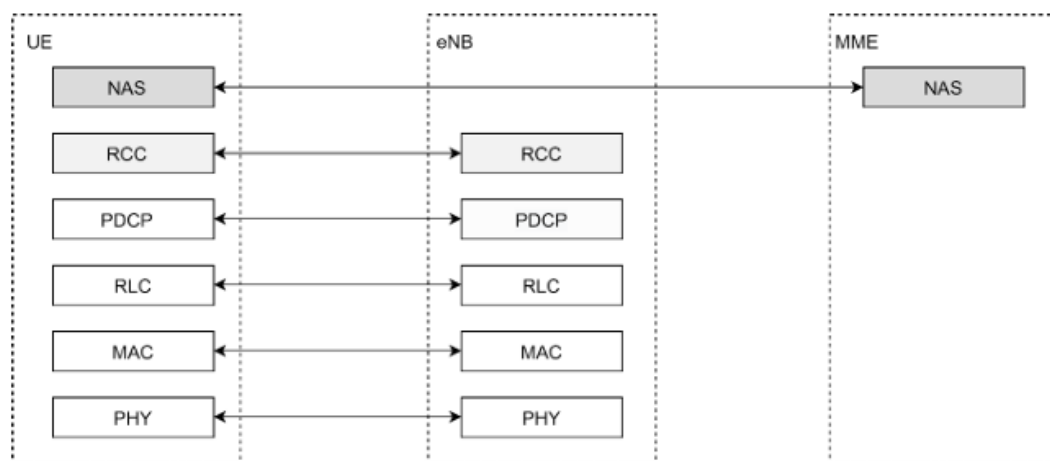


Рисунок 1.2 - Стек протоколів NB-IoT для рівня керування

**Режими роботи.** Технологія NB-IoT працює на основі існуючих функціональних можливостей LTE, повторно використовуючи те саме апаратне забезпечення eNB і спектр без проблем спільного існування. NB-IoT займає носій фізичних ресурсів LTE [3, 4]. Він може бути розроблений у трьох різних режимах роботи, показаних на рис.1.3. Автономна робота: він використовує одну виділену несучу частот глобальної системи мобільного зв'язку (GSM). У цьому режимі одна несуча використовує смугу пропускання 180 кГц із захисним інтервалом 10 кГц з обох сторін [1]. Робота захисної смуги: ця операція використовує невикористані блоки ресурсів у захисній смузі оператора LTE [1, 3].

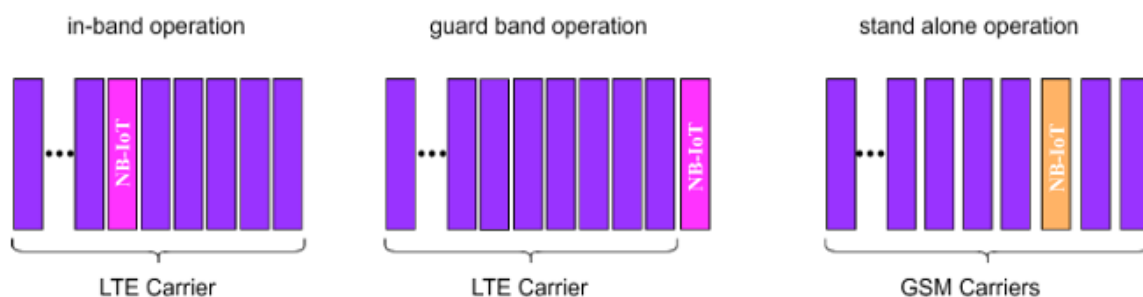


Рисунок 1.3 - Режими роботи NB-IoT

Внутрішньосмугова робота: використовується один блок фізичних ресурсів (PRB) у межах захисної смуги несучої LTE із загальною смугою пропускання 180 кГц [1]. Щоб уникнути інтерференції між NB-IoT PRB і LTE PRB, різниця

спектральної щільності потужності (PSD) не повинна перевищувати 6 дБ як для режимів роботи в смузі, так і для режимів захисної смуги [10].

NB-IoT призначений для роботи в робочих діапазонах LTE 1, 2, 3, 5, 8, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 26, 28 і 66, які визначені в таблиці 1 [13]. Система NB-IoT працює в дуплексному режимі з частотним поділом (FDD) на основі версії 13 3GPP. Передачі по низхідній і висхідній лінії зв'язку розділені в частотній області. eNB і UE будуть передавати в одному діапазоні частот і приймати в іншому. Система NB-IoT на стороні UE працює в напівдуплексному режимі FDD типу В (HD-FDD). Цей режим передачі корисний для апаратного забезпечення NB-IoT із низьким енергоспоживанням, низькою складністю та низькою обчислювальною здатністю. Передачі по низхідній і висхідній лінії зв'язку розділені як за частотою, так і за часом у режимі передачі HD-FDD, показаному на рис.1.4. Існує захисний час між передачею від eNB і NB-IoT UE. UE NB-IoT спочатку отримує сигнал низхідної лінії зв'язку від eNB, потім передає висхідну передачу через захисний час і, нарешті, стежить за наступною низхідною передачею через інший захисний час. Таким чином, існує принаймні один захисний підкадр (SF) між кожним перемиканням з низхідної лінії зв'язку на висхідну лінію зв'язку або навпаки. UE використовує цей захисний час для перемикання ланцюга передавача та приймача [1].

Таблиця 1.2 - Смуги частот для NB-IoT

Номерний діапазон	Діапазон частот висхідної лінії зв'язку / МГц	Частотний діапазон низхідної лінії зв'язку / МГц	Дуплексний режим
1	1920-1980	2110-2170	FDD
2	1850-1910	1930-1990	FDD
3	1710-1785	1805-1880	FDD
5	824-849	869-894	FDD
8	880-915	925-960	FDD
12	699-716	729-746	FDD
13	777-787	746-756	FDD
17	704-716	734-746	FDD
18	815-830	860-875	FDD
19	830-845	875-890	FDD

20	832-862	791-821	FDD
26	814-849	859-894	FDD
28	703-748	758-803	FDD
66	1710-1780	2110-2200	FDD

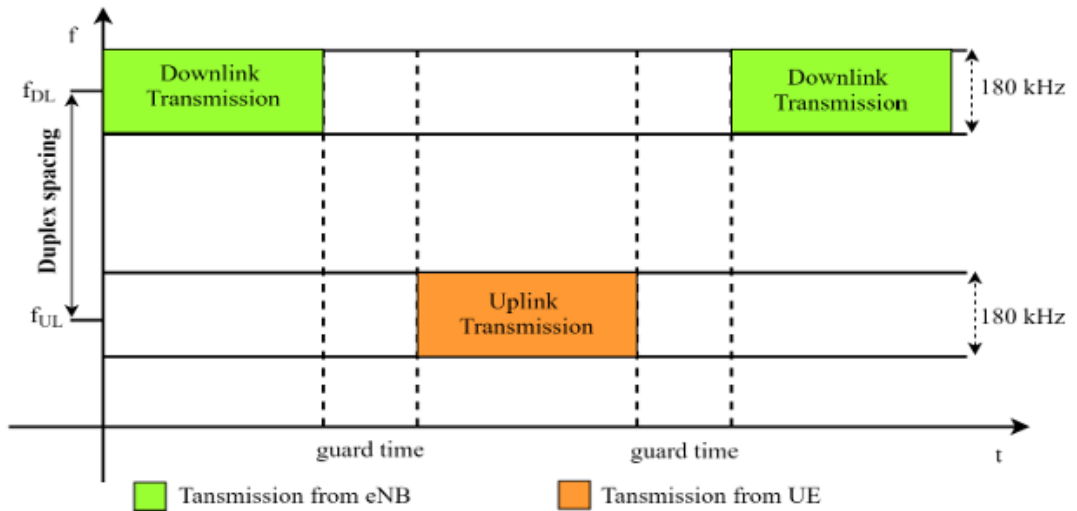


Рисунок 1.4 - Ілюстрація напівдуплексного дуплексування з частотним поділом типу В.

### 1.3 Аналіз ринку вузькосмугового IoT

Обсяг глобального вузькосмугового ринку Інтернету речей (NB-IoT) у 2021 році становив 641,32 мільяона доларів США, і очікується, що він зареєструє дохід CAGR 41,5% протягом прогнозного періоду. Зростання ринкових доходів насамперед завдяки швидкому впровадженню технології NB-IoT фірмами, телекомунікаційними послугами та провайдерами широкосмугового доступу та збільшенням застосування технології NB-IoT у нових розумних містах проекти та інфраструктура для будівництва торгових центрів, комерційних будівель, навчальних закладів та ін [16].

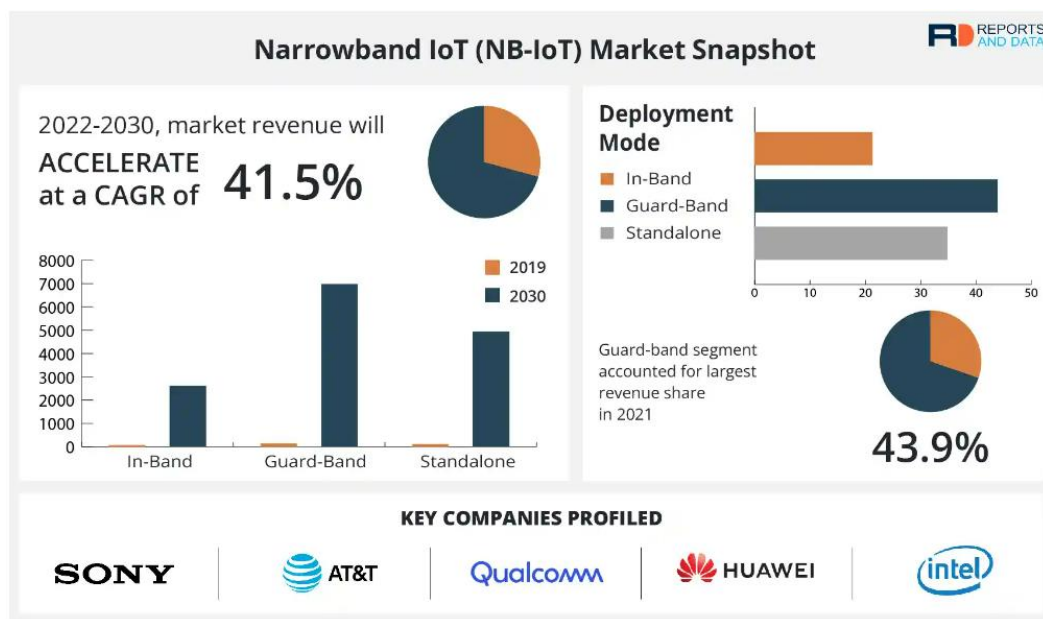


Рисунок 1.5 - Аналіз ринку вузькосмугового IoT

Крім того, зростаючі досягнення та інновації в технології NB-IoT для виявлення витоків сприяють зростанню доходів ринку. У світовій індустрії водопостачання все більше уваги приділяється приборканню витоків води. Лише у Великій Британії через витoki щодня втрачається близько трьох мільярдів літрів води, а Управління регулювання водних послуг країни Ofwat закликає національні водопровідні компанії скоротити цю цифру на 15% до 2025 року. Система автоматичного моніторингу витоків води з трубопроводів NB-IoT об'єднує NB-IoT і технологія ультразвукового виявлення. Він збирає дані трафіку ультразвуковим перетворювачем і надсилає їх на хмарну платформу через NB-IoT. Хмарна платформа зберігає та аналізує дані про трафік, визначає точку витoku та надсилає користувачеві сигнал тривоги, коли виникають нестандартні дані про трафік.

NB-IoT належить до категорії малопотужних глобальних мереж (LPWAN) і є технологією бездротового зв'язку IoT, що дозволяє широкому спектру нових і вдосконалених пристроїв IoT спілкуватися на більшій відстані та в місцях, куди неможливо дістатися вручну. через обмеження пропускнуої здатності. Він також може підтримувати більше 10 років автономної роботи. Це робить його придатним для різноманітних застосувань і випадків використання для IoT. NB-IoT може підтримувати конфіденційність ідентифікації користувача, автентифікацію



об'єктів, цілісність даних та ідентифікацію мобільного обладнання. Він також має нижчу швидкість передачі даних і кращий бюджет зв'язку порівняно з Long Term Evolution-M1 (LTE-M1) і не потребує шлюзів для підключення. Він може безпосередньо підключати датчики до базової станції, що допоможе підвищити гнучкість і знизити витрати [8].

Удосконалення аналітики штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання (ML) і великих даних дозволять компаніям перевіряти великі обсяги зібраних даних від відстеження та моніторингу діяльності, яка використовує мережі IoT. У результаті очікується, що зростанню доходів ринку сприятиме все більше використання пристроїв, підключених до Інтернету речей, у поєднанні з ML, AI та аналітикою великих даних< а і=4> у домашніх, комерційних і промислових програмах.

Розумні міста також пропонують різноманітні варіанти використання, які сприяють розгортанню NB-IoT. Наприклад, водії в Німеччині витрачають близько 560 мільйонів годин на рік на пошуки місць для паркування в місті. Місця для паркування, обладнані наземними датчиками, дозволяють визначити, чи вільне місце для паркування та де. Іншим застосуванням NB-IoT є розумне керування вуличним освітленням. 21 квітня 2022 року Urban Control, постачальник рішень для розумних міст, оголосив, що разом із Nordic Semiconductor вони разом працюють над контролером вуличних світильників, який можна масштабувати до мільйонів світильників, підключених через стільникові мережі NB-IoT. 8 березня 2022 року компанія Narrowband Network у партнерстві з Wellness TechGroup забезпечила покриття мережі Інтернет речей (IoT) для 70 000 розумних вуличних ліхтарів у Монтевідео, Уругвай. Очікується, що цей проект забезпечить розумним вуличним освітленням понад 1,3 мільйона людей і охопить відстань у 200 квадратних кілометрів, що покращить безпеку на дорозі та допоможе скоротити викиди вуглецю на 31 500 тонн на рік.

**Обмеження: NB-IoT обмежено додатками з низькою швидкістю передачі даних.** Швидкість передачі даних обмежена в пристроях NB-IoT, що обмежує їх стільникові можливості в програмах, які вимагають значної пропускну здатності,

наприклад, голосовий зв'язок і відеоспостереження. Він несумісний з мобільними телефонами, які використовують обмін повідомленнями, GSM, 3G і довгострокову еволюцію (LTE) для передачі голосу та високошвидкісної передачі даних. Нові технології, такі як Long-term Evolution for Machines (LTE-M), мають вищу швидкість передачі даних, що дозволяє їм надавати найповніший спектр можливостей стільникового зв'язку. Серед усіх інших технологій LPWA LTE-M має максимальну пропускну здатність, що робить її придатною для застосування в стаціонарних і мобільних мережах. Це може обмежити використання NB-IoT у додатках, які вимагають більшої швидкості передачі даних, таких як переносні пристрої для здоров'я та фітнесу та розумні лічильники. Таким чином, це перешкоджає зростанню доходів ринку NB-IoT. Однак початкова вартість модулів NB-IoT дещо така ж або вища, ніж у Global Systems for Mobile/General Packet Radio Service (GSM/GPRS), але очікується, що її вартість.

**Статистика режиму розгортання.** Залежно від режиму розгортання глобальний ринок вузькосмугового Інтернету речей поділяється на внутрішньосмуговий, охоронний і автономний.

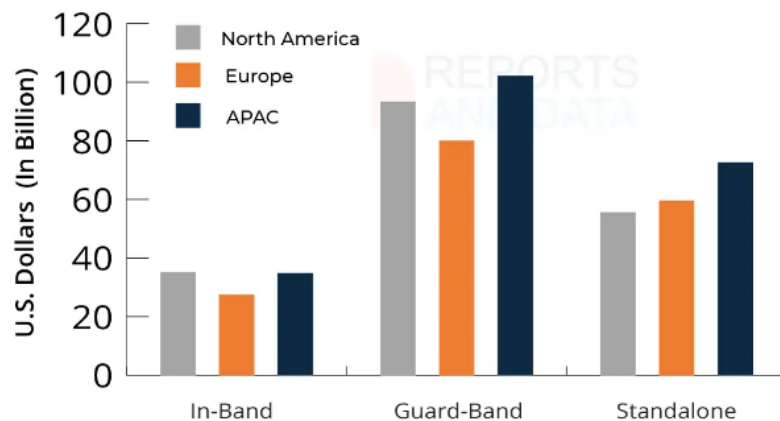


Рисунок 1.6 – Прибутки від сегменту розгортання

У 2021 році сегмент Guard-band отримав найбільшу частку доходу. Guard-band має можливість використовувати існуючу стільникову інфраструктуру, таку як антени та радіочастотні (РЧ) модулі, без додаткових витрат. AT&T і Verizon розгорнули цю технологію для створення комерційних мереж NB-IoT. Мережа

захисної смуги призначена для того, щоб послуги операторів мобільних операторів залишалися незмінними під час майбутнього перетворення спектру під час перетворення традиційних мереж 3G і 4G на стандарти 5G.

**Регіональна інформація.** Глобальний ринок вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT) сегментований на Північну Америку, Європу, Азіатсько-Тихоокеанський регіон, Латинську Америку, Близький Схід і Африку. Ринок NB-IoT у Північній Америці приніс найбільшу частку доходів у 2021 році. Це пов'язано з присутністю різних постачальників мережевих послуг, таких як Qualcomm Inc., AT&T, Cellco Partnership (Verizon) і T-Mobile US, Inc., зокрема, які спеціалізуються на тестуванні та комерційному розгортанні рішень для промислових і комерційних застосувань. Іншими важливими причинами зростання доходів ринку в Північній Америці є високий наявний дохід, зростання технічної підкованості населення та постійне прийняття передових та інноваційних технологій для особистого, корпоративного та промислового застосування.

Очікується, що ринок вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT) у Європі зареєструє значно швидкі темпи зростання протягом прогнозованого періоду завдяки зростаючому використанню NB-IoT в автомобільному та транспортному секторах регіону. Європа вносить великий внесок у загальний ринок, оскільки вона є домом для кількох великих компаній і була одним із перших регіонів, які прийняли технологію вузькосмугового Інтернету речей [.

Очікується, що ринок вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT) в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні зареєструє найшвидший CAGR прибутку протягом прогнозованого періоду завдяки збільшенню проникнення Інтернету та розгортанню мережі високошвидкісної інтернет-інфраструктури. Різноманітні урядові політики щодо розширення проектів розумних міст і підвищення рівня наявного доходу, зокрема в таких країнах, як Індія, Китай і Японія, також сприяють зростанню ринкових доходів. Крім того, кілька ключових виробників вузькосмугових модулів IoT, таких як MediaTek Inc. і Huawei Technologies Co., Ltd., розташовані в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні [5].



Рисунок 1.7 – Сегментація ринку по регіонах

### 1.4 Прогноз глобального розвитку Інтернету речей

У 2023 році глобальний ринок вузькосмугового Інтернету речей досяг майже 1427,02 мільйонів доларів США. Очікується, що ринок вузькосмугового Інтернету речей зростатиме на 35% протягом прогнозованого періоду 2024–2032 років.

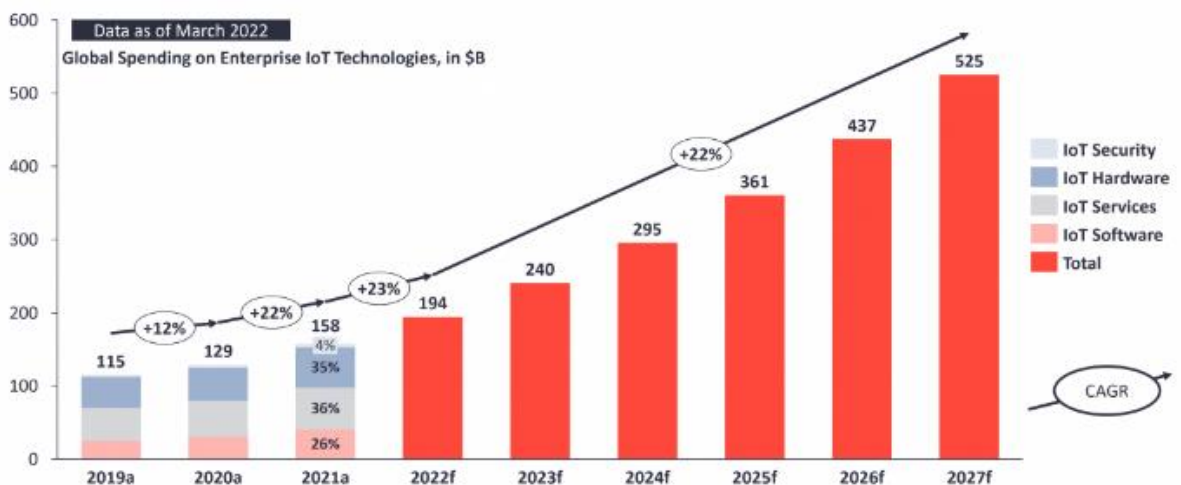


Рисунок 1.8 - Аналіз та прогноз зростання ринку IoT

Збільшення переваги енергоефективних вузькосмугових модулів IoT сприяє зростанню ринку вузькосмугового IoT, оскільки вони допомагають забезпечити тривалий термін служби батареї з мінімальною потужністю для застосування обробки сигналів [10].

Вузькосмуговий IoT (NB IoT) — це бездротова мережева система IoT, що розвивається, здатна з'єднувати пристрої IoT на більшій території та в областях з обмеженою пропускнуою здатністю, до яких важко дістатися вручну.

Economic		Political/Social		Environmental		Technological	
Factor	Expected Impact	Factor	Expected Impact	Factor	Expected Impact	Factor	Expected Impact
1 Lower than anticipated demand growth	Headwind	5 Nearshoring/ Reshoring	Tailwind	9 Sustainability goals	Tailwind	12 Maturing artificial Intelligence	Tailwind
2 Rising input prices	Headwind	6 Russian invasion of Ukraine	Headwind	10 Reducing fossil fuels	Tailwind	13 Cloud vendors focus on IoT	Tailwind
3 Lower valuations for disruptive technologies	Neutral	7 Skill/Labor shortage	Headwind	11 Living with COVID-19	Tailwind	14 Maturing connectivity	Tailwind
4 Unstable supply chains	Neutral	8 European Data Act	Neutral			15 Increasing cybersecurity incidents	Headwind
						16 Chip shortage	Headwind

Legend: ● Headwind ● Neutral ● Tailwind

Рисунок 1.9 - Фактори впливу на ринок IoT

Глобальний ринок вузькосмугового Інтернету речей можна розділити на такі сегменти, як типи, режими розгортання, типи пристроїв, кінцеве використання та регіони.

#### 1. Тип:

- обладнання;
- програмне забезпечення;
- сервіс.

#### 2. Режим розгортання:

- автономний
- гвардійський оркестр;
- всередині групи.

#### 3. Тип пристрою:

- розумна парковка;
- розумні лічильники;
- трекери;
- сигналізації та сповіщувачі;

- розумні вуличні ліхтарі;
- розумна техніка;
- носимі пристрої;
- інші;

#### 4. Кінцеве використання:

- сільське господарство;
- автомобільна промисловість і транспорт;
- енергетика та комунальні послуги;
- охорона здоров'я;
- виробництво;
- безпека та захист;
- інфраструктура;
- інші.

У звіті EMR розглядаються регіональні ринки вузькосмугового Інтернету речей, такі як Північна Америка, Латинська Америка, Європа, Близький Схід і Африка, а також Азіатсько-Тихоокеанський регіон.

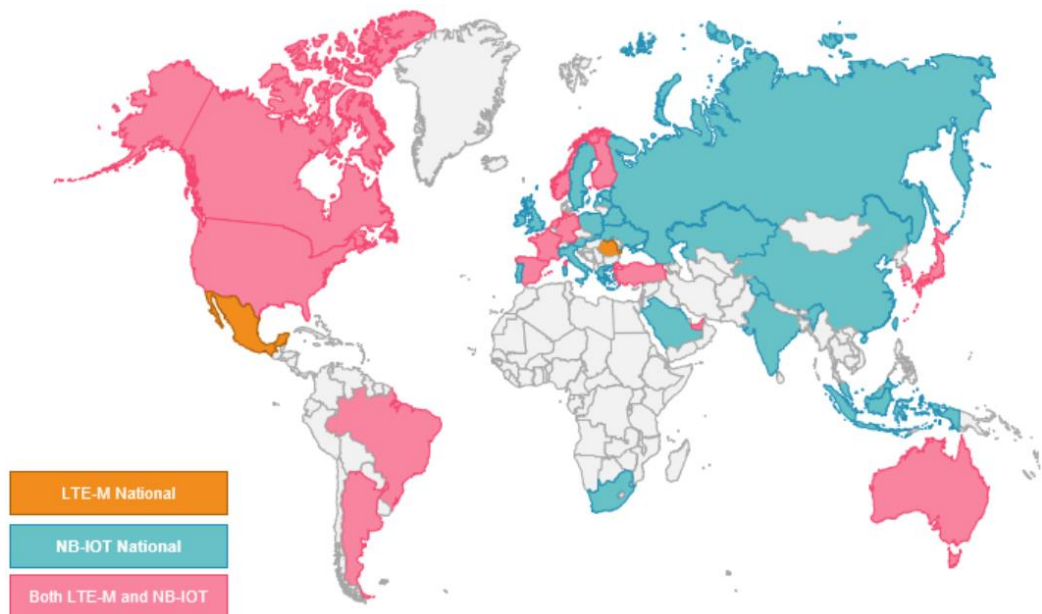


Рисунок 1.10 - Географічне розгортання NB IoT та LTE-M

Завдяки прогресуючій технології вузькосмугового Інтернету речей її застосування швидко зростає в різних програмах. Удосконалений дизайн і вдосконалені пристрої вузькосмугового Інтернету речей і сервіси розгортання, технологічні компанії та постачальники телекомунікаційних послуг інвестують більше в продукт, який, як очікується, сприятиме розвитку ринку вузькосмугового Інтернету речей протягом прогнозованого періоду. Крім того, розробки в області штучного інтелекту (AI), машинного навчання (ML) і аналітики великих даних дозволять компаніям аналізувати величезні обсяги даних, зібраних під час відстеження та моніторингу за допомогою вузькосмугових мереж IoT. Таким чином, очікується, що зростаюче впровадження IoT та підключених пристроїв, а також машинне навчання та аналітика великих даних через промислові та комерційні програми призведуть до зростання ринку вузькосмугового IoT у прогнозований період.

Сегмент захисної смуги, серед інших режимів розгортання, становив найбільшу частку на ринку вузькосмугового IoT. У регіональному розрізі, хоча Північна Америка домінувала на ринку, очікується, що Азіатсько-Тихоокеанський регіон буде лідирувати на світовому ринку вузькосмугового Інтернету речей протягом прогнозованого періоду завдяки зростаючому застосуванню передових технологій у регіоні.

## РОЗДІЛ 2 ЕФЕКТИВНІСТЬ КЕРУВАННЯ РЕСУРСАМИ ВУЗЬКОСМУГОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

### 2.1. Аналіз технологій Інтернет речей та їх порівняння

Дійсно, амбіційне ефективне використання мережевих ресурсів уже викликало значний інтерес до досліджень і розробок з точки зору розробки нових методів і підходів на всіх рівнях мережі, які є специфічними для IoT.

Одна з областей, яка нещодавно привернула увагу, - це глобальні мережі малої потужності (LPWAN). Low Power Wide Area (LPWA) описує категорію технологій бездротового зв'язку, призначених для підтримки розгортання Інтернету речей (IoT). Таким чином, LPWA представляють групу технологій, спрямованих на забезпечення енергоефективного та дешевого глобального зв'язку, на який може покладатися зв'язок між машинами (M2M) для набагато більш енергоефективного розгортання та роботи [4]. Очікується, що технологія LPWA обслуговуватиме широкий спектр вертикальних галузей і підтримуватиме низку додатків і сценаріїв розгортання, для підключення яких існуючі мобільні технології наразі не найкраще підходять. Основна мета розробки технологій LPWA полягає в забезпеченні потужного покриття на великих територіях, високої енергоефективності, великого масштабу, низької вартості зв'язку та низької пропускної здатності [3].

На сьогоднішній день LPWAN став одним із найбільш швидкозростаючих ринків IoT з багатьма технологіями LPWAN, які розробляються як у ліцензованих, так і в неліцензійних спектрах. Деякі з найпопулярніших технологій LPWA, що розробляються, можна класифікувати, як наведено в табл.2.1.

Таблиця 2.1 - Найбільш поширені технології LPWAN

Без ліцензії	Ліцензовані
LoRa	NB-IoT
SigFox	LTE-M
Symphony	NB-Fi



iFrogLab	LTE-MTC
ThingPark Wireles	UNB
Ingenu	WEIGHTLESS-P

Зі списку найпоширеніших технологій LPWAN у таблиці 1 було визначено, що Long Range (LoRa), а також вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) є двома найпопулярнішими та новими технологіями в неліцензійному та ліцензованому діапазонах. відповідно [7].

### 2.1.1 Порівняння NB-IoT ТА інших IoT технології

Вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT) — це нова вузькосмугова радіотехнологія, спеціально розроблена для IoT, яку можна безпосередньо розгорнути в мережах Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM) або довгострокової еволюції (LTE) з метою скорочення розгортання. витрати [8].

Однак існують інші технології бездротового зв'язку, які дозволяють розгорнути Інтернет речей. На рис. 2.1. представлено порівняння різних технологій для IoT та еволюції до 5G.










	NB-IoT 	WIFI 	BLUETOOTH 	SIGFOX 	LoRa 	LTE-M/ (eMTC) (Rel 13) 	EC-GSM (Rel. 13) 	ZIGBEE Pro 	5G (targets) 
Coverage Area	<15 km 164 dB	17-30+ (meters)	1-10+ (meters)	<12km 160 dB	<10 km 157 dB	<10 km 156 dB	<15 km 164 dB	1-100+ (meters)	<12km 160 dB
Spectrum Bandwidth	Licensed 7-900MHz 200 kHz shared	2.4 GHz 802.11	2.4 GHz 802.15.1	Unlicense d 900MHz 100kHz	Unlicense d 900MHz <500kHz	Licensed 700MHz-900MHz 1.4 MHz shared	Licensed 800MHz-900MHz shared	2.4G 802.15.4	Licensed 700MHz-900MHz shared
Rate	<50 kbps	150Mbps	1Mbps	<100bps	<10 kbps	<1 Mbps	10 kbps	250kbps	<1 Mbps
Terminal cost	4.00\$ (2015) 2-3\$ (2020)	4.00\$ (2016)	4.00\$ (2016)	4.00\$ (2015) 2.64\$ (2020)	4.00\$ (2015) 2.64\$ (2020)	5.00\$ (2015) 3.30\$ (2020)	4.5\$ (2015) 2.97\$ (2020)	3.00\$ (2016)	<2\$
Network Reforming	Small to moderate	None	None	Large	Large	Small	Moderate (LTE reuse)	None	Requires 5G NWS

Рисунок 2.1 - Порівняння продуктивності деяких поширених технологій IoT

На нещодавньому пленарному засіданні в Південній Кореї Проект партнерства третього покоління (3GPP) завершив стандартизацію NB-IoT, у якій

NB-IoT вважається дуже важливою технологією та великим кроком для еволюції 5G IoT [5]. Галузі, включаючи Ericsson, Nokia та Huawei, виявили великий інтерес до NB-IoT як частини систем 5G і витратили багато зусиль на стандартизацію NB-IoT [8], яка широко розглядається як основна техніка для наступних поколінь бездротового зв'язку. Очікується, що NB-IoT забезпечить покращене покриття та підтримку величезної кількості пристроїв із низькою пропускну здатністю, низькою чутливістю до затримки, наднизькими витратами на пристрої та низьким споживанням енергії. Питання про те, як досягти цих переваг, зокрема покращення покриття, швидкості передачі даних та енергоефективності, є великим викликом. У стандартизації 3GPP багаторазове повторення даних передачі та відповідна контрольна сигналізація використовувалися як базове рішення для досягнення розширення покриття для NB-IoT [6]. Інші існуючі роботи з NB-IoT враховують нову функцію повторення.

Підхід полягає в тому, щоб розглянути можливість виконання адаптації каналу для управління ресурсами для підвищення енергії, швидкості передачі даних, ефективності покриття шляхом розгляду двовимірного простору, а саме вибору рівня модуляції та кодування (MCS), як це розглядається в традиційних системах LTE, а також у визначення кількості повторень.

### **2.1.2. Порівняння фізичного рівня NB-IoT та LoRa**

У цьому розділі коротко обговорюються ключові технічні відмінності на рівні PHY між технологією NB-IoT (яка вважається провідною технологією LPWAN у ліцензованому діапазоні) і технологією Long Range (LoRa) (вважається провідною технологією в неліцензованому діапазоні).

Технологія LoRa LPWAN працює в неліцензованому діапазоні нижче 1 ГГц для зв'язку на великі відстані.

Він використовує модуляцію Chirp Spread Spectrum (CSS) на рівні PHY, що дозволяє змінювати швидкість передачі даних (низьку) на чутливість у фіксованій смузі пропускання каналу, що робить його досить стійким до перешкод. Модуляція

CSS також відома своїми можливостями великої дії, головним чином завдяки своїй стійкості до перешкод. В результаті він знаходить широке застосування у війську.

Використовуючи техніку модуляції з розширеним спектром, LoRa не тільки забезпечує можливість великого діапазону, але також забезпечує чудову продуктивність бюджету зв'язку. Важливо відзначити, що розширений спектр забезпечує ортогональне розділення між сигналами.

Це робиться за допомогою унікального коефіцієнта поширення для окремих сигналів. Цей підхід є перевагою з точки зору управління швидкістю передачі даних. Співвідношення між необхідною швидкістю передачі даних і швидкістю чіпа та символною швидкістю, що використовуються для мережі LoRa, було змодельовано в [10] як:

$$R_b = SF \times \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \text{ bits/sec} \quad (2.1)$$

де "SF" - коефіцієнт розширення, а "BW" - смуга модуляції (Гц). Як чітко показано в рівнянні 1, швидкість передачі даних прямо пропорційна смузі модуляції.

У модуляції LoRa розширення спектру досягається шляхом генерації чірп-сигналу, частота якого постійно змінюється. Перевагою цього методу є те, що часові та частотні зсуви між передавачем і приймачем еквівалентні, що значно зменшує складність конструкції приймача. LoRa також має інші переваги, такі як адаптивна швидкість передачі даних, масштабована пропускна здатність, висока енергоефективність і стійкість до багатопроменевого поширення.

З іншого боку, NB-IoT можна розглядати як новий повітряний інтерфейс сам по собі, незважаючи на те, що він інтегрований у LTE. Це пояснюється тим, що NB-IoT усуває багато функцій LTE, включаючи передачу обслуговування, вимірювання для моніторингу якості каналу, агрегацію несучих і подвійне підключення, щоб задовольнити критерії проектування NB-IoT щодо енергоефективності та роботи з низьким енергоспоживанням (енергоефективність). у розділі II.

На відміну від LoRa, який використовує неліцензійну смугу, NB-IoT використовує ті ж смуги частот, що й LTE, які є ліцензованими смугами частот, розділеними на 12 піднесучих по 15 кГц кожна в низхідній лінії зв'язку (DL) з використанням методу доступу OFDM і 3,75 або 15 кГц. у висхідній лінії зв'язку (UL) з використанням схеми доступу FDMA з однією несучою (SC-FDMA). Також важливо відзначити, що NB-IoT використовує PSK, який є тією ж технікою модуляції, що використовується в LTE. NB-IoT займає смугу частот 180 кГц, що відповідає одному блоку ресурсів у передачі LTE. Це призводить до трьох можливих режимів роботи залежно від розташування блоку в спектрі LTE, як показано на рис.2.2.

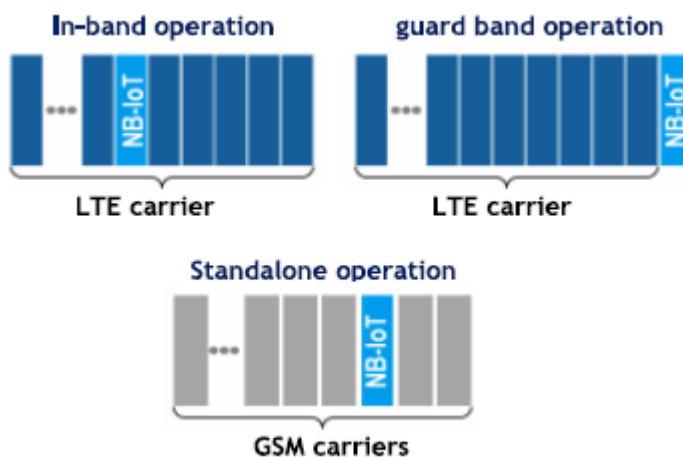


Рисунок 2.2 - Режими роботи діапазону NB-IoT

Три режими роботи включають:

- внутрішньосмугова робота з використанням ресурсних блоків у межах носія LTE;
- робота охоронної смуги з використанням невикористаного ресурсу блоку в межах захисної смуги оператора LTE;
- автономна робота: можливим сценарієм є використання частот GSM, які зараз використовуються. З їх смугою пропускання 200 кГц все ще залишається захисний інтервал 10 кГц по обидва боки спектра.

У табл.2.2. представлено порівняльний підсумок ключових відмінностей на рівні PHY між LoRa та NB-IoT.

Таблиця 2.2- Порівняльна таблиця між функціями PHY LoRa та NB-IoT

PHY параметри	LoRa	NB-IoT
Модуляція	CSS	QPSK
Бюджет посилення	154 dB	150 dB
Спектр	Без ліцензії	Ліцензована пропускна здатність LTE
Пропускна здатність	500KHz-125 KHz	180 KHz
Пікова швидкість передачі даних	290 bps-50kbps (DL/UL)	DL:234,7 kbps UL:204,8 kbps
Енергоефективність	>10 років автономної роботи пристроїв	>10 років автономної роботи пристроїв
Спектральна ефективність	Мікросхеми SS CDMA краще, ніж FSK	Покращено автономною роботою внутрішньосмугової захисної смуги
Енергоефективність	Висока	Середня
Трафік області	Залежить від типу шлюзу	40 пристроїв на домогосподарство = 55 тисяч пристроїв на комірку
Імунітет інтерфейсу	Dbsjrbq	Низький
Стандартизація	Стандарт де-факто	3GPP Rel.13
Мобільність	Краще, ніж NB-IoT	Немає підключеної мобільності (лише повторний вибір режиму очікування)

Підводячи підсумок, мета цієї роботи полягає в тому, щоб надати огляд існуючих статей, які зосереджуються на вдосконаленні одного або кількох ресурсів NB-IoT, і критично оцінити їх відповідні показники, порівнюючи їх на основі енергоефективності, швидкості передачі даних і масштабованості мережі та ідентифікації потенційні дослідницькі можливості для майбутньої роботи. Основна увага статті зосереджена на існуючих підходах до кодування каналів, схемах

вибору рівня модуляції та підходах до масштабування мережі. Решта паперу організована таким чином.

Розділ II представляє та описує основні цілі розробки NB-IoT. Розділ III обговорює найпоширеніші програми NB-IoT і пов'язані з ними проблеми з ресурсами, тоді як розділ IV зосереджується на проблемах безпеки та пов'язаних із ними рішеннях. У розділі V обговорюється відповідна робота над існуючими енергоефективними схемами кодування каналів NB-IoT. Розділ VI описує та обговорює роботу, пов'язану з розробкою схем вибору модуляції NB-IoT для підвищення швидкості передачі даних. У розділі VII розглядаються схеми адаптації каналів для покращеної масштабованості NB-IoT. У Розділі VIII визначаються та обговорюються проблеми продуктивності NB-IoT і відкриті питання. У розділі IX аналізуються аспекти NB-IoT як частини стільникового IoT 5G, тоді як у розділі X обговорюється програмно визначена мережа (SDN) і віртуалізація мережевих функцій (NFV) NB-IoT у системах 5G, перш ніж будуть зроблені висновки та рекомендації. для майбутніх напрямків сформульовано в розділі XI.

## **2.2. Цілі проектування NB-IoT**

NB-IoT в основному спрямований на надання енергоефективних і економічно ефективних зв'язків для великої кількості об'єктів, розподілених на широкій географічній території [9]. Як і більшість технологій IoT, однією з головних цілей дизайну NB IoT є досягнення зв'язку машинного типу (MTC). На рис.2.3. чітко зображено різні додатки MTC NB-IoT разом із відповідними цілями проектування, чітко класифікуючи їх у масових і критичних додатках MTC.

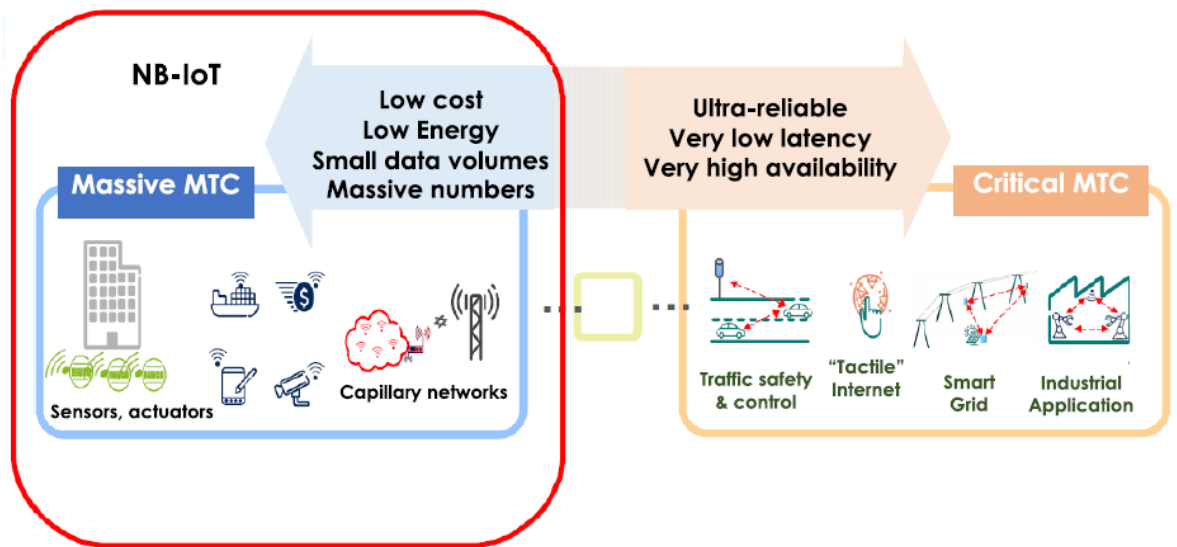


Рисунок 2.3 - Комунікаційні програми машинного типу NB-IoT

З літератури можна стверджувати, що деякі цілі дизайну NB-IoT є суперечливими. У цьому розділі коротко описано цілі проектування систем NB-IoT, а також деякі методи, запропоновані в літературі для їх досягнення. Нижче наведено деякі з основних цілей проектування систем NB-IoT:

**Зв'язок на далеку діяльність.** Щоб досягти широкої зони покриття, конструкція NB-IoT повинна забезпечити високу якість розповсюдження сигналу та глибше проникнення сигналу, здатне досягати підвалів і глибинних зон будівель. Відповідно до [18], конструкція націлена на сигнали, які часто кількісно оцінюються в 20 дБ посилення над середніми стільниковими сигналами. Цей вигреш перетворюється на з'єднання кінцевих пристроїв на відстані від кількох до десятків кілометрів і залежить від типу середовища розгортання (сільська місцевість, місто тощо). Щоб досягти довгострокових конструкцій NB-IoT, більшість дослідницьких робіт у літературі запропонували такі (фізичні) методи проектування рівня РНУ:

- Використання низькогодіапазону ГГц: у більшості проектів NB-IoT запропоновано використання діапазону нижче ГГц, щоб підвищити стійкість і надійність зв'язку за менших витрат на електроенергію. Діапазон нижче ГГц забезпечує кращу якість сигналу на ширшій зоні покриття та на більшій відстані головним чином з двох основних причин. По-перше, на відміну від діапазону 2,4

ГГц, діапазон нижче ГГц складається з нижчих частот, які, отже, зазнають меншого загасання та багатопроменевого завмирання, викликаного перешкодами та щільними поверхнями, такими як бетонні стіни, як моделюється за формулою Фріса, заданою за формулою:

$$L = 20 \times \log_{10} \left( \frac{4 \times \pi \times d \times f}{c} \right) \quad (2.2)$$

L являє собою наближення (ідеальний випадок: ізотропні антени та вільний простір) загасання, d являє собою відстань між передавальною та приймальною антенами, f і c представляють частоту та швидкість світла відповідно.

По-друге, було доведено, що діапазон нижче ГГц менш перевантажений порівняно з діапазонами 2,4 ГГц і 5 ГГц, які використовуються для звичайних бездротових технологій, таких як Wi-Fi, бездротові телефони, Bluetooth, ZigBee та інші бездротові технології, специфічні для побутова техніка [18]. Завдяки досягненню надійного та високонадійного зв'язку використання діапазону нижче ГГц забезпечує більший діапазон зв'язку та менше енергоспоживання.

- Оптимальний вибір схеми модуляції: для досягнення зв'язку на великій відстані в деяких роботах щодо ефективних проектів NB-IoT, знайдених у літературі, наприклад [19], запропоновано ефективні методи вибору схеми модуляції. Загальна ідея більшості запропонованих підходів полягає в компромісі між високою швидкістю передачі даних і більшою енергією в кожному переданому біті (або символі) на фізичному рівні (PHY).

Ця техніка проектування дозволяє створювати сигнал, більш стійкий до шуму та перешкод і який може передаватися на більші відстані. Таким чином, загалом визначеною метою більшості проектів є досягнення бюджету каналу зв'язку 150+-10 дБ, що можна перекласти на кілька кілометрів і десятки кілометрів у міських і сільських районах відповідно [7]. Кодування більшої кількості енергії в бітах сигналу (або символів) призводить до дуже високої надійності декодування на стороні приймача. Таким чином, типова чутливість приймача може бути лише -130 дБм.

Методи модуляції, які використовуються для більшості технологій LPWAN, можна класифікувати на дві основні категорії, а саме: вузькосмугові методи та



методи розширеного спектру. Методи розширення спектру поширюють вузькосмуговий сигнал у ширшому діапазоні частот, але з тією самою щільністю потужності. Фактична передача – це шумоподібний сигнал, який важче виявити перехоплювачам, він більш стійкий до перешкод і стійкий до атак з перешкодами (захищений) [18].

Порівняно з іншими технологіями LPWAN, такими як LTE Cat-M1, які в основному використовують методи модуляції з розширеним спектром, більшість робіт щодо проектів NB-IoT, знайдених у літературі, такій як [7,18], пропонують використання вузькосмугової модуляції техніки. Загалом методи вузькосмугової модуляції забезпечують високий бюджет зв'язку, який часто становить менше 25 кГц. Вони дуже ефективні для спільного використання частотного спектру між декількома лініями зв'язку, і вони мають дуже низький рівень шуму в кожній окремій вузькій смузі. Для подальшого зменшення шуму деякі технології LPWAN, такі як SIGFOX, WEIGHTLESS-N і TELENSA, використовують ультравузьку смугу (UNB) із шириною до 100 Гц [9]. Таким чином, вони здатні досягати більшої дальності передачі.

Однією з головних відмінностей між методами вузькосмугової модуляції та методами розширеного спектру є те, що методи розширеного спектру часто вимагають більшого підсилення обробки на стороні приймача для декодування отриманого сигналу (нижче рівня шуму). Однак для декодування сигналу в приймачі у випадку методів вузькосмугової модуляції не потрібне жодне виграш обробки через згортання частоти. Це призводить до більш простих і дешевих конструкцій трансиверів. Різні варіанти методів розширеного спектру, такі як Chirp Spread Spectrum (CSS) і Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), використовуються існуючими стандартними технологіями LPWA.

Інші автори, такі як [11], запропонували використовувати методи машинного навчання як механізм для розширення покриття у вузькосмуговому IoT. Замість використання процедури довільного доступу до спектру, підхід полягає у використанні техніки динамічного доступу до спектру, яка призводить до зменшення кількості необхідних повторень, збільшення покриття мережі та

зменшення споживання енергії. Замість довільного доступу на основі розрізненогоALOHA, який випадковим чином вибирає канал для передачі, щоб встановити з'єднання зі стільником. У цій роботі пропонується використовувати динамічний доступ до спектру для визначення каналу, який з більшою ймовірністю буде доступним і в хороших умовах покриття. Процес навчання спектра може бути змодельований як структура багаторукового бандита (MAB), як запропоновано в [12], [13]. Залежно від розташування UE (на вулиці, у приміщенні, підвали) і умов каналу (високий або низький SNR), якість фізичних каналів змінюється. Таким чином, вибір каналу з найкращою якістю (тобто рівнем покриття) потенційно призводить до надійної передачі та є менш витратним з точки зору споживання енергії.

**Робота з низькою потужністю.** Щоб зменшити витрати на технічне обслуговування, об'єкти IoT, що живляться від батарейок, повинні мати термін служби не менше 10 років.

Це ключова вимога до дизайну IoT/M2M.

Згідно з більшістю робіт у літературі, термін служби батареї часто залежить від низки факторів, які включають топологію мережі, використовуваний робочий цикл і розподіл завдань між кінцевими пристроями та базовими станціями (BS) [19].

а) Топологія мережі:

Відповідно до [9], коли система NB-IoT складається з великої кількості підключених об'єктів на великій географічній території, топологія сітчастої мережі не тільки страждає від високих витрат на розгортання, але також страждає від «проблеми вузького місця». Це пов'язано з тим, що коли трафік пересилається через кілька переходів до шлюзу, деякі пристрої стають більш перевантаженими, ніж інші, залежно від їхнього розташування чи шаблонів мережевого трафіку. Це призводить до скорочення терміну служби їхніх акумуляторів, що обмежує загальний термін служби мережі кількома місяцями або роками.

Таким чином, більшість систем NB-IoT використовують мережеву топологію типу «зірка», підключаючи кінцеві пристрої безпосередньо до базових станцій,

повністю усуваючи потребу в щільному та дорогому розгортанні реле та шлюзів. Ця технологія дає величезну економію енергії. Порівняно з сітчастою топологією, пристроям не потрібно витрачати дорогоцінну енергію на зайняте прослуховування інших пристроїв, які хочуть передавати свій трафік через них. У зіркоподібній топології, яка використовується в більшості технологій LPWAN загалом, а також у системах NB-IoT зокрема, базова станція завжди залишається увімкненою, щоб забезпечити зручний і швидкий доступ, коли цього потребують кінцеві пристрої. Важливо зазначити, що хоча більшість технологій LPWA використовують зіркоподібну топологію, деякі з них використовують дерево або сітчасту топологію. Однак останні часто вимагають значно складніших конструкцій протоколів, щоб досягти подібних показників енергоефективності до топології зіркової мережі.

#### b) Керування робочим циклом:

Інша техніка, яка часто використовується для досягнення енергоефективної роботи систем NB-IoT, полягає в випадковому відключенні пристроїв M2M/IoT з високим енергоспоживанням, таких як схема радіоприймача. Застосування покращеного робочого циклу для живлення схеми радіоприймача шляхом перемикання радіо лише тоді, коли дані потрібно передати або коли дані отримані, показало значне зниження загального енергоспоживання мережі [6].

Ряд досліджень у літературі про системи NB-IoT розглядав вплив інших аспектів рівня РНУ на енергоспоживання системи. Як результат, у цій роботі пропонується розглянути вплив і внесок вибору схеми модуляції, а також кодування каналу на загальне енергоспоживання системи NB-IoT.

**Низька вартість дизайну.** Низька вартість дизайну залишається ключовим гравцем у комерційному успіху проектів NB-IoT. Цю умову проектування можна краще виразити наступним формулюванням оптимізації витрат: «Досягнення підключення великої кількості пристроїв (якомога більшої кількості пристроїв), зберігаючи як вартість обладнання (наприклад, нижче 5 доларів [18]), так і вартість підписки за одиницю пристрою якнайнижче (наприклад, \$1 [19])". Деякі з

найпоширеніших методів, механізмів і підходів, які використовуються технологіями NB-IoT для досягнення мети недорогого проектування, включають:

- Зменшення складності апаратного забезпечення: у цій галузі докладаються значні зусилля як на рівні пристроїв NB-IoT, так і на проектуванні різних апаратних платформ. Ці зусилля включають, наприклад, пом'якшення обробки базової смуги, що значно знижує вимоги до обчислень у eNB. Це автоматично означає здешевлення апаратних пристроїв, які значно знижують вартість [20]. Такі зусилля також включають зменшення радіочастотних (RF) компонентів [21] на радіочастотному тракті вузлів NB-IoT.

Це, наприклад, досягається за допомогою інтегральної схеми радіочастотного перемикача, здатної перемикати кілька радіоприймачів, присутніх на вузлі NB-IoT, на один і той самий антенний тракт за допомогою основного вихідного контакту низької потужності процесора на платі. Було доведено, що цей метод мінімізації радіочастотного обладнання є економічно ефективним, але також забезпечує мінімальні локальні перешкоди між радіоактивністю на вузлі NB-IoT.

- Спрощення мережевої інфраструктури: в результаті зусиль щодо віртуалізації мережевих функцій NB-IoT [25] відбулося значне зниження вимог до пам'яті в різних частинах мережевої архітектури, таких як SGW (обслуговуючий шлюз), орган управління мобільністю (MME) і мережа радіодоступу стільникового Інтернету речей (CIoT RAN).

### **2.3. Особливості застосування NB-IoT та аналіз складнощів реалізації**

**Розумне вимірювання.** Одним із найбільш підходящих застосувань для NB-IoT є розумне вимірювання. NB-IoT зазвичай використовується для обліку води, газу та електроенергії [13]. Унікальність систем NB-IoT, які використовуються для обліку води та газу на відміну від обліку електроенергії, полягає в обмеженій доступності енергії для вузлів NB-IoT. Більшість лічильників води та газу працюють від батарейок. Обмежена доступність енергії створює проблему для їх розробки, оскільки конструкція має забезпечити тривалий термін служби мережі

[14]. Через енергетичні обмеження лічильники води та газу часто обмежені використанням технологій зв'язку з низьким енергоспоживанням, на відміну від конструкцій лічильників електроенергії, які все ще можуть досліджувати інші енергоємні технології зв'язку, такі як стільниковий (LTE, GPRS тощо) [15]. Модулі NB-IoT з живленням від батареї не потребують підключення до джерела живлення, забезпечують глибоке проникнення в приміщення і, таким чином, встановлюють надійні з'єднання навіть у місцях, де мобільний прийом поганий. Постачальник може зняти показання лічильника дистанційно, і кінцевому споживачу не потрібно залишатися вдома, щоб чекати, поки зчитувач лічильника зніме показання лічильника в приміщенні користувача.

Іншим сценарієм є застосування NB-IoT для дистанційного інтелектуального обліку енергії. В енергетичному секторі розробка мереж інтелектуального вимірювання дозволяє операторам і компаніям підвищити ефективність виробництва та пропонувати клієнтам покращений сервіс.

Автори в [18] пропонують аналіз розгортання системи NB-IoT для кількох систем вимірювання з метою оцінки її покриття та продуктивності пропускну здатності.

Для оцінки продуктивності встановлюється кілька сценаріїв. Це можна підсумувати таким чином:

- Вимірювання енергії (наприклад, вимірювання газу): обладнання користувача розміщується глибоко в приміщенні, іноді в підземній зоні. Це означає, що вони страждають від додаткових втрат на шляху порівняно з приладами, які працюють поза приміщенням, такими як лічильники води. Ці пристрої є статичними.

- Вимірювання якості повітря: ці типи інтелектуальних лічильників NB-IoT також є статичними (не мобільними) і зазвичай розміщуються вдома. Незважаючи на те, що ці пристрої розміщуються всередині приміщень, вони нечасто знаходяться в глибоких приміщеннях, як, наприклад, лічильники газу.

- Розумні дворові лічильники води: ці лічильники споживання води та реєстратори часто розгортаються на відкритому повітрі. Це робить їх майже без втрат шляху.

Передбачається, що всі ці пристрої в цих трьох сценаріях щодня обмінюються даними з базовою станцією NB-IoT через періодичний інтервал, щоб надсилати значення щоденного споживання. Дослідження демонструє, що пристрої, розташовані поза приміщенням, мають кращу потужність сигналу порівняно з пристроями всередині будинку, які, у свою чергу, мають перевагу перед лічильниками газу NB-IoT, розташованими глибоко всередині приміщень.

Це означає більшу надійність мережі для зовнішніх пристроїв, що потім впливає на їх енергоспоживання та пропускну здатність каналу порівняно з пристроями, що працюють усередині приміщень і глибоко всередині приміщень.

**Розумні міста.** У розумних містах системи NB-IoT можна використовувати для вуличного освітлення, як описано в [19]. Ліхтарні стовпи, обладнані відповідними модулями, можна дистанційно вмикати та вимикати або затемнювати, і вони можуть викликати сигнал тривоги, якщо вони несправні. Якщо місто об'єднує свої паркувальні місця за допомогою NB-IoT, досягається кращий рівень використання доступної парковки. Інтелектуальна система паркування водіїв направляє до найближчого вільного паркувального місця за найкоротшим маршрутом [12]. Під час утилізації відходів сміттєві баки з модулями NB-IoT сповіщають центр керування, коли вони заповнені. Як наслідок, компанії з утилізації відходів можуть оптимізувати маршрути транспортних засобів і зменшити витрати.

Нетиповий сценарій використання NB-IoT у додатках розумних міст описано та проаналізовано в [17]. Сценарій складається з пристроїв NB-IoT, розміщених у різних частинах міста в неоднорідних середовищах з різними умовами покриття мережі. Ці пристрої використовуються для керування паркуванням, керування дорожнім рухом, утилізації відходів та багатьох інших повсякденних операцій з управління містом. Вони в основному служать для реєстрації даних для прогнозного та реактивного планування управління містом [18].

Досвід продемонстрував чітку різницю в енергоефективності різних типів пристроїв залежно від того, чи є вони мобільними чи статичними, у приміщенні чи на вулиці, у місті чи за містом. Було визначено деякі ключові проблеми, пов'язані з розгортанням систем NB-IoT у програмі розумного міста. Вони включають планування та оптимізацію мережі для забезпечення надійного та тривалого покриття, затримки мережі, а також локалізацію вузлів.

**Локалізація.** NB-IoT підходить для пошуку домашніх тварин або цінних речей як у приміщенні, так і на вулиці. Щоб не втратити з поля зору домашнього улюбленця чи дорогу особисту річ, недорогою альтернативою GSM-трекеру може стати модуль NB-IoT. NB-IoT представляє цілий новий набір можливостей для низької потужності та недорогої локалізації як рухомих, так і нерухомих активів, таких як автомобілі, сенсорні вузли [16]. Як сценарій використання використання триангуляції для встановлення локалізації вузлів NB-IoT між трьома найближчими базовими станціями може бути підходом із низьким споживанням енергії порівняно з тим, що кожен вузол має власний модуль GPS. Базуючись на відношенні сигнал/шум (SNR) пакету, отриманого від трьох найближчих базових станцій із добре відомими місцями розташування GPS, вузол NB-IoT можна обґрунтовано визначити. Існує багато інших можливих методів, які можна використовувати для локалізації з комунікацій, керованих пристроями NB-IoT. Ці методи включають, наприклад, спостережувану різницю в часі надходження (OTDoA) та індикатор потужності отриманого сигналу (RSSI).

**Фермерське та лісове господарство: моніторинг тваринництва.** Технологія NB-IoT також підходить для використання в сільському господарстві, де немає джерела живлення або де покриття мережі погане [4]. При зрошенні полів або плантацій вимірюються рівні в резервуарах, тиск насоса та витрати води. Також можна контролювати місцезнаходження та здоров'я худоби. У лісовому господарстві недорогі датчики можуть розповсюджуватися у великій кількості, щоб повідомляти таку інформацію, як температура, утворення диму або напрям вітру.

**Промисловість: NB-ІоТ НА піддонах та трубопроводах.** У сценарії використання, коли необхідно контролювати нафто- та газопроводи, датчики передають важливу інформацію про тиск, швидкість потоку або можливі витіки. Часто немає зовнішнього джерела живлення для трубопроводів у важкодоступних місцях. NB-ІоТ може знайти відповідні програми, оскільки модулі мають тривалий термін служби, не потребують обслуговування та мають на 20 дБ більший діапазон, ніж звичайні підключення до мобільної мережі [5].

## **2.4 Енергоефективні схеми кодування каналів NB-ІоТ**

Технології малопотужних глобальних мереж (LPWAN) як у ліцензованих, так і в неліцензійних діапазонах прагнуть стати енергоефективними на дуже великих відстанях.

NB-ІоТ розроблений для продовження терміну служби пристроїв і націлений на термін служби батареї понад 10 років. З цією метою ретельна розробка інтелектуальних схем кодування каналів була визначена як потенційний підхід до підвищення енергоефективності NB-ІоТ. Канальне кодування є одним із найважливіших аспектів у цифрових системах зв'язку, який дає можливість виявлення та виправлення помилок.

У своїй поточній формі NB-ІоТ широко використовує конструкцію LTE, включаючи нумерологію, множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA), множинний доступ з частотним поділом каналів на одній несучій (SC-FDMA), канальне кодування, узгодження швидкості, чергування тощо. Наскільки нам відомо, єдиною причиною такого широкомасштабного повторного використання кодування каналу LTE було значне скорочення часу, необхідного для розробки повних специфікацій NB-ІоТ. Однак існують проблеми, дуже специфічні для проектів мереж NB-ІоТ, включаючи проблему обмеженої енергетичної потужності. Тому дослідники [19] визначили дуже важливу потребу в розробці нового кодування каналів



техніки, дуже специфічні для NB-IoT з різними цілями проектування. Наша дослідницька робота, представлена цією статтею, визначила проблему енергоефективності як потенційну дослідницьку проблему. Однак інші дослідники розглядали цю проблему з інших точок зору. Різні підходи, розглянуті ними, коротко описані в наступних параграфах.

**Важливість кодування.** Однією з найважливіших проблем у проектуванні систем NB-IoT є виправлення помилок. Якщо техніка каналного кодування для NB-IoT добре розроблена, вона може допомогти заощадити значну кількість енергії шляхом значного зменшення кількості необхідних повторних передач.

Це підтверджує той факт, що значна кількість досліджень запропонувала методи кодування каналів з метою досягнення енергоефективності.

Існуючий енергоефективний канал NB-IoT підходи до кодування.

З огляду літератури було обрано наступні основні підходи, які є найбільш актуальними та останніми роботами:

1) Підходи до автоматичного повторного запиту (ARQ): у підходах ARQ приймач запитує повторну передачу пакетів даних. Якщо виявлено помилки, використовуючи певний механізм виявлення помилок. Автори в [11] пропонують метод прямого виправлення помилок відкритого циклу для мереж NB-IoT з метою оптимізації сигналізації ARQ. У цьому підході сигналізація повинна лише вказувати завершення передачі даних DL і не повинна вказувати, які саме блоки пакетних даних (PDU) втрачаються під час передачі. Це дозволяє зменшити простоту підходу до каналного кодування, а отже, дозволяє заощадити на споживанні обчислювальної енергії. Цей підхід довів свою ефективність у підвищенні швидкості передачі даних у Downlink (DL) мережі NB-IoT. Завдяки своїй низькій складності цей підхід також підтвердив підвищення енергоефективності мережі NB-IoT, оскільки він значно зменшує споживання обчислювальної енергії через прийом даних на трансивері вузла IoT. Підхід, запропонований у [19], полягає у використанні гібридного процесу автоматичного повторного запиту (HARQ) у сценаріях, коли мережа NB-IoT може підтримувати лише напівдуплексні операції. Підхід HARQ продемонстрував здатність

скорочувати час обробки на вузлі IoT. Отримані результати в [19] спроможні довести, що використання підходу HARQ може призвести до економії до 20% загального енергоспоживання мережі. Також було доведено, що підвищення масштабованості мережі NB-IoT при використанні підходу HARQ істотно не впливає на показники енергоефективності.

Автори в [13] пропонують гібридний підхід до канального кодування. Він складається з підтвердження гібридного запиту автоматичного повторення (HARQ) для вузькосмугового фізичного загального каналу низхідної лінії зв'язку (NPDSCH) і використовує код повторення для виправлення помилок. У цьому випадку UE може бути виділено 12, 6 або 3 тонами. Однак лише 6- і 3-тональні формати вводяться для пристроїв NB-IoT через обмеження покриття, не можуть отримати вигоду від вищого розподілу смуги пропускання пристрою, що призводить до більш високого енергоспоживання.

2) Підходи прямого виправлення помилок (FEC): дослідження ([14, 15, 17]) вивчали ефективність різних методів повторної передачі та FEC у системах NB-IoT. Декілька дослідників кількісно оцінили вплив низки мережевих параметрів на ефективність методів виправлення помилок (і пов'язані з ними мережеві витрати). Однак досі не було зроблено жодних зусиль, щоб об'єднати ці дослідження в системний підхід, який міг би допомогти у виборі найефективнішої методики з огляду на певні умови мережі.

Автори в [19] запропонували покращений алгоритм виправлення помилок для багатоадресної передачі через мережу LTE і, як розширення, через мережу Narrowband IoT. Використана модель передбачає випадковий розподіл втрат пакетів і постійну швидкість втрат у кожному сценарії. Модель може бути розширена, щоб включити різні розподіли помилок і різні умови втрат під час серії передач NB-IoT по низхідній лінії зв'язку. Отримані результати демонструють, що використання гібридного підходу (поєднання HARQ і FEC) перевершує як метод HARQ, який використовується окремо, так і підхід FEC, який використовується окремо, з точки зору енергоефективності.

Автори в [15] запропонували використовувати техніку прямого виправлення помилок відкритого циклу, щоб не тільки підвищити енергоефективність мережі NB-IoT, але й одночасно досягти ефективної швидкості передачі даних по низхідній лінії зв'язку. Перевага цього підходу полягає в тому, що він забезпечує надзвичайно надійне завантаження програмного забезпечення, що є важливою функцією IoT у ряді додатків, серед яких додатки сенсорної мережі.

Інший підхід до каналного кодування з прямим виправленням помилок для вузькосмугового IoT, запропонований у [16], був спеціально розроблений для зменшення кількості спроб повторної передачі. Це головним чином тому, що [11], [20] і [30] виявили та продемонстрували, що більша частина споживання енергії в Інтернеті речей і бездротових сенсорних мережах (WSN) споживається через фази передачі та прийому.

Одна з найвідоміших конструкцій обробки основної смуги висхідної лінії зв'язку NB-IoT в основному складається з двох основних частин, а саме конструкції обробки каналного кодування та частини модуляції. Відповідно до більшості робіт, знайдених у літературі [18], більшість підходів до кодування каналів висхідної лінії зв'язку NB-IoT включають генерацію та підключення циклічної перевірки надлишковості (CRC), турбо або згорткове кодування та узгодження швидкості в їх традиційному форматі, успадкованому від інфраструктури мережі LTE. . На відміну від більшості LTE-пристроїв, вузли NB-IoT здебільшого живляться від батареї, а отже, потребують обмеженого споживання енергії. Таким чином, деякі дослідження, такі як [11,16], вважають, що традиційні підходи до кодування каналів LTE не є настільки енергоефективними в контексті Інтернету речей (IoT). Тому автори в [11] запропонували механізм енергозбереження на основі прогнозування, який головним чином полягає у зменшенні часу передачі висхідної лінії зв'язку як ключі до забезпечення тривалого терміну служби пристрою IoT. Механізм складається з двох частин: по-перше, мережева архітектура передбачає появу пакета висхідної лінії зв'язку через глибоку перевірку пакетів; по-друге, алгоритм передбачає затримку обробки та попередньо призначає радіоресурси для покращення процедури запиту планування. Таким

чином, очікується, що запропонований підхід значно зменшить кількість випадкових доступів та енергію, споживану радіопередачею, і, отже, зменшить загальне енергоспоживання мережі NB IoT [11]. Архітектуру мережі з механізмом енергозбереження на основі прогнозування, як запропоновано [11], можна додатково покращити шляхом додавання механізму мережевої кластеризації на радіоінтерфейсі між різними вузлами NB-IoT і eNB замість наявності кількох окремих зв'язків між кожним вузлом і eNB. Це може ще більше підвищити загальну енергоефективність мережі.

Запропонована нами схема архітектури з покращеним енергоспоживанням показана на рис.2.6. Використовуються наступні ключові скорочення:

- SRB: сигнальний радіоносій;
- PPE: Packet Prediction Entity;
- PIE: об'єкт перевірки пакетів;
- MME: організація управління мобільністю;
- SGW: обслуговуючий шлюз;
- PDN: мережа пакетної передачі даних;
- PGW: шлюз мережі пакетних даних (PDN) ;
- C-SGN: Шлюз, що обслуговує стільниковий Інтернет речей;
- SCEF: Функція експозиції сервісних можливостей;
- HSS: домашній абонентський сервер.

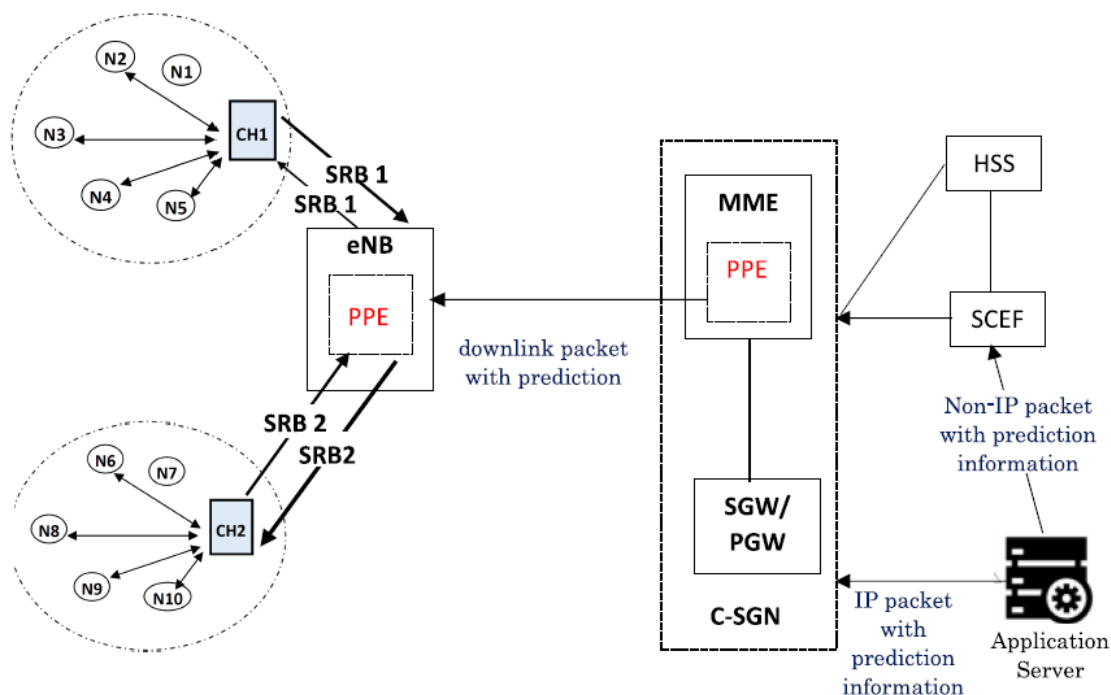


Рисунок 2.6 - Архітектура мережі кластеризації з посиленням енергоспоживанням із механізмом енергозбереження на основі передбачення

На рис.2.6. показана мережева архітектура NB-IoT, яка включає запропонований механізм. В основному він такий самий, як звичайна архітектура мережі та структура інтерфейсу, але враховує дві нові сутності, а саме сутність перевірки пакетів (PIE) і сутність передбачення пакетів (PPE). PIE, який логічно розташований на MME, визначає тип сеансу з перевірки заголовка пакета, наприклад. тип протоколу, номер порту та IP-адресу. Потім PIE прогнозує появу відповіді висхідної лінії зв'язку за допомогою розробленої стратегії, спрямованої на мінімізацію загальної затримки.

З точки зору архітектури, малюнок 5 доповнює ідею [11], додаючи кластеризацію вузлів NB-IoT (N1, N2, N3,...Nx) як техніку для подальшого вдосконалення управління ресурсами в мережі. Кластеризація вузлів NB-IoT на географічній основі, де один із вузлів виконує роль голови кластера (CH, наприклад CH1 і CH2), забезпечує більш децентралізований підхід до обробки пакетів висхідної та низхідної лінії зв'язку, а отже, може бути очікується підвищення загальної продуктивності мережі з точки зору часу (затримки), енергії та ресурсів масштабованості.

## 2.5 NB-IoT як частина мобільної мережі

На відміну від попередніх поколінь мобільних мереж, очікується, що технологія 5-го покоління (5G) фундаментально змінить роль, яку телекомунікаційні технології відіграють у суспільстві [29]. Питання, яке багато хто задає, це знати місце NB-IoT та інших ліцензованих технологій LPWAN, таких як LTE-M з 5G [13]. Запропонована технологія 5G має три основні принципи.

- розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB);
- Ultra Reliability LowLatency Communication (URLLC);
- Massive Machine Type Communication (mMTC).

Рис.2.7 коротко описує ці три стовпи. Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) визначив кілька вимог до 5G mMTC для роботи з додатками IoT [28].

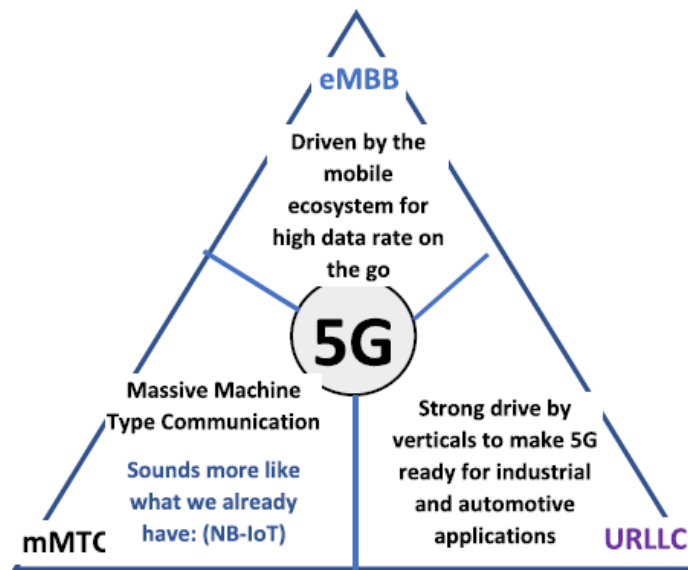


Рисунок 2.7 - Три стовпи 5G і як до них вписується NB-IoT

Основні вимоги включають:

- Термін служби батареї: 10 років при 200 байтах (UL) і 20 байтах (DL) на день
- Покриття: 164 дБ з 160 біт/с

- Щільність: 1 млн пристроїв/км<sup>2</sup>
- Затримка: <10 секунд із 20-байтовим пакетом програми
- Ціна: ультрадешевий пристрій
- Додаткові функції, такі як позиціонування, багатоадресна передача, мобільність тощо.

Щоб досягти таких вимог, 3GPP випустив ще три стандартні версії, підсумовані в таблиці 4:

- eNB-IoT: вдосконалення NB-IoT
- FeNB-IoT: подальше покращення NB-IoT
- NB-IoTenh3: розширена NB-IoT версія 3
- RLF: Збій радіолінії
- PRACH: Фізичний канал довільного доступу
- TDD: двосторонній друк із розділенням часу
- RAT: Технологія радіодоступу
- TBS: розмір транспортного блоку
- HARQ: автоматичний запит на повтор Hybrid.

Таблиця 2.3 - Релізи NB-IoT для задоволення вимог ITU

Release 14	Release 15	Release 16
Неякірний носій		
Індикатор допомоги при звільненні	Нова форма PRACH	
Повторне підключення до RLF	Підтримка TDD	Вибір клітинки Inter RAT
eNB-IoT	FeNB-IoT	NB-IoTenh3

Поліпшення TBS/HARQ	Покращте отримання стільників	Співіснування з 5G
Позиціонування	Сигнал пробудження	Сигнал пробудження групи
Групова розсилка в один стільник	Рання передача даних	Рання передача DL/UL

Ключовим питанням тут було те, як забезпечити співіснування NB-IoT з різними рівнями (фізичним і основним) мережі 5G.

На практиці 5G побачить початкове розгортання в міських районах.

Це, можливо, вигідно з точки зору IoT, оскільки більшість ключових програм IoT підтримуватимуть розумні міста, розумні кампуси та розумні будівлі. NB-IoT вже є ліцензованою смугою. Технологія IoT має велику конкурентну перевагу з точки зору інтеграції зі стільниковою мережею 5G порівняно з іншими технологіями IoT у неліцензованій смузі, такими як LoRa, Sigfox тощо. Одним із ключових факторів для 5G IoT є високий попит на пропускну здатність. що, природно, породжується рядом застосувань технології 5G. Пропускна здатність потрібна, щоб увімкнути послуги 5G на основі розширеного мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB). Таким чином, інтеграція NB-IoT у системи 5G як частини mMTC є чудовою можливістю задовольнити такий величезний попит на пропускну здатність, як NB-IoT, якщо її добре спроектувати та обробляти багато комунікаційних аспектів мережі.

Однак інтеграція NB-IoT із системами 5G пов'язана зі своїми проблемами та проблемами. Деякі з виявлених проблем включають:

- Відсутність узгодженої наскрізної архітектури: стандартизація на нижніх рівнях (контроль каналу передачі даних і фізичний) може сприяти розробці більш інклюзивної багаторівневої багатопрограмної архітектури.

- Проблеми з розповсюдженням: системи 5G розроблені для роботи на частотах мм хвиль, щоб забезпечити високу швидкість передачі даних. Однак це створює проблему з точки зору проникнення сигналу всередину будівель. У той же час для додатків NB-IoT потрібні рішення для приміщень.



Це створює серйозну проблему для розгляду дизайну з вузлової точки зору, коли йдеться про використання мереж NB-IoT із системами 5G.

- Проблеми з множинним доступом: хоча в принципі можливо підтримувати технології множинного доступу в сенсорі IoT (чіпсеті), кінцеві пристрої IoT, як правило, мають низьку складність, щоб досягти встановленої цільової ціни та вбудованого живлення (акумулятор). ) бюджет. Таким чином, низка додатків матиме пристрої, які мають єдину реалізовану бездротову висхідну лінію зв'язку.

- Енергетичні проблеми: через те, що більшість пристроїв NB-IoT обмежені з точки зору обробки, пам'яті та енергетичних ресурсів, інтеграція мережі NB-IoT зі стільниковою мережею 5G створює значне енергетичне навантаження на вузли NB-IoT у порівнянні до неліцензованих смуг IoT-мереж, таких як LoRa, Sigfox тощо. Однак ліцензована смуга має перевагу збору енергії, яку можна використовувати для компенсації високого попиту на енергію. Один із підходів збору енергії, змодельований у [12], розглядає підхід зворотного розсіювання навколишнього середовища. Останнім є використання того факту, що радіочастотні (РЧ) сигнали в повітрі несуть як інформацію, так і енергію.

Якщо сконструйовано належним чином, вузли NB-IoT можуть збирати енергію, що переноситься електромагнітними хвилями (ЕМ), щоб підтримувати рівень енергії та, отже, подовжувати термін служби. Робота в [12] розглядає передачу одного символу на символ мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) на короткі відстані та демонструє, що це може призвести до досягнення задовільних швидкостей передачі даних при економії та зборі значної кількості енергії.

Незважаючи на різні проблеми, пов'язані з інтеграцією NB-IoT як частини стільникового Інтернету речей 5G, NB-IoT залишається дуже конкурентоспроможним порівняно з неліцензійними технологіями з точки зору вибору технології Інтернету речей, яка найкраще підходить для систем 5G. Це пов'язано з тим, що, на відміну від неліцензійних технологій, NB-IoT не створює проблеми неоднорідності мережі, яка ускладнила б керування нею. Деякі зусилля

щодо пом'якшення проблем, пов'язаних з інтеграцією NB-IoT у системи 5G, включають використання SDN і NFV, як обговорювалося в розділі X.

### РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗГОРТАННЯ NB-ІОТ ДЛЯ РОЗУМНИХ МЕРЕЖ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ

Представлено оцінку придатності та оптимізацію продуктивності вузькосмугової стільникової технології Інтернету речей (NB-IoT) для використання в розумних мережах розподілу енергії. Основна увага приділяється надійній і своєчасній доставці повідомлень про відновлення та управління збоями (ORM) у разі локального або регіонального збою в електропостачанні. Як стільниковий NB-IoT, так і мережі розподілу енергії моделюються в симуляторі системного рівня, який використовується для проведення обширного аналізу чутливості продуктивності послуги ORM відносно різних конфігурацій радіомережі в різних середовищах.

Зокрема, пропонуються та аналізуються різні планувальники пакетів, що стосуються пріоритезації пристроїв і розподілу піднесучих як основних механізмів оптимізації продуктивності служби. Крім того, ми розглядаємо всі три можливі спектральні режими розгортання NB-IoT: внутрішньосмугове, охоронне смугове та автономне розгортання. Результати показують, що із запропонованою майже оптимальною конфігурацією радіомережі надійність доставки повідомлень ORM наближається до 100% для більшості сценаріїв відключення електроенергії, тоді як досліджувана 95% затримки передачі для повідомлень ORM знаходиться в межах допустимого 20 с.

Це дослідження має на меті забезпечити широку оцінку продуктивності технології NB-IoT у контексті сценарію використання ORM у розумних мережах і рекомендувати конфігурації радіомереж, які можуть забезпечити майже оптимальну продуктивність.

Оцінка продуктивності виконується за допомогою симулятора системного рівня на основі MATLAB. Симулятор містить реалістичні моделі для інтелектуальної мережі і стільникових мереж NB-IoT. За допомогою відповідних налаштувань симулятора виконується порівняння продуктивності для кількох реалістичних мережевих сценаріїв, яке ґрунтується на зміні ступеня відключень

електроенергії (з точки зору кількості інтелектуальних лічильників, на які впливає) у мережі розподілу енергії. Слід зауважити, що в ORM навантаження на мережу пропорційне кількості інтелектуальних лічильників, які постраждали від відключення електроенергії. Для кожного мережевого сценарію виконується кілька ітерацій моделювання, щоб врахувати статистичні варіації та відповідним чином отримати ключові показники продуктивності (KPI). Ключові показники ефективності були обрані на основі наявних посилань [5, 6] щодо вимог до продуктивності додатків інтелектуальної мережі.

### 3.1. Розумна мережа розподілу енергії

У розподільчому сегменті інтелектуальних енергетичних мереж існують різні відповідні випадки використання, включаючи (на вимогу або періодичне) дистанційне зчитування лічильників, ціноутворення в реальному часі (RTP), роботу перемикача послуг, ORM та оновлення мікропрограми [5, 6]. Вони потребують зв'язку з великою кількістю вимірювальних пристроїв у потенційно складних місцях, напр. вимагають глибокого покриття в приміщенні. Крім того, оскільки вимоги до затримки таких послуг становлять секунди, хвилини або навіть години, стільникова технологія, така як NB-IoT, здається особливо придатною для обробки цих послуг. Табл. 3.1. надає невичерпний перелік ключових випадків використання в мережі розподілу енергії з відповідними аспектами трафіку та вимогами до продуктивності щодо затримки та надійності [5].

Таблиця 3.1 - Варіанти використання: аспекти трафіку та вимоги

Випадок використання	Аспекти трафіку (UL = Uplink/DL = Downlink)	Вимоги
Зняття показань лічильника (за графіком)	4–6 повідомлень/ квартирний метр/день; 1600–2400 байт (UL)	$\leq 4$ години, $\geq 98\%$
	12–24 повідомлення/промисловий лічильник/день; 200–1600 байт (DL)	$\leq 2$ години, $\geq 98\%$
RTP	60/1000 метрів: 1 повідомлення/день	$\leq 5$ с, $\geq 99\%$

	100 байт (DL) + 25 байт (UL)	
Робота сервісного перемикача	1–50/1000 метрів: 1 повідомлення/день 25 байт (DL) + 25 байт (UL)	$\leq 1-2$ хв, $\geq 98\%$
ORM	1 повідомлення/метр/подія 25 байт (UL)	$\leq 20$ с, $\geq 30\%$
Оновлення прошивки	2×/метр/рік 400–2000 кБ (DL)	$\leq 4$ години, $\geq 98\%$

Враховуючи відносно суворі вимоги до затримки в поєднанні з великою кількістю залучених лічильників, ми вибираємо ORM як найбільш вимогливий варіант використання для представленої оптимізації продуктивності розгортання NB-IoT для розумних мереж розподілу енергії, припускаючи заплановані зчитування лічильників як фоновий трафік. У випадку використання ORM інтелектуальні лічильники визначають будь-яке відключення електроенергії та мають негайно повідомити про це оператора комунального підприємства. Потім оператор комунального підприємства збирає всі ці звіти та виконує виявлення, локалізацію та подальше відновлення збою електроенергії. З метою аналізу продуктивності на основі моделювання ми моделюємо таке звітування на основі ORM наступним чином: після події збою кожен лічильник, на який впливає, ініціює свій звіт після бета-розподіленого [19] періоду часу з параметрами  $\alpha = 3$  і  $\beta = 4$ , у діапазоні [0,10] секунд [20]. Окрім характеристик трафіку для конкретних варіантів використання, як показано в табл. 3.1, компонування та щільність вузлів інтелектуальної мережі розподілу енергії є додатковими аспектами, які впливають на ефективність варіантів використання. Мережа розподілу енергії складається з трьох різних типів компонентів, як також показано на рис. 3.1 [21].

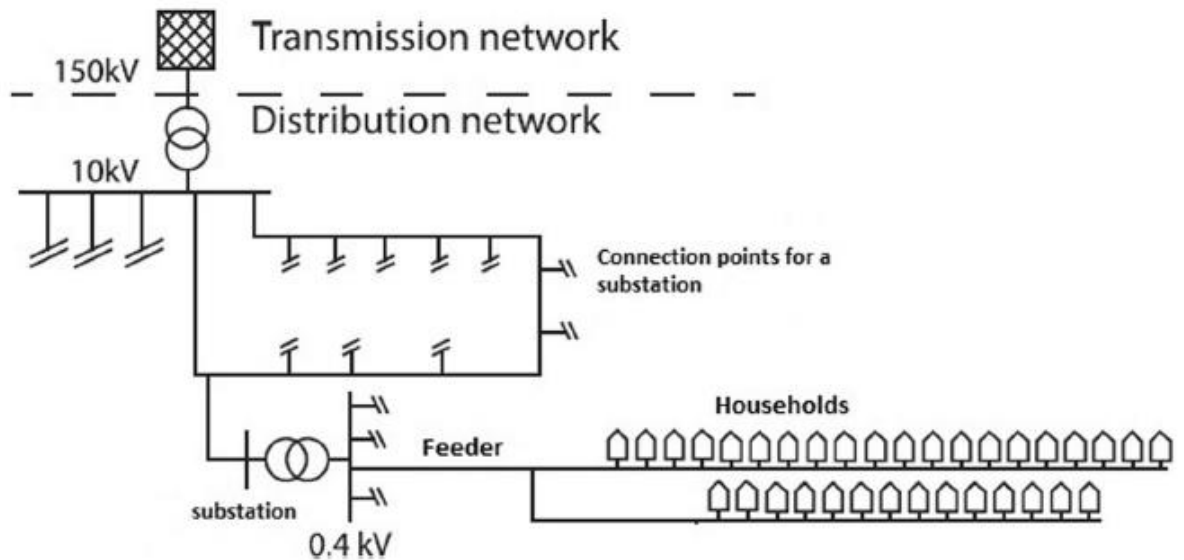


Рисунок 3.1 - Топологія мережі розподілу енергії [21]

Мережа, як правило, складається з кільця підстанцій (перетворюють середню на низьку напругу), звідки розподільні фідери починаються в радіальній топології до кількох домогосподарств, у кожному з яких встановлено розумний лічильник. Середні налаштування параметрів мережі розподілу енергії в Нідерландах наведені в табл.3.2 [21] для сільської (RU), приміської (SU), міської (U) і густонаселеної (DU) середовищ. Зауважте, що «НН» означає «домогосподарство».

Таблиця 3.2 - Середні налаштування параметрів мережі розподілу енергії

Навколишнє середовище	Щільність НН	#ННs/ підстанція	Довжина фідера
RU	50 ННs/km <sup>2</sup>	24	0,80 км
SU	350 ННs/km <sup>2</sup>	165	0,60 км
U	1500 ННs/km <sup>2</sup>	480	0,40 км
DU	2272 ННs/km <sup>2</sup>	693	0,35 км

Крім того, зауважте, що щільність домогосподарства на км<sup>2</sup> є явно найвищою в густонаселеному міському середовищі, як інтуїтивно очікується, і так само є щільність домогосподарства на підстанцію, незважаючи на те, що в густонаселеному міському середовищі зазвичай також більше підстанцій на одиницю площі, порівняно з сільське, приміське та міське середовище.

### 3.2. Ключові аспекти NB-IoT та визначених схем планування

У даному підрозділі виконано огляд ключових аспектів NB-IoT як стандартизованої технології 3GPP, розглянемо завдання планування. Слід зауважити, що схеми планування, як правило, ще не стандартизовані, але зазвичай впроваджуються постачальниками обладнання та налаштовуються операторами мереж. Для більш детального розгляду технології NB-IoT, її моделювання та визначених схем планування наведено в роботах [18, 24].

**Технологія NB-IoT.** Як згадувалось раніше, 3GPP стандартизував технологію NB-IoT для підтримки певного класу додатків IoT, що характеризуються скромною швидкістю передачі даних, але вимогами до глибокого покриття [1]. З огляду на ці вимоги, технологія працює з вузькою смугою пропускання лише 180 кГц як у висхідній, так і в низхідній лінії зв'язку, що включає піднесучі з інтервалом 3,75 (лише висхідна лінія зв'язку) або 15 кГц (висхідна/низхідна лінія зв'язку). Якщо налаштовано на інтервал піднесучих 3,75 кГц, обов'язковими є «однотональні» (1 піднесуча) передачі, тоді як інтервал піднесучих 15 кГц дозволяє як однотональні, так і багатотональні (3, 6 або 12 піднесучих) передачі. У висхідній лінії зв'язку NB-IoT опція для зменшення інтервалу піднесучої (тобто 3,75 кГц) стандартизована для підтримки великої одночасної кількості пристроїв низької складності та, зокрема, для покращення покриття за рахунок збільшення спектральної щільності потужності та, як наслідок, досяжного сигналу до відношення перешкод і шуму (SINR) при передачах по висхідній лінії зв'язку. Відзначається, що це відбувається за рахунок зниження бітрейтів і, отже, вищих затримок передачі, що вважається розумним компромісом для багатьох додатків IoT, стійких до затримок. Подібні аргументи терпимості до затримки та низької складності підтверджують обмеження модуляції лише B/QPSK.

Технологія NB-IoT, що працює в дуплексному режимі з половинним частотним поділом, може бути розгорнута в даній комірці з кількома парами

несучих, щоб забезпечити достатню пропускну здатність обробки трафіку залежно від кількості пристроїв у зоні обслуговування комірки та ступеня їх передачі. Однак зазначається, що індивідуальне обладнання користувача (UE) може в будь-який момент часу використовувати лише одну пару несучих. Одна або кілька носіїв NB IoT розгортаються в одному з трьох різних режимів [22], як показано на рис. 3.2.

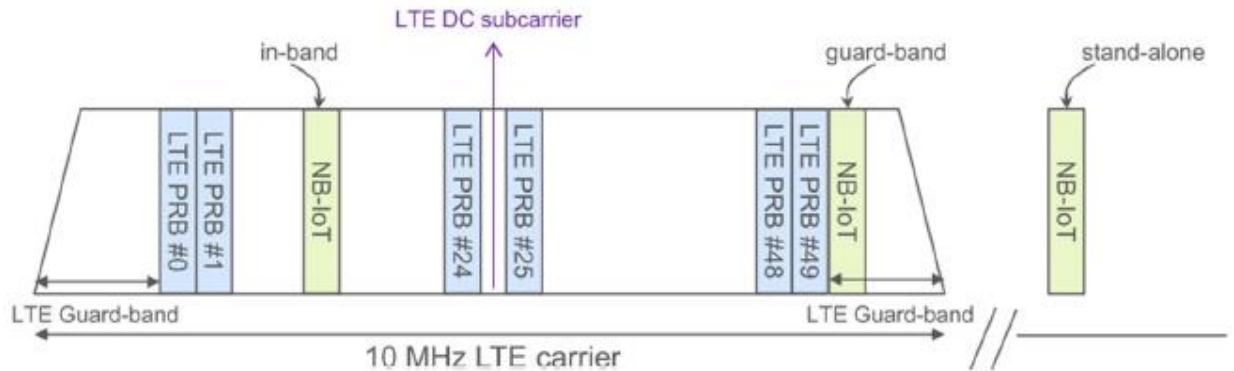


Рис. 3.2 - Варіанти розгортання оператора для NB-IoT

- Внутрішньосмуговий режим — у цьому режимі розгортається носій NB-IoT, який займає блок фізичних ресурсів (PRB) у носії LTE. Ймовірно, це найпростіший і найбільш економічно ефективний режим розгортання, оскільки він дозволяє повторно використовувати існуюче обладнання та антени базової станції LTE. Ключовим недоліком є те, що деякі частотно-часові ресурси низхідної лінії зв'язку зайняті опорними сигналами LTE і, можливо, деякими каналами керування, і, отже, недоступні для передач NB-IoT.

- Режим захисної смуги — у цьому режимі носій NB-IoT розгортається в межах захисного діапазону оператора LTE. Оскільки це долає ключовий вищезгаданий недолік внутрішньосмугового режиму, можна досягти кращої продуктивності низхідної лінії зв'язку. Одним із потенційних недоліків режиму захисної смуги з точки зору передач NB-IoT є можливе обмеження потужності низхідної лінії зв'язку, накладене регулятором, враховуючи, що захисна смуга відносно близька до смуги пропускання, ліцензованої іншим операторам або іншим системам. Це обмеження потужності може бути накладено для обмеження впливу



перешкод на «звичайні» LTE-передачі суміжного спектру, що, звичайно, безпосередньо пов'язано з самою метою наявності такої захисної смуги.

- Автономний режим — у цьому режимі носій NB-IoT розгортається незалежно від будь-якого оператора LTE, напр. у оновленому спектрі глобальної системи мобільного зв'язку (GSM). Що стосується режиму захисної смуги, то ключовою перевагою є повна доступність частотно-часового ресурсу. Ключовим недоліком є те, що цей режим, ймовірно, вимагає розгортання спеціального апаратного забезпечення, а також зазначається, що, наскільки нам відомо, регуляторні органи в усьому світі не призначили жодного спеціального спектру NB-IoT.

Оператори мобільних мереж зазвичай прагнуть використовувати технологію NB-IoT у внутрішньосмуговому режимі з причин низької вартості та складності розгортання [23]. Тому в цій статті ми також зосередимо більшу частину нашого аналізу на внутрішньосмуговому режимі, представивши обмежені результати щодо двох інших режимів розгортання.

Щоб прискорити розробку технологій і розгортання, кілька функцій радіоінтерфейсу LTE повторно використовуються в NB-IoT, включаючи загальну структуру сітки радіоресурсів і схеми множинного доступу. На додаток до цього було стандартизовано ряд оптимізацій, наприклад, згаданий вище варіант зменшеного інтервалу піднесучих висхідної лінії зв'язку та використання повторів для покращення покриття для передачі повідомлень сигналізації та даних. Загалом ці вдосконалення зроблено для підтримки вимог, орієнтованих на додаток/пристрій, пов'язаних, наприклад, з покриття, енергоефективність і складність впровадження [24].

Для необізнаного читача наступні кілька абзаців представляють короткий опис оцінюваної технології NB-IoT, чії специфікації фактично розкидані по ряду документів 3GPP [1] і тому є досить недоступними.

Будь ласка, зверніться до [18] і [24] для більш докладних спеціальних описів технології NB-IoT.

Рис.3.3. ілюструє операції та моделювання процедур довільного доступу та передачі даних у висхідній лінії зв'язку в технології NB-IoT відповідно до розглянутого випадку використання ORM. Розглянемо спочатку «фазу довільного доступу». Після генерації повідомлення ORM UE в інтелектуальному лічильнику (передбачається, що він знаходиться в режимі очікування) намагається передати преамбулу, випадково вибрану з обмеженого набору, через так званий вузькосмуговий фізичний канал довільного доступу (NPRACH).

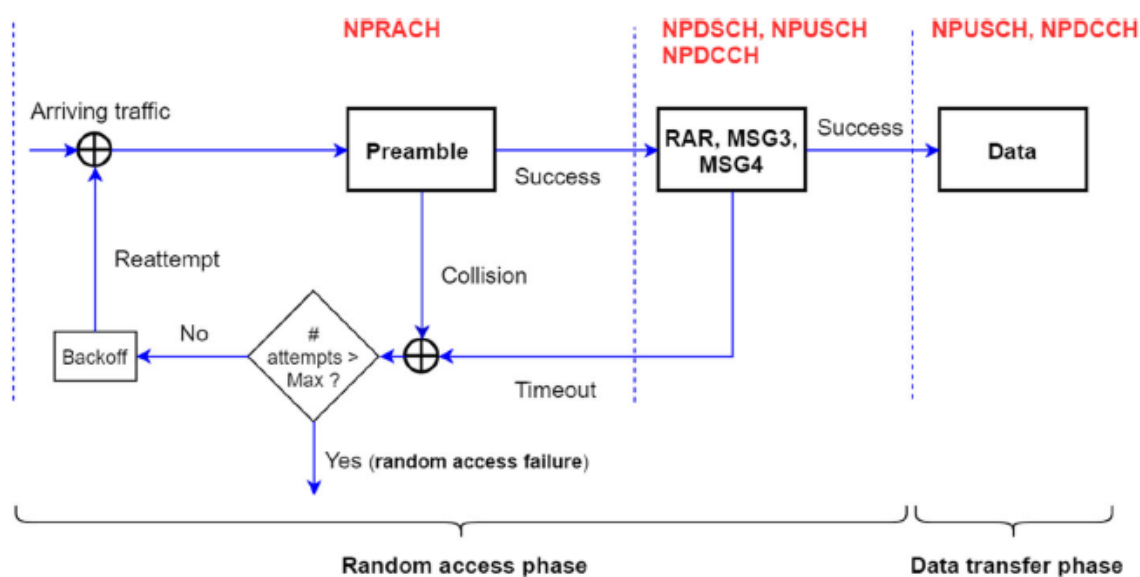


Рисунок 3.3 - Процедури довільного доступу та передачі по висхідній лінії зв'язку в NB-IoT

Кількість доступних преамбул визначається спектральною шириною ресурсів NPRACH, яка становить 12, 24, 36 або 48 піднесучих, забезпечуючи відповідну кількість доступних преамбул. Набір преамбул розділено на різні так звані «рівні охоплення» (CLs). Кожне UE визначає свій CL на основі досвідчених втрат зв'язку, які, у свою чергу, оцінюються на основі вимірювань отриманої потужності опорного сигналу (RSRP) і відповідно до попередньо визначеного та широкомовного відображення втрат зв'язку з CL. Пропускна здатність NPRACH у часовій області встановлюється періодом  $T_{NPRACH}$  NPRACH, який налаштований для визначення специфічної для CL періодичності можливостей довільного

доступу (RAO), де одна така можливість існує на сконфігурований період, наприклад, 40, 80, 160, максимум до 2560 мс. Після передачі преамбула надсилається кілька разів із певною кількістю застосованих повторень CL. Якщо одна і та ж преамбула одночасно використовується декількома пристроями, передавання преамбули може збігатися, залежно від, напр. відносні сили сигналу. Крім того, чим частіше (тобто нижчий TNPRACH) RAO в CL, тим нижчою є ймовірність зіткнення для даного навантаження трафіку.

Якщо преамбула успішно отримана на базовій станції, вона надсилає повідомлення відповіді з довільним доступом (RAR) через вузькосмуговий фізичний спільний канал низхідної лінії зв'язку (NPDSCH), разом із сигнальною індикацією передачі цього повідомлення на вузькосмуговому фізичному виділеному каналі керування (NPDCCH). Подібно до NPRACH, ресурс NPDCCH конфігурується періодом NPDCCH TNPDCCH і максимальною кількістю повторень  $R_{max}$ . Слід зазначити, що вищий параметр  $R_{max}$  покращує покриття за рахунок споживання більшої кількості ресурсів NPDCCH на UE з ризиком перевантаження та, як наслідок, блокування інших UE. Крім того, існує настроюваний параметр зсуву  $\alpha_{offset}$ , який визначає відносний час початку NPDCCH для різних CL [25]. Щоб обмежити кількість сценаріїв, у нашому дослідженні ми консервативно фіксуємо  $\alpha_{offset}$  до 0.

Повідомлення RAR включає в себе дозвіл висхідної лінії зв'язку для UE для надсилання MSG3 на вузькосмуговий фізичний спільний канал висхідної лінії зв'язку (NPUSCH), який ділиться своїми ресурсами UL з NPRACH. MSG3 містить індикацію обсягу даних, який UE хоче передати. Оскільки повідомлення RAR і, отже, надання ресурсу висхідної лінії зв'язку для передачі MSG3 передаються у відповідь на передачу преамбули, повідомлення MSG3 можуть фактично також конфліктувати у випадку, якщо кілька UE одночасно використовували ту саму преамбулу і, отже, вважають, що переданий RAR призначений для них. Якщо передача MSG3 є успішною, за нею слідує подальше квиткування для встановлення з'єднання керування радіоресурсами (RRC), що включає передачу MSG4 по низхідній лінії зв'язку та відповідне підтвердження (ACK/NACK) від сторони UE,

що сигналізує про ресурс висхідної лінії зв'язку. надати UE, який згодом використовується для фактичної передачі даних висхідної лінії зв'язку («фаза передачі даних»). Фактично це передача площини керування як частина налаштування з'єднання RRC [24]. Слід зазначити, що будь-який збій протягом усієї цієї процедури, включаючи збій виявлення преамбули та можливий тайм-аут різних сигнальних повідомлень (налаштованих розмірами вікон RAR/MSG4), призведе до повторної спроби пристрою з самого початку, тобто з новою передачею преамбули після випадково вибраного часу відстрочки, яка рівномірно відбирається в межах налаштованого інтервалу відстрочки. У разі постійних збоїв навіть після налаштованої максимально дозволеної кількості спроб довільного доступу (RA) процес довільного доступу завершується збою.

**Планування.** Планування відіграє важливу роль у загальному процесі передачі даних і необхідне для передачі всіх вищезазначених повідомлень, тобто повідомлень RAR і MSG4 у низхідній лінії зв'язку, а також повідомлень MSG3, ACK/NACK і фактичної передачі даних у висхідній лінії зв'язку. Застосований алгоритм планування не стандартизований, але залишається відкритим для реалізації постачальником і конфігурацією оператора.

У цій статті ми представляємо та оцінюємо планувальники, які спрямовані на максимізацію продуктивності надійності передачі повідомлень ORM, виконуючи два ключових завдання. По-перше, схема визначення пріоритетів визначає порядок пріоритетів, у якому обслуговуються UE, що стоять у черзі. Ми розглядаємо наступні три схеми пріоритезації, які характеризуються чітко визначеними показниками пріоритетності:

- Спочатку найраніша дата виконання (EDDF) — характеризується показником пріоритетності  $\tau_{\text{wait}}/\tau_{\text{due date}}$ , де  $\tau_{\text{wait}}$  і  $\tau_{\text{due date}}$  позначають понесений час очікування та час, що залишився до дати виконання, відповідно. Термін виконання залежить від характеру запланованого повідомлення. Наприклад, для фактичної передачі даних дата виконання негайно впливає з вимоги до конкретної затримки використання. Ця схема надає пріоритет UE, чиє повідомлення вже довго чекає та/або чия дата надходження відносно близька.

- Спочатку найкоротший час обробки (SPTF) — характеризується метрикою пріоритетності  $1/\tau_{\text{transmission}}$ , де  $\tau_{\text{transmission}}$  означає очікуваний час передачі [18]. Ця схема ігнорує дати виконання, але дотримується загального принципу управління часом, тобто намагається якомога швидше задовольнити якомога більше UE.

- Найраніша дата виконання – спочатку найкоротший час обробки (EDDF-SPTF) – характеризується показником пріоритетності  $\tau_{\text{wait}}/(\tau_{\text{due date}} \times \tau_{\text{transmission}})$  з  $\tau_{\text{wait}}$ ,  $\tau_{\text{due date}}$  та  $\tau_{\text{transmission}}$ , як визначено вище. Ця схема намагається знайти оптимальний компроміс між основними схемами EDDF і SPTF шляхом інтеграції їхніх відповідних переваг: компонент EDDF надає пріоритет UE, повідомлення яких має низький бюджет затримки, що залишився, тоді як компонент SPTF надає пріоритет UE, повідомлення яких має відносно короткий очікуваний час передачі.

Хоча одиниці орієнтованих на час змінних  $\tau_{\text{wait}}$ ,  $\tau_{\text{due date}}$  і  $\tau_{\text{transmission}}$  насправді не мають значення, оскільки запропоновані вище показники пріоритезації використовуються лише для цілей упорядкування, ми зауважимо, що в моделюванні ці змінні однаково виражаються в одиницях секунд.

По-друге, схема розподілу піднесучих вирішує, скільки піднесучих висхідної лінії зв'язку виділено кожному з UE. Ми розглядаємо три варіанти:

- Розподіл найменшої деталізації (LGA) — ця схема має на меті максимізувати швидкість передачі даних (і, отже, мінімізувати час передачі) запланованого UE шляхом призначення налаштованої максимально можливої кількості (1, 3, 6 або 12) піднесучих 15 кГц. Недоліком цього варіанту є те, що він обмежує кількість UE, які можуть одночасно використовувати ресурси, що може призвести до тривалого часу очікування та, отже, можливого порушення бюджетів затримки.

- Мінімально-максимальний розподіл (MMA) — ця схема націлена на максимально ефективне використання ресурсів максимізацію бітової швидкості шляхом призначення мінімальної кількості піднесучих 15 кГц, необхідних для забезпечення запланованого UE з максимальною досяжною бітовою швидкістю.

- Розподіл максимальної деталізації (MGA) — ця схема максимізує кількість одночасно запланованих UE шляхом призначення однієї піднесучої 3,75 кГц кожному UE. Недоліком цього варіанту є субоптимальна швидкість передачі даних, призначена (зокрема) UE з високим SINR і у випадку, якщо недостатньо UE для використання всіх ресурсів. Враховуючи різні схеми, описані вище, в принципі можна розробити  $3 \times 3 = 9$  планувальників-кандидатів, тобто комбінації пріоритезації та схеми розподілу піднесучої. Щоб обмежити наше числове дослідження найбільш розумними кандидатами, ми попередньо вибрали п'ять таких комбінацій, а саме. EDDF/MGA, SPTF/MGA, EDDFNair SPTF/MGA, EDDF-SPTF/MMA та EDDF-SPTF/LGA.

Мотивація вибору цих п'яти кандидатів-планувальників полягає в наступному. Схеми EDDF і SPTF ігнорують можливий вплив на порушення бюджету затримки через різний час передачі UE та час, що залишився до дати виконання, відповідно. Очікується, що вплив цього потенційного внутрішнього недоліку буде найменш значним, якщо схему пріоритезації поєднати з більш детальним розподілом ресурсів, тобто схемою MGA.

Як альтернатива, схеми розподілу піднесучих LGA і MMA найбільш прийнятно поєднуються зі схемою визначення пріоритетів EDDFSPTF, оскільки вона спрямована на усунення недоліків обох схем EDDF і SPTF. В якості остаточного вибору також розглядається комбінація EDDF-SPTF і MGA, оскільки час передачі потенційно все ще може впливати на продуктивність у схемі MGA через низьку швидкість передачі даних UE.

### **3.3. Мережеві сценарії на основі моделювання та застосуванням розумних мереж розподілу енергії**

**Моделі мереж.** У цьому розділі описано мережеві сценарії, розглянуті в дослідженні оцінки на основі моделювання, враховуючи як розумну мережу розподілу енергії, так і стільникову мережу NB-IoT.

Ми моделюємо інтелектуальну мережу розподілу енергії за шестикутником, де кожен шестикутник моделює зону обслуговування певної підстанції з рівномірно розподіленими домогосподарствами.

Для припущених налаштувань для специфічних навколишніх умов для щільності домогосподарств і кількості домогосподарств на підстанцію звертаємось до табл.3.2. Радіус шестикутника моделюється ефективною довжиною фідера, яка трохи відрізняється від реальних довжин фідерів, наведених у крайньому правому стовпчику таблиці. Ці ефективні довжини фідерів вибираються таким чином, щоб кількість домогосподарств на шестикутник (модель) була такою ж, як і для площі підстанції (реальність). Це призводить до ефективної довжини фідера 0,43, 0,43, 0,35 і 0,35 км для середовищ RU, SU, U і DU відповідно.

Стільникова мережа NB-IoT складається з дев'ятнадцяти розділених на сектори сайтів, розгорнутих у шестикутній формі. Слід підкреслити, що, незважаючи на те, що як розподіл енергії, так і стільникова мережа NB-IoT моделюються в шестикутній сітці, вони, звичайно, мають незалежні розміри. Специфічна відстань між об'єктами (ISD) стільникової мережі, як правило, визначається вимогами до покриття (сільська місцевість) або орієнтованої на пропускну здатність (міське/приміське середовище). Припущені ISD базуються на тому, що мережа NB-IoT зазвичай розгортається на існуючій сітці сайту 2/3/4G. Кожен сектор обслуговується спрямованою антеною з коефіцієнтом підсилення основного пелюстка 18 дБі та 3D діаграмою спрямованості антени, взятою з [1]. UE (модем, пов'язаний з лічильником) оснащено всенаправленою антеною з коефіцієнтом посилення 0 дБі, встановленою на орієнтовній висоті 1,5 м. Припускається, що розглянута несуча частота знаходиться в діапазоні 800 МГц і планується з безперервним повторним використанням.

Табл.3.3. показує ISD та моделі розповсюдження, що розглядаються для різних середовищ [26–28]. У моделі розповсюдження затінення моделюється з припущенням між- та внутрішньосайтових кореляцій 0,5 та 1 відповідно.

Як загальне зауваження, ми визнаємо, що різні варіанти моделювання можуть певною мірою впливати на результати, але наполягаємо на тому, що поки робляться

реалістичні припущення моделювання, як ми вважаємо, що ми зробили, очікується, що ключові якісні результати будуть в основному однаковими, незалежно від детальна специфіка моделювання.

Таблиця 3.3 - Специфічна мережа та аспекти розповсюдження

Навколишнє середовище	ISD (км)	Втрати на шляху (дБ)	Затінення	Втрата проникнення	Модель каналу
RU	7,5	$94,6 + 34,1 \times \log_{10}(d^{km})$	6 dB	На основі COST231 Модель NLOS	Модель для сільської місцевості, 6 кранів, Допплер 0 Гц
SU	3,2	$103.8 + 33.6 \times \log_{10}(d^{km})$	8 dB		Типовий міський (TU), 20 кранів, Допплер 0 Гц
U	17,32	$119.8 + 37.6 \times \log_{10}(d^{km})$	10 dB		
DU	0,5				

Як пояснювалося, загальна модель складається з двох окремих і незалежно спланованих мереж, а саме. розумна мережа розподілу електроенергії, включаючи домогосподарства з інтелектуальними лічильниками, і стільникова мережа NB-IoT, яка використовується для передачі повідомлень ORM, що передаються інтелектуальними лічильниками, оснащеними режимами, у разі відключення електроенергії.

На рис. 3.4. показано обидві мережі в накладеному вигляді для всіх чотирьох розглянутих середовищ. Як показано на рисунках, кількість підстанцій, охоплених радіостільником, залежить від навколишнього середовища та зменшується в порядку сільських, приміських, міських і густонаселених міст.



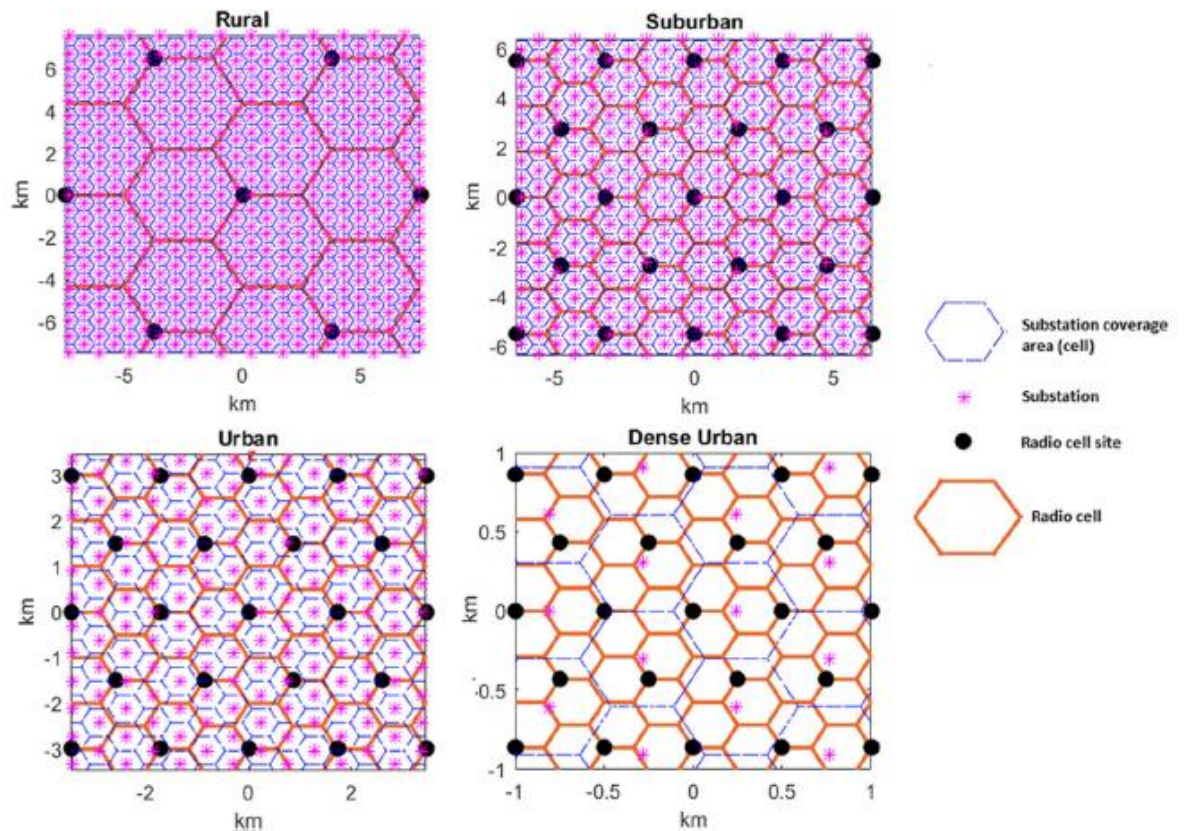


Рисунок 3.4 - Схема радіомережі та мережі розподілу енергії для різних середовищ

Це чистий ефект ISD стільникової мережі та щільності домогосподарства, які залежать від середовища, але різною мірою. Трафічне навантаження, яке відчуває радіокомірка, залежить від добутку кількості підстанцій, охоплених радіокоміркою, та кількості домогосподарств на підстанцію, де остання зменшується при переході з густонаселеного міста до сільської місцевості, як показано в таблиці 2. На рисунку також показано, що ступінь перекриття між підстанцією та радіостільником не є рівномірним для всіх радіостільників, особливо в густонаселеному та міському середовищі. Це може вплинути на навантаження на мережу в радіокомірці під час сценарію відключення електроенергії, що впливає на одну або кілька випадково вибраних підстанцій. Щоб змоделювати цю мінливість навантаження на мережу в симуляції однієї радіостійки, відносне положення обох сіток відносно одна одної вибирається випадковим чином у різних знімках симуляції. Отже, це призводить до різного перекриття між осередками радіозв'язку та осередками підстанції.

На рис.3.5. показано накладання інтелектуального розподілу енергії та стільникових мереж NB IoT для міського середовища. Зображені маркери червоного, зеленого та жовтого кольорів представляють UE (розумні лічильники в домогосподарствах), які обслуговуються трьома осередками центрального сайту, тоді як усі UE сірого кольору обслуговуються іншими осередками. Під час аналізу одна комірка явно моделюється, тоді як усі інші комірки статично налаштовані для встановлення реалістичних рівнів перешкод.

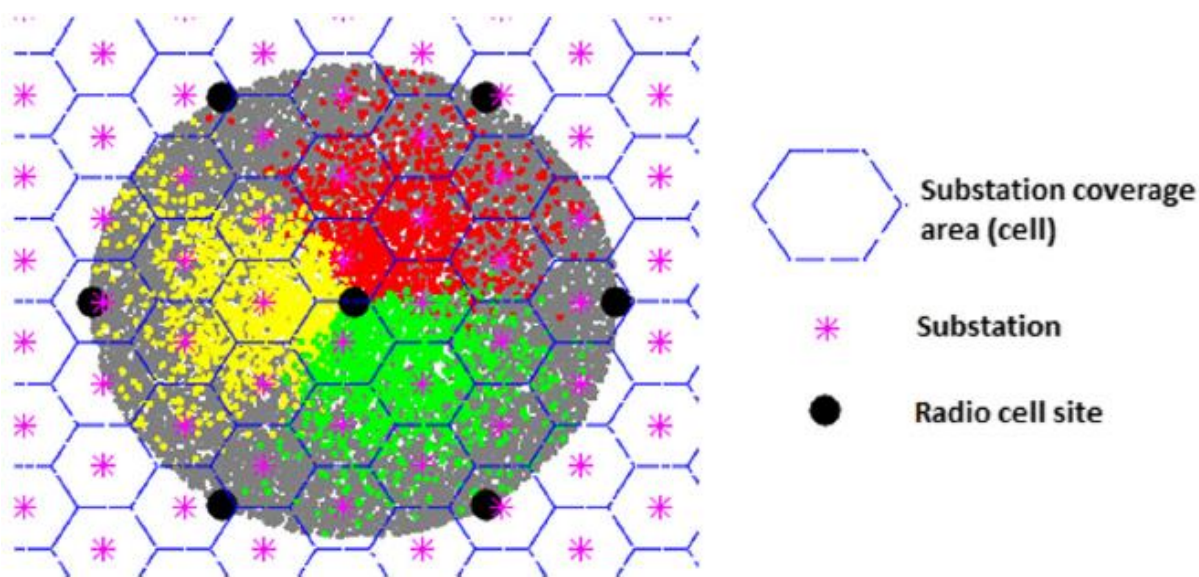


Рисунок 3.5 - Перекриття NB-IoT і мережі розподілу енергії для регіону навколо центрального майданчика, показано для міського середовища

### 3.4. Результати аналізу моделювання

У цьому розділі представлені ключові результати обширного аналізу продуктивності. Хоча обговорення зосереджено на режимі внутрішньосмугового розгортання, оскільки це найімовірніший режим, який використовується в фактичних розгортаннях, деякі результати також представлені для режимів охоронного смуги та автономного розгортання. Під час числового аналізу результати передусім показують вплив так званого «відсотка простою» на певні ключові показники ефективності (KPI). Відсоток відключення визначається як частка підстанцій у змодельованій радіостільнику, які змодельовані як такі, що перебувають у стані відключення електроенергії та, як наслідок, запускать

лічильники (~ UE) у базових домогосподарствах, щоб ініціювати передачу повідомлення ORM.

Щоб проілюструвати це більш чітко, на рис.3.6. показано для кожного середовища кількість охоплених підстанцій на радіокомірку, середню кількість інтелектуальних лічильників на підстанцію та кількість зачеплених інтелектуальних лічильників у радіокомірці, наприклад, відсоток відключень 10%, 50 % і 100 %. Смуги значень і смуги помилок вказують на середнє значення та стандартне відхилення, відповідно, отриманих значень для 100 знімків симуляції.

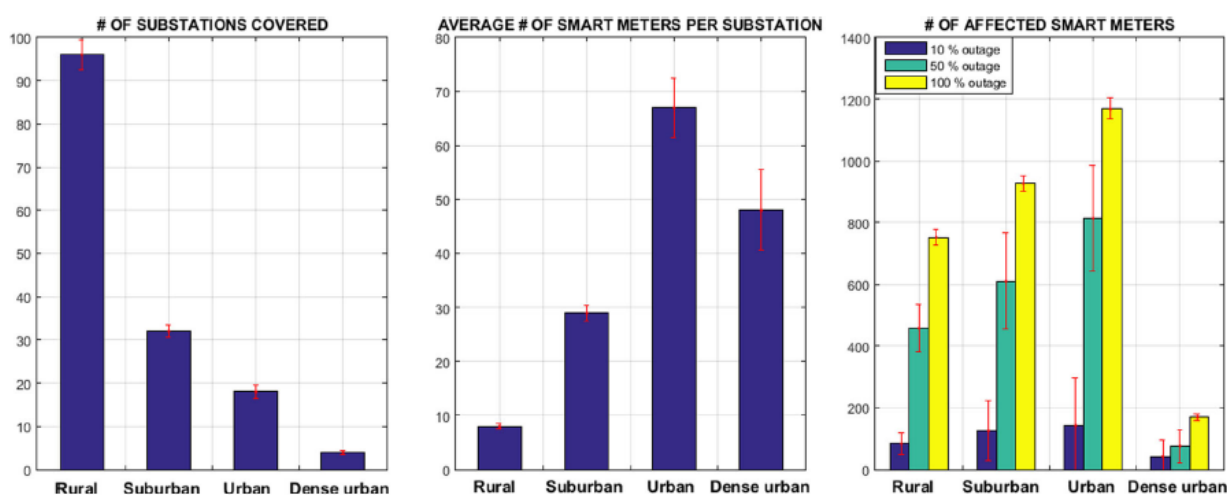


Рисунок 3.6 - Діаграми, що показують кількість охоплених підстанцій, середню кількість інтелектуальних лічильників на підстанцію та кількість зачеплених інтелектуальних лічильників для різних відсотків відключень для кожного середовища та на радіокомірку.

Слід зазначити, що ці графіки є однаковими незалежно від вибраного режиму розгортання, оскільки обслуговуючу радіокомірку для кожного відключеного UE вибирають виключно на основі умов розповсюдження (втрати зв'язку), які, у свою чергу, залежать лише від розташування UE та даного середовища. На малюнку показано, що середня кількість інтелектуальних лічильників на радіокомірку є найвищою в міському сценарії. Слід зазначити, що середня кількість інтелектуальних лічильників для кожного середовища приблизно

дорівнює кількості постраждалих підстанцій (на основі відсотка відключень), помноженій на середню кількість інтелектуальних лічильників на підстанцію. Тоді на двох лівих діаграмах можна легко перевірити, що цей продукт дійсно є найвищим для міського сценарію, що пояснює спостереження на крайній правій діаграмі.

Під час аналізу вивчається вплив зростання відсотка відключень на наступні три KPI:

- надійність, визначена як частка повідомлень ORM, які успішно передано протягом передбачуваного терміну 20 с.
- рівень успіху, визначений як частка повідомлень ORM, які успішно передано.
- 95-й перцентиль затримки передачі, визначений для успішно переданих повідомлень ORM.

Серед розглянутих ключових показників ефективності метрика надійності є, мабуть, найбільш актуальною, оскільки вона явно містить вимогу до затримки повідомлень ORM. Показник надійності має бути достатньо високим, щоб оператор комунальної мережі міг надійно визначати перебої в електропостачанні.

Табл.3.4. показує базову конфігурацію мережі. Діапазони втрат зв'язку трьох рівнів покриття встановлюються так, щоб відображати типовий розподіл UE на цих рівнях покриття [29].

Таблиця 3.4 - Конфігурація базової мережі та налаштування сценарію

Параметри		Налаштування		
# Носії		1		
Планувальник		EDDF-SPTF з MGA		
Діапазони втрат зв'язку на CL (дБ)		CL1	CL2	CL3
		[0,130]	[130,140]	[140,∞]
Конфігурація NPDCCH		Налаштування		
Максимум # повторень ( $R_{max}$ )		8		
Період ( $T_{NPDCCH}$ )		12 ms		
Конфігурація NPRACH		Налаштування		
Максимум # спроб RA		CL1		

		19	5	7
Конфігурація ресурсу	Період ( $T_{NPRACH}$ )	80 ms	160 ms	320 ms
	# Повторення преамбули	2	4	32
	# Преамбули	24	12	12
Інтервал перерви		[0,1024] ms		
Розмір вікна RAR		$10 \times T$ ms		
Розмір вікна MSG4		$54 \times T$ ms		

Щоб вивчити вплив вибраного режиму розгортання NB-ІоТ, було проведено порівняння показників надійності для внутрішньосмугового, охоронно-смугового та автономного режимів, враховуючи базову конфігурацію, з результатами, зображеними на рис.3.7.

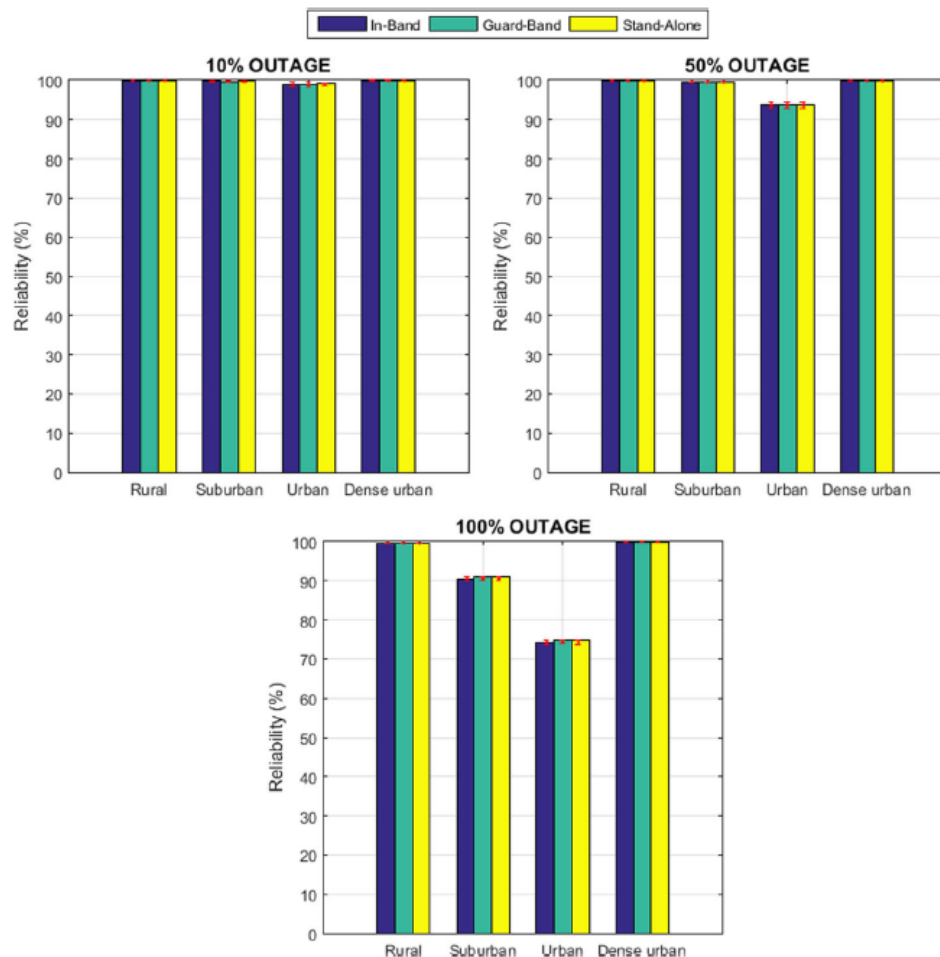


Рисунок 3.7 - Порівняння показників надійності в базовій конфігурації для різних середовищ, відсоток відключень (10%, 50% і 100%) і для трьох різних режимів розгортання NB-ІоТ

Незважаючи на те, що можна очікувати кращої пропускнуї здатності низхідної лінії зв'язку для режимів захисної смуги та автономного режиму, фактична різниця в продуктивності досить незначна через той факт, що загальний процес передачі даних включає лише дві передачі повідомлень низхідної лінії зв'язку (RAR і MSG4) з відносно малими розмірами повідомлень (< 30 байт). Показники надійності для сільських і густонаселених міських середовищ, майже 100%, стійкі до всіх відсотків відключень.

Лише для приміських і міських середовищ надійність значно погіршується для 100% відсотка відключення, при цьому найнижча надійність спостерігається для міського середовища.

Це пов'язано з тим, що при високих відсотках відключень мережеве навантаження з точки зору кількості інтелектуальних лічильників, які постраждали від відключення електроенергії, на радіокомірку є значно високим лише в міських і приміських середовищах, як показано на рис. 3.6. Якщо навантаження комірки значне, це призводить до великої кількості колізій преамбули та збоїв довільного доступу, таким чином впливаючи на продуктивність надійності.

Для наступних аналізів чутливості передбачається внутрішньосмугове розгортання, як зазначено раніше. На рис.3.8. показано результати моделювання, отримані для чотирьох розглянутих середовищ, знову припускаючи базову конфігурацію та тепер показуючи всі три визначені вище КРІ. На цьому та наступних малюнках усі криві ефективності супроводжуються вказаним 95% довірчим інтервалом навколо оцінок КРІ. Зверніть увагу, що підмножина значень надійності на рис. 8 також відображається на рис. 3.7. для внутрішньосмугового випадку. Таким чином, спостереження про те, що міське середовище має найгіршу надійність для всіх відсотків відключень, є послідовним. Цей малюнок чітко показує, що більш високе навантаження на комірку, викликане вищим відсотком збоїв, призводить до більшої кількості колізій преамбули та тайм-аутів, а також спричиняє падіння рівня успіху та надійності.

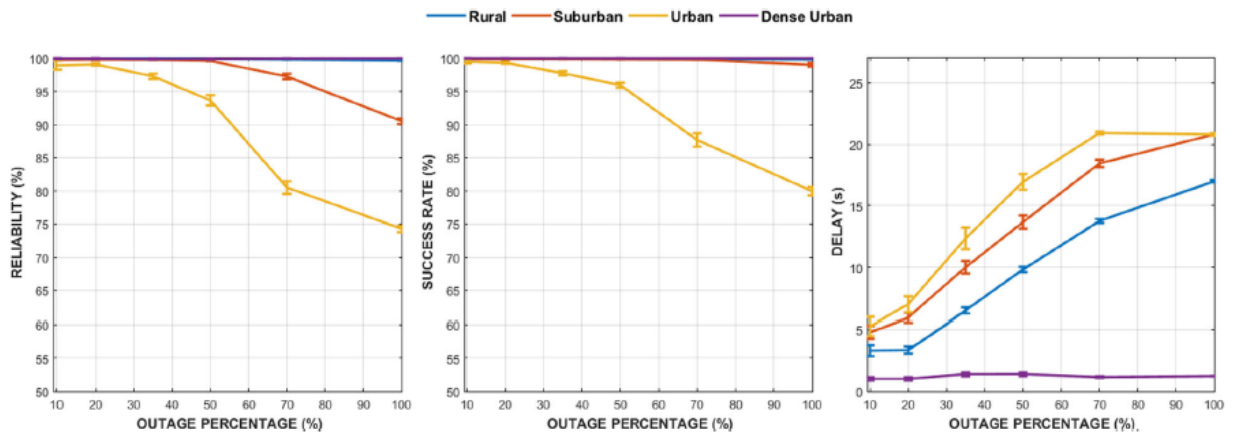


Рисунок 3.8 - Порівняння надійності, рівня успіху та 95-го перцентиля затримки передачі з відсотком відключень для базового сценарію в усіх чотирьох середовищах

Наступні аналізи чутливості зосереджуються на міському середовищі, враховуючи його відносно низьку ефективність порівняно з іншими середовищами. Мета полягає в тому, щоб вивчити вплив на продуктивність односторонніх варіацій наступних чотирьох аспектів конфігурації:

- планувальник;
- конфігурація ресурсу NPRACH;
- максимальна кількість спроб RA;
- конфігурація ресурсу NPDCCH.

Слід зазначити, що для простоти у всіх випадках, де це можливо, зміна конфігурації виконується лише для CL1, оскільки більшість UE розташовані в діапазоні CL1.

На рис.3.9. показано порівняння кандидатських конфігурацій планувальника. Зауважте, що кожна конфігурація є комбінацією пріоритетзації та схеми розподілу піднесучої. Ми бачимо, що комбінація пріоритетності EDDF-SPTF із розподілом піднесучої MGA забезпечує найвищу надійність для майже всіх відсотків відключень. Можна відзначити, що для тієї самої схеми пріоритетзації (EDDF-SPTF) показники надійності погіршуються, оскільки деталізація розподілу піднесучої UL зменшується (від MGA до LGA).

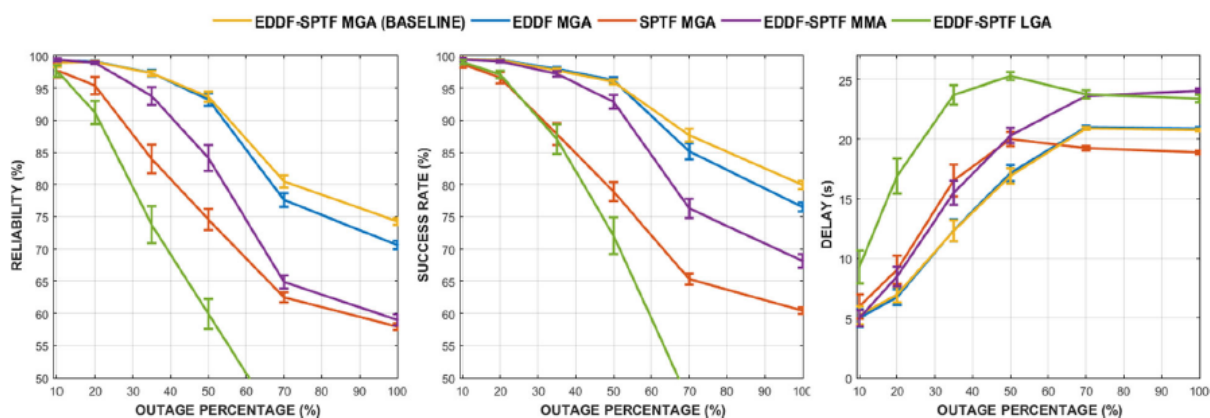


Рисунок 3.9 - Аналіз чутливості відносно конфігурації планувальника

В основному це пов'язано з невеликими розмірами пакетів, які використовуються у випадку використання ORM, що обмежує вигреш у фактичній пропускній здатності даних із зменшенням деталізації розподілу піднесучої. З іншого боку, зменшення деталізації суттєво впливає на час очікування UE, що впливає на рівень успіху та 95-й перцентиль затримки передачі.

Рисунок 3.10. порівнює різні конфігурації NPRACH, які відрізняються кількістю RAO за секунду, тобто кількістю преамбул за період (див. Табл.3.4).

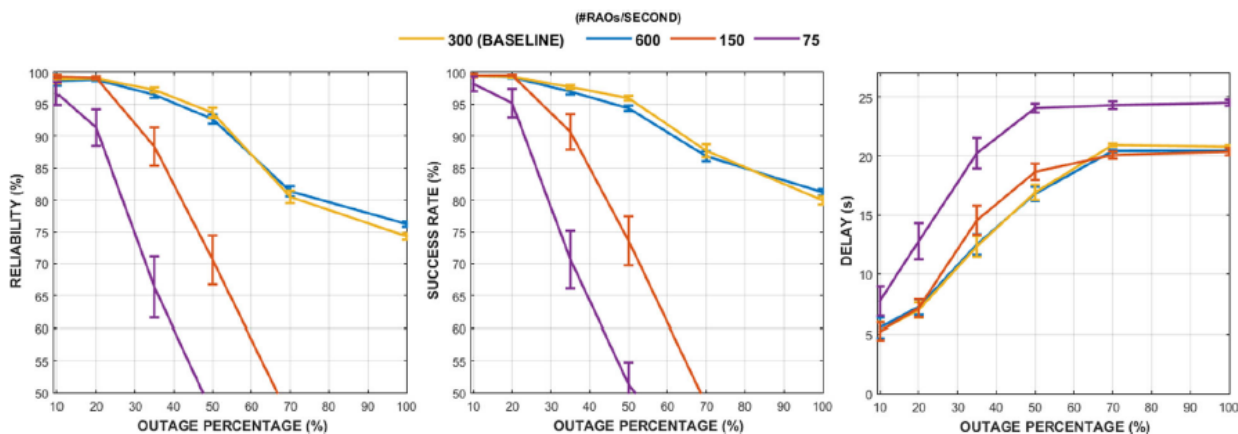


Рисунок 3.10 - Аналіз чутливості відносно конфігурації NPRACH, позначений відповідною кількістю RAO в секунду

У цьому аналізі змінюється лише тривалість періоду NPRACH TNPRACH, тобто інтервал часу між послідовними RAO для UE. Ключем до оптимізації конфігурації NPRACH є збалансування виникнення колізій преамбули та тайм-



аутів. Це пояснюється тим, що NPRACH і NPUSCH спільно використовують ті самі ресурси UL. Отже, їх відповідний склад впливає на ймовірність колізії преамбули та час очікування UE відповідно. Результати показують, що базова конфігурація та конфігурація з 600 RAO/c (синій графік) мають однакову та майже оптимальну продуктивність. Крім того, їх відповідна оптимальність залишається стійкою до варіацій навантаження (відсоток простоїв). Продуктивність, досягнута іншими двома конфігураціями, є значно нижчою, оскільки ресурси NPRACH настільки обмежені, що це викликає забагато колізій преамбули.

На рис.3.11. проаналізовано чутливість продуктивності щодо максимальної кількості спроб RA, що показує покращення надійності, якщо максимальну кількість спроб RA збільшити з 15 (синій графік) до 19 (базова лінія), але погіршення для вищого налаштування, напр. 23 або 27.

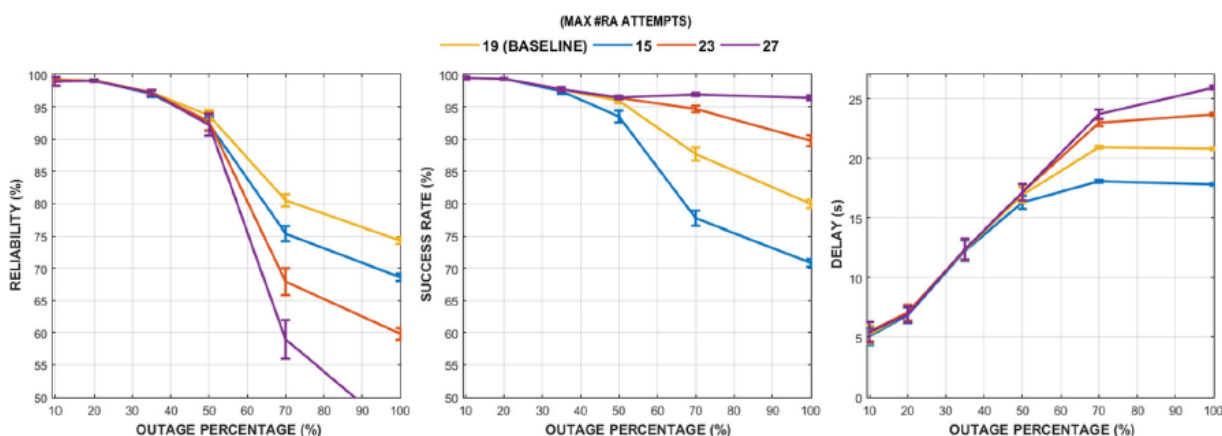


Рисунок 3.11 - Аналіз чутливості відносно максимальної кількості спроб RA

Можна інтуїтивно стверджувати, що збільшення дозволеної кількості спроб RA покращує рівень успішності за рахунок збільшення затримок передачі. Для конфігурацій із значенням 23 і 27 значна частка успішних спроб призводить до затримок передачі, що перевищують цільові 20 с, тим самим знижуючи показники надійності. Це базова конфігурація, яка дійсно забезпечує оптимальний компроміс між рівнем успіху та затримкою передачі.

Оптимізація ресурсів NPDCCH передбачає коригування розподілу ресурсів NPDCCH з точки зору співвідношення параметрів  $R_{max}$  і  $T_{NPDCCH}$  (див. табл.3.4).

Чим вищий коефіцієнт для даного CL, тим більше ресурсів доступно для планування UE цього CL. Однак це знижує доступність ресурсів і продуктивність UE в інших CL. При високих навантаженнях очікується, що час очікування до планування для UE в CL1 (де присутня більшість UE) буде більш домінуючим порівняно з UE CL2 і CL3 порівняно зі сценаріями низького навантаження. Рис. 3.12 ілюструє чутливість до продуктивності щодо конфігурації NPDCCH ( $R_{max}/T_{NPDCCH}$ ). Отримано оптимальну конфігурацію залежно від навантаження.

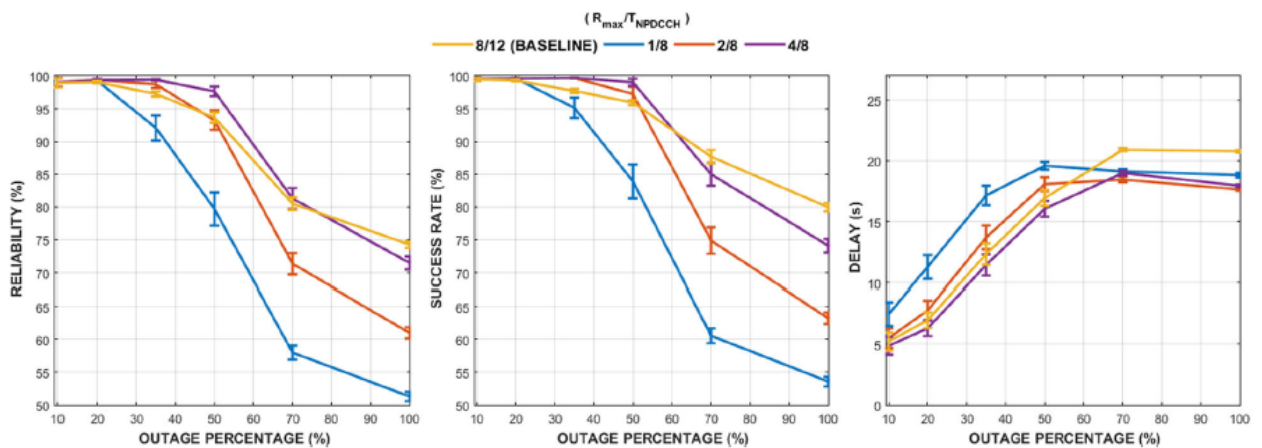


Рисунок 3.12 - Аналіз чутливості відносно конфігурації NPDCCH, позначеної відповідним значенням  $R_{max}/T_{NPDCCH}$

Базова конфігурація з максимальним співвідношенням ( $R_{max}/T_{NPDCCH} = 8/12$ ) дійсно працює краще при високих навантаженнях (де домінує навантаження CL1), тоді як конфігурація з трохи нижчим співвідношенням ( $R_{max}/T_{NPDCCH} = 4/8$ ) працює краще краще при низьких навантаженнях. Параметр конфігурації з  $R_{max}/T_{NPDCCH} = 1/8$  працює найгірше при більшості навантажень, що вказує на те, що доступні ресурси планування занадто низькі.

Аналіз чутливості, показаний на рис. 3.9, 3.10, 3.11 і 3.12 вказують на те, що кілька альтернативних конфігурацій працюють нарівні з базовою конфігурацією або краще, ніж синя крива на фіг. 10 (NPRACH) і фіолетова крива на фіг. 12

(NPDCCH). Ми можемо помітити, що блакитна крива є оптимальною для відсотків відключень понад 70%, тоді як фіолетова крива є оптимальною для відсотків відключень нижче 70%. Щоб дослідити, чи існує «надійна» конфігурація, яка є майже оптимальною для всіх навантажень, створюється кандидатська конфігурація для остаточного аналізу, представленого на рис. 13, поєднуючи наведені вище альтернативні конфігурації. Зауважте, що синя та фіолетова криві відповідають кривим еквівалентного кольору та параметрам їх конфігурації на рис. 3.10 і 3.12 відповідно.

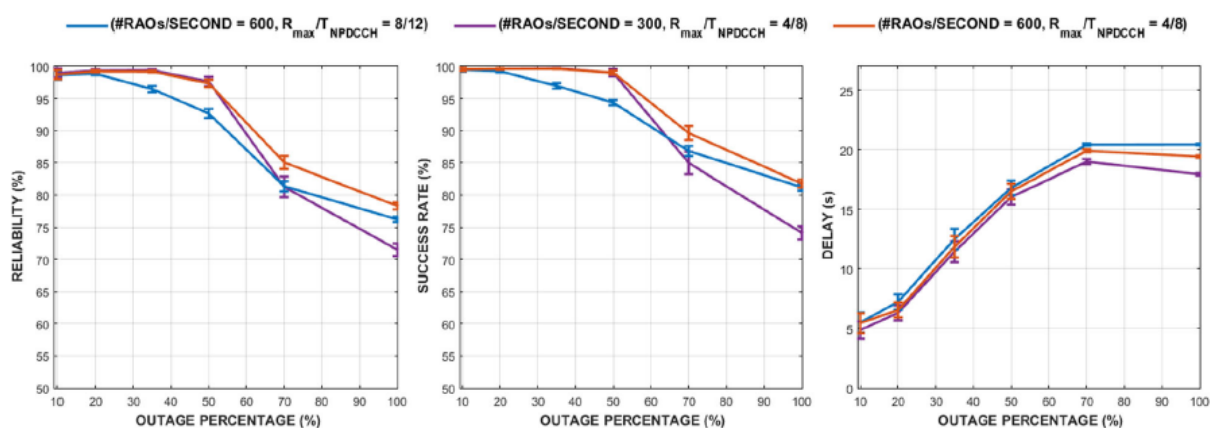


Рисунок 3.13 - Порівняння продуктивності для набору майже оптимальних конфігурацій. Синя та фіолетова криві відповідають еквівалентно забарвленим кривим та параметрам їх конфігурації на рис. 3.10 та рис. 3.12 відповідно. Червона крива відповідає «незалежній від навантаження» майже оптимальній конфігурації

Третя (червона) крива відповідає конфігурації, яка поєднує залежні від навантаження оптимальні налаштування NPRACH і NPDCCH синьої та фіолетової кривих відповідно. Як показано на рис.3.13, ця конфігурація справді працює майже оптимально для всіх навантажень, досягнута надійність становить близько 100% для більшості розглянутих відсотків відключень.

## ВИСНОВКИ

Виконуючи перше завдання, мною було проаналізовано стан та перспектив розвитку сучасних безпроводових технологій. Наведено особливості розвитку, сфери застосування, особливості організації та представлено можливі стратегії розгортання NB-IoT. У рамках прогнозування поширення технології Інтернет речей було розглянуто ринок IoT та фактори впливу на його зростання, до яких належать економіка, політичні події, екологічні фактори і технологічний прогрес. Аналіз показав, що незважаючи на зниження прогнозів зростання, IoT залишається дуже актуальною технологічною темою для подальшого розвитку систем зв'язку.

Виконуючи друге поставлене завдання, дослідження зосереджено на схемах підвищення швидкості передачі даних, енергоефективності та масштабованості, які були запропоновані протягом останніх трьох років. Внесок в роботі полягає в аналізі, синтезі, порівнянні та узагальненому узгодженні деяких основних існуючих схем для визначення проблем, з якими стикається розробка NB-IoT. Нарешті, ця робота спрямована на виявлення проблем дослідження, відкритих питань і можливостей, які можуть виникнути в результаті аналізу існуючих методів.

У третьому розділі було представлено оцінку придатності та оптимізацію продуктивності для використання стільникової технології NB-IoT для підтримки розумних мереж розподілу енергії.

Основна увага була зосереджена на надійній та своєчасній доставці повідомлень ORM у разі локального чи регіонального відключення електроенергії. Для досягнення цієї мети були розроблені різні реалістично налаштовані моделі як для мережі розподілу енергії, так і для стільникової мережі NB-IoT.

Щоб досягти оптимальної конфігурації радіомережі, було проведено обширний аналіз чутливості продуктивності (з точки зору надійності, рівня успіху та затримки) відносно широкого діапазону мережевих конфігурацій NB-IoT. Зокрема, ми розглядали планування як ключовий засіб оптимізації продуктивності сервісу.

Були запропоновані та проаналізовані деякі планувальники-кандидати, що стосуються пріоритезації пристроїв і розподілу піднесучих.

Отримані результати показують, що справді технологія NB-IoT, якщо вона належним чином налаштована, підходить для адекватної підтримки ORM та інших служб розумної мережі розподілу енергії з подібними або меншими вимогами до продуктивності.

Цей висновок узгоджується з результатами попередніх досліджень, які вказують на те, що технологія NB-IoT підходить для програм розумних мереж, які не мають жорстких вимог до затримки. Загальна продуктивність надійності виявилася подібною для трьох режимів розгортання NB-IoT, тобто внутрішнього діапазону, охоронного діапазону та автономного. Серед розглянутих сценаріїв середовищ, міське середовище виявилось найскладнішим, враховуючи його відносно низьку продуктивність через високе навантаження на мережу. Результати також показують, що серед оцінюваних планувальників пакетів об'єднання планувальника

Пріоритезація EDDF-SPTF із розподілом піднесучої MGA перевершує інші планувальники з можливістю досягнення рівнів надійності, наприклад, у діапазоні 98–100% для відсотка відключення електроенергії приблизно до 50%.

У якості подальших досліджень варто виконувати оптимізацію розгортання NB-IoT у контексті різноманітного поєднання сценаріїв використання інтелектуальної мережі, включно з тими, що знаходяться поза сегментом розподілу енергії, як описано в цьому дослідженні.

## **ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Zayas, A.D.; Merino, P. The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, France, 21–25 May 2017.
2. Imran, M.A.; Hussain, S.; Abbasi, Q.H., Narrowband Internet of Things (NB-IoT) for Industrial Automation. In *Wireless Automation as an Enabler for the Next Industrial Revolution*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2020; pp. 65–87.
3. Bao, L.; Wei, L.; Jiang, C.; Miao, W.; Guo, B.; Li, W.; Cheng, X.; Liu, R.; Zou, J. Coverage Analysis on NB-IoT and LoRa in Power Wireless Private Network. *Procedia Comput. Sci.* 2018, 131, 1032–1038.
4. Chen, J.; Hu, K.; Wang, Q.; Sun, Y.; Shi, Z.; He, S. Narrowband Internet of Things: Implementations and Applications. *IEEE Internet Things J.* 2017, 4, 2309–2314.
5. Boyes, H.; Hallaq, B.; Cunningham, J.; Watson, T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Comput. Ind.* 2018, 101, 1–12.
6. Liao, Y.; Loures, E.d.F.R.; Deschamps, F. Industrial Internet of Things: A systematic literature review and insights. *IEEE Internet Things J.* 2018, 5, 4515–4525.
7. Huang, X. Quality of service optimization in wireless transmission of industrial Internet of Things for intelligent manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, p. 1007–1016.
8. Sachan, V.K.; Imam, S.A.; Beg, M. Energy-efficient communication methods in wireless sensor networks: A critical review. *Int. J. Comput. Appl.* 2012, 39, 35–48.
9. Jamali, J.; Bahrami, B.; Heidari, A.; Allahverdizadeh, P.; Norouzi, F. *Towards the Internet of Things*; Springer International Publishing AG: Cham, Switzerland, 2020.
10. L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “SIoT: Giving a Social Structure to the Internet of Things,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 11, pp. 1193 - 1195, November 2020.
11. W. Abdelghani, C. A. Zayani, I. Amous, and F. Sedes, “Trust Management in Social Internet of Things: A Survey,” in the 15th IFIP Conference on e-Business, e-Services and e-Society (I3E2016), Swansea, UK, 13 - 15 September 2016.

12. R. Girau, S. Martis, and L. Atzori, "Neighbor discovery algorithms for friendship establishment in the social Internet of Things," IEEE 3<sup>rd</sup> World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 1 - 6, 2016.
13. E. Rastogi, N. Saxena, A. Roy, and D. R. Shin. Narrowband internet of things: A comprehensive study. *Computer Networks*, 173:1 – 40, May 2020.
14. G. Berardinelli, L. A. M. Ruiz de Temino, S. Frattasi, M. I. Rahman, and P. Mogensen. OFDMA vs. SC-FDMA: performance comparison in local area imt-a scenario. *IEEE Wireless Communications*, 15(5):64 –72, October 2018.
15. 3GPP. 3GPP TS 36.101, User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP, November 2017.
16. 3GPP. 3GPP TS 36.211, Physical channels and modulation (Release 13, v13.9.0). Technical report, 3GPP, April 2018.
17. R. Frank. Polyphase codes with good nonperiodic correlation properties. *IEEE Transactions on Information Theory*, 9(1):43 – 45, January 1963.
18. D. Chu. Polyphase codes with good periodic correlation properties. *IEEE Transactions on Information Theory*, 18(4):531 – 532, July 1972.
19. H. Kröll, M. Korb, B. Weber, S. Willi, and Q. Huang. Maximum-Likelihood Detection for Energy-Efficient Timing Acquisition in NB-IoT. In *proc. of WCNCW'17*. San Francisco, CA, March 2017.
20. Nauman, A.; Jamshed, M.A.; Ahmad, Y.; Ali, R.; Zikria, Y.B.; Kim, S.W. An intelligent deterministic D2D communication in narrow-band Internet of Things. In *Proceedings of the IEEE 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco, 24–28 June 2019; pp. 2111–2115.
21. Asadi, A.; Wang, Q.; Mancuso, V. A survey on device-to-device communication in cellular networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2014, 16, 1801–1819.20.
22. Zhang, Y.; Pan, E.; Song, L.; Saad, W.; Dawy, Z.; Han, Z. Social network aware device-to-device communication in wireless networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2014, 14, 177–190.

23. Al-Samman, A.M.; Rahman, T.A.; Hindia, M.; Daho, A.; Hanafi, E. Path loss model for outdoor parking environments at 28 GHz and 38 GHz for 5G wireless networks. *Symmetry* 2018, 10, 672.

24. Pawa, T.D.S. Analysis of Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) Protocol. BTech Thesis, Department of Computer Science and Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela-769 008, Orissa, India, 2011.

25. Althobaiti, O.S.; Dohler, M. Cybersecurity Challenges Associated With the Internet of Things in a Post-Quantum World. *IEEE Access* 2020, 8, 157356–157381.

26. da Cruz, R.M. Network Planning Model for NB-IoT. Master's Thesis, Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto, Porto, Portugal, 2019.

27. Malik, H.; Pervaiz, H.; Alam, M.M.; Le Moullec, Y.; Kuusik, A.; Imran, M.A. Radio resource management scheme in NB-IoT systems. *IEEE Access* 2018, 6, 15051–15064.

28. Singh, A.; Kumar, A.; Kumar, A.; Dwivedi, V. Radio Frequency global positioning system for real-time vehicle parking. In Proceedings of the IEEE 2016 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), Noida, India, 26–28 December 2016; pp. 479–483.

29. Rappaport, T. *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed.; Pearson Education: London, UK, 2010.

30. Piro, G.; Grieco, L.A.; Boggia, G.; Capozzi, F.; Camarda, P. Simulating LTE cellular systems: An open-source framework. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2010, 60, 498–513.

31. Azari, A.; Stefanovic', C.; Popovski, P.; Cavdar, C. On the latency-energy performance of nb-iot systems in providing wide-area iot connectivity. *IEEE Trans. Green Commun. Netw.* 2019, 4, 57–68.

32. Azari, A.; Miao, G.; Stefanovic, C.; Popovski, P. Latency-energy tradeoff based on channel scheduling and repetitions in NB-IoT systems. In Proceedings of the 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December 2018; pp. 1–7.



