

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням
технології 4G»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-22м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

Бахарев О.О.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ
Михалевський Д.В.

« 11 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Осадчук В.С.

« 12 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.
д.т.н., проф.

« 12 » 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації

(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“19” 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Бахареву Олексію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G

керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, докт. техн. наук, професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” 09 2023 року № 247

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2023 року

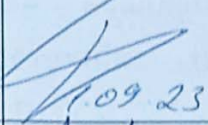

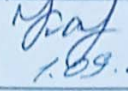
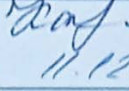


3. Вихідні дані до роботи ширина смуги пропускання – 10 МГц; потужність передавача корисного сигналу -43 дБп; довжина радіотракту передавання – 450 м; коефіцієнт послаблення корисного сигналу - -80 дБ; рівень спектральної густини потужності АБГШ приймача, 10^{-10} Вт; пропускна здатність каналу передавання – 250 кБіт/с; доступність мережі - 99.999%; смуга пропускання LTE - 10 МГц; чутливість до затримок – 1 мс; максимальна густина NB-ІоТ пристроїв (UE) - 800 /км²; потужність прийомо-передавача NB-ІоТ - 43/35 дБп; ширина смуги пропускання NB-ІоТ - 180 кГц; коефіцієнт підсилення базової станції - 18 дБі .

4. Зміст текстової частини: методи розрахунку ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг інтернету речей; модель оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг інтернету речей; метод дослідження ефективності функціонування мереж 4G; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
алгоритм розподілення частотно-часового ресурсу в LTE і NB-ІоТ; структурна модель оцінювання ефективності функціонування мережі з технологією NB-ІоТ; схема оцінювання внутрішньосистемних завад на границі стільника; модель оцінки ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G при наданні

послуг NB-IoT; архітектура NB-IoT мережі для послуг ЖКГ; діаграма оцінювання ефективності мережі.

6. Консультанти розділів роботи

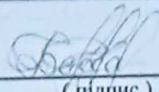
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	 1.09.23	 11.12.23
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 1.09.23	 11.12.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 1.09.23	 11.12.23

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

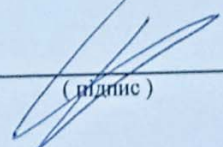
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	08.09.2023р.	
2.	Дослідження функціональних параметрів мобільної мережі 4G	17.09.2023р.	
3.	Методи розрахунку ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг інтернету речей	06.10.2023р.	
4.	Модель оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг інтернету речей	27.10.2023р.	
5.	Метод дослідження ефективності функціонування мереж 4G.	10.11.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	17.11.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	24.11.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	01.12.2023р.	
9.	Нормоконтроль МКР	04.12.2023р.	
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	08.12.2023р.	
11.	Захист МКР ЕК	14.12.2023р.	

Студент


(підпис)

Бахарев О.О.

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Бахарев О.О. Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 124 – стор., 44 – рис., 27 – табл., 24 – бібл. – українською мовою.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка схеми оцінювання ефективності функціонування мережі радіодоступу мобільного зв'язку 4G (LTE Advanced) для різних сценаріїв використання вузькосмугових каналів технології NB-IoT під час надання послуг Інтернету речей (автономного, використання захисної смуги та всередині смуги) в інтересах розроблення технічних стратегій операторів мобільного зв'язку залежно від доступного радіочастотного спектра, продуктивності та пропускнуої спроможності мережі Інтернету речей.

Удосконалено багатокритеріальний метод комплексного оцінювання ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G для надання послуг NB-IoT за різних сценаріїв розгортання в частотному спектрі (автономний, у захисній смузі, внутрішньосмуговий).

Проведено порівняльну оцінку сценаріїв розгортання мережі NB-IoT на основі обраних показників ефективності, унаслідок чого виявлено, що ефективність функціонування мережі за умови розгортання технології NB-IoT у захисному інтервалі на 12% та в автономному на 7% вища, ніж у разі використання внутрішньосмугового варіанту.

На підставі комплексу результатів моделювання розроблено механізми реалізації на практиці технологічної стратегії операторів мереж мобільного зв'язку для вибору сценарію застосування частотних каналів NB-IoT при наданні послуг Інтернету речей під час побудови та експлуатації мережі радіодоступу.

Ключові слова: мережа радіодоступу 4G; послуга Інтернету речей; багатокритеріальний метод комплексного оцінювання ефективності; частотний канал NB-IoT.

ABSTRACT

UDC 621.391

Bakharev O.O. Study of the efficiency of Internet of Things networks using 4G technology - Master's thesis in speciality 172 - Telecommunications and Radio Engineering, Educational programme - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU 2023. 124 pages, 44 figures, 27 tables, 24 bibliography - in Ukrainian.

The aim of the qualification work is to develop a scheme for evaluating the efficiency of the 4G (LTE Advanced) mobile radio access network for various scenarios of using narrowband channels of NB-IoT technology when providing Internet of Things services (autonomous, using a protective band and in-band) in the interests of developing technical strategies for mobile operators depending on the available radio frequency spectrum, performance and throughput of the Internet of Things network.

A multi-criteria method for a comprehensive assessment of the efficiency of a 4G mobile network for the provision of NB-IoT services under different scenarios of deployment in the frequency spectrum (autonomous, in the protective band, in-band) has been improved.

A comparative assessment of the NB-IoT network deployment scenarios based on the selected performance indicators is carried out, which revealed that the network efficiency when deploying NB-IoT technology in the protective interval is 12% higher and in the autonomous mode is 7% higher than when using the in-band option.

Based on a set of modelling results, mechanisms for implementing in practice the technological strategy of mobile network operators to select a scenario for the use of NB-IoT frequency channels in the provision of Internet of Things services during the construction and operation of a radio access network have been developed.

Keywords: 4G radio access network; Internet of Things service; multicriteria method of comprehensive performance evaluation; NB-IoT frequency channel.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G ПРИ НАДАННІ ПОСЛУГ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	12
1.1 Дослідження особливостей використання технології NB-IoT під час надання послуг Інтернету речей	12
1.2 Визначення ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G при наданні базових послуг Інтернету речей	20
1.3 Аналіз методів і вибір показників для розрахунку ефективності функціонування мережі	23
1.4 Висновки до розділу 1	27
2 МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G ПРИ НАДАННІ ПОСЛУГ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ	30
2.1 Основні показники ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G під час надання послуг Інтернету речей	32
2.2 Формування факторних груп із використанням основних мережевих показників ефективності.....	36
2.3 Багатокритеріальне оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг Інтернету речей.....	52
2.4 Особливості методу експертних оцінок у багатокритеріальному підході....	55
2.5 Модель оцінки ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G.....	58
2.6 Висновки до розділу 2	62
3 МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ 4G.....	64

3.1 Математичні основи методу розподілу радіочастотного спектру в мережах 4G з технологією NB-ІоТ	65
3.2 Методика проведення моделювання мереж мобільного зв'язку 4G	70
3.3 Оцінювання ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G з технологією NB-ІоТ для різних сценаріїв використання радіочастотного спектра	83
3.4 Розроблення механізмів реалізації технології NB-ІоТ для різних сценаріїв використання радіочастотного спектра в мережах 4G	85
3.5 Висновки до розділу 3	89
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	90
4.1 Оцінювання наукового ефекту.....	90
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	93
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	94
4.2.2 Відрахування на соціальні заходи	97
4.2.3 Сировина та матеріали.....	97
4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	99
4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	100
4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	101
4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	102
4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	103
4.2.9 Службові відрядження.....	104
4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації	105
4.2.11 Інші витрати.....	105
4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	105
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	107
4.4 Висновок до розділу 4.....	108
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	109
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	109

	4
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	111
5.2.1 Мікроклімат	111
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	112
5.2.3 Виробниче освітлення.....	113
5.2.4 Виробничий шум.....	114
5.2.5 Виробничі випромінювання.....	115
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи РЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	116
5.3.1 Дія електромагнітних випромінювань на радіоелектронні системи	116
5.3.2 Оцінка безпеки роботи РЕС в умовах дії електромагнітних випромінювань.....	117
5.4 Висновки до розділу 5	119
ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	122
ДОДАТКИ.....	125
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	126
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	130

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АБГШ - адитивний білий гаусовий шум;
БС - базова станція;
РБ - ресурсний блок;
РЕ - ресурсний елемент;
РЧС - радіочастотний спектр;
DL - спадний канал;
LTE - стандарт бездротового високошвидкісного передавання даних;
MCL - максимальні втрати при затуханні;
MIMO - метод просторового кодування сигналу;
NB-IoT - вузькосмугова технологія інтернету речей;
NP - продуктивність мережі;
OFDM - мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів;
QAM - квадратурно-амплітудна маніпуляція;
QCI - індикатор класу QoS;
QoS - якість обслуговування;
RSRP - рівень сигналу, що приймається;
SC-FDMA - метод множинного доступу;
TTI - часові інтервали передачі
UL - висхідний канал;
UE - клієнтське обладнання

ВСТУП

Актуальність теми. Технологія NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) - це нова технологія радіодоступу на основі мереж мобільного зв'язку LTE, призначена для стаціонарних пристроїв з передачею невеликих обсягів даних. NB-IoT створена для використання в сегменті IoT, де необхідні висока дальність зв'язку, невеликі швидкості та максимальна енергоефективність [1]. Технологію створювали як адаптацію високошвидкісного стандарту стільникового зв'язку 4G (LTE), розробленого для під'єднання безлічі IoT-пристроїв, але без звичної для 4G стандарту надлишкової функціональності та наявної швидкодії.

Розвиток нового стандарту мобільного зв'язку - 5G і хмарних обчислень призведуть до побудови нового типу комунікаційних мереж, що пропонують вдосконалений сервіс для послуг Інтернету речей. І хоча здається, що технологія 5G готова запропонувати найкращі умови для IoT пристроїв, пройде ще чимало часу для її повсюдного впровадження в телекомунікаційні мережі розвинених країн, у т.ч. і на території Республіки Казахстан. Саме тому впровадження технології NB-IoT на мережах мобільного зв'язку 4G ще довго залишатиметься затребуваним завданням, а її повна сумісність з LTE - безсумнівною перевагою.

Незважаючи на те, що технологія NB-IoT багато що успадкувала від LTE, починаючи з фізичної та закінчуючи мережевою архітектурою, є й істотні відмінності. Ці відмінності сформовані робочою групою 3GPP у Релізі 13 і представлені як основні вимоги до вузькосмугової технології Інтернету речей. До них належать: можливість під'єднання до базової станції великої кількості пристроїв (до 100 тис. од. на стільник), стабільне покриття NB-IoT (до -164 дБ для пристроїв із класом потужності 23дБ), низьке енергоспоживання пристроїв (до 10 років роботи від батареї) і низька вартість пристроїв (до 10\$).

У технічній специфікації консорціуму 3GPP TR 45.820 [2] з погляду мережі радіодоступу наведено три можливі NB-IoT сценарії використання радіочастотного спектра в мережах мобільного зв'язку [3]:

1) автономний сценарій (англ.: Standalone mode), де незайняті ресурси GSM-спектра задіюються на принципах рефармінгу, тобто заміни частот GSM на NB-IoT [3];

2) внутрішньосмуговий або сценарій спільного використання спектра (англ.: In-band mode), де робочі ресурсні блоки LTE зі смугою пропускання 180 кГц заміщуються NB-IoT RB [3];

3) сценарій використання захисних захисних радіочастотних блоків LTE з полозою пропускання 180 кГц [2];

4) сценарій використання захисної смуги (англ.: Guardband mode), де під розгортання технології NB-IoT видають надлишковий спектр частотного каналу LTE, тобто використовують захисні інтервали [3].

Варіативність сценаріїв реалізації вузькосмугового IoT пояснюється тим, що спочатку стандарт NB-IoT розробляли з урахуванням вимог до повної сумісності з уже наявними стандартами стільникових мереж - 2G/3G/4G [4]. Це дало змогу уникнути істотних змін на мережі мобільного зв'язку і знизити капіталовкладення в модернізацію стільникової мережі за рахунок перевикористання інфраструктури мережі. Крім того, на сьогоднішній день, регулюючі органи не виділяють окремі частотні діапазони для розгортання технології NB-IoT.

З цієї причини, перед мобільними операторами стоїть непросте завдання - потрібно максимально ефективно перевикористовувати наявні частотні ресурси стільникового зв'язку під технологію вузькосмугового Інтернету речей.

Водночас вибір певного сценарію розгортання технології NB-IoT є дуже важливим, оскільки справляє значущий вплив не лише на економічні та технічні показники під час розгортання нових мереж зв'язку, наприклад, на гнучкість побудови мереж, потенційні грошові витрати, а й на основні показники ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G, а, отже, як результат, і на задоволеність кінцевих користувачів послугами Інтернету речей. У цьому разі аналіз ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку при використанні різних сценаріїв технології NB-IoT [3] допоможе визначити

найоптимальніший сценарій, що дасть змогу забезпечити належну якість послуг, що надаються. Однак, наразі питанню ефективності використання кожного зі сценаріїв розгортання технології NB-IoT за певних умов присвячена лише невелика кількість робіт і досліджень, а методичні підходи та пошуки на цю тему відсутні.

Аналіз останніх досліджень. Наявні методи не дають змоги вірно розрахувати ефективність роботи мережі та визначити найоптимальніший зі сценаріїв розгортання технології NB-IoT на мережах мобільного зв'язку 4G, які функціонують, оскільки орієнтуються на обмежену кількість критеріїв, а саме - доступний частотний ресурс (ширина смуги пропускання, частотний діапазон і т.д.) [5].

При цьому вибір ефективного сценарію розгортання мережі NB-IoT на базі мережі мобільного зв'язку 4G під час надання послуг Інтернету речей є дуже важливим, оскільки значною мірою впливає на:

- основні показники ефективності функціонування мережі;
- показники якості мережі (QoE) і послуг, що надаються;
- кількість потенційних абонентів послуги IoT;
- витрати на побудову або поліпшення IoT мережі (TCO) [6].

Тому питання визначення ефективності сценаріїв NB-IoT має вирішуватися комплексно, і оцінка ефективності повинна проводитися з використанням групи декількох найважливіших параметрів.

Операторам мобільного зв'язку необхідно розуміти заздалегідь, який зі сценаріїв NB-IoT буде найефективнішим і тому найкращим для розгортання на наявній мережі мобільного зв'язку 4G, а також допоможе досягти найкращого балансу між згаданими критеріями.

Доведено, що існує необхідність у розробці багатокритеріального методичного підходу до оцінки ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G для надання послуг NB IoT за різних сценаріїв розгортання в частотному спектрі (автономного, використання захисної смуги та всередині смуги).

Застосування єдиного багатокритеріального методу для оцінювання ефективності функціонування мереж NB-ІоТ на мережах мобільного зв'язку дало б змогу вибрати найоптимальніший сценарій розгортання технології NB-ІоТ, тим самим, забезпечити економію часу, підвищити точність вибору та зменшити витрати на модернізацію мережі при виборі підходящого сценарію використання радіочастотного спектра з першого разу.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка схеми оцінювання ефективності функціонування мережі радіодоступу мобільного зв'язку 4G (LTE Advanced) для різних сценаріїв використання вузькосмугових каналів технології NB-ІоТ під час надання послуг Інтернету речей (автономного, використання захисної смуги та всередині смуги) в інтересах розроблення технічних стратегій операторів мобільного зв'язку залежно від доступного радіочастотного спектра, продуктивності та пропускної спроможності мережі Інтернету речей.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідити особливості застосування технології NB-ІоТ та недоліки наявних способів і підходів до оцінки її ефективності під час надання послуг Інтернету речей;

- виявити технічні чинники, що впливають на ефективність використання радіоресурсів мережі, а також визначити й обґрунтувати вибір параметрів (індикаторів) мережі радіодоступу 4G (LTE Advanced) із технологією NB-ІоТ, що впливають на ефективність керування розподілом радіоресурсу залежно від вибору сценарію використання частотних каналів NB-ІоТ;

- розробити критерії оцінки та модель оцінки ефективності використання мережевих ресурсів мережі радіодоступу 4G (LTE Advanced) у разі застосування вузькосмугових каналів технології NB-ІоТ з урахуванням технічних чинників, що впливають на ефективність мережі;

- виробити багатокритеріальний метод, необхідний для комплексної оцінки ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку залежно від обраного сценарію NB-ІоТ;

- моделювання функціонування мережі NB-ІоТ з урахуванням запропонованих до використання основних технічних показників мережі радіодоступу;

- розробити на основі результатів досліджень механізми реалізації на практиці технологічної стратегії операторів мереж мобільного зв'язку для вибору сценарію застосування частотних каналів NB-ІоТ при наданні послуг Інтернету речей під час побудови та експлуатації мережі радіодоступу.

З урахуванням викладеного тема магістерської кваліфікаційної роботи є актуальною.

Об'єктом дослідження є вузькосмугова технологія NB-ІоТ, інтегрована в мережі мобільного зв'язку 4G.

Предметом дослідження є ефективність використання ресурсів мережі радіодоступу мобільного зв'язку 4G для різних сценаріїв застосування частотних каналів NB-ІоТ при наданні послуг Інтернету речей.

Методи досліджень базуються на використанні: методів теорії телетрафіку та теорії масового обслуговування, теорії ймовірностей, математичної статистики.

Новизна одержаних результатів:

Удосконалено багатокритеріальний метод комплексного оцінювання ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G для надання послуг NB-ІоТ за різних сценаріїв розгортання в частотному спектрі (автономний, у захисній смузі, внутрішньосмуговий).

Проведено порівняльну оцінку сценаріїв розгортання мережі NB-ІоТ на основі обраних показників ефективності, унаслідок чого виявлено, що ефективність функціонування мережі за умови розгортання технології NB-ІоТ у захисному інтервалі на 12% та в автономному на 7% вища, ніж у разі використання внутрішньосмугового варіанта.

На підставі комплексу результатів моделювання розроблено механізми реалізації на практиці технологічної стратегії операторів мереж мобільного

зв'язку для вибору сценарію застосування частотних каналів NB-IoT при наданні послуг Інтернету речей під час побудови та експлуатації мережі радіодоступу.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» у 2023 році.

1 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G ПРИ НАДАННІ ПОСЛУГ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

1.1 Дослідження особливостей використання технології NB-IoT під час надання послуг Інтернету речей

До сучасних технологій радіодоступу, що використовуються для надання послуг Інтернету речей, висуваються суворі критерії та вимоги. На щастя, технології, що застосовуються, досить гнучкі, щоб максимально точно забезпечувати правильний набір різних мережевих характеристик залежно від сценарію використання технології, а також здійснювати пріоритизацію різних видів мережевого трафіку й оптимальний перерозподіл ресурсів мережі для збереження економічної ефективності. Безліч сценаріїв використання [5], надійне управління і контроль, глибоке радіопокриття, довгий термін експлуатації за рахунок низького енергоспоживання кінцевих пристроїв, їхня невелика вартість і можливість під'єднання понад 50 тисяч пристроїв до базової станції мобільного оператора - усіх цих вимог має бути досягнуто в рамках єдиної мережі, що функціонує, під час надання послуг Інтернету речей [5].

Перераховані вище вимоги було реалізовано в рамках універсальних розподілених мереж телеметрії, що забезпечують тривалий час роботи пристроїв на великих відстанях без додаткового обслуговування і зарядки. Такі мережі називаються енергоефективними мережами дальнього радіусу дії або мережами LPWAN (англ. - Low Power Wide Area Networks).

На сьогодні консорціум 3GPP стандартизує три головні технології для частотних діапазонів із ліцензованим використанням спектра: - LTE-M (Long-Term Evolution for Machine-Type Communications) є адаптацією високошвидкісної технології IoT для мереж мобільного зв'язку LTE.

Початкову версію представлено 2014 року в Релізі 12 [7], надалі, в Релізі 13 було здійснено її оптимізацію [2]. Завершена специфікація технології LTE-M з'явилася в 2016 р. Особливість технології полягає у використанні каналу

шириною 1,4 МГц, що дозволяє передавати дані зі швидкістю до 1 Мбіт/с; - EC-GSM (Enhanced Coverage GSM) - технологія з розширеним GSM-покриттям, запропонована робочою групою GERAN у Релізі 13 [2]. Завершена версія специфікації з'явилася одночасно з технологією LTE-M у I кварталі 2016 р. Технологія дає змогу обмінюватися невеликими пакетами даних у збільшеній на 20дБ порівняно зі стандартним режимом 2G зоні покриття в режимі GPRS. Швидкість передачі даних досягає до 256 кбіт/с з підтримкою до 50 тисяч пристроїв на базову станцію [8];

- NB-IoT (LTE Cat. NB1) - технологія нового, вузькосмугового радіоінтерфейсу, регламентована поряд з LTE-M і EC-GSM у стандарті 3GPP Rel.13 [2]. Спочатку швидкість передачі в технології становила всього 70 кбіт/с за ширини смуги в 180 кГц. На сьогодні максимальні швидкості передачі даних досягають 250 кбіт/с. Технологію реалізовано із застосуванням вузькосмугових FDMA-сигналів для висхідних каналів передавання повідомлень, у низхідній лінії використовують вузькосмугові OFDMA-сигнали.

Фактично, жодна з перерахованих технологій не є самостійним стандартом; вони є доопрацюванням і розвитком наявних стандартів мобільного зв'язку, розроблених для задоволення потреб абонентів, а саме - масове під'єднання слабкопотужних терміналів і датчиків з обмеженими потребами в пропускній спроможності, що функціонують переважно від батареї [8].

Так, наприклад, EC-GSM - це розширення чинного стандарту мобільного зв'язку GSM, що дає змогу швидше впровадити IoT за рахунок відсутності необхідності в заміні комплектів обладнання базових станцій. Для застосування технології EC-GSM використовується стандартна несуча GSM зі змінами, що стосуються збільшення бюджету лінії - радіопокриття, кількості під'єднаних IoT пристроїв і зниження грошової вартості впровадження технології в кінцевому пристрої.

Основна перевага EC-GSM - це підготовленість інфраструктури мережі (потрібне оновлення тільки програмного забезпечення), а поширеність мереж стандарту GSM і їхнє повсюдне охоплення дають змогу легко масштабувати

мережі IoT. Однак наразі технологію EC-GSM розглядають як проміжну, оскільки провідні оператори і виробники телекомунікаційного обладнання та терміналів прогнозують, що GSM-технологія застаріває [9] і незабаром її можна буде замінити на перспективніші стандарти стільникового зв'язку, хоча вона й далі відчуває велике навантаження передачею голосового трафіку в деяких регіонах, що робить недоцільним завантажувати її додатково швидкозростаючим IoT-трафіком.

Видима нерівномірність поширення двох основних ліцензованих технологій IoT, реалізованих відповідно до стандарту LTE, і істотна перевага в бік однієї з них - NB-IoT - визначає необхідність більш докладного вивчення особливостей і недоліків використання цих технологій при побудові та наданні різних послуг Інтернету речей на мережах мобільного зв'язку 4G.

Технологія LTE-M (також має назву eMTC або LTE Cat.M1) - це одна з трьох основних технологій 3GPP IoT, які використовують ліцензований частотний діапазон, що володіє найкращими енергетичними характеристиками та високою швидкістю передавання даних у спадному (Downlink, DL) і висхідному (Uplink, UL) каналах.

Технологія LTE-M являє собою еволюцію мереж мобільного зв'язку 4G для реалізації IoT з поліпшеною підтримкою міжмашинної взаємодії [10].

Основні ключові показники цієї технології IoT все ті ж - це низька вартість, поліпшене покриття, високий термін автономної роботи при досягненні максимальної сумісності з мережевою інфраструктурою технології LTE. Примітно, що технологію допрацьовували в міру її використання.

Так, перша версія стандарту технології LTE-M була представлена робочою групою 3GPP у Релізі 12 [7]. У даній версії для забезпечення високого терміну служби акумулятора пристроїв основний наголос йшов на зниження енергоспоживання, що досягається за рахунок використання спеціальної функції PSM (Power Save Mode), і підтримки напівдуплексного режиму з передачею 1000 біт інформації в 1 транспортному блоці (TBS). Доповнена специфікація LTE-M з'явилася вже в I кварталі 2016 р. в Релізі 13, де були розроблені спеціальні

функції енергозбереження, такі як eDRX (extended Discontinuous Reception Mode) і індикація відключення - RAI (Release Assistance Indication). Крім того, було потрібне поліпшення покриття всередині будівель і приміщень, але оскільки система від початку була обмежена смугою пропускання в 1,4 МГц (Cat M1), то до радіопокриття додали низку розширень, як-от стрибкоподібна перебудова частот і повтори підкадрів, що дають змогу зберегти оптимальний рівень сигналу і збільшити дальність його дії. Примітно, що подальші доповнення і поліпшення до технології вносилися аж до Релізу 16, тобто до відносно недавнього часу.

У результаті здійснених доопрацювань технологія LTE-M зарекомендувала себе як недороге і зручне рішення для надання послуг Інтернету речей.

Основними причинами поширення технології стали: - невелика ширина смуги пропускання (1.4МГц);

- використання одиночної антени (SISO), що здешевлює виробництво устаткування; - швидке і спрощене опрацювання основної смуги завдяки внесенню змін в опрацювання фізичного рівня; - забезпечення зони та рівня покриття NB-IoT нарівні з GSM; - чудова сумісність з наявними частотами мереж 4G (FDD, TDD);

- невелика вартість і широкий вибір клієнтських терміналів із підтримкою технології LTE-M; - час автономної роботи щонайменше 10 років, завдяки чому досягається зниження витрат на обслуговування пристроїв;

- підтримка голосового трафіку за допомогою технології VoLTE (Voice over LTE), що робить технологію дуже привабливою для застосування в багатьох додатках IoT, що вимагають певного рівня взаємодії з людиною, включно з пристроями з функціями екстреного виклику, як-от системи спостереження за дітьми, додатки для здоров'я й безпеки та багато чого іншого [11].

Ключові технічні особливості вузькосмугових технологій IoT наведено в таблиці 1.3. Як згадувалося раніше, головна перевага технології LTE-M - це надання високої пропускнуєї спроможності, аж до 1 Мбіт/с в UL/DL напрямку, завдяки можливості використання ширшої смуги пропускання в 1.4 МГц. Низька

затримка, оцінювана в мілісекундах, і підтримка мобільності також є безперечними перевагами технології LTE-M.

Технологія LTE-M нарівні з EC-GSM може похвалитися високим ступенем готовності мережевої інфраструктури, що дає змогу розгорнути її на наявних мережах 4G завдяки оновленню програмного забезпечення (ПЗ).

Апаратне забезпечення, при цьому, практично повністю перевикористовується.

Технології LTE-M і LTE прекрасно співіснують і дають змогу динамічно перерозподілити залежно від навантаження, що надходить, ресурси, що використовуються.

З іншого боку, мобільним операторам найчастіше видають обмежений ліцензований спектр під LTE-технологію, що не перевищує 15 -20 МГц, водночас у 90% випадків LTE-M датчики передають інформацію вагою всього лише 50-100 біт/день. Тому тримати 1.4 МГц канал для таких цілей стає недоцільно, оскільки йде нерозумна трата дорогих мережевих ресурсів мобільних операторів. Отже, застосування технології LTE-M передусім має бути обґрунтоване необхідністю досягнення зазначених переваг, інакше реалізація такої технології часто може бути нерентабельною для мобільних операторів і постачальників послуг IoT.

Наступний недолік LTE-M полягає в тому, що використання частотної смуги в 1.4 МГц і одиночної антени приймання-передачі сигналів, ускладнює використання стандартних методів, які використовуються для забезпечення надійного підключення. До них належать просторове рознесення, частотне рознесення тощо.

Хороша новина полягає в тому, що перераховані недоліки були вже враховані та вирішені під час розробки специфікації наступної нової технології Інтернету речей - NB-IoT.

NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) - це нова технологія радіодоступу на основі мереж мобільного зв'язку LTE, яка використовується для стаціонарних пристроїв з передачею невеликих обсягів даних на далекі відстані [12].

Технологію створювали як адаптацію високошвидкісної технології LTE, розробленої для підключення безлічі IoT пристроїв, але без надлишкової LTE-функціональності і, на жаль, без його наявної швидкодії. Технологія NB-IoT повністю сумісна з LTE і багато що успадкувала від останньої, починаючи з фізичної інфраструктури і закінчуючи мережевою архітектурою [13].

Основні вимоги, що висувуються до технології NB-IoT, були сформовані робочою групою 3GPP у Релізі 13:

- низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв; досягнуто за рахунок відсутності функцій мобільності та передавання великих даних, що дало змогу збільшити термін життя батареї до 10 років і встановлювати пристрої у важкодоступних для обслуговування місцях;

- поліпшене, порівняно з LTE, радіопокриття з бюджетом лінії зв'язку до 164 дБ, як, наприклад, у мереж технології 2G (GSM);

- більш низька вартість модулів і послуг зв'язку; за рахунок можливості перевикористання інфраструктури мереж LTE і дешевизни кінцевих пристроїв.

При цьому основний недолік технології NB-IoT - це наявність великих затримок під час відгуку пристроїв на запити з боку мережі (сервера додатків).

Ба більше, в NB-IoT не підтримуються такі важливі функції, що значно обмежують сферу застосування цієї технології: автоматичне перемикання між стільниками (через відсутність хендовера, мобільності), екстрені виклики і функція CS fallback. Низькі швидкості приймання та передавання даних також значно звужують коло можливих сценаріїв використання цієї технології.

Для успішного розуміння досягнутого балансу між перевагами і недоліками технології NB-IoT необхідно заглибитися в технічні аспекти архітектури радіодоступу мобільної мережі LTE. Для початку варто відзначити явну перевагу NB-IoT - смуга пропускання становить усього лише 180 кГц, тоді як для технології LTE від 1.4 МГц до 20 МГц. Звідси значно нижчі швидкості передачі даних і відсутність мобільності та надмірності, про які згадувалося вище.

Далі, є два стандартних напрямки взаємодії між базовою станцією (BTS, Base Transceiver Station) і клієнтським терміналом (UE, User Equipment):

Downlink (DL) - це напрямок від базової станції до кінцевого пристрою (низхідний канал) і Uplink (UL) - це, навпаки, напрямок від термінального пристрою до БС. Кожен з каналів розділяється на піднесучі по 15 кГц, причому для Downlink каналу використовується OFDMA мультиплексування (ортогональний частотний поділ каналів), а для Uplink - FDMA доступ з GMSK модуляцією і SC-FDMA доступ з одночастотною несучою [14]. Наприклад, у LTE застосовується принцип поділу каналів OFDM.

Сама несуча в LTE (також і для NB-IoT) розділена на ресурсні блоки (RB, Resource Block), які, своєю чергою, розділені на 12 піднесучих. Отримуємо загальну ширину займаної смуги: $12 \times 15 \text{ кГц} = 180 \text{ кГц}$ (рисунок 1.1). Звідси й обмеження NB-IoT загальною смугою одного RB шириною в 180 кГц. Додатково кожен ресурсний блок має 7 таймслотів по 0.5 мс, разом, один ресурсний блок містить 84 ресурсних елементи (RE, Resource Element).

NB-IoT пристрої працюють у режимі напівдуплексу з частотним поділом UL і DL каналів, де в низхідному каналі абонентам виділяється смуга 180 кГц (один ресурсний блок), що складається з 12 піднесучих із кроком 15 кГц, а в UL аналогічна смуга, розділена на 12 або 48 піднесучих (3.75 кГц - рознос між піднесучими в останньому випадку).

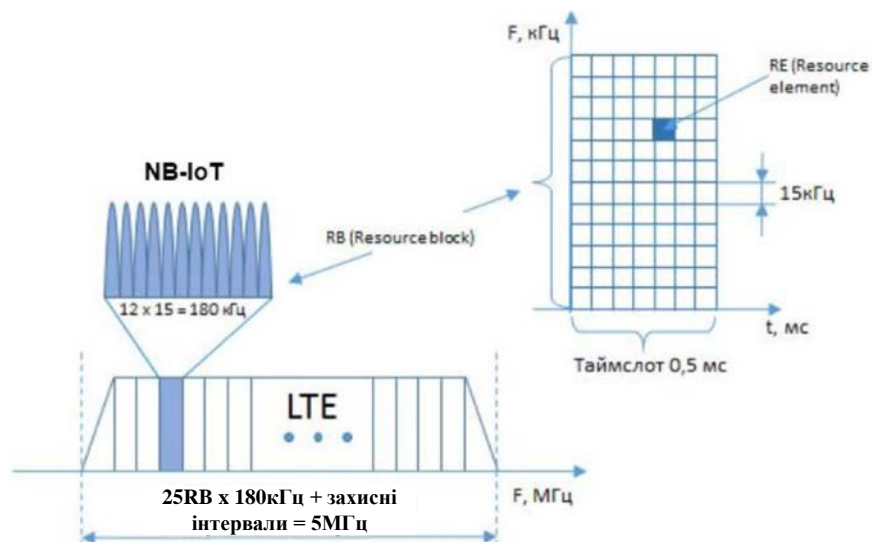


Рисунок 1.1 – Алгоритм розподілення частотно-часового ресурсу в LTE і NB-IoT

Для збільшення пропускної спроможності на мережі додатково застосовуються більш високі порядки модуляції (наприклад, QAM256 для Downlink і QAM64 в Uplink) і технології MIMO 2x2, MIMO 4x4 тощо. Обмеження в потужності абонентських пристроїв NB-IoT (як і LTE) до 23 дБм (200 мВт) дає змогу значно збільшити спектральну щільність сигналу під час його передавання в смузі 15 кГц. Як результат, досягається більш ефективне співвідношення сигнал/шум у NB-IoT порівняно з технологіями GSM/GPRS [15].

Також є одна важлива особливість NB-IoT, що дає змогу зменшити частоту виникнення помилок під час передавання пакетів, - це функція переповторів переданого сигналу (coverage enhancement). Кількість повторів встановлюється індивідуально залежно від очікуваного рівня покриття (coverage level 0, 1 і 2) [15].

Ширина каналу LTE визначає яку максимально можливу кількість каналів NB-IoT може бути передано в захисному інтервалі. При використанні LTE каналу з шириною 5 МГц (25 ресурсних блоків), ефективна ширина каналу становить лише 4,5 МГц. Ліворуч і праворуч від основного спектра сигналу утворюються захисні смуги по 0,25 МГц, у яких можливе передавання двох каналів NB-IoT - один розташовується зліва, другий - праворуч. Чим ширша смуга каналу LTE задіюється, тим більшу кількість каналів NB-IoT можна підняти. Наприклад, за ширини смуги LTE 15 МГц або 20 МГц можна передавати 2 і більше каналів NB-IoT.

Наступною особливістю технології є варіативність способів її реалізації. Згідно зі стандартом 3GPP TR 45.820 Реліз 13 [2] передбачає підтримку трьох різних сценаріїв використання спектра для технології NB-IoT:

- Standalone mode - автономний сценарій, де для каналу NB-IoT частотний спектр обирають у діапазоні ліцензованих частотних каналах мереж 3GPP на правилах заміщення (рефармінгу) несучої LTE або GSM на NB-IoT. Наприклад, для GSM операторів достатньо замінити один 200кГц - носій GSM на NB-IoT.

- Guard band mode - сценарій використання захисної смуги технології LTE, де для реалізації технології NB-IoT застосовують надлишковий спектр

виділеного каналу LTE на його невикористовуваній частині, а саме в захисному інтервалі. У зв'язку з цим, сценарій із захисною смугою не гарантує відсутність завад (інтерференцію) від суміжного каналу на кордонах стільників LTE. Відповідно до специфікації 3GPP TS 36.802 ширина смуги LTE має бути не менше ніж 5 МГц [8].

- In-band mode - сценарій суміщеного (внутрішньосмугового) використання спектра, за якого для каналу NB-ІоТ використовуються робоча смуга всередині дозволеного спектра LTE. Порядок розміщення ресурсних блоків NB-ІоТ має збігатися з вимогами, зазначеними в 3GPP TS 36.101 [9].

На сьогоднішній день регулюючі органи не виділяють окремі частотні діапазони для розгортання технології NB-ІоТ. З цієї причини, мобільним оператором потрібно максимально ефективно перевикористовувати наявні частоти під технологію вузькосмугового Інтернету речей.

Можливість розгортання технології NB-ІоТ на базі наявних мереж LTE, а також мереж GSM і UMTS, є однією з головних її переваг. Додатковим плюсом технології є можливість перевикористання наявних частотних діапазонів стільникових мереж мобільного зв'язку під реалізацію вузькосмугового ІоТ.

1.2 Визначення ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G при наданні базових послуг Інтернету речей

Тут розглядається питання визначення ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G у разі надання послуг Інтернету речей на основі рекомендацій, представлених Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ), і термінології, відображеної в стандартах 3GPP. Вивчення цього питання починається з наведення дефініцій задіяних термінів, таких як: "Інтернет речей", "продуктивність мережі" [4], "базові послуги" мережі, "якість обслуговування мережі", "ефективність функціонування мережі" четвертого покоління тощо. Чітке розуміння термінології - основоположний момент роботи, який необхідний для детальнішого та глибшого вивчення підходів, що застосовуються різними

компаніями та організаціями, і надалі для розроблення єдиного методу оцінювання ефективності функціонування мобільних мереж зв'язку [4, С.58].

Під "базовими послугами" мобільного зв'язку розуміють можливість отримання послуг, визначених специфікацією стандарту, міжнародними рекомендаціями та деякими заданими умовами клієнтського терміналу, за їхнього запиту користувачем, під'єднаним до діючої мережі, наприклад, 4G. До основної послуги 4G стільникового зв'язку належить надання доступу до Інтернету, тобто послуга з приймання та передавання даних із використанням мережі Інтернет [7, 8].

Показник ефективності функціонування мереж - це кількісна (рідше якісна) оціночна характеристика, що враховує тимчасові, точнісні та надійнісні показники мережі, а також її параметри та характеристики, які визначаються умовами функціонування [9]. Показник ефективності мереж W включає три складові:

$$W = \{W_{\text{ц}}, W_{\text{т}}, W_{\text{э}}\}, \quad (1.1)$$

де $W_{\text{ц}}$ - набір показників цільової ефективності функціонування мережі, або кількісна міра відповідності планованої мережі своєму призначенню; $W_{\text{т}}$ - набір показників технічної ефективності мереж; $W_{\text{э}}$ - група показників економічної ефективності.

При цьому ефективність функціонування мобільних мереж у роботах [1, 3] згадується як "мережевий показник якості" або "показник роботи мережі" та характеризується насамперед набором технічних показників, об'єднаних у єдиний показник продуктивності мережі (англ.: Network Performance, NP) [4, С.58]. NP є мірою визначення ефективності роботи мережі. МСЕ в рекомендаціях МСЕ-Т E.800 і I.350 [30], спрямованих на вивчення якості телекомунікаційних послуг, що надаються, та питань продуктивності цифрових мереж, використовує наступне визначення: "Продуктивність мережі - можливість мережі або частини мережі забезпечувати функції, які відносяться до зв'язку між користувачами", та

характеризується мережевими параметрами, які є важливими для оператора мережі та застосовуються для налаштування, проектування, техобслуговування та експлуатації систем зв'язку. Продуктивність мережі позначає стан телекомунікаційних мереж і визначається незалежно від моделі терміналу абонента або виконуваних ним дій [3].

У згаданих рекомендаціях і наукових монографіях під час аналізу продуктивності мережі, застосовують терміни - "параметр" і "показник", де параметр - це кількісна характеристика обслуговування з конкретною сферою застосування. Після того, як основні характеристики мережі визначено, вони іменуються параметрами та виражаються метриками, що називаються "показники". Важливо, що параметри якості мережі мають важливе значення для всіх гравців телекомунікаційного ринку і вимірюються на тій мережі, до якої вони застосовуються. Оскільки ми аналізуємо ефективність функціонування на мережі радіодоступу (Radio Access Network, RAN) [3, 4], то, відповідно, і всі параметри та показники мають характеризувати стан мережі мобільного зв'язку 4G.

При виборі та розрахунку показників продуктивності мережі рекомендується враховувати два основні принципи:

1. Кожен показник має бути вимірюваний на межі елемента (-ів) мережевого з'єднання, до якого він застосовується. Ці визначення не повинні ґрунтуватися на припущеннях ні про внутрішні характеристики мережі (або її частин), ні про внутрішні причини порушень, які спостерігаються на границях;

2. Показники можна розглядати на кожному елементі мережі окремо для отримання наскрізного показника продуктивності, якщо можливо отримати справедливий розподіл між функціональними елементами мережі та постачальниками послуг [3].

Розуміння сенсу та призначення обох показників, якості обслуговування та продуктивності мережі, є важливим фактором у вивченні ефективності функціонування мереж. Орієнтовані на користувача параметри QoS забезпечують цінну основу для радіопланування і проектування мережі, але вони

не обов'язково можуть використовуватися при визначенні вимог до продуктивності для конкретних випадків. Аналогічно, параметри NP зрештою визначають QoS (спостережуваний користувачем), але вони не обов'язково описують цю якість таким чином, щоб вона була значущою для користувачів. Однак обидва набори параметрів необхідні, і їхні значення мають бути кількісно пов'язані, якщо мережа має бути ефективною в обслуговуванні своїх користувачів. У випадку з оцінкою ефективності функціонування мобільної мережі визначення параметрів QoS і NP може бути зведене до одного й того самого набору чинників і/або показників, які рівною мірою доповнюють один одного. При цьому використання суб'єктивних чинників виключається від початку [3].

Застосовуючи наведені раніше поняття та визначення, стає зрозумілим, що під час реалізації послуг Інтернету речей ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку 4G має характеризуватися параметром продуктивності мережі, який об'єднує в собі набір основних мережевих характеристик і кількісних показників, що визначають якість зв'язку та повноту послуги зв'язку, яку надають [24, С. 8], що надається мобільними операторами. Параметри QoS відіграють також важливу роль під час аналізу ефективності роботи мережі, однак, у цьому випадку потрібно підходити уважніше до вибору ключових показників. Оцінка останніх рекомендується до проведення на мережі радіодоступу загалом, виключаючи суб'єктивні показники, які не стосуються роботи 4G мережі [3].

1.3 Аналіз методів і вибір показників для розрахунку ефективності функціонування мережі

На сьогодні не представлено єдиного стандартизованого методу або способу для проведення оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку, за умови, що питанням та особливостям продуктивності

мобільної мережі під час розгортання технології NB-IoT присвячено достатню кількість робіт і досліджень [11].

Тому, найбільші виробники та постачальники телекомунікаційного обладнання (до них належать: Rohde&Schwarz, Nokia, Ericsson, Huawei) та міжнародні робочі групи й асоціації (ETSI, MCE-T, GTI TDD тощо) використовують власні, унікальні, але не стандартизовані підходи до оцінювання ефективності роботи мобільних мереж [4]. Цікаво, що, при цьому, кінцеві гравці - мобільні оператори та постачальники телекомунікаційних послуг, позбавлені розуміння, на чому базуються пропоновані підходи, а також вони обмежені в можливості отримання інформації про основоположні фактори, які враховуються під час розроблення того чи іншого підходу. Ба більше, у таких підходах найчастіше відсутня можливість розширення або додавання низки ключових показників або параметрів. Зрештою, проблема відсутності єдиного підходу до оцінки ефективності функціонування мереж під час використання технології NB-IoT не дає змоги детально вивчити питання щодо впливу технології та її сценаріїв розгортання на ефективність функціонування мережі мобільного зв'язку 4G з використанням глобальних даних, що могли б бути отримані від різних операторів мереж мобільного зв'язку.

Нижче наведено аналітичний огляд на найбільш відомі та використовувані способи оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку та технології NB-IoT загалом.

Так, наприклад, міжнародна група компаній Rohde&Schwarz заявляє, що, "хоча NB-IoT і є доповненням до стандарту 3GPP для мережі LTE, це рішення є абсолютно новою системою радіозв'язку, зокрема за характеристиками покриття" [3]. Тому розрахунок ефективності функціонування NB-IoT мереж тут проводиться окремо від мобільної мережі 4G/LTE, на якій реалізовано технологію NB-IoT. У підході використовується кілька груп показників:

1. Показники якості обслуговування (QoS) мережі NB-IoT;
- 2) Показники, що характеризують покриття мережі NB-IoT;

3) Показники ефективності, які заміряють на рівні застосунків (час передавання, показник успішності, час налаштування, швидкість передавання призначених для користувача даних, мережева затримка);

4) Показники ємності мережі NB-IoT [4];

5) Показники продуктивності (використання ресурсів, ефективність використання спектра, енергоефективність, радіопокриття).

Перевага цього підходу в тому, що порівняно з іншими способами, він використовується для проведення більш глибокого дослідження NB-IoT технології. Недолік підходу - група ключових показників, що використовуються, не включає повний перелік важливих KPI і не стандартизована, тобто може різнитися для кожного конкретного випадку вимірювання роботи мережі. Крім того, аналіз ефективності мережі проводиться переважно на рівні базових станцій або сектора, що не підходить для цілковитої оцінки мереж радіодоступу з реалізованою технологією NB-IoT [2]. Інші важливі недоліки полягають у тому, що немає орієнтації на варіативність технічного виконання технології NB-IoT і відсутність єдиного критерію порівняння або оцінки результатів.

Достатньо уваги питанню аналізу ефективності Інтернету речей шляхом використання двох різних технологій: eMTC і NB-IoT, було приділено в літературі [4]. У цій роботі оцінюється продуктивність двох технологій IoT для застосунку "Розумне місто". Порівнюється продуктивність систем з погляду споживання енергії, затримки, масштабованості та максимальної кількості клієнтських терміналів (англ. - User Equipment, UE) на осередок або мережу, а також MCL, пропускної здатності каналу, довжини даних, затримки радіочастотного перемикачання тощо. Недолік цього підходу в наявності параметрів, що мають значення, в основному, тільки для користувачів IoT. Тобто деякі параметри характеризують не продуктивність радіомережі загалом, а продуктивність кінцевих терміналів і сервісу, що надається.

Це позначається на обмеженості аналізу і відсутності загальної оцінки якості функціонування мережі.

Міжнародний союз електрозв'язку в рекомендації МСЕ-Т I.350 [3] також приділив увагу питанню дослідження ефективності роботи мережі передавання даних, там же наводиться опис термінології основних параметрів мережі.

Важливе значення мають критерії продуктивності - швидкість, точність і надійність мережі, де точність - критерій продуктивності, що характеризує ступінь достовірності системи, а надійність виступає мірою ефективності, яка виконується незалежно від швидкості або точності, але в межах встановленого інтервалу вимірювань.

Дев'ять параметрів мережі сформульовано для опису продуктивності мережі при використанні матричного підходу [3]:

- надійність доступу;
- швидкість доступу;
- точність доступу;
- надійність передавання інформації;
- швидкість передавання інформації;
- точність передавання інформації;
- надійність роз'єднання;
- швидкість роз'єднання;
- точність роз'єднання [4].

Перевага цього підходу в його простоті та можливості негайного формування ключових груп показників [2]. Підхід застосовується для оцінювання параметрів продуктивності мереж передавання даних.

Існуючі способи та методичні підходи аналізу продуктивності або ефективності функціонування радіомереж становлять цінність для вивчення, оскільки можуть бути взяті за основу розроблюваного методу комплексного оцінювання, що може бути застосований до конвергентних мереж - мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг вузькосмугового IoT. Однак, є низка загальних недоліків, які не дають змоги використовувати будь-який із розглянутих способів як самостійний універсальний метод для визначення

максимально придатного, з погляду ефективності, сценарію NB-ІоТ. Ці недоліки можна сформулювати таким чином:

- наявні підходи застосовні до мереж мобільного зв'язку, тому в них не враховується додатковий вплив, який чинить технологія NB-ІоТ на мобільну мережу 4G;

- оцінний критерій - доступний частотний спектр і час розгортання мережі;

- немає орієнтації на сценарії використання РЧС, тобто оцінку ефективності функціонування мереж проводять без урахування самого сценарію розгортання NB-ІоТ;

- обмеженість параметрів і показників, що використовуються. Запропоновані авторами [3] мережеві показники використовуються або для оцінки продуктивності мережі загалом, або для оцінки клієнтського досвіду кінцевих користувачів (наприклад, середня швидкість абонентів, середня кількість датчиків\лічильників тощо). При цьому жоден із підходів не враховує економічні показники - можливі витрати на побудову та/або модернізацію наявної мережі мобільного зв'язку 4G для надання послуг NB-ІоТ залежно від обраного сценарію розгортання (автономний, у захисній смузі, усередині спектра); - відсутня можливість масштабування наявних підходів із метою розширення набору показників, що використовуються.

І найголовніше, у запропонованих підходах не розкривається спосіб або метод проведення подальшої оцінки ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку після вибору та вимірювання ключових показників продуктивності радіомережі. Тому стає незрозуміло, як проводити порівняння ефективності для трьох сценаріїв розгортання з метою вибору найкращого.

1.4 Висновки до розділу 1

У розділі представлено результати аналізу наявних способів і підходів оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку, зокрема, і технології NB-ІоТ. Огляд показав, що вивчені підходи містять велику базу

мережевих показників і параметрів, рекомендованих до використання. Однак, стає очевидним, що представлені підходи мають низьку достовірність і точність визначення ефективності функціонування мережі, коли справа стосується дослідження технології NB-IoT.

Причиною стає те, що стандартні підходи враховують не всі важливі для прийняття кінцевого рішення показники якості мобільної мережі. Наприклад, не враховується клієнтський досвід кінцевих користувачів (середня швидкість абонентів, середня кількість абонентських пристроїв тощо), або витрати на оснащення наявної мережі. Усе це не дає змоги провести точну всебічну оцінку впливу, що чиниться технологією NB-IoT на наявну мережу LTE, і, як наслідок, визначити найефективніший і найоптимальніший сценарій розгортання технології NB-IoT.

Звідси виникає необхідність у розробленні нового методу комплексного оцінювання ефективності мереж NB-IoT, який дасть змогу провести всебічну систематизовану оцінку з урахуванням трьох різних сценаріїв використання спектра під час впровадження вузькосмугового IoT.

Для цього потрібно вирішити такі поставлені в дисертаційному дослідженні завдання:

- виявити технічні чинники, що впливають на ефективність використання радіоресурсів мережі, а також визначити й обґрунтувати вибір параметрів (індикаторів) мережі радіодоступу 4G (LTE Advanced) з технологією NB-IoT, які впливають на ефективність управління розподілом радіоресурсу залежно від вибору сценарію використання частотних каналів NB-IoT;

- розробити критерії оцінювання та модель оцінювання ефективності використання мережеских ресурсів мережі радіодоступу 4G за умови застосування вузькосмугових каналів технології NB-IoT із врахуванням технічних чинників, що впливають на ефективність використання радіоресурсів мережі;

- розробити критерії оцінки та модель оцінки ефективності використання мережевих ресурсів мережі радіодоступу 4G за застосування вузькосмугових каналів технології NB-IoT з урахуванням

2 МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G ПРИ НАДАННІ ПОСЛУГ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Наразі більшість операторів під час проєктування технічного проєкту мереж мобільного зв'язку та вибору відповідного сценарію розгортання NB-IoT застосовують підхід, орієнтований лише на аналіз наявних спектральних ресурсів, а саме: ширину використовуваного каналу і мінімальну потребу в спектрі для розгортання NB-IoT на комерційній мережі [9], і швидкість (час) розгортання. Такий підхід не враховує переваги та недоліки трьох сценаріїв розгортання NB-IoT - автономного, у захисній смузі та сценарію суміщеного використання спектра, а наявні підходи аналізу продуктивності мобільних мереж не дають змоги провести всебічну оцінку ефективності мережі мобільного зв'язку під час надання послуг NB-IoT, показуючи, який вплив на найважливіші мережеві показники та продуктивність мережі загалом справляє вибір сценарію використання радіочастотного спектра NB-IoT.

Результати аналізу наявних інструментаріїв і схем оцінювання ефективності мереж передавання даних, проведеного в попередньому розділі дисертаційного дослідження, наголошують на необхідності розроблення єдиного інструменту, що дає змогу завчасно виявити найоптимальніший сценарій розгортання технології NB-IoT, а також визначити ефективність і доцільність реалізації проєкту з урахуванням безлічі чинників, що відрізняються важливістю (вагою) впливу на продуктивність і розрахунковий показник ефективності мереж. Розрахунковий показник ефективності виступає критерієм оцінки на користь вибору одного з трьох сценаріїв.

Тоді математичним інструментом розроблюваного методу є багатокритеріальна модель, яка необхідна для проведення комплексного, всебічного оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при використанні різних сценаріїв NB-IoT. Точність розрахункових даних моделі досягається виконанням строго визначеної послідовності дій:

1. Отримання та аналіз технічного завдання і передбачуваного сценарію використання технології IoT для формування вхідних і вихідних завдань моделі.

2. Вибір показників і параметрів, що характеризують ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку 4G під час використання технології NB-IoT і враховують варіативність сценаріїв розгортання.

3. Формування факторних груп із приватних показників і параметрів, порівнянних і таких, що належать до єдиного аспекту факторної групи.

4 Використання методу експертних оцінок для визначення "важливості" факторних груп і приватних показників мережі мобільного зв'язку.

5. Моделювання значень показників ефективності для трьох сценаріїв NB-IoT з метою аналізу їхньої значущості та залежності від варіанта використання мережевих ресурсів при виборі сценарію NB-IoT [11].

6. Нормування значень приватних показників і факторних груп, а також переведення їх у порівнянний вигляд для розрахунку єдиного коефіцієнта ефективності.

7. Проведення порівняльної оцінки коефіцієнта ефективності для трьох сценаріїв використання спектра NB-IoT.

8. Врахування невизначеностей і ризиків при складанні практичних рекомендацій щодо вибору оптимального сценарію [4].

У цьому розділі розкриваються критерії формування факторних груп, виявлення з усього різноманіття наявних параметрів і показників, розглянутих у першому розділі, найвагоміших; наведено опис використовуваних методів і розроблено модель для комплексного оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку з метою вибору відповідного сценарію розгортання NB-IoT [11].

2.1 Основні показники ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G під час надання послуг Інтернету речей

Ключові показники ефективності (KPI, key performance indicator) надають інформацію про мережу, необхідну для ефективного її планування, аналізу продуктивності та оптимізації. Однак недостатні дані, зібрані з обмеженої кількості KPI, можуть істотно обмежити ефективність планування мережі, що призведе до зростання операційних витрат і негативно позначиться на якості сервісу, що надається, тобто на абонентах мережі [1]. У цьому підрозділі наводиться опис ключових показників мережі, рекомендованих для оцінки досягнення найкращої ефективності функціонування мережі 4G з технологіями Інтернету речей.

Результати оцінки за цими показниками допоможуть мобільним операторам та іншим зацікавленим сторонам визначити, який сценарій і якою мірою може розглядатися як "оптимальний" і найбільш економічно вигідний.

Згідно з Рекомендацією МСЕ-Т Y.4903/L.1603 [2], шість основних принципів мають суворо дотримуватися під час вибору ключових показників і мережевих характеристик: - незалежність. Показники мають бути незалежними або ортогональними один одному, що дає змогу уникати їхнього дублювання та непрямого впливу в кількох приватних модулях одночасно; - простота. Суть кожного показника має бути простою і легко зрозумілою.

У кожного показника має бути одне загальноприйняте визначення, щоб забезпечити однакове тлумачення цього показника різними користувачами.

Розрахунки відповідних даних також мають бути простими та інтуїтивно зрозумілими; - вимірність. Показники мають визначатися так, щоб їхні значення можна було вимірювати та порівнювати науковим методом на різних етапах розвитку міста; іншими словами, KPI мають піддаватися порівнянню в часі та просторі. Необхідно, щоб дані за поточний і минулий періоди або були доступні, або їх можна було легко зібрати; - досяжність. Цілі, встановлювані пороги значень для показників, мають бути досяжними. Має бути присутня можливість

розширення і коригування набору показників відповідно до фактичної стадії розвитку; - релевантність. Застосовувані показники мають відповідати предмету кількісної оцінки. Система показників має відображати рівень загального розвитку в конкретному аспекті; - актуальність. Важливо відображати значення кожного показника в часі.

Будь-який показник має сенс тільки тоді, коли відомі часові рамки його реалізації. Отже, його реалізація і стандартизація мають бути розбиті на часові етапи.

Крім того, у процесі відбору ключових показників мережі мають бути враховані ще два важливі принципи, а саме:

- показники ефективності мають гарантувати можливість їхнього застосування в будь-яких галузях і сферах послуг технології Інтернету речей, чи то датчики руху, чи то лічильники задимлення;
- набір обраних показників не повинен змінюватися залежно від використовованого сценарію розгортання технології NB-IoT.

Формування схеми оцінювання ефективності роботи мереж 4G з різними сценаріями розгортання технології NB-IoT проводили не тільки з урахуванням перерахованих вище вимог, а й із використанням факторного аналізу, який застосовують у багатокритинних моделях. Для проведення факторного аналізу з усього різноманіття вивчених у першому розділі показників мережі необхідно було виявити найбільш значущі (важливі) і такі, що впливають на ефективність функціонування мобільної мережі зв'язку.

Необхідним до використання в моделі визнають той показник або параметр, який потрапляє під опис наведених нижче критеріїв і значення якого змінюється залежно від застосовуваного варіанта використання РЧС під час розгортання технології NB-IoT. На рисунку 2.1 наведено такі чотири критерії:

- частотний ресурс;
- стійкість функціонування мережі, що характеризується її продуктивністю;
- якість мережі та сервісних послуг, що надаються, IoT;

- інвестиційні витрати на побудову і модернізацію мережі (ліцензії на спектр, обладнання, термінали тощо).

Якість послуг зв'язку, що надаються, характеризується групою показників, які відображають споживчі властивості телекомунікаційної послуги та визначають її здатність задовольнити заявлені, встановлені та необхідні потреби користувача [3].

Стійкість функціонування мережі характеризує процес від моменту встановлення з'єднання і до його завершення. Визначається показниками доступності мережі, безперервності зв'язку, часткою неуспішних викликів, або відсотком викликів, що не потрапляють під нормативи за якістю передавання тощо.



Рисунок 2.1 - Критерії, що впливають на вибір ключових показників мережі 4G з використанням технології NB-IoT

Типовим завданням для будь-якого оператора зв'язку є виявлення з усього розмаїття наявних параметрів і показників найвагоміших, і побудова за їхньою допомогою матриці чинників, що безпосередньо впливають на бізнес-модель і якість функціонування мереж 4G [4].

Визначення найвагоміших показників дає змогу провести грамотну оцінку якості роботи мережі та мережевих сервісів, що надаються.

Критерії примітні тим, що побудовані на основі аналізу технічних та економічних складових планування будь-яких мереж із передаванням даних (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 - Вплив зміни сценарію розгортання NB-ІоТ на групи критеріїв та їхніх показників мережі

Критерій	Показник/Параметр	Вплив на вибір сценарію NB-ІоТ
Частотний ресурс	Ширина смуги спектру	Присутній
Якість мережі та наданих послуг	Швидкості передавання даних	Присутній
	Обсяг переданих даних	Незначною мірою
	Затримка	Відсутній
	Класи трафіку	Відсутній
	Пріоритети	Відсутній
	Покриття мережі NB-ІоТ	Присутній
	Якість мережі NB-ІоТ	Присутній
	Завади/інтерференція	Присутній
Стійкість функціонування мережі	Доступність мережі	Присутній
	Показник успішності з'єднання	Присутній
	Безпека мережі	Відсутній
	Надійність мережі доступу	Відсутній
	Точність доступу	Відсутній
	Кількість NB-ІоТ пристроїв	Присутній
Інвестиційні витрати	Частотний спектр	Присутній
	Апаратне забезпечення	Присутній
	Сервісні витрати	Незначною мірою
	Споживання електроенергії	Відсутній

З таблиці 2.1 видно, що до основних показників, що використовуються для проведення оцінки ефективності функціонування мережі при зміні сценарію розгортання NB-ІоТ, можна віднести: доступність та успішність мережі (успішність встановлення RRC з'єднання), пропускну здатність мережі (швидкість передачі даних у висхідному та низхідному каналах), кількість NB-ІоТ пристроїв на мережі, рівень сигналу або зону покриття, якість мережі, інтерференцію, витрати на частотні ресурси та апаратне забезпечення

(обладнання), витрати на виконання сервісних робіт, а саме: витрати на обслуговування мережі та на обслуговування мережі.

Об'єднання в групи і підгрупи схожих за призначенням показників і параметрів значно спрощує структуру розроблюваної моделі.

2.2 Формування факторних груп із використанням основних мережевих показників ефективності

Оскільки показників і параметрів мережі досить багато, то їхній аналіз показав необхідність використання факторного методу, що полягає в об'єднанні показників, які сильно корелюють між собою, у відповідні факторні групи. Оскільки кожен аспект роботи мережі характеризується своїм набором чинників, то застосування такого підходу дасть змогу провести верхньорівневе оцінювання, а також за необхідності розглянути вплив показників, що входять до їхнього складу, більш детально. Групи представлені таким набором чинників (рисунок 2.2):

1. Продуктивність мережі, її динаміка залежно від сценаріїв використання спектра для технології NB-IoT;
2. Кількість пристроїв NB-IoT у мережі LTE, які обслуговуються з якістю, що не є нижчою за встановлені рекомендації;
3. Зона покриття мережі LTE, а саме рівень сигналу та радіус покриття залежно від обраного сценарію реалізації технології NB-IoT.
4. Якість мережі, а саме відношення прийнятого сигналу до інтерференції плюс шум;
5. Перешкоди на вході пристроїв NB-IoT оцінюються показником інтерференції та рівнем внутрішньосистемних перешкод. У деяких випадках вибір може бути зроблено на користь одного показника;
6. Клієнтський досвід як оцінка якості відчуттів абонентів від користування послугою. До нього відносяться: середні та пікові значення

швидкості передавання даних, обсяг потенційного трафіку при використанні однакової смуги пропускання тощо;

7. Вартість створення мережі (капітальні витрати) залежно від сценарію розгортання технології NB-IoT.

Кожен із зазначених чинників може характеризуватися різними приватними показниками, які можуть мати в моделі оцінювання ефективності різну вагу і важливість урахування в інтегральному показнику ефективності.

Перевага цього підходу в тому, що сформовані факторні групи можуть бути доповнені надалі будь-якими приватними показниками залежно від результатів досліджень і моделювання.

Модель оцінювання ефективності функціонування мережі				
Факторні групи	Окремі параметри мережі			
Продуктивність мережі	Доступність мережі	Результативність сесії	...	
Кількість пристроїв	Кількість NB-IoT пристроїв	Кількість LTE активних користувачів	...	
Зона покриття мережі	Значення максимального покриття NB-IoT	Значення максимального покриття LTE	...	
Якість мережі	Відношення сигналу до інтерференції + шум	
Завади	Рівень внутрішніх завад	Інтерференція	...	
Клієнтський досвід	Середня швидкість передавання даних вниз/вверх	Максимальна швидкість передавання даних вниз/вверх	Кількість переданої інформації	...
Собівартість мережі	Частотний спектр	Модернізація обладнання мережі	Видатки на сервісне обслуговування	...

Рисунок 2.2 – Структурна модель оцінювання ефективності функціонування мережі з технологією NB-IoT

Нижче перелік та опис 7 факторних груп, задіяних у схемі оцінки ефективності мережі NB-IoT.

А. Продуктивність мережі Відповідно до чинних норм експлуатації мережі радіодоступу продуктивність мережі характеризує набір статистичних

параметрів. До найбільш значущих можна віднести доступність 4G мережі та успішність встановлення сесії.

Доступність мережі (Network Availability) - це показник, що належить до групи якісних показників мережі (KQI, key quality indicator). Визначає наявність і можливість надання мережевих ресурсів для кінцевого користувача, за допомогою яких встановлюється його підключення до мережі передачі даних [5].

Показник успішності сесії (RRC Connection Success Rate) характеризує успішність підключення до мережі та наявність активного сеансу користувача. У разі послуг мобільного широкосмугового передавання даних сеанс має зберігатися мережею доти, доки користувач сам не скасує сеанс або не припинить сеанс через причину, пов'язану з користувачем і згенеровану мережею [5].

Таблиця 2.2 - Факторна група показників мережі з рекомендованими значеннями

Категорія	Показники	Значення	Оцінювання
Продуктивність мережі	Доступність мережі Відсоток успішних з'єднань	> 99%	Дуже добре
		95% - 99%	Добре
		80% - 95%	Задовільно
		< 80%	Погано

Ще один важливий показник продуктивності мережі - відсоток обірваних з'єднань не за бажанням абонента (Call Drop Rate, %). Характеризує насамперед цілісність і якість стану мережі.

Показники, що входять до факторної групи, яка характеризує продуктивність мережі, схожі в нормуванні, і тому можуть підлягати рівносильному ваговому зіставленню всередині згаданої групи. Значення фіксуються на основі статистичних даних, одержуваних за допомогою системи контролю та моніторингу мережі мобільного зв'язку.

Пропускна спроможність мережі (Throughput) - показник потенційно можливого обсягу даних, який може бути переданий або отриманий

користувачами за одиницю часу [5]. Найчастіше показник пропускної спроможності мережі використовується мобільними операторами для того, щоб розрахувати технічну ємність каналу зв'язку. Обчислюється як максимальна кількість пакетів даних, що проходять каналом зв'язку, або максимальна швидкість завантаження і вивантаження даних усіх користувачів. Пропускна спроможність є важливим фактором з точки зору вимог користувача, і, забезпечення необхідної ємності мережі, виходячи з числа користувачів і обсягів їхньої інформації.

Пропускну здатність мережі NB-IoT можна оцінити числом переданих пакетів [7] за одиницю часу (1 секунду):

$$C_{cp} = \frac{N_b S_{cv}}{1024}, \quad (2.1)$$

де $N_b = 23040$ кбіт - кількість біт, що передаються за один сеанс з урахуванням автоматичних повторів, щоб уникнути помилок передавання даних;
 S_{cv} - загальна кількість сеансів зв'язку, що розраховується за формулою:

$$S_{cv} = \frac{11,2 \cdot N_{устр} \cdot T_{мод}}{86400}, \quad (2.2)$$

де $N_{устр}$ - кількість пристроїв IoT, підключених на сектор БС, $N_{устр} = 50000$;

$T_{мод}$ - фактичний час моделювання, 1с.

Тоді S_{cv}

$$S_{cv} = \frac{11,2 \cdot 50000 \cdot 1}{86400} = 6,48 \approx 7 \text{ сеансів зв'язку на 1 секунду}$$

Пропускна здатність C_{cp} , необхідна для обслуговування 50 тис. пристроїв:

$$C_{cp} = \frac{23040 \cdot 7}{1024} = 157,5 \text{ кбіт/с.}$$

Оскільки в технології NB-ІоТ йде передача невеликих за розміром даних, а кількість користувачів рідко перевищує 100 пристроїв на сектор (у зв'язку з невеликою густотою населення), то має значення враховувати не пропускну спроможність мережі, а середні швидкості передачі даних на кінцевого користувача. Цей показник буде найбільш інформативним при розрахунку ефективності функціонування мережі.

Б. Число пристроїв Факторна група визначає кількість NB-ІоТ пристроїв на сектор базової станції LTE, що різниться залежно від кількості виділених 180-кГц каналів і доступної ширини смуги пропускання спектра LTE (1.4, 3, 5, 10, 15, 20 МГц). Згідно зі специфікацією партнерського проєкту 3GPP [2] та результатами досліджень компанії Huawei [8], одна макробазова станція 4G з однією несучою обслуговує до 50 тис. пристроїв вузькосмугового ІоТ за радіусу дії один кілометр. В умовах щільної міської забудови (dense urban), де на 1 кв.км припадає близько 1.5 тисячі домогосподарств, ємності однієї БС вистачить для 40 підключень на одне домогосподарство. Зазначається, що така велика кількість пристроїв зумовлена не одноразовим під'єднанням до БС, а обслуговуванням в одному 180-кГц каналі пристроїв, з передачею даних не більше 100 байт інформації на годину [3].

Також на кількість пристроїв, що обслуговуються в одній стільнику, впливає радіус покриття і рівня сигналу в стільнику, а також виникнення додаткових втрат L через проникнення за стіни будівель і споруд. Приклад наведено на рисунку 2.3 [8].

Завдяки особливостям реалізації сценаріїв NB-ІоТ, кількість несучих частот (180-кГц каналів) змінюється залежно від наявного радіоресурсу.

Так, автономний сценарій за ширини смуги пропускання в 10 МГц дає змогу реалізувати до 50 несучих частот. У той час як під час використання

внутрішньосмугового сценарію під технологію NB-ІоТ перевикористовується тільки 8 несучих частот.

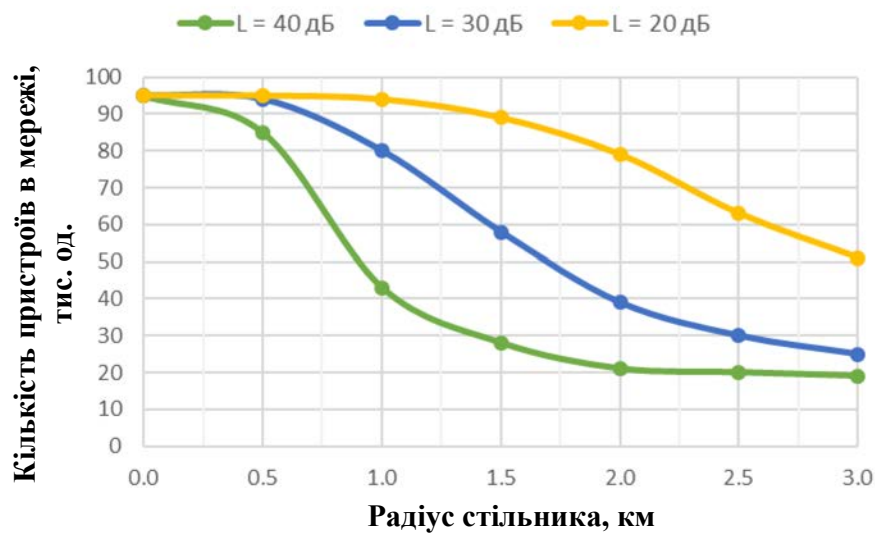


Рисунок 2.3 - Кількість ІоТ пристроїв в одному стільнику за 1 годину в каналі 180 кГц

Відповідно, і кількість під'єднаних пристроїв залежатиме безпосередньо від обраного сценарію та наданого радіоресурсу. Згідно з таблицею 2.3 максимально можлива кількість пристроїв буде за використання автономного сценарію і 20-МГц смуги пропускання.

Таблиця 2.3 - Кількість 180-кГц каналів NB-ІоТ

Можливі сценарії	Ширина смуги пропускання					
	1.4МГц	3МГц	5МГц	10МГц	15МГц	20МГц
Внутрішньосмуговий	-	2	4	8	14	18
У захисній смузі	-	-	2	2	4	4
Автономний	7	15	25	50	75	100

У [1] зазначається, що одна БС з одним 200-кГц каналом NB-ІоТ дає змогу під'єднати 67 тис. пристроїв із трафіком, еквівалентним отриманню 7.5 тис повідомлень за одиницю часу. Додавання кожного наступного 180-кГц каналу

дасть змогу підключити додатково близько 110 тис. пристроїв. Таким чином, виділення тільки під потреби IoT 10 каналів або 2МГц спектра на одній макробазовій станції дасть змогу під'єднати приблизно 1 мільйон IoT-пристроїв, які передають не більше ніж 100 тисяч повідомлень на секунду.

Результати розрахунку теоретично можливої кількості пристроїв для підключення при використанні кожного сценарію розгортання NB-IoT представлені на рисунку 2.4. Порядок розрахунку такий - теоретично максимальна кількість пристроїв (67 тис. пристроїв для першого каналу і 110 тис. пристроїв для наступних) множиться на кількість доступних 180-кГц каналів NB-IoT залежно від доступної ширини пропускання (таблиця 2.2) для кожного сценарію NB-IoT.

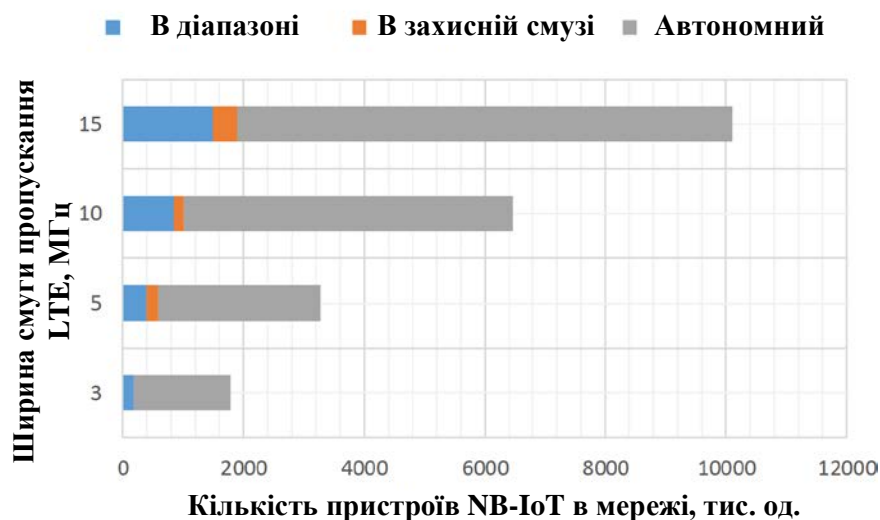


Рисунок 2.4 - Максимальна кількість NB-IoT підключень за ширини смуги пропускання LTE 3, 5, 10, 15 МГц

На практиці кількість під'єднаних NB-IoT пристроїв набагато менша й ідентифікується шляхом вимірювання статистичних даних, отриманих з використанням системи моніторингу та контролю стану мережі (OSS, Operation Support System). Для цього фіксують значення показників, що характеризують

число реальних користувачів або пристроїв NB-IoT, наприклад, показник кількості активних користувачів (NB-IoT Active User Number).

Середня кількість активних користувачів важливий показник, оскільки ідентифікує завантажені ділянки мережі на основі даних від базових станцій, тим самим, дозволяє розрахувати плановану ємність мережі. Кількість активних користувачів мережі нерівнозначна сумарній кількості всіх підключених до БС користувачів. Цей показник фіксується як для NB-IoT пристроїв, так і для звичайних LTE терміналів (користувачів). Згідно з [9] в один момент часу один активний користувач LTE реєструється на 8,5 підключених користувачів. Для NB-IoT терміналів подібної статистики не фіксують, і обмежуються рекомендаціями виробників обладнання для базових станцій, які повідомляють, що максимальна кількість пристроїв для підключення до NB-IoT мережі становить не менше 50 тисяч на стільницю [5].

В. Зона покриття мережі Зона покриття є однією з найважливіших факторних груп, що характеризують продуктивність мережі NB-IoT та досягнення параметрів QoS.

Зона покриття мережі характеризується параметром, що фіксує рівень або потужність опорного сигналу, що приймається (Reference Signal Received Power, RSRP), і вимірюється в дБм (dBm). Обчислюється як середнє значення потужності прийнятих опорних сигналів. Рівень прийнятого сигналу заміряється як для LTE мережі, так і для NB-IoT (таблиця 2.4). При значеннях $RSRP \leq -120$ дБм LTE-підключення може бути нестабільним. Оскільки під час використання технології NB-IoT не відбувається передача величезних масивів даних і немає вимог до виконання хендовера, то вимоги до NB-IoT RSRP на кордоні обслуговування базової станції знижено до значення -140 дБм. Тоді, діапазон вимірювання NB-IoT RSRP варіюється від -44 до -140 дБм. Значення показника RSRP тим нижче (рівень сигналу гірше), чим далі UE знаходиться від базової станції, і навпаки [22]. Тим самим віддаленість UE від BTS безпосередньо впливає на RSRP.

Таблиця 2.4 - Порівняння рівнів сигналу для LTE мережі та NB-ІоТ

LTE	NB-ІоТ	Рівень сигналу (RSRP)
>-80 дБп	>-84 дБп	Відмінний
-80 ... -90 дБп	-85 ... -102 дБп	Добрий
-90 ... -100 дБп	-103 ... -111 дБп	Задовільний
-100 ... -120 дБп	-112 ... -140 дБп	Поганий
≤ -120 дБп	≤ -140 дБп	Відключення

З таблиці 2.4. зрозуміло, що для проведення експериментальних досліджень рівень сигналу NB-ІоТ RSRP не повинен бути нижчим за -140 дБм. Г. Якість мережі До традиційного показника якості даних у радіоканалі належить параметр SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), що виражає відношення сигналу до інтерференції плюс шум і вимірюється в dB на приймачі [3, 4, 5].

SINR використовується як основний індикатор якості мережі, оскільки вимірюється абонентським терміналом і найточніше описує радіоумови. Однак, до переліку обов'язкових KPI, визначених, визначених 3GPP, він не входить.

Діапазон вимірювання NB-ІоТ SINR змінюється від - 20 до 20 dB. Що вище значення SINR, то краща якість сигналу та мережі загалом (таблиця 2.5). За негативного значення SINR рівень перешкод перевищує рівень корисного сигналу. Показник якості бездротового зв'язку SINR безпосередньо залежить від відстані між базовою станцією та абонентським терміналом, що передає дані, і має зворотну залежність від потужності сигналу, що інтерферує [4].

Показники SINR і RSRP є одними з основних KPI, призначених для вимірювання радіоумов 4G мереж [5].

Кореляція між SINR і RSRP наводиться нижче:

$$SINR = \frac{RSRP[W]}{P_{I,15kHz} + P_{N,eff,15kHz}}, \quad (2.3)$$

де $P_{I,15kHz}$ - це потужність перешкод від зовнішніх джерел;

$P_{N,eff,15kHz}$ - ефективна потужність шуму.

Таблиця 2.5 - Порівняння значень SINR для LTE мережі та NB-ІоТ

LTE	NB-ІоТ	Якість мережі (SINR)
>20 дБ	>12 дБ	Відмінний
13 ... 20 дБ	10 ... 12,5 дБ	Добрий
0 ... 13 дБ	7 ... 10 дБ	Задовільний
≤0 дБ	< 7 дБ	Поганий

Для ІоТ-пристроїв SINR і RSRP вимірюються на обслуговуваній стільниці тільки під час активного з'єднання. У NB-ІоТ це відбувається тому, що стандарт не підтримує плавну мобільність і передачу обслуговування, і мало значуще заміряти сигнали з сусідніх стільників під час драйв-тесту.

Д. Завади Важливим моментом у плануванні покриття стільникового зв'язку є прогнозування внутрішньосистемних перешкод та інтерференції. У стандарті LTE внутрішньосистемні перешкоди зводяться до мінімуму завдяки використанню FSS (Frequency Selective Scheduling) - налаштуванню розподілу диспетчера частотних ресурсів, гнучкому частотному плану та ICIC (Inter Cell Interference Control) - координації перешкод між окремими сотами [7]. Такого роду перешкоди, найчастіше, присутні на кордонах обслуговування стільників (рисунок 2.5), і чинять негативний вплив на пропускну спроможність, тим самим знижуючи швидкості передавання мережі та приймання інформації абонентами, а також створюють обмеження в наданні сервісу [5].

Варто зазначити, що згідно з документом МСЕ "Radio Regulations" № 1.166 [8] для опису шкідливих впливів на радіоканалах зв'язку застосовується термін інтерференція. Під інтерференцією в загальному значенні розуміють взаємодію сигналів, що передаються різними джерелами на одних і тих самих або на близьких радіоканалах. Характер їх виникнення часто схожий з внутрішньосистемними перешкодами, але на відміну від останніх, на виникнення зовнішньої інтерференції не впливає дальність знаходження приймача від базової станції. Інтерференція викликає спотворення спочатку переданого сигналу під впливом сигналів сторонніх джерел, тому інтерференцію частіше розглядають як зовнішні перешкоди зв'язку.

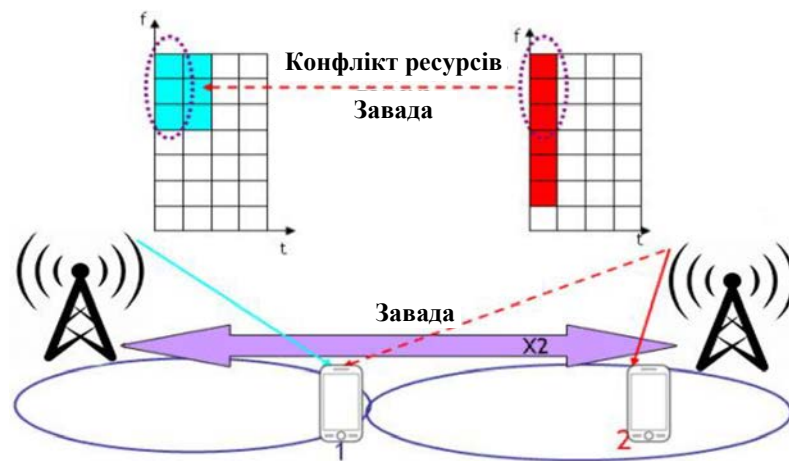


Рисунок 2.5 – Схема оцінювання внутрішньосистемних завад на границі стільника

На практиці інтерференція вимірюється як шум на рівні секторів базових станцій - тобто, залишок після віднімання опорного сигналу з прийнятого сигналу у відповідних ресурсних елементах [9].

Раніше ми наводили опис трьох сценаріїв розгортання технології NB-IoT: автономного, у захисній смузі та всередині смуги. Під час аналізу ефективності функціонування мережі для третього сценарію до обов'язкової групи факторів належить рівень внутрішньосистемних перешкод (інтерференція). Показник є універсальним і використовується для всіх трьох сценаріїв. Однак, саме для третього сценарію розгортання через близьке "сусідство" LTE та NB-IoT ресурсних блоків, показник інтерференції може відігравати суттєву роль в ухваленні рішення щодо використання даного сценарію.

Для прогнозування потенційних внутрішньосистемних перешкод потрібен розрахунок зменшення пропускної спроможності LTE БС через виникнення соконалих перешкод. Для цього запишемо вирази для максимальної швидкості передавання інформації, використовуючи теореми Шеннона, для двох сценаріїв:

- корисний сигнал транслюється за наявності адитивного білого гауссовського шуму (АБГШ);

- корисний сигнал транслюється за присутності АБГШ і різних соканальних перешкод [6].

Для першого сценарію межа (границя) Шеннона для швидкості передавання інформації в смузі ΔF :

$$C_1 = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c L_c}{N} \right), \quad (2.4)$$

де C_1 - пропускна здатність каналу, біт/с;

ΔF - ширина смуги пропускання каналу, Гц;

P_c - потужність передавача корисного сигналу, Вт;

L_c - ослаблення корисного сигналу між передавачем і приймачем, Вт;

N - потужність АБГШ, Вт.

В другому сценарії присутні АБГШ і соканальні перешкоди. Тоді потенційна швидкість передавання інформації розраховуватиметься так:

$$C_2 = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c L_c}{N + \sum_{i=1}^k P_i L_i} \right), \quad (2.5)$$

де i - номер джерела виникнення соканальних завад;

P_i - рівень потужності випромінювання i -ї завади; L_i - ослаблення i -ї завади, що виникає між передавачем БС і точкою приймання інформації.

Тоді зниження потенційної швидкості передавання БС у разі виникнення внутрішньосистемних перешкод можна розрахувати в такий спосіб:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c L_c}{N} \right) - \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c L_c}{N + \sum_{i=1}^k P_i L_i} \right) =$$

$$\Delta F \log_2 \left(\frac{1 + \frac{P_c L_c}{N}}{1 + \left(\frac{N}{P_c L_c} + \frac{\sum_{i=1}^k P_i L_i}{P_c L_c} \right)^{-1}} \right). \quad (2.6)$$

Проведемо в (2.6) заміну відношення сигнал/шум через $h^2 = \frac{P_c L_c}{N}$ і відношення сигнал/завада – $q^2 = \frac{P_c L_c}{\sum_{i=1}^k P_i L_i}$. Тоді ΔC .

$$\Delta C = \Delta F \log_2 \left(\frac{1 + h^2}{1 + \left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{q^2} \right)^{-1}} \right), \quad (2.7)$$

Використовуючи формулу 2.7, розрахуємо, на скільки відсотків знизиться пропускна спроможність базових станцій LTE при погіршенні радіоумов.

Вхідні параметри наведено в таблиці 2.6, результати розрахунку - на рисунку 2.6 і в таблиці 2.7.

Таблиця 2.6 - Вхідні параметри для розрахунку пропускної спроможності NB-ІоТ мережі

Найменування параметру	Сценарій	
	Автономний	В захисній смузі
Ширина смуги пропускання, МГц	10	
Потужність передавача корисного сигналу, дБп	43	35
Відстань між приймачем і передавачем, м	450	
Коефіцієнт послаблення корисного сигналу, дБ	-73,74 ... -83,28	
Рівень спектральної густини потужності АБГШ приймача, Вт	10^{-10}	

Аналіз зниження пропускної спроможності 4G БС через виникнення завад показав (таблиця 2.7), що на краю обслуговування стільники потужність внутрішньосистемних завад може досягати потужності корисного сигналу БС (рисунок 2.6).

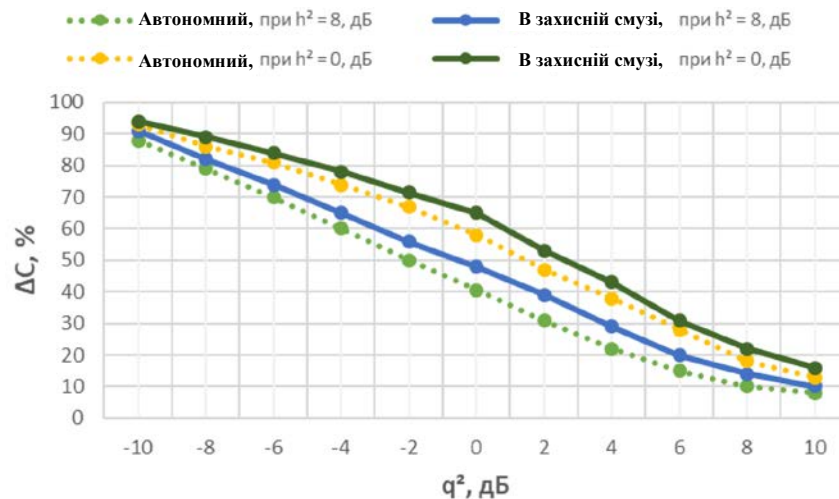


Рисунок 2.6 - Вплив завад на зниження пропускної здатності 4G БС

Таблиця 2.7 - Зміна пропускної спроможності мережі в разі збільшення рівня внутрішньосистемних перешкод

Відношення сигнал/завада	Сценарій NB-IoT / АС, %			
	Автономний , при h² 8, дБ	В захисній смузі, при h² 8, дБ	Автономний , при h² 0, дБ	В захисній смузі, при h² 0, дБ
-10	88	91	93	94
-8	79	82	86	89
-6	70	74	81	84
-4	60	65	74	78
-2	50	56	67	71.5
0	40.5	48	58	65
2	31	39	47	53
4	22	29	38	43
6	15	20	28	31
8	10	14	18	22
10	8	10	13	16

Тоді відношення сигнал/завада $q^2 \approx 0$ дБ, сигнал/шум $h^2 \approx 8$ дБ, а втрати в пропускній спроможності можуть сягати до 70% для користувачів, які опинилися на краю обслуговування стільники. Як і передбачалося, для NB-ІоТ сценаріїв у захисній смузі або всередині смуги LTE, перешкоди впливають на пропускну здатність мережі на 11-16% відсотків значніше, ніж для автономного сценарію.

Для вимірювання впливу перешкод на передачу даних NB-ІоТ, що здійснюються через діючу мережу LTE, необхідно за допомогою системи моніторингу зафіксувати значення статистичного параметра - $L.NB.UL.Interference.Avg(dBm)$. При цьому відокремити внутрішньосистемні перешкоди від зовнішньої інтерференції не є можливим.

Е. Клієнтський досвід Ця факторна група відображає якість наданих послуг зв'язку з боку клієнта, і може складатися з таких показників, як середня або максимальна швидкість передавання даних в обох напрямках, швидкість на кордоні обслуговування БС, обсяг переданих даних, кількість обірваних не з ініціативи абонента сесій, затримка на мережі тощо. Оскільки наразі йдеться про технологію, призначену для передавання невеликих обсягів даних і некритичну до затримок, які виникають під час активних інтернет-з'єднань, то для оцінювання задоволеності користувача послугами Інтернету речей ми обмежимося вимірюванням середньої швидкості передавання даних [2, 3].

Середня швидкість передавання даних базової станції на кінцевого користувача NB-ІоТ у лінії "вниз" позначається як Avg DL NB User Throughput і вимірюється в кбіт/с. Розраховується на рівні сектора і вище. Обчислюється як відношення сумарної кількості даних до суми значень часу передавання даних за всіма абонентськими терміналами. Формула для розрахунку параметра вказана нижче [6]:

$$\text{Avg DL NB User Throughput} = \frac{\sum_{i=1}^n L.NB.Thrp.bits.DL.}{\sum_{i=1}^n L.NB.Thrp.Time.DL.} \text{ [кбіт/с]}, \quad (2.8)$$

де $\sum_{i=1}^n L.NB.Thrp.bits.DL.$ – сума всіх біт інформації, переданих в напрямку вниз на сектор БС;

$\sum_{i=1}^n L.NB.Thrp.Time.DL.$ – тривалість передачі інформації

Середня швидкість передавання даних базової станції на кінцевого користувача NB-IoT у лінії "вгору" позначається як Avg UL NB User Throughput і вимірюється в кбіт/с. Розраховується на рівні сектора і вище.

Обчислюється як відношення сумарної кількості даних до суми значень часу передавання даних за всіма абонентськими терміналами:

$$\begin{aligned} \text{Avg DL NB User Throughput} = \\ = \frac{\sum_{i=1}^n (L.NB.Thrp.bits.UL - L.NB.Thrp.bits.UE.UL.LastTTI)}{\sum_{i=1}^n L.NB.Thrp.Time.UE.UL.RmvLastTTI} \text{ [кбіт/с]}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $L.NB.Thrp.bits.UL$ - сума всіх бітів інформації, переданих у напрямку вгору;

$L.NB.Thrp.bits.UE.UL.LastTTI$ - це загальний обсяг даних, за винятком даних, переданих у часових інтервалах передавання (TTI), що спустошують буфер;

$L.NB.Thrp.Time.UE.UL.RmvLastTTI$ - час, що використовується для надсилання інформації, виключаючи останні TTI [4].

Для вимірювання реальних значень середніх швидкостей передавання даних IoT користувачів рекомендується проведення експериментального дослідження та моделювання. Теоретично можливі значення представлені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Максимальні значення швидкості передавання даних у Релізі 13 [5].

Розрахункові показники	«Вниз»	Розрахункові показники	«Вгору»
Пропускна здатність несучої частоти каналу	170 кБіт/с	Пропускна здатність несучої частоти	250 кБіт/с
Максимальна швидкість без NPBSCH/PSS/SSS	26.15 кБіт/с	Максимальна швидкість без NPRACH	62.5 кБіт/с
Максимальна швидкість з NPBSCH/PSS/SSS	19.6 кБіт/с	Максимальна швидкість з NPRACH	56.25 кБіт/с

2.3 Багатокритеріальне оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при наданні послуг Інтернету речей

Аналіз найважливіших показників ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G під час надання послуг NB-IoT засвідчив, що складові мережі, найчастіше, не можуть бути охарактеризовані належною мірою одним або двома критеріями. Для правильного ухвалення рішення щодо ефективності кожного зі сценаріїв розгортання NB-IoT мають бути сформовані факторні групи, що характеризують ефективність функціонування мережі та містять у собі набір найзначущіших показників і параметрів мережі.

Очевидно, що постає питання про інструментарій, що дає змогу комплексно розрахувати й оцінити важливість кожної факторної групи всередині моделі, а також зіставити отримані результати для вибору найефективнішого сценарію розгортання NB-IoT. У цьому разі раціональним видається використання багатокритеріального підходу до оцінювання ефективності мереж мобільного зв'язку 4G, який давав би змогу враховувати: факторні групи, набір показників, що входять до цих груп, а також вагу та вплив кожної групи на загальну оцінку ефективності функціонування мереж залежно від обраного сценарію розгортання NB-IoT. Тоді основне завдання під час формування інструментарію оцінювання ефективності будь-якого проєкту полягає у розрахунку та порівнянні його узагальненого показника. Назвемо його розрахунковим коефіцієнтом (показником) ефективності.

Для вирішення цього завдання доцільно використовувати сукупність різних математичних методів і прийомів. Наприклад: факторний аналіз, метод експертних оцінок, метод Дельфі, методи експериментальних досліджень і математичного моделювання тощо [4].

Під час розроблення моделі оцінювання ефективності функціонування мережі 4G під час реалізації NB-IoT з урахуванням трьох сценаріїв розгортання застосовували метод зваженої суми оцінок критеріїв (ЗСОК).

МЗСОК - загальновідомий і часто застосовуваний метод. Привабливість МЗСОК полягає в такому: - метод видається для дослідників простим і доступним; - зручність і зрозумілість під час розрахунків; - рекомендований під час розв'язання задач ухвалення будь-якого рішення в різних постановках, наприклад, у разі вибору найкращого варіанта, необхідності ранжування всіх варіантів за їхньою переважністю тощо. - ідеальний для розв'язання багатокритеріальних задач, для яких не розроблено правильних та ефективних методів розв'язання.

Варто нагадати, що пропонується багатокритеріальний підхід до побудови моделі оцінювання ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G під час надання послуг Інтернету речей для кожного зі сценаріїв використання спектра NB-ІоТ (автономний, у захисній смузі, внутрішньосмуговий) застосовується у вигляді трикрокової процедури: - визначення основних показників (критеріїв) та їхніх факторних груп із метою оцінювання ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G під час використання вузькосмугової технології ІоТ для різних сценаріїв використання спектра; - проведення ранжування обраних показників та їхніх факторних груп за важливістю, тобто надання ваг для всіх показників усередині груп; - порівняння узагальненого показника, розрахованого для кожного з трьох сценаріїв вузькосмугової технології ІоТ.

Метод зваженої суми оцінок критеріїв націлений на розрахунок узагальненого показника ефективності мереж мобільного зв'язку. Під час використання МЗСОК застосовують чисельні показники важливості критеріїв (тобто їхню питому вагу), помножені на оцінки за показниками або факторними групами [6]:

$$F(f | w) = w_1 f_1 + w_i f_i + w_m f_m \rightarrow 1(\text{Max}), \quad (2.10)$$

де $F(f | w)$ - розрахунковий коефіцієнт ефективності, представлений у вигляді суми показників, зважених коефіцієнтами їхньої відносної важливості;

f_m - основні показники ефективності;

w_i - ваговий коефіцієнт i -го показника;

w_m - числа, які в сумі дорівнюють одиниці і є ваговими коефіцієнтами і призначені для врахування відносної важливості або значущості критеріїв;

m - кількість показників, задіяних у моделі.

На практиці показники f_m найчастіше використовують різні шкали та одиниці виміру (таблиця 2.9) через свою "природу" (наприклад, перший критерій характеризує продуктивність мережі у %, наступний - кількість пристроїв в одиницях, інший - зону покриття, тощо). Тоді пряме використання формули 2.10 не є правильним рішенням. Для справедливості роботи системи вихідні критерії (тобто показники) необхідно нормалізувати, використовуючи метод простого нормування, і таким чином привести до порівнянного вигляду. У підсумку нормалізовані критерії є безрозмірними і їхні значення перебувають у єдиній шкалі - від нульового значення до одиниці. Нормалізація відбувається відносно еталонного критерію або рекомендованого порога. Як результат, формула 2.10 перетворюється [11] на такий вигляд:

$$F(\hat{f} | w) = w_1 \hat{f}_1 + w_i \hat{f}_i + w_m \hat{f}_m \rightarrow 1(\text{Max}), \quad (2.11)$$

де \hat{f}_m – нормальний показник ефективності

Таблиця 2.9 - Приклад ненормалізованих факторних груп

Факторні групи	Продуктивність мережі	Кількість пристроїв	Зона покриття	Якість сигналу	Завади	Клієнтський досвід	Додаткові витрати
Одиниці вимірювання	%	тис. од.	дБм	дБ	дБм	кБіт/с	тг

Сумарно розрахунковий коефіцієнт ефективності $F(\hat{f} | w)$ не повинен перевищувати одиницю. Після систематизації отриманих даних за кожним сценарієм розгортання окремо, для ухвалення вірного рішення щодо вибору

ефективного і найоптимальнішого сценарію розгортання NB-ІоТ, що не чинить негативного впливу на основні технічні та економічні показники, проводиться їх порівняння за допомогою розрахункового коефіцієнта ефективності [7].

Чим більше значення зваженої суми виходить, тим варіант вважається найкращим. Тоді вигідним вважається той варіант, для якого ця сума набуває максимального значення [1].

Ваги, або коефіцієнти важливості, проставляються шляхом ранжування обраних показників та їхніх факторних груп за ступенем впливу на розрахунковий коефіцієнт ефективності мереж мобільного зв'язку із застосуванням методу них оцінок.

2.4 Особливості методу експертних оцінок у багатокритеріальному підході

Для проставлення достовірних вагових коефіцієнтів для кожної із запропонованих факторних груп було задіяно метод експертних оцінок, який полягає у збиранні, аналізі та інтерпретації незалежних суджень достатньої кількості експертів щодо ступеня значущості кожного з чинників, які підлягають оцінюванню [2]. Наразі не представлено єдину процедуру з проставлення експертних оцінок, але в більшості досліджень [3-5] уже закладено кілька основних принципів, характерних для більшості досліджень. До них належать:

1. Експертиза проводиться експертною групою, яка має достатню компетенцію у сфері дослідження, що проводиться, для проведення аналізу;
2. Вибір шкали оцінок і методу проведення експертизи встановлюється перед проведенням експертизи і не змінюється в процесі проведення дослідження;
3. Статистичне опрацювання результатів опитування та розрахунок показників узгодженості думок проводиться ідентично для кожного експерта.

З огляду на вище викладені принципи, для проведення ранжування семи факторних груп, задіяних в оцінці ефективності розгортання сценаріїв NB-ІоТ на мережі мобільного зв'язку 4G, було розроблено експертну анкету, яка містить у

собі фактори, що визначають ефективність функціонування NB-IoT, і можливі вагові коефіцієнти, які набувають значень від 0 до 1. Сумарно вага всіх факторних груп не повинна перевищувати одиницю. Для проведення оцінювання в ролі експертів були представлені досвідчені фахівці, добре обізнані з особливостями професійної діяльності, вимогами до побудови мобільних мереж 4-го покоління, і зокрема із застосуванням технології NB-IoT.

Експерти оцінювали важливість таких факторних груп:

- продуктивність мережі;
- кількість пристроїв;
- зона покриття;
- якість мережі;
- рівень внутрішньосистемних перешкод/інтерференція;
- клієнтський досвід, а саме середні значення швидкостей передавання даних до абонента і від абонента;
- витрати на модернізацію мережі.

Об'єктивність виставлених оцінок (ваг) визнається в тому разі, якщо думки експертів узгоджені між собою, тобто близькі за змістом. Ступінь узгодженості експертів оцінюється за величиною так званого коефіцієнта конкордації (W). Формулу розрахунку наведено нижче:

$$W = \frac{12 \cdot S}{d^2 \cdot (m^3 - m)}, \quad (2.12)$$

де d - кількість експертів;

m - кількість об'єктів дослідження;

S - сума квадратів відхилень сум оцінок, отриманих для кожної групи факторів, від середньої суми "важливості".

Величина S визначається за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{s=1}^d r_{is} - \bar{r} \right)^2, \quad (2.13)$$

r_{is} - ранг, що присвоюється s-м експертом i-му об'єкту;

\bar{r} - оцінка математичного очікування, що дорівнює:

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i. \quad (2.14)$$

Обчислимо коефіцієнт конкордації та зробимо оцінку значущості факторних груп, використовуючи формули (2.12-2.14). Оцінку ступеня значущості факторів експерти здійснюють шляхом присвоєння їм рангового номера. Фактору, якому експерт дає найвищу оцінку, присвоюється ранг 8, найменша оцінка - 1. Якщо експерт визнає кілька факторів рівнозначними, то їм присвоюється однаковий ранговий номер. Результатом анкетного дослідження є зведена матриця рангів.

Величина S відповідно до формули (2.13) дорівнює 5218.50.

Тоді коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{12 \cdot S}{d^2 \cdot (m^3 - m)} = \frac{12 \cdot 5218,50}{12^2 \cdot (8^3 - 8)} = 0,86$$

Основними критеріями судження і виставлення оцінок експертами виступають технічні специфікації та рекомендації партнерської групи 3GPP, а також власний досвід, рідше - рекомендації від постачальників обладнання базових станцій або абонентських пристроїв.

За великої кількості експертів домогтися узгодженої думки вельми важко. Тому коефіцієнт конкордації $W = 0.86$ свідчить про наявність досить високого ступеня узгодженості думок експертів. Отже, середнє арифметичне вагових коефіцієнтів може бути використано в моделі.

2.5 Модель оцінки ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G

Кількісне оцінювання багатокритеріальної моделі, що аналізує ефективність функціонування мобільного зв'язку 4G під час надання послуг NB-IoT, проводять із використанням функціонально пов'язаних приватних модулів, які входять до головного розрахункового модуля. Структурну схему моделі наведено на рисунку 2.7.

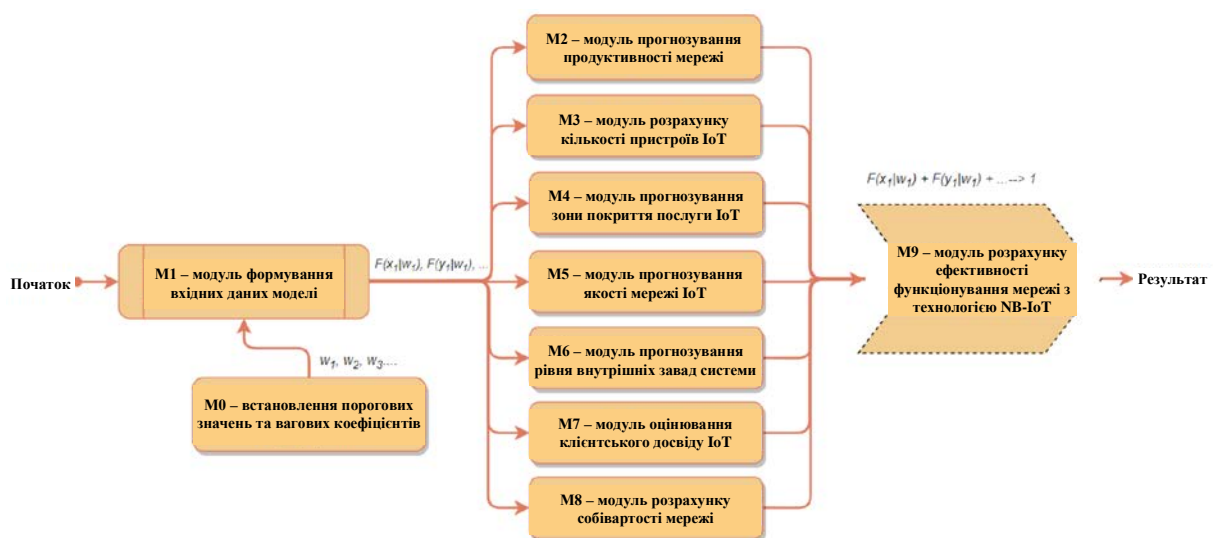


Рисунок 2.7 - Модель оцінки ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G при наданні послуг NB-IoT

Принцип дії моделі ґрунтується на сукупності семи розрахункових і прогнозованих приватних модулів, що забезпечують врахування впливу виявлених раніше факторних груп на загальний показник ефективності використання сценаріїв NB-IoT на мережі мобільного зв'язку. Два додаткові приватні модулі використовуються для формування та налаштування вхідних даних, і останній модуль виводить результат розрахунку узагальненого коефіцієнта ефективності, на основі якого ухвалюють рішення про необхідність використання конкретного сценарію NB-IoT.

Окремі моделі M0-M9 представлені такими модулями:

- M0: Модуль встановлення порогових значень і вагових коефіцієнтів.

Завдяки цьому модулю зберігається гнучкість і універсальність моделі.

Порогові значення показників мережі, найчастіше, виставляються із застосуванням положень 3GPP і технічних рекомендацій постачальника обладнання, а визначення коефіцієнтів важливості відбувається із застосуванням методу експертних оцінок;

- M1: Модуль формування вхідних даних багатокритеріальної моделі оцінки ефективності функціонування мереж. Необхідний для формування технічних вимог, які використовуються в моделі (наприклад, частотний спектр, ширина смуги, модель обладнання БС, пропускна спроможність мережі тощо), на основі аналізу основних вимог замовника відповідно до бізнес-кейса, що висувається.

Модуль стає найбільш корисним, коли заздалегідь відомий бізнес-сценарій послуги, що надається, Інтернет речей і основні вимоги, що пред'являються до неї;

- M2: Модуль прогнозу продуктивності мережі мобільного зв'язку 4G при наданні послуг NB-IoT з урахуванням обраного сценарію розгортання.

Доступність мережі та успішність сесії - два головні показники, задіяні до вимірювання в цьому модулі. Сукупність значень показників загальної продуктивності мережі є вихідним результатом модуля M2;

- M3: Модуль розрахунку кількості пристроїв IoT на умовну одиницю (стілницю, базову станцію, кластер тощо). Визначає максимально можливу кількість терміналів NB-IoT залежно від сфери застосування послуг;

- M4: Модуль прогнозу зони покриття послуг IoT. Маючи в своєму розпорядженні дані про цільові показники функціонування мережі та вимоги, що висуваються до підсистем базових станцій, аналізує достатність рівня покриття технології Інтернету речей. Для цього проводиться розрахунок ємності мережі, радіусу покриття та кількості БС. Значущий вплив на цей модуль чинять вхідні параметри - трафікова модель і технічні вимоги до мережі передачі даних.

Розрахунок зони покриття здійснюється за допомогою інструментів моделювання та/або експериментального тестування;

- M5: Модуль прогнозу якості мережі IoT. Враховує відношення прийнятого сигналу до інтерференції плюс шум. Результати вимірювання якості мережі фіксуються за допомогою проведення процесу моделювання або експериментального тестування якості мережі;

- M6: Модуль прогнозу рівня внутрішньосистемних перешкод під час надання послуг IoT. Використовується для перевірки рівня перешкод та інтерференції на предмет допустимості значень, виставлених у M0;

- M7: Модуль оцінки клієнтського досвіду під час реалізації послуг вузькосмугового Інтернету речей. Визначає сукупність вражень, одержуваних абонентом під час підключення до мережі NB-IoT. Клієнтський досвід складається з безлічі факторів і зачіпає весь цикл взаємодії абонентів з його мобільним оператором: від моменту першого підключення до послуги (мережі) і до завершення експлуатації мережі або відключення від послуги. Як вхідні параметри можуть бути використані: показники середньої та максимальної швидкостей передачі даних, загальна кількість переданої інформації (трафік), завантаженість мережі в пікові години тощо. Для вимірювання ефективності функціонування мережі NB-IoT ми зупинилися на вимірюванні середньої швидкості передавання даних у напрямках "вгору" / "вниз";

- M8: Модуль розрахунку вартості створення мережі радіодоступу, а саме капітальних та операційних витрат на реалізацію проєкту з впровадження послуг IoT. Витрати на побудову або модернізацію мережі радіодоступу визначаються індивідуально для кожного оператора і не підлягають розголошенню.

Головний розрахунковий модуль представлений як M9 - Модуль розрахунку ефективності функціонування мережі радіодоступу 4G RAN з технологією NB-IoT. Розраховує коефіцієнт ефективності трьох сценаріїв NB-IoT для різних варіантів виробничої діяльності на основі вимірів приватних показників, що визначаються модулями M2...M8.

Для створення моделі комплексної оцінки було прийнято низку таких припущень:

1. Насамперед, на момент складання проекту в операторів мобільного зв'язку є готова інфраструктура для надання послуг мобільного зв'язку 4-го покоління, тому всі параметри розглядаються з погляду лише підключення та надання послуг NB-IoT.

2. Вихідні дані приватних модулів подано у вигляді нормованих порівнянних значень.

3. Факторні групи та мережеві показники узгоджені та схвалені.

4. Оптимізація факторів і приватних показників усередині приватних модулів відбувається по черзі.

5. Виставлення порогових значень і вагових коефіцієнтів відбувається до початку аналізу і приймається умовним для всіх трьох сценаріїв використання РЧС NB-IoT.

6. Під час проведення розрахунків і вимірювань за одиницю часу приймається найкраще значення порівнюваного коефіцієнта ефективності.

Використання методу багатокритеріального аналізу, який розглядає впровадження сценаріїв розгортання NB-IoT у мережу оператора мобільного зв'язку 4G як інвестиційний проект, дає змогу провести якісну оцінку кожного з трьох можливих сценаріїв. Розроблена модель оцінки виступає надійним інструментом, застосовуваним для аналізу ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4-го покоління при наданні послуги Інтернету речей з використанням одного з трьох сценаріїв розгортання (автономного, внутрішньосмугового, у захисній смузі) вузькосмугового IoT.

Модель розв'язує задачу застосування єдиного багатокритеріального підходу до оцінки ефективності мереж мобільного зв'язку, і дозволяє:

- виокремити й систематизувати ключові показники ефективності мережі NB-IoT, використовуючи набір основних і найбільш важливих KPI під час ухвалення рішення щодо ефективності мереж;

- комплексно оцінити ефективність функціонування мобільних мереж за трьома сценаріями розгортання технології NB-IoT, використовуючи принцип багатокритеріальності;

- забезпечити високу якість послуг за рахунок використання технічних чинників, що безпосередньо впливають на ефективність використання радіоресурсів мережі.

У розробленій моделі оцінки для кожного процесу роботи з даними передбачено свій підхід, що спирається на відомі методи. До них належать: метод експертних оцінок, метод зваженої суми оцінок, метод простого нормування тощо. При цьому зона впливу кожного методу чітко локалізована, що дає змогу впоратися з можливими ризиками втрати даних (Прим: у нашому випадку - це робота з показниками і параметрами зв'язку) і загалом підвищити точність оцінки кожного модуля. Особливістю та особистим внеском автора роботи є те, що в запропонованій багатокритеріальній моделі метод експертних оцінок застосовується не для вибору основних показників ефективності функціонування мережі, а тільки для визначення величин важливості того чи іншого показника мережі.

2.6 Висновки до розділу 2

1) Сформовано сім факторних груп: продуктивність мережі, зона покриття, якість мережі, кількість NB-IoT пристроїв, рівень внутрішньосистемних завад (інтерференція) на співіснуючу мережу 4G, середні та пікові значення швидкості передавання інформації, інвестиційні витрати на побудову та модернізацію мережі.

2) Обрано 9 основних мережевих параметрів, які найповніше характеризують зміну ефективності мереж NB-IoT залежно від використаного сценарію розгортання технології NB-IoT.

3) Для визначення важливості мережевих показників і факторних груп використано метод експертних оцінок. Результати показують, що найбільш

значущими факторами є: клієнтський досвід (середні швидкості передачі даних), перешкоди (інтерференція), зона покриття мережі. Найменший вплив мають такі факторні групи: число NB-IoT пристроїв (3%), продуктивність мережі (5%), витрати на модернізацію мережі (11%), якість мережі (13%).

4) Розроблено модель оцінювання ефективності застосування технології NB-IoT на мережі мобільного зв'язку 4G, що дає змогу провести комплексне дослідження мереж NB-IoT із застосуванням набору факторних груп і мережевих показників, які входять до складу приватних розрахункових і прогнозованих модулів.

Принцип дії моделі ґрунтується на замірі та зборі якісних вимірювань показників мобільної мережі та технології NB-IoT з метою забезпечення врахування впливу виявлених раніше факторних груп на загальний показник ефективності використання сценаріїв NB-IoT на мережі мобільного зв'язку.

3 МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ 4G

У попередньому розділі на основі затверджених критеріїв було розроблено комплексну модель оцінювання ефективності використання мережевих ресурсів мережі радіодоступу 4G під час застосування вузькосмугових каналів технології NB-IoT із врахуванням різноманітних технічних чинників, що впливають на якість функціонування мережі. Розроблена модель оцінювання ефективності та основні положення дисертаційного дослідження стали основою для розроблення багатокритеріального методу комплексного оцінювання ефективності функціонування мереж 4G і технології NB-IoT.

На відміну від раніше використовуваних способів і підходів, запропонований метод має низку переваг:

- в основі закладено принцип багатокритеріальності. Таким чином, ефективність функціонування мереж з технологією NB-IoT розглядається комплексно, з урахуванням технічних та економічних складових планування радіомереж;

- метод націлений на порівняння ефективності функціонування трьох сценаріїв розгортання NB-IoT;

- запропоновані мережеві показники та факторні групи універсальні та застосовні до кожного зі сценаріїв NB-IoT, що дає змогу провести вірну оцінку їхньої ефективності;

- факторні групи достатньо гнучкі, що дає змогу змінювати чи доповнювати набір показників та параметрів мережі всередині кожної із них;

- метод має на меті порівняння ефективності функціонування мереж з технологією NB-IoT.

3.1 Математичні основи методу розподілу радіочастотного спектру в мережах 4G з технологією NB-IoT

Метод складається з восьми послідовних етапів (кроків), обов'язкових до виконання для досягнення найдостовірнішого результату роботи алгоритму з визначення найкращого сценарію використання спектра NB-IoT.

Етап 1. Аналіз основних вимог до послуги IoT На першому етапі формується технічне завдання на основі затвердженого бізнес-сценарію надання послуги Інтернет речей. Тут складаються основні вимоги та технічні можливості оператора зв'язку та постачальника IoT-послуг. Цей етап важливий, оскільки вимоги до кінцевого результату моделі оцінки можуть диференціюватися залежно від сфери реалізації послуги.

Тому важливо максимально точно сформулювати основні вимоги для мережі мобільного зв'язку з метою забезпечення повсюдного доступу до послуги Інтернет речей. Приклад кількох таких запитів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Рекомендації для сфери застосування послуг IoT [4].

Набір показників	Технологія	"Розумні" лічильники води	Автономні машини	Автоматизація підприємств
Доступність мережі	LTE	99%	99.9%	99.999%
Смуга пропускання	5 Мбіт/с	50 кбіт/с	10 Мбіт/с	50 Мбіт/с
Покриття	Оптимальне -95...-105 дБм	Глибоке > -115дБм	Відмінне - 95 дБм	Глибоке > -115дБм
Чутливість до затримок	60-80 мс	5 с	1 мс	1 мс
Режим енергозбереження	14 годин 4000мАг	10 років 4800 мАг	Оптимальний	Оптимальний

Інтерпретувати рекомендації слід наступним чином: згідно з таблицею 3.1, для реалізації бізнес-кейса з автономними машинами потрібно, насамперед, забезпечити зону покриття з рівнем покриття RSRP не гірше -95дБм, і встановити мінімальну затримку на мережі (до 1 мс), тоді як для "Розумного будинку"

критичним є глибоке покриття всередині будівель при порівняно невеликій смузі пропускання (50 кбіт/с).

Подібні рекомендації формуються відповідно до чітких вимог сценарію використання послуги і не завжди можуть бути доповнені або змінені в процесі планування мережі IoT. Причина - зміна вимог наприкінці проєкту спричинить повний перерахунок усіх попередніх етапів алгоритму. До технічних вимог може бути віднесено інформацію про наявний або запланований для використання частотний діапазон, пропускну спроможність мережі, готовність мережі з погляду інфраструктури та відповідності програмного забезпечення тощо. "М1: Модуль формування вхідних даних моделі" оцінки ефективності функціонування мереж відповідає за виконання першого кроку.

Етап 2. Формування факторних груп. Після узгодження вимог до мережі мобільного зв'язку для реалізації послуг IoT проводиться факторний аналіз, присвячений формуванню факторних груп. Створення факторних груп відбувається на основі вимог бізнес-кейса (Модуль 1), і з урахуванням необхідності дотримання такого правила - сукупність факторних груп повинна повною мірою давати оцінку таким критеріям: якості послуг, що надаються, стійкості функціонування мережі, можливих інвестиційних витрат на побудову нової або модернізацію наявної мережі (наприклад, ліцензія на спектр, обладнання, термінали і т.д.). Детально цей процес описано в підрозділі 2.2. Відмінною рисою розробленого методичного підходу є те, що під час формування факторних груп і добору показників мережі важливе значення приділяється тому, щоб показники всередині групи були актуальні для всіх трьох сценаріїв.

Критерії примітні тим, що побудовані на основі аналізу технічних та економічних складових планування радіомереж. Відомо, що типовим завданням для будь-якого оператора зв'язку є виявлення з усього різноманіття чинників, що існують, найвагоміших і побудова на їхній основі матриці параметрів, що впливають на бізнес-модель і якість функціонування мереж 4G [2]. Визначення

таких чинників дає змогу провести грамотне оцінювання якості роботи мережі та мережевих сервісів, що надаються.

Етап 3. Вибір показників-індикаторів факторних груп Добір показників і параметрів, що характеризують ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку 4G при використанні технології NB-IoT, і враховують варіативність сценаріїв розгортання, відбувається на третьому етапі. Оскільки формування факторних груп відбувається з використанням часткових показників і параметрів, то останні мають дотримуватися принципу співмірності та належати до єдиного аспекту факторної групи.

Варто зазначити, що набір показників мережі та факторні групи загалом можуть доповнюватися новими метриками в міру необхідності. Завдання третього етапу - з усього різноманіття вивчених у першому розділі показників мережі необхідно виявити найбільш значущі (важливі), що впливають на ефективність функціонування мобільної мережі зв'язку.

Етап 4. Встановлення порогових значень і вагових коефіцієнтів моделі На четвертому етапі для ранжування обраних показників та їхніх факторних груп за важливістю, застосовується метод експертних оцінок, що дає змогу призначити ваги для кожного з цих показників усередині групи. Метод детально описано в розділі 2.

Визначення рекомендованих порогових значень показників мережі всередині відповідних факторних груп також відбувається на четвертому етапі. Межі порогових значень найчастіше фіксуються на основі готових рекомендацій МСЕ, стандартів стільникового зв'язку або чинних нормативних актів. Наприклад, таблиця 3.2. Далі слід провести нормування приватних показників і факторних груп, а також здійснити переведення їх у зіставний вигляд.

Таблиця 3.2 - Рекомендовані порогові значення показників якості мережі мобільного зв'язку 4G.

№	Показник	Рекомендоване значення	
		Місцевість *	
		1	2
1	RSRP - значення потужності прийнятих опорних сигналів на вході 4G приймача, дБм	>-90 / 5	>-100 / 10
2	RSRQ - якість прийнятих пілотних сигналів на вході 4G приймача, дБ	>-12 / 15	>-14 / 15
		.. .	
N	SINR - відношення рівня прийнятого сигналу на вході 4G приймача і рівня інтерферуючого сигналу, дБ	< 3 / 15	< 0 / 10

Примітка: 1 - висока щільність забудови (urban);

2 - околиці, низька щільність забудови (suburban).

Четвертий етап методу функціонально закладений у Модулі 0 - Модуль встановлення порогових значень і вагових коефіцієнтів.

Етап 5 - Побудова моделі оцінювання ефективності мережі NB-IoT За допомогою методу зваженої суми оцінок критеріїв (МВСК) обрані факторні групи зв'язуються за допомогою єдиного узагальненого показника - розрахункового показника ефективності.

Етап 6. Моделювання основних показників мережі Оцінювання ефективності функціонування мережі залежно від сценарію використання спектра NB-IoT відбувається завдяки використанню сукупності різних методів і прийомів. Тут, пропонується проведення імітаційного моделювання для вимірювання значень мережевих показників, що входять до складу розроблених факторних груп. Цьому присвячено шостий етап методу. Здійснюється також експериментальне дослідження, що використовується для проведення моделювання та експериментальних досліджень, що зумовлено необхідністю отримання реальних значень показників, задіяних у розробленій моделі, для кожного сценарію розгортання мережі NB-IoT, і, як результат, ухвалення

рішення на користь вибору найбільш вигідного сценарію NB-ІоТ. Порівняння здійснюється шляхом розрахунку єдиного комплексного коефіцієнта моделі (Етап 8).

Етап 7. Облік невизначеностей і ризиків. Сьомий етап присвячено врахуванню невизначеностей і ризиків при складанні методичного підходу до розрахунку єдиного показника. Уточнення або внесення наведених вказівок, а також внесення до складу робіт пропущених операцій або виключення зі складу робіт операцій, що фактично не виконуються, відбувається на цьому контрольному етапі.

У разі наявності доповнень або необхідності внесення змін формується пояснювальна записка до проекту, яка має містити детальну характеристику нормативної бази, опис усіх змін моделі із зазначенням причин, що їх викликали. Нормативні дані, що характеризують ступінь технічної обґрунтованості проєктованих доповнень і змін, кількість і тривалість проведених нормативних спостережень, обсяг, отриманих за час спостережень, вимірювань, відсоток виконання норм тощо.

Етап 8. Вибір сценарію розгортання NB-ІоТ Восьмий етап - завершальний. Передбачає порівняння коефіцієнта ефективності, розрахованого для кожного з трьох сценаріїв NB-ІоТ за формулою 2.11:

$$F(\hat{f} | w) = w_1 \hat{f}_1 + w_i \hat{f}_i + w_m \hat{f}_m \rightarrow 1(\text{Max}),$$

Порівнюючи три розрахункових коефіцієнти ефективності між собою, ухвалюють рішення про вибір найоптимальнішого сценарію. Наприклад:

$$F_{\text{внутр}}(\hat{f} | w) < F_{\text{авт}}(\hat{f} | w) < F_{\text{зах}}(\hat{f} | w).$$

Розроблений метод дає змогу провести всебічну оцінку ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G при наданні послуг NB-IoT для кожного сценарію розгортання в частотному спектрі.

Важливою складовою методу є використання результатів моделювання та експериментального тестування продуктивності кожного сценарію розгортання NB-IoT. Такий підхід гарантує отримання найбільш достовірних результатів дослідження та підвищує точність роботи моделі, тим самим виділяючи її серед наявних.

3.2 Методика проведення моделювання мереж мобільного зв'язку 4G

Вибір найбільш підходящого сценарію розгортання технології NB-IoT проводиться з використанням розробленої комплексної моделі, яка розраховує ефективність кожного сценарію розгортання на основі методу багатокритеріальної оцінки із застосуванням результатів імітаційного моделювання та емпіричного дослідження. Для цього проводиться дослідження ефективності функціонування трьох сценаріїв розгортання технології вузькосмугового Інтернету речей, запущеної на 4G мережі в діапазоні 800 МГц у приміській (suburban) зоні. Зона відрізняється меншою щільністю забудови порівняно з міським типом (urban). Частота 800 МГц обрана як найпоширеніша для передачі 4G даних серед операторів Казахстану.

Проведення моделювання та експериментальних досліджень зумовлено необхідністю отримання реальних значень показників, задіяних у розробленій моделі, для кожного сценарію розгортання мережі NB-IoT, і, як результат, прийняття рішення на користь вибору найбільш вигідного сценарію NB-IoT. Порівняння здійснюється шляхом розрахунку єдиного комплексного коефіцієнта моделі $F(f|w)$.

Подібне дослідження представляє цінність, перш за все, тому, що за допомогою моделювання дає змогу завчасно отримати достовірну інформацію про стан (або поведінку) мережі мобільного зв'язку в умовах, наближених до

реальних, а також на їхній основі вжити заходів щодо поліпшення якості роботи мережі перед введенням у комерційну експлуатацію [7]. Нижче наведено методику моделювання та експериментального дослідження.

Методика дослідження ефективності функціонування технології NB-IoT з урахуванням використання одного з трьох можливих сценаріїв розгортання є комбінованим підходом, що містить у собі: моделювання, експериментальні дослідження та аналіз отриманих даних.

Методику розроблено з урахуванням положень із міжнародних стандартів партнерської групи 3GPP [2], рекомендації Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ) [78], GTI TDD [10], робочих специфікацій, підготовлених телекомунікаційними компаніями Huawei, Rohde&Schwarz, і наукових пошуків, представлених у першому розділі. Важливо зазначити, що задіяний підхід [11] вирізняється достатньою точністю проведення вимірювань ключових показників ефективності мережі NB-IoT, що підтверджується високою збіжністю результатів моделювання та експерименту. Інструментальні методи вимірювання та роботи з основними показниками функціонування мереж детально розкрито в [9].

Об'єктом дослідження виступає кластерна зона мобільної мережі, що складається з шести функціонуючих 4G базових станцій, які випромінюють у діапазоні 800МГц. Кластерна зона обрана не випадково. Критерії відбору: приміська зона, розвинена інфраструктура мережі, завантаженість 4G БС не більше ніж 80%, середня відстань між БС не більше ніж 3 км.

Для проведення дослідження технології NB-IoT використовується функціонуюча мобільна мережа 4G, оскільки це спрощує процес проведення тестування NB-IoT, і виключає необхідність планування і запуску 4G мережі з нуля. Моделювання та експериментальне тестування проводиться по черзі для кожного з трьох режимів NB-IoT (автономний, у захисній смузі, внутрішньосмуговий) за однакових зовнішніх умов.

Практична частина. Тут викладено результати експериментального дослідження та імітаційного моделювання роботи системи комерційного обліку

лічильників/датчиків NB-IoT у реальних умовах на мережі мобільного зв'язку 4G. Для цього проводяться імітаційне моделювання в спеціалізованих програмних середовищах Forsk Atoll 3.3.2 і U-Net Network Planning Tool, та експериментальне дослідження на тестовому кластері 4G мережі одного з мобільних операторів зв'язку (mobile network operator, MNO) згідно з параметрами БС, зазначеними в таблиці 3.4.

У вузькосмуговій технології IoT застосовується безліч відомих функцій і методів, зафіксованих у стандарті стільникового зв'язку LTE. У зв'язку з цим методологія тестування NB-IoT може бути схожа з методологією тестування технології 4G. Після здійснення необхідних поліпшень методика дослідження, що проводиться, стала містити в собі чотири основні завдання, що забезпечують максимальну достовірність результатів вимірювань, а саме - відтворення умов тестування технології NB-IoT на тестовій ділянці мережі 4G, найбільш наближених до реальних; - моделювання продуктивності й основних показників NB-IoT мережі при використанні внутрішньосмугового, автономного та сценарію розгортання в захисній смузі; - моделювання продуктивності та основних параметрів NB-IoT мережі у вищезазначених трьох режимах з використанням програмного середовища Forsk Atoll 3.3.2 і U-Net Network Planning Tool.

Архітектура мережі. На сьогодні найперспективнішою сферою застосування технології NB-IoT виступає сфера віддаленого контролю та управління датчиками/лічильниками, де технологія вузькосмугового IoT дає змогу збирати дані та здійснювати дистанційний контроль для постачальників електроенергії, теплової енергії, водоканалів тощо [8]. Саме цей бізнес-кейс узятो за основу під час проведення оцінювання ефективності мереж NB-IoT, шляхом проведення експериментальних досліджень і моделювання відповідно до структурної діаграми, представленої на рисунку 3.1.

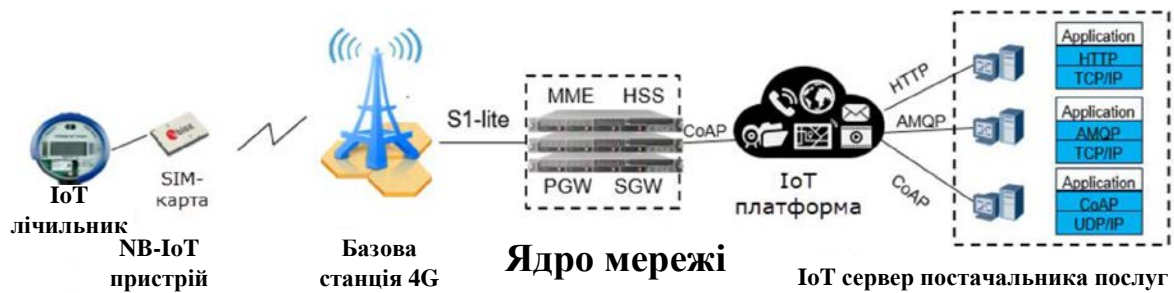


Рисунок 3.1 - Архітектура NB-IoT мережі для послуг ЖКГ

Структурна схема мереж NB-IoT схожа з 4G мережею, і містить п'ять головних функціональних елементів мережі:

1. Клієнтські термінали NB-IoT (датчики, сенсори тощо);
2. Базові станції, які забезпечують килимове покриття технологією NB-IoT і підтримують три варіанти використання спектра;
3. Ядро мережі, яке відповідає за під'єднання NB-IoT БС до хмарної обчислювальної платформи IoT;
4. хмарна платформа, призначена для обробки даних різних послуг; 5. вертикальний IoT-центр, який отримує, записує дані NB-IoT, і контролює роботу NB-IoT терміналів [2].

Для проектування NB-IoT мережі було використано три стандартизовані режими роботи:

- автономний режим роботи (standalone mode);
- робота в захисній смузі мережі 4G (guard band mode);
- робота в смузі мережі 4G (in-band mode).

Імітаційне моделювання націлене на створення умов роботи технології NB-IoT на 4G мережі в умовах, максимально близьких до комерційних. Для цього задіюється програмне середовище Forsk Atoll v.3.3.2 [6]. Forsk Atoll - це система автоматизованого проектування мереж мобільного зв'язку, що містить у собі програмне, математичне та інформаційне забезпечення. Завдяки поєднанню в собі архітектурних і функціональних можливостей, ПЗ дає змогу запускати процеси проектування та оптимізації мереж.

Налаштування середовища моделювання встановлено відповідно до поточних налаштувань тестової мережі 4G. Вхідні дані для проведення моделювання наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Вхідні дані моделювання

Вхідні дані	Параметри
1	2
Режим роботи технології NB-IoT	Автономний, внутрішньосмуговий, в захисній смузі
Тип місцевості	Приміський (Suburban)
Густина населення	2636 /км ²
Максимальна густина NB-IoT пристроїв (UE)	800 /км ²
Архітектура мережі	18 секторів (6 БС), які працюють в діапазоні 800 МГц
Ширина смуги пропускання	10 МГц (LTE), 180 кГц (NB-IoT)
Потужність прийомо-передавача NB-IoT	43/35 дБп
Конфігурація антенної системи	БС: 1 Tx, 2 Rx; UE: 1 Tx, 1 Rx
Завантаження LTE БС	<80%
Доступні ресурси	1 PRB на пристрій (180kHz)
BTS receiver noise figure	3 дБ

Модель поширення сигналу - Cost231 Hata, використовується для роботи в діапазоні 0.8 - 2 ГГц з висотою БС не менше ніж 30 м, висотою антени клієнтського пристрою NB-IoT від 1 до 10 м і середньою відстанню між ними в інтервалі 1-20 км. Формально модель рекомендується до використання на мережах, де БС не нижча за 30 м, однак на практиці її застосовують для нижчих висот за умови, що навколишні будівлі набагато нижчі за висоту антени, як у нашому випадку. Також ця модель не може бути застосована на місцевості, де відстань між великими будівлями менша за 1 км.

З використанням цієї моделі були вручну проведені розрахунки розрахунки для знаходження радіуса (зони) покриття базової станції. Для цього виконується така послідовність:

1. З урахуванням технічних характеристик БС розраховується бюджет каналу - максимально допустимі втрати при поширенні сигналу (МДП).
2. Проводиться розрахунок зони покриття однієї макробазової станції.
3. За необхідності розраховується необхідна кількість сайтів для забезпечення покриття і ємності мережі.

Максимальні втрати при поширенні сигналу (загальне загасання за енергетичними характеристиками) розраховується за формулою:

$$PL_{\text{сум}} = P_{\text{ЕІМ}} - S_{\text{прм}} + G_{\text{пр. ант.}} - L_{\text{пр. ант.}} - M_{\text{прон.}} - M_{\text{пом.}} - M_{\text{зат.}} + G_{\text{хенд.}} \quad (3.1)$$

де $P_{\text{ЕІМ}}$ - еквівалентна ізотропна випромінювана потужність (ЕІВП) передавача, Вт;

$S_{\text{прм}}$ - чутливість приймача, дБм;

$G_{\text{пр. ант.}}$ - коефіцієнт підсилення антени, дБі;

$L_{\text{пр. ант.}}$ - втрати в оптоволоконному антенно-фідерному тракті, дБ;

$M_{\text{прон.}}$ - запас на проникнення сигналу всередину будівель в умовах передмістя (рідкісна забудова), дБ;

$M_{\text{пом.}}$ - запас на внутрішньосистемні перешкоди на вході приймача, дБ;

$M_{\text{зат.}}$ - запас на затінення, дБ;

$G_{\text{хенд.}}$ - виграш від хендовера, дБі.

Використовувані для розрахунку максимальних втрат дані наводяться нижче в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Початкові дані для розрахунку $PL_{сум}$ у напрямку "вниз"/"вгору"

Вхідні енергетичні параметри	Умовне позначення	Направлення «вниз»/Downlink	Напрямок «вгору»/Uplink
Вихідна потужність, дБп	$P_{прд.}$	46	23
Коефіцієнт підсилення базової станції, дБі	$G_{прд. ант}$	18	0
Коефіцієнт підсилення антени термінала, дБі	$G_{прм. ант}$	0	18
Втрати а антенно-фідерному тракті, дБ	$L_{пр. ант},$ $L_{прд. фід}$	0,5	0
Виграш сумарної потужності передавачів, дБ	$G_{прд.}$	3	0
Потужність теплового шуму, дБп	$P_{ш}$	-104,4	-118,4
Рекомендоване відношення сигнал/шум, дБ	N_{SNR}	-0.24	0.61
Коефіцієнт шуму приймача, дБ	$N_{ш}$	7	2,5
Запас на завади, дБ	$M_{завади}$	8,51	3,8
Запас на проникнення всередині будинків в умовах при передмістя, дБ	$M_{проник}$	12	
Запас на затінення (при ймовірності покриття 95%), дБ	$M_{затін}$	8,7	
Виграш від хендвера, дБ	$G_{хенд.}$	2,5	

Зробимо розрахунок необхідних параметрів із застосуванням формули (3.1).

Для лінії "вниз" (Downlink):

$$P_{EIM_DL} = P_{прд.} + G_{прд.} + G_{прд. ант.} - L_{прд. ф.} = 46 + 3 + 18 - 0,5 = 66,5 \text{ дБп}$$

$$S_{прм_DL} = P_{ш} + N_{SNR} + N_{ш} = -104,4 - 0,24 + 7 = -97,6 \text{ дБп}$$

Для лінії «вгору» (Uplink):

$$P_{EПМ_UL} = P_{прд.} + G_{прд.} + G_{прд.ант.} - L_{прд.ф.} = 23 + 0 + 0 - 0 = 23 \text{ дБп}$$

$$S_{прм_UL} = P_{ш} + N_{SNR} + N_{ш} = -118.4 - 0,61 + 2.5 = -115.29 \text{ дБп}$$

Тоді сумарне затухання по енергетичних характеристиках:

$$PL_{сум_DL} = 66,5 + 97,6 - 0 - 0 - 12 - 8,51 - 8,7 + 2,5 = 137,39 \text{ дБп}$$

$$PL_{сум_UL} = 23 + 115,29 + 18 - 0,5 - 12 - 3,8 - 8,7 + 2,5 = 133,79 \text{ дБп}$$

Для розрахунку дальності зв'язку і радіусу обслуговування БС вибирається мінімальне значення з виконаного розрахунку - $PL_{сум_UL} = 133.79$ дБ.

Для розрахунку радіуса покриття базових станцій використовується формула розрахунку МДП за допомогою Cost231 Hata моделі. Тут максимально допустимі втрати розраховуються за формулою:

$$PL_{suburban} = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) + C_m, \quad (3.2)$$

де $PL_{suburban}$ - втрати сигналу при поширенні в приміській зоні, у [дБ];

f - задіяний частотний діапазон, у [МГц];

h_m - висота приймального пристрою, у [м];

h_b - висота передавальної антени базової станції, у [м];

a - ефективний коефіцієнт корекції приймальної антени;

d - відстань між приймачем і передавачем, у [км] [7];

C_m - поправочний коефіцієнт, заданий як 0 дБ для приміської зони, 3дБ - для великих міст.

Знаючи, що середня висота БС у приміській зоні - 27м, а висота рухомої станції - 3м, визначимо зону покриття сигналу БС d під час поширення в приміському кластері за формулою Cost321-Nata (3.1):

$$PL_{suburban} = 46.3 + 33.9 \log_{10}(800) - 13.82 \log_{10}(27) - a(h_m) + \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10}(24)) \log_{10}(d) + 0$$

Поправочний коефіцієнт ah_m обчислюється за формулою:

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7) h_m - (1,56 \log f - 0,8) = 2,15 \quad (3.3)$$

У формулу (3.1) підставивши отримані значення, обчислимо зону покриття стільника d :

$$133,79 = 46,3 + 33,9 \log_{10}(800) - 13,82 \log_{10}(27) - 2,15 + \\ + (44,9 - 6,55 \log_{10}(24)) \log_{10}(d) + 0$$

Рекомендований радіус покриття БС d склав 2.03 км.

Надалі за необхідності проведення вимірювань на межі покриття базових станцій LTE саме ця відстань буде враховуватися.

Доведено, що в міру віддалення клієнтського терміналу від базової станції різниця в значеннях RSRP для трьох сценаріїв розгортання NB-IoT буде значно збільшуватися і досягне піку на межі покриття секторів БС.

Крім вибору сценарію розгортання NB-IoT, необхідно враховувати, що в реальному середовищі, на відміну від результатів моделювання, є достатньо чинників, що впливають на зону покриття і потребують уваги на етапі планування радіомережі. До них належать: вид споруди (місто/місто/село), радіус обслуговування БС (наприклад, відстань між БС LTE і GSM можуть

відрізнятись), доступний ліцензійний спектр, потужність приймально-передавальних пристроїв і багато іншого.

Також керівництвом до аналізу наявності впевненого NB-IoT покриття можуть виступати міжнародні рекомендації та польові випробування [1, 2]. У деяких випадках MNO від самого початку застосовують відомі бізнес-моделі з уже встановленими вимогами до рівня покриття, якості сигналу, що приймається, швидкості та інших важливих показників. У такому разі рекомендації до рівня покриття висуваються відповідно до інших затверджених параметрів, наприклад, швидкості передачі даних служби NB-IoT.

Таблиця 3.5 - Вимога до показників RSRP і SINR для забезпечення відомої швидкості передавання даних IoT послуг

Показники	Базові рекомендовані вимоги	Спеціальні вимоги 1	Спеціальні вимоги 2
MCL (maximum coupling loss, максимальна втрата зв'язку, що відображає вимогу до покриття висхідної лінії зв'язку)	157 дБ	154 дБ	151 дБ
RSRP DL (Автономний сценарій, за вихідної потужності передавача БС - 32.2дБм, total power 1x20 Вт)	-125 дБм	-122 дБм	-119 дБм
RSRP DL (Внутрішньосмуговий, сценарій використання захисної смуги, при вихідній потужності передавача БС - 24.2 дБм, total power 2x1.6 Вт)	-133 дБм	-130 дБм	-127 дБм
DL SINR	-9 дБ	-5 дБ	-4 дБ
Avg DL User Throughput	670 біт/с	1.2 кбіт/с	1.8 кбіт/с
Avg UL User Throughput	160 біт/с	300 біт/с	600 біт/с

Під час проведення моделювання також заміряли радіус покриття для найчастіше використовуваних частотних діапазонів LTE для реалізації технології NB-IoT. Результати наведено в таблиці 3.6. Наступні вхідні дані використовували для тестування: три варіанти реалізації NB-IoT, потужність передавача NB-IoT - 43 і 35 дБм, NRS-потужність, що дорівнює 32.2 дБм, рекомендований рівень покриття послугою щонайменше -122.34 дБм.

Таблиця 3.6 - Зона покриття [км] NB-ІоТ для трьох сценаріїв розгортання і різних частотних діапазонів при значенні RSRP -122.34 дБм

Сценарій NB-ІоТ	Частотний діапазон	800МГц	900МГц	1800 МГц	2100 МГц
Автономний	Місто	1.39	1.34	0.97	0.95
	Передмістя	2.87	2.74	1.98	1.97
	Село	9.7	8.43	5.87	5.32
У захисній смузі	Місто	1.34	1.23	0.76	0.66
	Передмістя	2.67	2.53	1.89	1.54
	Село	9.1	8.33	5.84	5.02
Внутрішньосмуговий	Місто	1.21	1.21	0.75	0.63
	Передмістя	2.03	1.94	1.87	1.52
	Село	8.91	8.12	5.7	5

З таблиці 3.6 видно, що для низькочастотного сегмента покриття NB-ІоТ значно вище. При однаковому значенні RSRP сигналу зона покриття при використанні частоти в 800 МГц приблизно в 2 рази більша, ніж при 2.1 ГГц. Можна зробити висновок, що найкращими частотними діапазонами для запуску технології NB-ІоТ є 800 МГц і 900 МГц.

Аналіз зони покриття показав, що при бажанні досягти певного рівня покриття NB-ІоТ RSRP, необхідно враховувати не тільки сценарії реалізації NB-ІоТ, а й слід брати до уваги такі фактори, як доступні спектральні ресурси оператора, відомі вимоги до якості мережі та клієнтського досвіду. Рекомендується віддавати перевагу низькочастотним сегментам, таким як 800 МГц/900 МГц [8].

Аналіз якості мережі NB-ІоТ. Згідно з рекомендаціями партнерської групи 3GPP рекомендоване значення SINR для прийнятної роботи мережі NB-ІоТ лежить у межах 7...10 дБ. За від'ємного значення SINR рівень перешкод перевищує рівень корисного сигналу, що є частим явищем на межі покриття сектора приймально-передавальної базової станції. Оскільки спочатку було поставлено завдання протестувати NB-ІоТ KPIs у максимально наближених до реальних умовах, то вимірювання DL SINR проводять у вже відомій локації - 2.03 км від базових станцій NB-ІоТ, де рівень покриття RSRP не менший за -

122.34 дБм. На рисунку 3.2 представлено усереднені значення NB-IoT DL SINR: в автономний сценарій - 7.96 дБ, у захисній смузі - 7.61 дБ, поєднане використання спектра - 7.52 дБ.

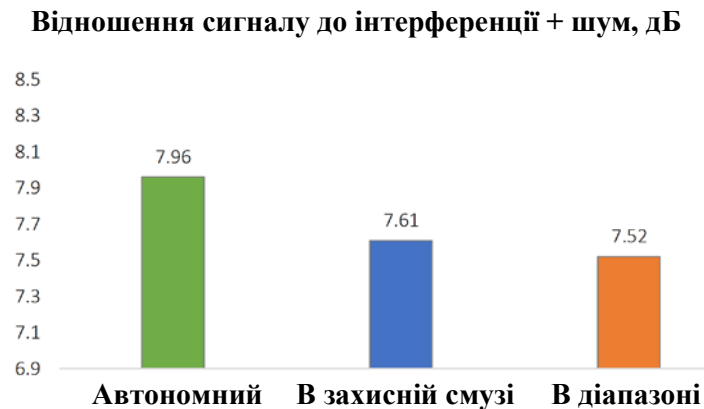


Рисунок 3.2 - Вимірювання DL SINR для трьох сценаріїв розгортання технології NB-IoT

Загалом, можна зробити висновок, що всі три сценарії NB-IoT забезпечують належну якість мережі. Однак, оскільки внутрішньосмуговий сценарій у попередньому аналізі показав найгірший рівень сигналу RSRP, що визначає зону покриття, та в поточному аналізі за якістю мережі знов пасе задніх, то слід перевірити наявність кореляції між показниками RSRP та SINR.

Результати кореляції одних із головних факторних груп: зони покриття та якості мережі NB-IoT у приміській зоні для внутрішньосмугового сценарію розгортання NB-IoT наведені на рисунку 3.10. Дослідження показують, що:

1. Втрата зв'язку між приймально-передавальною базовою станцією та абонентським терміналом відбувається за умови перевищення порогового значення RSRP в -130 дБм і SINR -17 дБ (рисунок 3.10). При цьому, тільки 2.2% проведених вимірювань показують рівень сигналу -130 дБм і нижче, що зумовлено дальністю розташування від базової станції та існуючими умовами географічної місцевості.

2. За умови, що чутливість приймача становить щонайменше -141 дБм, деякі абонентські термінали все ще можуть підключатися до базової станції та передавати дані на зазначену відстань. Підключення UE далі рекомендованої зони покриття - 2.7 км, призводить до втрати сигналу та збільшення обривів зв'язку на мережі (рисунок 3.3).

3. Максимальне значення NB-IoT RSRP для приміської зони становить - 93.34 дБм (таблиця 3.8.). На відстані 2.03 км від базової станції, рівень сигналу опускається до -122.34 дБм і DL SINR до 7.52 дБ.

Слід зазначити, що результати дослідження DL RSRP and SINR не є фіксованими, оскільки залежать від багатьох факторів, як-от: завантаженість та умови експлуатації базової станції, чутливої приймальної антени UE, погодні умови тощо. Однак, проведення дослідження допомагає встановити загальний характер зміни вищевказаних показників для трьох варіантів використання РЧС при запуску технології NB-IoT.

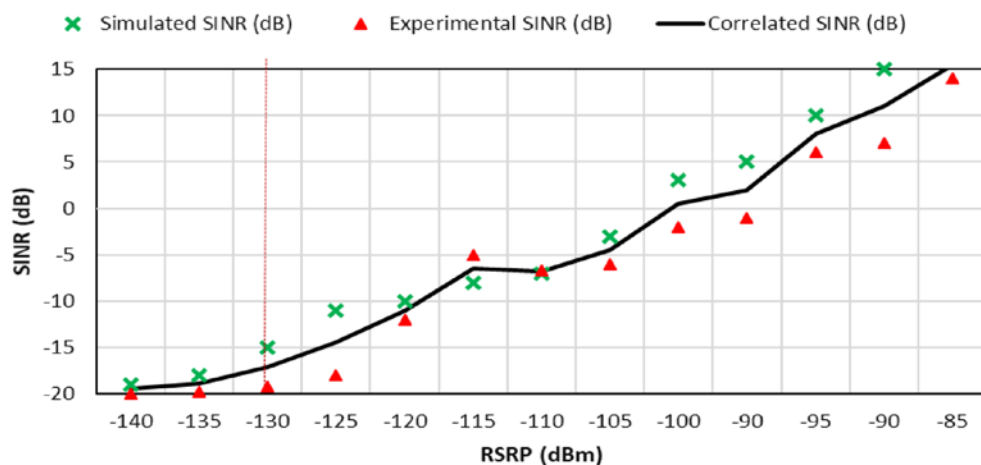


Рисунок 3.3 – Залежність якості мережі NB-IoT (SINR) від радіопокриття (DL RSRP)

Згідно з [2, 7] автономний режим розгортання NB-IoT досягає пікових (максимальних) значень UL і DL Throughput - 22.7 і 62.5 кбіт/с відповідно. При цьому, результати дослідження доводять, що максимально можлива швидкість, одержувана за допомогою імітаційної моделі в програмному середовищі Fork

Atoll 3.3.2, і під час експериментального дослідження в тестовому кластері стільникової мережі 4G, не набагато відрізняються - відносна похибка вимірювань складає не більше 7.9%.

Причиною цього можуть бути як неконтрольовані зміни зовнішніх радіоумов (наприклад, завантаження мережі в пікові години роботи), так і обмеження на стороні абонентських терміналів, а також різниця в налаштуваннях вхідних даних програмного середовища.

Варто підкреслити, що подібні дослідження становлять особливу цінність, оскільки дають змогу завчасно отримати достовірну інформацію про поведінку користувачів мережі та вжити заходів для поліпшення продуктивності NB-IoT мережі перед введенням у комерційну експлуатацію [7, 15].

При цьому аналіз результатів дослідження показав високу збіжність значень, що підкріплює достовірність отриманих результатів і роботи в цілому.

3.3 Оцінювання ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G з технологією NB-IoT для різних сценаріїв використання радіочастотного спектра

Згідно із запропонованим методом оцінка ефективності функціонування трьох сценаріїв NB-IoT проводиться на восьмому етапі. Тут, значення основних показників мережі, отримані в ході проведення експериментального дослідження, проходять процес нормування. Для цього застосовується метод простого нормування, згаданий у розділі 2.

Ранжування йде відповідно до визначених у стандартах 3GPP максимальних порогових значень із рекомендованого інтервалу. Такий підхід дає змогу чесно проставити коефіцієнти та використовувати модель універсально для багатьох виробничих випадків без перерахунку порогових значень.

Використовуючи метод зваженої суми оцінок критеріїв, зробимо розрахунок коефіцієнта ефективності $F(f | w)$, поданого у вигляді суми показників, зважених коефіцієнтами їхньої відносної важливості. Метод

докладно описано в підрозділі 2.3. Формула (2.9) для кожного зі сценаріїв NB-ІоТ матиме такий вигляд: для автономного сценарію:

$$F_{\text{авт}}(\hat{f} | w) = 0.26 * 0.94 + 0.13 * 0.80 + 0.05 * \left(\frac{1.00+1.00+1.00}{3} \right) + 0.20 * 1.00 + 0.20 * 0.82 + 0.03 * 0.12 + 0.11 * 0.20 + 0.03 * 1.00 = 0.82;$$

для сценарію використання захисної смуги:

$$F_{\text{зах}}(\hat{f} | w) = 0.26 * 0.93 + 0.13 * 0.76 + 0.05 * \left(\frac{1.00+1.00+1.00}{3} \right) + 0.20 * 1.00 + 0.20 * 0.60 + 0.03 * 0.11 + 0.11 * 1.00 + 0.03 * 1.00 = 0.85;$$

для внутрішньосмугового сценарію:

$$F_{\text{зах}}(\hat{f} | w) = 0,26 \cdot 0,90 + 0,13 \cdot 0,75 + 0,05 \cdot \left(\frac{1,00 + 1,00 + 1,00}{3} \right) + 0,20 \cdot 0,98 + 0,20 \cdot 0,50 + 0,03 \cdot 0,11 + 0,11 \cdot 0,50 + 0,03 \cdot 1,00 = 0,76;$$

Порівнюючи три розрахункові коефіцієнти ефективності між собою, з'ясуємо, що:

$$F_{\text{внутр}}(\hat{f} | w) < F_{\text{авт}}(\hat{f} | w) < F_{\text{зах}}(\hat{f} | w). \quad (3.4)$$

сценарій використання захисної смуги найкращий. Порівняння розрахункових коефіцієнтів засвідчило, що ефективність розгортання NB-ІоТ у захисному інтервалі на 12% і в автономному на 7% вища, ніж у разі використання внутрішньосмугового сценарію.

3.4 Розроблення механізмів реалізації технології NB-IoT для різних сценаріїв використання радіочастотного спектра в мережах 4G

Результати використання розробленого методу багатокритеріального оцінювання для розрахунку ефективності функціонування мереж NB-IoT залежно від сценарію розгортання представлено на рисунку 3.4.

Тут видно, що в разі порівняння сценаріїв розгортання в діапазоні 800МГц із шириною смуги пропускання LTE 10МГц, запланованим навантаженням не більше 100 термінальних пристроїв на мережу та моделлю розповсюдження сигналу COST321 Neta в приміській зоні, кожен зі сценаріїв має свої переваги та недоліки. Ухвалення рішення щодо вибору оптимального сценарію розгортання NB-IoT будується з урахуванням таких результатів дослідження і рекомендацій:

1. Сценарій розгортання NB-IoT у захисній смузі на 12% має вищу ефективність функціонування на мережах мобільного зв'язку 4G, ніж внутрішньосмуговий режим. Найгірші результати вимірювань основних показників мережі серед досліджуваних сценаріїв NB-IoT спостерігалися для внутрішньосмугового варіанта розгортання [4].

2. Частотний спектр: порівняльні результати вимірювання ключових мережевих показників у найпопулярніших частотних діапазонах LTE, а саме в діапазоні 800МГц та 900МГц, доводять, що найкращим частотним діапазоном для запуску технології NB-IoT є низькочастотний сегмент.

3. Зона покриття: за необхідності забезпечення глибокого стабільного покриття послугою Інтернету речей, автономний сценарій (-117.5дБм) і сценарій використання захисної смуги (-119.1дБм) показують значення рівня сигналу, близьке до рекомендованого (-111дБм). Однак, для зменшення можливості появи потенційних завад (інтерференції) від суміжного каналу на кордонах сот LTE мінімальна необхідна ширина смуги LTE для сценарію використання захисної смуги повинна становити не менше 5 МГц, що не завжди можливо.

4. Якість мережі: належна якість мережі забезпечується при використанні будь-якого з трьох сценаріїв NB-IoT на відстані до 2.03 км у приміській зоні.

У разі збільшення відстані між NB-IoT пристроєм і базовою станцією перевагу віддають автономному сценарію, де відношення сигналу до інтерференції плюс шум дорівнює 7.96дБ. Найменш бажаний сценарій - внутрішньосмуговий із SINR, що дорівнює 7.52дБ. При значенні SINR менше 0дБ рівень перешкод прагне перевищити рівень корисного сигналу, що негативно позначається на якості послуги, що надається.

5. Продуктивність мережі: Було виявлено, що показники продуктивності мережі (доступність мережі, відсоток встановлених з'єднань, відсоток роз'єднання встановлених з'єднань) для всіх розглянутих випадків мало залежні від способу використання радіочастотного ресурсу для впровадження NB-IoT через невеликий обсяг даних, що передаються. Дослідження рекомендується повторити, збільшивши мережеве навантаження до 75%.

6. Завади (інтерференція): Внутрішньосмуговий сценарій схильний до більшого впливу інтерференції, порівняно з автономним і сценарієм використання захисних інтервалів. Заходи, яких вживають для боротьби з можливою інтерференцією з боку суміжних каналів LTE, а саме зниження вихідної потужності 4G приймачів-передавачів базової станції на 2x3Вт, закономірно призводять до зменшення зони покриття мережі [4], і відповідно, її дальності. Так, рівень покриття і якість мережі для внутрішньосмугового сценарію в середньому на 4-6% гірші, а середня швидкість на NB-IoT пристрої на 34% нижча, порівняно з автономним варіантом.

7. Клієнтський досвід: середнє значення показника DL User Throughput для автономного варіанта становить 14.90 кбіт/с на абонента, тоді як для сценаріїв розгортання в захисній смузі та всередині смуги показники нижчі - 11.09 кбіт/с і 9.82 кбіт/с відповідно.

8. Вартість створення мережі: Незважаючи на високі значення технічних параметрів, недоліком автономного сценарію є можливі високі витрати на побудову мережі, в тому випадку, якщо наявне обладнання GSM/UMTS (основний сценарій) не підтримує технологію NB-IoT.

9. Кількість пристроїв NB-IoT: За необхідності підключення великої кількості пристроїв і терміналів до мережі NB-IoT рекомендується використання автономного сценарію, який за однакової ширини частотного спектра - 10 МГц - забезпечує в 6.5 більшу ємність мережі з погляду підтримки кількості пристроїв IoT, порівнюючи з іншими варіантами запуску технології NB-IoT.

Таким чином, автономний сценарій забезпечує найкращу продуктивність NB-IoT мережі в разі наявності вільного спектра і високих вимог до покриття. Однак для його використання необхідно здійснити рефармінг 200кГц GSM спектра, що не завжди є можливим через дорожнечу низьких частот, які використовуються для 2G мережі.

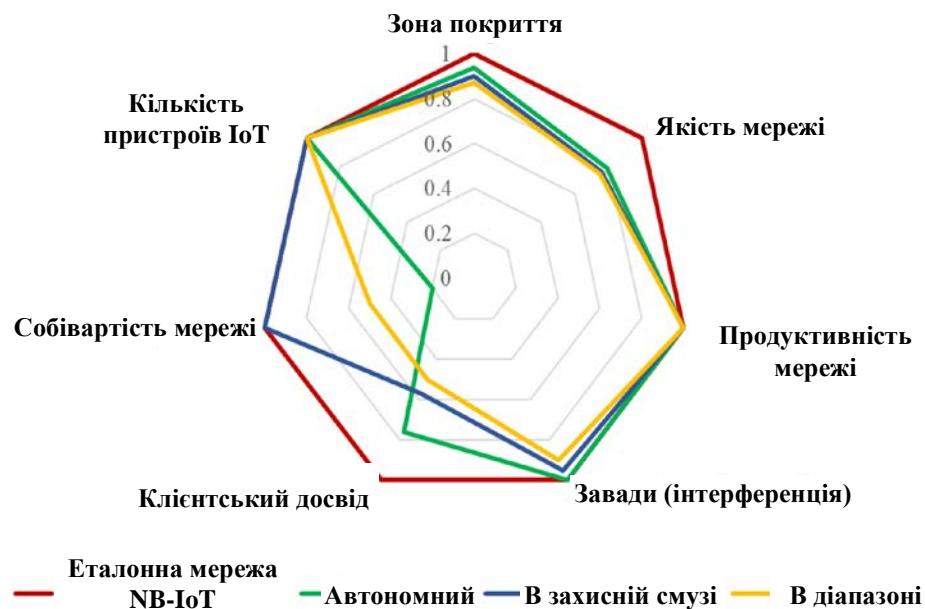


Рисунок 3.4 – Діаграма оцінювання ефективності мережі

Внутрішньосмуговий сценарій розгортання дає змогу запускати технологію NB-IoT усередині наявних мереж 4G, які на сьогодні повсюдно запуснені з належною якістю обслуговування. Сценарій дає можливість операторам зв'язку використовувати сучасне апаратне забезпечення без істотних вкладень і оновлень. Однак цей сценарій NB-IoT забирає функціонально важливі ресурси

мережі 4G і може створювати перешкоди (інтерференцію), і тим самим, знижувати продуктивність функціонування технології NB-ІоТ і мережі 4G.

Для ухвалення рішення щодо використання внутрішньосмугового сценарію розгортання NB-ІоТ на мережі 4G у приміській зоні та проведення якісної оцінки продуктивності такої мережі, автором рекомендується використовувати запропоновану методику тестування NB-ІоТ мереж та спиратися на результати проведеного імітаційного моделювання та експериментального тестування мережі. Результати дослідження показують, що внутрішньосмуговий сценарій не відповідає суворим вимогам до покриття (-111 дБм) і якості мережі (7 дБ) на відстані до 2.03 км.

Перевага сценарію розгортання NB-ІоТ у захисній смузі полягає в найбільш вигідному використанні мережевих ресурсів, а також хорошій завадозахищеності для будь-якої технології, чи то LTE, чи то NB-ІоТ.

Було помічено, що під час тестування значної інтерференції не спостерігалось.

Достатній вплив на результати моделювання чинить вибір програмного забезпечення, а також застосовані моделі та вхідні дані.

Наприклад, такі фактори, як неправильне встановлення потужності базових станцій, відсутність достовірних гео-карт із ландшафтом і щільністю забудови місцевості, вибір модуляції та багато іншого, може суттєво вплинути на значення вихідних даних. Тому результати можуть незначно відрізнитися при проведенні моделювання в інших програмних середовищах. Проте результати дослідження доводять, що технологія NB-ІоТ прекрасно співіснує на мережах LTE, відповідає основним вимогам 3GPP, і здатна забезпечити глибоке покриття до 2.03 км за будь-якого варіанта розгортання NB-ІоТ [4]. При цьому найкращим сценарієм застосування частотних каналів NB-ІоТ на 4G-мережі в діапазоні 800МГц у приміській зоні для надання послуг Інтернету речей виступає сценарій використання захисної смуги.

3.5 Висновки до розділу 3

1) Розроблено метод, що дає змогу провести всебічну оцінку ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G під час надання послуг NB-IoT для кожного сценарію розгортання в частотному спектрі (автономного, внутрішньосмугового, у захисній смузі).

2) Наведено методику дослідження: моделювання та експериментального тестування на тестовій ділянці 4G мережі, що складається з 6 базових станцій LTE. Застосування моделювання та експериментального тестування для оцінки ефективності кожного зі сценаріїв розгортання технології NB-IoT гарантує отримання найдостовірніших результатів дослідження та підвищує точність роботи моделі оцінювання, тим самим вирізняючи її з-поміж наявних.

3) Розрахунок коефіцієнта ефективності показав, що найкращим є сценарій використання захисної смуги, найменш - внутрішньосмуговий сценарій. З точки зору технічних показників - автономний сценарій дає змогу забезпечити найглибше покриття, прийнятну якість мережі та стабільні швидкості передавання даних у напрямку від базової станції до абонента. Однак, застосування цього сценарію може потребувати певних капіталовкладень, що знижує його привабливість в очах MNO.

4) На основі результатів дослідження та застосування багатокритеріального методу комплексної оцінки було розроблено механізми визначення на практиці найоптимальнішого сценарію використання частотних каналів NB-IoT залежно від умов надання послуги Інтернету речей.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	0	0	53
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	39	40	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		44,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	0	0
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	58	58
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	60,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [16]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 44,0, k_{\text{теор}} = 60,3$ балів;

$0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 44,0 + 0,4 \cdot 60,33 = 50,53 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G», даний рівень становить 50,53 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [16]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 16200,00 \cdot 21 / 22 = 15463,64 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	16200,00	736,36	21	15463,64
Науковий співробітник	15600,00	709,09	21	14890,91
Інженер-розробник телекомунікаційних систем	15300,00	695,45	10	6954,55
Всього				37309,09

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [16];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,70 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 87,37 \text{ грн.}$$

$$З_{р1} = 87,37 \cdot 6,00 = 524,20 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обчислювального обладнання для проведення досліджень	6,00	5	1,70	87,37	524,20
Підготовка робочого місця дослідника мереж	4,00	6	2,00	102,78	411,14
Інсталяція програмного забезпечення проведення аналітичного дослідження ефективності	5,00	5	1,70	87,37	436,83
Підготовка дослідних баз даних	12,00	6	2,00	102,78	1233,41
Ведення характеристик базових модулів аналізу моделей мереж	8,00	5	1,70	87,37	698,93
Компіляція програмних модулів системи взаємодії за технологією 4G	3,00	6	2,00	102,78	308,35
Налагодження блоків системи	4,00	5	1,70	87,37	349,47
Всього					4000,36

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (37309,09 + 4000,36) \cdot 10 / 100\% = 4130,94 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (37309,09 + 4000,36 + 4130,94) \cdot 22 / 100\% = 9996,89 \text{ грн.}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 195,00 \cdot 1,02 - 0 \cdot 0 = 596,70 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4 500/80	195,00	3,0	0	0	596,70
Диск оптичний	26,50	4,0	0	0	108,12
Канцелярське приладдя	183,00	4,0	0	0	746,64
Тека для паперів	124,00	3,0	0	0	379,44

продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Тонер HP 1200X	174,00	1,0	0	0	177,48
Флеш-пам'ять 16 Gb	125,00	1,0	0	0	127,50
Всього					2135,88

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$K_e = 1 \cdot 2600,00 \cdot 1,02 = 2652,00$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Спеціалізовані радіоінтерфейси	1	2600,00	2652,00
Всього			2652,00

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 15400,00 \cdot 1 \cdot 1,02 = 17094,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Фізичне обладнання серверу бази даних	1	15400,00	17094,00
Імітатор передавачів (навантаження)	1	1860,00	1897,20
Імітатор приймача (комутатор)	1	2300,00	2346,00
Всього			21337,20

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.и}} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.и}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 9485,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 9579,85 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладне програмне забезпечення проектування PCAD 2000 Schematic	1	9485,00	9579,85
Комп'ютерні моделі радіомережі Інтернету речей	1	6820,00	6888,20
Всього			16468,05

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{об}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де $Ц_{об}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{е}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (32560,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1356,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Обчислювальний центр та комп'ютеризована система проектування	32560,00	2	1	1356,67
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	11345,00	4	1	236,35

Продовження таблиці 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Програмне забезпечення комп'ютеризованої системи проектування	6560,00	2	1	273,33
Офісна оргтехніка	7830,00	5	1	130,50
Приміщення лабораторії досліджень	500000,00	25	1	1666,67
Робоче місце дослідника мереж 4G	8450,00	4	1	176,04
Всього				3839,56

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{vni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{vni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{vni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 384,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Обчислювальний центр та комп'ютеризована система проектування	0,32	160,0	384,00
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	0,22	160,0	264,00
Робоче місце дослідника	0,09	160,0	108,00
Офісна оргтехніка	0,45	1,5	4,89
Фізичне обладнання серверу бази даних	0,25	50,0	93,75
Імітатор передавачів (навантаження)	0,05	50,0	18,75
Імітатор приймача (комутатор)	0,03	50,0	11,25
Всього			884,64

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{i\epsilon}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де $H_{i\epsilon}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{i\epsilon} = 50\%$.

$$I_{\epsilon} = (37309,09 + 4000,36) \cdot 50 / 100\% = 20654,72 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (37309,09 + 4000,36) \cdot 100 / 100\% = 41309,45 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_e + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_e + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 37309,09 + 4000,36 + 4130,94 + 9996,89 + 2135,88 + 2652,00 + 21337,20 + 16468,05 + 3839,56 + 884,64 + 0,00 + 0,00 + 20654,72 + 41309,45 = 164718,79 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,9$.

$$3B = 164718,79 / 0,9 = 183020,87 \text{ грн.}$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають

відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 183020,87$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [16].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 183,0 \cdot 0,08 = 33,57.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» складають 183020,87 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

На працівника під час дослідження ефективності мереж інтернету речей із використанням технології 4G могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- пряма і відбита блискіть;
- підвищення яскравість;
- недостатня освітленість робочої зони;

2. Психофізіологічні:

- статичне перевантаження;
- розумове перевантаження;
- емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Головними елементами робочого місця проектувальника за ПК є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташовано в зоні легкої досяжності робочого простору.

Максимальна зона досяжності рук – це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками при русі їх у плечовому суглобі.

Оптимальна зона – частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччя при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При роботі в положенні сидячи рекомендуються такі параметри робочого простору:

- ширина не менше 700 мм;
- глибина не менше 400 мм;
- висота робочої поверхні столу над статтю 700-750 мм.

Оптимальними розмірами столу є:

- висота 710 мм;
- довжина столу 1300 мм;
- ширина столу 650 мм.

Під робочою поверхнею повинно бути передбачено простір для ніг:

- висота не менше 600 мм;
- ширина не менше 500 мм;
- глибина не менше 400 мм.

Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін - на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше 90° (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано зашторити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

Приміщення, де здійснювалося дослідження ефективності мереж інтернету речей із використанням технології 4G за небезпекою ураження електричним

струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки [19].

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки встановлюються наступні технічні рішення:

Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).

Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В, передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.

Розподільні шафи, пускові пристрої й клемні коробки закритого типу (розміщаються в спеціальних кожухах) - для забезпечення недоступності неізольованих струмопровідних частин.

Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Робота дослідника ефективності мереж інтернету речей із використанням технології 4G за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139 Дж/с) [20]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с

Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується централізована парова система опалення.
2. Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування.
3. Систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Залежно від ступеня токсичності, фізико-хімічних властивостей, шляхів проникнення в організм, санітарні норми встановлюють гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони виробничих приміщень, перевищення яких неприпустиме.

В приміщенні, де здійснюється дослідження ефективності мереж інтернету речей із використанням технології 4G можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Дуже високої точності	V0,15 - до 0,3	II		великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5
-----------------------	----------------	----	--	---------	---------	------	-----	---	-----	-----	-----

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

5.2.4 Виробничий шум

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [22]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах середньогеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Працюючи за комп'ютером, користувач підпадає під вплив високочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Як показують результати вимірювання електромагнітного випромінювання, інтенсивність опромінення ЕМП від комп'ютера підсилюється, коли одночасно оператор ще й розмовляє по мобільному телефону.

Люди, які працюють в ЕМП, що перевищує допустимі норми, швидко втомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в ділянці серця. Вони стають дратівливими, у них збільшується пітливість та порушується нічний сон. Відтак, захист від ЕМВ не лише покращить самопочуття працівників, але і допоможе створити більш сприятливі умови для праці.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів	20кВ / м

для дітей дошкільних установ і що вчать середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	15кВ / м
--	----------

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи РЕС в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

5.3.1 Дія електромагнітних випромінювань на радіоелектронні системи

Як уражаючий фактор електромагнітний імпульс (ЕМІ) здатний розповсюджуватись на десятки і сотні кілометрів лініями електропередач, зв'язку, трубопроводах. Особливо піддаються ЕМІ радіоелектронна апаратура, системи автоматичного управління. ЕМІ також пробиває ізоляцію, випалює елементи електронних схем, стирає магнітний запис ЕОМ, викликає коротке замикання.

Електромагнітний імпульс може вивести з ладу електронну систему управління, дати збої у роботі, спричинити аварії та нещасні випадки, в результаті яких можуть загинути люди.

До матеріалів, з яких виготовляють елементи радіоелектронних систем (РЕС) відносять: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники і різні органічні сполуки (діелектрики, смоли тощо).

З метою запобігання цього проводяться розрахунки з безпеки роботи в умовах дії електромагнітних випромінювань та приймаються рішення щодо захисту елементів РЕС [24].

5.3.2 Оцінка безпеки роботи РЕС в умовах дії електромагнітних випромінювань

Вихідні дані: $U_{ж} = 12 \pm 5\% \text{ В}$; $l_{Г} = 0 \text{ м}$; $l_{В} = 0,08 \text{ м}$.

$l_{Г} = 0 \text{ м}$, оскільки усі струмоведучі частини РЕС даного приладу розташовані у вертикальній площині.

За критерій стійкості РЕС в умовах дії електромагнітного імпульсу приймається коефіцієнт безпеки, який визначається за формулою [24]

$$K_{Г} = 20 \lg \frac{U_{Д}}{U_{В}} \geq 40 \text{ [дБ]}. \quad (5.1)$$

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення

$$U_{Д} = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} N \text{ [В]}; \quad (5.2)$$

$$U_{Д} = 12 + \frac{12}{100} 5 = 12,6 \text{ (В)},$$

де $U_{ж}$ – робоча напруга живлення, В;

N – допустимі коливання напруги, %.

З формули (5.1) виразимо вертикальну складову напруги наведення на струмопровідних частинах РЕС

$$U_{В} = \frac{U_{Д}}{100} \text{ [В]}; \quad (5.3)$$

$$U_B = \frac{12,6}{100} = 0,13 \text{ (В)}.$$

Визначаємо допустиму горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля, при якому коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого:

$$U_B = E_\Gamma I_B \text{ [В]}, \quad (5.4)$$

звідки

$$E_\Gamma = \frac{U_B}{I_B} \text{ [В/м]}; \quad (5.5)$$

$$E_\Gamma = \frac{0,13}{0,08} = 1,625 \text{ (В/м)}.$$

Знаходимо допустиму вертикальну складову напруженості електромагнітного поля, при якому коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого

$$E_\Gamma = 10^{-3} E_B \text{ [В/м]}, \quad (5.6)$$

звідки

$$E_B = \frac{E_\Gamma}{10^{-3}} \text{ [В/м]}; \quad (5.7)$$

$$E_B = \frac{1,625}{10^{-3}} = 1625 \text{ (В/м)} = 1,625 \text{ (кВ/м)}.$$

5.4 Висновки до розділу 5

Отже, знайдено допустимі горизонтальну та вертикальну складові напруженості електромагнітного поля, при яких коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого, тобто забезпечується безпечна робота РЕС в умовах дії електромагнітних випромінювань.

ВИСНОВКИ

У роботі наведено аналіз наявних способів і підходів до оцінки ефективності мереж мобільного зв'язку, який показав необхідність розроблення єдиного комплексного методу оцінки ефективності розгортання вузькосмугової технології Інтернету речей на мережах 4G. Виявлено, що методичні підходи, які визначають продуктивність мереж NB-IoT залежно від сценаріїв використання РЧС, відсутні. Швидке поширення технології NB-IoT, і дорожнеча ліцензованого частотного спектра, який не всі країни готові виділити для розгортання послуг Інтернету речей, підкреслюють необхідність і актуальність досліджень у цьому напрямку.

У процесі проведення наукових досліджень, поставлені мета і завдання МКР виконані в повному обсязі, і отримано такі результати, що володіють науковою цінністю і практичним застосуванням:

1) Досліджено архітектурні особливості побудови технології NB-IoT на мережах мобільного зв'язку; окреслено недоліки існуючих способів і підходів до оцінки її ефективності при наданні послуг Інтернету речей.

2. Виявлено сім головних факторних груп, що забезпечують комплексне оцінювання ефективності сценаріїв розгортання мережі NB-IoT, визначено 17 найважливіших технічних та економічних показників, необхідних для повного аналізу ефективності функціонування мереж NB-IoT. Допускається зміна набору показників усередині факторних груп залежно від пропонованих вимог до послуги Інтернету речей.

3. Розроблено багатокритеріальний метод, що дає змогу здійснити комплексне оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку 4G під час розгортання технології NB-IoT з використанням одного з трьох можливих сценаріїв: автономного, внутрішньосмугового або сценарію розгортання в захисній смузі. Відмітна особливість методу в тому, що він націлений на порівняння ефективності функціонування трьох сценаріїв розгортання NB-IoT із застосуванням єдиного розрахункового коефіцієнта

ефективності, а запропоновані мережеві показники та факторні групи є універсальними та застосовними до кожного зі сценаріїв NB-IoT, що дає змогу провести вірну оцінку їхньої ефективності.

4. На основі запропонованої моделі оцінки виконано розрахунок єдиного коефіцієнта ефективності та проведено порівняльну оцінку сценаріїв розгортання мережі, яка показала, що під час розгортання технології NB-IoT на мережах мобільного зв'язку 4G у діапазоні 800 МГц з шириною смуги пропускання 10 МГц в умовах приміської забудови, ефективність розгортання NB-IoT у захисному інтервалі на 12% та в автономному на 7% вища, ніж у разі використання внутрішньосмугового сценарію.

5. Виконано комплекс досліджень, що полягає у проведенні імітаційного моделювання, виконаного з використанням професійного програмного забезпечення Forsk Atol 3.

Застосування моделювання гарантує отримання найдостовірніших результатів дослідження та підвищує точність роботи моделі оцінювання, тим самим вирізняючи її з-поміж наявних. Відносна похибка вимірювання склала не більше 7,9%, що показує високу збіжність результатів дослідження.

6. Результати досліджень дали змогу розробити для операторів мереж мобільного зв'язку механізми реалізації на практиці технології NB-IoT з метою вибору найбільш підходящого сценарію застосування частотних каналів NB-IoT під час надання послуг Інтернету речей.

В економічній частині роботи були розраховані витрати на проведення досліджень та проведена оцінка важливості та наукової значимості роботи

В розділі "Охорона праці" проаналізовані умови праці в лабораторії для досліджень, виконано організаційно-технічні та санітарно-гігієнічні заходи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sudhir K. Routray, Sasmita Mohanty. Principles and Applications of Narrowband Internet of Things (NB-IoT) // IGI Global. – 2021, P. 436.
2. Matz, A.P. Fernandez-Prieto, J.-A., Cañada-Bago, J., Birkel, U. A Systematic Analysis of Narrowband IoT Quality of Service // Sensors. – 2020. – Vol. 20, №6. – P. 1636.
3. Imoize A.L, Orolu K., Atayero A.A. Analysis of key performance indicators of a 4G LTE network based on experimental data obtained from a densely populated smart city // Data in Brief. – 2022. – Vol. 42. – P. 108-240.
4. Rastogi E., Saxena N., Roy A., Shin D.R. Narrowband Internet of Things: A Comprehensive Study // Computer Networks. – 2020. – Vol. 173, – P.107-209.
5. Malik H., Khan S., Redondo J. and et al. NB-IoT Network Field Trial: Indoor, Outdoor and Underground Coverage Campaign // 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). – 2019. – P. 537-542.
6. Poddar N. Coverage Analysis of LPWAN in Estonia: Sigfox and NB-IoT Case study in Tallinn and Tartu. – Tartu, 2020. – P.83.
7. Sebastian E.J., Sikora A. Systematic Test Environment for Narrowband IoT Technologies // Part of the Technologien für die intelligente Automation book series. – 2022. – Vol. 14. – P. 233-244.
8. Turzhanova K., Tikhvinskiy V., Konshin S., Solochshenko A. Experimental Performance Evaluation of NB-IOT Deployment Modes in Urban Area // International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS). – 2021. – Vol.13, № 2. – P. 230-235.
9. Turzhanova K., Konshin S., Tikhvinskiy V., Solochshenko A. Performance evaluation of NB-IoT in-band deployment mode in suburban area // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol.23, № 2. – P. 855-862.
10. Pramono S., Alvionita L., Danang M., Sulisty M.E. Optimization of 4G LTE (Long Term Evolution) Network Coverage Area in Sub Urban // in AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2217, № 30193. – P. 1-9.

11. Putra G. M., Budiman E., Malewa Y., Cahyadi D., Taruk M., Hairah U. 4G LTE Experience: Reference Signal Received Power, Noise Ratio and Quality // 2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIconCIT). – Indonesia: IEEE, 2021. – P. 139-144.
12. Santoso E.S., Hidayati A., Suryanegara M., Nashiruddin M.I. NB-IoT Network Planning for Smart Metering Services in Jakarta, Depok, Tangerang, and Bekasi // 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering. – Indonesia: IEEE, 2019, – P. 1-6.
13. Basu S.S., Sultania A.K., Famaey J., Hoebeke J. Experimental Performance Evaluation of NB-IoT // 2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – Barcelona, Spain: IEEE, 2019. – P.1-6.
14. Mahbub M. NB-IoT: applications and future prospects in perspective of Bangladesh // International Journal of Information Technology. – 2020. – Vol. 12. – P. 1183–1193.
15. Cruz R., Coelho A., Campos R., Ricardo M. A Theoretical Model for Planning NB-IoT Networks // 2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – IEEE, 2019. – P. 1-4.
16. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
17. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с
18. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_prapor_0_00-7_15-18_01_ua.php.
19. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

20. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

21. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

22. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

23. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

24. Методичні вказівки до самостійної та індивідуальної роботи з дисципліни "Цивільний захист та охорона праці в галузі. Частина 1. Цивільний захист" / Уклад. О. В. Поліщук, О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 32 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ 4G
назва магістерської кваліфікаційної роботи

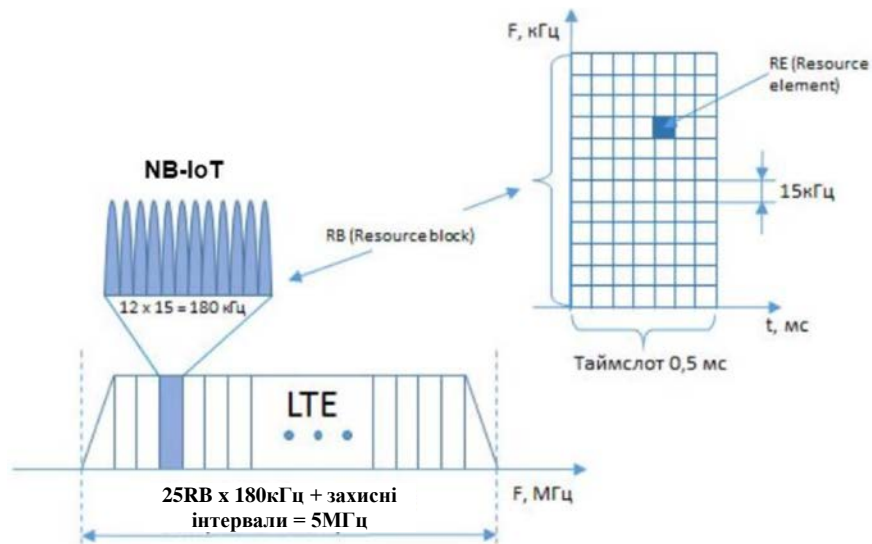


Рисунок 1 – Алгоритм розподілення частотно-часового ресурсу в LTE і NB-IoT

Модель оцінювання ефективності функціонування мережі				
Факторні групи	Окремі параметри мережі			
Продуктивність мережі	Доступність мережі	Результативність сесії	...	
Кількість пристроїв	Кількість NB-IoT пристроїв	Кількість LTE активних користувачів	...	
Зона покриття мережі	Значення максимального покриття NB-IoT	Значення максимального покриття LTE	...	
Якість мережі	Відношення сигналу до інтерференції + шум	
Завади	Рівень внутрішніх завад	Інтерференція	...	
Клієнтський досвід	Середня швидкість передавання даних вниз/верх	Максимальна швидкість передавання даних вниз/верх	Кількість переданої інформації	...
Собівартість мережі	Частотний спектр	Модернізація обладнання мережі	Видатки на сервісне обслуговування	...

Рисунок 2 – Структурна модель оцінювання ефективності функціонування мережі з технологією NB-IoT

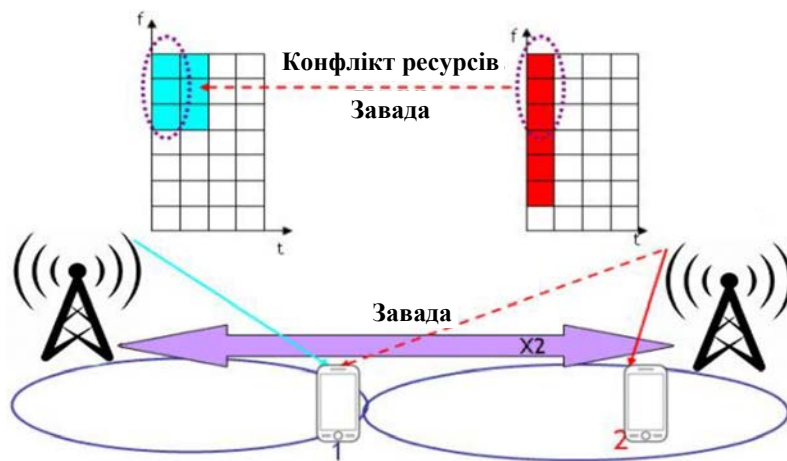


Рисунок 3 – Схема оцінювання внутрішньосистемних завад на границі стільника

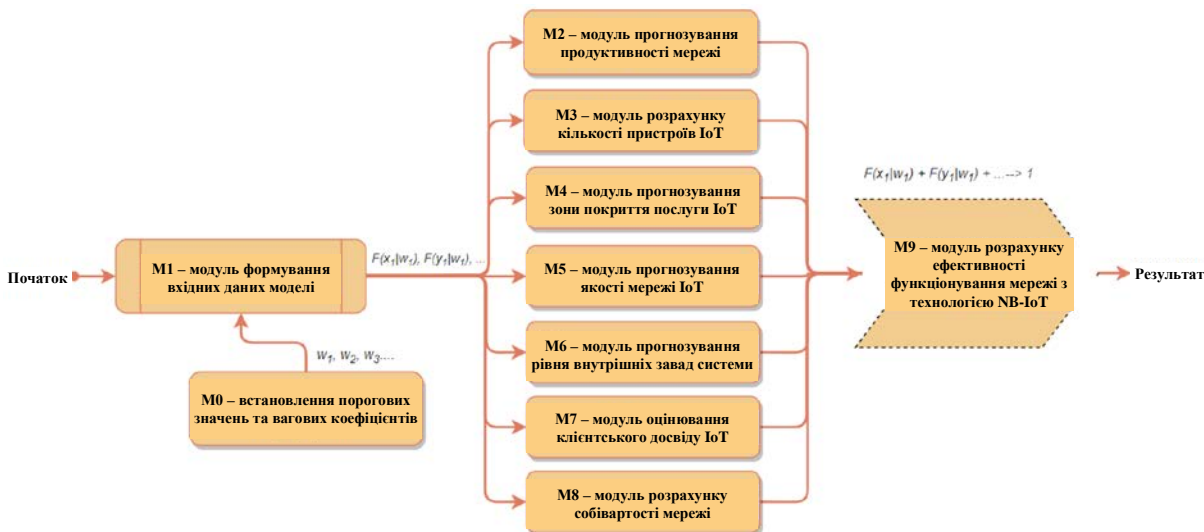


Рисунок 4 - Модель оцінки ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку 4G при наданні послуг NB-IoT



Рисунок 5 - Архітектура NB-IoT мережі для послуг ЖКГ

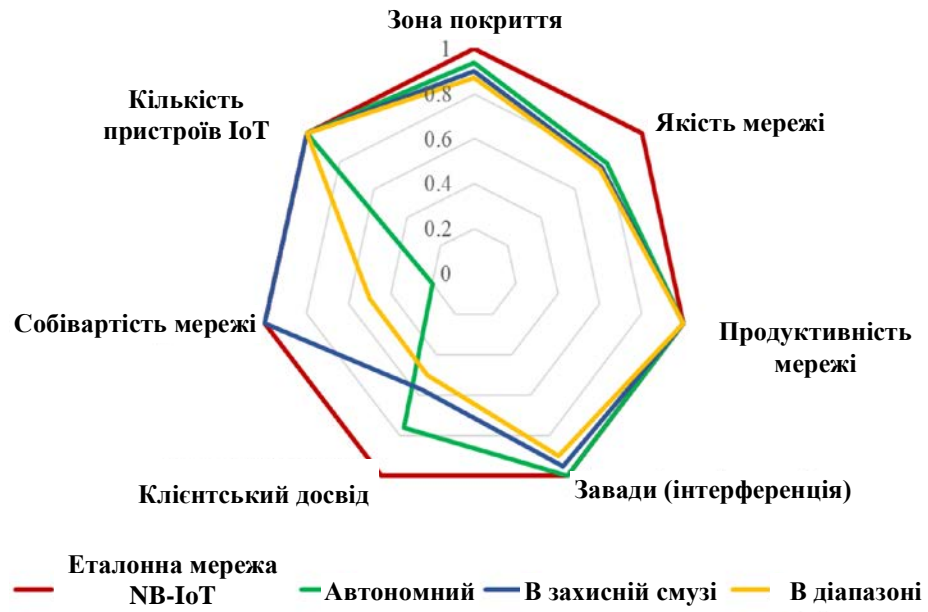


Рисунок 6 – Діаграма оцінювання ефективності мережі

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження ефективності мереж Інтернету речей із використанням технології 4G

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

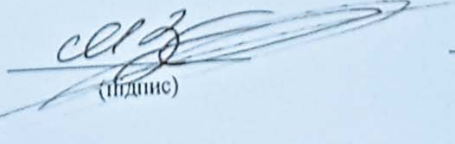
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 98,11 % Схожість 1,89 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

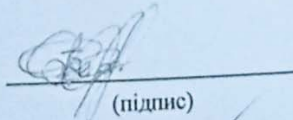
Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

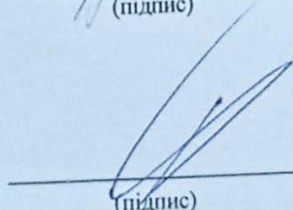
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Бахарев О.О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Михалевський Д.В.
(прізвище, ініціали)