

Г. В. Бешлей, М. М. Климаш, М. І. Бешлей

5 G

**МЕТОДИ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ  
5G ADVANCED ДЛЯ РОЗВИТКУ  
ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ  
УКРАЇНИ**

5 G

5 G



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Г. В. Бешлей, М. М. Климаш, М. І. Бешлей**

**МЕТОДИ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ  
5G ADVANCED ДЛЯ РОЗВИТКУ  
ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ  
УКРАЇНИ**

**МОНОГРАФІЯ**

**Київ  
ДП «Експрес-об'ява»  
2024**

УДК 621.37/39, 621.396.946.2, 621.396.2, 004.7, 004.8.032.26  
Б57

**Колектив авторів**

*Бешлей Г. В., Климаш М. М., Бешлей М. І.*

**Рецензенти:**

**Русин Б. П.** – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу інформаційних технологій дистанційного зондування, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України.

**Кочан О. В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національного університету «Львівська політехніка».

**Бондарев А. П.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка».

**Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради  
Національного університету «Львівська політехніка»  
(протокол №14 від 27 серпня 2024 р.)**

**Бешлей Г. В., Климаш М. М., Бешлей М. І.**

**Б57** Методи розгортання мереж 5G Advanced для розвитку електронних комунікацій України : монографія. К. : ДП «Експрес-об'ява», 2024. 288 с.

ISBN 978-617-7389-31-5

DOI 10.51587/9786-1773-89315-2024-14

Монографія присвячена дослідженню сучасних технологій і методів розгортання мереж 5G. Детально аналізуються особливості розгортання, виклики та перспективи впровадження 5G Advanced в Україні, а також досліджується вплив новітніх технологій, таких як агрегація спектра, багатокористувацький множинний вхід і множинний вихід, а також неортогональний множинний доступ, на пропускну здатність мереж. Особливу увагу приділено методам планування, управління і оптимізації сучасних мереж мобільного зв'язку із використанням штучного інтелекту для прогнозування навантаження на інфраструктуру. Досліджується ефективність інноваційних методів розподілу радіоресурсів, пов'язаних із розгортанням приватних мереж 5G в Україні. Охоплюються питання цифровізації інфраструктури України за допомогою приватних мереж 5G та інтелектуального розгортання мереж із застосуванням технології сегментування Network Slicing.

Видання призначене для дослідників, інженерів, аспірантів та фахівців, які працюють у галузях «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації», а також «Інформаційні технології», і прагнуть глибше зрозуміти процеси розвитку та впровадження 5G в Україні та за її межами.

УДК 621.37/39, 621.396.946.2, 621.396.2, 004.7, 004.8.032.26

# З М І С Т

<b>ВСТУП</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ I АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗГОРТАННЯ, СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ 5G</b>	<b>7</b>
1.1. Поточний стан, виклики та перспективи впровадження 5G в Україні	7
1.2. Основні технології та методи розгортання сучасних мереж мобільного зв'язку 5G Advanced	19
1.2.1. Метод розгортання малих комірок 5G	21
1.2.2. Розгортання 5G Advanced з використанням технологій mMIMO, mmWave та 3D-формування променя	27
1.2.3. Методи множинного доступу для мереж 5G Advanced	31
1.2.4. Метод розгортання мережевої архітектури 5G Advanced за допомогою технологій NFV/SDN та Cloud RAN	38
<b>РОЗДІЛ II ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ АГРЕГАЦІЇ СПЕКТРА, MU-MIMO І NOMA НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ 5G ADVANCED</b>	<b>41</b>
2.1. Управління радіоресурсами та принципи модуляції в системах мобільного зв'язку 5G	41
2.2. Дослідження пропускної здатності 5G мережі в умовах використання різної кількості MIMO антен та ширини каналу	48
2.3. Методика розрахунку пропускної здатності мереж 5G Advanced та вибір оптимальних параметрів для високошвидкісних потоків	51
2.4. Дослідження пропускної здатності в системах мобільного зв'язку 5G в умовах використання NOMA та OMA	56
2.4.1. Постановка сценарію моделювання для порівняння пропускної здатності мережі 5G Advanced в умовах використання технологій NOMA та OMA	59
2.4.2. Результати моделювання щодо оцінки ефективності використання технології NOMA для 5G	67
<b>РОЗДІЛ III МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЛАНУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ СУЧАСНИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ</b>	<b>73</b>
3.1. Основні методи планування та оптимізації мереж мобільного зв'язку	73
3.2. Етапи планування та управління мережами мобільного зв'язку	77
3.3. Програмні засоби для планування та управління сучасними мережами мобільного зв'язку	82
3.4. Дослідження існуючих проблем, що виникають у мережах мобільного зв'язку в Україні	91
3.5. Дослідження процесу ефективного планування радіорелейних ліній зв'язку з використанням системи Atoll	96

- 3.6. Дослідження процесу ефективного управління трафіком в комунаційній частині мобільної мережі України ..... 110

**РОЗДІЛ IV УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПЛАНУВАННЯ ATOLL  
З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ..... 117**

- 4.1. Моніторинг та аналіз трафіка мереж мобільного зв'язку: виклики та перспективи розвитку комунаційної інфраструктури під час війни в Україні ..... 117
- 4.2. Розвиток системи планування Atoll з використанням оптимізованої LSTM моделі нейронної мережі для прогнозування навантаження на інфраструктуру оператора мобільного зв'язку ..... 125
- 4.3. Прогнозування обсягу мобільного трафіка для BC-1 LTE із використанням відомої LSTM моделі ..... 131
- 4.4. Прогнозування обсягу мобільного трафіка для BC-1 LTE із використанням запропонованої оптимізованої LSTM моделі ..... 140
- 4.5. Порівняння точності прогнозування мобільного трафіка для BC-1, BC-2 та BC-3 технології LTE із використанням відомої та запропонованої LSTM моделі ..... 146
- 4.5. Порівняння точності прогнозування мобільного трафіка для BC-1, BC-2 та BC-3 технології LTE із використанням відомої та запропонованої LSTM моделі ..... 146

**РОЗДІЛ V МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ ТА РОЗПОДІЛУ РАДІОРЕСУРСІВ  
В МЕРЕЖАХ 5G ADVANCED ..... 155**

- 5.1. Формування завдання дослідження для енергоефективного планування та розподілу ресурсів в мережах 4G/5G ..... 155
- 5.2. Методи розподілу ресурсів в мережах 5G з урахуванням впливу на QoS ..... 160
- 5.3. Моделювання процесу планування та розподілу радіоресурсів в 5G мережах ..... 165
- 5.3.1. Імітаційна модель процесу розподілу ресурсів в межах однієї базової станції 5G ..... 165
- 5.3.2. Удосконалення методу повторного використання частот між сусідніми базовими станціями 5G на основі динамічного принципу розподілу спектра ..... 170
- 5.3.3. Розробка імітаційної моделі для дослідження процесу розподілу ресурсів та повторного використання частот між сусідніми комітками мережі 4G/5G ..... 175
- 5.3.4. Інтерфейс імітаційної моделі мережі мобільного зв'язку для проведення дослідження щодо ефективності запропонованих рішень ..... 182
- 5.4. Дослідження ефективності методу дробового повторного використання частот з статичним та динамічним розподілом ресурсів між граничною і центральною зоною базової станції ..... 183

5.4.1.	Моделювання та дослідження методу динамічного розподілу ресурсів в умовах, коли більшість користувачів розподілені в центральних зонах комірки.....	188
5.4.2.	Моделювання та дослідження методу динамічного розподілу ресурсів в умовах, коли більшість користувачів розподілені в граничних зонах комірки.....	194
5.5.	Дослідження методу динамічного розподілу радіоресурсів для зменшення енергоспоживання в мережах 5G Advanced з урахуванням вимог QoS.....	200
<b>РОЗДІЛ VI ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗГОРТАННЯ ПРИВАТНИХ МЕРЕЖ 5G ADVANCED ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ .....</b>		<b>205</b>
6.1.	Особливості використання приватних мереж 5G для підприємств .....	205
6.2.	Дослідження методів розгортання приватних 5G мереж для підприємств .....	211
6.3.	Дослідження обмежень та проблем розгортання 5G у приватному промисловому секторі .....	217
6.4.	Аналіз спектра для розгортання приватних 5G-мереж в Україні з урахуванням досвіду ЄС.....	218
6.5.	Метод сегментавання мережі 5G для приватного розгортання в індустріальній сфері .....	221
6.6.	Цифровізація інфраструктури України за допомогою приватних мереж 5G .....	227
<b>РОЗДІЛ VII МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РОЗГОРТАННЯ ПРИВАТНИХ МЕРЕЖ 5G ADVANCED НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ СЕГМЕНТАВАННЯ NETWORK SLICING.....</b>		<b>233</b>
7.1.	Метод інтелектуального розгортання приватних мереж 5G Advanced на основі технології сегментавання .....	233
7.2.	Розробка імітаційної моделі для дослідження процесу сегментавання мережі 5G .....	252
7.3.	Функціональні можливості імітаційної моделі 5G .....	257
7.4.	Опис алгоритмів планування розподілу ресурсів в імітаційній моделі 5G .....	261
7.5.	Моделювання та дослідження методу інтелектуального прогнозування та розподілу трафіка між віртуальними сегментами мережі 5G .....	267
<b>ВИСНОВОК .....</b>		<b>275</b>
<b>ПОДЯКА .....</b>		<b>279</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>		<b>280</b>

## ВСТУП

Стрімкий розвиток інформаційних технологій та електронних комунікацій є невід'ємною частиною сучасного суспільства, що безпосередньо впливає на економічний та соціальний розвиток країн. У цьому контексті впровадження п'ятого покоління мобільних мереж (5G) відіграє ключову роль у формуванні нових стандартів зв'язку, які забезпечують високошвидкісний доступ до інформації, низькі затримки та масове підключення пристроїв. Особливого значення технологія 5G набуває для України, де розвиток сучасних електронних комунікацій є важливим кроком на шляху до побудови цифрової економіки та зміцнення національної безпеки.

5G Advanced, як наступний етап розвитку технології 5G, відкриває нові горизонти для електронних комунікацій, пропонуючи інноваційні рішення для ефективного розгортання, управління та оптимізації мереж. Такий розвиток сприятиме підвищенню пропускної здатності, покращенню енергоефективності та забезпеченню надійного зв'язку, що є критично важливим у сучасних умовах. Застосування передових технологій, таких як MU-MIMO, NOMA, агрегація спектра та штучний інтелект для управління навантаженням і ресурсами, дозволяє значно підвищити ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку нового покоління.

Монографія зосереджена на дослідженні та моделюванні методів розгортання мереж 5G Advanced, з особливим акцентом на впровадження приватних 5G-мереж в Україні. Аналізуються технологічні виклики та можливості, а також пропонуються інноваційні підходи, засновані на передовому світовому досвіді. Особлива увага приділяється розробці нових методів для ефективного використання радіо-ресурсів, інтеграції штучного інтелекту в процеси управління мережею та забезпечення високої якості обслуговування користувачів, що робить значний внесок у розвиток електронних комунікацій і технологічний прогрес країни.

## РОЗДІЛ I

---

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗГОРТАННЯ, СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ 5G

---

### 1.1. Поточний стан, виклики та перспективи впровадження 5G в Україні

Електронні комунікації – це процес обміну інформацією між людьми, організаціями чи пристроями за допомогою електронних засобів і технологій. До них належать усі форми передавання даних через електронні пристрої, такі як комп'ютери, мобільні телефони, Інтернет, радіозв'язок, супутники та оптоволоконні системи. Електронні комунікації дозволяють передавати текстові повідомлення, голосові дзвінки, відео, зображення та інші види даних як у реальному часі, так і з певною затримкою.

У сучасному швидкозмінному технологічному середовищі електронні комунікації відіграють ключову роль у забезпеченні взаємозв'язку між людьми, бізнесами та спільнотами по всій території України. Держава ставить за мету забезпечення доступності електронних комунікаційних послуг для всіх категорій користувачів, включаючи вразливі соціальні групи, та стимулювання ефективних інвестицій у ті сегменти ринку, де рівень конкуренції може бути недостатнім. Стрімкий розвиток цифрових технологій в Україні призвів до значного зростання попиту на надійний та високошвидкісний доступ до Інтернету. Відтак, одним із головних завдань держави є сприяння залученню ефективних інвестицій та впровадженню інновацій у сфері електронних комунікацій, що дозволить забезпечити безперебійний зв'язок для всіх користувачів, незалежно від їхнього місцезнаходження або кінцевого обладнання. Інвестиції у нові мережі, технології та рішення сприяють збільшенню асортименту електронних комунікаційних послуг та підвищенню їхньої якості [1].

З огляду на зростаючу кількість постачальників послуг та технологічний прогрес, користувачі отримали більше можливостей, що підвищує важливість їхньої поінформованості та захисту від потенційних ризиків. Задля цього держава має застосовувати про-



активний підхід до захисту прав споживачів, забезпечуючи справедливі та прозорі правила гри на ринку, а також сприяти підтриманню здорової конкуренції шляхом оперативного інформування споживачів про наявні пропозиції.

Зважаючи на динамічний розвиток галузі, зокрема в умовах військової агресії російської федерації, надзвичайно важливо, щоб регуляторна база не виступала бар'єром для впровадження інновацій, а навпаки, сприяла підвищенню довіри та стабільності у сфері.

Питання зміни клімату також набуває все більшої ваги у контексті електронних комунікацій. Ця галузь відіграє важливу роль у декарбонізації економіки, починаючи від розвитку віддаленої роботи до впровадження смарт-технологій.

У 2024 році Міністерство цифрової трансформації України презентувало Стратегію розвитку електронних комунікацій до 2030 [2]. Метою цієї стратегії є забезпечення сталого розвитку сфери електронних комунікацій України в умовах сучасних викликів, враховуючи світові тенденції та особливості національного розвитку. Стратегія передбачає адаптацію державної політики до потреб галузі, з акцентом на виконанні міжнародних зобов'язань України та необхідності впровадження змін для підтримки інновацій і конкурентоспроможності в цій сфері.

Стратегія визначає стратегічні цілі, а також завдання та заходи для їх досягнення, що дозволить удосконалити державну політику у цій сфері, створити сприятливі умови для розвитку галузі та забезпечити якісними електронними комунікаційними послугами користувачів на всій території країни.

Технології п'ятого покоління (5G) є основоположним елементом для стратегічного розвитку сучасних країн. В Україні їх впровадження не лише сприятиме інноваціям, але й стане ключовим чинником для відбудови та модернізації національної економіки. В Україні мобільний безпроводний доступ до Інтернету наразі забезпечується переважно технологіями 3G і 4G. Технологія 5G ще не впроваджена. Існує кілька важливих причин, чому 5G поки що не реалізовано в країні, зокрема через технічні та безпекові виклики, особливо в умовах воєнного стану.

Однією з основних проблем є ускладнення проведення необхідних науково-дослідних робіт, які є критично важливими для вивчення умов сумісного функціонування радіоелектронних засобів спеціальних користувачів (зокрема, військових і правоохоронних структур) з обладнанням п'ятого покоління. Ці дослідження вимагають доступу до певних частотних діапазонів, таких як 703–733/758–788 МГц та 3400–3800 МГц, які часто використовуються для цілей безпеки та оборони. У воєнний час доступ до цих частот значно обмежений, що унеможливує проведення необхідних тестів і досліджень.

Крім того, впровадження 5G вимагає значних інвестицій у розвиток інфраструктури, включаючи модернізацію базових станцій, оновлення мережевих компонентів, і створення нових мережевих сегментів. В умовах воєнного стану ці інвестиції є ризикованими через нестабільну ситуацію, що впливає на економічне середовище країни, а також через загрози фізичної безпеки інфраструктурних об'єктів.

Низький рівень цифрової грамотності, особливо серед старшого покоління, яке не користується цифровими послугами, конкуренція з боку мобільних операторів, а також низька платоспроможність окремих категорій населення є значними перешкодами для збільшення проникнення фіксованого ШСД в Україні.

Україна значно відстає від країн-лідерів за швидкістю фіксованого інтернету, з показником 77,7 Мбіт/с, що ставить її на один рівень із країнами, такими як Бруней, Словаччина та Хорватія. Хоча технічні можливості провайдерів дозволяють забезпечувати швидкість до 100 Мбіт/с і навіть до 1 Гбіт/с завдяки широкому використанню оптоволоконних мереж, споживачі часто обирають пакети з нижчими швидкостями через більш доступні тарифи.

Отже, хоча рівень покриття та швидкість Інтернету в Україні поступово зростають, за цими показниками країна все ще відстає від європейських стандартів. Факторами, що стримують розвиток ШСД, є низький рівень цифрової грамотності, недостатня платоспроможність населення, важкодоступність і нерентабельність покриття в окремих регіонах, особливо в сільській місцевості з низькою щільністю населення.

Також важливим фактором є питання кібербезпеки. 5G відкриває нові можливості для використання Інтернету речей (IoT), роботизації та автоматизації, що створює нові виклики з точки зору захисту даних та мереж від кібератак. В умовах воєнного стану, коли кіберзагрози значно зростають, забезпечення надійного захисту мережевих інфраструктур стає пріоритетним завданням, що також затримує впровадження нових технологій.

Отже, повномасштабне впровадження 5G в Україні наразі стикається з комплексом технічних, економічних та безпекових перешкод, які ускладнюють його реалізацію, особливо в умовах воєнного стану.

На сьогоднішній день розглядаються можливості проведення тестувань технології 5G для підготовки до її майбутнього повноцінного запуску в Україні. Це важливий крок на шляху до впровадження новітніх технологій, які можуть суттєво покращити якість мобільних послуг і підтримати цифровий розвиток країни.

Зважаючи на виклики воєнного часу, регулятор прийняв рішення тимчасово виділити постачальникам електронних комунікаційних послуг мобільного зв'язку радіочастотний спектр у діапазонах 2100 МГц, 2300 МГц і 2600 МГц. Це рішення спрямоване на підтримання високої якості мобільних послуг в умовах міграції населення та постійно зростаючого обсягу передавання даних.

За результатами вивчення попиту на користування цими частотами, Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері електронних комунікацій та радіочастотного спектра (НКЕК), виявила зацікавленість трьох основних постачальників мобільних послуг у отриманні ліцензій на користування спектром у діапазонах 2100 МГц, 2300 МГц і 2600 МГц. У зв'язку з цим, у лютому 2024 року НКЕК ухвалила рішення про надання радіочастотного спектра у зазначених діапазонах виключно на умовах конкурсу або аукціону.

На даний момент НКЕК здійснює всі необхідні заходи, передбачені Законом України «Про електронні комунікації», для реалізації процедури надання ліцензій на користування радіочастотним спектром. Це забезпечить прозорість процесу та створить умови для розвитку ринку телекомунікаційних послуг, що є особливо важливим у контексті відновлення та модернізації країни.

Закон України «Про електронні комунікації» встановлює сучасні вимоги до якості послуг передавання даних, що стають особливо актуальними з впровадженням технологій 4G та 5G [3]. Галузеві законодавчі виклики в «епоку» 4G/5G показано на рис.1.1.



Рис.1.1. Галузеві законодавчі виклики в «епоку» 4G/5G

У цьому контексті нові специфічні вимоги охоплюють декілька ключових аспектів:

- *Передача даних і медіа-контент.* Зокрема, йдеться про потокове відео та онлайн TV, що потребують значної пропускної здатності та надійності мережі. Технології 4G і 5G дозволяють забезпечити безперерйну трансляцію високоякісного відео в режимі реального часу.
- *Аутентифікація та ідентифікація.* Надійність і безпека користувацьких даних підвищуються за рахунок вдосконаленої аутентифікації та ідентифікації на основі особистих параметрів користувачів. Це критично важливо для захисту конфіденційності в умовах зростаючого обсягу даних, що передаються.
- *Хмарні обчислення та віртуальна реальність.* Технології 5G сприяють розвитку хмарних обчислень, а також онлайн 3D і

віртуальної реальності (VR) у режимі присутності. Це відкриває нові можливості для інтерактивних сервісів і розваг, освіти, медицини, бізнесу та інших сфер.

- *М2М (машина до машини)*. Широке використання 5G значно покращує можливості М2М-комунікацій, де пристрої обмінюються даними без втручання людини. Це є основою для розбудови розумних міст, автоматизованих виробництв і логістичних систем.
- *Інтернет речей (ІоТ)*. 5G дозволяє підтримувати величезну кількість пристроїв, що підключені до мережі, розширюючи можливості для розвитку ІоТ. Це включає управління розумними будинками, моніторинг екологічних систем, автоматизацію промислових процесів та багато іншого.
- *Права та обов'язки нових видів користувачів*. Із розвитком технологій виникають нові типи користувачів, такі як інформаційні системи та штучний інтелект. Закон регулює їхні права та обов'язки, зокрема у сфері використання даних і взаємодії з іншими учасниками мережі.
- *Юрисдикція розподілених даних*. З огляду на глобальність і складність сучасних мереж, виникає необхідність чітко визначити юрисдикцію розподілених даних, що передаються. Це дозволяє забезпечити правовий захист інформації в різних країнах та регіонах.
- *Захист даних у мережі*. Особлива увага приділяється безпеці даних під час їх передавання в мережах, зокрема захисту від кібератак, несанкціонованого доступу та інших загроз.
- *Міжоператорська взаємодія та взаєморозрахунки*. Закон встановлює правила взаємодії між операторами зв'язку, що включають обмін даними, взаєморозрахунки за надані послуги та забезпечення належного рівня якості обслуговування.
- *Вимоги до збереження інформації про активність користувачів*. Законодавство зобов'язує операторів зберігати інформацію про активність користувачів у мережі, що може використовуватись для аналізу, планування мережевих ресурсів і забезпечення безпеки.

- *Перехоплення і блокування даних.* Для забезпечення національної безпеки та боротьби зі злочинністю передбачено можливість перехоплення і блокування даних, що передаються через мережу, у випадках, визначених законодавством.
- *Державний нагляд у реальному часі.* Введення технологій 4G і 5G також вимагає посиленого державного нагляду за роботою мереж, зокрема у реальному часі, щоб оперативно реагувати на порушення та загрози.
- *Розподіл і страхування відповідальності.* Закон регулює питання відповідальності операторів та інших учасників ринку, зокрема у випадку втрат даних або порушень роботи мереж, що може вимагати страхування відповідальності.
- *Забезпечення авторських прав.* Впровадження нових технологій також вимагає додаткових заходів для захисту авторських прав, особливо у контексті передавання медіаконтенту та інших цифрових матеріалів через мережі 4G та 5G.

На рис. 1.2 представлено еволюцію мобільних послуг зв'язку в напрямку 5G [4]. З розвитком кожного покоління зв'язку суттєво змінювались як обсяг, так і типи послуг. Наразі існують такі покоління мобільних мереж: 1G, 2G, 3G, 4G та 5G. Кожен стандарт був впроваджений з метою покращення якості зв'язку, швидкості передавання даних і розширення функціональності мобільних комунікацій.

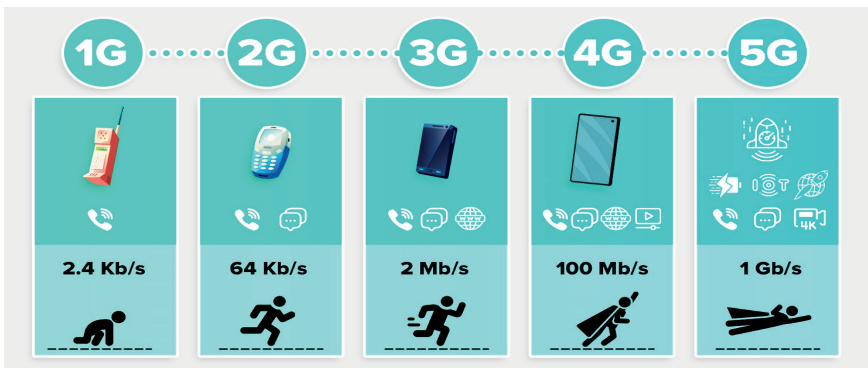


Рис. 1.2. Еволюція стандартів мобільного зв'язку

Перша генерація, 1G, запровадила безпроводні телефонні технології і мобільні телекомунікації у 1980-х роках. Швидкість

передавання даних у цей період становила від 2.9 до 5.6 КБайт/с. Попередньо існувала рухома радіотелефонна технологія, іноді згадувана як 0G. Незважаючи на популярність 1G протягом десятиліття, обмеження та низька швидкість спричинили перехід до вдосконаленішого стандарту 2G.

2G стало початком цифрової комунікації, коли на зміну прийшла більш удосконалена технологія на початку 1990-х. Важливою особливістю 2G було впровадження цифрової системи, що дозволило шифрувати дзвінки та надсилати SMS. В рамках 2G використовувалися такі технології, як GSM, CSD (wap) і CDMA. Вдосконалені 2G технології, такі як EDGE, GPRS і CDMA 2000, забезпечили перехід до наступного покоління – 3G.

3G змінило сценарій передавання даних, вперше було представлено у США в ранніх 90-х. Стандарт IS-95, працюючи на частоті 800 МГц, був запущений у середині 90-х. Технології, такі як UTMS, базовані на W-CDMA, дозволили досягнути швидкостей передавання даних до 2 Мбіт/с, що було значним досягненням для мобільних мереж.

Поступова модернізація технологій згодом призвела до появи проміжних етапів, відомих як 3.5G, 3.75G, та 3.9G, що ще більше наближали світ до впровадження стандарту 4G. Ці проміжні стандарти запровадили такі технології, як HSPA і HSPA+, які підвищили швидкість завантаження даних до 21 Мбіт/с та 42,2 Мбіт/с відповідно, використовуючи більш широкі канали та технологію MIMO для покращення зв'язку. MIMO (Multiple Input, Multiple Output) – це метод безпроводного зв'язку, який використовує кілька антен для одночасного передавання та приймання даних. Ця технологія зазвичай застосовується в безпроводних мережах, таких як Wi-Fi, LTE та 5G, для підвищення швидкості передавання даних, зниження затримок та покращення стабільності зв'язку. Використання MIMO дозволяє застосовувати множинну каналів одночасно, що підвищує ефективність передавання даних та забезпечує кращу якість зв'язку, особливо в умовах високих рівнів перешкод.

Конфігурації MIMO варіюються від базової до більш складних. Наприклад, MIMO 1x1 – це базова конфігурація з однією антеною

для передавання та однією для прийому, яка підтримує лише одночасну передачу або прийом даних. MIMO 2x2 є більш поширеною конфігурацією, яка використовує дві антени для передавання та дві для прийому, що дозволяє використовувати просторову різницю між антенами для підвищення швидкості передавання даних та забезпечення кращої якості сигналу. Конфігурації MIMO 3x3, 4x4, 8x8 і так далі використовують відповідно три, чотири, вісім і більше антен для передавання та прийому сигналу, надаючи ще більшу пропускну здатність і можливість підтримувати більше одночасних з'єднань та користувачів. Кожна з цих конфігурацій MIMO може бути використана для підвищення ефективності та надійності безпроводного зв'язку залежно від конкретних потреб та умов використання.

Після впровадження стандарту LTE, або 3.9G, було створено основу для розвитку 4G, яке стало першою технологією, здатною забезпечувати передачу даних на швидкостях до 100 Мбіт/с і більше. Наступним етапом став LTE Advanced (LTE-A), який використовував агрегацію несучих для підвищення швидкості передачі даних і стабільності з'єднання. Ця технологія відіграла важливу роль у переході до 5G, забезпечивши можливість об'єднання кількох частотних діапазонів для збільшення загальної пропускну здатності мережі.

Завдяки надзвичайно високим швидкостям передавання даних та мінімальним затримкам, технологія 5G має великий потенціал для застосування у сферах, що вимагають масштабної підключеності, таких як Інтернет речей (IoT), де можливе одночасне підключення мільйонів пристроїв [6]. Це відкриває нові перспективи для розвитку інфраструктури «розумних» міст, автоматизованих виробничих процесів та автономного транспорту. Крім того, 5G дозволить інтегрувати такі технології, як штучний інтелект і великі дані, для створення інтелектуальних систем управління. Від «розумних» побутових приладів до безпілотних транспортних засобів, 5G сприяє розбудові більш інтегрованого та автоматизованого світу. Еволюція характеристик мобільних мереж чітко представлена на рис. 1.3, що демонструє прогрес у розвитку мобільних технологій [4].



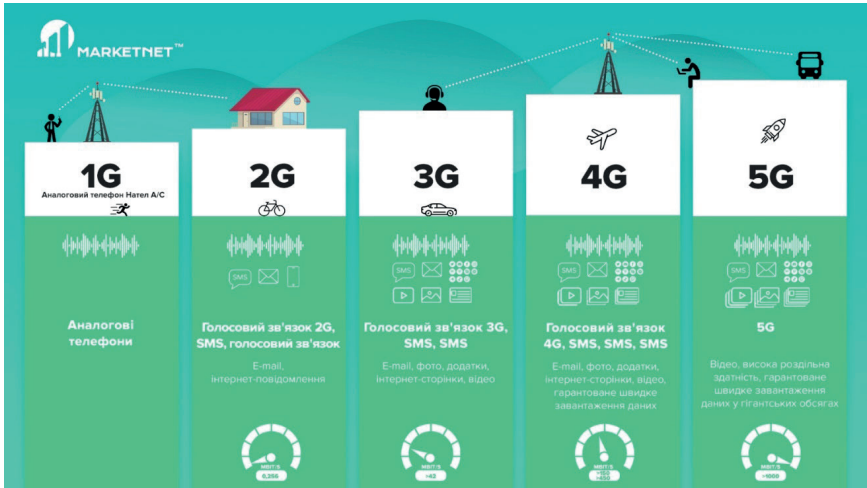


Рис. 1.3. Еволюція характеристик мереж мобільного зв'язку

На рис. 1.4 представлено порівняння характеристик трьох поколінь мобільного зв'язку: 3G, 4G/LTE та 5G. Порівняння проведено за такими параметрами: максимальна швидкість зв'язку, комунікаційна зона та стабільність зв'язку. Технологія 3G (3-тє покоління) забезпечує максимальну швидкість зв'язку від 64 до 384 Кбіт/с, має майже 100 % охоплення населення і може використовуватися завжди, незалежно від місця розташування. 4G / LTE (4-тє покоління) пропонує максимальну швидкість зв'язку в діапазоні від 37.5 до 150 Мбіт/с для LTE та від 110 Мбіт/с до 1 Гбіт/с для 4G. Однак, 4G/LTE недоступна в гірських районах та деяких сільських районах, і спілкування може перериватися в місцях з товстими стінами та іншими перешкодами. Технологія 5G (5-тє покоління) забезпечує максимальну швидкість зв'язку близько 10 Гбіт/с, але доступна тільки в деяких районах, таких як мегаполіси. У 5G затримка становить близько 1 мс, що значно краще порівняно із затримкою в 10 мс для 4G. Таким чином, з кожним новим поколінням мобільного зв'язку максимальна швидкість значно зростає, комунікаційна зона залишається найбільшою для 3G, а стабільність зв'язку найкраща у 3G. 4G/LTE має певні проблеми в будівлях з товстими стінами, а 5G забезпечує найнижчу затримку передавання даних, що робить його найбільш перспективним для майбутніх застосувань.

	3G 3-го покоління	4G / LTE 4-е покоління	5G 5-те покоління
<b>Максимальна швидкість зв'язку</b>	64 ~ 384 Kbit/c	(LTE) 37.5 - 150 Mbit/c (4G) 110 Mbit/c ~ 1 Gbit/c	Близько ~ 10 Tbit/c
<b>Комунікаційна зона</b>	Майже 100% охоплення населення	(4G/LTE) Недоступно в гірських районах та деяких сільських районах	Тільки в деяких районах, таких як мегаполіс
<b>Стабільність</b>	Можна використовувати де завгодно, незалежно від місця розташування	Спілкування має тенденцію перериватися в місцях з товстими стінами тощо.	У 4G затримка становить 10 мс, а у 5G - близько 1мс

Рис. 1.4. Відмінності мереж мобільного зв'язку

Цей стрімкий розвиток мобільних технологій підкреслює їх невід'ємну роль у формуванні нашого сучасного світу, підтверджуючи, що сфера мобільного зв'язку та інтернет-технологій продовжить бути в авангарді інновацій та змін у майбутньому [6].

5G Advanced – це покращена версія технології п'ятого покоління (5G), яка знаходиться на етапі активного розвитку і впровадження. Ця технологія є логічним продовженням 5G, орієнтованою на подальше підвищення ефективності, продуктивності та функціональності мереж мобільного зв'язку. Метою 5G Advanced є забезпечення більш комплексного і гнучкого підходу до використання мобільних мереж, що дозволить вирішити нові виклики, які не були повністю охоплені попередніми версіями 5G [7].

Основні характеристики та переваги 5G Advanced:

1. *Вища швидкість передавання даних.* 5G Advanced забезпечить ще більшу швидкість передавання даних порівняно з базовою версією 5G, що дозволить більш ефективно працювати з великими обсягами інформації, включаючи потокове відео у надвисокій роздільній здатності, складні віртуальні реальності та обчислення у хмарі.
2. *Знижена затримка.* Подальше зниження затримки в мережі дозволить покращити реакцію в реальному часі, що є критично важливим для таких застосувань, як автономні транспортні засоби, дистанційна хірургія та інші сценарії, де необхідна миттєва реакція.

3. *Підвищена надійність.* 5G Advanced включатиме вдосконалені механізми захисту та безпеки, що забезпечать більш надійний зв'язок навіть у складних умовах. Це особливо важливо для критично важливих секторів, таких як медицина, енергетика, транспорт і національна безпека.
4. *Розширена підтримка IoT.* Технологія 5G Advanced оптимізована для підключення ще більшої кількості пристроїв Інтернету речей (IoT), що відкриває можливості для розвитку розумних міст, промислового інтернету та масового впровадження IoT на глобальному рівні.
5. *Інтелектуальні мережі.* Використання штучного інтелекту (AI) та машинного навчання у 5G Advanced дозволить автоматизувати управління мережею, підвищити ефективність використання ресурсів і забезпечити більш точне прогнозування потреб користувачів.
6. *Розширення спектра частот.* 5G Advanced підтримуватиме нові частотні діапазони, включаючи міліметрові хвилі, що забезпечить більшу пропускну здатність і поліпшить якість зв'язку у щільно населених міських районах.

5G Advanced стане основою для нових інноваційних рішень у різних галузях, включаючи:

- *Автономні транспортні засоби.* Зниження затримки і підвищення надійності забезпечить безпечну та ефективну роботу безпілотних автомобілів.
- *«Розумні» міста.* Розширена підтримка IoT дозволить впроваджувати інтелектуальні системи управління міською інфраструктурою, енергозбереженням, трафіком та іншими важливими аспектами міського життя.
- *Індустрія 4.0.* 5G Advanced стане каталізатором для розвитку Індустрії 4.0, забезпечуючи гнучкі та надійні виробничі процеси з широким використанням робототехніки та автоматизації.
- *Медицина галузь.* Підтримка віддаленої медицини, телемедицини та інших технологій, які потребують надійного та швидкого з'єднання.

5G Advanced стане ключовим елементом у створенні майбутнього цифрового світу, забезпечуючи високий рівень продуктивності, надійності та безпеки для всіх видів комунікацій. Технологія відкриє нові горизонти для інновацій і стане важливим інструментом для досягнення вищих стандартів життя та продуктивності у різних сферах людської діяльності.

У монографії будуть детально розглянуті інноваційні підходи до розгортання технології 5G Advanced. Зокрема, акцент зроблено на дослідженні новітніх методів використання терагерцових частот для забезпечення надвисоких швидкостей передавання даних, а також на методів множинного доступу. Розглянуто оптимізацію мережевої інфраструктури, використання штучного інтелекту для планування мереж, покращену взаємодію між різними пристроями та платформами, розгортання приватних мереж, а також нові можливості, які відкриває 5G Advanced для забезпечення зв'язку у віддалених та важкодоступних регіонах. Інноваційні методи створюють основу для успішного впровадження 5G Advanced в Україні, що дозволить країні закласти фундамент для майбутнього розвитку цифрової інфраструктури.

---

## 1.2. Основні технології та методи розгортання сучасних мереж мобільного зв'язку 5G Advanced

5G Advanced є еволюційним кроком у розвитку безпроводних мереж п'ятого покоління, що поєднує в собі ряд передових технологій для забезпечення високої швидкості передавання даних, надійного зв'язку та широких можливостей для різноманітних застосувань [8]. Основні технології для розгортання мереж 5G Advanced показано на рис. 1.5.

У цьому розділі розглядаються ключові технології, що лежать в основі розгортання мереж 5G Advanced.

1. *Network Function Virtualization (NFV)*. Віртуалізація функцій мережі дозволяє гнучко керувати мережевими ресурсами, розподіляючи їх за потребою, що забезпечує ефективність та масштабованість мережі.

2. *Device-to-Device Communication*. Пряме спілкування між пристроями без базової станції знижує затримки, підвищує швидкість передавання даних і оптимізує використання спектра.
3. *Millimeter Wave*. Використання міліметрових хвиль (mmWave) відкриває нові можливості для передавання даних на надвисоких частотах, що дозволяє значно підвищити пропускну здатність мережі.
4. *Massive MIMO*. Технологія Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) значно збільшує кількість одночасних підключень та ефективно використовує радіочастотний спектр, що є ключовим для підтримки великої кількості користувачів.
5. *Green Communications*. Енергоефективні рішення, що мінімізують споживання енергії, забезпечують сталість розвитку мережі та зменшують вплив на навколишнє середовище.
6. *Ultra-densification*. Ця технологія передбачає збільшення кількості базових станцій на одиницю площі для покращення покриття та підвищення пропускну здатності в зонах з високою щільністю користувачів.
7. *Big Data and Mobile Cloud Computing*. Інтеграція великих даних і мобільних хмарних обчислень дозволяє обробляти величезні обсяги інформації в режимі реального часу, підвищуючи якість обслуговування користувачів та ефективність мережі.
8. *Radio Access Techniques*. Новітні радіодоступні технології забезпечують надійне та швидке з'єднання для кінцевих користувачів, враховуючи особливості частотного спектра та топології мережі.
9. *Internet of Things (IoT)*. Інтернет речей стає невід'ємною частиною 5G Advanced, що дозволяє з'єднувати мільярди пристроїв та забезпечувати їхню взаємодію в реальному часі.
10. *Wireless Software Defined Networking (WSDN)*. Програмно визначені мережі (SDN) дозволяють динамічно керувати мережевими ресурсами та швидко адаптувати мережу до змінних умов, що є особливо важливим для 5G Advanced.



Рис. 1.5. Основні технології для розгортання мереж 5G Advanced

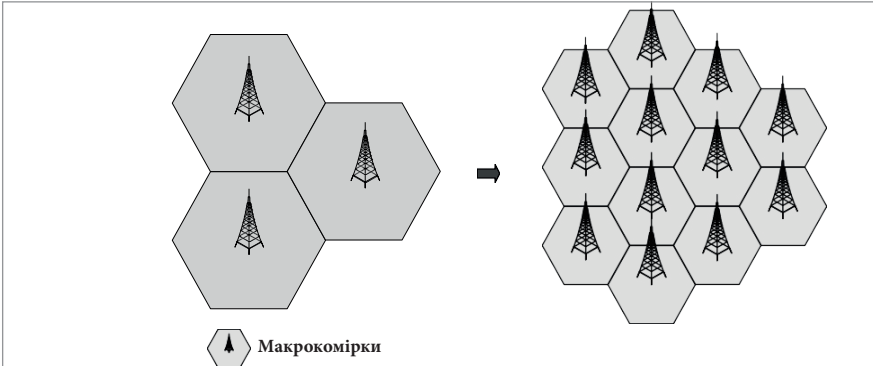
Загалом ці технології утворюють комплексний підхід до розгортання мереж 5G Advanced, забезпечуючи високі показники продуктивності, гнучкість та надійність, необхідні для підтримки сучасних і майбутніх телекомунікаційних потреб.

### 1.2.1. Метод розгортання малих комірок 5G

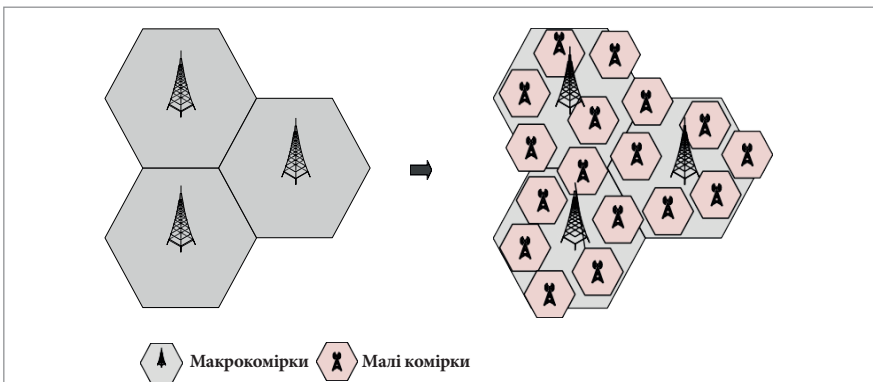
Для збільшення пропускну здатності мобільних мереж LTE/5G та 5G Advanced існують три основні підходи: розширення спектра, застосування технологій MIMO та збільшення кількості базових станцій. Останній підхід, відомий як ущільнення мережі, передбачає встановлення більшої кількості комірок для підтримки високого попиту на мобільний трафік, особливо у густонаселених міських районах та місцях великого скупчення людей, таких як торгові центри та

стадіони. Зростання мобільного широкосмугового трафіка вимагає адаптації розгортання мереж LTE та 5G для задоволення підвищених потреб користувачів. Дві ключові вимоги до мереж 5G включають забезпечення надзвичайної пропускну здатності та високих швидкостей передачі даних. Ущільнення RAN (Radio Access Network) відіграє вирішальну роль у досягненні цих цілей. Ущільнення мережі може бути реалізовано шляхом розгортання більшої кількості макрокомірок, що створює однорідну мережу. Це зменшує міжкоміркову відстань (ISD), що дозволяє збільшити покриття на квадратний кілометр без значного збільшення навантаження на кожен макрокомірку. Планування багаторівневих мереж мобільного зв'язку є складнішим у порівнянні з однорівневими мережами, оскільки потребує окремого врахування щільності базових станцій. Розгортання більшої кількості макрокомірок має свої обмеження через складність і вартість пошуку місць для їх встановлення. Альтернативою є ущільнення мережі шляхом розгортання малих комірок з меншою потужністю всередині зон покриття макрокомірок, створюючи багаторівневу мережу. Такий підхід дозволяє ефективніше використовувати простір і забезпечувати кращу якість обслуговування в місцях з високим попитом на зв'язок. У мережах LTE/5G та 5G Advanced впровадження малих комірок особливо важливе для забезпечення необхідної пропускну здатності та швидкості передачі даних. Малі комірки можуть бути розташовані в місцях високої концентрації користувачів, таких як торгові центри, стадіони та ділові райони, що покращує якість обслуговування та знижує навантаження на макрокомірки. Рис. 1.6 демонструє два підходи: однорівневе покриття з більшою кількістю макрокомірок (рис. 1.6a) та дворівневе покриття з додаванням малих комірок поверх макрокомірок (рис. 1.6b) [9].

Малі комірки завдяки компактним розмірам можуть встановлюватися на ліхтарних стовпах, світлофорах та фасадах будівель, що спрощує процес оренди місць і знижує витрати. Розгортання малих комірок стало простішим завдяки впровадженню функцій, таких як управління інтерференцією, NFV та SDN у рамках проекту 3GPP. Додатково з'явилися нові рішення для безпроводного транзитного зв'язку, що полегшують їх розгортання.



а)



б)

Рис. 1.6. Способи покриття мереж 5G

Малі комірки додаються у зонах з високим попитом на дані, на межах покриття макрокомірок та у неохоплених макрокомірками зонах, як зовні, так і всередині приміщень, покращуючи загальне покриття мережі. Такий підхід утворює гетерогенну мережу (HetNet), де малі комірки, хоч і мають обмежений радіус дії, значно підвищують пропускну здатність і зменшують навантаження на макрокомірки, покращуючи якість обслуговування (QoS) для користувачів.

Розгортання малих комірок зменшує відстань між користувачами та базовими станціями, що знижує втрати сигналу, підвищує швидкість передачі даних і покращує енергоефективність. На рис. 1.7 показано приклад архітектури гетерогенної 5G мережі.



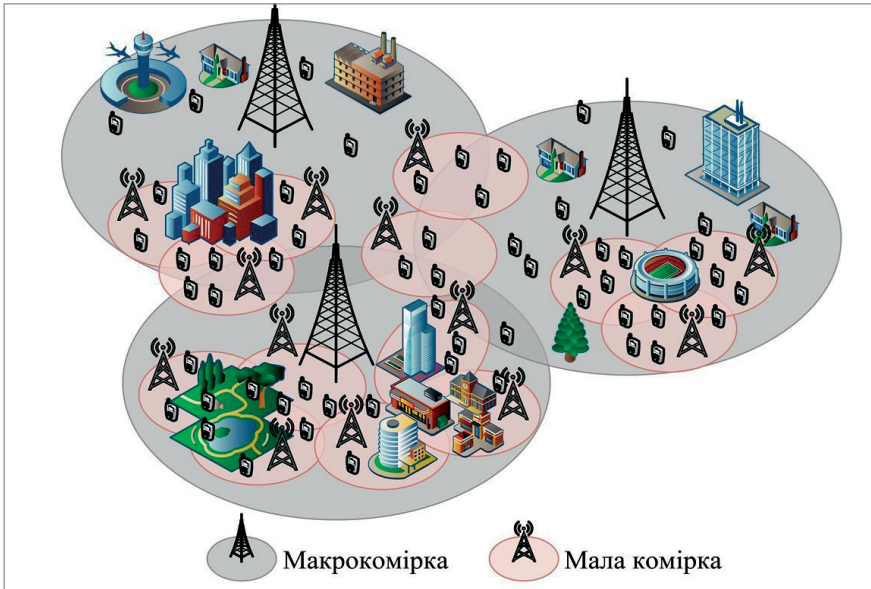


Рис. 1.7. Приклад покриття гетерогенної мережі 5G

Основною складовою мереж 5G буде утворення надщільних мереж (UDN, Ultra-Dense Network), де малі комірки відіграють ключову роль у підвищенні ємності мережі [10]. Хоча ідея гетерогенних мереж (HetNets) не є новою, оскільки вона вже застосовувалася у мережах 3G та 4G LTE, де комірки різного розміру розгортані в межах однієї мережі. У мережах 3G використовувалися макро- та малі комірки, розділені за допомогою різних частот. У 4G LTE через спільне використання однієї частоти виникала значна інтерференція між комірками різних розмірів. Тим не менш, застосування методів координації міжстильникової інтерференції (ICIC), покращеної ICIC (eICIC) та ще ефективнішої ICIC (feICIC) дозволяє успішно керувати міжстильниковою інтерференцією та збільшувати пропускну здатність мережі при розширенні її масштабів [11].

Використання методів придушення інтерференції є важливим аспектом внутрішньосмугового розгортання, оскільки вони дозволяють повною мірою використовувати переваги HetNets. Завдяки технології feICIC, користувацькі пристрої (UE) у малих комірках можуть знижувати інтерференцію від макрокомірок, що забезпечує

вищу швидкість передавання даних, особливо на межах комірки, та збільшує загальну ємність мережі [12]. Ця техніка є особливо корисною для UDN.

Координаційні технології також допомагають підвищити продуктивність внутрішньосмугових мереж HetNet. Технології, такі як координована багатоточка (CoMP) та її покращений варіант eCoMP, дозволяють динамічно координувати планування та формування променів між сусідніми комірками. При розгортанні мереж, де макрокомірки та малі комірки працюють на різних частотах (позасмугове розгортання), інтерференцію між комірками можна усунути за допомогою простих методів придушення інтерференції.

Для UDN, які очікуються у 5G, управління інтерференцією стає складнішим через високий рівень взаємних перешкод. Велика кількість малих комірок і їх близьке розташування (близько 100 м одна від одної) можуть призводити до того, що кілька сигналів одночасно впливатимуть на користувачів, знижуючи якість сигналу. Для вирішення проблеми можна застосовувати два підходи: проактивну координацію міжстільникових інтерференцій у часовій області та реактивну координацію міжкоміркових інтерференцій на основі несучої частоти.

Однією з ключових переваг 5G є позасмугові реалізації, які дозволяють досліджувати нові діапазони частот, такі як mmWave, забезпечуючи ширший спектр і можливість розділення площин керування та користувача (C/U). У звичайній HetNet макрокомірки та малі комірки працюють на однаковій частоті, що призводить до неоптимального використання ресурсів та енергії.

В архітектурі розділеної площини C/U макрокомірка відповідає за площину керування, забезпечуючи широке покриття та управління мобільністю на нижчих частотах. Рішення також надає послуги даних для користувачів, які не покриваються малими комірками, та для швидкорухомих користувачів, щоб уникнути частих хендоверів у малих комірках. Малі комірки відповідають за площину користувача, підвищуючи пропускну здатність та забезпечуючи високошвидкісні з'єднання для передавання даних (рис.1.8).

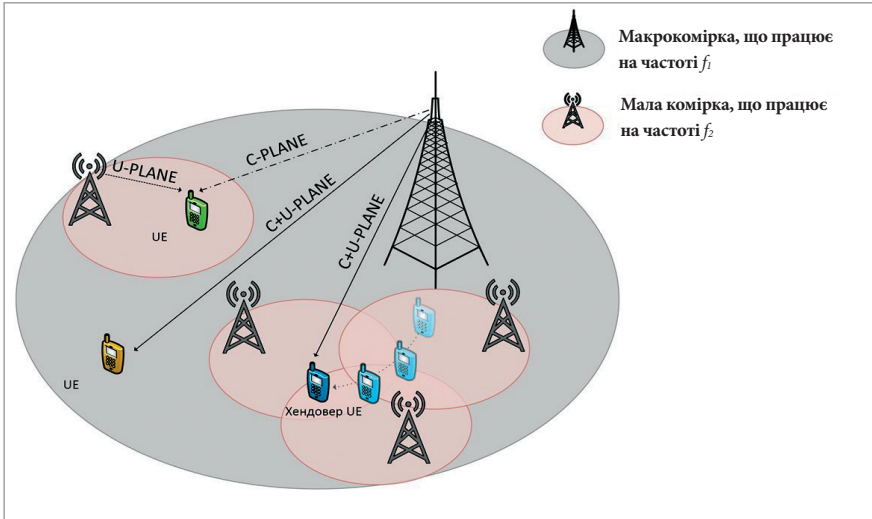


Рис. 1.8. Управління гетерогенними мережами

З розділеною архітектурою C/U користувачі будуть одночасно підключені до макрокомірки та малих комірок, що дозволить швидко передати користувача макрокомірці у разі втрати зв'язку з малою коміркою. Рішення потребує нового інтерфейсу, за допомогою якого макрокомірка зможе керувати малими комірками, активуючи або деактивуючи їх для енергозбереження та управління радіоресурсами, що зменшить інтерференцію. Подвійне підключення, вперше впроваджене в LTE, знайде широке застосування в 5G Advanced, що дозволить підтримувати одночасні з'єднання через 5G, 4G LTE, 3G та Wi-Fi у багатокомпонентному розгортанні. Такий підхід не лише забезпечує безперерйну та поліпшену взаємодію з користувачами, але й відіграє ключову роль у тісній інтеграції LTE та NR для 5G Advanced. Це необхідно для плавного впровадження 5G, спрощення його розгортання та забезпечення тривалого перехідного періоду. На рис. 1.9 наведено приклад розгортання радіоінтерфейсу 5G, який демонструє інтеграцію різних технологій [17].

Завдяки такій інтеграції, користувачі зможуть одночасно використовувати переваги обох технологій, що забезпечить якісне покриття та високу швидкість передавання даних.

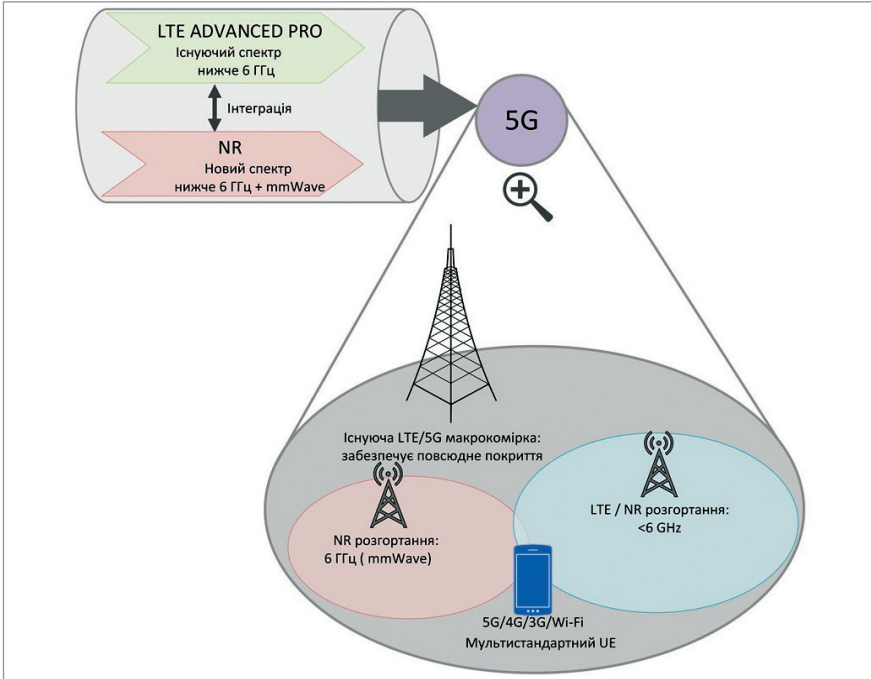


Рис. 1.9. Радіоінтерфейс мережі 5G Advanced

### 1.2.2. Розгортання 5G Advanced з використанням технологій mMIMO, mmWave та 3D-формування променя

Іншою проривною технологією, невід’ємною частиною успіху 5G, є формування променя. Звичайні базові станції передають сигнали в декількох напрямках незалежно від позиції цільових користувачів або пристроїв. Завдяки використанню масивів з кількома входами та виходами MIMO (Multiple Input Multiple Output), що містять десятки невеликих антен, об’єднаних в одну форму, можна використовувати алгоритми обробки сигналів для визначення найбільш ефективного шляху передавання кожному користувачеві, тоді як окремі пакети можна надсилати кількома шляхами, які потім створюються для досягнення кінцевого користувача у заздалегідь визначеній послідовності.

У мережах 5G Advanced технологія МІМО відіграє ключову роль у забезпеченні високої пропускну здатності, ефективного використання спектра та надійного зв'язку [14]. Одним із найважливіших аспектів цієї технології є збільшення кількості антен на базових станціях і користувацьких пристроях.

### *Кількість антен у 5G Advanced*

1. *Традиційний МІМО.* У традиційних системах МІМО, які використовувалися в мережах 4G LTE, на базових станціях зазвичай встановлювали від 2 до 4 антен, а на користувацьких пристроях (наприклад, смартфонах) – 1 або 2 антени. Це дозволяло збільшити пропускну здатність за рахунок використання кількох потоків даних, які передавалися одночасно.
2. *Massive МІМО.* У мережах 5G Advanced кількість антен на базових станціях значно збільшується, що призводить до впровадження технології Massive МІМО. Massive МІМО може включати десятки, а іноді й сотні антен на одній базовій станції. Типові конфігурації можуть включати 64, 128 або навіть 256 антен. Це забезпечує можливість одночасного передавання десятків потоків даних на різні пристрої, що значно підвищує загальну пропускну здатність мережі.
3. *Користувацькі пристрої.* Хоча користувацькі пристрої, такі як смартфони, зазвичай мають менше місця для встановлення антен, вони також використовують більше антен порівняно з попередніми поколіннями. Сучасні смартфони можуть мати від 4 до 8 антен для підтримки зв'язку в діапазонах Sub-6 GHz та mmWave (міліметрові хвилі). Це дозволяє пристроям ефективніше приймати і передавати дані, використовуючи переваги Massive МІМО на базових станціях.

### *Переваги збільшеної кількості антен*

- *Формування вузьких променів.* Збільшена кількість антен дозволяє базовій станції формувати дуже вузькі промені, спрямовані безпосередньо на користувача. Це забезпечує

сильніший і надійніший сигнал, навіть у складних радіоумовах, таких як міські каньйони або всередині будівель.

- *Покращена продуктивність у реальному часі.* Можливість одночасного використання багатьох антен дозволяє мережі краще адаптуватися до змін умов середовища і забезпечувати стабільний рівень обслуговування для більшої кількості користувачів.
- *Зниження рівня інтерференції.* Використання великої кількості антен дозволяє точніше контролювати напрямок сигналу, що знижує інтерференцію між різними користувачами і підвищує загальну якість зв'язку.
- *Підтримка високої щільності підключень.* Більша кількість антен на базових станціях дозволяє обслуговувати більше користувачів одночасно, що є критично важливим у густонаселених районах і під час великих масових заходів.

Наразі мобільні мережі в основному працюють у діапазонах частот від 300 МГц до 3 ГГц, із загалом менше ніж 1 ГГц виділеного спектра. На цих частотах спектр сильно перевантажений через використання багатьма різними службами. Радіомовлення AM і FM, телевізійне мовлення, Wi-Fi та поточний стільниковий зв'язок 3G/4G LTE є прикладами таких служб. Це вимагає розгляду мобільного зв'язку у доступних діапазонах частот, які можуть запропонувати більший обсяг спектра. Однак спектр mmWave, який охоплює діапазон від 30 до 300 ГГц, менш використовується. Військові передавання, автомобільні радары та транспортні з'єднання є прикладами служб, що працюють на частотах міліметрових хвиль. Незважаючи на це, на цих частотах доступний значний обсяг спектра. Діапазон 60 ГГц, також відомий як V-діапазон, охоплює частоти від 57 до 66 ГГц і характеризується суцільним блоком із 9 ГГц доступного неліцензованого спектра. E-діапазон, що складається з двох блоків по 5 ГГц у діапазонах від 71 до 76 ГГц та від 81 до 86 ГГц, пропонує загалом 10 ГГц доступного спектра. Інші перспективні діапазони mmWave для 5G знаходяться на частотах 28 ГГц і 38 ГГц, які разом пропонують приблизно 4 ГГц спектра. Водночас, правила використання цих діапазонів mmWave відрізняються залежно від країни.

Оскільки передача даних 5G займає міліметрову хвилю, втрати вільного простору, пропорційні меншому розміру антени, і втрати на дифракцію, властиві високим частотам і відсутності проникнення стін, значно більші. З іншого боку, менший розмір антени також дозволяє набагато більшим решіткам займати той самий фізичний простір. Оскільки кожна з цих менших антен потенційно переопризначає напрямок променя кілька разів на мілісекунду, масове формування променя для підтримки проблем пропускну здатності 5G стає більш можливим. З більшою щільністю антени в тому ж фізичному просторі, більш вузькі промені можуть бути досягнуті за допомогою масивного МІМО, забезпечуючи тим самим засіб для досягнення високої пропускну здатності з ефективнішим відстеженням користувача [15].

3D-формування променя у 5G дозволяє базовим станціям точно спрямовувати радіосигнали до користувачів у тривимірному просторі, враховуючи їхнє положення по горизонталі та вертикалі, наприклад, на різних поверхах будівель (рис.1.10).

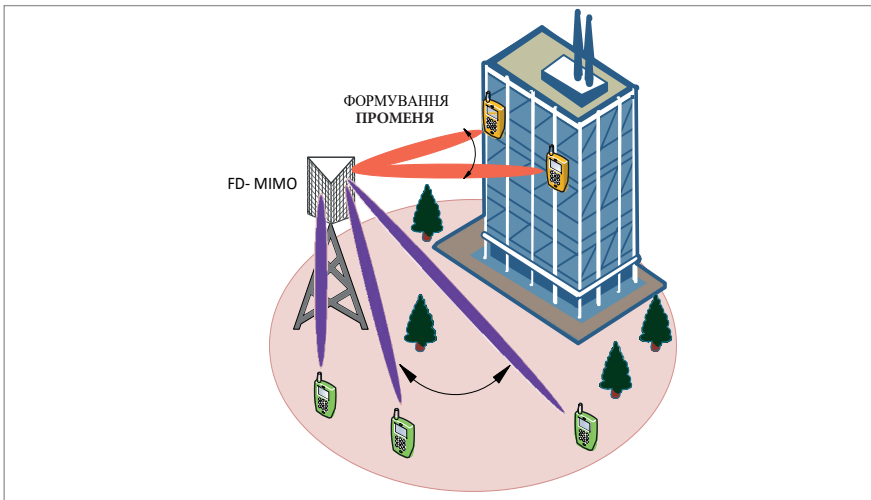


Рис. 1.10. Архітектура радіоінтерфейсу 5G мережі, що поєднує mMIMO, mmWave та 3D-формування променя

Такий підхід покращує якість зв'язку, мінімізує перешкоди, оптимізує використання частотного спектра та знижує енергоспоживання мережі, що особливо важливо в густонаселених міських районах і при високій щільності підключених пристроїв.

### 1.2.3. Методи множинного доступу для мереж 5G Advanced

Підвищення спектральної ефективності є одним з головних рішень для підвищення пропускної спроможності мобільної мережі. Методи МА (Multiple Access, множинний доступ) – це сукупність технологій і методів, що використовуються в телекомунікаційних системах для забезпечення одночасного доступу кількох користувачів до одного каналу зв'язку або до одного спектра частот [16].

Починаючи з першого покоління мобільних мереж, методи МА використовуються з метою найбільш ефективного розподілу наявних ресурсів серед великої кількості UE. Оскільки одним із найбільш обмежених ресурсів мобільної мережі є спектр, у системі МА різні UE отримують можливість одночасно використовувати доступну смугу пропускання, збільшуючи тим самим спектральну ефективність.

Схеми МА можна класифікувати на дві категорії: ОМА та NOMA. Переваги схем ОМА в тому, щоб уникнути внутрішньокіліметрових перешкод, але вони вимагають ретельного планування комірок, щоб зменшити міжкіліметрові перешкоди [17].

Навпаки, схеми NOMA схильні до високих внутрішньокіліметрових перешкод, але надійні проти затухання та міжкіліметрових перешкод. Методи магістерської роботи були ретельно вивчені в літературі та впроваджені в мобільні мережі з самого початку. У 1G та 2G переважали схеми ОМА: множинний доступ з частотним поділом часу (FDMA) та множинний доступ з часовим поділом (TDMA) відповідно. Однак у 2G стільникова система IS-95 використовувала множинний доступ з кодовим поділом (CDMA) у його асинхронній формі (тобто не ортогональний) для UL. Така сама тенденція продовжувалась і в 3G із такими системами, як Code Division Multiple Access 2000 (CDMA2000) та WCDMA, де передавання UL також були неортогональними.

У 4G LTE для DL та UL були обрані OFDMA та множинний доступ з розподілом частоти з однією несучою (SC-FDMA) відповідно. Вибір цих схем МА був ключовим кроком для збільшення пропускної здатності та покращення продуктивності 4G LTE. Незважаючи на



суттєві вдосконалення, які пропонують схеми MA у 4G LTE, вони можуть бути недостатніми, щоб задовольнити очікувані вимоги щодо руху 5G. Тому нові схеми MA, спрямовані на подальше підвищення спектральної ефективності, є дуже очікуваними.

NOMA привернув багато уваги як метод MA, який може збільшити пропускну здатність мереж 5G/5G Advanced завдяки своїй здатності збільшувати спектральну ефективність. Інші переваги використання NOMA включають більшу пропускну здатність на краю комірки, послаблений зворотний зв'язок каналу та низьку затримку передавання. Крім того, за допомогою NOMA можна досягти хорошої робочої точки, коли як ефективність спектра, так і енергетична ефективність стають оптимальними.

Дві основні категорії NOMA були широко визначені в літературі: NOMA домену влади та NOMA коду. У першому сигнал кожного мультиплексованого UE відокремлюється в області потужності; в останньому для розрізнення мультиплексованих сигналів використовуються специфічні для користувача коди розповсюдження. Робота представляє суть найбільш актуальних методів NOMA. Робота над цією дисертацією зосереджена на енергетичному домені NOMA у низхідній лінії зв'язку, тому відтепер ми будемо називати цю схему просто NOMA.

У NOMA, крім мультиплексування в часовій та частотній областях, UE також мультиплексується в домені потужності, що недостатньо використовується в схемах MA, що використовувались у попередніх поколіннях (наприклад, FDMA, TDMA, CDMA та OFDMA). У схемах OMA, що використовуються в 4G LTE в DL, передача здійснюється з повною потужністю, але з розділеною пропускну здатністю. Цей підхід не використовує переваги швидкості квантування в системі. З метою зменшення накладних витрат, пов'язаних із зворотним зв'язком стану каналу між UE і BS, UE повідомляє квантоване значення показника якості каналу (CQI). Кожен CQI відповідає MCS, а отже, і дискретній швидкості. CQI, про який повідомляє UE, залежить від вимірюваного співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR), і чим вище CQI, тим вище коефіцієнт підсилення каналу, і навпаки. Через ці

швидкості квантування для деяких запланованих UE розподіленої потужності може бути достатньо для підтримки повідомленого CQI, але недостатньо для наступного вищого CQI. У цих випадках, якщо використовується ОМА, частина розподіленої потужності може розглядатися як надлишок потужності та недостатнє використання ресурсів. Однак за допомогою NOMA це можна подолати.

На відміну від схем ОМА, що використовуються в 4G LTE, ортогональність ресурсів (наприклад, частота, час, коди розповсюдження) для NOMA більше не потрібна. Принцип NOMA полягає у виборі UE з великою різницею в умовах каналу та мультиплексуванні їх в однакових частотно-часових ресурсах, але з різним рівнем потужності передавання. Це дозволяє UE з високими умовами каналу отримувати доступ до ресурсів, призначених UE з поганими умовами каналу, отже, збільшуючи спектральну ефективність та пропускну здатність системи; ось тут покладається перевага NOMA перед схемами ОМА, що використовуються в 4G LTE.

На рис. 1.11 показано порівняння мультиплексування між ОМА та NOMA для чотирьох UE. У передавачі сигнали мультиплексованих UE накладаються, і методи адаптивного розподілу потужності використовуються для визначення потужності для кожного UE [18]. Виділена потужність залежить від умов каналу, чим вище коефіцієнт підсилення каналу, тим вища потужність, і навпаки. Хоча розподіл енергії зменшує потужність, виділену кожному мультиплексованому UE, їм вигідно частіше планувати та мати доступ до більшої пропускну здатності, як показано на рис. 1.11.

На стороні приймача використовуються методи послідовної інтерференції перешкод (SIC) для пом'якшення внутрішньокоміркових перешкод. Кількість UE, які можна мультиплексувати в одних ресурсах за допомогою NOMA, не обмежена; однак внутрішньокоміркові перешкоди пропорційні кількості UE.

Більше того, сузір'я накладеного сигналу в передавачі стає більш складним, оскільки збільшується кількість мультиплексних UE, що створює великі проблеми на стороні декодування та погіршує продуктивність мережі.

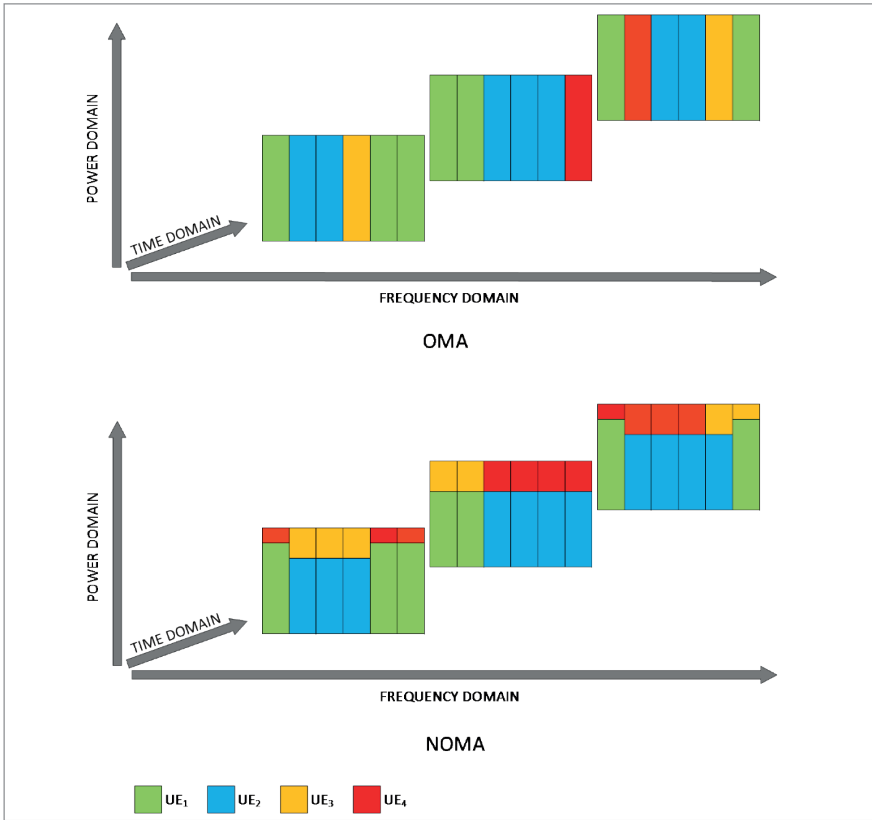


Рис. 1.11. Різниця між мультиплексуванням користувачів між OMA та NOMA

Відмінною рисою NOMA є те, що обслуговування проводиться з використанням одних і тих самих частотних та часових ресурсів. При цьому використовується суперпозиційне кодування передавача і послідовне придушення перешкод (Successive Interference Cancellation – SIC) в приймачі. Відразу, звичайно, складно зрозуміти, про що йдеться, тому давайте пояснимо принцип роботи на прикладі, зображеному на рис. 1.12.

Як показано на рис. 1.12, базова станція (БС) відправляє накладені один на одного (тобто що знаходиться в одній частотно-часовій області) сигнали двом користувачам (абонентам 1 та 2). При цьому абонент 1 має більш високий рівень сигналу, порівняно з другим. У NOMA для таких користувачів з «високим» та «низьким» рівнями

сигналів ввели спеціальну назву – сильний (Strong User – SU) і слабкий (Weak User – WU) користувач відповідно. Сильний користувач спочатку віднімає сигнал слабого користувача через систему послідовного придушення перешкод – SIC, потім декодує свій власний сигнал. Слабкий користувач сприймає сигнал сильного користувача як шум і виявляє власний сигнал без необхідності застосування SIC. Оскільки слабкий користувач має найгіршу якість каналу зв'язку і як наслідок велику кількість перешкод, то технології NOMA йому передбачено порівняно більше потужності в одному каналі. Тобто в одному просторово-часовому каналі переміщуються два сигнали, один з яких слабого користувача має більший рівень (до 70 %), рис. 1.13.

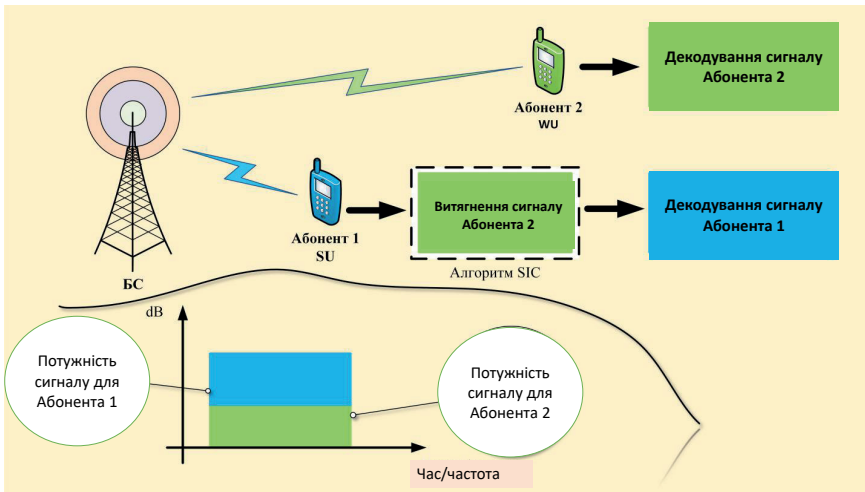


Рис. 1.12. Принцип роботи NOMA у низхідному каналі

У сучасних мережах така передача даних без NOMA неможлива, оскільки сигнали в каналі створюють взаємні перешкоди.

### Переваги NOMA

У порівнянні з традиційним ортогональним множинним доступом NOMA має кілька значних переваг:

1. NOMA забезпечує чудову спектральну ефективність за рахунок одночасного обслуговування кількох користувачів з одним і тим же частотним ресурсом та алгоритмом придушення перешкод – SIC;

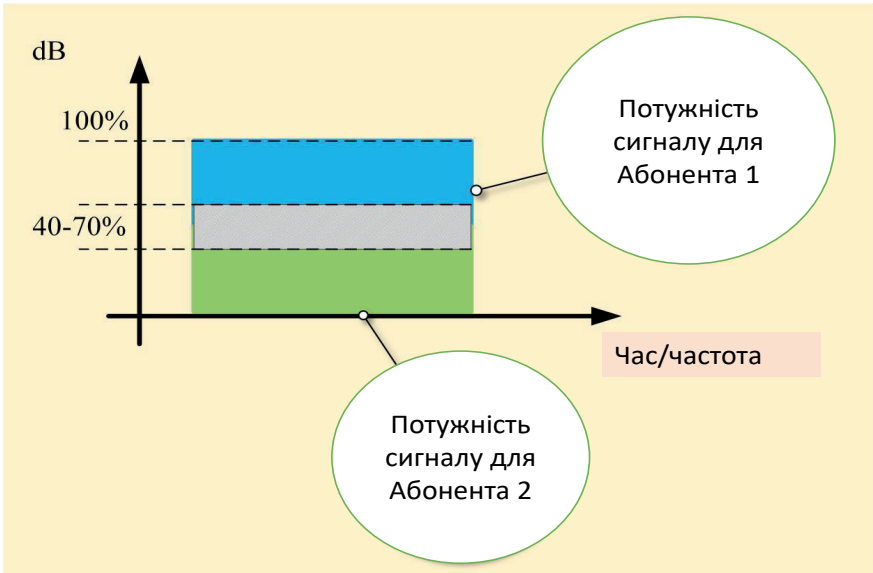


Рис. 1.13. Відсоткове співвідношення сигналів для двох користувачів NOMA

2. Розглянута технологія збільшує кількість абонентів, що одночасно обслуговуються, а, отже, у перспективі за допомогою NOMA може бути організований зв'язок з «масивом користувачів». Цілком можливо, що незабаром після її впровадження ми почуємо про те, що NOMA здатна ущільнювати один канал 16, 32, 64 і т.д. користувачів (аналогічно глибині модуляції, наприклад, QAM 64 та ін.).
3. NOMA дозволить зменшити затримку в мережі під час передавання даних, оскільки користувачеві не потрібно буде очікувати запланованого часового інтервалу для передавання своєї інформації. Користувач просто почне передавати сигнал у будь-який проміжок часу, який може бути декодований одержувачем (рис. 1.14).
4. Завдяки гнучкому управлінню потужністю між сильними та слабкими користувачами NOMA може забезпечити потрібну якість обслуговування для кожного абонента окремо. Зокрема, так як для слабого користувача виділяється більше потужності в каналі (рис. 1.14), це дозволяє забезпечити

хорошу пропускну здатність для абонентів, що знаходяться на межі стільника. І тим самим гарантувати однакову якість обслуговування всім абонентам у соті.

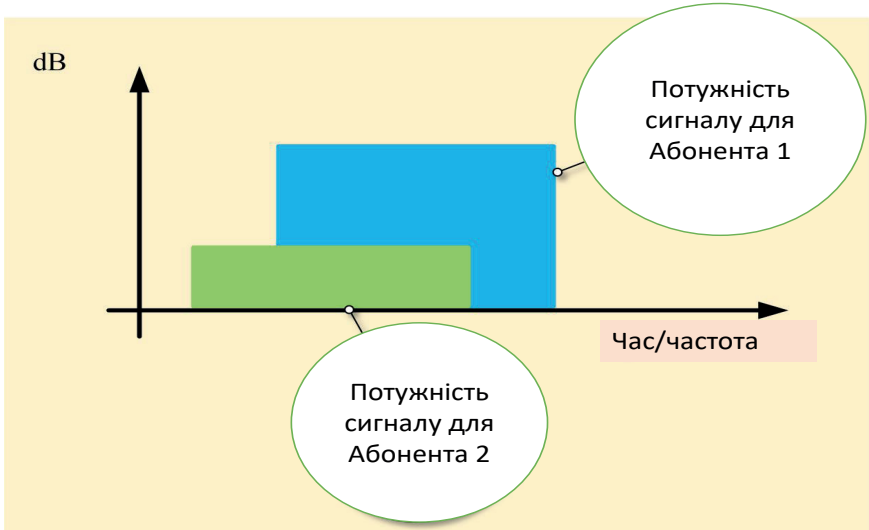


Рис. 1.14. Передача NOMA без очікування тимчасового інтервалу

Слід зазначити, що перша згадка технології та можливості її застосування в 5G наводилася в статті [17], опублікованій ще в 2016 році. Також цікаво відзначити, як NOMA працюватиме разом із існуючими рішеннями радіодоступу. Так продуктивність NOMA може бути додатково збільшена за рахунок об'єднання з технологією багатоантенного радіодоступу MIMO. Кожному користувачеві до кодування власної інформації необхідно декодувати інформацію всіх інших користувачів з найгіршим коефіцієнтом посилення каналу (тих користувачів, що знаходяться в одному кластері). Само собою це призводить до складності прийому та додаткових витрат обчислювальних та енергетичних ресурсів абонентського пристрою на «розшифровку» даних. Коли в системі SIC виникне помилка, то, найімовірніше, подальше декодування інформації інших користувачів буде виконано помилково. Це означає, що кількість користувачів у кожному кластері буде досить низька, щоб зменшити ефект поширення помилок. Для отримання переваг мультиплексування «за потужністю» з використанням NOMA, потрібна значна різниця коефіцієнтів

посилення каналу між сильними та слабкими користувачами. Це обмежує ефективну кількість пар користувачів, що, своєю чергою, зменшує коефіцієнт сумарного приросту NOMA. Для роботи NOMA кожен користувач повинен надсилати базовій станції інформацію про коефіцієнт посилення свого каналу, а технологія NOMA є досить чутливою до неточності визначення цього коефіцієнта.

Агрегація каналів у поєднанні з NOMA може підвищити швидкість передавання даних, але оптимальний тип агрегування поки що не визначений. Також не вирішене питання щодо простого і ефективного алгоритму розподілу потужності для кожного абонента. Крім того, залишається завдання фізичної реалізації безпеки з'єднання, що потребує подальшого дослідження.

---

#### **1.2.4. Метод розгортання мережевої архітектури 5G Advanced за допомогою технологій NFV/SDN та Cloud RAN**

Загалом, не тільки радіоінтерфейс буде розвиватися в бік 5G Advanced. Нові засоби, такі як NFV і SDN, забезпечують гнучкість архітектури, необхідну для виконання різноманітних вимог до послуг. Використання обох технологій вже відбувається для LTE, в основному для базової мережі (CN) [18]. Однак мережі 5G будуть досліджувати ці дві технології з самого початку, що вимагатиме переосмислення деяких аспектів традиційного проектування мережі. Характерна гнучкість 5G поширяться на RAN з опціями централізованої RAN (C-RAN) і розподіленої RAN (D-RAN). Останній в основному працює в застарілих архітектурах і характеризується наявністю всіх радіокомпонентів базової станції (BS), розташованих у кожній комірці. Радіостанція BS складається з віддаленого радіоприймача (RRH) (тобто приймача або антени) і базового блоку обробки сигналу (BBU), з'єднаних між собою за допомогою спільного загальнодоступного радіоінтерфейсу (CPRI) або ініціативи архітектури відкритої базової станції (OBSAI). У C-RAN BBU переміщуються з кожної окремої комірки до централізованого блоку, який називається пулом BBU; ця централізація допомагає спростити архітектуру мережі, зменшити експлуатаційні

витрати та прискорити розгортання та масштабованість. Зв'язок між RRH і пулом BBU відомий як fronthaul. Результати C-RAN дуже цікаві для UDN, оскільки зменшує навантаження на мережу, маючи спрощені базові станції з меншою кількістю обладнання, меншою потужністю та меншим простором. C-RAN підвищує продуктивність мережі через з'єднання інтерфейсів X2 і S1 від кількох BBU, що покращує мультиплексування. Проте, це вимагає передавання оцифрованих даних на великі відстані, що підвищує вимоги до затримки та синхронізації, і збільшує витрати на розгортання, особливо при використанні оптоволоконних з'єднань. Можливими альтернативами є OTN, PON, WDM, або CPRI через Ethernet чи бездротовий зв'язок. Централізація BBU дозволяє віртуалізувати їх функції (Cloud RAN), підвищуючи гнучкість і знижуючи витрати [19].

Розвиток мережі метро має бути спрямований на оптимізацію хмарних сервісів, оскільки її трафік перевищує базову мережу. Периферійні обчислення децентралізують сховища і обробку даних, створюючи нові потоки трафіка. Ядро метро може розвантажити CN, зосередившись на міжметро та основному транзитному трафіка. Поєднання цих інновацій і модернізація мобільних мереж є важливими для успіху 5G, забезпечуючи вимоги до послуг і високу якість обслуговування. На рис. 1.15 показано архітектуру мережі 5G, що демонструє взаємодію LTE, NR, Cloud RAN, NFV, SDN, та конвергентної мережі метро з децентралізацією центрів обробки даних для забезпечення масштабованості й гнучкості послуг 5G. Технологія SDN в першу чергу розділяє площину даних і площину управління. Ця функція допомагає операторам програмувати функції управління мережею 5G. Технологія NFV дозволяє операторам визначати функції мережі за допомогою програмного забезпечення і запускати їх на апаратному забезпеченні загального призначення. Реалізація мережевих функцій за допомогою віртуалізації дозволить задовольнити зростаючі потреби в трафіка.

Також, використання архітектури SDN і NFV дозволить реалізувати концепцію розгалуження мережі 5G. Нарізка мережі дозволяє створювати багато віртуальних мереж на основі загальної фізичної інфраструктури, де мережа розгалужується з кінця в кінець,



утворюючи ізольовану мережу, призначену для різних типів послуг і вимог. Концепція нарізки може бути прийнята для віртуального розділення як мережі C-RAN, так і опорної мережі. Отже, вона буде підтримувати різні випадки використання RAN і 5G, що працюють через одну RAN. Кожен фрагмент мережі має свої власні ресурси в межах пропускної здатності мережі, NFV, хмарні обчислення і SDN з обмеженнями QoS.

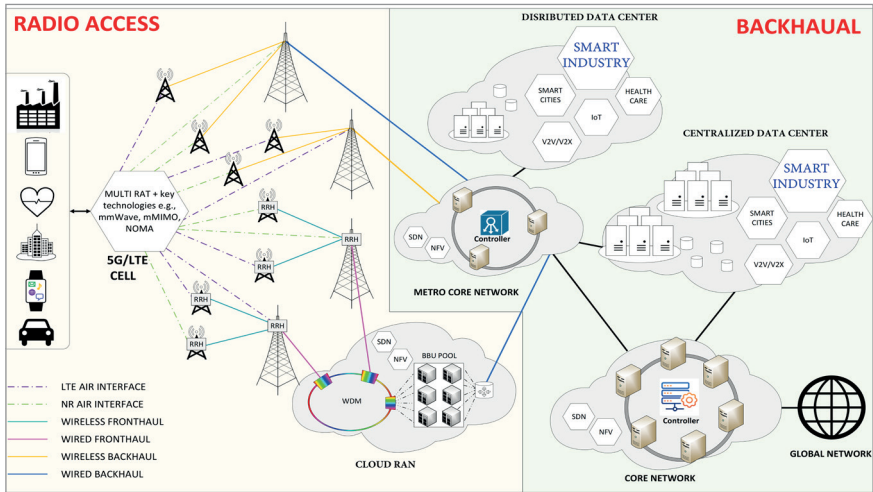


Рис. 1.15. Архітектура мережі 5G

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ АГРЕГАЦІЇ СПЕКТРА, MU-MIMO І NOMA НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ 5G ADVANCED

---

## 2.1. Управління радіоресурсами та принципи модуляції в системах мобільного зв'язку 5G

Управління радіоресурсами (RRM) у мережах 5G є важливою складовою для забезпечення ефективності мережі та високої якості обслуговування (QoS) через ефірний інтерфейс. Функції RRM охоплюють широкий спектр алгоритмів і методів, які допомагають базовим станціям (eNodeB) виконувати завдання з управління мережею, такі як планування пакетів, контроль навантаження, прийом і передача хендоверів (HO) на основі різних алгоритмів [20].

Однією з ключових функцій RRM є планування пакетів і адаптивне управління модуляцією та кодуванням (AMC). Ця функція дозволяє eNodeB динамічно розподіляти доступні радіоресурси серед активних користувачів, що підвищує надійність і швидкість передавання даних. AMC використовує адаптивну модуляцію і кодування для налаштування типу модуляції та швидкості кодування відповідно до поточних умов радіоканалу.

Одним із важливих елементів RRM є механізм зворотного зв'язку, який забезпечує обмін інформацією між користувачьким обладнанням (UE) та базовими станціями. UE періодично повідомляє eNodeB про виміряну якість каналу через індикатор якості каналу (CQI). CQI є важливим параметром, який використовується для вибору відповідної схеми модуляції та кодування (MCS), ефективного планування за часом і частотою, управління інтерференцією та регулювання потужності передавання.

Збір і обробка CQI проводиться регулярно. Основний принцип, за яким працює RRM, полягає в тому, щоб розподіляти ресурсні

блоки (RB) користувачам із кращими умовами каналу, уникаючи розподілу ресурсів тим, хто стикається з високими перешкодами або завмираннями сигналу. Усі користувачі, залучені до АМС, повинні повідомляти CQI, який обчислюється на основі декодування опорних сигналів, до eNodeB. Це дозволяє eNodeB визначати MCS на основі поточної якості каналу (рис. 2.1).

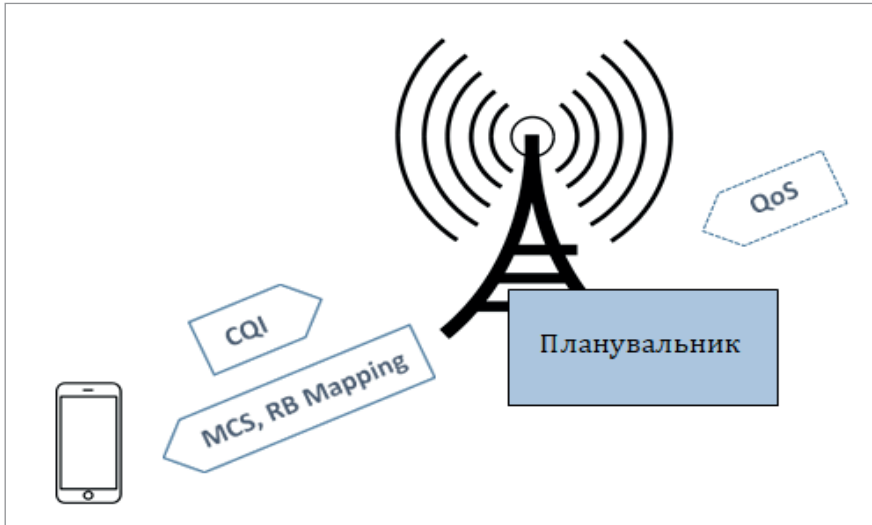


Рис. 2.1. Схема управління ресурсами в мережах 5G

Залежно від умов каналу, RRM вибирає різні схеми модуляції. Якщо умови каналу сприятливі, застосовуються схеми модуляції вищого порядку, такі як 64QAM, які мають високу спектральну ефективність і забезпечують високу швидкість передавання даних. У випадках, коли умови каналу погіршуються, АМС вибирає схеми модуляції нижчого порядку, наприклад, QPSK, яка є більш надійною проти помилок передавання, хоча і з меншою спектральною ефективністю. Відповідна швидкість кодування обирається залежно від якості каналу для кожної схеми модуляції. Чим краща якість каналу, тим вища швидкість кодування, що, у свою чергу, підвищує швидкість передавання даних.

Базові станції eNodeB відіграють ключову роль у виконанні функцій RRM. Вони відповідають за прийняття рішень щодо розподілу радіоресурсів, виходячи з інформації про стан каналу,

отриманої від UE. Завдяки механізму зворотного зв'язку, eNodeB може адаптувати свої рішення в реальному часі, забезпечуючи ефективне використання спектра та високу якість обслуговування. RRM є критичним елементом для забезпечення високої якості обслуговування (QoS) у мережах 5G. Завдяки ефективному управлінню радіоресурсами, мережа може динамічно адаптуватися до змін умов радіоканалу, забезпечуючи надійне та швидке з'єднання для всіх користувачів. Це особливо важливо в умовах високої щільності трафіка та різних умов навколишнього середовища, які можуть впливати на якість сигналу.

Однією з головних переваг AMC є його здатність адаптуватися до змін умов каналу в реальному часі. Це дозволяє eNodeB вибирати оптимальні схеми модуляції та кодування для кожного користувача, забезпечуючи максимальну пропускну здатність та надійність з'єднання. Наприклад, у сприятливих умовах каналу використовуються схеми модуляції вищого порядку, такі як 64QAM, що дозволяє передавати дані на високій швидкості. У менш сприятливих умовах застосовуються схеми модуляції нижчого порядку, як-от QPSK, що забезпечує більшу надійність передавання за рахунок меншої спектральної ефективності.

Попри численні переваги, управління радіоресурсами в мережах 5G стикається з певними викликами. Одним з основних викликів є забезпечення балансування між ефективним використанням спектра та підтриманням високої якості обслуговування для всіх користувачів. Це вимагає постійного моніторингу та адаптації алгоритмів RRM до змін умов каналу і навантаження на мережу.

З розвитком технологій 5G Advanced, функції RRM стають ще більш складними та важливими. Впровадження нових технологій, таких як міліметрові хвилі (mmWave) та масивний MIMO, вимагає нових підходів до управління радіоресурсами. Зокрема, координація між великою кількістю антен та ефективне використання широкого спектра стають критично важливими для забезпечення високої продуктивності мережі.

Стандарт 3GPP визначає ключові показники ефективності (KPI) для оцінки ефективності мережі на всіх рівнях. Найбільш релевант-

ними параметрами для цієї оцінки є пропускна здатність, затримка, втрата пакетів, отримана потужність опорного сигналу (RSRP), індикатор сили сигналу (RSSI), якість отриманого опорного сигналу (RSRQ) та співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR). Розробка та моніторинг цих параметрів є базовими знаннями, необхідними для обчислення CQI (індикатору якості каналу).

Основні KPI параметри сучасних мереж мобільного зв'язку [21]:

1. *Пропускна здатність*. Визначає максимальну кількість даних, які можуть бути передані через мережу за одиницю часу. Вимірюється у бітах на секунду (bps).
2. *Затримка*. Відображає час, необхідний для передавання пакета даних від відправника до отримувача. Вимірюється у мілісекундах (ms).
3. *Втрата пакетів*. Відсоток пакетів, які не доходять до пункту призначення. Вимірюється у відсотках.
4. *Отримана потужність опорного сигналу (RSRP)*. Відображає потужність сигналу, прийнятого від базової станції. Вимірюється в децибелах міліват (дБм).
5. *Індикатор рівня сигналу (RSSI)*: Визначає загальну потужність сигналу, прийнятого від базової станції. Вимірюється в дБм.
6. *Якість отриманого опорного сигналу (RSRQ)*. Відображає співвідношення RSRP до загальної потужності сигналу RSSI. Вимірюється у децибелах (дБ).
7. *Співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR)*. Визначає співвідношення потужності сигналу до суми потужностей інтерференційних сигналів та шуму. Вимірюється у децибелах (дБ).

Для оцінки стану каналу користувачьке обладнання (UE) інтерполює кілька референсних сигналів (RS). UE використовують RS для оцінки каналу низхідної лінії зв'язку. На основі цих сигналів та сигналів керування базові станції оцінюють якість отриманих передач і надсилають відповідні заходи назад до базової станції у звіті зворотного зв'язку CQI.

Правильна оцінка KPI є критично важливою для точного обчислення CQI, що, у свою чергу, дозволяє мережі динамічно

адаптувати тип модуляції та швидкість кодування відповідно до поточних умов радіоканалу. Це допомагає забезпечити високу якість обслуговування (QoS) для кінцевих користувачів, зменшити затримки, мінімізувати втрати пакетів та покращити загальну продуктивність мережі. Пропускна здатність мобільних мереж є одним із ключових параметрів, що визначає ефективність та якість обслуговування користувачів. У мережах 5G оцінка пропускну здатності базується на фізичних характеристиках каналу, типах модуляції та швидкості кодування, а також на ефективному управлінні радіоресурсами.

На фізичному рівні мережі LTE часто використовують частотний дуплексний поділ (FDD) для досягнення симетричної пропускну здатності як у висхідній, так і в низхідній лініях зв'язку. FDD дозволяє одночасно використовувати окремі частотні смуги для передавання та прийому даних, що забезпечує стабільну та високу пропускну здатність. LTE підтримує різні смуги пропускання, зокрема 1,4, 3, 5, 10, 15 та 20 МГц. Кожна з цих смуг пропускання складається з певної кількості ресурсних блоків (RB), які є найменшими одиницями ресурсів, що можуть бути призначені користувачеві. Розмір одного RB у частотній області становить 180 кГц, а в часовій області – 0,5 мс. В одному інтервалі передавання (TTI), який триває 1 мс, розміщується 12 піднесучих у частотній області. Таким чином, пропускна здатність одного RB становить 180 кГц.

При використанні смуги пропускання 20 МГц, система LTE може розгортати до 1200 піднесучих. Однак, 10 % смуги зарезервовані для захисної смуги, що захищає від інтерференції. Це означає, що фактична пропускна здатність буде трохи нижчою за номінальну. Кожен RB складається з певної кількості піднесучих, і кількість цих RB визначає загальну пропускну здатність каналу. Спектральна ефективність визначає кількість інформаційних бітів, які можуть бути передані через певну частотну смугу. У мережах LTE використовуються різні схеми модуляції, такі як QPSK, 16QAM і 64QAM. Вибір конкретної схеми модуляції залежить від якості каналу, визначеної через параметри CQI. У сприятливих умовах каналу застосовуються схеми модуляції вищого порядку, які мають більшу спектральну ефективність.

Максимальна теоретична пропускна здатність для LTE визначається множенням кількості RB на спектральну ефективність. Наприклад, у смузі пропускання 20 МГц із 1200 піднесучими (приблизно 100 RB) та використанням модуляції 64QAM можна досягти високої пропускної здатності. Проте реальна пропускна здатність залежить від багатьох факторів, таких як якість каналу, рівень інтерференції, швидкість кодування та інші.

У мережах 5G оцінка пропускної здатності значно ускладнюється завдяки використанню нових технологій і ширших смуг пропускання. 5G підтримує смуги пропускання до 100 МГц і навіть більше у діапазонах міліметрових хвиль (mmWave) [22]. Це дозволяє досягати пропускної здатності на рівні декількох гігабіт на секунду. Міліметрові хвилі (mmWave) використовують частоти в діапазоні від 24 ГГц до 100 ГГц. Принципи агрегації частот показано на рис. 2.2.

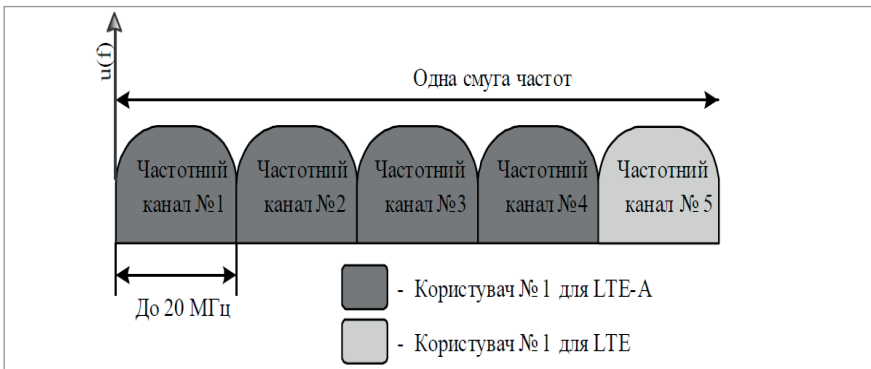


Рис. 2.2. Агрегація смуги частот

Технологія масивного MIMO дозволяє використовувати велику кількість антен на базових станціях для одночасного передавання та прийому сигналів. Це значно підвищує спектральну ефективність та пропускну здатність мережі. У поєднанні з технологіями beamforming, масивний MIMO дозволяє точно направляти сигнали до користувачів, зменшуючи інтерференцію та покращуючи якість зв'язку.

Окрім FDD, у мережах 5G використовується також часове розділення каналів (TDD), що дозволяє динамічно розподіляти час передавання та прийому даних залежно від поточного навантаження

мережі. Це забезпечує гнучкіше використання радіоспектра та підвищує загальну ефективність мережі. Агрегація носіїв (Carrier Aggregation) дозволяє об'єднувати кілька частотних смуг для підвищення загальної пропускну здатності. У мережах 5G агрегація носіїв може включати як суб-6 ГГц смуги, так і mmWave смуги, забезпечуючи комбіновану високу пропускну здатність та стабільність з'єднання [23].

Модуляція – це процес зміни одного або декількох параметрів носійного сигналу (наприклад, амплітуди, частоти чи фази) відповідно до інформаційного сигналу. У мобільних технологіях, таких як LTE та 5G, модуляція дозволяє ефективно передавати дані через безпроводні канали.

Модуляція в 5G: 5G використовує більш розширені техніки модуляції ніж LTE для підвищення швидкості та ефективності мережі [24]:

- QPSK, 16QAM, 64QAM. Схоже на LTE, але використовується в більш складних сценаріях з вищою пропускну здатністю.
- 256QAM. Завдяки цій схемі модуляції можна передавати 8 біт на символ, що значно збільшує швидкість передавання даних порівняно з LTE.

Швидкості передавання в 5G: Швидкість 5G може значно перевищувати LTE, досягаючи теоретичних швидкостей до 10 Гбіт/с або більше за оптимальних умов.

LTE та 5G використовують складні методи модуляції для оптимізації швидкості передавання даних і якості з'єднання, що дозволяє підтримувати широкий спектр застосувань від потокового відео до Інтернету речей і автономних транспортних засобів. Оцінка пропускну здатності мереж LTE та 5G є складним процесом, який враховує численні технічні параметри. На фізичному рівні LTE використовує частотний дуплексний поділ і смуги пропускання від 1,4 до 20 МГц, що визначають загальну пропускну здатність каналу. У мережах 5G, завдяки ширшим смугам пропускання, міліметровим хвилям, масивному MIMO, агрегації носіїв, модуляції 256 QAM та NOMA, досягаються гігабітні швидкості передавання даних NOMA у поєднанні з адаптивним управлінням радіоресурсами оптимізує використання спектра і забезпечує високу якість обслуговування в будь-яких умовах.



## 2.2. Дослідження пропускної здатності 5G мережі в умовах використання різної кількості MIMO антен та ширини каналу

У попередніх розділах зазначалося, що на базі стандарту LTE можливо розгортати мережі 5G, тому важливим завданням є розробка методики розрахунку пропускної здатності мережі з урахуванням змін у структурних параметрах системи, таких як кількість антен, ширина каналу, модуляція та швидкість кодування. У цій роботі використовується програмне забезпечення LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1 для аналізу розташування сигналів, даних управління та корисного навантаження, а також для визначення пропускної здатності з урахуванням зазначених параметрів. При використанні ширини каналу 20 МГц розташування сигналів в ресурсній сітці показана на рис. 2.3.

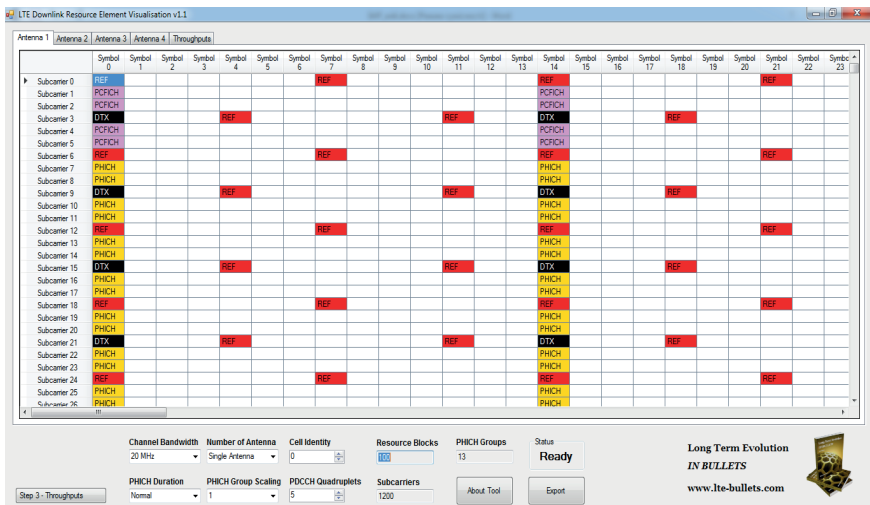


Рис. 2.3. Розташування даних низхідного сигналу для ширини каналу 20 МГц і однієї антени

Пропускна здатність при ширині каналу 20 МГц і різних швидкостях модуляції та коду наведена на рис. 2.4. Цей показник демонструє збільшення пропускної здатності при використанні більшої кількості ресурсних блоків (100).

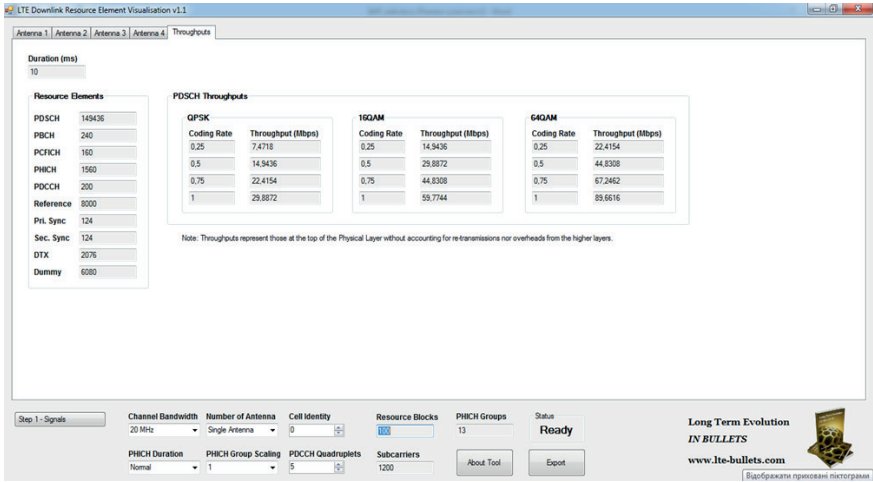


Рис. 2.4. Максимальна пропускну здатність при ширині каналу 20 МГц і одній антені

Можливі варіанти використання MIMO-антени в 5G наведені на рис. 2.5. На рис. 2.6 показано розташування сигналів управління та корисного навантаження (а), а також досягнута пропускну здатність (б) при використанні ширини каналу 20 МГц та 4x4 MIMO.

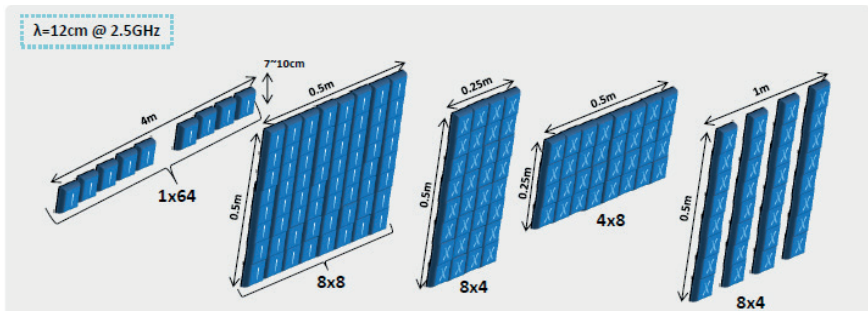
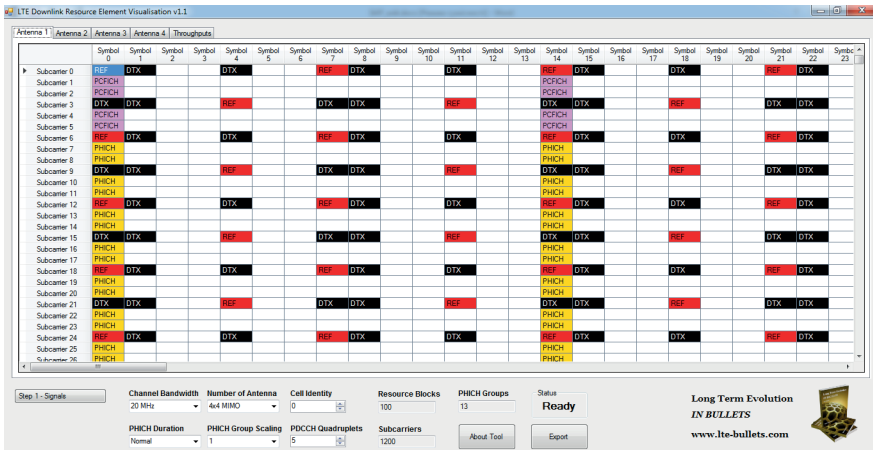


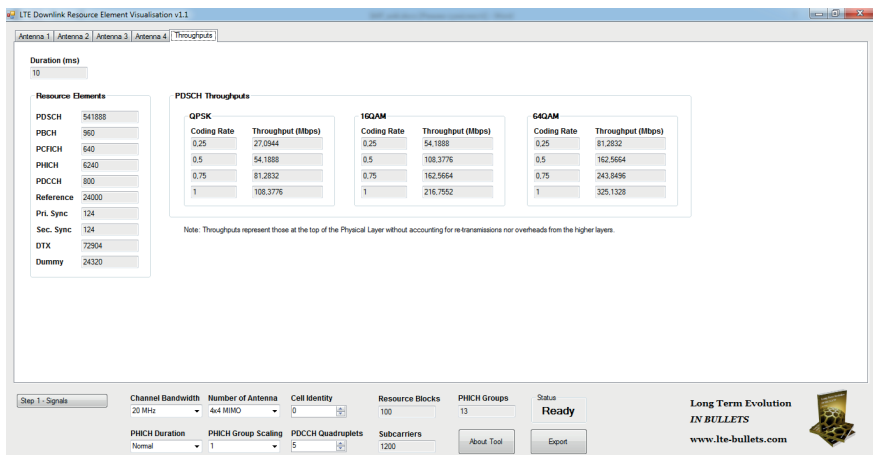
Рис. 2.5. Варіанти використання MIMO-антен в 5G

З рис. 2.6, праворуч, видно, скільки ресурсних елементів для кожного каналу даних управління та корисного навантаження використовується для передавання в ресурсному блоці за умов роботи з різною шириною каналу (1,4 та 20 МГц).

У табл. 2.1 представлено залежність пропускну здатності від ширини каналу для системи з використанням технології 4x4 MIMO.



a)



b)

Рис. 2.6. Розташування сигналу в першій антені (а) та смуга пропускання (б) при ширині каналу 20 МГц та 4x4 MIMO

Таблиця 2.1

### Пропускна здатність 4x4 MIMO

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
Корисна швидкість, Мбіт/с								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,05	0,46	1,211	2,03	4,11	6,18	8,25	41,27

Продовження табл. 2.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0,076	0,71	1,863	3,13	6,32	9,513	12,7	63,50
3	0,12	1,15	2,99	5,04	10,17	15,3	20,42	102,13
4	0,19	1,83	4,78	8,05	16,23	24,41	32,59	162,98
5	0,28	2,67	6,97	11,74	23,66	35,59	47,52	237,6
6	0,38	3,58	9,34	15,74	31,73	47,72	63,714	318,57
7	0,48	4,5	11,73	19,76	39,85	59,93	80,013	400,06
8	0,62	5,84	15,21	25,62	51,65	77,68	103,72	518,6
9	0,78	7,34	19,12	32,21	64,94	97,66	130,39	651,95
10	0,89	8,36	21,7	36,55	73,69	110,82	147,96	739,8
11	1,08	10,14	26,4	44,48	89,66	134,84	180,02	900,14
12	1,27	11,91	31,01	52,24	105,31	158,39	211,46	1057,31
13	1,48	13,8	35,95	60,56	122,08	183,6	245,11	1225,59
14	1,67	15,6	40,66	68,48	138,05	207,62	277,18	1385,94
15	1,82	16,9	44,15	74,37	149,91	225,45	301,00	1505,00

Для подальшого нарощування пропускну здатності буде використано 8 передавальних антен MIMO для прийому та агрегації спектра (5x20 МГц), що дозволить досягти швидкості передавання близько 10 Гбіт/с в мережах мобільного зв'язку 5G.

### 2.3. Методика розрахунку пропускну здатності мереж 5G Advanced та вибір оптимальних параметрів для високошвидкісних потоків

IMT-2020 визначає максимальну швидкість передавання даних, яку має забезпечити 5G. Це 20 Гбіт/с (низхідна лінія) і 10 Гбіт/с (висхідна лінія). Це значне збільшення в порівнянні з IMT-Advanced (4G/LTE Release 14), який пропонує 1 Гбіт/с (низхідна лінія) і 50 Мбіт/с (висхідна лінія). 3GPP надає нам формулу для розрахунку теоретичної пікової швидкості передавання даних на рівні 1. Знаючи, що реальні розгортання навряд чи досягнуть цього, IMT-

2020 визначає, що «користувацька» швидкість передавання даних повинна становити щонайменше 100 Мбіт/с (низхідна лінія) і 50 Мбіт/с (висхідна лінія).

Важливо розрізнити пікову, середню та медіанну швидкість. Тести, що показують лише пікову швидкість передачі даних, можуть бути оманливими. Часто в реальних умовах тести також демонструють середню або медіанну швидкість. Специфікація 3GPP TS 38.306 містить формулу для розрахунку максимальної швидкості передачі даних, яку може підтримувати UE у низхідній та висхідній лініях зв'язку [25]. Формула враховує агрегацію несучих (Carrier Aggregation, CA). Розрахунок проводиться для кожної складової несучої (CC), а потім підсумовується для всіх J несучих.

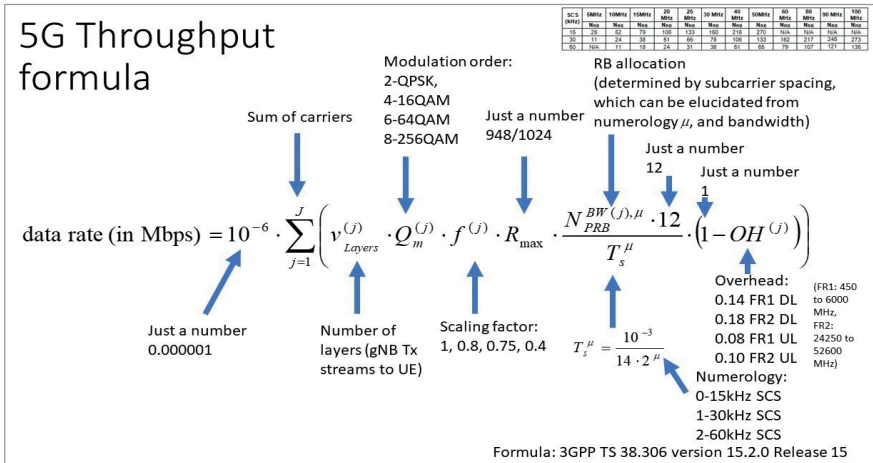


Рис. 2.7. Математична модель розрахунку максимальної швидкості передавання даних UE DL/UL над 5G

Формула, наведена на рис. 2.7, використовується для розрахунку швидкості передавання даних (throughput) у 5G-мережах. Розглянемо кожен компонент формули детальніше:

$10^{-6}$ : Константа, яка дозволяє отримати результат у Мбіт/с.

$\sum_{j=1}^J$ : Сума по всіх несучих (carriers). Це означає, що формула враховує всі несучі, що використовуються для передавання даних.

$v_{\text{Layer}}^i$ : Кількість шарів MIMO (Multiple Input Multiple Output), які використовуються для передачі даних. Вказує на кількість потоків, що передаються одночасно.

: Порядок модуляції, який визначає, скільки бітів передається на один символ. Наприклад, для QPSK це 2 біти, для 16QAM – 4 біти, для 64QAM – 6 бітів, для 256QAM – 8 бітів.

$f^i$ : Фактор масштабування, який враховує інші технічні параметри, що можуть змінюватися залежно від налаштувань мережі та може приймати значення 1, 0,8, 0,75 і 0,4.

$R_{\max}$ : Максимальна швидкість кодування LDPC, яка становить 948/1024. Це вказує на ефективність кодування для передавання даних.

$N_{PRB}^{BW,\mu}$ : Кількість ресурсних блоків (RB), які можуть бути виділені для UE (User Equipment) на даній піднесучій інтервалу і ширині смуги пропускання.  $\mu$  формули позначає нумерологію (numerology) в системі 5G. Нумерологія визначає параметри піднесучої частоти (subcarrier spacing, SCS) та пов'язана з шириною каналу, що використовується для передачі даних. У стандарті 5G NR (New Radio) є кілька варіантів SCS, які визначаються нумерологією  $\mu$ :

- $\mu = 0$ : 15 kHz SCS
- $\mu = 1$ : 30 kHz SCS
- $\mu = 2$ : 60 kHz SCS
- $\mu = 3$ : 120 kHz SCS (в основному використовується для міліметрових хвиль)
- $\mu = 4$ : 240 kHz SCS

Чим більше значення  $\mu$ , тим більша піднесуча частота, що дозволяє передавати дані з більшою швидкістю, але з меншою дальністю та вищими вимогами до сигналу. Вибір нумерології залежить від конкретних вимог до покриття та пропускну здатності мережі.

12: Кількість піднесучих у ресурсному блоці (RB).

1 – *OH*: Враховує накладні витрати (overhead), які можуть бути у передачі даних, такі як затримки або інші технічні втрати.

$T_s^\mu$ : Час символу, який визначається інтервалом піднесучої (SCS) і номінологією,  $s$  у формулі для пропускну здатності 5G зазвичай позначає тривалість одного символу або період символу. У контексті 5G, тривалість символу пов'язана з нумерологією  $\mu$  і визначається піднесучою частотою (subcarrier spacing, SCS).

Розглянемо, наприклад, UE, чия пропускну здатність базової смуги (BPC) становить 100 МГц, 4 шари і 256QAM (рис. 2.8). Припустимо,

що цей UE налаштований на двокомпонентні несучі. Завдяки BPS, UE може підтримувати тільки два шари для кожної СС, в результаті чого коефіцієнт масштабування дорівнює 0,5. Альтернативно, UE може бути налаштований на використання чотирьох шарів для кожної СС, але замість цього використовується нижчий порядок модуляції 64QAM, в результаті чого коефіцієнт масштабування дорівнює 0,75. Масштабний коефіцієнт налаштовується за допомогою сигналізації RRC.

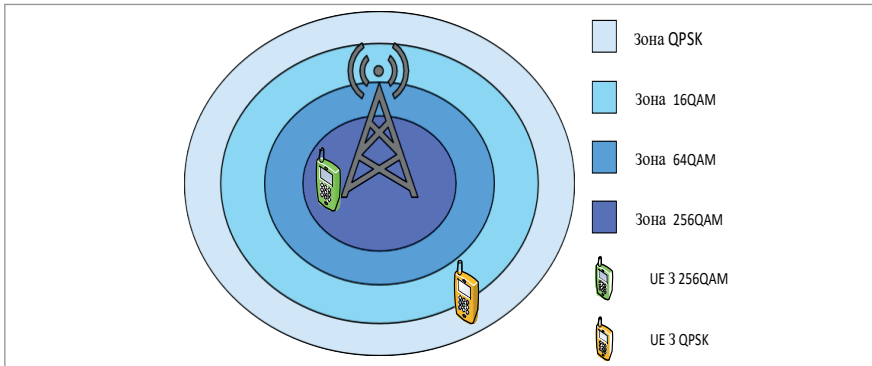


Рис. 2.8. Модель мережі 5G для оцінки пропускну́ї здатності

Накладні витрати ОН коливаються від 8 % (FR1 UL) до 18 % (FR2 DL). Це пов'язано з використанням сигналів PHY, які зазвичай включають SSB, TRS, PDCCH, DM-RS, PT-RS, CSI-RS, PUCCH і SRS. Ми відзначаємо, що низхідні передавання мм-хвиль мають найвищі накладні витрати.

Розглянемо швидкість передавання даних FR1 для однієї СС. Параметри для використання: 256QAM (значення 8), масштабний коефіцієнт 1 і накладні витрати 0,14. При смузі пропускання 100 МГц кількість РБ дорівнює 135. Розрахункова швидкість передавання даних становить 4623 Мбіт/с.

У FR2 ми обмежуємося 2 шарами, але переходимо до 120кГц SCS при пропускну́ї здатності 400МГц. Нумерологія  $\mu$  дорівнює 3. Ми отримуємо 264 RB. Накладні витрати зростають до 0,18. Розрахункова швидкість передавання даних становить 4310 Мбіт/с. Віднімаючи кількість шарів MIMO від пропускну́ї здатності, отримуємо приблизно таку ж швидкість передавання даних. FR2 дає меншу затримку, але страждає від меншої дальності передавання.

Розрахунки висхідної лінії зв'язку аналогічні, за винятком накладних витрат, які відрізняються від низхідної лінії. Запропонована вище модель була розроблена для розрахунку пропускну здатності одного користувача для різних сценаріїв використання спектра та порівняння з вимогами до пропускну здатності різних служб, як для висхідного так і низхідного каналу (рис. 2.9, рис. 2.10).

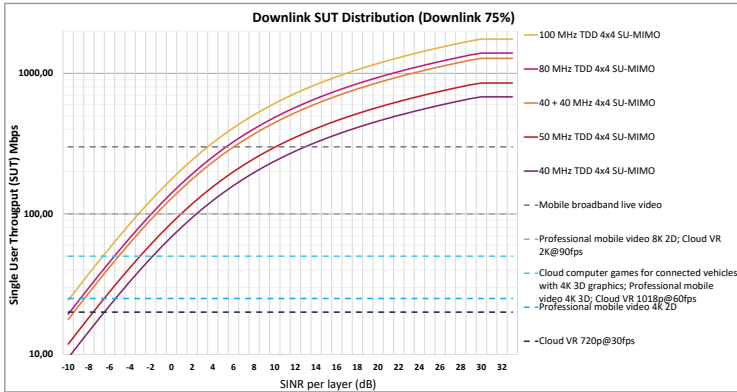


Рис. 2.9. Оцінка пропускну здатності для висхідного каналу 5G

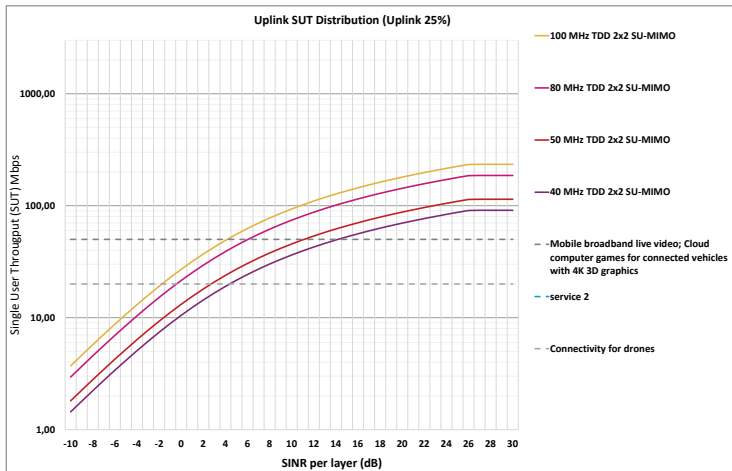


Рис. 2.10. Оцінка пропускну здатності для низхідного каналу 5G

Ці розрахунки наведені тільки для однієї БС 5G Advanced, яка дозволяє об'єднувати до 16 агрегуючих спектрів. Однак максимальний агрегований спектр становить 1 ГГц. Крім того, загальна швидкість, яку може обробити UE, буде залежати від підтримуваних категорій UE.



$$data\ rate(in\ Mbps) = 10^{-6} \cdot \nu_{Layer} \cdot Q_m \cdot f \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW,\mu} \cdot 12}{T_S^\mu} \cdot (1 - OH) \quad (2.1)$$

Кілька передавальних антен на БС можуть використовуватися для рознесення передавання і різних типів формування променя. Основною метою формування променя є поліпшення відношення сигналу, що приймається, до перешкод і шуму (SINR) і, в кінцевому підсумку, підвищення пропускної здатності системи. Методи Massive MIMO можуть забезпечити додаткове збільшення пропускної спроможності завдяки збільшенню спектральної ефективності (SE) за використання тієї самої смуги пропускання та розміщення БС, як порівняти з методами MIMO. Якщо ті самі концепції розподілу ресурсів будуть застосовуватися в системах Massive MIMO з десятками UE на кожній з тисяч піднесучих, складність буде величезною. Технології Massive MIMO можуть бути реалізовані шляхом надання БС просторового мультиплексування (SM), що є методом передавання в технологіях бездротового зв'язку MIMO для передавання незалежних і окремо закодованих сигналів даних, що дасть змогу знизити складність [2]. Система підраховує кількість UE кожного інтервалу часу передавання (TTI) і призначає, відповідно до стандарту 5G, радіопромінь, схему модуляції та кодування (MCS) кожному UE [3]. У напрямку підвищення пропускної здатності UE спостерігалися різні тенденції. Як згадувалося раніше, методи MIMO підвищують пропускну здатність мережі, а також схеми SM для досягнення підвищення пропускної здатності.

#### 2.4. Дослідження пропускної здатності в системах мобільного зв'язку 5G в умовах використання NOMA та OMA

Теоретично відомо, що NOMA забезпечує більшу область пропускної спроможності, ніж OMA [15;17], як показано на рис. 2.11. NOMA дуже ефективний для збільшення пропускної здатності системи, коли різниця в коефіцієнтах посилення каналів мультиплексованих UE велика. Ця різниця перетворюється на коефіцієнт посилення мультиплексування. Припускаючи успішне декодування та відсутність по-

ширення помилок, швидкість передавання даних з NOMA для UE1 та UE2 може бути представлена рівняннями 2.2 та 2.3 відповідно.

$$R_1 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{N_{o,1}} \right) \quad (2.2)$$

$$R_2 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{P_1 |h_2|^2 + N_{o,2}} \right) \quad (2.3)$$

де  $\beta$  доступна смуга пропускання, до якої обидва UE мають доступ одночасно;  $N_{o,i}$  – спектральна щільність потужності  $W_i$ . Оскільки значення  $R_1$  і  $R_2$  залежать від співвідношення розподілу потужності  $P_1=P_2$ , загальний вигравш пропускну здатності NOMA тісно пов'язаний з обраною схемою розподілу потужності. Для порівняння, при передаванні OMA швидкість передавання даних UE1 та UE2 визначається рівняннями 2.4 та 2.5, відповідно:

$$R_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{\alpha N_{o,1}} \right) \quad (2.4)$$

$$R_2 = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{(1 - \alpha) N_{o,2}} \right) \quad (2.5)$$

де  $\alpha$  представляє собою смугу пропускання, призначену UE1, а решта смуги пропускання назначається UE2.

Реалізація NOMA в мобільних мережах має вищі швидкості передавання даних, одним з найбільш перспективних є вища спектральна ефективність. З NOMA можна розмістити більше UE на тих самих ресурсах, ніж з OMA, що особливо цікаво для перевантажених сценаріїв, які дуже очікуються в мережах 5G. Таке повторне використання ресурсів дозволяє більш ефективно використовувати наявний спектр.

Забезпечення підтримки масового підключення є ще однією перевагою використання NOMA. Впроваджуючи NOMA, кількість запланованих UE строго не обмежена кількістю доступних ресурсів [26]; це означає, що NOMA може виділити більше UE, ніж OMA, протягом того самого періоду часу, отже, збільшуючи кількість обслуговуваних UE в субкадрі, не вимагаючи додаткових ресурсів.

Через втрату ортогональності та мультиплексування UE, реалізація NOMA супроводжується проблемами впровадження, які необхідно вирішити при розгляді його інтеграції в мережі 5G.

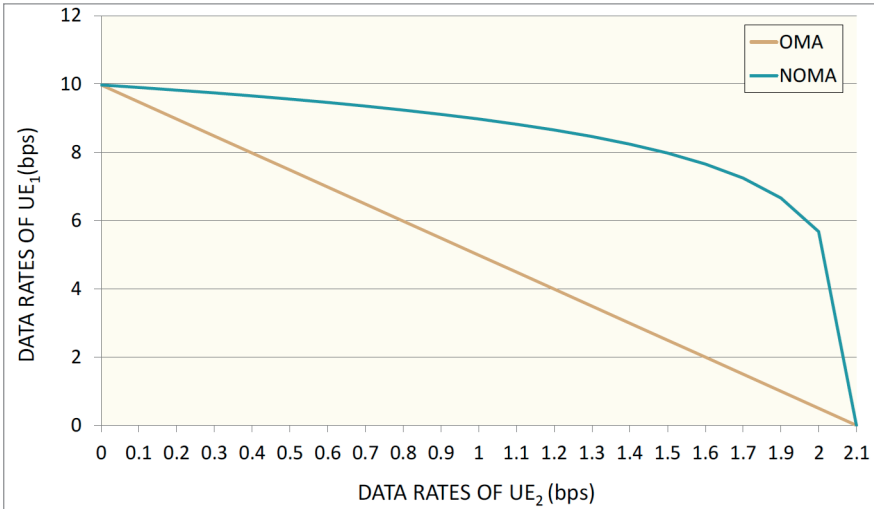


Рис. 2.11. Порівняння пропускної здатності для OMA та NOMA з двома UE. SINR для UE1 становить 30 дБ, тоді як для UE2 становить 5 дБ

Процес створення пари користувачів є одним із аспектів, який становить велику проблему для NOMA; UE, які підлягають з'єднанню, необхідно ретельно вибирати за допомогою схем динамічного сполучення, щоб гарантувати збільшення ємності системи. Досяжна пропускна здатність у NOMA також залежить від розподілу потужності, тому методи динамічного розподілу потужності, які пристосовуються до умов каналу UE, також є кращими для досягнення більшої пропускної здатності. Це може збільшити складність обчислень.

Більше того, ці алгоритми для створення пари користувачів і розподілу потужності в NOMA зазвичай покладаються на високоточну інформацію про стан каналу (CSI). Це ускладнює роботу серед високошвидкісних середовищ, що обмежує сценарії, для яких можна розглянути NOMA.

Для декодування сигналу процес стає більш складним для мультиплексованих UE з високим коефіцієнтом підсилення каналу, оскільки їм потрібно застосувати SIC, щоб декодувати своє повідомлення правильно. Для SIC є додаткова інформація (наприклад, розподіл потужності, порядок SIC), тому очікується збільшення сигналізації.

Через втрату ортогональності та мультиплексування UEs реалізація NOMA пов'язана з проблемами, які необхідно вирішити під час розгляду можливості її інтеграції у мережі 5G. Процес сполучення користувачів є одним з аспектів, який є великою проблемою для NOMA; UE, які повинні бути пов'язані, повинні бути ретельно відібрані за допомогою схем динамічного сполучення, щоб гарантувати збільшення пропускну здатності системи. Досяжна пропускну здатність NOMA також залежить від розподілу потужності, тому для досягнення більш високої пропускну здатності використовуються методи динамічного розподілу потужності, які підлаштовуються під умови каналу UEs. Це може збільшити складність обчислень. Більше того, ці алгоритми для сполучення користувачів та розподілу потужності в NOMA зазвичай покладаються на високоточну інформацію про стан каналу (CSI); це створює проблеми для високошвидкісних середовищ, обмежуючи сценарії, котрим можна розглядати NOMA. Для декодування сигналу процес ускладнюється мультиплексованих UE з високим коефіцієнтом посилення каналу, оскільки їм необхідно застосовувати SIC для правильного декодування свого повідомлення. Для SIC потрібна додаткова інформація (наприклад, розподіл потужності, порядок SIC), тому очікується збільшення кількості сигналів. З точки зору безпеки, при використанні NOMA виникають певні проблеми, оскільки UE з більш високим коефіцієнтом посилення каналу повинні декодувати повідомлення від UE із поганими умовами каналу.

---

#### **2.4.1. Постановка сценарію моделювання для порівняння пропускну здатності мережі 5G Advanced в умовах використання технологій NOMA та OMA**

З впровадженням міліметрових хвиль (mmWave) у технології 5G Advanced стає можливим забезпечення високої швидкості передавання даних на рівні Гбіт/с, завдяки широкому діапазону доступних частот у цьому спектрі. Однак використання mmWave супроводжується низкою викликів, серед яких найбільш значущою є обмежена дальність дії через високі втрати сигналу під час його поширення. Це

робить технологію mmWave найбільш підходящою для розгортання в малих комірках. Для ефективного використання mmWave необхідно застосовувати високонаправлені антени та методи формування променя, що додає складності до процесу розгортання таких мереж.

NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) є перспективною технологією для мереж 5G, яка привертає велику увагу в наукових дослідженнях. Висока спектральна ефективність, яку забезпечує NOMA, робить її привабливою для сценаріїв з обмеженими ресурсами, які стають все частішими в сучасних умовах. Однак такі переваги досягаються за рахунок складнішого передавання та прийому сигналів, додаткових внутрішньокоміркових перешкод і підвищеної складності в плануванні UE (User Equipment) та розподілі ресурсів. Аналіз проводиться для низхідної лінії зв'язку (DL), оскільки саме в цьому напрямку зазвичай виникає найбільший попит на передачу даних, і результати дослідження отримані на основі моделювання.

Для деяких сценаріїв розглядається поєднання NOMA з частотами mmWave, де ці частоти використовуються для розширення покриття, що демонструє значний приріст швидкості передавання даних завдяки їхньому поєднанню. Однак проблеми, що виникають при поєднанні mmWave з NOMA, виходять за межі цього дослідження. У цьому розділі також аналізуються наслідки використання NOMA для QoS у порівнянні з OMA. Представлено рішення, яке допомагає NOMA подолати проблеми з якістю обслуговування, а також порівнюється продуктивність чотирьох типових методів сполучення користувачів для NOMA, з особливою увагою до виграшу пропускнуої здатності в порівнянні з обчислювальною складністю. Однак впровадження NOMA супроводжується виникненням навмисних внутрішньокоміркових перешкод під час суперпозиції на передавачі. Ці додаткові перешкоди необхідно враховувати при аналізі ефективності NOMA, особливо при порівнянні з OMA. За однакових умов розповсюдження та розташування, сигнал у NOMA матиме нижчий SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) через додаткові внутрішньокоміркові перешкоди, що знижує або навіть усуває потенційний виграш у швидкості передавання даних, який NOMA могла б мати перед OMA. Якщо ця різниця в SINR не враховується і

використовується однаковий показник якості каналу (CQI) для обох схем MA, це може призвести до збільшення коефіцієнта блокових помилок (BLER), що поставить під загрозу якість обслуговування.

Для оцінки впливу NOMA на якість обслуговування порівняно з OMA було проведено порівняння обох схем на основі сумарної швидкості, SINR та BLER. Моделювання виконувалося для однієї комірки на частоті 73 ГГц з радіусом дії 200 м, що підкреслює високі швидкості передавання даних, характерні для 5G. NOMA очікується інтегрованою з новими технологіями 5G, що робить це дослідження особливо актуальним.

У процесі моделювання необхідно було визначити відображення SINR, випробуваного UE, у значення CQI; це CQI повідомляється БС і визначає, який MCS (Modulation and Coding Scheme) слід використовувати, впливаючи таким чином на швидкість передавання даних UE. Відображення SINR у CQI, а також CQI у MCS не стандартизовані, і реалізація залежить від постачальника або оператора. Тому першим кроком у моделюванні було визначення відображення SINR у CQI для цільового BLER на рівні 10 % і для чотирьох типів модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM та 256QAM. Як правило, UE, що знаходяться ближче до БС, матимуть вищий SINR через менші втрати на шляху ніж UE, розташовані далі, тому зону покриття комірки можна умовно розділити на концентричні кільця з центром у БС, кожне з яких характеризується підтримкою певної модуляції. Таким чином, UE на краю комірки можуть підтримувати лише QPSK, тоді як UE поблизу БС можуть використовувати до 256QAM, як показано на рис. 2.12. Враховуючи це, для точного відображення SINR у CQI необхідно оцінити положення UE на різних відстанях від БС. Це відображення спочатку було отримане для OMA і пізніше використано для NOMA, що дозволяє оцінити внутрішньокміркову інтерференцію. Сценарій моделювання, що використовується для порівняння продуктивності NOMA та OMA показано на рис. 2.12.

Блок-схема на рис. 2.13 показує процес відображення SINR у CQI. Розмір пакетів, що використовуються для відображення, було обрано відповідно до розміру транспортного блоку (TBS), визначеного у стандарті LTE [27] для 100 PRB, оскільки в дослідженні розглядається ширина смуги несучої 20 МГц.

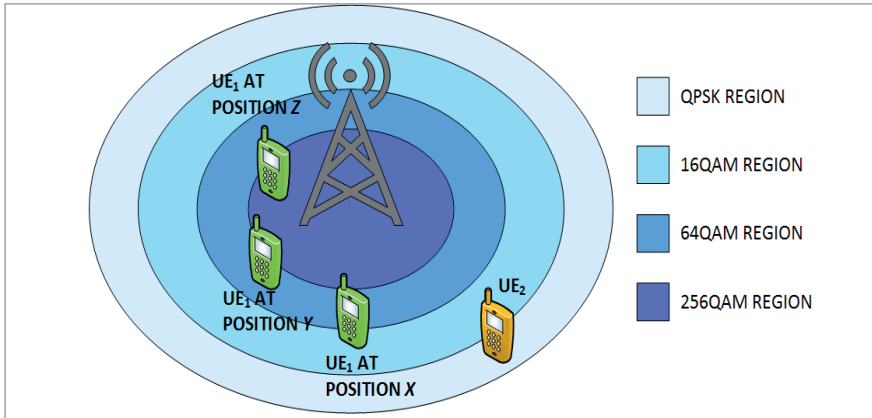


Рис. 2.12. Сценарій моделювання, що використовується для порівняння продуктивності NOMA та OMA

Після того, як відображено зони модуляцій, ми переходимо до оцінки продуктивності NOMA порівняно з OMA. Для цього розглядається сценарій моделювання з двома UE, і передбачається, що обидва UE повинні обслуговуватися одночасно і доступні ресурси повинні бути розділені між ними; таким чином, кількість мультиплексованих UE для NOMA встановлюється рівним двом. Виграш швидкості передавання даних при використанні NOMA залежить від різниці в коефіцієнті посилення каналу,  $\Delta\text{SINR}$ , між мультиплексованими UE. Щоб гарантувати, що  $\Delta\text{SINR}$  буде достатньо великим для виграшу у швидкості передавання даних кожного UE, використовується отримане відображення SINR на CQI та оцінюються різні значення  $\Delta\text{SINR}$ . Розташування UEs оцінюється відповідно до бажаного SINR, гарантуючи при цьому, що існує різниця в CQI, що повідомляються UEs, тобто  $\text{CQI1} > \text{CQI2}$  за умови, що UE1 має більш високі умови каналу. Наприклад, якщо необхідно повідомити  $\text{CQI}=2$ , то SINR має бути більшим за  $-5,75$  дБ і менше  $-2,7$  дБ. Для цього для кожного UE визначається набір допустимих значень CQI; для UE1 це набір  $S1=\{3,4,5,\dots,15\}$ , а UE2 –  $S2=\{2,3,4,\dots,14\}$ . Під час кожної ітерації моделі значення CQI2 S2 і всі значення CQI1 S1 з  $\text{CQI1} > \text{CQI2}$  оцінюються один до одного, що становить загалом 13 ітерацій за прогін, причому кількість комбінацій CQI, що оцінюються, зменшується на одну в кожній ітерації. Наприклад, у першій ітерації  $\text{CQI2}=2$  та

$CQI1=\{3,4,5,\dots,15\}$ ; у другій ітерації  $CQI2=3$  і  $CQI1=\{4,5,6,\dots,15\}$ , і так далі, доки не будуть обрані всі значення  $S2$ . На рис. 2.14 показано блок-схему, що використовується для порівняння OMA та NOMA.

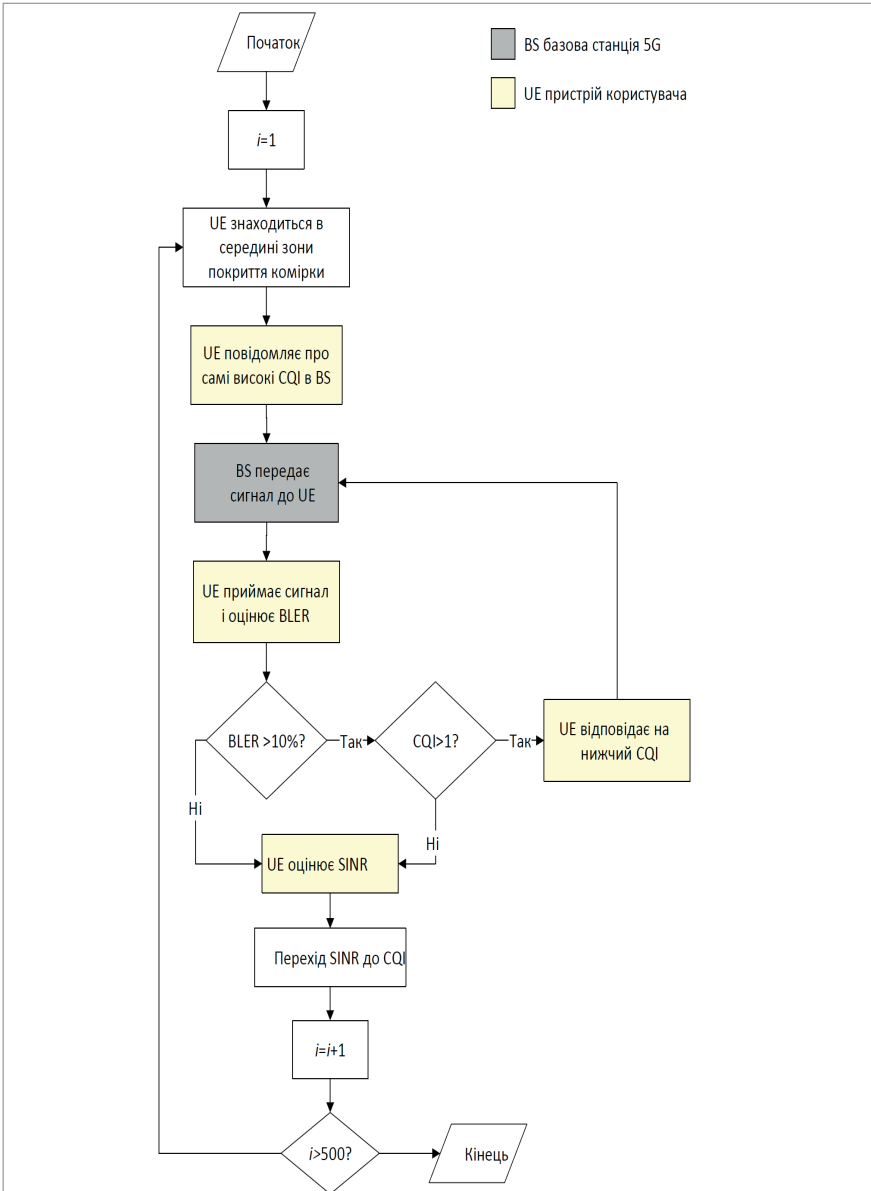


Рис. 2.13. Блок-схема, що використовується для відображення SINR і CQI для OMA



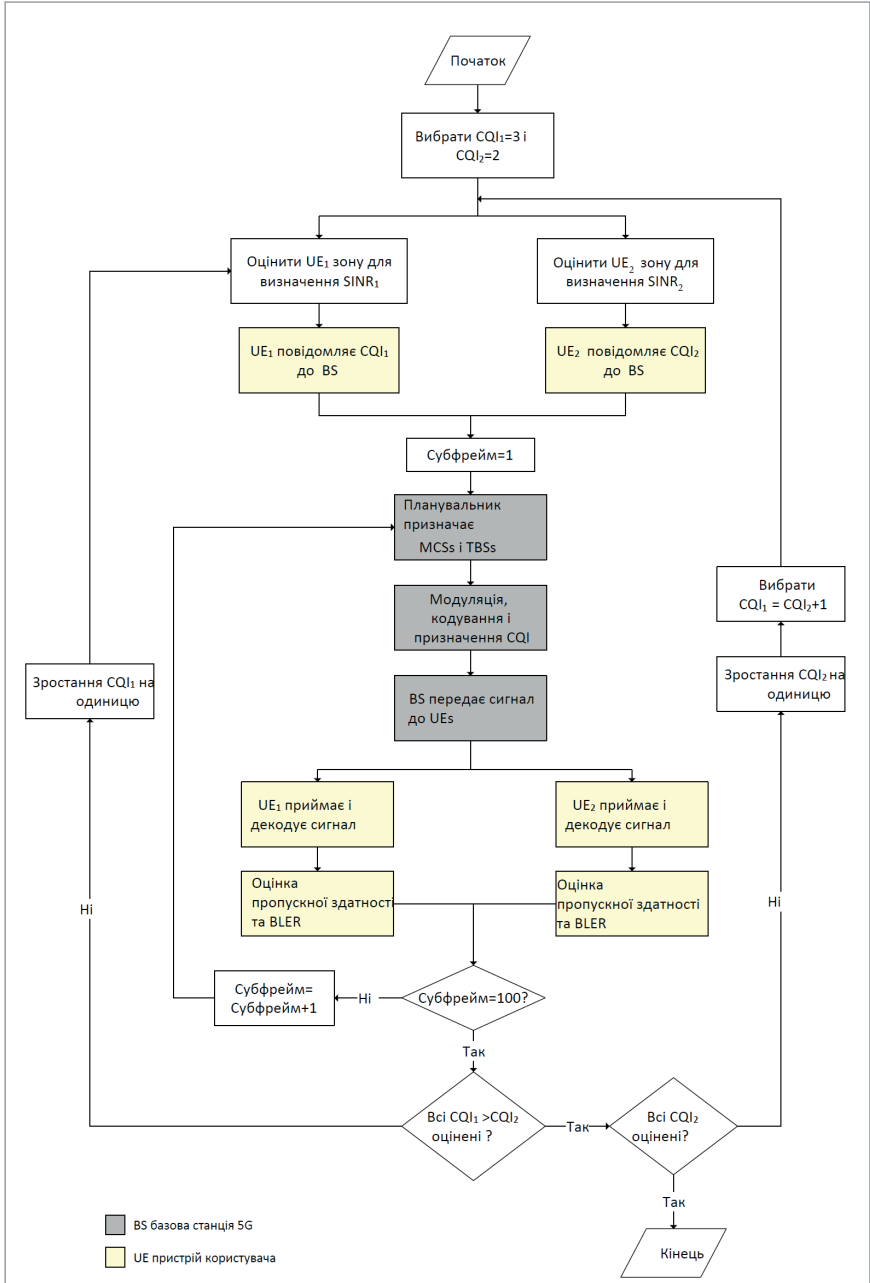


Рис. 2.14. Блок-схема, що використовується для порівняння OMA та NOMA

У таблиці 2.2 показані результати SINR і CQI для OMA, отримані на основі моделювання.

Таблиця 2.2

**Відображення SINR і CQI для OMA,  
отримане на основі моделювання**

SINR	CQI	MCS INDEX	Модуляція	Порядок модуляції	Швидкість коду (x1024)
-7	1	0	QPSK	2	78
-5.75	2	1	QPSK	2	193
-2.7	3	3	QPSK	2	449
1.4	4	5	16QAM	4	378
2.83	5	7	16QAM	4	490
4.48	6	9	16QAM	4	616
6.45	7	11	64QAM	6	466
8.14	8	13	64QAM	6	567
9.47	9	15	64QAM	6	666
11.43	10	17	64QAM	6	772
12.82	11	19	64QAM	6	873
14.47	12	21	256QAM	8	711
16.16	13	23	256QAM	8	797
17.53	14	25	256QAM	8	885
20.55	15	27	256QAM	8	948

Різниця між CQI1 і CQI2, показана для всіх розглянутих комбінацій CQI. Щоб обчислити відстань між BS та UE на основі бажаного SINR/CQI, застосовуються наступні кроки:

Розраховуємо отриману потужність,  $P_{RX}$ , як:

$$P_{RX} = SINR - (P_N + P_I) \quad (2.6)$$

де  $P_I$  – потужність перешкод, а  $P_N$  – потужність шуму на виході підсилювача з низьким рівнем шуму (LNA) приймача і розраховується як:

$$P_N = -174 [dBm] + 10 \log(B) + NF_{RX} + G_{RX} \quad (2.7)$$

де  $B$  – смуга пропускання в Гц,  $NFRX$  – коефіцієнт шуму приймача в дБ, а  $GRX$  – коефіцієнт підсилення антени приймача в дБі.

Обчислюються втрати на шляху,  $P_L$ , як:

$$P_L = P_{TX} - P_{RX} - G_{TX} + G_{RX} \quad (2.8)$$

де  $P_{TX}$  – потужність передавання в дБм,  $G_{TX}$  – коефіцієнт підсилення антени передавача в дБі.

Розраховується відстань між БС та UE,  $d$ . Використовується наступна модель поширення для зовнішніх каналів ммХвилі на частоті 73 ГГц [28], і передбачається, що UE знаходиться в NLOS. Дане припущення було зроблено для оцінки моделі у найскладніших умовах поширення:

$$P_L = 69.8dB + 33\log(d) + x_\sigma \quad (2.9)$$

де  $x_\sigma$  являє собою коефіцієнт затінення, і це випадкова гауссова величина із середнім нулем і стандартним відхиленням  $\sigma = 7,6$  дБ. Відстань  $d$  виражається в метрах. Комбінації CQI, що розглядаються для моделювання показано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Комбінації CQI, що розглядаються для моделювання

		CQI 1												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CQI2	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	3		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	4			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	5				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	6					1	2	3	4	5	6	7	8	9
	7						1	2	3	4	5	6	7	8
	8							1	2	3	4	5	6	7
	9								1	2	3	4	5	6
	10									1	2	3	4	5
	11										1	2	3	4
	12											1	2	3
	13												1	2
	14													1

Той самий сценарій моделювання був використаний для NOMA та OMA, з різницею, що покладалася на алгоритм планувальника

на рівні MAC. Для NOMA планувальник призначає всю смугу пропускання для обох UE і розділяє потужність відповідно до їх посилення каналу. Процес розподілу потужності для кожного мультиплексованого UE в NOMA є складним завданням, і співвідношення необхідно ретельно вибирати, щоб забезпечити правильне декодування сигналів на стороні приймача. Для цього підхід, запропонований в [29] далі, що ґрунтується на оцінці значення  $P_1$ , яке задовольняє наступному рівнянню:

$$\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_2) = \log_2\left(1 + \frac{(1 - P_1)\gamma_2}{\left(\frac{P_1}{r}\right)\gamma_2 + 1}\right) \quad (2.10)$$

де  $\gamma_2 > 0$  – SINR2, а  $r$  – кількість переданих шарів. Задовольняючи рівняння 2.10 ємність каналу UE2 з NOMA дорівнює пропускну здатності, досягнутій з OMA, коли повна потужність і половина смуги пропускання призначені UE2. Оскільки це має місце в цьому моделюванні, використання цієї стратегії розподілу потужності є дійсним. Тоді  $P_1$  можна обчислити таким чином для  $r=1$ .

$$P_1 = \frac{\sqrt{1 + \gamma_2} - 1}{\gamma_2} \quad (2.11)$$

Для UE2 значення  $P_2$  можна розрахувати як потужність, що залишилася:

$$P_2 = P_{TX} - P_1 \quad (2.12)$$

---

### 2.4.2. Результати моделювання щодо оцінки ефективності використання технології NOMA для 5G

Для OMA половина пропускну здатності призначається кожному UE в планувальнику. Розмір пакета, що підлягає передаванню в UE, визначається відповідно до BS, визначені в стандарті LTE 3GPP 17 для 100 та 50 PRB для NOMA та OMA відповідно. Оскільки модель працює на частотах mmWave, передбачається, що для передавання буде доступна смуга пропускання 800 МГц. Така смуга пропускання розділена на вісім каналів по 100 МГц кожен. Це робиться для того, щоб передача була сумісна з LTE, яка підтримує максимальну пропускну здатність каналу 100 МГц. Крім

того, для модуляції несучої використовується мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM). У системах NOMA приймачі можуть використовувати різні методи для обробки сигналів і усунення інтерференції.

UE1 використовує метод усунення перешкод на рівні символів (Symbol-Level Interference Cancellation, SLIC). Цей підхід полягає в тому, що UE1 намагається виділити і усунути перешкоди від інших сигналів на рівні символів, що дозволяє підвищити точність декодування власного сигналу. UE2 використовує метод лінійної мінімальної середньої квадратичної помилки (Linear Minimum Mean Square Error, LMMSE). Цей метод полягає в лінійній фільтрації сигналу для мінімізації середньої квадратичної помилки між переданим і прийнятим сигналами. LMMSE-фільтрація ефективно зменшує вплив перешкод і шуму, забезпечуючи кращу якість зв'язку для UE2. Використання різних підходів до обробки сигналу дозволяє забезпечити оптимальну продуктивність для кожного UE в системі NOMA з огляду на різні умови каналу і потреби користувачів. Для OMA обидва UE використовують приймач LMMSE. Параметри для моделювання зведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

### Параметри моделювання для порівняння продуктивності NOMA та OMA

	OMA	NOMA
Несуча частота (ГГц)	73	
Ширина каналу (МГц)	20	
Ширина каналу для UE (МГц)	10	20
Кодування/Декодування	Турбокодування	
Схема модуляції	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	
Потужність передавання (дБм)	15	
Розподіл потужності на UE	1	Адаптивний (*)
Мультиплексування	OFDM	
Режим передавання	SU-MIMO (2x2)	
Підсилення антени передавача (дБі)	37	
Оцінка каналу	MMSE	

Продовження табл. 2.4

1	2	
Підсилення антени приймача (дБі)	0	
Рівень шуму приймача (дБ)	6	
Схема приймача	LMMSE	UE1= SLIC UE2= LMMSE

Для першого порівняння (рис. 2.15) показаний приріст пропускну здатності каналу NOMA у порівнянні із OMA залежно від  $\Delta CQI$  всі комбінації CQI, наведені у таблиці 2.4. Видно, що такий приріст пропускну здатності значно варіюється від 13 % до 71,5 %, причому менші значення відповідають найменшому  $\Delta CQI$ , і навпаки. Таким чином, підтверджується, що переваги NOMA за пропускну здатністю порівняно з OMA збільшуються в міру збільшення різниці в коефіцієнтах посилення каналу між мультиплексованими UE. Проте, навіть за найменшого  $\Delta CQI$  очікується середній вигреш у 40 %; при більш високих значеннях CQI1 і CQI2 можуть бути досягнуті вищі швидкості передавання даних і пропускну здатність каналу завдяки більш високому порядку модуляції та нижчій швидкості кодування (табл. 2.4).

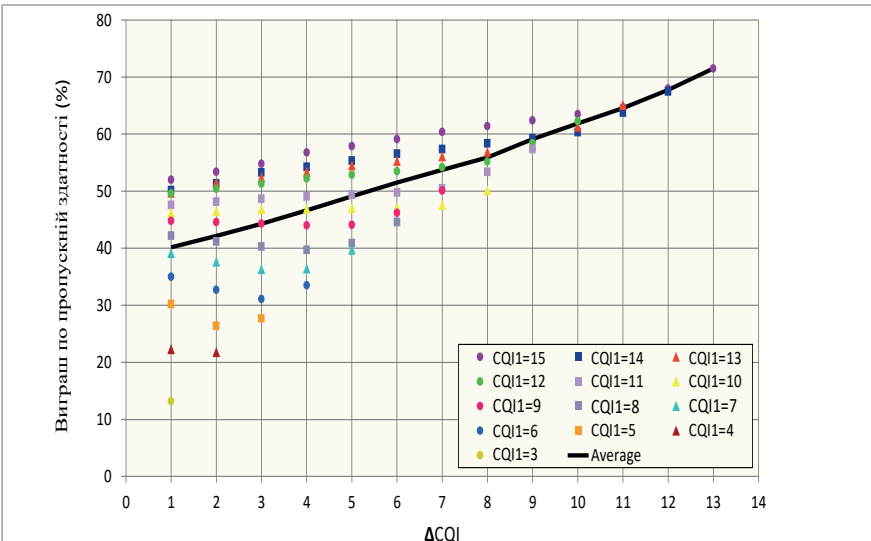
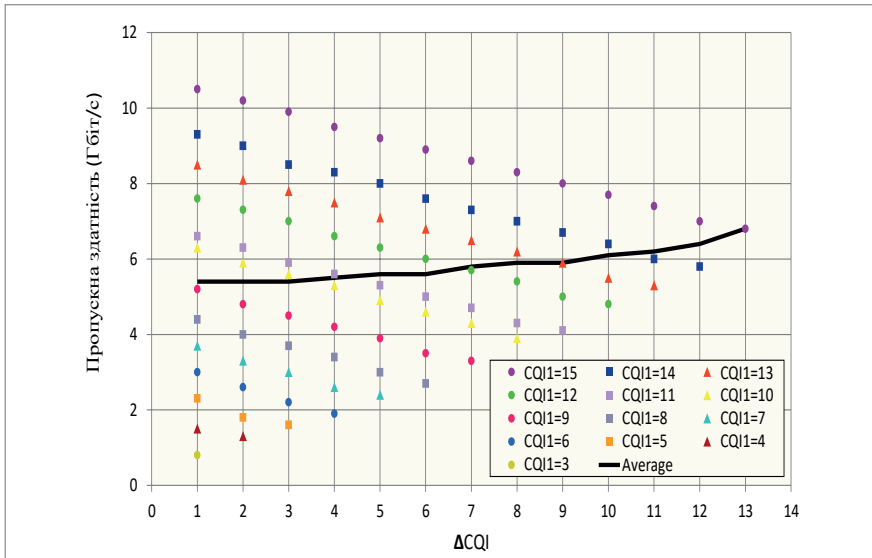
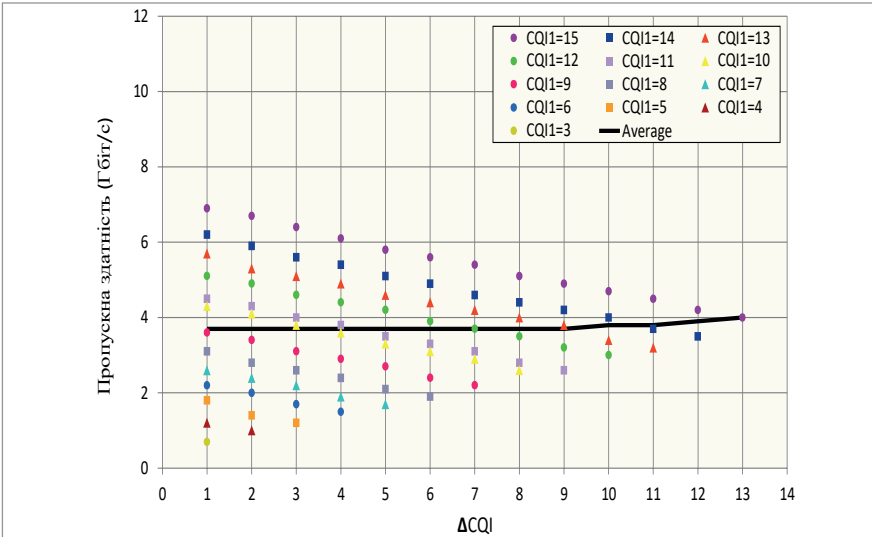


Рис. 2.15. Підвищення пропускну здатності каналу NOMA з використанням OMA як еталону

На рис. 2.16 показана пропускна здатність каналу для обох схем MA. Значення до 11 Гбіт/с і 6,5 Гбіт/с були досягнуті за допомогою NOMA і OMA відповідно. Крім того, зі збільшенням кількості портів антени, які підтримує MIMO, можна досягти більшої пропускної здатності каналу та спектральної ефективності. Незважаючи на те, що з точки зору пропускної здатності каналу переваги використання NOMA очевидні, слід також оцінити наслідки, які навмисні внутрішньостільникові перешкоди, додані передавачу з NOMA, мають на продуктивність мережі. На рис. 2.17 показано BLER для NOMA. Видно, що тенденція протилежна тій, що спостерігається для пропускної здатності каналу: BLER зменшується зі збільшенням  $\Delta\text{CQI}$ . Щоб зрозуміти це, припустимо, що обидва UE повідомляють CQI, які відповідають модуляції QPSK, наприклад,  $\text{CQI}_1=3$  і  $\text{CQI}_2=2$ . У такому випадку, хоча сузір'я сигналів не буде надто складним, призначене кожному UE відношення потужності може бути недостатнім для правильного декодування сигналу, особливо для UE2. Це пов'язано з тим, що обидва UE потребують високого коефіцієнта потужності (наприклад,  $P_2>0,5$ ) через низький рівень підсилення каналу.



(a) NOMA



(б) ОМА

Рис. 2.16. Пропускна здатність для мережі 5G в умовах використання NOMA та ОМА

Розглянемо інший сценарій, коли обидва UE мають високий рівень сигналу і повідомляють CQI, відповідні модуляції 256QAM, наприклад, CQI1=15 і CQI2=14. У такому випадку сузір'я сигналів стане значно складнішим, як показано на рис. 2.17, що ускладнює правильне декодування навіть при високих коефіцієнтах посилення каналу. Навпаки, якщо коефіцієнти підсилення каналів значно відрізняються, то UE2 може отримати більшу частину потужності (тобто  $P_2 > 0,5$ ), а залишкова потужність може бути призначена UE1, якому завдяки високому коефіцієнту підсилення каналу не потрібно багато потужності.

Однак, як видно з рис. 2.17, у більшості випадків значення BLER перевищує цільові 10%; фактично, лише коли CQI1 = 15 і  $\Delta CQI \geq 5$ , BLER утримується нижче 10%. Це свідчить про те, що призначена для UE MCS не була оптимальною для умов підсилення каналу. Однак MCS було призначено відповідно до CQI, використовуючи відображення MCS, наведене в таблиці 3.1, отримане за допомогою тих самих моделей для UE у випадку ОМА, яке виконувало вимогу BLER на рівні 10%. Ці результати підтверджують, що для успішного



декодування сигналів UE у NOMA потрібні вищі рівні SINR, ніж у UE у OMA, за однакових умов поширення; це зумовлено додатковими внутрішньокмірковими перешкодами в NOMA.

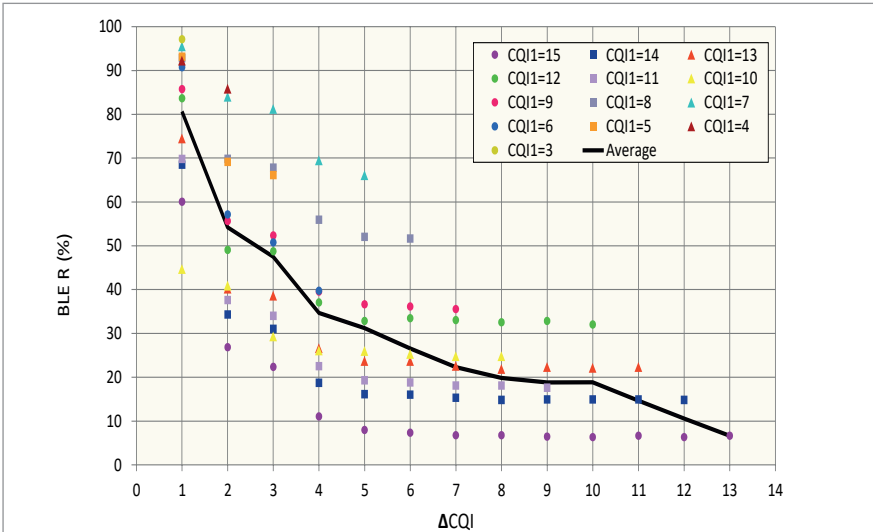


Рис. 2.17. BLE R для NOMA при використанні відображення SINR в CQI у порівнянні з OMA

# МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЛАНУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ СУЧАСНИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

---

### 3.1. Основні методи планування та оптимізації мереж мобільного зв'язку

На сьогоднішній день технології безпроводного зв'язку розвиваються надзвичайно швидкими темпами. Провайдери мобільного та фіксованого зв'язку активно впроваджують новітні технології широкосмугового бездротового доступу в свої мережі, що дає змогу покращити якість обслуговування клієнтів, розширити спектр послуг та збільшити доходи компаній. Проте, без належного автоматизованого планування та оптимізації мережі з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, ці переваги можуть залишитися нереалізованими. Щоб надавати якісні послуги зв'язку, необхідно ефективно організувати процес побудови та модернізації мережі. Цей процес починається з планування і завершується оптимізацією мережі в цілому. Планування мережі передбачає аналіз продуктивності мережі для певної конфігурації, тоді як оптимізація спрямована на пошук конфігурації, яка забезпечить оптимальну якість мережі.

Планування мереж LTE/5G включає кілька ключових аспектів. По-перше, це аналіз трафіка в мережі, який дозволяє моделювати її роботу. Клієнтів, розподілених по території випадковим чином (але з урахуванням статистичного розподілу за типами місцевості), підключають до базових станцій, враховуючи необхідну ємність. Це дає змогу оцінити завантаження кожної базової станції та визначити кількість абонентів, які не можуть отримати обслуговування через обмежену ємність базових станцій. Для аналізу трафіка попередньо необхідно провести розрахунок радіопокриття та аналіз інтерференції мережі. По-друге, це вибір оптимальних частотних параметрів мережі для мінімізації інтерференції. По-третє, оптимізація мережі передбачає налаштування параметрів базових станцій: частот, азимутів, кутів нахилу антен, потужності та висоти

підвіски. Це дозволяє досягти оптимальних показників якості мережі, таких як забезпечення необхідної зони обслуговування, мінімізація інтерференції та рівномірне навантаження трафіка на базові станції.

Оптимізація мережі полягає в точному налаштуванні плану комірок до реальних умов. Загалом, у сфері телекомунікацій оптимізація є надзвичайно важливим процесом. Мобільні оператори прагнуть надавати своїм абонентам найвищу якість обслуговування, тому постійно вдосконалюють свої мережі, підвищуючи їх ефективність.

У процесі створення та вдосконалення мережі стільникового зв'язку вирішуються два тісно пов'язані завдання: планування мережі (як попереднє, так і детальне) та її оптимізація (перепланування на основі результатів експлуатації).

Потреба в оптимізації мережі виникає через кілька важливих причин:

- *Зниження якості мережі.* Це може бути виявлено за допомогою моніторингу продуктивності мережі та досвіду користувачів, які відчують проблеми з підключенням.
- *Максимізація використання існуючої інфраструктури.* Це дозволяє оптимально використовувати вже наявні ресурси без необхідності значних інвестицій у нове обладнання.
- *Впровадження нових послуг.* Оптимізація мережі необхідна для забезпечення належної якості нових послуг та їх безперервного впровадження.

У LTE/5G використовується декілька концепцій оптимізації мережі із врахуванням вимог по функціональності. Одним із ключових методів є балансування навантаження, яке суттєво підвищує продуктивність мережі. Цей метод полягає у налаштуванні параметрів управління мережею так, щоб перевантажені осередки могли розподіляти надлишковий трафік до сусідніх осередків, якщо такі є.

Процес оптимізації включає:

- Налаштування обладнання антенної системи. Регулювання нахилу, азимуту та висоти антени.
- Регулювання потужності передавання eNB. Оптимізація потужності передавання сигналу для покращення покриття та зменшення інтерференції.

- Алгоритми функцій та налаштування параметрів продуктивності. Вдосконалення алгоритмів для більш ефективного використання мережевих ресурсів.

Ці методи оптимізації є загальними для всіх мобільних технологій, проте кожен стандарт має власні визначення вимірювань та конкретні параметри.

На рис. 3.1 представлені методи оптимізації мереж мобільного зв'язку, що включають налаштування антен, регулювання потужності передавання та інші параметри для досягнення оптимальної продуктивності.



Рис. 3.1. Основні методи планування та управління мережами мобільного зв'язку

Процес оптимізації включає налаштування антенного обладнання, зокрема регулювання кута нахилу, азимуту та висоти антени. Також важливим є налаштування потужності передавання базової станції (eNB) і коригування алгоритмів та параметрів продуктивності. Хоча ці методи застосовуються в усіх мобільних технологіях, кожен стандарт має свої специфічні вимірювання та параметри, які потрібно враховувати під час оптимізації.

Оптимізація нахилу антени є критичним процесом для покращення якості голосових викликів, передавання даних, доступності зв'язку, пропускну здатності та спектральної ефективності. Кут нахилу антени

ни базових станцій безпосередньо впливає на покриття стільникового зв'язку та керування перешкодами. У регіонах з високогірною місцевістю або неоднорідною висотою антени правильний нахил антени має вирішальне значення для забезпечення стабільної роботи мережі.

Правильне вирівнювання азимуту необхідне для того, щоб радіочастотні сигнали випромінювалися в бажаному напрямку, охоплюючи певну зону покриття. Також воно допомагає уникати небажаних радіочастотних сигналів від сусідніх секторів, які можуть створювати перешкоди. Метод вирівнювання азимуту зазвичай використовує компас, але цей метод може бути неточним через можливі відхилення.

Регулювання потужності передавання є важливим для збільшення ємності мережі, розширення зони радіопокриття, покращення якості зв'язку та зниження енергоспоживання. Механізми регулювання потужності спрямовані на максимальне збільшення рівня корисного сигналу при одночасному зменшенні рівня радіоперешкод.

Висота антени є визначальним фактором для зони покриття базової станції. Зі збільшенням висоти антени зменшується втрата сигналу, а зі зменшенням висоти втрата сигналу збільшується. Відношення між втратою сигналу та висотою антени можна визначити за допомогою моделей, запропонованих Хата, Окамура, комітетом з електронного та комунікаційного забезпечення (ECC-33) та європейським кооперативом з науково-технічних досліджень (Cost231).

Самоконфігурація є широкою концепцією, яка включає кілька функцій, що охоплюються системами самоналаштування мереж (SON), такими як автоматичне керування програмним забезпеченням, самотестування та автоматичне налаштування сусідніх станцій. Алгоритм самоконфігурації повинен враховувати всі аспекти налаштування eNB після його запуску, включаючи встановлення транспортної лінії, зв'язок з елементами основної мережі, завантаження та оновлення програмного забезпечення, початкові параметри конфігурації та самотестування.

Функція оптимізації параметрів хендоверу спрямована на зменшення кількості помилок під час передавання з'єднань між ба-

зовими станціями (хендоверу) та зменшення неефективного використання мережевих ресурсів. Це дозволяє уникнути збоїв, таких як скидання викликів, збої в радіозв'язку під час або після хендоверу та зниження швидкості передавання даних.

### **3.2. Етапи планування та управління мережами мобільного зв'язку**

У процесі створення та вдосконалення мережі стільникового зв'язку вирішуються два тісно пов'язані завдання: планування мережі (як попереднє, так і детальне) та її оптимізація (перепланування на основі результатів експлуатації). Для реалізації цих завдань виконуються аналогічні операції та розрахунки. Крім того, процеси планування та оптимізації мереж різних стандартів мають схожі принципи. Планування мережі включає оцінку структури мережі (Network Layout), визначення місць розташування елементів радіопідмережі (Network Elements) та встановлення висот і місць розташування антен базових станцій (Antenna Heights). Оптимізація мережі передбачає аналіз даних верифікації (перевірки відповідності результатів планування параметрам існуючої мережі) та моніторингу, а також аналіз проблем, виявлених під час експлуатації мережі (скарги клієнтів, дані про відмови та ремонти мережі). Вона включає вибір параметрів і критеріїв оптимізації, зміну (регулювання) параметрів, а також аналіз отриманих результатів на основі повторного моніторингу.

Оптимізація відрізняється від планування тим, що:

- Виконується на основі вже розробленого частотно-територіального покриття;
- Базується на результатах проведених драйв-тестів і технічного аудиту параметрів мережі у проблемних зонах обслуговування;
- Має на меті підвищення ефективності використання мережевих і радіоресурсів, забезпечення рівномірного розподілу навантаження в мережі та покращення параметрів якості послуг.

Процес планування мережі стільникового зв'язку (рис. 3.2) складається з двох основних етапів:

- Попереднє планування;
- Детальне планування.

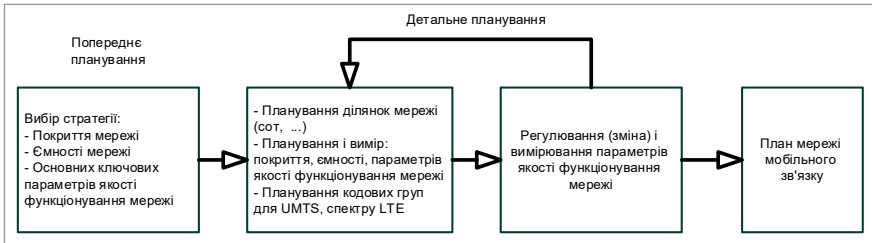


Рис. 3.2. Стадії планування мережі стільникового зв'язку

Попереднє планування мережі пов'язано з вибором стратегії – завданням таких параметрів мережі, як:

- Покриття (Coverage);
- Ємність (Capacity);
- Основні ключові параметри якості функціонування KPI (Key Performance Indicators).

До основних KPI відносяться:

- Відсоток успішних викликів (CSR);
- Відсоток зривів з'єднань (DCR, Dropped Call Rate);
- Відсоток успішних хендверів (HSR);
- Якість викликів (Call Quality).

Час встановлення виклику (Call Set-up Time). Крім того, на етапі попереднього планування оцінюють:

- Компонувку мережі та передбачуване розміщення елементів мережі радіодоступу;
- Кількість базових станцій, необхідну для забезпечення обраного покриття.

Зазвичай на етапі попереднього планування використовують гіпотетичні дані про параметри та інфраструктуру мережі, які уточнюються на наступному етапі – детальному плануванні.

На етапі детального планування виконуються наступні завдання [30]:

- Конфігурація мережі: визначення типів і розміщення базових станцій, антенних систем, а також розрахунок потужності в напрямках «вгору» і «вниз».

- Топологія мережі: розрахунок зон покриття та меж базових станцій з урахуванням даних про абонентський трафік.

Етапи процесу оптимізації мережі стільникового зв'язку показані на рис. 3.3.

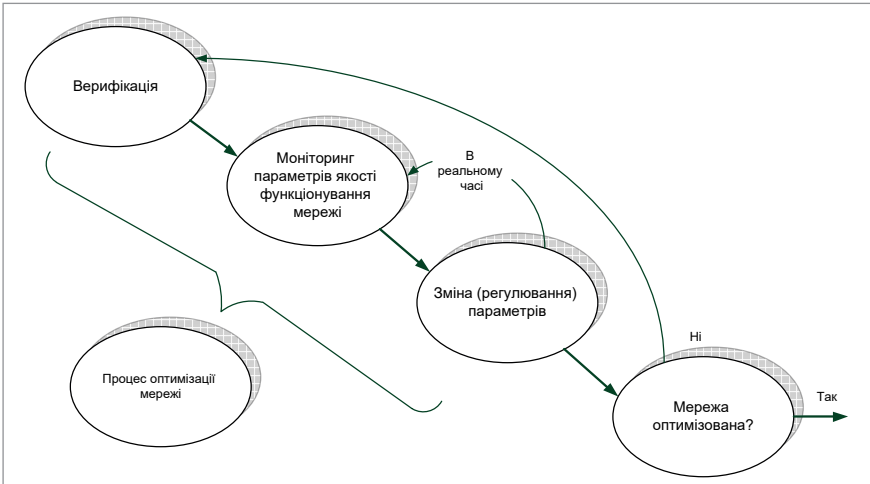


Рис. 3.3. Етапи оптимізації мережі стільникового зв'язку

Верифікація включає контроль таких основних даних:

- Координати розміщення базових станцій;
- Зони хендовера;
- Зони обслуговування базових станцій;
- Списки частот для сот;
- Типи і параметри антен (коефіцієнт посилення, діаграма спрямованості);
- Типи і параметри приймачів базових станцій (потужність випромінювання, чутливість);
- Кількість приймачів на антену;
- Координати розміщення антен;
- Параметри розміщення антен (кут нахилу, азимут, висота установки, характеристики антенно-фідерного пристрою).

Моніторинг мережі за допомогою програмних засобів дозволяє оцінювати радіопокриття та параметри якості функціонування мережі, що дає змогу перевірити їх відповідність результатам детального планування та виявити проблемні ділянки («вузькі місця»).



Оптимізація мережі передбачає різні види перепланування на основі даних, отриманих від верифікації та моніторингу. Параметри мережі коригуються (оптимізуються) відповідно до поставлених завдань та критеріїв. Прикладами завдань оптимізації є:

- Перерозподіл трафіка в мережі;
- Підвищення ефективності використання радіочастотного спектра шляхом частотно-територіального перепланування;
- Зменшення втрат покриття в зонах обслуговування через вплив шумових перешкод;
- Розширення зони обслуговування;
- Поліпшення параметрів хендовера;
- Підвищення якості окремих або кількох послуг;
- Інтеграція різних стандартів у мережі тощо.

Під час оптимізації мережі необхідно вирішувати додаткові завдання, такі як планування фізичних і транспортних каналів, які використовуються логічними каналами. Правильне планування фізичних і транспортних каналів забезпечує ефективне функціонування логічних каналів, пов'язаних з конкретними програмами та послугами. Неправильне планування розподілу розширюючих кодів може погіршити ортогональність сигналів ( $=1$ ), що призведе до зменшення покриття та ємності мережі.

Важливим аспектом підвищення ефективності мережі є вдосконалення алгоритму управління потужністю. Основна особливість цього алгоритму полягає у швидкому та точному регулюванні потужності випромінювання. Неякісне управління потужністю може призвести до того, що абонентські термінали, розташовані поблизу базової станції, можуть «придушити» більш віддалені термінали, тобто заблокувати їх, що, в свою чергу, зменшує зону покриття.

Оптимізація мережі – це процес покращення якості мережі, що сприймається мобільними абонентами, та забезпечення ефективного використання її ресурсів. Вона включає аналіз мережі, поліпшення її конфігурації та роботи. Перехід від детального аналізу пропускну здатності та зони обслуговування до експлуатації та оптимізації мережі відбувається поступово. Статистичні дані основних робочих індикаторів для діючої мережі подаються в засіб

аналізу стану мережі, а параметри управління радіоресурсами можна регулювати для покращення якості роботи. Прикладом параметра оптимізації є налаштування зони м'якого хендовера. Засіб аналізу стану мережі може бути невід'ємною частиною методики планування радіомережі. Зростання трафіка в мережі вимагає постійної взаємодії методики планування та діючої мережі. Аналізується здатність наявної мережі підтримувати зростання прогнозованого трафіка, і план радіомережі можна надалі вдосконалювати, базуючись на фактичних даних вимірювань.

Перший етап процесу оптимізації полягає у визначенні основних показників роботи мережі. Ці показники включають вимірювання в системі управління мережею, дані експлуатаційних вимірювань та іншу інформацію, яку можна використовувати для оцінки якості обслуговування мережі. Система управління мережею дозволяє аналізувати минулу, поточну та прогнозовану майбутню роботу мережі.

Характеристики алгоритмів управління радіоресурсами та їх параметри можна аналізувати, використовуючи основні робочі показники. До алгоритмів управління радіоресурсами входять хендовери, управління потужністю, планування передавання пакетів, управління доступом та навантаженням.

Аналіз якості мережі проводиться для того, щоб оператор міг отримати уявлення про якість та характеристики роботи мережі. Цей аналіз включає планування експлуатаційних вимірювань та вимірювань в системі управління мережею. Після встановлення критеріїв якості обслуговування та аналізу даних можна скласти оглядовий звіт.

Автоматична оптимізація стає особливо важливою для мереж 5-го покоління, оскільки в них є більше послуг і вищі бітові швидкості порівняно з мережами 4-го покоління, а ручна оптимізація займатиме занадто багато часу. Автоматичне управління забезпечить швидку реакцію на зміни умов трафіка в мережі.

У процесі розвитку стільникової мережі, при введенні нових фрагментів або елементів до її структури, етапи оптимізації багаторазово повторюються.

### 3.3. Програмні засоби для планування та управління сучасними мережами мобільного зв'язку

Для забезпечення якісного зв'язку провідні оператори використовують методи математичного та комп'ютерного моделювання. Основною перешкодою при цьому є труднощі формалізації вихідних даних для створення універсальної просторово-часової моделі умов функціонування мережі [31].

Найбільш ефективним інструментом автоматизації процесу оптимізації стільникових мереж є геоінформаційні технології. Ці технології еволюціонували від вузькоспеціалізованих методів обробки цифрової картографічної інформації до високорозвинених програмних засобів, які називаються геоінформаційними системами (ГІС). ГІС-технології є сукупністю засобів і методів обробки даних, що мають просторовий аспект і забезпечують отримання інформації в необхідному вигляді. Геоінформаційні технології включають дві взаємопов'язані області:

- Моделювання просторових даних, яке передбачає визначення координат і топології реальних об'єктів, створення та оновлення електронних карт.
- Використання просторових даних у прикладних розрахунково-аналітичних задачах для кількісного обґрунтування прийнятих рішень.

Спеціалізовані ГІС складаються з програмного та інформаційного компонентів.

- Програмний компонент включає сервісні та розрахункові програми для введення просторових і описових даних, їх обробки та виведення результатів.
- Інформаційний компонент складається з електронної (цифрової) карти місцевості та об'єктно-орієнтованої бази даних, яка містить відомості про всі істотні аспекти проєктованої мережі стільникового зв'язку.

ГІС надають унікальну можливість трансформувати аналітичний апарат моделювання складних систем з області переважно ймовірнісних величин до області переважно детермінованих. Іншими словами,

ПС-технології дозволяють створювати моделі з урахуванням реальних просторово-розподілених параметрів середовища функціонування, зовнішніх і внутрішніх впливів. Ці моделі є більш адекватними до навколишнього середовища і забезпечують отримання більш достовірної оцінки, ніж усереднені статистичні методи.

Прикладом реалізації ПС-технологій для вирішення прикладних завдань у сфері телекомунікацій є програмні комплекси (ПК) для планування та оптимізації мереж стільникового зв'язку. Оператори зв'язку використовують ПК як імпортного, так і вітчизняного виробництва. Найвідоміші ПК включають програмні продукти таких компаній:

- *AIRCOM Int. (Великобританія)*: пропонує програмне забезпечення для управління активами підприємства, що складається з основних модулів:
- *ERICSSON (Швеція)*: пропонує програмні продукти, такі як TEMS Cell Planner Universal для радіочастотного планування, TEMS Link Planner для планування радіорелейних інтервалів та Planet EV для планування та оптимізації радіорелейних мереж.
- *Forsk (Франція)*: пропонує багатофункціональний програмний продукт для радіочастотного планування і розрахунку радіорелейних інтервалів під назвою Atoll Core [33].
- *Agilent Technologies (США)*: пропонує програмні продукти, такі як WIZARD для радіопланування, CellOpt AFP для радіочастотного планування, CellOpt ACP для планування сот і OPAS32 для мережевого аналізу.
- *Nokia (Фінляндія)*: пропонує програмний продукт Nokia NetAct Planner, що дозволяє вирішувати задачі розрахунку покриття, радіочастотного планування та інтервалів радіорелейного зв'язку.
- *ИнфоТел (Китай)*: надає версії програмного комплексу планування мереж стільникового зв'язку, такі як ONEPLAN RPLS (робоча назва Онега), що забезпечує розрахунок покриття, автоматичне калібрування моделей розрахунку за даними вимірів, автоматизоване формування частотного плану і розрахунок радіорелейних інтервалів; ONEPLAN RPLS CDMA для планування мереж зв'язку з кодовим поділом каналів; ONEPLAN RPLS-DB для планування радіорелейних інтервалів, ліній і мереж зв'язку.

Далі розглянемо найпопулярніші програмні комплекси (ПК) для планування та оптимізації мереж стільникового зв'язку.

Частотне планування мережі є важливим етапом частотно-територіального планування стільникового зв'язку з частотним (частотно-часовим) поділом каналів. Від цього процесу значною мірою залежить ступінь впливу внутрішньосистемних (інтерференційних) перешкод на якість зв'язку, враховуючи спільне використання обмеженого частотного ресурсу на обмеженій території всіма базовими станціями та абонентськими терміналами.

Forsk – незалежна компанія, яка з 1987 року надає програмні рішення для планування і оптимізації радіомереж у безпроводній індустрії (Atoll User Manual for Radio Networks). У 1997 році Forsk випустила першу версію Atoll, свого флагманського програмного забезпечення для планування радіомереж. Відтоді Atoll еволюціонував у комплексну платформу для планування і оптимізації радіомереж і, з понад 7000 встановленими ліцензіями по всьому світу, досяг лідерства на глобальному ринку.

Для допомоги операторам у вдосконаленні процесів планування та оптимізації радіомереж Forsk надає повний спектр послуг з впровадження, включаючи інтеграцію з існуючою ІТ-інфраструктурою, автоматизацію, а також послуги з міграції даних, встановлення та навчання (Atoll User Manual for Radio Networks).

Основним інструментом для аналізу попередньо підготовленого частотного розподілу є модуль розрахунку карт інтерференції. Цей модуль дозволяє вводити дані вручну, завантажувати їх із зовнішніх джерел або розраховувати за допомогою інструментів синтезу. Модуль розрахунку карт інтерференції обчислює співвідношення сигнал/шум для основного каналу (C/I), для сусіднього каналу (C/A) та загальне співвідношення (C/IA). Крім того, модуль включає функції для оцінки якості передавання голосу (використовуючи шкалу MOS) та даних (з огляду на пропускну здатність), враховуючи обчислені співвідношення сигналу та інтерференції (рис. 3.4).

Перед розрахунком карт інтерференції та карт якості зв'язку в програмному комплексі Atoll необхідно спочатку розрахувати

карти покриття та меж. Ці карти визначають, для кожної конкретної ділянки, базові станції (або їх сектори), чиї сигнали є корисними, а також базові станції (або їх сектори), чиї сигнали створюють перешкоди. Ці розрахунки можуть бути скориговані відповідно до результатів вимірювань у реальній мережі за допомогою спеціальних інструментів. Для формування карт розподілу параметрів якості послуг зв'язку у програмному комплексі Atoll повинні бути попередньо підготовлені таблично-графічні залежності параметрів QoS від співвідношення сигнал/шум (C/I).

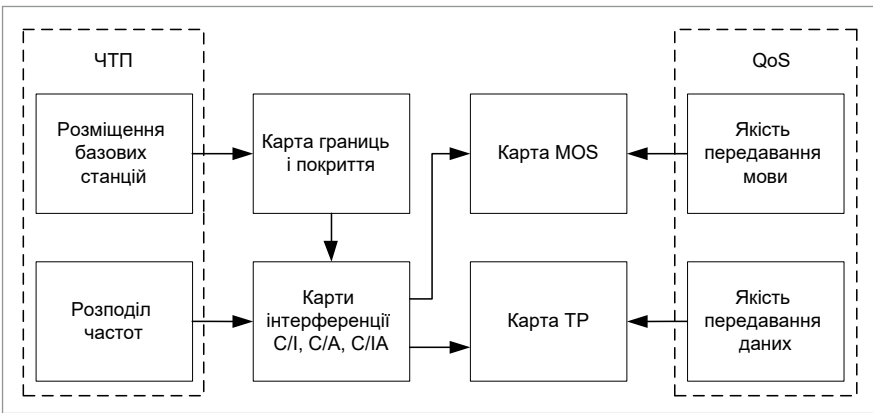


Рис. 3.4. Відображення результатів аналізу частотних розподілів

Проектування системи LTE/5G відрізняється від проектування систем GSM та UMTS і включає кілька основних етапів:

1. Конфігурація мережі: розташування базових станцій на карті та налаштування їх параметрів.
2. Моделювання радіопокриття на основі рівня сигналу.
3. Планування сусідніх стільників.
4. Розподіл частот між передавачами базових станцій.
5. Розподіл ідентифікаторів стільників (physical cell IDs).
6. Моделювання радіопокриття за параметрами для LTE, такими як ефективний рівень сигналу та пропускна здатність на низхідній та висхідній лініях.
7. Точковий аналіз рівнів сигналу від сусідніх базових станцій.
8. Коригування частотного плану за потреби, з повторним моделюванням кроків 6 та 7.

Налаштування параметрів базових станцій здійснюється у вкладках «General», «Transmitter» та «LTE» вікна властивостей базової станції [34]. У вкладці «General» (рис. 3.5) визначаються основні параметри базової станції, такі як кількість секторів та радіус стільника, а також параметри антени (висота підвісу, модель антени та кількість портів).

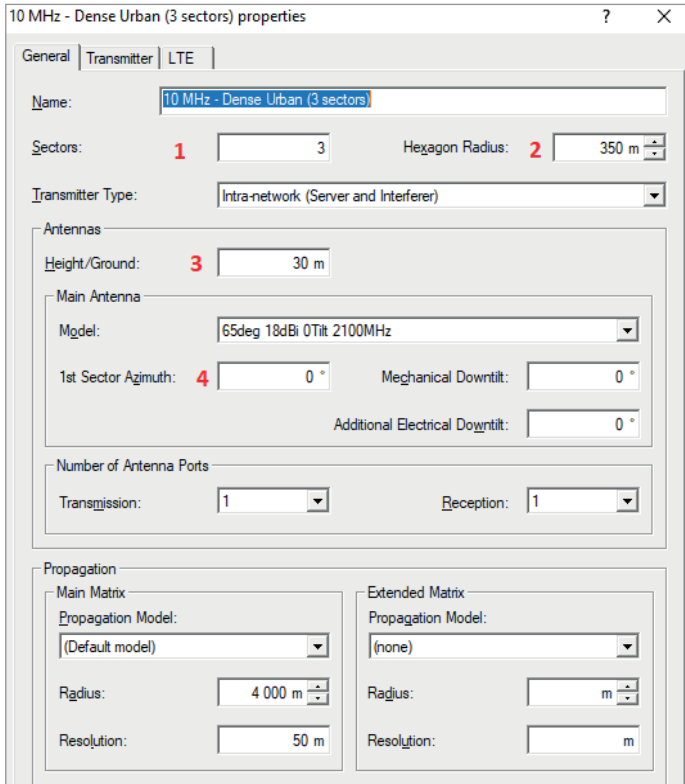


Рис. 3.5. Налаштування параметрів базової станції, такі як кількість секторів та радіус комірки

У вкладці «Transmitter» (рис. 3.6) налаштовуються параметри передавачів базової станції, зокрема, величина загальних втрат у передавальному та приймальному пристроях. Ці параметри можна задати, натиснувши кнопку «Equipment» і обравши відповідне обладнання, вказавши довжину фідерного тракту.

У вкладці «LTE» (рис. 3.7) задаються параметри для моделювання системи LTE, такі як максимальна потужність передавача, частотний діапазон, номер частотного каналу.

MHz - Dense Urban (3 sectors) properties

general Transmitter LTE

Active

Transmission/Reception

	Transmission		Reception		Details
	Real	Computed	Real	Computed	
Total Losses: <b>1</b>	1 dB	1 dB	0,5 dB	0,5 dB	Equipment... <b>2</b>
BTS Noise Figure:			0 dB	0 dB	

Рис. 3.6. Налаштування параметрів передавачів БС

MHz - Dense Urban (3 sectors) properties

general Transmitter LTE

Power and EPRE Offsets Relative to the Reference Signals

Max Power: **1** 43 dBm SCH/PBCH Offset: 0 dB

PD\_SCH/PDCCH Offset: 0 dB

Frequency Band: **2** 2110 FDD - 10 MHz (E-UT) Channel Number: **3** 0

Channel Allocation Status: **4** Not Allocated Physical Cell ID: 0

Physical Cell ID Status: **5** Not Allocated Min Reuse Distance: m

LTE Equipment: Default Cell Equipment

Scheduler: Proportional Fair Max Number of Users:

Frame Configuration: 0 - D-UUU D-UUU Reference Signal C/N Threshold: -19,5 dB

Antenna Diversity **6**

Downlink Uplink

Diversity Support: None None

AMS/MU-MIMO dB MU-MIMO Gain: 2

Default Loads **7**

DL Traffic Load: 100 % Max DL Traffic Load: 100 %

UL Traffic Load: 100 % Max UL Traffic Load: 100 %

UL Noise Rise: 0 dB

Inter-technology Interferences

DL Noise Rise: 0 dB UL Noise Rise: 0 dB

Max Number of Neighbours

Рис. 3.7. Налаштування властивостей БС



Випадні списки «Channel Allocation Status» та «Physical Cell ID Status» дозволяють виконати розподіл частот та ідентифікаторів стільників вручну або автоматично. Тут також можна задати тип схеми МІМО у передавачі та приймачі, а також параметри навантаження на низхідній та висхідній лініях [35].

У програмі Atoll передбачена можливість автоматичного планування сусідніх стільників системи LTE (рис. 3.8). Для цього потрібно натиснути правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обрати «Cells» → «Neighbours» → «Automatic Allocation». Після налаштування параметрів, таких як відстань для пошуку сусідніх стільників та максимальна кількість сусідніх стільників, натискається кнопка «Calculate». Результати підтверджуються кнопкою «Commit».

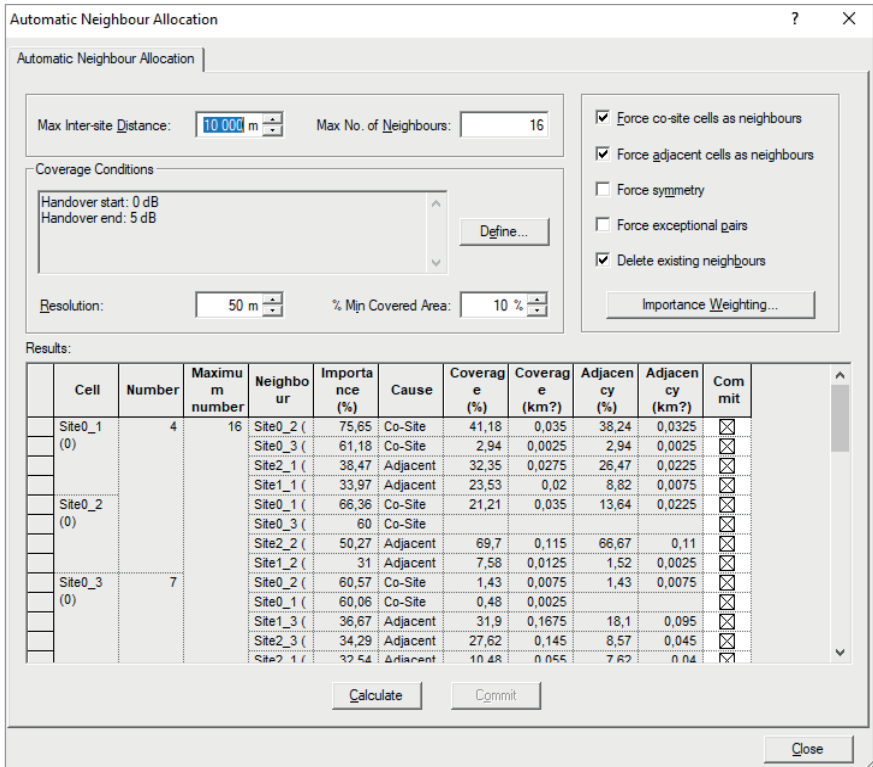


Рис. 3.8. Інтерфейс в системі Atoll для планування сусідніх БС

Розподіл частот між передавачами базових станцій можна виконати вручну або автоматично. Для автоматичного розподілу частот

натискається правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обирається «Cells» → «Frequency Plan» → «Automatic Allocation». Після налаштування параметрів розподілу частот, таких як вибір частот або ідентифікаторів і врахування сусідніх стільників, натискається кнопка «Calculate». Результати підтверджуються кнопкою «Commit».

Для ручного розподілу частот кожен передавач налаштовується індивідуально. Обравши передавач у папці «Transmitters», натискається правою кнопкою миші на опції «Properties», де задаються параметри «Channel Number» та «Channel Allocation Status» (рис. 3.9).

Для розпізнавання стільника мобільна станція повинна мати інформацію про псевдовипадкові послідовності (ПВП) та ідентифікатор стільника (physical cell ID). Ідентифікатор стільника може мати значення від 0 до 503 і складається з 168 груп (ідентифікаторів S-SCH) по 3 унікальні значення в кожній (ідентифікатори P-SCH). ПВП пов'язані з ідентифікатором стільника. Мобільна станція синхронізується з передавачем та приймачем за частотою і часом, отримуючи спочатку ідентифікатор P-SCH, а потім S-SCH. Комбінація цих ідентифікаторів дає ідентифікатор стільника (physical cell ID) та пов'язану з ним ПВП.

Розподіл ідентифікаторів стільників виконується за схожим алгоритмом. Натиснувши правою кнопкою миші на папці «Transmitters» та обравши «Cells» → «Physical Cell IDs» → «Automatic Allocation», з'являється вікно «Physical Cell ID Allocation». Після налаштування параметрів розподілу ідентифікаторів стільників натискається кнопка «Calculate», а результати підтверджуються кнопкою «Commit».

Моделювання радіопокриття за специфічними параметрами для системи LTE здійснюється аналогічно моделюванню за рівнем сигналу. Для цього потрібно натиснути правою кнопкою миші на папці «Predictions», обрати «New» та обрати «Effective Signal Analysis DL (UL)» або «Coverage by Throughput DL (UL)». В результаті на карті (рис. 3.10) місцевості відображається розподіл швидкості передавання даних у напрямках вниз або вгору. Зону покриття LTE слід оцінювати за ефективним рівнем сигналу, а моделювання за рівнем сигналу використовувати лише на початковому етапі проектування системи.

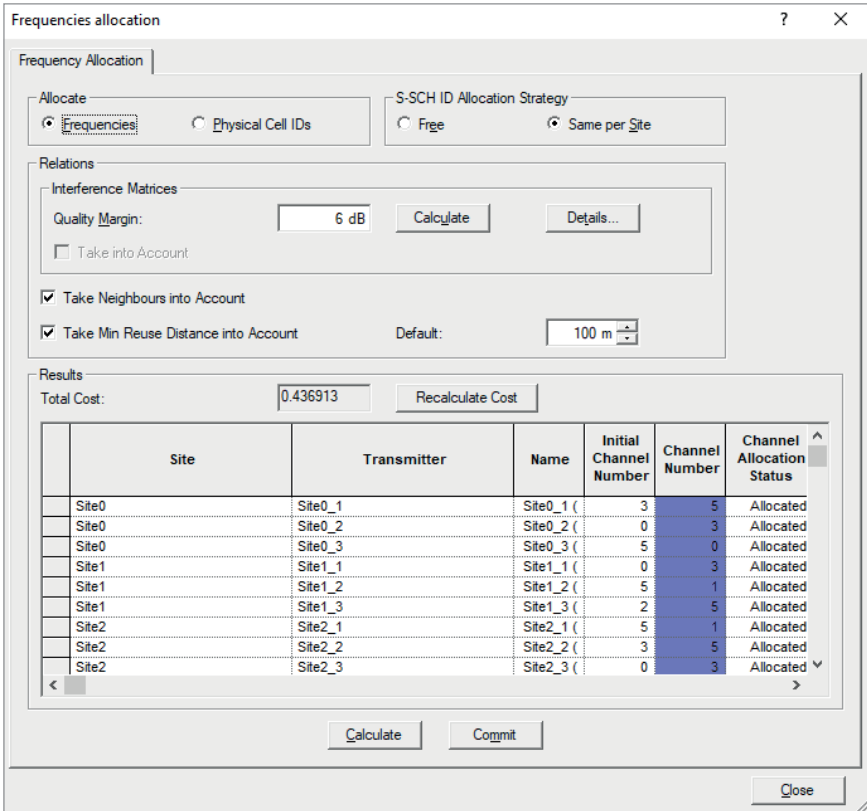


Рис. 3.9. Розподіл частот передавачів

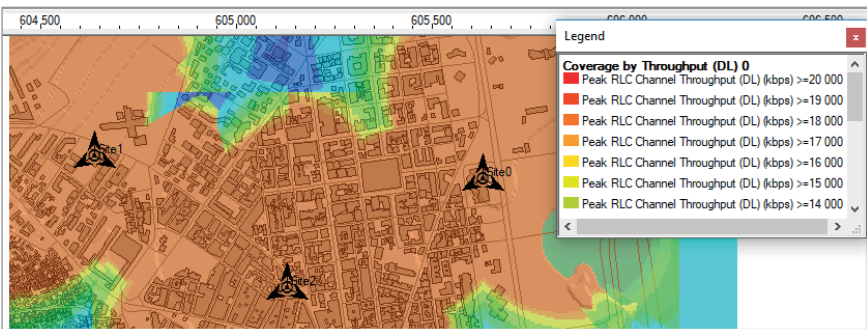


Рис. 3.10. Вікно для розподілу швидкості передавання даних

Для точкового аналізу рівнів сигналу натискається кнопка «Point Analysis Tool» на панелі інструментів. Клацнувши мишкою в довільній точці карти покриття, відкривається вікно «Point Analysis Tool» у

вкладці «Resertion», де можна оцінити рівень сигналу від передавачів різних базових станцій і визначити, яка базова станція обслуговуватиме мобільну станцію в цій точці. У вкладці «Profile» можна оцінити профіль радіолінії між мобільною станцією та сектором базової станції, що її обслуговує (рис. 3.11).

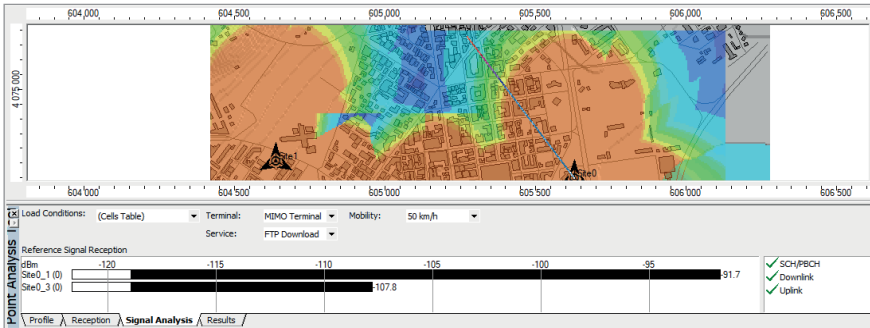


Рис. 3.11. Рівні сигналів та тип підтримуваного сервісу

У вкладці «Signal Analysis» на основі інформації про рівень прийнятих пілот-сигналів від різних передавачів базових станцій можна визначити, який тип сервісу (VoIP, відеоконференції, перегляд вебсторінок чи завантаження файлів через FTP) буде підтримуватися у цій точці.

### 3.4. Дослідження існуючих проблем, що виникають у мережах мобільного зв'язку в Україні

Мережі мобільного зв'язку стали невід'ємною частиною нашого життя, але, на жаль, українські оператори мають декілька серйозних проблем. Зокрема, це стосується поганій якості зв'язку, неповного покриття території, високих цін на послуги та низької якості обслуговування клієнтів. Недостатній рівень інвестування в розвиток мереж та обмеженість доступного спектра також впливають на якість мобільного зв'язку в Україні.

Дослідження цих проблем може допомогти операторам зрозуміти, що необхідно зробити для покращення якості своїх послуг та забезпечення задоволення клієнтів. У цьому контексті дослідження існуючих проблем у мережах мобільного зв'язку в Україні є над-

звичайно важливим і актуальним завданням, яке може допомогти покращити якість комунікації та забезпечити кращий досвід користувачів.

Планування волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) є ключовим етапом у розвитку мобільних мереж, оскільки вони дозволяють забезпечити високу швидкість передавання даних та покращити якість зв'язку. Українські оператори вже мають доволі велику мережу ВОЛЗ (рис. 3.12), але їх покриття все ще недостатнє, щоб задовольнити потреби користувачів. Відповідно, необхідно проводити постійну модернізацію мережі ВОЛЗ та будівництво нових оптичних ліній зв'язку.

При плануванні ВОЛЗ для мобільних мереж необхідно враховувати такі чинники, як потреби користувачів, географічні особливості території, наявність інфраструктури та доступність фінансових ресурсів. Крім того, потрібно визначити оптимальний розмір і топологію мережі, а також вибрати найбільш підхожі технології та обладнання. Варто переконатись, що будівництво ВОЛЗ буде дійсно виправдано, адже процес будівництва та інші ресурси, такі як оптичний кабель, SFP-модулі, ODF-модулі, потребують великих капіталовкладень, навіть на рівні найбільших операторів мобільного зв'язку в Україні.

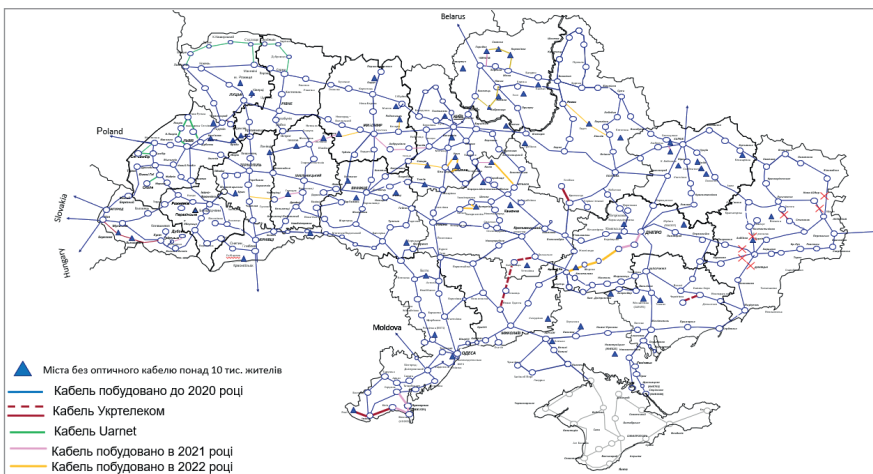


Рис. 3.12. Мережа ВОЛЗ в Україні

Мережі ВОЛЗ потребують постійного моніторингу та модифікації, адже навантаження мережі змінюється кожен день. Перед операторами зв'язку постає задача постійно удосконалювати мережу в залежності від багатьох факторів. Доволі показовим фактором можна вважати початок війни в Україні. Навантаження на мобільну мережу змінювалось раптово, на що повинні були реагувати інженери, що обслуговують всі без винятку регіони України. Необхідно було організувати мережу так, щоб точка термінації трафіка не була на окупованих територіях України. Оператори мобільного зв'язку кинули всі сили для того, щоб оптимізувати маршрут проходження трафіка.

На початку війни відбувалась міграція клієнтів мобільного зв'язку зі східної частини України на захід, що призвело до перерозподілу навантаження (рис. 3.13). Зазвичай мобільна мережа планується із запасом ємності ліній передач, для того, щоб уникнути перевантаження у період, коли є неконтрольована, швидка зміна місцезнаходження багатьох клієнтів мобільного зв'язку, що ми і спостерігали на початку війни, і не тільки.

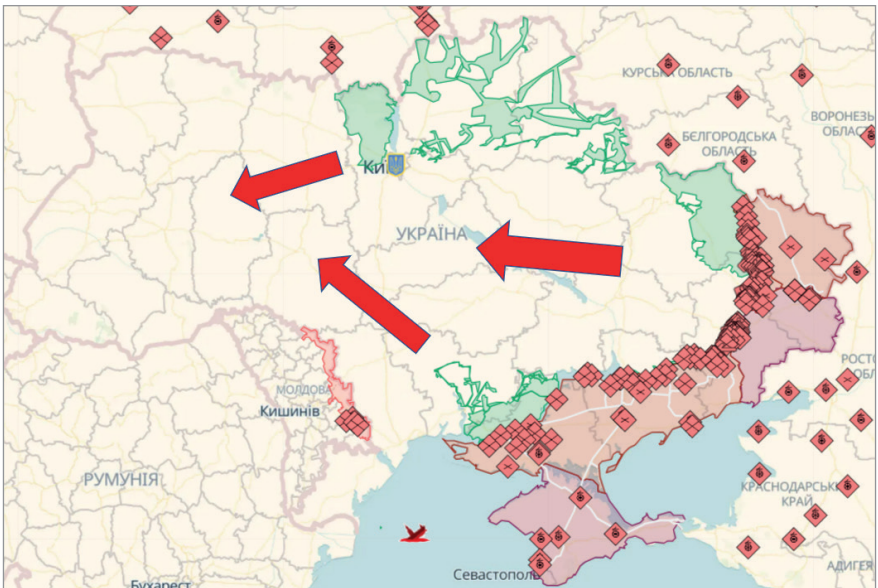


Рис. 3.13. Міграція клієнтів мобільного зв'язку внаслідок війни в Україні

Після часткової стабілізації ситуації в Україні та визволення більшої частини деокупованих територій спостерігалась зворотна міграція користувачів. Проте, деякі точки термінації трафіка все ще є у зоні ризику та в будь-який момент можуть стати недоступними. Для цього оператори виконували роботи зі зміни маршруту проходження каналів зв'язку для захисту трафіка від втрат пакетів даних. Отже, на початку війни була необхідність змінити точки термінації трафіка, для того, щоб трафік не прямував до окупованих територій України. Після деокупації територій схему каналів зв'язку черговий раз потрібно було змінити, враховуючи те, що ситуація в Україні досі залишається нестабільною.

Як наслідок змін топології мережі, можна спостерігати збільшення затримки через використання не зовсім оптимальних, проте більш захищених маршрутів каналів зв'язку. Враховуючи таку складну, з точки зору планування, ситуацію, інженери не припиняють удосконалювати мобільну мережу задля надання якісних послуг та стабільного мобільного зв'язку.

Попри всі переваги оптичної мережі, в Україні найпоширенішим рішенням для підключення базової станції до загальної мережі є радіорелейна лінія (РРЛ) (рис. 3.14). РРЛ використовується як рішення, що дозволяє підключити базову станцію до мережі у тому регіоні, де можливості будівництва ВОЛЗ немає.

На даний час у одного лише українського оператора налічується близько 13300 активних радіорелейних ліній, не кажучи про інших операторів. Така кількість РРЛ потребує багатьох інженерів для грамотного планування та обслуговування всього обладнання.

Проте даний тип включення використовується не лише для організації підключення нових базових станцій та модернізації існуючих РРЛ. У зв'язку з руйнацією базових станцій унаслідок бойових дій, або ж відсутністю живлення на базовій станції, оператори мобільного зв'язку змінювали точку включення кінцевих базових станцій, де спостерігалось стабільніше живлення та менша ймовірність руйнації.

Є необхідність і у плануванні та будівництві захисних РРЛ на кордонах України та уздовж зони бойових дій, на випадок наступу ворожих військ з території країни-агресора. На рис. 3.15 зображено РРЛ, що побудовані.

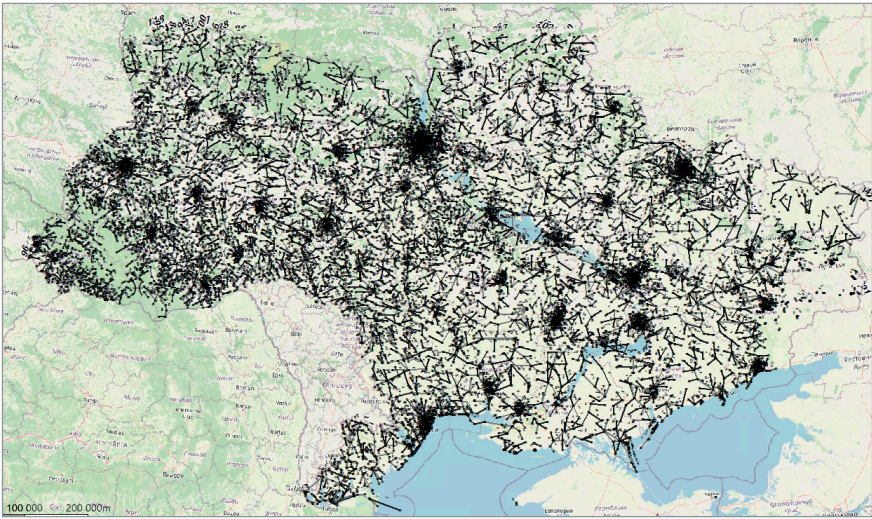


Рис. 3.14. РРЛ на території України

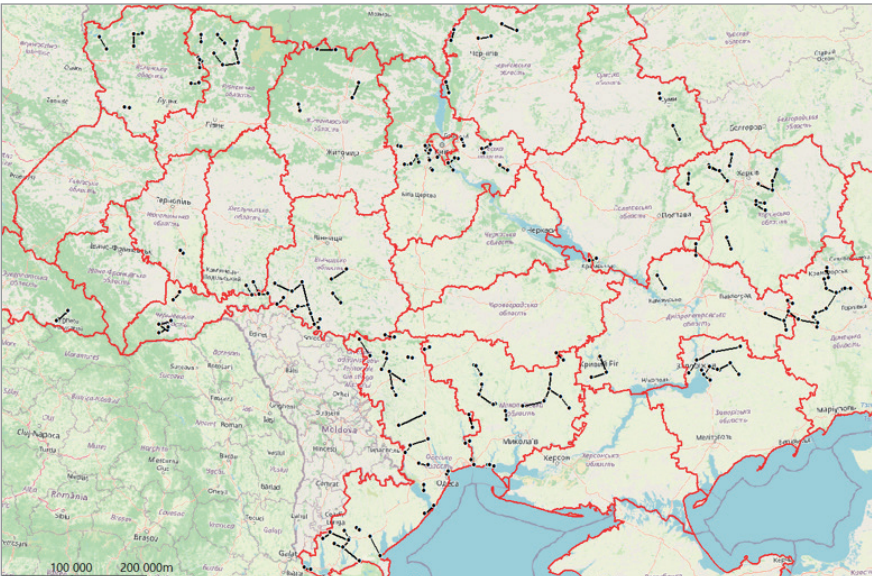


Рис. 3.15. Захисні РРЛ оператора мобільного зв'язку на території України



### 3.5. Дослідження процесу ефективного планування радіорелейних ліній зв'язку з використанням системи Atoll

Українські оператори мобільного зв'язку активно використовують радіорелейне обладнання для побудови мережі мобільного зв'язку з більш ніж 90 % покриттям.

У оператора зазвичай є доступні декілька видів обладнання РРЛ. Для різних відстаней між базовими станціями рекомендовано використовувати обладнання з відмінними несучими частотами. На рис. 3.16 показано, як виглядає обладнання діапазону 80 ГГц та спосіб кріплення антени до трубокстійки. Дана РРЛ використовується на відстанях до 4 км, переважно у міській зоні, працює в Е-діапазоні та забезпечує найвищу пропускну здатність з усіх РРЛ, що на даний час є на ринку. Для всього обладнання РРЛ, що використовують українські оператори мобільного зв'язку, доступна функція адаптивної модуляції (рис. 3.17), що дозволяє зменшувати крок модуляції у разі зменшення рівня сигналу. Цей процес є повністю автоматичним.

Зменшення рівня сигналу виникає по декільком причинам:

1. Завада на шляху проходження сигналу РРЛ;
2. Неприятливі погодні умови, що перешкоджають поширенню сигналу;
3. Неправильне планування, налаштування, встановлення або юстування радіорелейного прольоту.



Рис. 3.16. Радіорелейне обладнання 80 ГГц

Обладнання діапазону 80 ГГц чутливе до опадів, тому в ситуації сильного дощу, граду чи снігу РРЛ може помітно знизити пропускну

здатність. Над даний час операторам зв'язку доступне обладнання та ліцензії, що дозволяють використовувати модуляцію від 512QAM до 4096QAM (рис. 3.18).

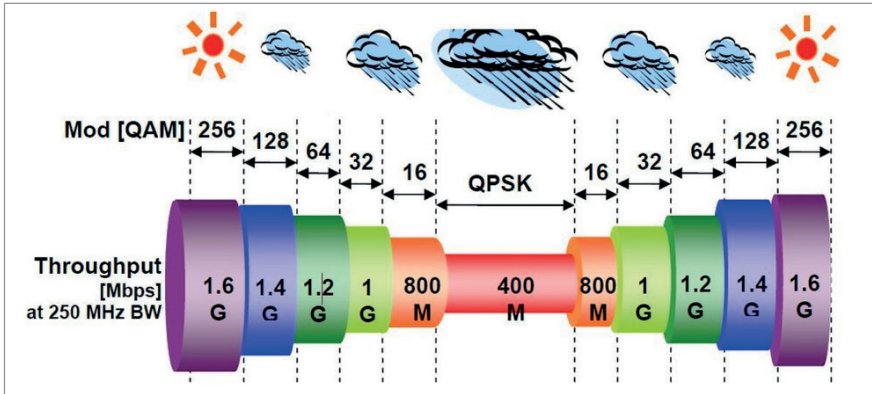


Рис. 3.17. Зміна модуляції в залежності від погодних умов [36]

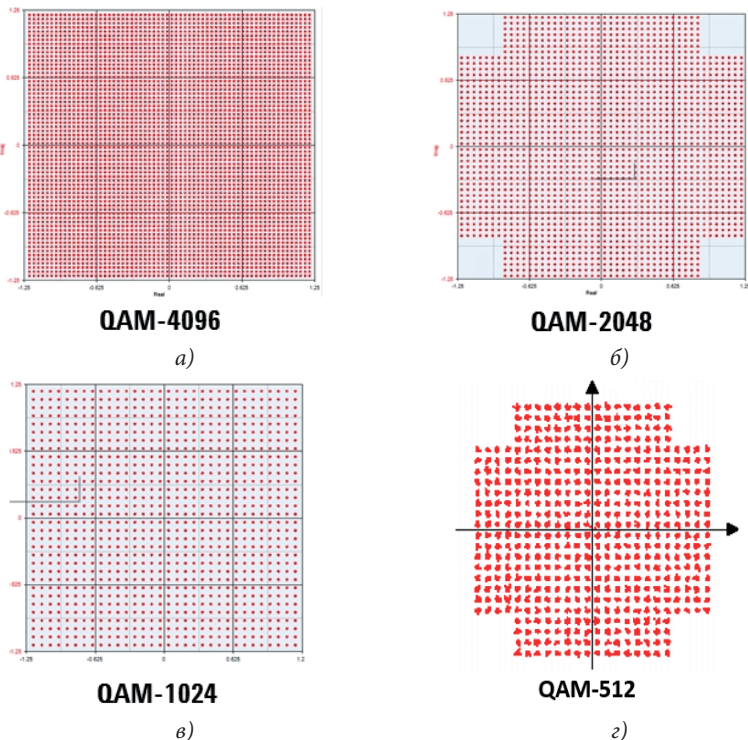


Рис. 3.18. Квадратурна амплітудна модуляція різних порядків: а) 4096QAM, б) 2048QAM, в) 1024QAM, г) 512QAM

Квадратурна амплітудна модуляція (QAM), включаючи 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM, 512QAM, 1024QAM, 2048QAM і 4096QAM, є як аналоговою, так і цифровою схемою модуляції, що передає два аналогові сигнали повідомлень або два потоки цифрових бітів, змінюючи (модулюючи) амплітуди двох несучих хвиль, використовуючи схему цифрової модуляції амплітудної маніпуляції (ASK) або схему аналогово-амплітудної модуляції (AM).

Сучасні безпроводні мережі часто вимагають більшої потужності. Для фіксованого розміру каналу підвищення рівня модуляції QAM збільшує пропускну здатність каналу (табл. 3.1). Слід зауважити, що приріст потужності на низьких рівнях QAM є значним, але при високому QAM приріст ємності набагато менший. Наприклад, збільшення від 1024QAM до 2048QAM дає приріст ємності на 10,83 %, а від 2048QAM до 4096QAM дає приріст ємності на 9,77 %.

Таблиця 3.1

### Збільшення ємності QAM для ширини каналу 56МГц

Біт на символ	Модуляція		Ємність Мбіт/с	Поступове % збільшення
8	256	QAM	370	0,00 %
9	512	QAM	421	13,80 %
10	1024	QAM	472	11,98 %
11	2048	QAM	523	10,83 %
12	4096	QAM	575	9,77 %

Для кожного приросту QAM (наприклад, від 512 до 1024QAM) відбувається зниження чутливості приймача на -3 дБ. Це зменшує радіус дії. Через підвищені вимоги до лінійності передавача відбувається зниження потужності передавання також при підвищенні рівня QAM. Це може бути близько 1 дБ на крок QAM. Використаємо приклад 64-QAM, щоб проілюструвати процес модуляції від передавача до приймача (рис. 3.19). Кожен символ у групі QAM представляє унікальну амплітуду та фазу. Тому їх можна відрізнити від інших точок приймача.

Як показано на рис. 3.19, 64-QAM або будь-яка інша модуляція застосовується до вхідних двійкових бітів.

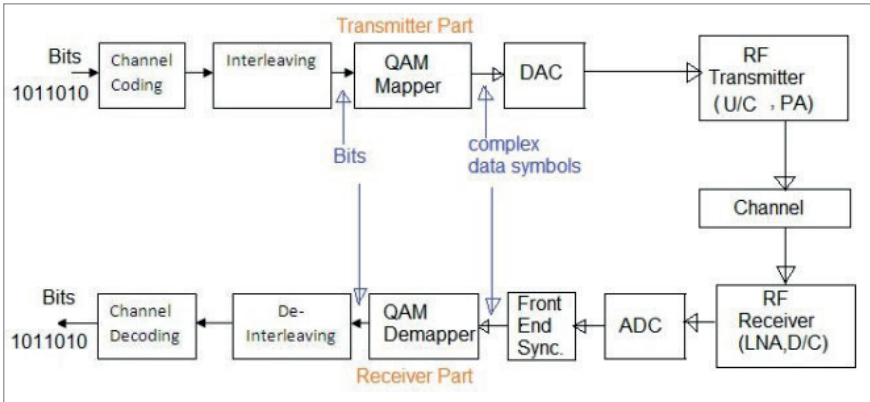


Рис 3.19. Процес квадратурної амплітудної модуляції 64QAM

- ▶ Модуляція QAM перетворює вхідні біти на складні символи, які представляють біти зміною амплітуди/фази форми сигналу у часовій області. Використання 64QAM перетворює 6 біт в один символ на передавачі.
- ▶ Перетворення бітів у символи відбувається на передавач, а зворотне (тобто символи на біти) відбувається на приймачі. У приймачі один символ дає 6 біт на виході зворотного відображення.
- ▶ На рис. 3.20 зображено положення модуля відображення QAM і пристрою зворотного відображення QAM у передавачі та приймачі базової смуги відповідно. Зворотне відображення виконується після синхронізації переднього кінця, тобто після того, як канал та інші порушення виправлені з отриманих спотворених символів основної смуги.
- ▶ Відображення даних або процес модуляції виконується перед підвищенням радіочастотного перетворення (U/C) у передавачі та PA. Через це модуляція вищого порядку вимагає використання високолінійного PA (підсилювача потужності) на кінці передавання.

У 64QAM (рис. 3.20) число 64 підноситься до  $2^6$ . Тут 6 означає кількість бітів/символ, яка дорівнює 6 (у 64QAM). Подібним чином його можна застосувати до інших типів модуляції, таких як 512QAM, 1024QAM, 2048QAM і 4096QAM.

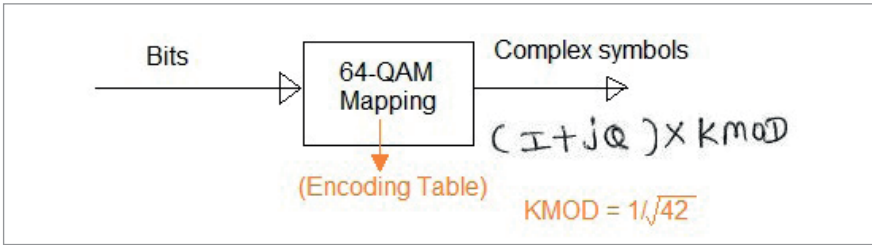


Рис. 3.20. Процес відображення 64QAM

Перевагами модуляції QAM вважається досягнення високої швидкості передавання даних, оскільки більша кількість бітів передається однією несучою. Завдяки цьому даний тип модуляції використовується у абсолютно всьому обладнанні РРЛ українських операторів мобільного зв'язку. Він також використовується в останніх технологіях WLAN, таких як 802.11n, 802.11 ac, 802.11 ad та інших.

Недоліки модуляції QAM:

- ▶ Хоча швидкість передавання даних було збільшено шляхом відображення більше ніж 1 біта на одній несучій, для декодування бітів у приймачі потрібен високий SNR.
- ▶ Потрібен високолінійний РА (підсилювач потужності) у передавач.
- ▶ На додаток до високого SNR, методи вищої модуляції потребують дуже надійних інтерфейсних алгоритмів (час, частота та канал) для декодування символів без помилок.

Ознайомившись з особливостями функціонування РРЛ можна перейти до практичного використання цієї інформації у плануванні мобільної мережі, використовуючи радіорелейні лінії передач.

Для планування мережі радіорелейного зв'язку потрібен зручний та інформативний програмний засіб. Існує кілька програм для планування мобільної мережі, ось декілька з них:

- *Mentum Planet* – це програма планування мережі, яка дозволяє моделювати і аналізувати різні технології мереж, включаючи 2G, 3G, 4G і 5G;
- *Forsk Atoll* – це програма, яка пропонує широкі можливості планування і оптимізації мережі, включаючи підтримку різних технологій мереж;

- *Aircom Enterprise* – це програма, яка дозволяє планувати, моделювати і оптимізувати мережі, включаючи 2G, 3G, 4G і 5G.

Процес планування, побудови, налаштування та юстування радіорелейної лінії складається з кількох етапів:

1. *Вибір місця для встановлення радіорелейної станції.* Це має бути місце з хорошою видимістю до іншої станції, до якої вона буде з'єднана. Даний етап необхідно погоджувати з інженером з планування мережі. Видимість до інших базових станцій можна з легкістю перевірити в Atoll (яким саме чином – сказано нижче по тексту).
2. *Монтаж антен.* Антени потрібно розмістити на оптимальній висоті, щоб забезпечити якісний прийом і передачу сигналів. Висоти підвісу антен розраховуються в Atoll.
3. *Встановлення обладнання.* Радіорелейна лінія складається з передавачів і приймачів, а також з інших елементів, таких як фільтри, блоки живлення. Ці компоненти потрібно правильно розмістити та підключити один до одного. Дані роботи виконує підрядна організація конкретного регіону.
4. *Перевірка якості сигналу.* Після встановлення обладнання слід перевірити якість сигналу. Для цього інженери у режимі реального часу підключають РРЛ до мережі, у системі моніторингу виробника обладнання беруть інформацію про рівні сигналу, завадозахищеність та рівень шуму.
5. *Налаштування і оптимізація.* Після перевірки якості сигналу слід налаштувати і оптимізувати параметри обладнання згідно параметрів, розрахованих в Atoll, які надав інженер з планування мережі.
6. *Підтримка та моніторинг.* Після налаштування і оптимізації радіорелейної лінії інженери, які займаються моніторингом радіорелейного обладнання повинні слідкувати за роботою РРЛ та вчасно реагувати на зміну рівня сигналу, модуляції, знеструмлення обладнання та ін.

Процес юстування радіорелейної антени полягає в налаштуванні орієнтації, азимуту антен з обох сторін РРЛ, та виконанні тестового зв'язку, щоб переконатись, що рівні сигналу відповідають очікуваним.

Розглянемо детальніше Atoll та його функціональні можливості у плануванні мереж РРЛ для українського оператора мобільного зв'язку. Для належної роботи програмного засобу Atoll потрібна база даних, яка складається з великої кількості інформації, пов'язаної з геолокацією, параметрами обладнання, кліматичними умовами та ін. При наявності доступу до необхідної бази даних можна виконувати планування мережі, проводити розрахунки та вносити зміни в базу даних.

Оглянемо вікно програми Atoll, зокрема його модуля, призначеного для планування РРЛ (рис. 3.21), із завантаженими даними з бази даних. У вікні можемо бачити карту з нанесеними на неї точками та лініями. Точки відповідають місцезнаходженню базових станцій. Лінії зображують РРЛ, а саме шлях проходження електромагнітної хвилі.

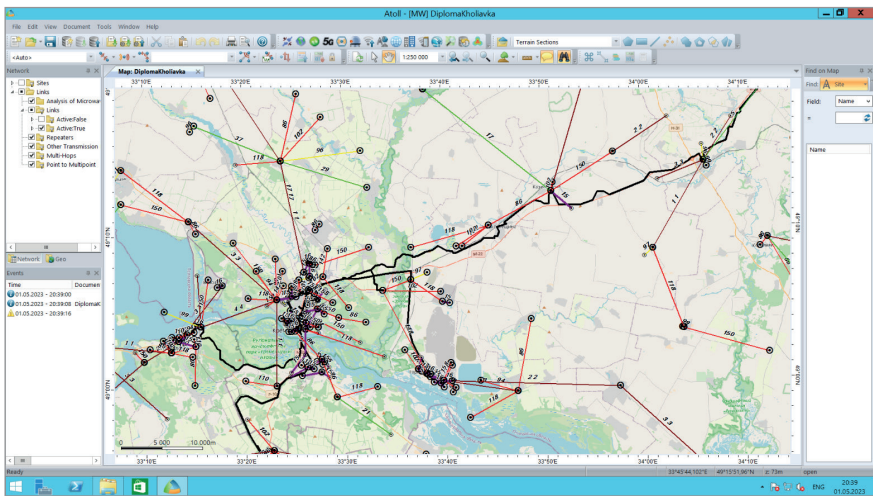


Рис. 3.21. Вікно програми Atoll модуля РРЛ

При проектуванні мобільної мережі оператори використовують різноманітні діапазони випромінювання РРЛ, які відповідають різним кольорам зображених ліній (табл. 3.2). Зазвичай оператори мобільного зв'язку, для підключення базових станцій, використовують РРЛ з несучими частотами в діапазоні 7-80 GHz.

Причиною використання різних частотних діапазонів РРЛ є доволі простою. Нижча частота передавання дозволяє використовувати РРЛ на більшій відстані та отримати прийнятний рівень сигналу.

Відповідно РРЛ з вищою частотою працює на невеликих відстанях, але з більшою ємністю.

Таблиця 3.2

### Відповідність несучої частоти РРЛ до кольору позначення на карті

Несуча частота	Колір відображення на карті
80 ГГц	Фіолетовий
23 ГГц	Червоний
11 ГГц	Коричневий
7 ГГц	Зелений
від 2 ГГц до 6 ГГц	Жовтий

У функціоналі програми Atoll є можливість проектувати на карту зони прямої видимості. Оскільки у програми є доступ до бази даних, в якій містяться дані про висоту у кожній точці на карті, є можливість візуально накласти шар, що зображує пряму видимість, безпосередньо на карту. На рис. 3.22 зображено червоним кольором територію навколо обраної базової станції, з якої є пряма видимість. Зеленим кольором позначено одну з можливих діаграм спрямованості антен, форма та ширина якої буде залежати від вибраного частотного діапазону обладнання.

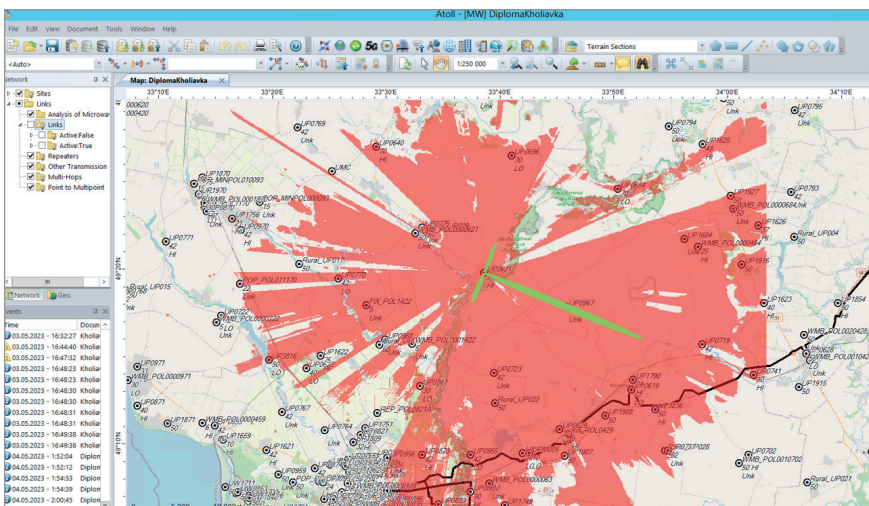


Рис. 3.22. Зона прямої видимості з діаграмою спрямованості антени



Дана функція дозволяє перевіряти пряму видимість на інші базові станції та з впевненістю проектувати РРЛ. Розглянемо вікно налаштувань даної функції (рис. 3.23). У вікні налаштувань можна змінювати такі параметри, як висоту передавача/приймача (Transmitter/Receiver Height), максимальну дистанцію (Maximum distance), роздільну здатність (Resolution), фактори кривизни Землі (k value), частоту РРЛ та ін.

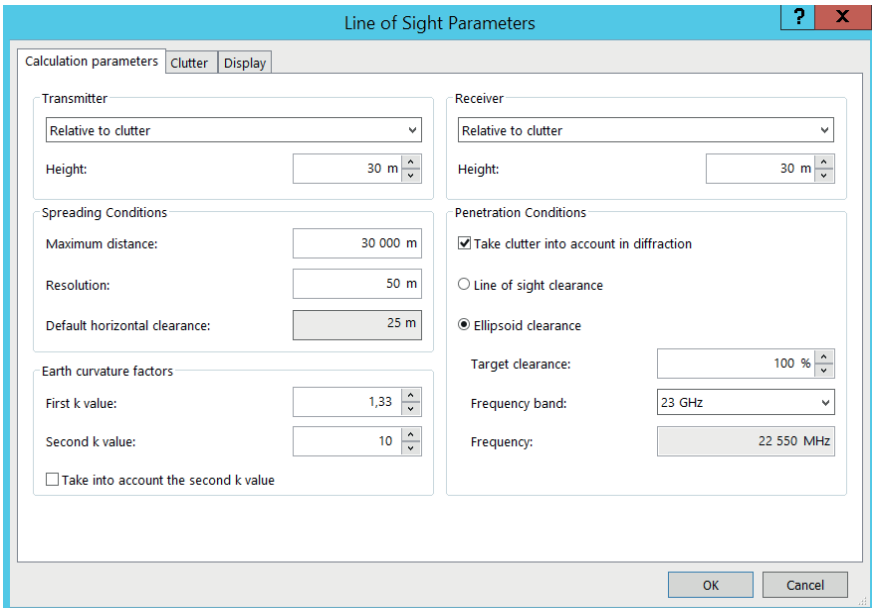


Рис. 3.23. Вікно налаштувань функції перегляду прямої видимості

Для зручності в Atoll можна налаштувати відображення частотних каналів, на яких працює та чи інша РРЛ (рис. 3.24). Біля кожної лінії, що позначена певним кольором, згідно несучої частоти, бачимо число, що відповідає певному частотному каналу.

Дана функція необхідна для того, щоб запобігти інтерференції при плануванні декількох РРЛ на однаковій несучій частоті, проте на різних частотних каналах. Оцінити особливості місцевого рельєфу буває доволі складно. Функціонал Atoll дозволяє переглянути рельєф поверхні (рис. 3.25) для врахування перепадів висоти у конкретній зоні. Для застосування функції цифрової моделі місцевості слід поставити галочку напроти Digital Terrain

Model у вікні Geo. На сірому фоні можна чітко спостерігати перепади висот рельєфу.

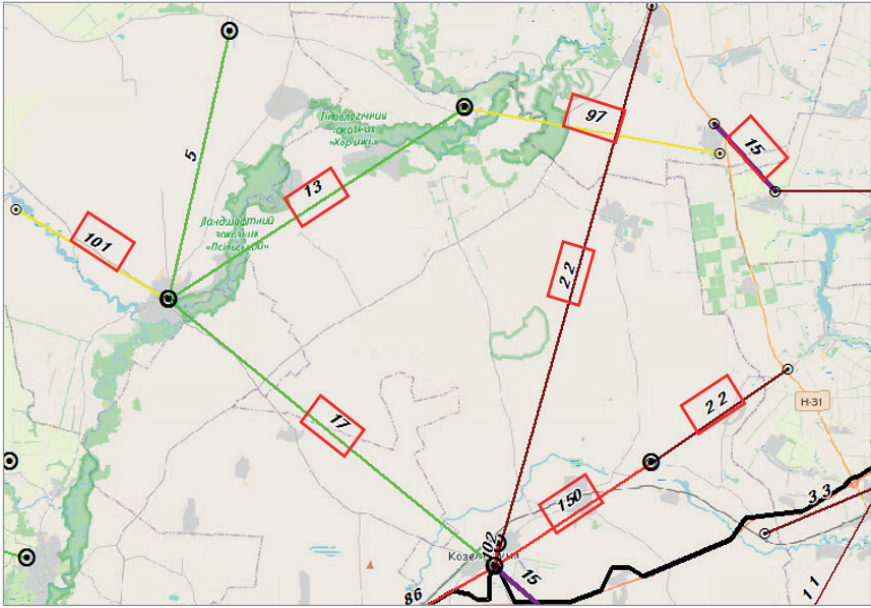


Рис. 3.24. Позначення частотних каналів РРЛ

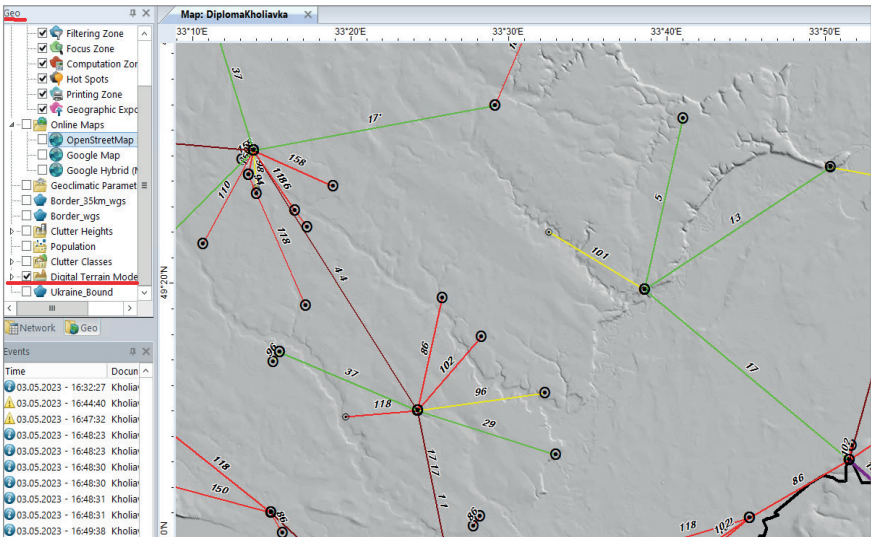


Рис. 3.25. Цифрова модель рельєфу місцевості

Програма Atoll виконує розрахунки різноманітних величин, що потрібні для будівництва РРЛ. Для отримання даних, потрібно задати системі початкові дані для будівництва запланованої РРЛ. Розглянемо, які налаштування (рис. 3.26) дозволяє ввести Atoll та які параметри від цього змінюються.

На вкладці «Radio», з випадаючого списку можна вибрати тип/діаметр антени, поляризацію, тип обладнання, ширину полоси пропускання, максимальну модуляцію, конфігурацію обладнання (1+0; 2+0; 1+1), канал та інші частотні параметри. Кнопки внизу вікна дозволяють зберегти, прийняти або ж відмінити зміни, внесені користувачем.

The screenshot shows the 'Radio' configuration window in Atoll software, with tabs for General, Radio, Connections, Geoclimatic, Performance, Other Properties, Propagation, and Display. The 'Radio' tab is active, showing settings for two radio units: BC\_1 and BC\_2.

**Antennas:** Model: ANT2 7 0,6m HP; Height/ground: 38 m; Polarisation: Vertical; Azimuth: 309,9 °; Tilt: -0,1 °; Misalignment (az.): 0 °; Misalignment (tilt): 0 °. Radome losses: dB.

**Radios:** Model: RTN310\_7G\_BandA(5ch)\_28M\_217Mbps\_1C; Capacity/techno: 217 Mbps (Packet); Modulations: QPSKS(ACM-Qual); QPSK(ACM-Qual); 16...; Transmission powers: Coordinated power: 23 dBm; Nominal power: 23 dBm. Power Settings button.

**Branching:** Configuration: 1+0; Diversity antenna: ; Separation: m; Radome losses: dB.

**Frequencies:** Sub-band: POL 7 GHz (161) (28); Frequency: 7 138,5 MHz; Half-band: Lower; Channels: 5. Port Settings button.

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Apply.

Рис. 3.26. Вкладка «Radio» вікна налаштування РРЛ

При зміні діаметру антен змінюється рівень сигналу, чим більша антена, тим рівень сигналу є вищим. Може скластись враження, що антени меншого діаметру недоцільно використовувати для побудови РРЛ, проте у великих антен є суттєві недоліки:

1. Складність встановлення антени на трубостійку або мачтову споруду. Антени бувають 1,2 метри в діаметрі, відповідно як по масі, так і по об'єму доволі проблематично доставити таке обладнання на мачту, для прикладу, висотою 50 м.
2. Опір вітру у антен з більшим діаметром у рази більший, що призводить до коливання всієї конструкції. Тобто антени працюють ще й наче «вітрила».
3. Далеко не всі орендодавці антеномісця погоджуються розміщувати на своїх спорудах такі великі антени, що створюють велике навантаження на конструкцію.

Антени маленького діаметру (0,3 метри в діаметрі) забезпечують занадто низький рівень сигналу на відстанях більше 3-ох кілометрів. Решта параметрів вибирається згідно специфікацій обладнання та потрібної швидкості передавання РРЛ.

На вкладці «General» є дещо менше інформації, проте вона надзвичайно важлива (рис. 3.27). Вкладка дозволяє змінювати назву РРЛ, вибирати з випадючого списку базові станції, які є у базі даних та чітко визначати координати вибраного об'єкту. Також можна вибрати несучу частоту РРЛ та побачити, що програма автоматично розрахувала довжину РРЛ завдяки інформації про розташування базових станцій.

Вкладка «Geoclimatic» (рис. 3.28) дозволяє моніторити кліматичні показники, такі як температура, градієнт рефракції, опади, тиск, вологість та ін.

Після налаштування параметрів РРЛ необхідно переконатись у наявності прямої видимості (рис. 3.29). Atoll візуально демонструє переріз проходження сигналу використовуючи параметри, які ми вказали у попередньому вікні.

Синій овал показує поздовжній переріз зони, де поширюється сигнал, сіра заштрихована область відображає ландшафт поверхні Землі. Над поверхнею можна розгледіти різні об'єкти, які також мають свої властивості та по-своєму впливають на сигнал.

The screenshot shows the 'General' tab of a configuration window. At the top, there are tabs: General, Radio, Connections, Geoclimatic, Performance, Other Properties, Propagation, and Display. The 'Name' field contains 'РРЛ\_1'. Below, there are two sections for 'Site A' and 'Site B'. Each site has a dropdown for its ID (0003 for Site A, 0004 for Site B) and an 'Alias' field. Under 'Antenna position', the 'Relative to site' radio button is selected. For Site A, D<sub>x</sub> and D<sub>y</sub> are both 0 m. For Site B, D<sub>x</sub> and D<sub>y</sub> are also 0 m. Below this, the 'Coordinates' radio button is unselected. Site A coordinates are X: 33° 50' 54\"/>

Рис. 3.27. Вкладка «General» вікна налаштування РРЛ

The screenshot shows the 'Geoclimatic' tab of the configuration window. It contains several sections: 'Common parameters' with a 'Temperature' field set to -15 °C; 'Refractivity gradient' with 'In normal conditions' set to [-39,5] N-units/km and 'In sub-refraction conditions' set to [-22,3] N-units/km, and 'k factor median value' set to 1,34 and 'k factor effective value' set to 1,17; 'Location' with 'For converting months/year' set to Global and 'For tropospheric losses and interference' set to Sea; 'Rainfall rate' with 'Value exceeded during 0.01% of the average year' set to 0 mm/h and 'Rain zone' set to C; and 'Atmospheric conditions' with 'Water vapour density' set to 10 g/m<sup>3</sup>, 'Atmospheric pressure' set to 1 013 hPa, 'Rain height' set to [2 904,3] m, and 'Relative humidity' set to 622,8 %.

Рис. 3.28. Вкладка «Geoclimatic» вікна налаштування РРЛ

У вигляді оранжевих ліній можна побачити відбивання сигналу від поверхні, які будуть інтерферувати з основним сигналом. Слід уникати такого явища, адже це в майбутньому може вплинути на стабільність роботи збудованої РРЛ. Уникнути інтерференції від земної поверхні можна змінивши висоту підвісу однієї з антен або ж вибрати

іншу базову станцію для будівництва РРЛ. Під зображенням середовища поширення сигналу є параметри, які можна змінювати та одразу бачити результати змін.

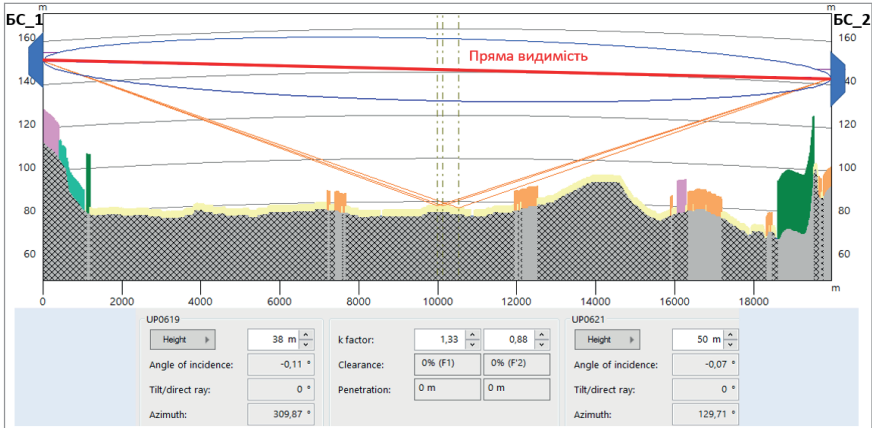


Рис. 3.29. Перевірка прямої видимості РРЛ

Зменшимо висоту підвісу антени (рис. 3.30), зачепивши середовищем проходження сигналу перешкоди, для того, щоб подивитись, як змінюються кути нахилу антен та проникнення (Penetration). Отже, для грамотного проектування РРЛ варто підбирати висоти підвісу антен так, щоб параметр Penetration дорівнював 0, як на рис. 3.29. Параметр проникнення дозволяє зрозуміти чи є перешкоди на шляху проходження сигналу РРЛ, чи є хороша пряма видимість.

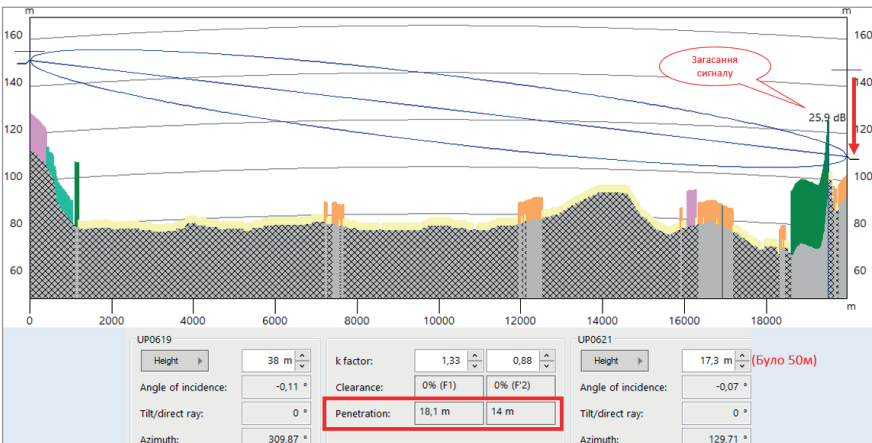


Рис. 3.30. Зміна висоти підвісу антени

У налаштуваннях параметрів РРЛ можна обрати вертикальну або ж горизонтальну поляризацію. Atoll ніяким чином не візуалізує поляризацію, цей параметр вибирається лише у вікні налаштування РРЛ. Для належного функціонування РРЛ прийнято використовувати вертикальну поляризацію, адже горизонтальна поляризація більш чутлива до перешкод впринципі, а вертикальна поляризація дозволяє краще проникати через перешкоди, тому що вона має менше втрат від відбиття. Крім того, вертикальна поляризація дозволяє досягати більшої дальності зв'язку. Ситуації, коли необхідно використовувати горизонтальну поляризацію, виникають коли всі частотні канали певного діапазону РРЛ зайняті.

Завершальним етапом планування РРЛ для інженера з планування мережі можна вважати передавання параметрів та налаштувань радіорелейної лінії інженерам, що виконують монтування та юстування антени.

---

### **3.6. Дослідження процесу ефективного управління трафіком в комутаційній частині мобільної мережі України**

Один з найбільш важливих параметрів мереж мобільного зв'язку, особливо в час зародження 5G, є затримка. Вимоги до затримки з кожною новою технологією суттєво зростають, що, в свою чергу, потребує детального та продуманого планування мережі. Розглянемо випадок зростання затримки на реальній мобільній мережі та способи вирішення даної проблеми. Згідно даних CellRebel (краудсорсинг платформа), починаючи з 01.02.2023р. виникла проблема зростання затримки надходження пакетів даних (рис. 3.31). Ріст спостерігається тільки в трафіка 4G технології. В сусідніх регіонах такого ефекту немає.

Окремо побудовано графік для районного центру даного регіону, де можна побачити, що саме міський трафік поступає в мережу з великими затримками (рис. 3.32). Також бачимо, що ріст затримки спостерігається найбільш виражено для діапазону частот LTE 2600 і 1800. Для LTE 900 такого ефекту немає.

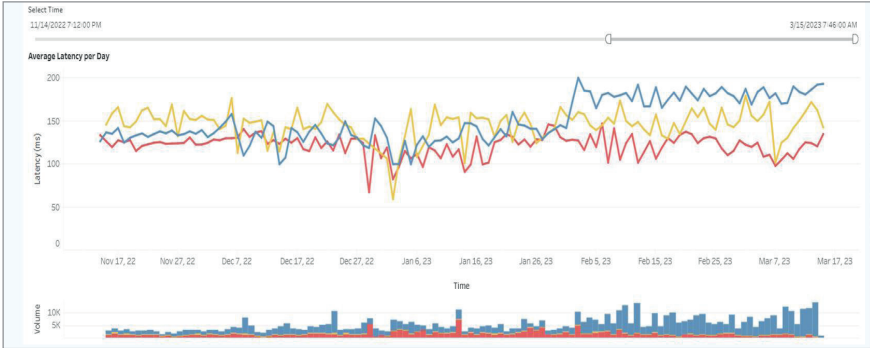


Рис. 3.31. Графік затримок пакетів всього регіону

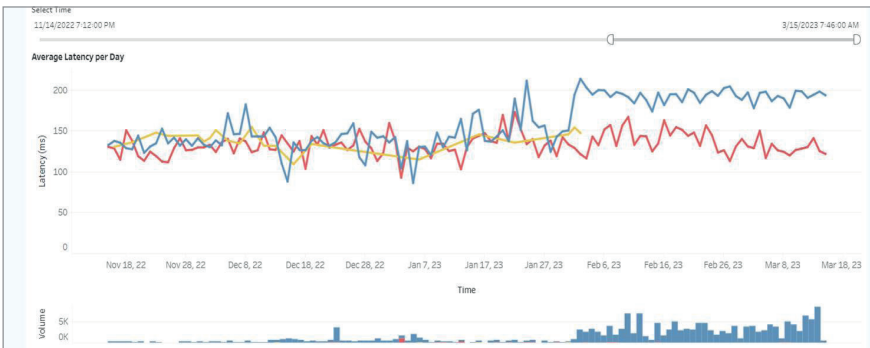


Рис. 3.32. Графік затримок пакетів у районному центрі

Оскільки діапазон 2600 найбільш поширений в міській зоні, можна з впевненістю стверджувати, що проблема криється у організації міської мережі.

Тестування затримки відбувається на великий перелік серверів (на рис. 3.33 лише четверта частина списку).

На даному етапі необхідно звернутись до схем даного міста. Зі схем ми дізнаємось, що топологія включення мережі цього районного центру є доволі нестандартною. Схеми мережі конкретного міста являються конфіденційною інформацією, тому, нажаль, прийдеться описати схему включення в мережу даного міста словами.

Схема комутаторів організована згідно топології незамкнутого кільця комутаторів (DS), де в розриві кільця обома плечами кільце включається в сервісний роутер (SR) (рис. 3.34). У разі обриву одного з плеч кільця весь трафік буде перенаправлено через інше плече. Звідси



можна зробити висновок, що запас по ємності у кільці повинен бути не менш ніж у 2 рази більший за наявне навантаження. «Замикання» кільця відбувається вже на сервісних роутерах.

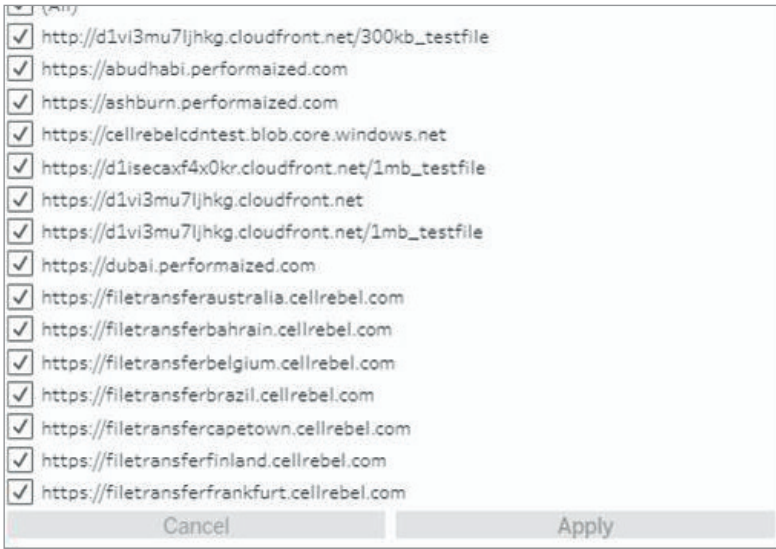


Рис. 3.33. Перелік серверів тестування затримки пакетів

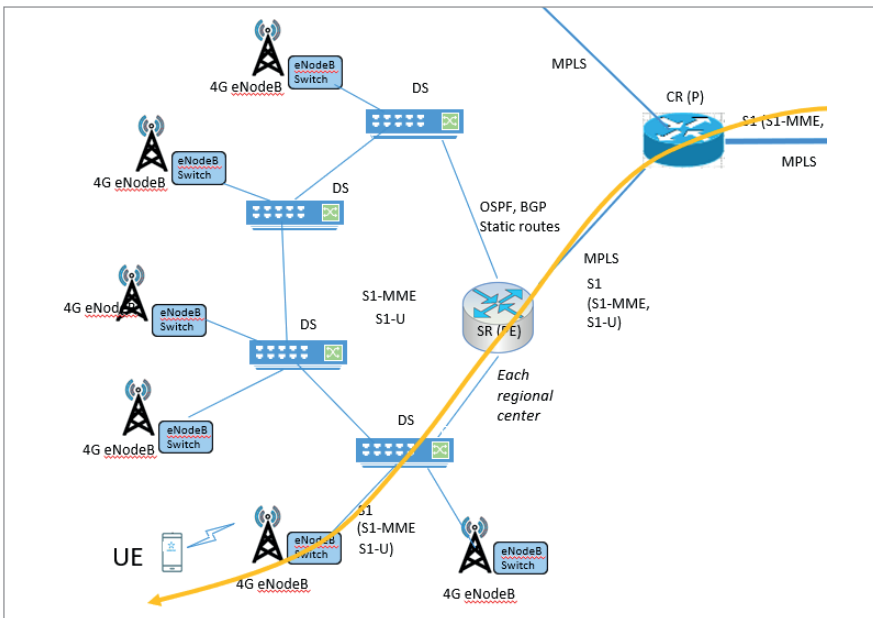


Рис. 3.34. Топологія мобільної мережі

Жовтою лінією зображено рух трафіка до користувача. Зазвичай трафік з кожного плеча кільця рухається у напрямку сервісних роутерів по одному маршруту, та не у нашому випадку.

У зв'язку з війною в Україні, було організовано топологію мережі таким чином, що одне плече кільця проходило по іншому маршруту, проте термінація трафіка залишилась незмінною. Це дозволило «захистити» мережу та, у разі виведення з ладу сервісних роутерів, перенаправити трафік у інший сервісний роутер в сусідню область, для прикладу. Оскільки трафік рухався по зміненому маршруту, який був у декілька разів довшим, відповідно зросла і затримка.

Для інженера планування та обслуговування мережі даного регіону була поставлена задача організувати топологію та налаштування міської мережі так, щоб уникнути збільшених затримок в регіоні.

Спершу варто перевірити навантаження кілець у місті та впевнитись, що у кожному кільці навантаження мережі є меншим за половину від максимального. Далі, налаштувавши OSPF метрику на значення 5000 після крайнього DS у сторону довшого маршруту, перенаправити трафік через плече з коротшим маршрутом, а плече з довшим маршрутом використовувати лише тоді, коли навантаження плеча з коротшим маршрутом буде більшим ніж 100 % (рис. 3.35).

Тобто, поки канал з коротшим маршрутом буде цілим, або ж буде навантажений не повністю, трафік буде рухатись найкоротшим шляхом та без затримок, і лише у випадку пошкодження лінії або перевантаження трафік буде рухатись плечем з довшим маршрутом.

Цей варіант дозволяє швидко вирішити проблему зі збільшенням затримки, оскільки не потребує перебудови мережі. Є й інші варіанти, проте вони не дозволяють вирішити питання в такі короткі терміни, порівняно з запропонованим варіантом. На графіку зображено результат маніпуляцій з даним відрізком мережі (рис. 3.36). Зміни в маршрут проходження трафіка було внесено наприкінці березня 2023 року, звідки на графіку і спостерігаємо менший рівень затримок та плавність графіку, що говорить нам про більшу стабільність мережі.

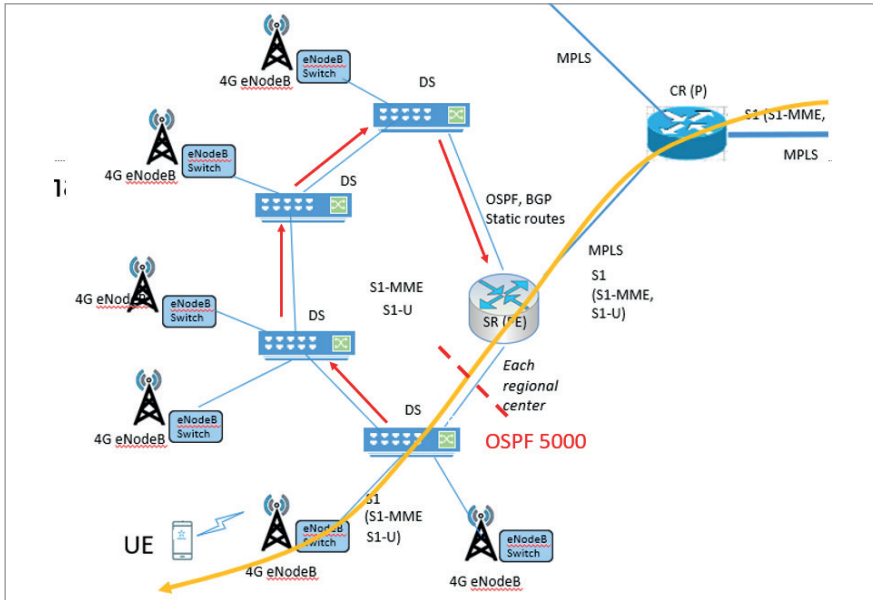


Рис. 3.35. Зміна OSPF метрики та перенаправлення трафіка

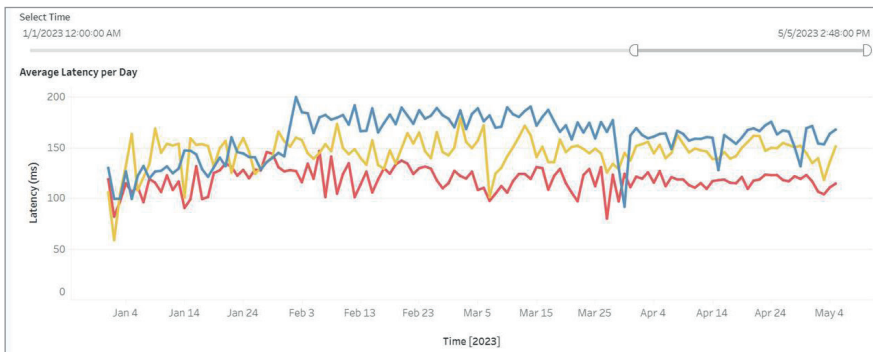


Рис. 3.36. Графік затримок після внесення змін в маршрут проходження трафіка

Ще однією постійною проблемою у мережах мобільного зв'язку є перевантаження ВОЛЗ та забезпечення достатньої ємності. Дієвим способом «наросити» ємність у волоконно-оптичній лінії зв'язку – організувати LAG.

LAG – Link Aggregation Group – це технологія зв'язку мережевих пристроїв, що дозволяє комбінувати кілька фізичних з'єднань в одну віртуальну логічну лінію зв'язку, що, власне, і забезпечує

збільшення пропускної здатності, забезпечує відмовостійкість та зменшує час простою мережі. Для організації LAG варто уточнити, чи є для цього всі необхідні ресурси. Спершу потрібно дізнатись, чи є в наявності вільні оптичні волокна, паралельні необхідному маршруту. Слід пам'ятати про затримку при плануванні маршруту, щоб не виникла ситуація як у прикладі, розглянутому вище, пов'язаному із затримками на мережі. Наступним кроком буде пошук вільного порту на конкретному сервісному роутері для включення фізичного каналу. Після отримання дозволу на використання певних портів, можна зайнятись безпосередньо організацією LAG, що дозволить збільшити ємність каналу, як мінімум – у два рази.

Якщо мережа у певному регіоні достатньо розвинута, практикується поділ мережевих кілець, що дозволить розділити трафік, тим самим зменшивши навантаження на плечі зокрема, як у прикладі нижче.

Необхідно поділити кільце, як показано на рис. 3.37, у зв'язку з тим, що сумарний трафік – 10,6Gbps з 20-ти максимальних.

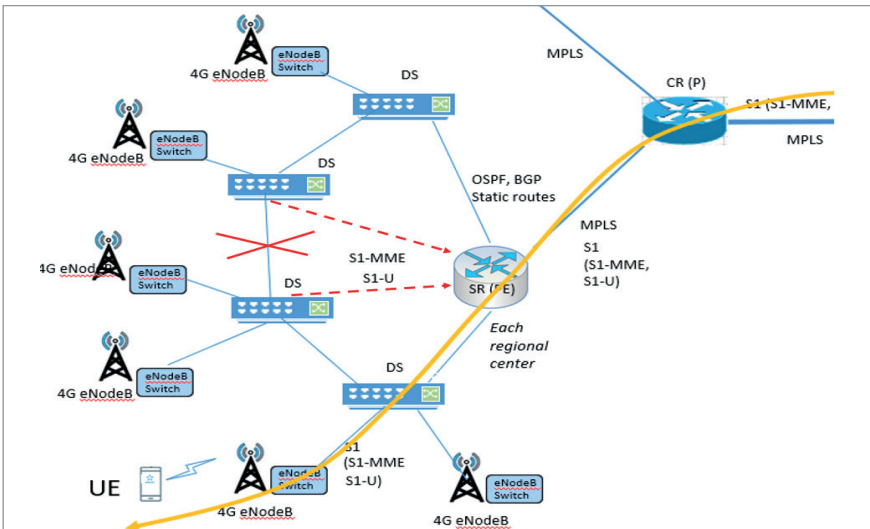


Рис. 3.37. Топологія перевантаженого кільця

Оцінивши навантаження на кожен елемент кільця, зроблено висновок, що найкращий варіант поділу – поділити кільце наполовину, таким чином розділивши трафік на два кільця та організу-

вати включення окремими оптичними волокнами, як показано на рис. 3.37 червоною лінією.

Розгортання 5G в Україні стало можливим завдяки модернізації транспортних мереж та радіорелейного зв'язку операторів мобільного зв'язку. Оператори, такі як Київстар, Vodafone Україна та Lifecell, суттєво вдосконалили свої оптичні транспортні мережі, що забезпечує достатню пропускну здатність і низькі затримки для підтримки 5G-сервісів. Радіорелейний зв'язок також зазнав модернізації, що дозволяє забезпечити необхідну пропускну здатність і надійність. Використання сучасних волоконно-оптичних ліній зв'язку та впровадження таких технологій, як Carrier Aggregation, сприяють підвищенню швидкості передачі даних. Українські оператори також активно інтегрують хмарні рішення для оптимізації керування мережею, що є важливим компонентом для ефективної роботи 5G. Проведені пілотні проекти підтвердили технічну можливість використання існуючої інфраструктури для 5G, включаючи тестування швидкості, надійності та низької затримки зв'язку.

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПЛАНУВАННЯ ATOLL З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

### 4.1. Моніторинг та аналіз трафіка мереж мобільного зв'язку: виклики та перспективи розвитку комунікаційної інфраструктури під час війни в Україні

Моніторинг трафіка дозволяє виявляти проблеми в мережі, такі як перевантаження та висока затримка, і приймати необхідні заходи для їх вирішення. Наприклад, якщо моніторинг трафіка показує велику кількість запитів на певний ресурс, то можна вжити заходів для розподілу навантаження та забезпечення швидкого доступу до ресурсу для всіх користувачів.

Оператори мобільного зв'язку зазвичай використовують програмне забезпечення виробника обладнання або ж підключають власне програмне забезпечення до системи управління та моніторингу конкретного обладнання (рис. 4.1).

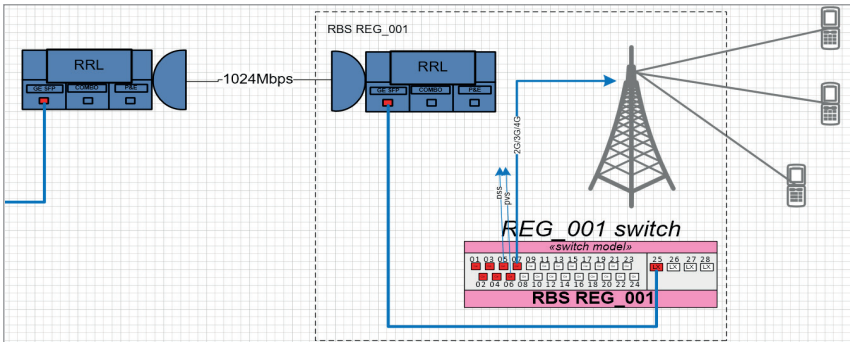


Рис. 4.1. Схема організації зв'язку на базовій станції

Дані збираються та формуються у вигляді таблиць (рис. 4.2), де у першій колонці вказано час, за який збирались дані. Наступні колонки відповідають окремим антенам для uplink та downlink каналу. Позначення A1, B1 та C1 відповідають конкретному сектору антени, бо оператори зазвичай для технологій 2G-4G використовують трьохсекторні антени з діаграмою направленості 120 градусів.

TIME	UPLINK				DOWNLINK		
	GP0825A1	GP0825B1	GP0825C1	GP0825M1	LP0825A1	LP0825B1	LP0825C1
02.05.2023 00:00	135	53	15	43	2891	5346	1091
02.05.2023 01:00	17	581	5	6	976	2391	712
02.05.2023 02:00	6	674	80	119	157	1103	552
02.05.2023 03:00	1	168	40	2	653	914	973
02.05.2023 04:00	1	64	13	7	118	999	625
02.05.2023 05:00	3	36	70	5	577	1863	931
02.05.2023 06:00	34	34	136	12	452	1291	1297
02.05.2023 07:00	281	257	412	21	2109	2584	1310
02.05.2023 08:00	178	257	451	29	2494	3287	1634
02.05.2023 09:00	826	169	427	172	3245	4101	2844
02.05.2023 10:00	466	488	569	205	4702	5390	4189
02.05.2023 11:00	632	364	518	255	3851	4270	2636
02.05.2023 12:00	659	378	840	298	8875	5789	2346
02.05.2023 13:00	794	496	471	202	6125	5572	3189
02.05.2023 14:00	395	294	503	269	3677	4113	3073
02.05.2023 15:00	538	282	444	255	5926	5493	3666
02.05.2023 16:00	461	229	352	290	3966	4670	3574
02.05.2023 17:00	462	491	374	106	3816	4520	3168
02.05.2023 18:00	473	390	201	67	2339	4984	2416
02.05.2023 19:00	252	464	358	100	2120	6219	3163
02.05.2023 20:00	404	584	511	87	2623	5611	2776
02.05.2023 21:00	288	433	528	314	2888	7032	1905

Рис. 4.2. Таблиця завантаженості базової станції

Отримавши дані з системи керування та моніторингу обладнання, зручніше відобразити результати у вигляді графіку, щоб оцінити піки зростання трафіка та вжити заходів щодо оптимізації навантаження. Таким чином, провівши аналіз даного графіку можна оцінити територію кожного з секторів антени, в якому навантаження є більшим, та запланувати пошук місця для будівництва додаткової базової станції. Це дозволить розвантажити дану базову станцію та забезпечити краще покриття та більшу ємність для конкретної території.

Вертикальна вісь графіка відповідає за кількість трафіка, що вказується у мегабайтах. Горизонтальна вісь вказує на час вибірки, що становить одну годину.

Для побудови графіка необхідно спершу вибрати конкретну базову станцію. В нашому випадку це BS-1. Трафік розділено на технології – для кожної технології (2G, 3G, 4G) окрема вкладка. На рис. 4.3 показано трафік 4G мережі. При виборі виведення 3G трафіка, додаються деякі налаштування.

Вертикальна вісь графіка відповідає за кількість трафіка, що вказується у мегабайтах. Горизонтальна вісь вказує на час вибірки, що становить одну годину.

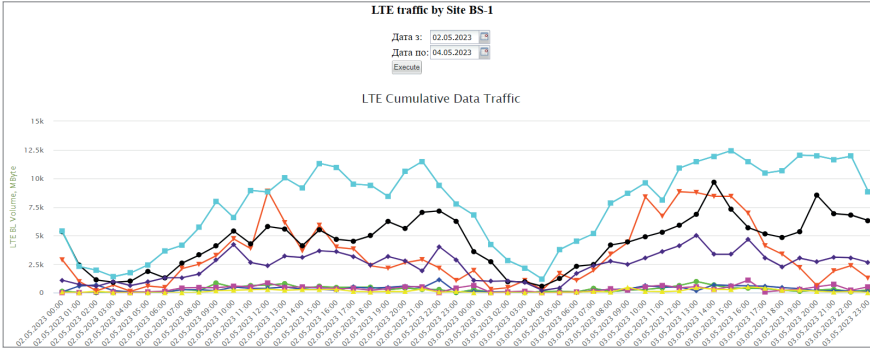


Рис. 4.3. Графік навантаження базової станції 4G трафіком

Для побудови графіка необхідно спершу вибрати конкретну базову станцію. У нашому випадку це BS-1. Трафік розділено на технології – для кожної технології (2G, 3G, 4G) окрема вкладка. На рис. 4.4 показано трафік 3G мережі. При виборі виведення 4G трафіка, додаються деякі налаштування (рис. 4.5).

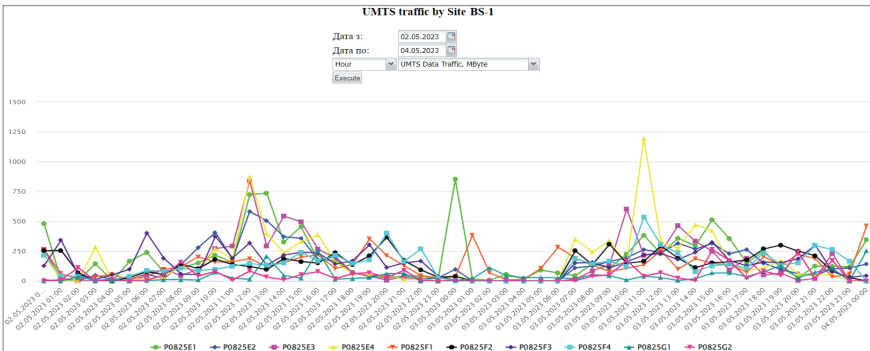


Рис. 4.4. Графік навантаження базової станції 3G трафіком

У вкладці дозволено змінювати час вибірки (15 хв, 1 година, та 1 доба). Також можна виводити значення навантаження як в мегабайтах, так і в ерлангах (рис. 4.5).

The screenshot shows two panels of the software interface. The left panel shows the "Day" dropdown menu expanded, with options for "15 Minutes", "Hour", and "Day". The right panel shows the "UMTS Data Traffic, MByte" dropdown menu expanded, with options for "UMTS Voice Traffic, Erl" and "UMTS Data Traffic, MByte". Both panels include date filters and an "Execute" button.

Рис. 4.5. Вибір параметрів виведення інформації



Принцип побудови графіка для технології 2G практично не відрізняється від принципу побудови технології 3G (рис. 4.6).

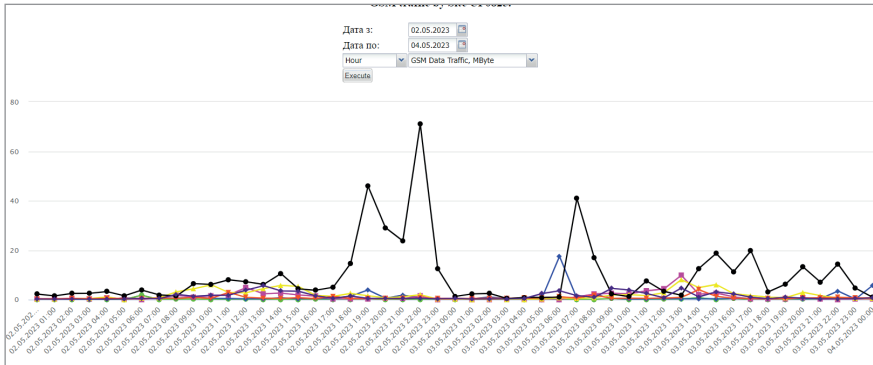


Рис. 4.6. Графік навантаження базової станції 2G трафіком

На площадці, де розміщена базова станція, знаходиться не тільки обладнання, що стосується передавачів/приймачів 2G-4G сигналу. Туди входять системи забезпечення живлення, кондиціонування та безпеки. Також зазвичай на базовій станції розміщують комутатор, що агрегує весь трафік з антен різних технологій в один фізичний канал, що дає змогу виконати включення базової станції в мережу, для прикладу, одним оптичним кабелем (двома волокнами ВОЛЗ) або ж однією радіорелейною лінією.

Оцінивши навантаження однієї базової станції, можна орієнтовно зобразити частки трафіка, що генеруються різними технологіями (рис. 4.7).

Для того, щоб переглянути навантаження з усіх антен та усіх технологій однієї базової станції, можна переглянути графік навантаження мережі на вихідному порті комутатора (рис. 4.8).

На графіку (рис. 4.8) прослідковується чітка періодичність навантаження, що зумовлена використанням мережі мобільного зв'язку в різний час доби. Проте існують фактори, що впливають на мережу довгостроково, кардинально перерозподіляючи навантаження між РРЛ. Найбільш показовими факторами, що вплинули на завантаження мережі в Україні, є:

- пандемія COVID-19 (віддалена робота);
- війна в Україні;

- віялові відключення електроенергії унаслідок пошкодження енергоінфраструктури України.

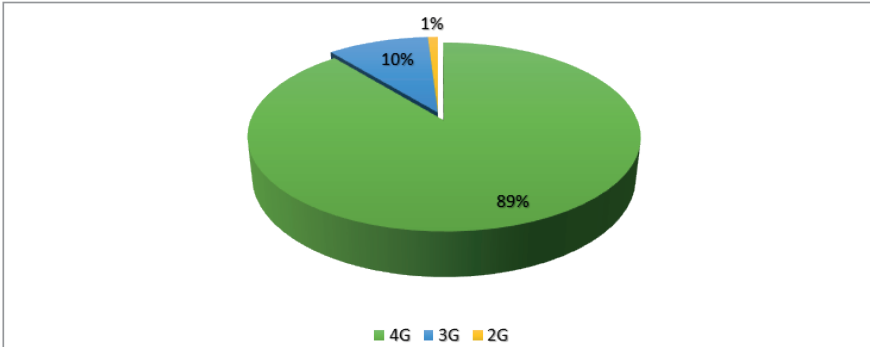


Рис. 4.7. Діаграма розподілення мобільного трафіка по технологіям зв'язку

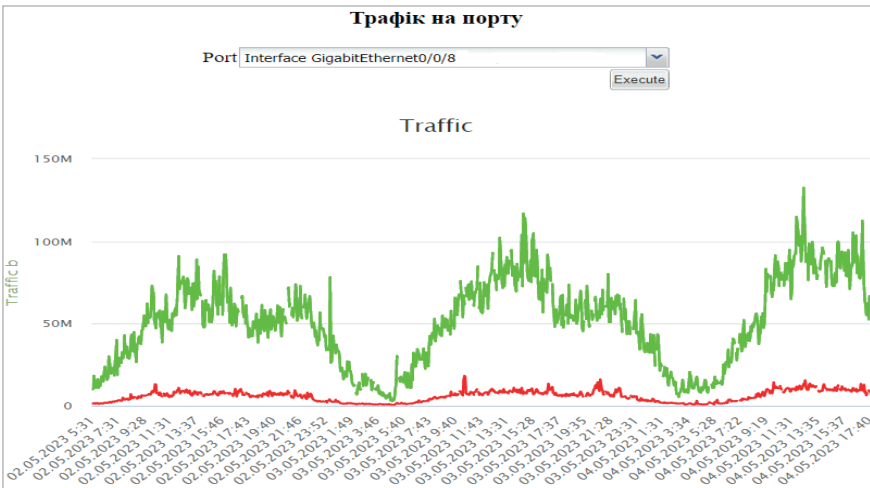


Рис. 4.8. Графік навантаження базової станції на порту комутатора

Короткостроковими змінами, окрім часу доби, можна вважати:

- опади (дощ, сніг, град);
- температура повітря;
- сильний вітер (коливання радіовежі з антенами);
- туман;
- повінь.

Статистика навантаження РРЛ може показати історію конкретного регіону. Для прикладу, по падінню трафіка до нуля можна оцінити чи РРЛ працювала та чи було живлення на базових станціях.

Розглянемо зміни трафіка за 2022 рік в Україні. Вибірка середнього значення трафіка виконується раз в тиждень протягом всього 2022 року. Для графіка навантаження РРЛ в центральній Україні вибірка проводилась до початку травня 2023 року. По вертикальній осі зображено середнє навантаження РРЛ, по горизонтальній – дати з інтервалом в тиждень.

### ***Навантаження РРЛ в центральній Україні***

На рис. 4.9 відображено графік навантаження РРЛ, що розташовується в Київській області. Поглянемо у які періоди ця лінія була активною, або ж, можливо, була без живлення. Бачимо різкий скачок трафіка на початку війни, що пояснюється великою кількістю дзвінків та інтернет-трафіка, оскільки люди моніторили кожну годину ситуацію в Україні [32].



Рис. 4.9. Графік навантаження РРЛ у Київської області

Після початку війни трафік опустився, проте не досяг такого низького рівня, як до початку війни. Даний ефект можна пояснити тим, що велика кількість людей мігрували на захід саме через Київську область. Густота населення на території Київської області, ймовірно, стала вищою.

### ***Навантаження РРЛ на заході України***

Поглянемо на графік зміни навантаження у Львівській області (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Графік навантаження РРЛ у Львівській області

У період початку війни, аналогічно графіка навантаження попередньої РРЛ, спостерігається зростання трафіка. Навантаження швидко приходить у норму з дещо більшим середнім значенням. Наприкінці року трафік знову зростає, у зв'язку з тим, що виялові відключення електроенергії обумовлюють перехід на використання мобільного трафіка. Домашній інтернет у випадку знеструмлення будинку перестав працювати. Також при відключенні електроенергії на базовій станції зв'язок суттєво погіршується задля економії заряду акумуляторів, встановлених для живлення обладнання.

### **Навантаження РРЛ на Львівському залізничному вокзалі**

На графіку навантаження РРЛ на залізничному вокзалі у м. Львів (рис. 4.11) спостерігається зростання трафіка на початку війни, та, на відміну від вище розглянутих базових станцій, спадання трафіка не відбулось. Дійсно, на даний час Львівський залізничний вокзал залишається величезним скупченням мобільних користувачів.

### **Навантаження РРЛ на окупованій території**

На рис. 4.12 зображено графік, що показує навантаження протягом всього 2022 року базової станції, що знаходиться на півдні, на тимчасово окупованій території України, Херсонська область.

Спостерігаємо суттєве зростання трафіка на період початку війни, в кінці березня РРЛ була тимчасово відключена від електроживлення. Працівникам знадобилось трохи часу для вирішення проблеми з відновленням електроживлення. Так РРЛ пропрацювала до кінця червня 2022 року, після чого окупанти частково зруйнували базову станцію та відключили електроживлення, відповідно доступ до базових станцій на даній території був неможливий. З 2023 року дана РРЛ й досі не працює.



Рис. 4.11. Графік навантаження РРЛ на Львівському залізничному вокзалі

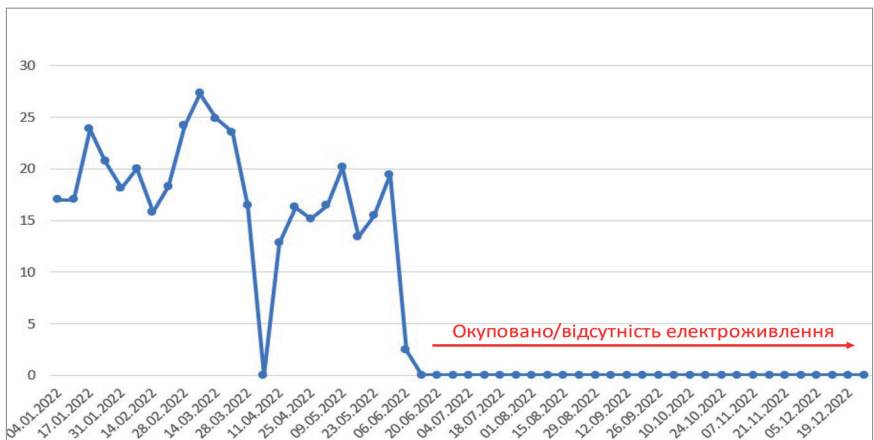


Рис. 4.12. Графік навантаження РРЛ на окупованій території України

Оскільки врахувати так багато факторів, що впливають на навантаження РРЛ, інженеру з планування мобільної мережі є надзвичайно

складно, необхідний інструмент, що дозволяє прогнозувати трафік. Модернізація РРЛ заздалегідь дозволить уникнути перевантаження РРЛ та, відповідно, втрати трафіка і погіршення зв'язку.

---

## **4.2. Розвиток системи планування Atoll з використанням оптимізованої LSTM моделі нейронної мережі для прогнозування навантаження на інфраструктуру оператора мобільного зв'язку**

Попит на трафік, серед іншого, є функцією поведінки клієнтів і моделей поселення, землекористування та часу доби, тому необхідне фіксування характеристик трафіка як у часовому, так і в просторовому вимірах. Крім того, інші параметри, такі як кількість користувачів і пропускна здатність даних, за своєю суттю містять інформацію, пов'язану з трафіком, що вимагає багатоваріантного підходу для розуміння попиту на трафік. Усвідомлюючи багатовимірну та багатоваріантну природу трафіка мобільних даних, використаємо модель прогнозування трафіка даних мережі довготривалої короткочасної пам'яті на основі LSTM архітектури. Модель побудовано на даних мобільного трафіка, зібраних мережею українського оператора мобільного зв'язку. Результати підтверджують, що запропонована модель перевершує свої однофакторні аналоги в середньоквадратичній помилці (RMSE) і середній абсолютній відсотковій помилці (MAPE).

Трафік мобільних даних демонструє різні властивості як у часовій, так і в просторовій областях. Тренд і сезонність використовуються для демонстрації часових властивостей даних часових рядів. Тенденція показує довгострокове збільшення або зменшення даних, тоді як сезонність – це повторювана закономірність із фіксованим періодом, наприклад: щодня, щотижня та щороку. На рис. 4.13 показано зразок трафіка даних downlink лінії зв'язку, виміряний у мегабайтах, від трьох секторів 4G базової станції (Sector\_1, Sector\_2 і Sector\_3). Ми спостерігаємо, що навіть, якщо середньодобовий трафік відрізняється в різні дні, у даних простежується щоденна циклічність.

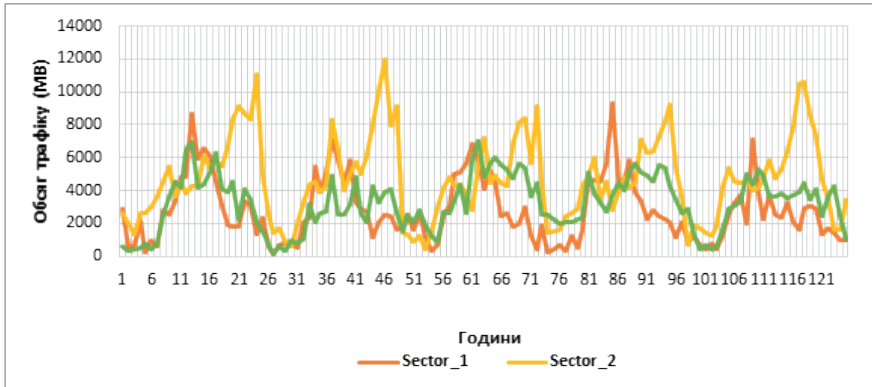


Рис. 4.13. Шаблон трафіка даних для трьох секторів базової станції

На рис. 4.13 ми спостерігаємо різницю в попиті на трафік даних у двох місяцях, що мотивує необхідність додаткового дослідження моделі трафіка в просторовому вимірі. Оскільки мобільні користувачі постійно переміщуються в межах даної стільникової мережі, шаблон трафіка на сусідніх базових станціях корелюється або доповнюється таким чином, що розвиток як у просторових, так і в часових вимірах надасть кращу інформацію для операторів зв'язку. Прогноз просторово-часового трафіка даних включає в себе різну поведінку користувача, таку як мобільність і поведінку мережі, таку як кількість хенд-оверів у мережі.

Для просторового аналізу можна використовувати сітковий або кластерний підхід. У першому підході дана зона обслуговування розбивається на сітки, а eNodeB (базові станції), які потрапляють в одну комірку сітки, розглядаються як одне ціле. Однак через нерівномірний розподіл eNodeB важко сформулювати моделі для великих областей із сітками дрібної гранулярності.

Підхід до кластеризації є ще одним варіантом об'єднання всіх eNodeB. У цьому підході eNodeB з подібними шаблонами навантаження трафіка групуються разом, і ці eNodeB в одному кластері мають подібні характеристики. eNodeB можна кластеризувати на основі географічного розташування, що також називається просторовою кластеризацією, або тимчасовою поведінки. У просторовій кластеризації припускається, що сусідні eNodeB демонструють подібні часові вла-

стивості. У кластеризації на основі часу кластеризація виконується на основі поведінки в часі незалежно від географічного розташування. Розгляд більш ніж одного eNodeB у кластеризації часових рядів включає просторову інформацію про трафік даних. Після кластеризації базових станцій розробляється модель прогнозування трафіка даних для кожного рівня кластера.

Кластеризація динамічного набору даних відрізняється від статичних даних, оскільки перші змінюються з часом. Для кластеризації даних часових рядів використовуються різні підходи, такі як ієрархічна кластеризація, кластеризація K-Means і Fuzzy C Means Clustering. Кожен метод має свої переваги та недоліки. Серед цих методів K-Means Clustering використовується в кількох роботах для швидкої конвергенції навіть для великої кількості наборів даних. У цій роботі кластеризація K-Means використовується для групування eNodeB відповідно до щоденного обсягу трафіка даних, і на основі кластеризації K-Means для набору даних отримано чотири окремі кластери. Серед різних методів кластеризації вибрано кластеризацію K-Means. Метод ліктя (Elbow Method) та оцінка силуету (Silhouette Score) використовуються для визначення оптимальної кількості кластерів у кластеризації K-Means та для оцінки ефективності техніки кластеризації відповідно. Для наших даних вибрано оптимальну кількість кластерів, що дорівнює чотирьом, і сайти згруповано в чотири кластери, як показано на рис. 4.14. Ми звернули увагу на те, як комірки з різних географічних областей групуються в один кластер через схожість у моделях їх трафіка. Крім того, деякі базові станції, знайдені в тих самих місцях, групуються в різні кластери.

Машинне та глибоке навчання може сприяти точному прогнозуванню пропускну здатності та класифікувати попередні дослідження, які використовують моделі навчання, такі як випадковий ліс (RF), опорна векторна регресія (SVR) і довготривала короткочасна пам'ять (LSTM). У цій роботі пропонується система прогнозування пропускну здатності мережі з використанням LSTM з методом уваги. Дана система прогнозування складається з трьох процесів: збір, навчання та оцінка. Дані про пропускну здатність



розділені на навчальні та тестові набори. Під час навчання ми використовуємо LSTM, використовуючи метод уваги як модель прогнозування, яка наближає функцію відображення попередніх зразків до майбутньої пропускної здатності. Щоб оцінити моделі навчання, ми обчислюємо середньоквадратичну помилку (RMSE) між справжніми значеннями пропускної здатності та прогнозованими значеннями в тестовому наборі. Результати прогнозування показують, що наша система прогнозування досягає нижчого RMSE у трасах пропускної здатності порівняно з існуючими методами без механізму уваги.

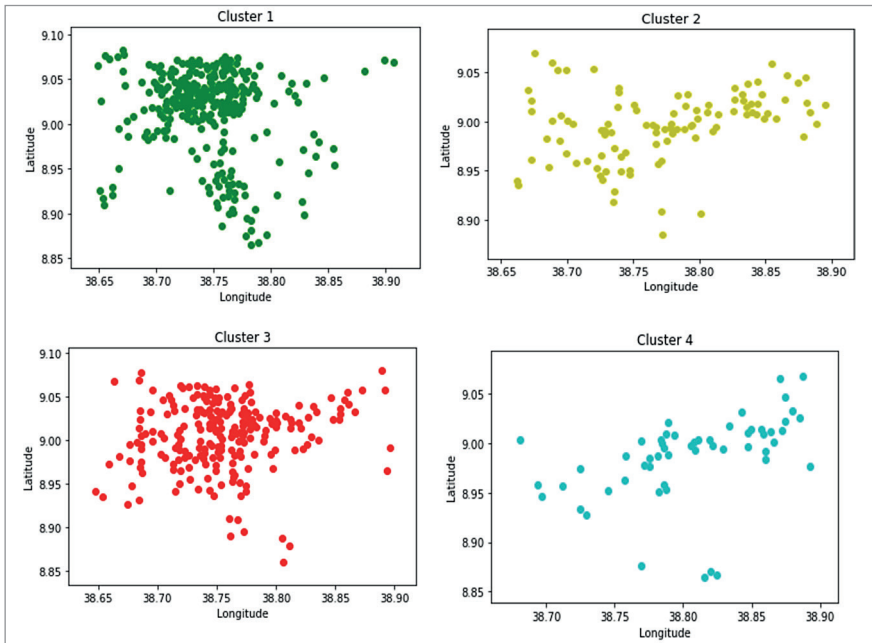


Рис. 4.14. Географічний розподіл 4G eNodeB у кожному кластері

Ми позначаємо дані про обсяг трафіка як  $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_T\}$ , який є серією невід’ємних значень для часових інтервалів  $T = \{1, 2, 3, \dots, T\}$ . Щоб використовувати дані для навчання та оцінювання моделі, ми визначаємо навчальний набір як  $X = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_k\}$ , де  $k \in T$ , а тестовий набір як  $Z = \{y_{k+1}, y_{k+2}, y_{k+3}, \dots, y_T\}$ . Метою задачі передбачення є оцінка  $Z$  і мінімізація помилки передбачення (рис. 4.15).

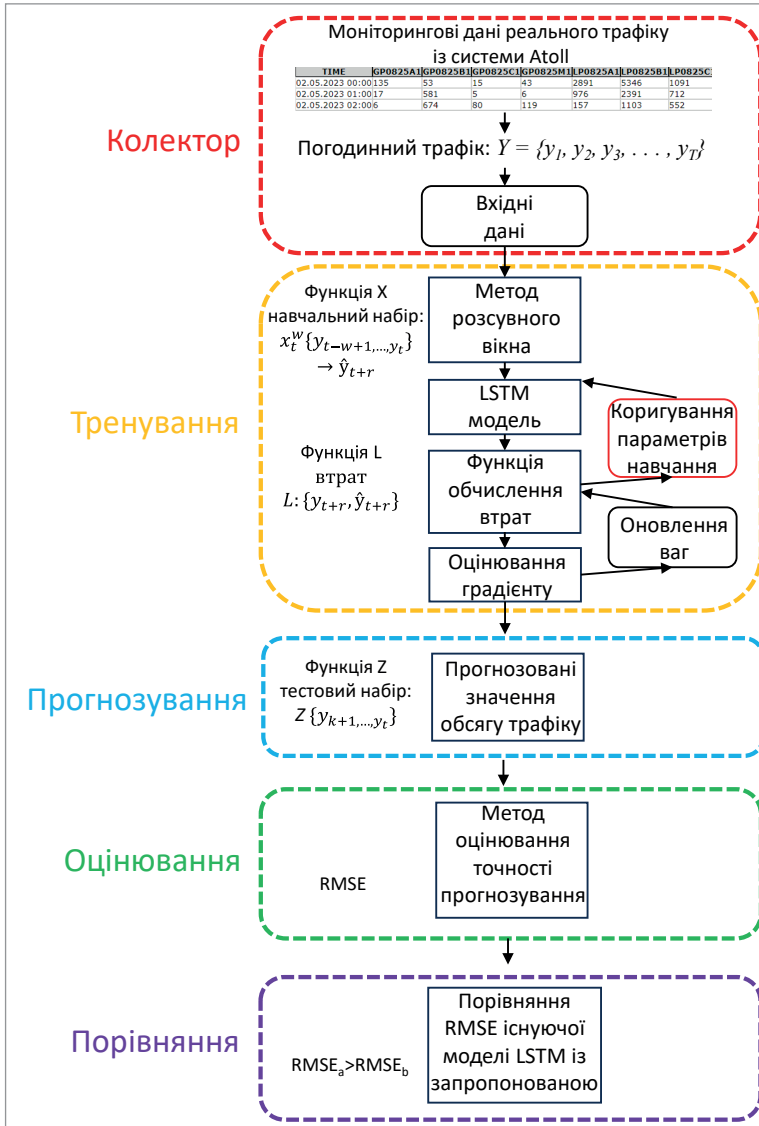


Рис. 4.15. Удосконалена система планування Atoll з використанням оптимізованої LSTM моделі нейронної мережі для прогнозування навантаження на мережі [32]

Систему прогнозування розроблено для обробки послідовних даних шляхом подачі вихідних даних попереднього рівня як вхідних даних для наступного рівня, що дозволяє мережі фіксувати за-

лежність послідовних даних. LSTM – це тип мережі RNN, яка була змодельована для вирішення проблем короточасних залежностей, а також проблем розриву та зникнення градієнта. Мережа LSTM має три шлюзи (Forget gate  $f_t$ , Input gate  $i_t$  і Output gate  $o_t$ ), які вирішують, яку інформацію додати або видалити зі стану клітинки, а стан клітинки,  $C_t$ , пам'ять зберігає бажану інформацію. Математичний вираз для мережі LSTM у момент часу  $t$  описується наступним чином:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot X_t + U_f \cdot h_{(t-1)} + b_f) \quad (4.1)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot X_t + U_i \cdot h_{(t-1)} + b_i) \quad (4.2)$$

$$S_t = \tanh(W_c \cdot X_t + U_c \cdot h_{(t-1)} + b_c) \quad (4.3)$$

$$C_t = i_t \cdot S_t + f_t \cdot C_{(t-1)} \quad (4.4)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot X_t + U_o \cdot h_{(t-1)} + V_o \cdot C_t + b_o) \quad (4.5)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (4.6)$$

де  $\tanh(\cdot)$  і  $\sigma$  є функціями активації, тоді як  $i_t$ ,  $f_t$  і  $o_t$  представляють значення вхідного вентиля, забутого вентиля та значення вихідного вентиля в момент часу  $t$ , тоді як  $b_f$ ,  $b_i$ ,  $b_c$  і  $b_o$  є векторами зсуву для вхідного вентиля, забутого вентиля, стану комірки та вихідного вентиля відповідно.  $X_t$  є вхідним вектором комірки пам'яті в момент часу  $t$ , тоді як параметри  $W_f$ ,  $W_i$ ,  $W_c$ ,  $W_o$ ,  $U_f$ ,  $U_i$ ,  $U_c$ ,  $U_o$  і  $V_o$  є ваговими матрицями для вентилів і стану комірки (рис. 4.16).

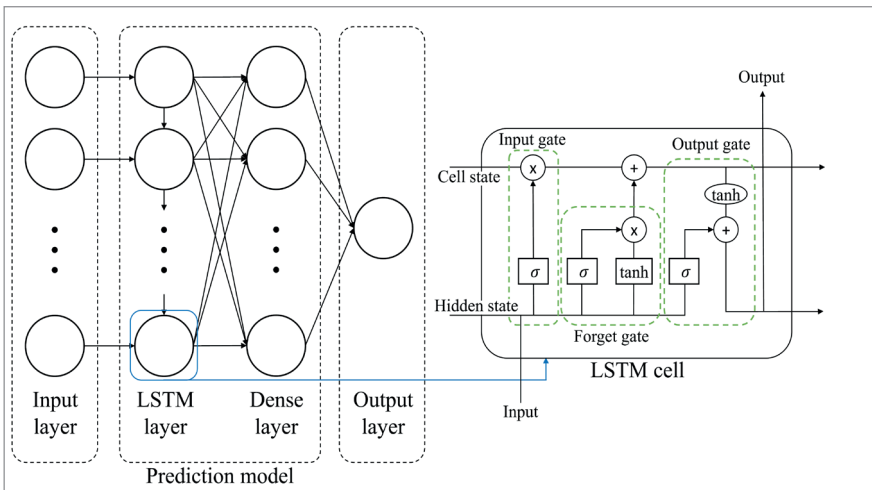


Рис. 4.16. LSTM нейронна модель мережі

Загальними показниками оцінки продуктивності для регресійних моделей є середньоквадратична помилка (RMSE) і середня абсолютна відсоткова помилка (MAPE). У цій роботі RMSE та MAPE використовуються як показники оцінки, а формула для цих показників така:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.7)$$

$$MAPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|} \quad (4.8)$$

$$nRMSE(\%) = \frac{100 \cdot RMSE}{\max(Z)} \quad (4.9)$$

$$nRMSE(\%)_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n nRMSE(\%)}{n} \quad (4.10)$$

де  $\hat{y}_i$  та  $y_i$  відповідають фактичним і прогнозованим значенням, а  $n$  є кількістю передбачених випадків.

### 4.3. Прогнозування обсягу мобільного трафіка для 5G-LTE із використанням відомої LSTM моделі

Ми описали загальний алгоритм прогнозування мобільного трафіка LTE в Україні за допомогою LSTM-моделі, який базується на наступних кроках, які необхідно виконати:

- Крок 1:** Зібрати та підготувати набір даних обсягу трафіка, які будуть використані для навчання моделі. Ми використали власний набір даних, який містить реальні погодинні дані трафіка LTE мережі з жовтня 2022 року по квітень 2023 року, що складається з 4369 годин спостережень.
- Крок 2:** Розділимо набір даних на навчальну та тестову вибірки. Для навчання ми використовуємо 90 % послідовностей набору даних, а для тестування – останні 10 %.
- Крок 3:** Провести попередню обробку даних, яка може включати такі етапи, як нормалізація, стандартизація та заповнення відсутніх даних.

Для кращого вирівнювання та запобігання розбіжностям у навчанні ми стандартизували навчальні дані, щоб вони мали нульове

середнє значення та одиничну дисперсію. Для прогнозування майбутніх значень часового ряду змінні відгуку повинні бути визначені як навчальні послідовності зі значеннями, зсунутими на один часовий крок. Іншими словами, модель LSTM буде навчена прогнозувати значення наступного часового кроку на основі поточного часового кроку. З іншого боку, предиктори повинні бути визначені як навчальні послідовності без кінцевого часового кроку. Такий підхід дозволяє мережі LSTM вивчати закономірності та взаємозв'язки в даних часових рядів і робити точні прогнози для майбутніх часових кроків.

**Крок 4:** Побудувати LSTM-модель з необхідною кількістю шарів і нейронів, кількістю епох навчання та швидкістю навчання. Відома модель для прогнозування трафіка використовує один шар з 200 прихованими нейронами.

**Крок 5:** Навчимо модель на навчальній вибірці, використовуючи такі параметри навчання, як вирішувач, кількість епох, поріг градієнта, початкова швидкість навчання та спад швидкості навчання.

Згідно відомої моделі ми будемо навчати мережу протягом 250 епох, використовуючи метод оптимізації Адама. У контексті машинного навчання, епоха – це одна ітерація алгоритму навчання, під час якої весь набір даних проходить через нейронну мережу. Щоб запобігти вибуху градієнтів, поріг градієнта рівний 1. Ми також згідно відомої моделі встановили початкову швидкість навчання 0,005 і зменшили швидкість навчання після 125 епох, помноживши її на коефіцієнт 0,2.

**Крок 6:** Тестування моделі на тестовій вибірці та оцінка її точності.

Щоб оцінити точність LSTM-моделі на тестовому наборі даних, ми використали функцію `predictAndUpdateState` для генерації прогнозів трафіка для тестового набору даних. Після отримання прогнозів ми порівнюємо їх з фактичними значеннями за допомогою метрики RMSE (Root Mean Square Error). Якщо значення RMSE низьке, це означає, що модель LSTM добре підходить для прогнозування майбутнього трафіка. Однак, якщо значення RMSE високе, модель може потребувати додаткового налаштування або інших методів для досягнення кращої продуктивності.

**Крок 7:** Оновити стан мережі за допомогою спостережених значень. Оновлення стану мережі за допомогою спостережених значень може мати кілька переваг:

- Покращення точності прогнозів. Використання фактичних значень замість прогнозованих може призвести до більш точних результатів передбачення. Оскільки спостережувані значення є реальними даними, вони можуть дати більш достовірну інформацію про стан системи.
- Коригування помилок. Якщо прогнози мережі виявляються неточними або відхиляються від спостережуваних значень, оновлення стану мережі може допомогти виправити ці помилки. Застосування фактичних даних для корекції стану мережі може поліпшити її прогностичні здібності.
- Адаптація до нових умов. Якщо у вас є доступ до спостережуваних значень часових кроків, оновлення стану мережі за допомогою цих значень може допомогти адаптуватися до змін у системі. Мережа може швидше виявити зміни в даних та змінити свій стан, щоб адекватно реагувати на нові умови.
- Зменшення кумулятивного помилкового впливу. Скидання стану мережі перед новими прогнозами допомагає уникнути кумулятивного помилкового впливу. Це означає, що попередні прогнози не впливають на нові прогнози, що дозволяє зберігати стабільність та точність системи.

Отже, оновлення стану мережі за допомогою спостережуваних значень може поліпшити якість передбачень, коригувати помилки, адаптуватися до нових умов та забезпечувати стабільність мережі.

**Крок 8:** Використовуючи навчену модель LSTM інтегруємо її в систему планування Atoll для підвищення ефективності управління та якості надання послуг користувачів мереж мобільного зв'язку.

Основні параметри відомої LSTM моделі для прогнозування мобільного трафіка:

`numFeatures = 1;`

`numResponses = 1;`

`numHiddenUnits = 200; //к-сть прихованих нейронів`

```

layers = [ ...
    sequenceInputLayer(numFeatures)
    lstmLayer(numHiddenUnits)
    fullyConnectedLayer(numResponses)
    regressionLayer];
options = trainingOptions('adam', ...
    'MaxEpochs',250, ... //к-сть епох навчання
    'GradientThreshold',1, ... //порогове значення градієнта
    'InitialLearnRate',0.005, ... //початкова швидкість навчання
    'LearnRateSchedule','piecewise', ...
    'LearnRateDropPeriod',125, ... //к-сть епох зменшення швидкості
навчання
    'LearnRateDropFactor',0.2, ... //коефіцієнт зменшення швидкості
навчання
    'Verbose',0, ...
    'Plots','training-progress');
    
```

На рис. 4.17 зображено графік зміни RMSE та Loss в процесі навчання відомої LSTM моделі. Час навчання у даній моделі становить 25 секунд.

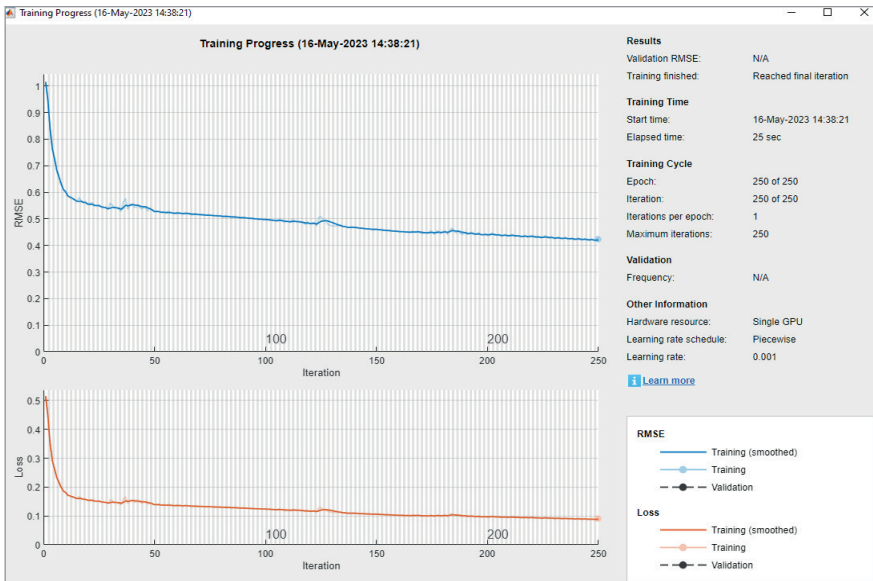


Рис. 4.17. Прогрес навчання моделі LSTM для прогнозування обсягу трафіка LTE мережі на БС-1 (відома модель LSTM)

Моніторинг реального трафіка LTE мережі на БС-1 показано на рис. 4.18 та відповідно побудова навчального часового ряду на основі реальних вимірних значень показано на рис.4.19.

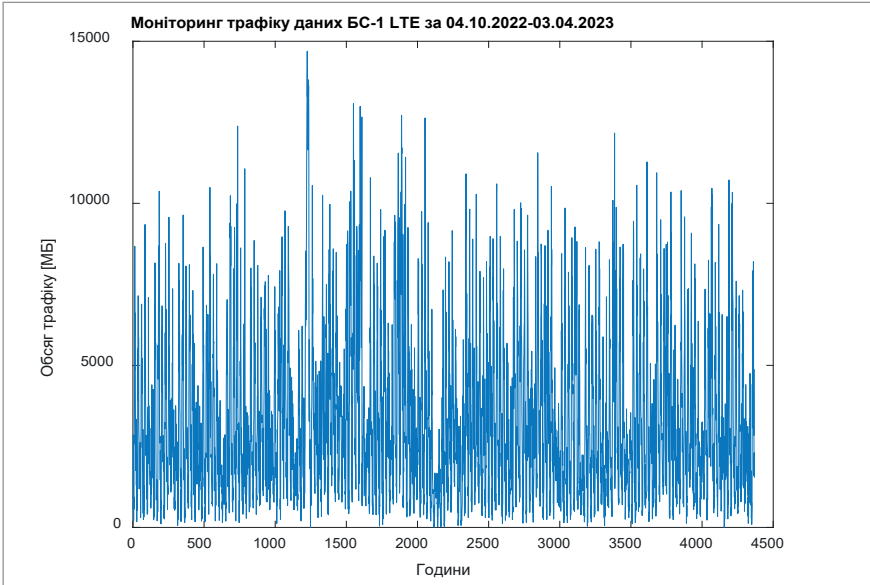


Рис. 4.18. Моніторинг реального трафіка LTE мережі на БС-1

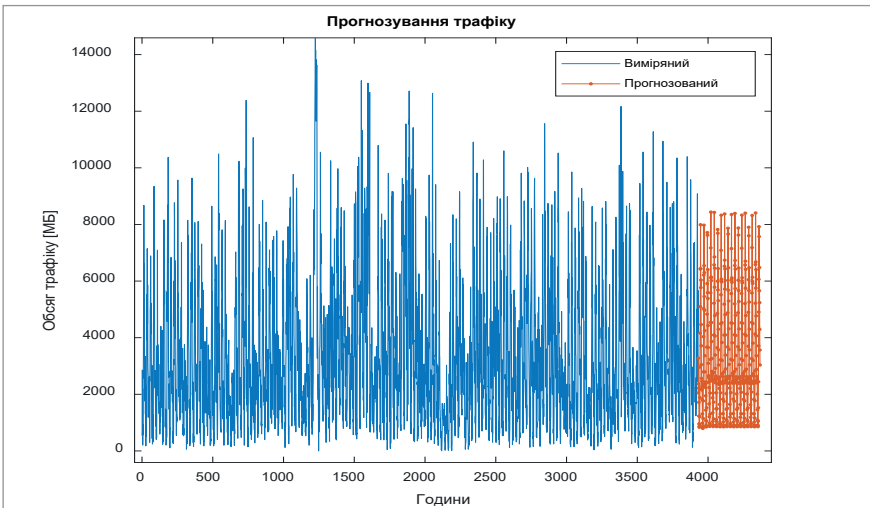


Рис. 4.19. Побудова навчального часового ряду на основі реальних вимірних значень (90 %) з прогнозованими значеннями (10 %) трафіка LTE мережі для БС-1



На графіку нижче (рис. 4.20) можна спостерігати результати експериментів, що дозволяють порівняти прогнозовані значення обсягу трафіку, з реальним вимірним системою Atoll, за критерієм RMSE.

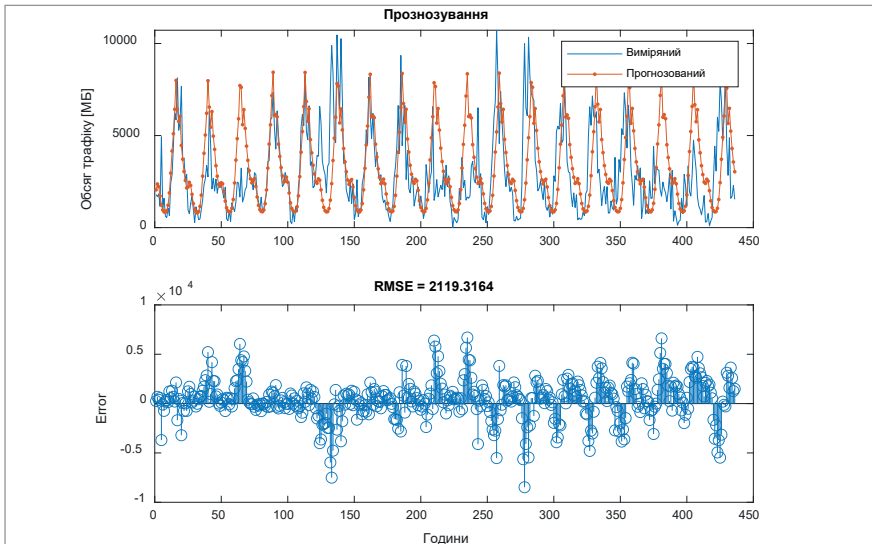


Рис. 4.20. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-1 (відома модель LSTM, експеримент №1)

Рис. 4.21 відображає прогнозування з оновленнями, яке описано в кроці 7. Показник RMSE у прогнозуванні з оновленнями є набагато нижчим, що підтверджує ефективність прогнозу з оновленням стану.

Для оцінки ефективності прогнозування ми провели ще два експерименти з цими ж вхідними даними та відомою нейронною моделлю LSTM, результати прогнозування зображені на рисунках 4.22 – 4.25. На цих графіках можна побачити як передбачувані значення відображаються в порівнянні з фактичними даними, що дозволяє візуально оцінити точність моделі. На основі отриманих результатів ми змогли зробити висновки про ефективність моделі LSTM в контексті нашого завдання. Ця модель показала себе як потужний інструмент для роботи з часовими рядами, демонструючи хороші результати в умовах змінних даних та довгострокових залежностей. У нашому дослідженні було виявлено, що LSTM може бути особливо корисною для задач, де важливо враховувати складні часові закономірності, що є характерним для даних, з якими ми працювали.

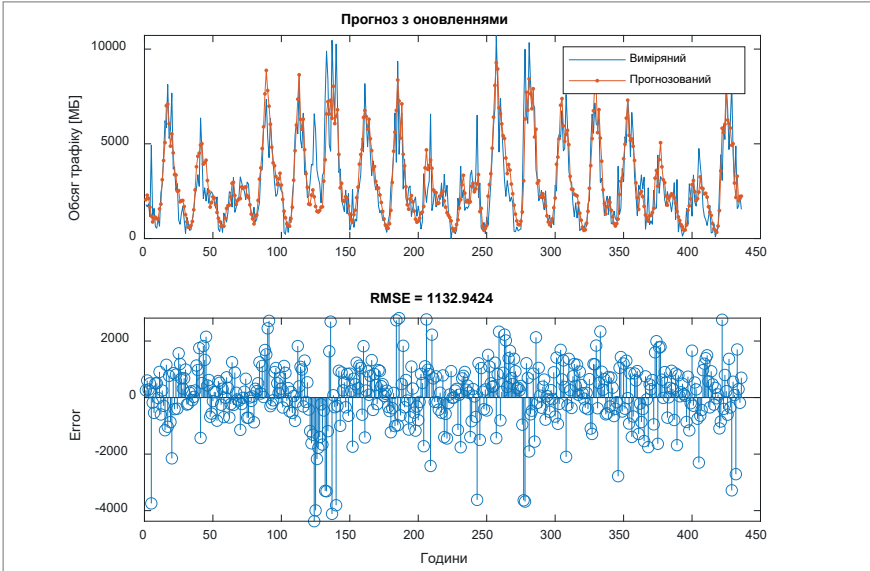


Рис. 4.21. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для БС-1 (відома модель LSTM із оновленням стану, експеримент №1)

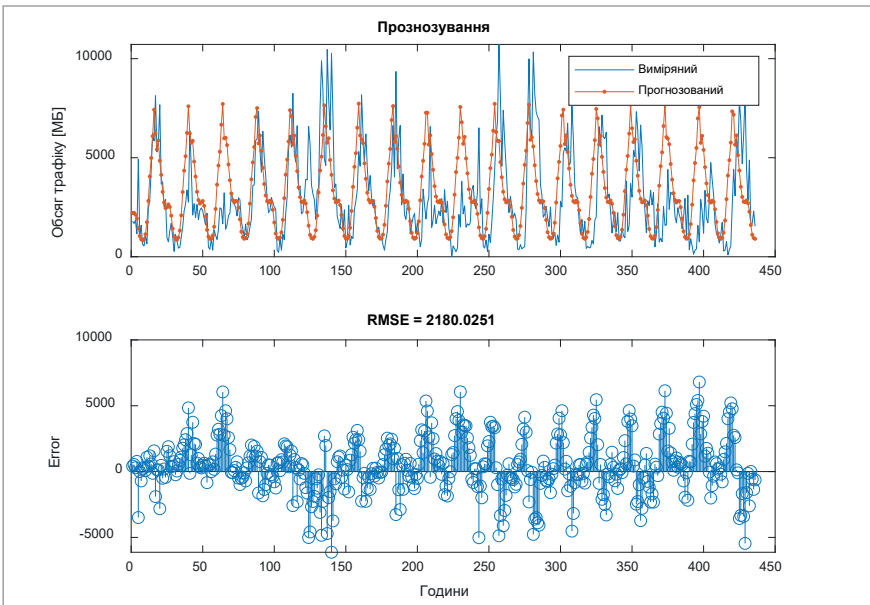


Рис. 4.22. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для БС-1 (відома модель LSTM, експеримент №2)

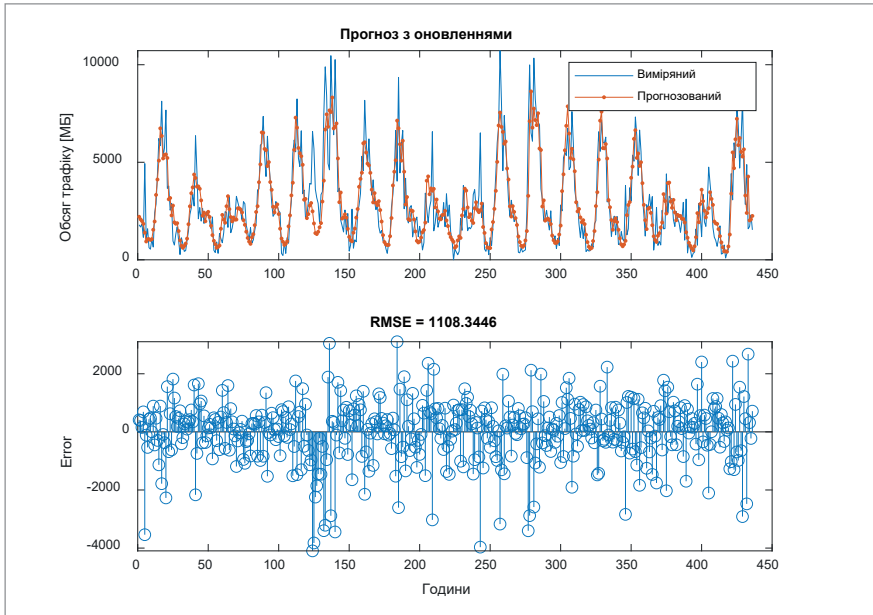


Рис. 4.23. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для БС-1 (відома модель LSTM із оновленням стану, експеримент №2)

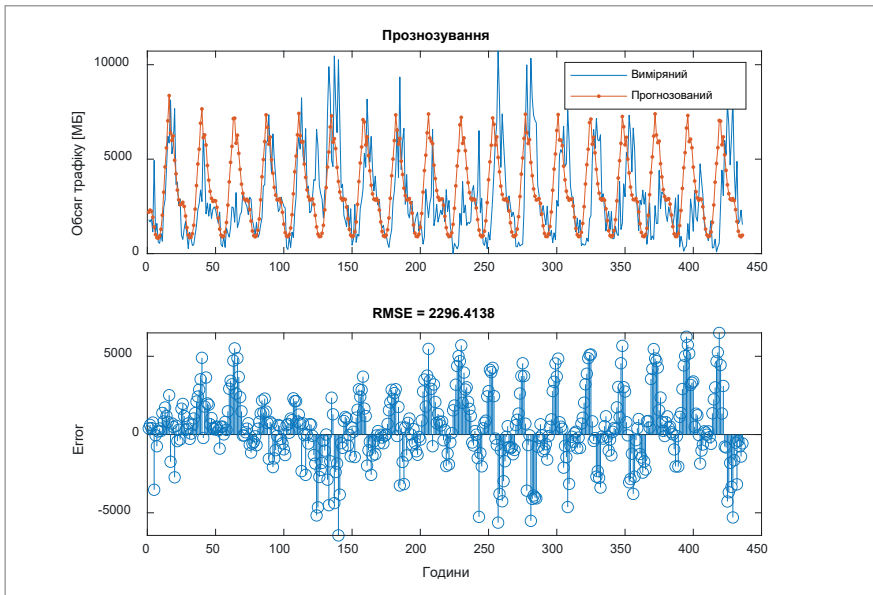


Рис. 4.24. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для БС-1 (відома модель LSTM, експеримент №3)

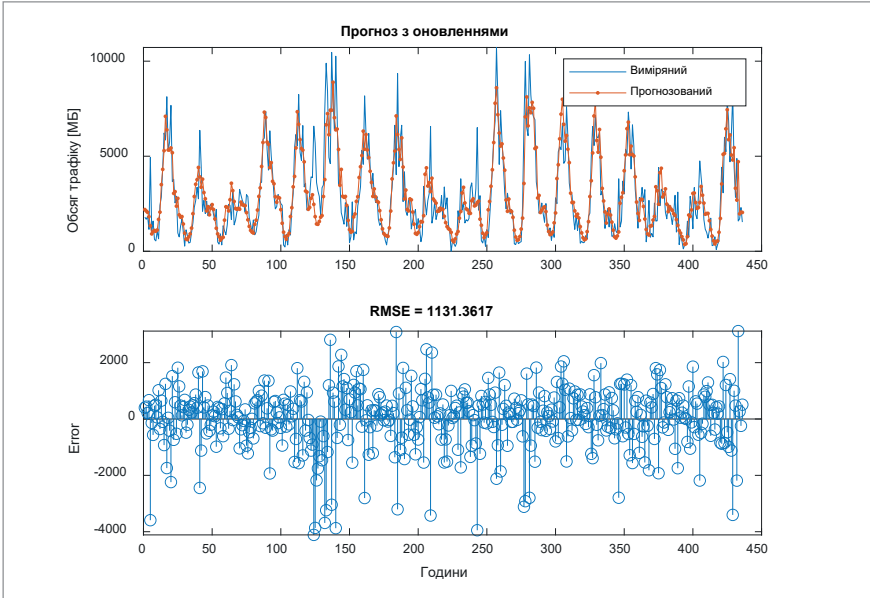


Рис. 4.25. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для BC-1 (відома модель LSTM з оновленням стану, експеримент №3)

Дані, отримані в результаті трьох експериментів відомої LSTM моделі прогнозування трафіка (звичайну та з оновленнями), усереднено та зведено в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

#### Показник RMSE та nRMSE для трьох експериментів

Експеримент 1	LSTM модель	LSTM з оновленнями
RMSE (МБ)	2119	1133
nRMSE (%)	19.26	10.3
<b>Експеримент 2</b>		
RMSE (МБ)	2180	1108
nRMSE (%)	19,81	10,07
<b>Експеримент 3</b>		
RMSE (МБ)	2296	1131
nRMSE (%)	20,87	10,28
nRMSEсепр (%)	19,98	10,22

Для покращення результатів прогнозування будемо підбирати параметри LSTM моделі таким чином, щоб показник RMSE і швидкість прогнозування були якомога меншими.

#### 4.4. Прогнозування обсягу мобільного трафіка для БС-1 LTE із використанням запропонованої оптимізованої LSTM моделі

Для підвищення точності прогнозування та пошуку оптимальних конфігурацій LSTM ми використали метод підбору. Перш за все ми оцінили вплив збільшення кількості епох навчання LSTM моделі для точності прогнозування. Для цього ми замінили 250 епох навчання на 1000. Дійсно, в результаті ми отримали кращий показник RMSE, проте час навчання зріс із 25 секунд до 1 хвилини 31 секунди (рис. 4.26). Графік на рис. 4.26 показує прогнозовані значення обсягу трафіка з реальним трафіком виміряними системою Atoll за критерієм RMSE з кількістю епох 1000.

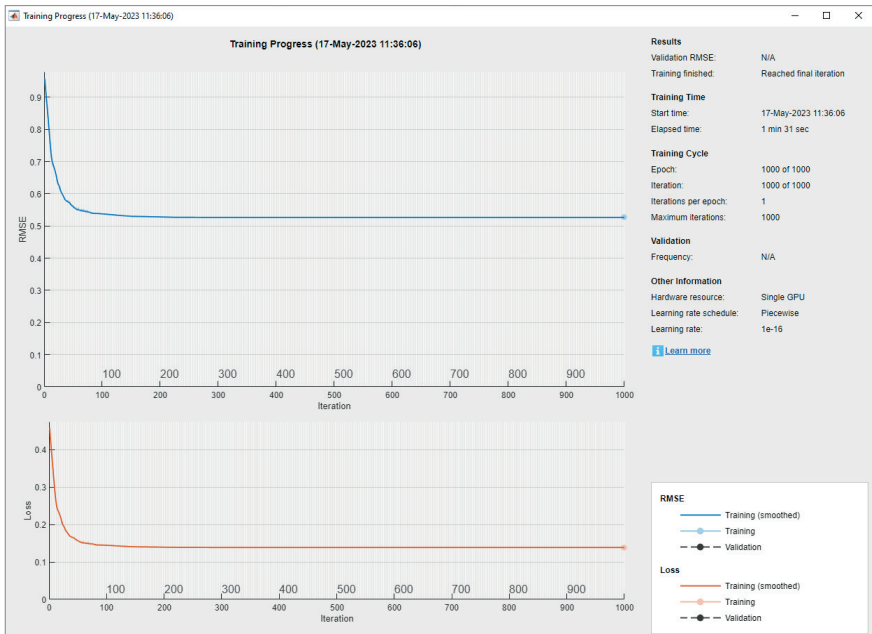


Рис. 4.26. Прогрес навчання моделі LSTM для прогнозування обсягу трафіка LTE мережі на БС-1 (відома модель LSTM із кількістю епох 1000)

Порівняння прогнозованих значень обсягу реального трафіка для БС-1 для відомої моделі LSTM, кількість епох 1000 показано на рис. 4.27 та прогрес навчання моделі LSTM для прогнозування обсягу трафіка LTE мережі на БС-1 показано на рис. 4.28.

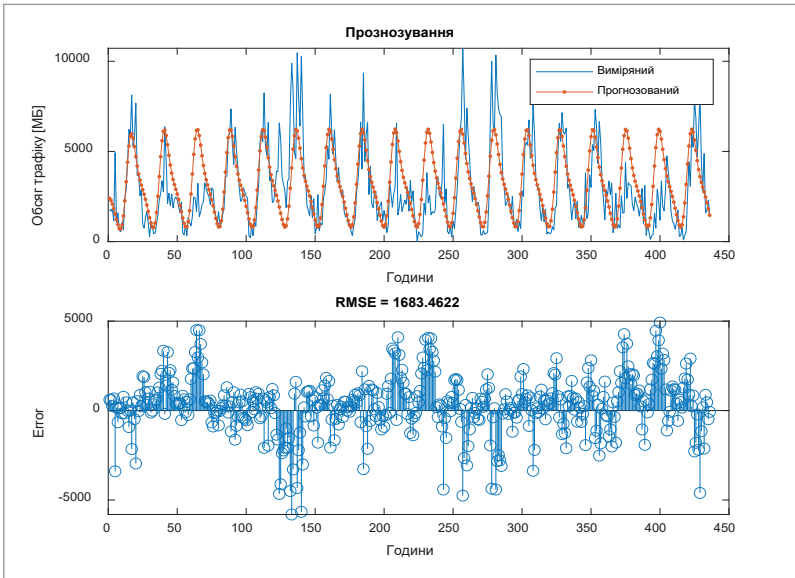


Рис. 4.27. Порівняння прогнозованих значень обсягу реального трафіка для БС-1 (відома модель LSTM, кількість епох 1000)

Ми також дослідили вплив меншої кількості епох на точність прогнозування. Зокрема ми оцінили показник RMSE при використанні 80 епох навчання, що становить 2175, в результаті ми побачили, що показник RMSE зріс, і це вказує на погіршення точності прогнозування обсягу мобільного трафіка (рис. 4.29). Хоча процес навчання зменшився із 25 секунд до 9 секунд. На основі проведених досліджень ми встановили, що оптимальною кількістю епох навчання, при якому не відбувається значного підвищення показника RMSE, що вказує на точність прогнозування трафіка буде 150. Також подібні експерименти були проведені із іншими параметрами (кількість нейронів навчання, початкова швидкість навчання та спад швидкості навчання) та знайдено їх оптимальні значення для підвищення точності прогнозування трафіка:

numFeatures = 1;

```

numResponses = 1;
numHiddenUnits = 150;
layers = [ ...
    sequenceInputLayer(numFeatures)
    lstmLayer(numHiddenUnits)
    fullyConnectedLayer(numResponses)
    regressionLayer];
options = trainingOptions('adam', ...
    'MaxEpochs',150, ...
    'GradientThreshold',1, ...
    'InitialLearnRate',0.001, ...
    'LearnRateSchedule','piecewise', ...
    'LearnRateDropPeriod',75, ...
    'LearnRateDropFactor',0.1, ...
    'Verbose',0, ...
    'Plots','training-progress');
    
```

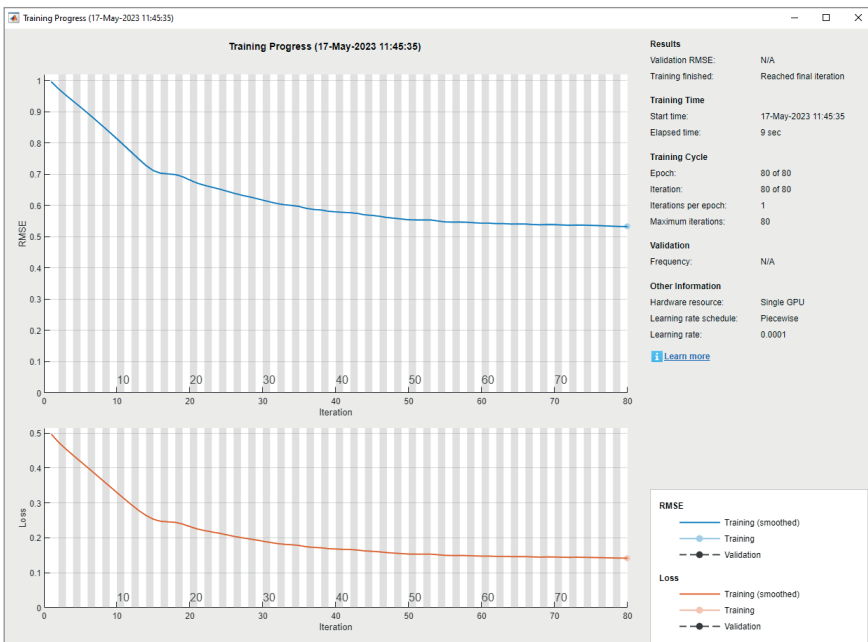


Рис. 4.28. Прогрес навчання моделі LSTM для прогнозування обсягу трафіка LTE мережі на БС-1 (відома модель LSTM із кількістю epoch 80)

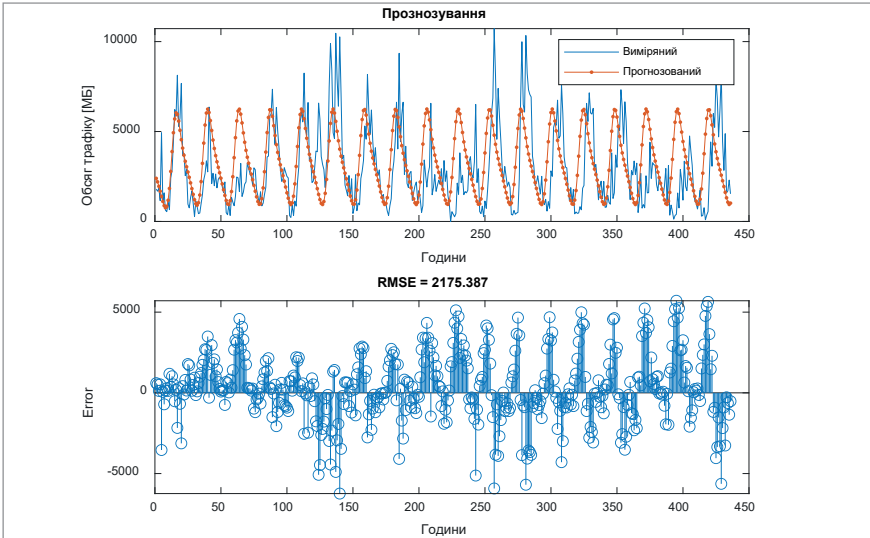


Рис. 4.29. Порівняння прогнозованих значень обсягу реального трафіка БС-1 (відома модель LSTM, кількість epoch 80)

Виконаємо прогнозування трафіка, у вигляді трьох експериментів, за допомогою запропонованої моделі з цими ж вхідними даними та порівняємо, наскільки покращився показник RMSE (рис. 4.30–4.33).

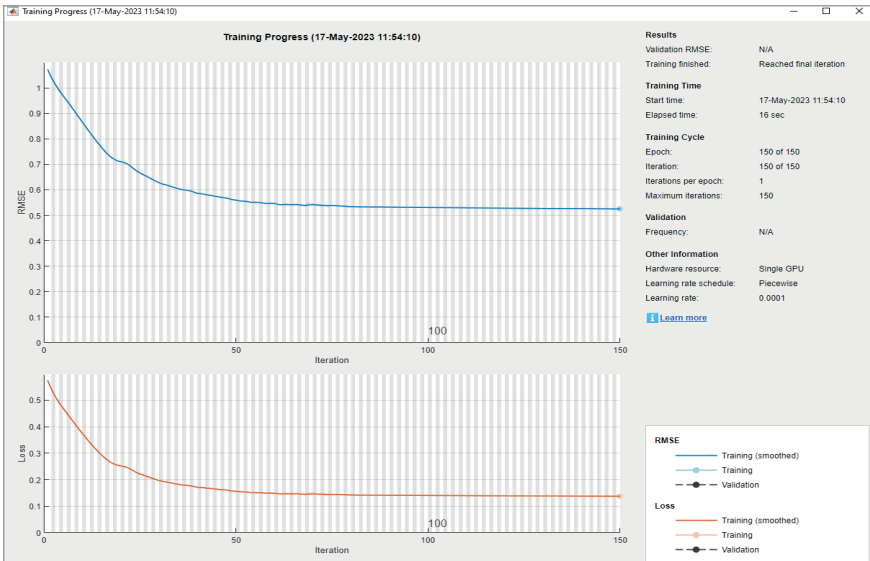


Рис. 4.30. Прогрес навчання моделі LSTM для прогнозування трафіка LTE мережі на БС-1 (запропонована модель LSTM)



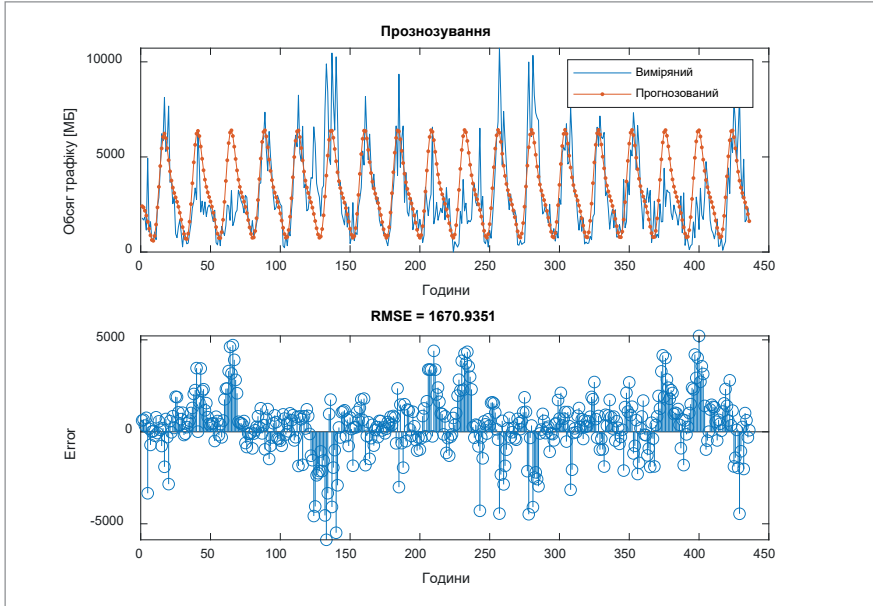


Рис. 4.31. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-1 (запропонована модель LSTM, експеримент №1)

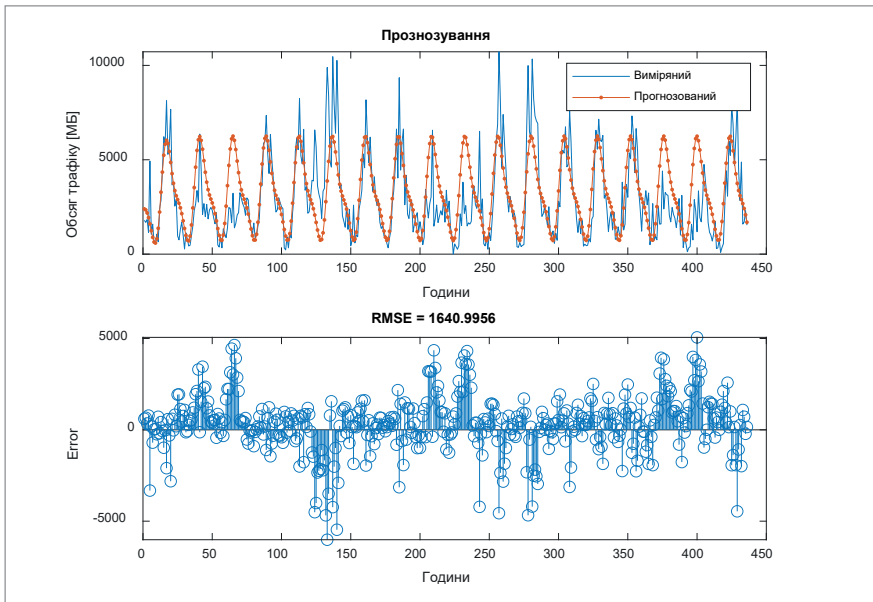


Рис. 4.32. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-1 (запропонована модель LSTM, експеримент №2)

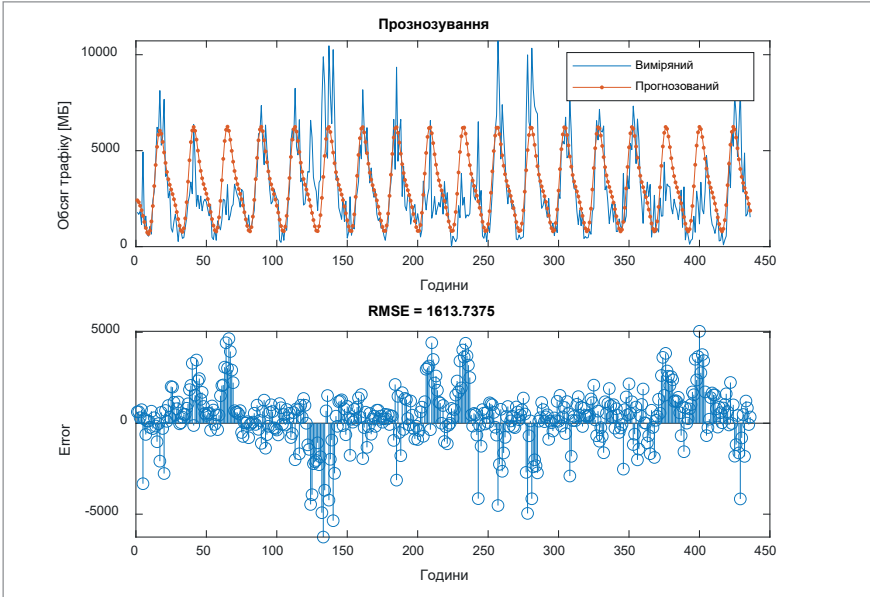


Рис. 4.33. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-1 (запропонована модель LSTM, експеримент №3)

Дані, отримані в результаті трьох експериментів відомої та трьох експериментів запропонованої моделі LSTM на основі LTE трафіка з БС-1 зведено в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2

### Показники RMSE та nRMSE для відомої та запропонованої моделі

Експеримент 1	Відома LSTM модель	Запропонована LSTM модель
RMSE (MB)	2119	1671
nRMSE (%)	19.26	15.19
<b>Експеримент 2</b>		
RMSE (MB)	2180	1641
nRMSE (%)	19.81	14.91
<b>Експеримент 3</b>		
RMSE (MB)	2296	1614
nRMSE (%)	20.87	14.67
nRMSEсеп (%)	19.98	14.92

Бачимо, що показник nRMSE запропонованої моделі є меншим на 5,06 %, що означає покращення точності прогнозування. Також слід врахувати, що запропонована модель на 9 секунд швидше проводить прогнозування, порівняно з відомою моделлю.

#### 4.5. Порівняння точності прогнозування мобільного трафіка для БС-1, БС-2 та БС-3 технології LTE із використанням відомої та запропонованої LSTM моделі

Для того, щоб переконатись у ефективності встановлених налаштувань запропонованої системи для інших даних трафіка БС, використовуємо дані про обсяг трафіка з інших базових станцій, а саме – БС-2 та БС-3 (рис. 4.34–4.46).

##### *Результати прогнозування трафіка для БС-2 з використанням відомої нейронної LSTM моделі*

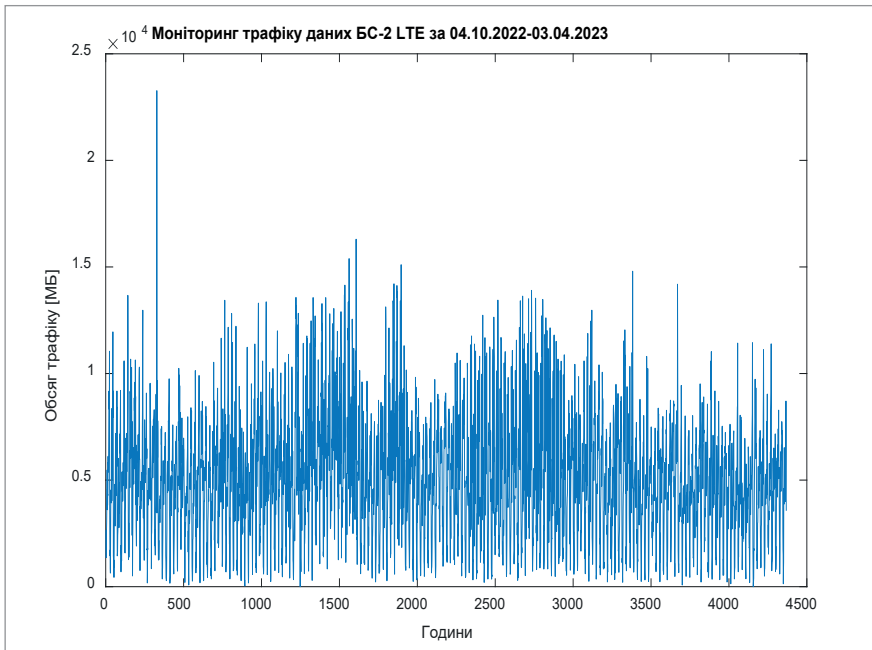


Рис. 4.34. Моніторинг реального трафіка LTE мережі на БС-2

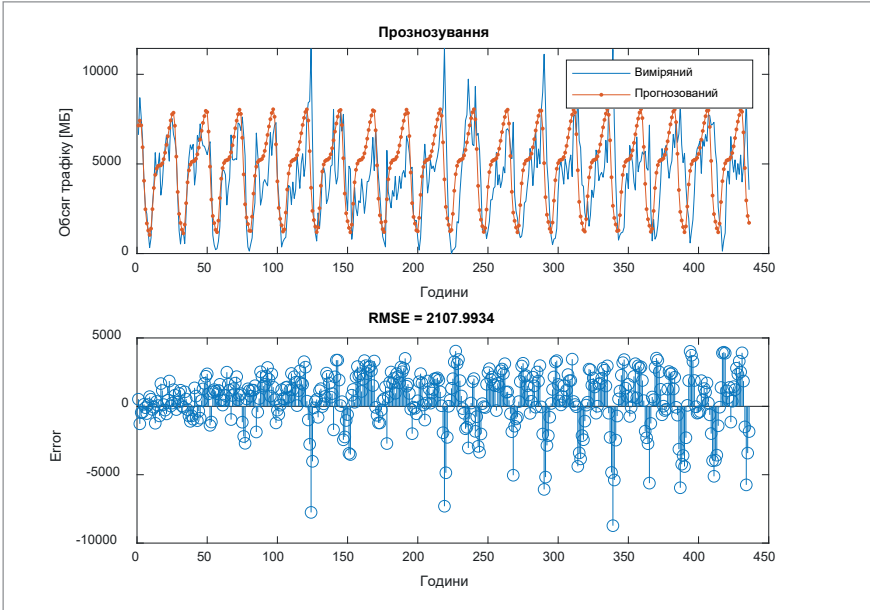


Рис. 4.35. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-2 (відома модель LSTM, експеримент №1)

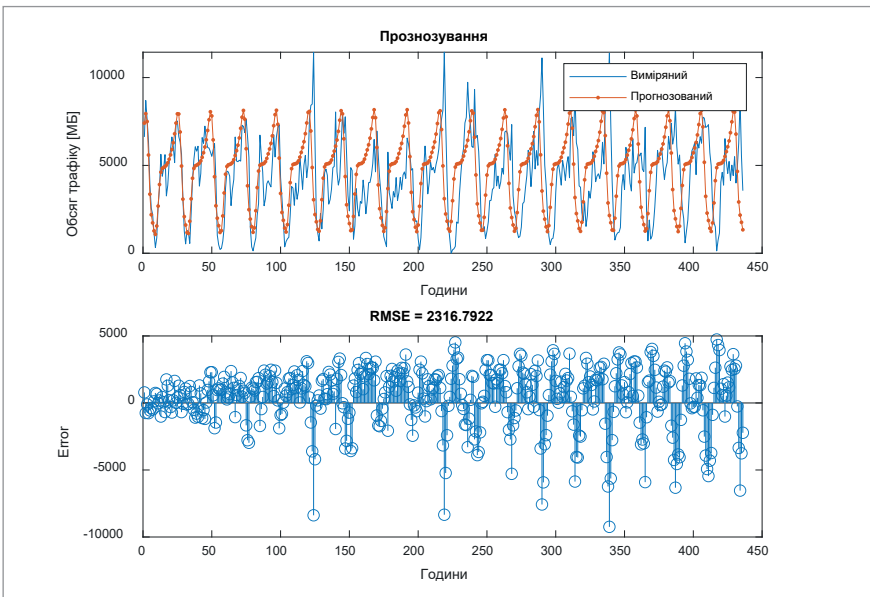


Рис. 4.36. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-2 (відома модель LSTM, експеримент №2)

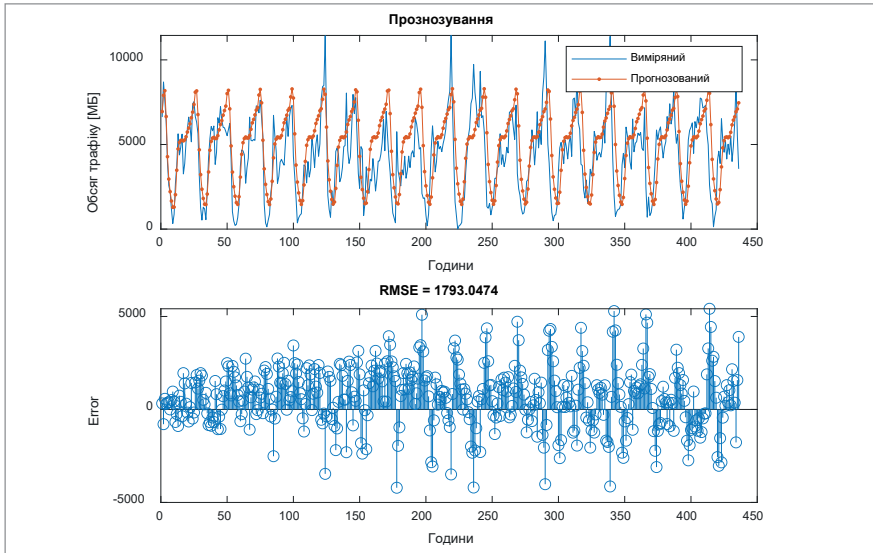


Рис. 4.37. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для БС-2 (відома модель LSTM, експеримент №3)

### Результати прогнозування трафіка для БС-2 з використанням запропонованої нейронної LSTM моделі

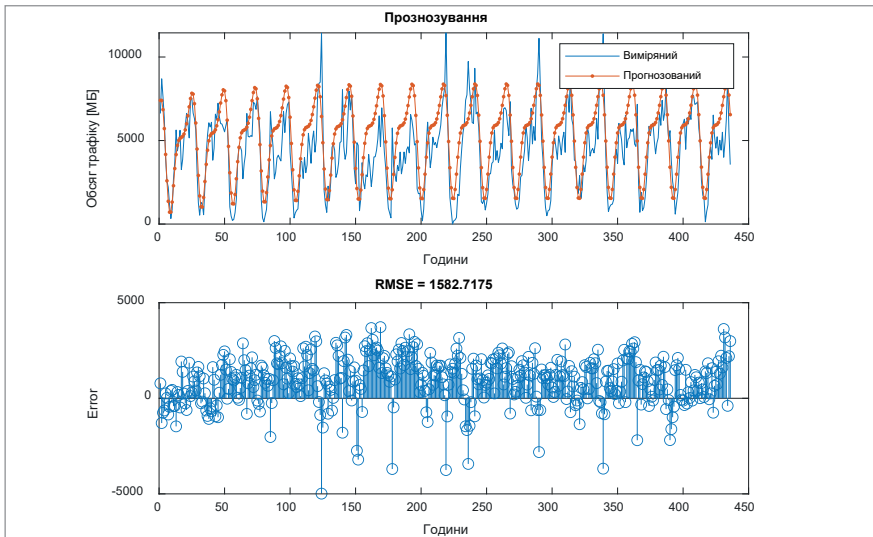


Рис. 4.38. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіка з реальним трафіком для БС-2 (запропонована модель LSTM, експеримент №1)

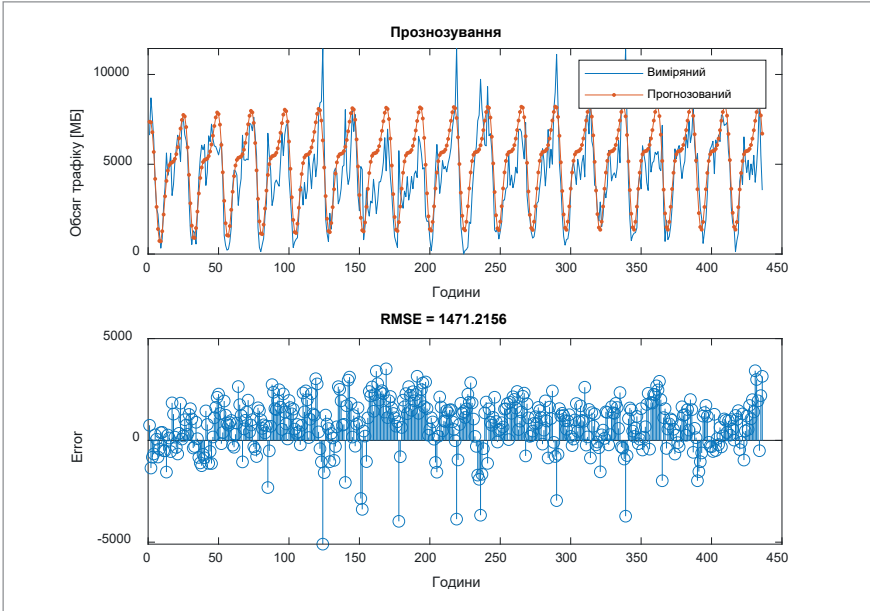


Рис. 4.39. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-2 (запропонована модель LSTM, експеримент №2)

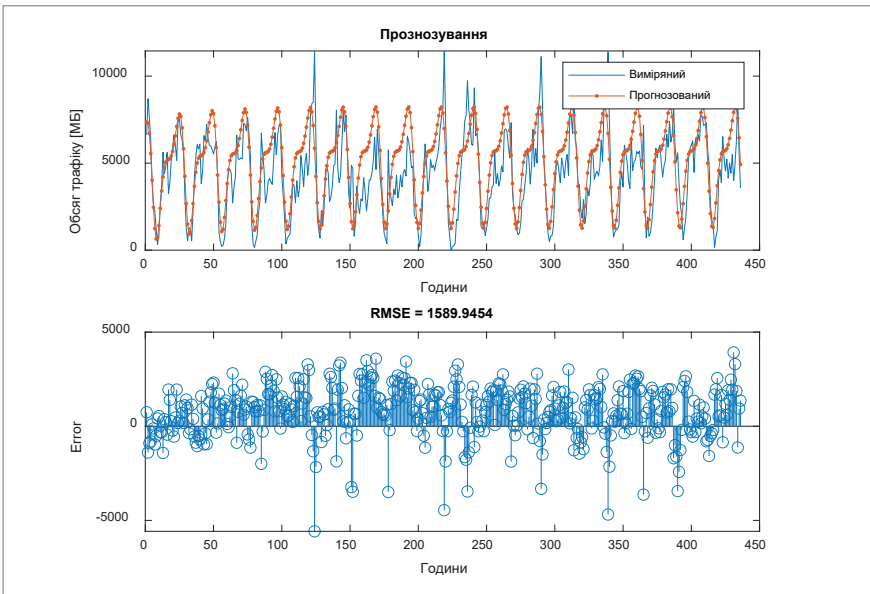


Рис. 4.40. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-2 (запропонована модель LSTM, експеримент №3)

### Результати прогнозування трафіку для БС-3 з використанням відомої нейронної LSTM моделі

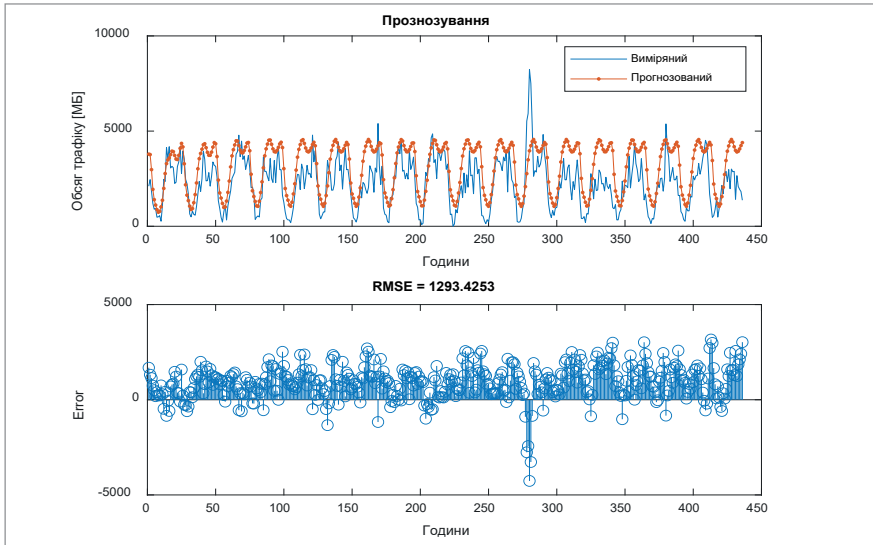


Рис. 4.41. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-3 (відома модель LSTM, експеримент №1)

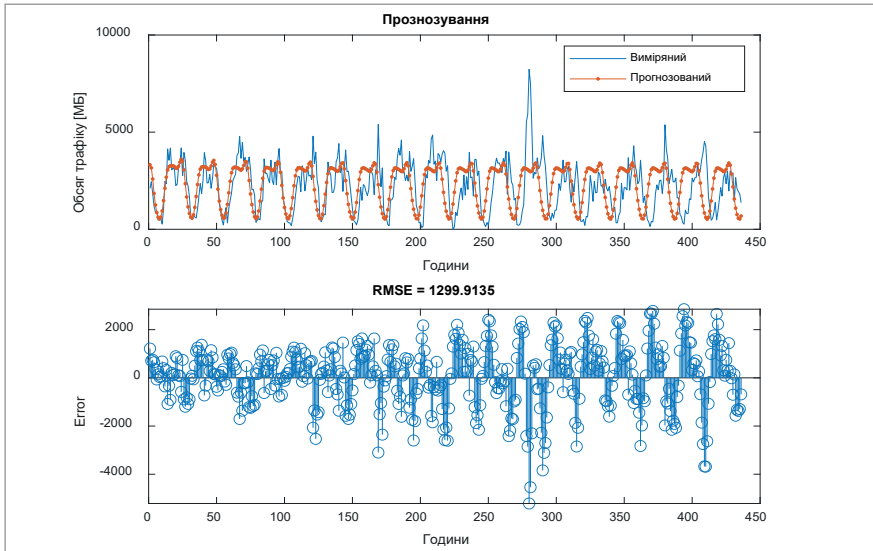


Рис. 4.42. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-3 (відома модель LSTM, експеримент №2)

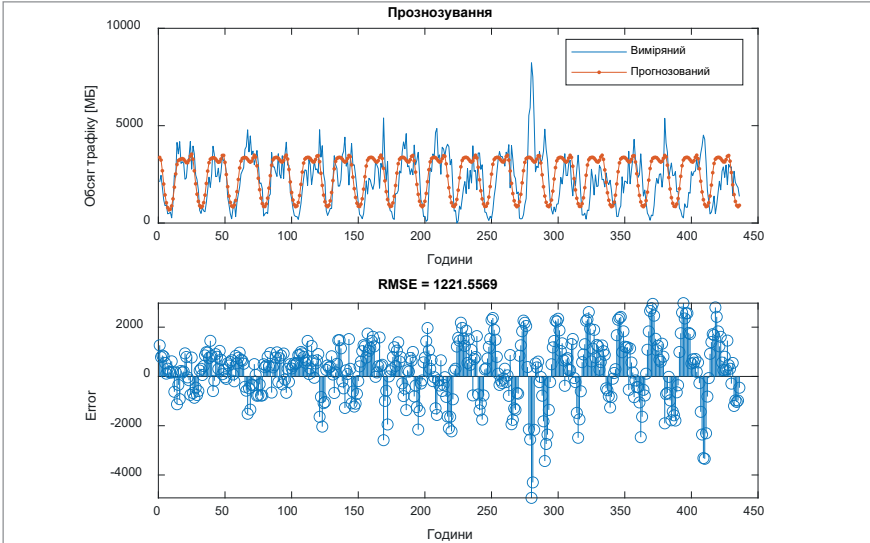


Рис. 4.43. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-3 (відома модель LSTM, експеримент №3)

### **Результати прогнозування трафіку для БС-3 з використанням запропонованої нейронної LSTM моделі**

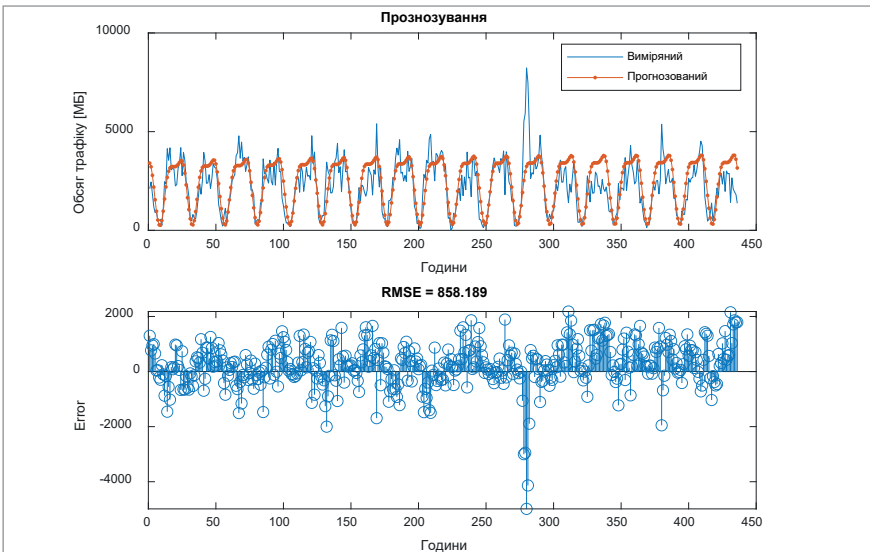


Рис. 4.44. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-3 (запропонована модель LSTM, експеримент №1)



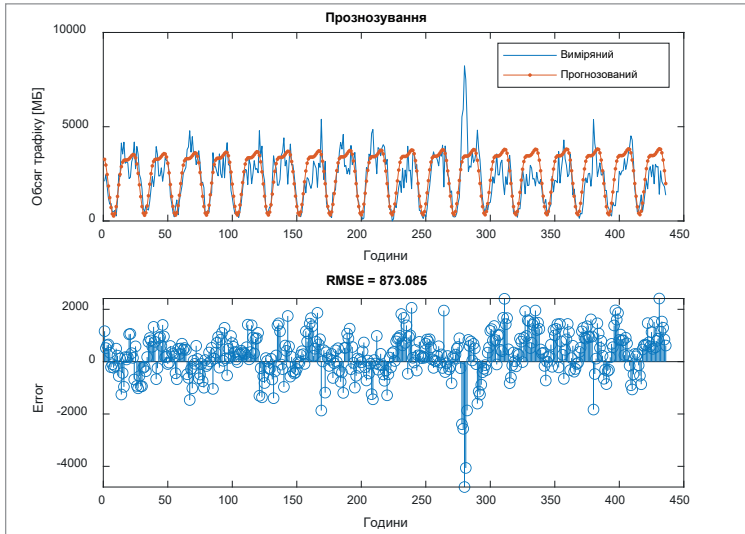


Рис. 4.45. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-3 (запропонована модель LSTM, експеримент №2)

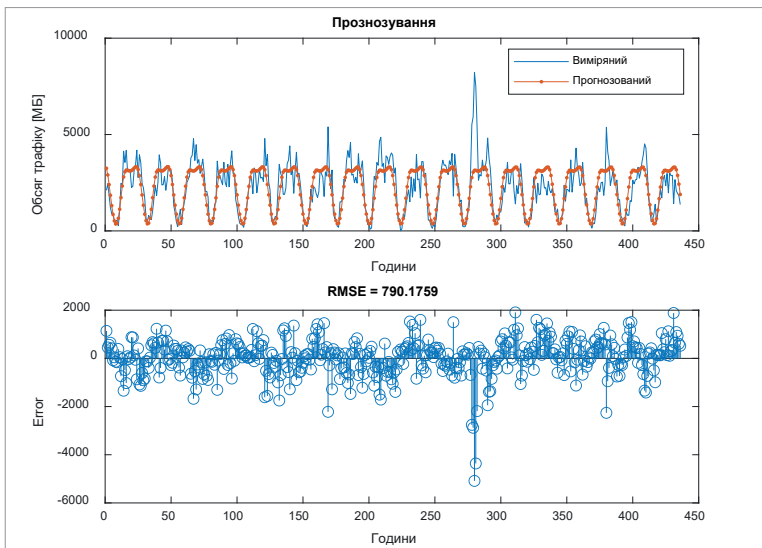


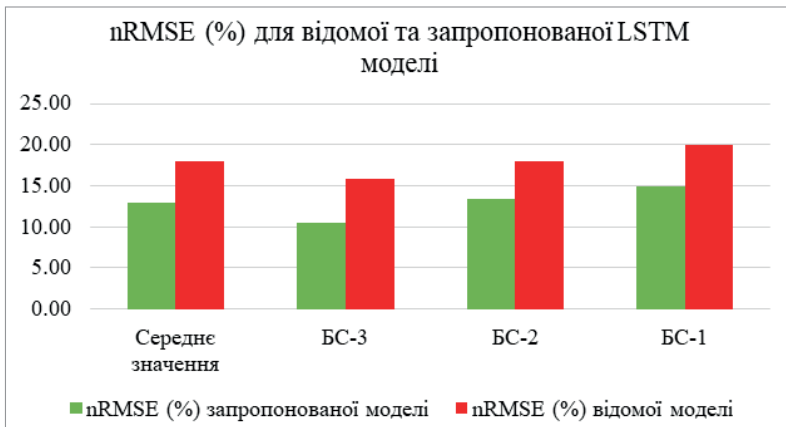
Рис. 4.46. Порівняння прогнозованих значень обсягу трафіку з реальним трафіком для БС-2 (запропонована модель LSTM, експеримент №3)

По три експерименти проведено для кожної БС, з запропованою та відомою моделлю. Дані, отримані на основі трафіку з системи Atoll розраховано та зведено в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3

**Показник RMSE та nRMSE прогнозування трафіка для трьох БС**

БС-1	Відома LSTM модель	Запропонована LSTM модель
nRMSE (%)	19.98	14.92
БС-2		
nRMSE (%)	18.02	13.46
БС-3		
nRMSE (%)	15.90	10.51
nRMSE <sub>сеп</sub> (%)	17.97	12.96



*Рис. 4.47. Гістограма порівняння показників nRMSE (%) відомої та запропонованої моделі LSTM*

З гістограми (рис. 4.47) бачимо, що середній показник nRMSE запропонованої моделі є меншим на 5,01 %, порівняно із відомою моделлю LSTM. Також час на прогнозування трафіка зменшився на 36%.

Отже, запропонована модель нейронної мережі LSTM для прогнозування трафіка мереж мобільного зв'язку є точніша та швидша від відомої. Прогнозування трафіка за допомогою запропонованої моделі LSTM можна виконувати не тільки для БС, а у будь-якій точці мережі, звідки можна отримувати дані про обсяг трафіка, нехай це буде РРЛ, порт комутатора, оптична лінія тощо. Використання даної моделі операторами мобільного зв'язку дозволить уникнути втрат пакетів та зниження швидкості Інтернет-з'єднання. Запропоновану модель можна інтегрувати у систему Atoll у якості модуля прогнозу-

вання трафіка, що дозволить реагувати на «стрибки» трафіка заздалегідь (рис. 4.48). Інженери, отримавши дані про зростання трафіка, зможуть модернізувати мережу до того, як навантаження почне впливати на якість послуг, що підвищить стійкість мережі, ефективність її управління та покращить якість обслуговування користувачів.

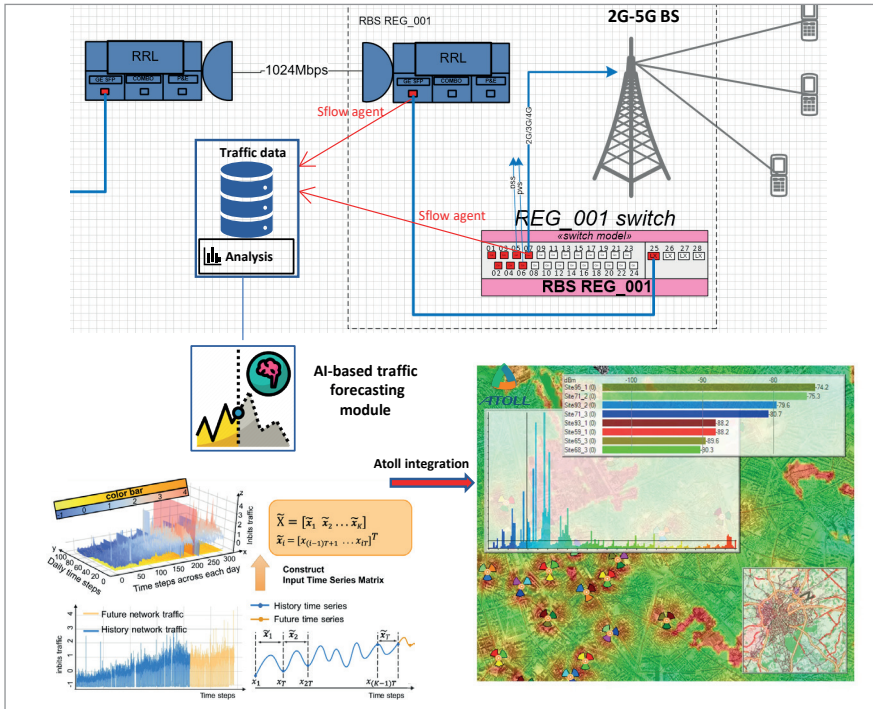


Рис. 4.48. Інтелектуальне планування, управління та оптимізація 2G-5G з використанням програмного забезпечення Atoll, покращеного за допомогою штучного інтелекту

Шляхи удосконалення запропонованої моделі прогнозування трафіка полягають у збільшенні типів вхідних даних для нейронної мережі. Система зможе краще прогнозувати трафік, враховуючи взаємозв'язки з такими показниками, як погодні умови (температура, швидкість вітру, опади, стихійні явища), масштабні події (мітинги, концерти, пандемії) та зміни ситуації в країні (війна, відключення електроенергії, окупація територій). Такий потужний інструмент дозволить ефективніше планувати та модернізувати мережу.

# МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ ТА РОЗПОДІЛУ РАДІОРЕСУРСІВ В МЕРЕЖАХ 5G ADVANCED

### 5.1. Формування завдання дослідження для енергоефективного планування та розподілу ресурсів в мережах 4G/5G

Забезпечення енергоефективності та спектральної ефективності є ключовими завданнями в безпроводних мережах, однак їх одночасне досягнення є складним завданням, що потребує компромісних підходів. Важливо зазначити, що залежно від конкретних умов, пріоритетність цих двох цілей може змінюватися [38]. Наприклад, при низькому навантаженні мережі забезпечення високого QoS не становить складності завдяки наявності достатньої кількості доступних радіоресурсів, що дозволяє зосередитися на оптимізації енергоспоживання [39]. З іншого боку, у разі високого навантаження, коли ресурси обмежені, основний акцент має бути на максимізації пропускної здатності для підтримання належного рівня QoS, навіть якщо це веде до підвищеного енергоспоживання. Існує багато рішень, які орієнтовані на оптимізацію енергоспоживання або збільшення пропускної здатності, і ці рішення демонструють високу ефективність у конкретних умовах, але вони не є універсальними [40-42]. Інші підходи пропонують статичні компроміси, які забезпечують середній рівень продуктивності, але не здатні повністю адаптуватися до всіх можливих сценаріїв.

У роботі пропонується підхід, що забезпечує динамічний компроміс між енергоефективністю та пропускною здатністю, адаптуючи пріоритети алгоритмів планування відповідно до поточного навантаження на мережу [43]. Планувальник здатний адаптувати свою стратегію залежно від контексту, з метою збереження високого рівня QoS при мінімальному енергоспоживанні. Результати оцінки показують, що запропоноване рішення знижує енергоспоживання ефективніше, ніж традиційні алгоритми планування при низькому навантаженні, водночас досягаючи аналогічної спектральної ефективності, як і пла-

нувальники, орієнтовані на максимальну пропускну здатність, в умовах високого навантаження. У цьому розділі представлено рішення, назване «Динамічний компроміс» (Dynamic Trade-off, DT), яке адаптивно змінює баланс між пропускну здатністю та енергоефективністю залежно від поточного використання мережі.

Кожна базова станція (eNB) оснащена  $n_t$  антенами. Таким чином, ми припускаємо, що всі eNB мають однакову кількість антен. Аналогічно, кожне користувацьке обладнання (UE) має  $n_r$  антен (однакова кількість для всіх UE). Для спрощення досліджувана система є одноствільниковою, з одним eNB. Будемо вважати, що в одному ресурсному блоці (РБ) є  $n_s$  піднесучих, а  $K$  – загальна кількість РБ. Нехай  $U$  – множина користувачів, підключених до eNB з активною сесією. В таблиці 5.1 наведені основні параметри системи.

Таблиця 5.1

**Основні параметри системи**

$n_s$	кількість піднесучих по РБ
$n_t$	кількість антен на базовій станції eNB
$n_r$	кількість антен в користувацькому пристрої
$K$	загальна кількість ресурсних блоків РБ
$U$	набір всіх активних пристроїв

В даний момент часу планування можна розглядати як індикаторну функцію:  $\delta_{i,k}(t)$ , де  $i$  – індекс UE,  $k$  – індекс RB та  $\delta_{i,k}(t) \in [0, \min(n_t, n_r)]$  – кількість потоків на ресурсі  $k$ , виділеному для  $i$ .

Маємо наступне обмеження:

$$\sum_{i \in U} \delta_{i,k}(t) \leq n_r, \forall k \in \{1, \dots, K\} \tag{5.1}$$

Потенційна кількість корисних ресурсів задається  $n_t \times K$ . Припускаємо, що немає ніяких обмежень щодо кількості радіочастот, пропускну здатності. Для пояснення попереднього рівняння можна розглянути кількість UE, що дорівнює  $n_t \times K$ , наприклад, 100. У цьому випадку UE матиме лише 1 RB зі 100 в середньому за часовий інтервал (TS). Зауважимо, що в більшості випадків  $\delta_{i,k}(t) = 0$ : лише невелика підмножина  $U$  дійсно обслуговується в заданий slot  $t$ .

У системі SISO  $n_t = 1$  і  $n_r \times 1$ , що означає, що тільки один користувач і може використовувати ресурс  $k$  на даній TS. За відсутності інтер-

ференції між користувачами однієї і тієї ж комірки пропускна здатність користувача обчислюється незалежно від інших користувачів. При кожному розподілі кадрів планувальник обчислює максимальну кількість бітів  $q_{i,k}$ , яка може бути передана з використанням ресурсу  $k$ , якщо він призначений користувачеві  $i$  [44], не перевищуючи при цьому цільового значення коефіцієнта бітових помилок (BER) ( $BER_{target,i}$ ), для всіх  $i$  та всіх  $k$ :

$$q_{i,k} \leq \left\lfloor \log_2 \left( 1 + \frac{3P \times T_s \times \left(\frac{1}{d_i}\right)^\beta \times \alpha_{i,k}^2}{2N_0 \left[ \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{BER_{target,i}}{2} \right) \right]^2} \right) \right\rfloor \quad (5.2)$$

де  $P$  – потужність передавання,  $N_0$  – спектральна щільність шуму,  $T_s$  – тривалість символу ортогонального частотного мультиплексування (OFDM),  $d_i$  – відстань до точки доступу користувача  $i$  і  $\alpha_{i,k}^2$  представляє завмирання, яких зазнає цей користувач на ресурсі  $k$ . Далі  $\alpha_{i,k}$  є релеєвським розподілом з математичним сподіванням, рівним одиниці. Експонента  $\beta$  відповідає втратам на шляху і змінюється від 2 до 4 в залежності від рівня щільності середовища.

На рис. 5.1 показано приклад горизонтального розподілу завдяки стабільності каналу. Дійсно, як тільки користувач обраний для передавання на РБ, рішення, швидше за все, залишиться незмінним до тих пір, поки не зміниться загасання сигналу [45–47].

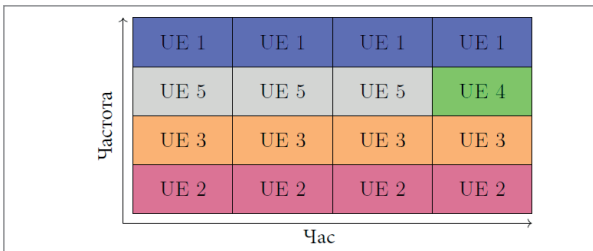


Рис. 5.1. Схема розподілу ресурсів між користувачами

Далі припустимо, що підтримувані порядки модуляції квадратурної амплітудної модуляції (QAM) обмежені таким чином, що  $q$  належить множині  $S = \{0, 2, 4, \dots, q_{max}\}$ . Звідси, максимальна кількість бітів  $m_{i,k}$ , яка буде передана на TS ресурсу  $k$ , якщо цей ресурсний блок виділено користувачу  $i$ , дорівнює:

$$m_{i,k} = \max \{q \in S, q \leq q_{i,k}\} \quad (5.3)$$

Структурна схема роботи планувальника розподілу ресурсів в мережах 5G Advanced показано на рис. 5.2.

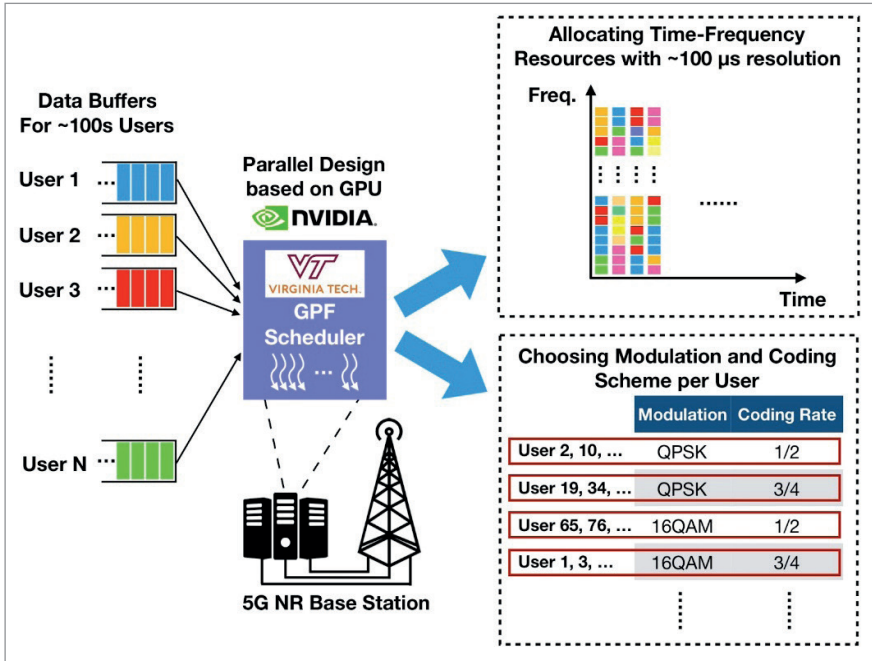


Рис. 5.2. Структурна схема роботи планувальника розподілу ресурсів в мережах 5G Advanced [48]

Використання OFDMA природно призводить до концептуалізації радіочастотного спектра як двовимірного ресурсу, як показано на рис. 5.3. Мінімальна запланована одиниця, яка називається елементом ресурсу (RE), відповідає смузі частот 15 кГц навколо однієї піднесучої частоти і часу, необхідному для передавання одного OFDMA-символу. Кількість біт, які можуть бути закодовані в кожному символі, залежить від швидкості модуляції, тому, наприклад, при використанні квадратурної амплітудної модуляції (QAM), 16-QAM дає 4 біти на символ, а 64-QAM – 6 біт на символ [49].

Планувальник виділяє деяку кількість RE кожному користувачеві, який має дані для передавання протягом кожного 1 мс інтервалу часу передавання (TTI), де користувачі зображені різними кольоровими блоками на рис. 5.3. Єдиним обмеженням для планувальника є

те, що він повинен приймати рішення про розподіл блоків з  $7 \times 12 = 84$  елементів ресурсу, які називаються блоком фізичного ресурсу (PRB). На рис. 5.3 показано два PRB, що йдуть один за одним. Звичайно, час продовжує текти вздовж однієї осі, і в залежності від розміру доступної смуги частот (наприклад, вона може бути шириною 100 МГц), вздовж іншої осі може бути набагато більше слотів піднесучих (і, отже, PRB), тому планувальник, по суті, готує і передає послідовність PRB [50–53].

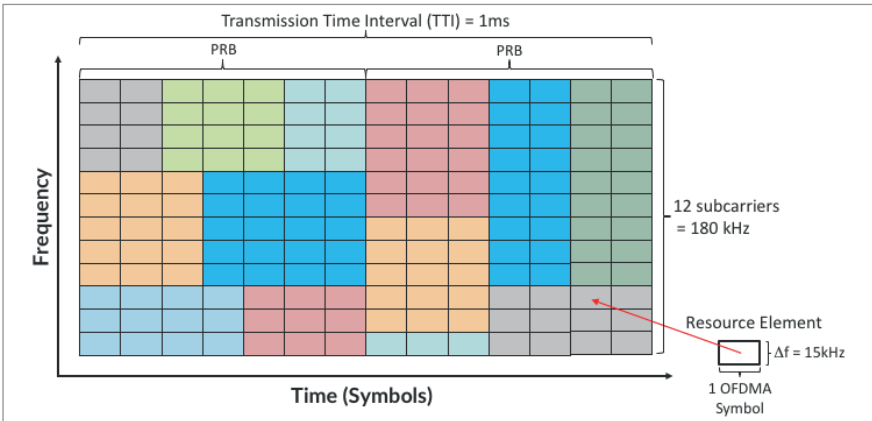


Рис. 5.3. Спектр абстрактно представлений 2-D сіткою елементів ресурсів, що планується для розподілу

OFDMA не є алгоритмом кодування/модуляції, а натомість забезпечує основу для вибору конкретного кодування і модулятора для кожної піднесучої частоти. Планувальник несе відповідальність за вибір модуляції для використання для кожного PRB на основі отриманого ним зворотного зв'язку CQI. Планувальник також вибирає кодування на основі кожного PRB, наприклад, за допомогою того, як він встановлює параметри алгоритму турбо-коду. TTI 1 мс відповідає часовому інтервалу, в якому планувальник отримує зворотний зв'язок від користувачів про якість сигналу, який вони відчувають. Це згаданий раніше CQI, де кожен мілісекунду кожен користувач надсилає набір метрик, які планувальник використовує для прийняття рішення щодо того, як розподіляти PRB під час наступного TTI.

Іншим вхідним параметром для прийняття рішення про планування є ідентифікатор класу QoS (QCI), який вказує на якість обслуговування, яку повинен отримати кожен клас трафіка.



Рис. 5.3 зосереджується на плануванні передавання даних з однієї антени, але впровадження технології МІМО, розглянутої вище, вимагає, щоб планувальник також визначав, яка антена або група антен буде найбільш ефективною для кожного приймача. Це означає, що планувальнику потрібно не лише розподіляти послідовність ресурсних елементів, а й оптимізувати використання антен.

Це викликає питання: як планувальник вирішує, яку групу користувачів обслуговувати в певний момент, скільки ресурсів виділити кожному користувачу, які рівні модуляції і кодування вибрати, і через яку антену передавати дані? Це складна оптимізаційна задача, яка розглядається в цій роботі. Метою є описати архітектуру, яка дозволить легко розробляти та інтегрувати ефективний планувальник. Забезпечення відкритості архітектури стільникового зв'язку для таких інновацій є однією з ключових цілей, і, як буде показано в наступному розділі, ця відкритість стає ще важливішою в 5G Advanced, де планувальник працює з більш гнучкими можливостями розподілу ресурсів.

---

## 5.2. Методи розподілу ресурсів в мережах 5G з урахуванням впливу на QoS

Неопортуністичний планувальник не враховує стан радіозв'язку користувачів перед тим, як виділяти РБ. Це може призвести до того, що планувальник призначить РБ користувачеві, який має миттєво низьку досяжну пропускну здатність ( $m_{i,k}$ ). Однак, великою перевагою є те, що в більшості випадків його легше обчислити і реалізувати.

Одним з добре відомих алгоритмів такого типу є Round Robin (RR) [53]. Навіть якщо існують різні способи його реалізації, основний принцип залишається незмінним. Він послідовно приписує РБ користувачам. Він приписує  $n$  одиниць першому користувачу  $i$ , потім  $n$  одиниць другому користувачу  $i+1$ , і коли він досягає останнього користувача, він починає спочатку з першого користувача  $i$ . Таким чином, RR є справедливим щодо того, що він розподіляє однакову кількість РБ для всіх користувачів (рис. 5.4). Але ця справедливість є відносно низькою, оскільки користувачі не мають однакової серед-

ньої досяжної пропускної здатності через втрати, і тому з однаковою кількістю РБ вони не всі можуть передати однакову кількість даних. Оскільки вона не враховує радіоумови користувачів, спектральна ефективність близька до середньої досяжної пропускної здатності користувачів [54].

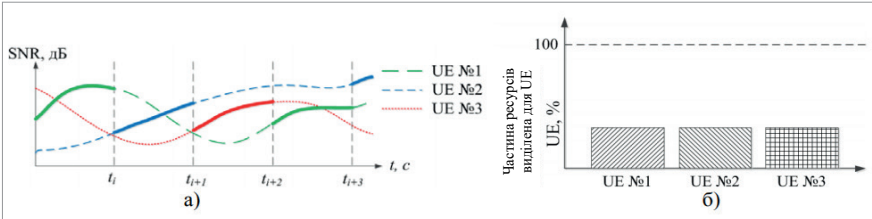


Рис. 5.4. Приклад розподілу ресурсів згідно алгоритму Round Robin Scheduler

Випадковий доступ (Random Access, RA) [55] дотримується того ж принципу, що і RR, і розподіляє РБ випадковим чином між користувачами, які повинні передавати дані. В середньому всі користувачі мають однакову кількість одиниць ресурсу. Він має той самий рівень справедливості, що і RR. Залежно від платформи, його може бути легше реалізувати.

### Опортуністична схема розподілу ресурсів

Оскільки вони не враховують умови радіозв'язку користувачів, неопортуністичні планувальники швидко досягають своїх обмежень в бездротовому контексті. Щоб використовувати мінливість умов радіозв'язку на свою користь, опортуністичні планувальники додають  $m_{i,k}$  користувача в процесі прийняття рішення. Тоді він буде віддавати перевагу користувачам з хорошими умовами радіозв'язку.

Однією з головних проблем в мережах в цілому є загальна пропускна здатність, або скільки інформації, яку система здатна передати.

Максимальне відношення сигнал/шум (MaxSNR) [56] є найпростішим опортуністичним планувальником, який фокусується тільки на пропускній здатності. Мета полягає в тому, щоб використовувати умови радіозв'язку для призначення РБ користувачеві з найкращим  $m_{i,k}$ . Формула вибору користувача має вигляд :

$$u = \arg \max(m_{i,k}) \quad (5.4)$$

Таким чином,  $\text{MaxSNR}$  уникає всіх поганих розподілів не опортуністичного алгоритму (рис. 5.5), а спектральна ефективність є вищою, ніж середня  $m_{i,k}$  користувачів.

$\text{MaxSNR}$  особливо ефективний, коли кількість користувачів зростає і випереджає RR. Насправді, коли кількість користувачів зростає, шанс отримати хороші умови також зростає. Опортуністичний планувальник потребує великої різноманітності користувачів, щоб використати свій реальний потенціал. Завжди вибираючи користувача з найкращою досяжною пропускну здатністю,  $\text{MaxSNR}$  може бути дійсно несправедливим.

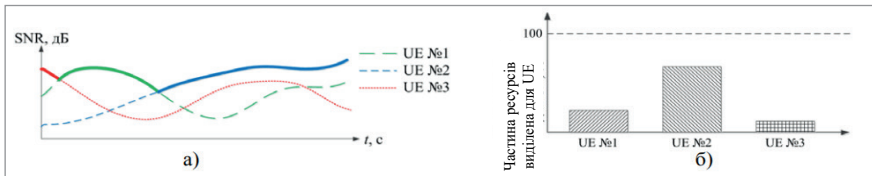


Рис. 5.5. Приклад розподілу ресурсу за алгоритмом  $\text{MaxSNR}$

Наприклад, якщо ми розглянемо двох користувачів, один з яких знаходиться поблизу базової станції, а інший на краю зони покриття, то найближчий користувач, швидше за все, отримає РБ швидше, ніж дальній користувач. Це призводить до великої різниці в якості обслуговування для цих двох користувачів (рис. 5.6).

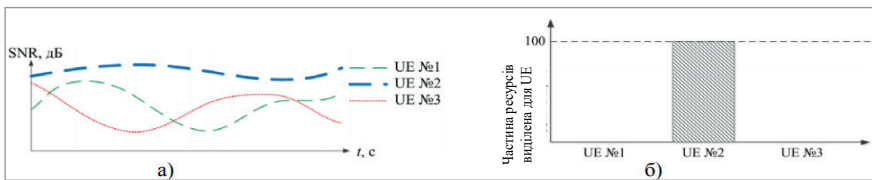


Рис. 5.6. Приклад розподілу ресурсів згідно алгоритму  $\text{MaxSNR}$  у разі коли одна із UE має високу якість сигналу

### **Схема розподілу ресурсів, орієнтована на справедливість**

Як було показано раніше, зосередження уваги тільки на пропускну здатності може призвести до несправедливих ситуацій. Для підтримки хорошого QoS в межах комірки незалежно від відстані користувачів від базової станції (БС), алгоритми повинні компенсувати відмінності між користувачами.

Пропорційна справедливість (PF) [57] вирішує цю проблему шляхом компенсації середньої отриманої або досяжної пропускної здатності. Дійсно, користувачі, що знаходяться близько до точки доступу, мають кращу середню пропускну здатність на RU, ніж користувачі, що знаходяться далеко. Це означає, що при використанні планувальника MaxSNR близькі користувачі мають статистично більше шансів отримати доступ до середовища. Як наслідок, дальні користувачі часто отримують радіоресурси після ближніх користувачів, що призводить до перевищення їхніх вимог до QoS і незадоволення. Основним принципом алгоритмів на основі PF є виділення ресурсів одному конкретному користувачеві, коли умови його каналу є найбільш сприятливими по відношенню до усереднених за часом умов. Стратегія полягає в обчисленні середнього значення  $M_{i,k}$  пропускної здатності користувача  $m_{i,k}$ . Обчислення  $M_{i,k}$  залежить від реалізації і існує багато варіантів цього алгоритму. Одним із способів є розрахунок середньої кількості бітів на РБ, отриманих користувачем і за певний період часу. Тоді формула вибору користувача виглядає наступним чином:

$$u = \arg \max \left( \frac{m_{i,k}}{M_{i,k}} \right) \quad (5.5)$$

Цей підхід є більш справедливим, ніж MaxSNR, оскільки всі користувачі статистично мають однакову ймовірність доступу до радіоресурсів (рис. 5.7). Таким чином, PF збільшує переваги багатокористувацької різноманітності, яка посилює опортуністичну поведінку розподілу ресурсів. Враховуючи всіх користувачів при досягненні ними максимально можливої пропускної здатності, алгоритми на основі PF є більш спектрально ефективними, ніж алгоритми на основі MaxSNR.

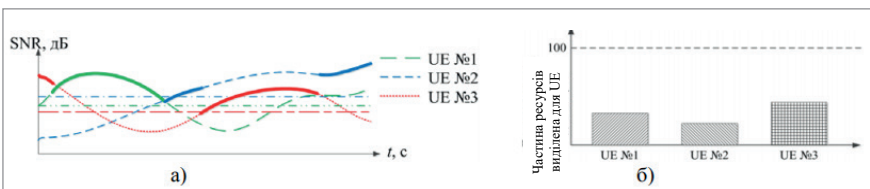


Рис. 5.7. Приклад розподілу ресурсів за алгоритмом пропорційного справедливого планування

FairMaxSNR [58] пропонує вирішити проблему справедливості, орієнтуючись на відстань між користувачами БС. FairMaxSNR компенсує різницю в середній пропускну здатності між користувачами, враховуючи коефіцієнт компенсації (CF<sub>i</sub>), який зменшується зі збільшенням відстані. Цей компенсаційний коефіцієнт надає користувачам однакові шанси на доступ до РБ незалежно від їх відстані від БС.

$$u = \arg \max \left( \frac{m_{i,k}}{CF_i} \right) \quad (5.6)$$

Продуктивність порівнянна з найкращими розробленими планувальниками на основі PF.

Оскільки гарантія енергоефективності не повинна суперечити вимогам QoS та оптимізації пропускну здатності системи, необхідно розробити нові підходи, які б поєднували в собі високу спектральну ефективність, справедливість та мінімізацію енергоспоживання незалежно від розглянутого навантаження трафіка.

### ***Ефективна схема енергозбереження для базових станцій в мережах 5G***

Запропонована схема енергозбереження визначає стан БС в залежності від кількості користувачів (UE), які потребують високошвидкісного трафіка передавання даних та кількості абонентів, які знаходяться в зонах перекриття, що зазвичай покриваються розглянутою БС та сусідніми БС. У разі, коли всі UE, які вимагають високошвидкісного трафіка передавання даних в зоні покриття БС, можуть бути покриті сусідніми БС, розглянута БС для економії електроенергії може переведитися в сплячий режим або відключатися. У цій роботі, якщо БС має високу ймовірність активації через більшу кількість UE, що вимагають швидкості передавання даних під покриттям БС, або більшу кількість UE в області перекриття, яку зазвичай охоплюють сусідні БС і розглянута БС, БС може бути переведена у режим сну для швидкого переходу у ввімкнений стан, коли це необхідно. В іншому випадку БС переходить у вимкнений стан, щоб заощадити більше енергії.

У цій роботі для оцінки продуктивності передбачається досліджувати гетерогенну мережеву архітектуру з макрокоміркою з перебиваючими її малими комірками, як показано на рис. 5.8.

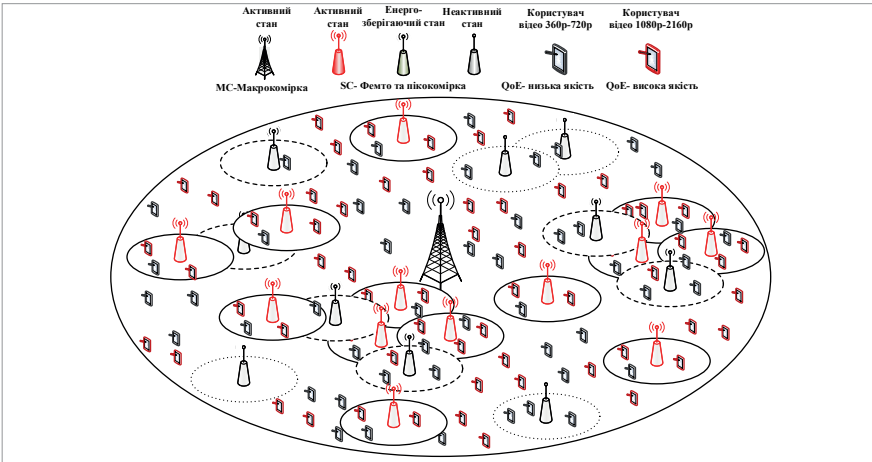


Рис. 5.8. Ідея мінімізації енергетичного споживання в 5G шляхом ефективного перерозподілу процесу обслуговування користувачів між базовими станціями

### 5.3. Моделювання процесу планування та розподілу радіоресурсів в 5G мережах

#### 5.3.1. Імітаційна модель процесу розподілу ресурсів в межах однієї базової станції 5G

У роботі використано імітаційну модель, яка розроблена у роботі [59] для дослідження процесу розподілу ресурсів між користувачами в межах однієї базової станції 4G/5G.

Імітаційна модель містить окремий модуль для вивчення параметрів, що впливають на кількість ресурсів, які можуть бути виділені базовою станцією залежно від переміщення абонента. Зокрема, в ділянці 1 можна вибрати напрямок downlink/uplink, кількість антен для передавання та приймання, а також фактор, що впливає на кількість ресурсів, які виділяються для повідомлення. Області 2 і 4 відповідають за графічне представлення зміни відстані до базової станції та параметра SNR відповідно, на підставі яких базова станція перераховує і визначає значення параметра CQI (область 3). Для кожного значення CQI, згідно зі стандартом, визначається схема модуляції-кодування, яка впливає на пропускну здатність, виділену базовою станцією абоненту, що досліджується (рис. 5.9).

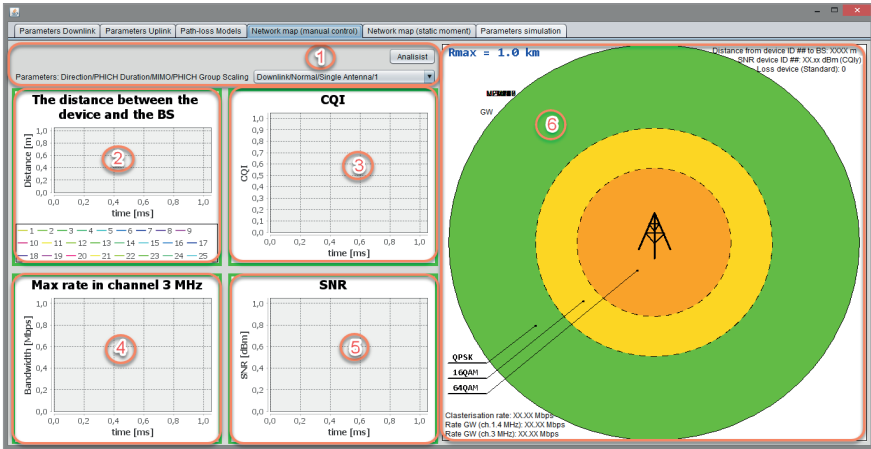


Рис. 5.9. Модуль для визначення процесу розподілу ресурсів між користувачами в межах однієї БС

Імітаційна модель також дає змогу визначити інші параметри, такі як: відстань до базової станції для активного абонента (пристрою) (ділянка 1), пропускна здатність, необхідна для послуг, які ці абоненти (датчики) хочуть використовувати (ділянка 2), а також швидкості, доступні для кожного з них у каналах 1,4 МГц і 3 МГц (ділянки 3, 4 відповідно), рис. 5.10.

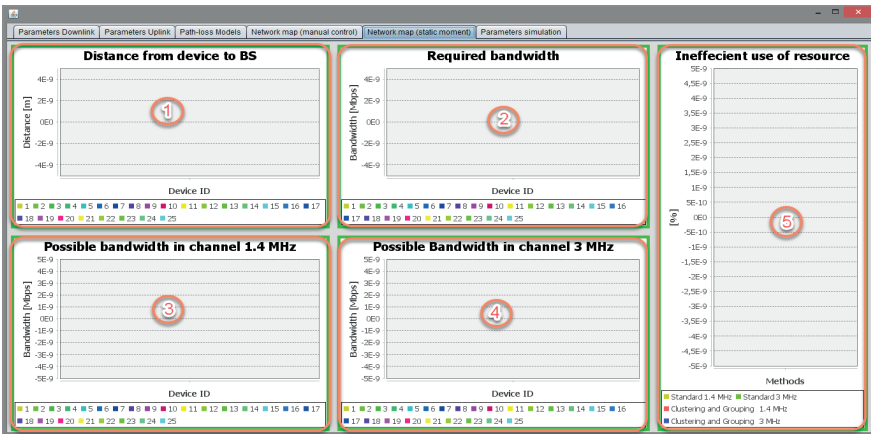


Рис. 5.10. Модуль для визначення можливості надання пропускних здатностей користувачам в залежності від їх локалізації

На рис 5.10 спочатку генерується пристрій – мобільний телефон. Рухаємо його в зону покриття базової станції. Спостерігаємо, що відстань

між мобільним пристроєм та базовою станцією змінюється. Мобільний абонент спочатку рухається в бік базової станції, потім віддаляється від неї і зупиняється на відстані 98 м. По мірі переміщення абонента змінюються умови радіоканалу, що впливає на відношення сигнал/шум, зміна значень якого відображається на графіку, який має назву «SNR». Відповідно до кожної точки цього графіка імітаційна модель будує криву зміни показника якості каналу CQI, для кожного значення якого визначається модуляційно-кодова схема (рис. 5.11). Модуляційно-кодова схема впливає на значення максимальної пропускної здатності.

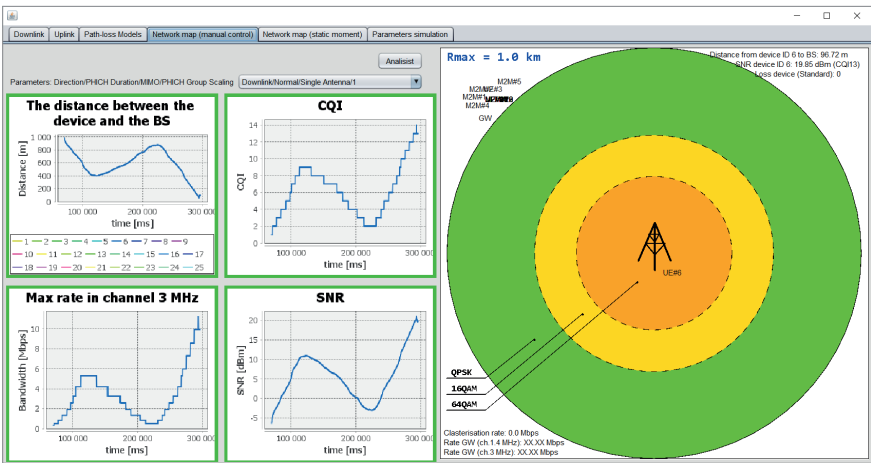


Рис. 5.11. Моделювання впливу зміни локалізації користувача на параметр CQI, SNR та пропускну здатність в межах БС

Максимальне значення пропускної здатності для ширини каналу 1.4 МГц та 3 МГц показано на графіку в лівому нижньому кутку модуля. На даний момент абонент вимагає пропускну здатність 0,75 Мбіт/с (рис. 5.12). Як бачимо, в таких радіумовах де знаходиться користувач на відстані 98 м до базової станції, ресурси виділяться в повному обсязі.

У випадку коли в межах БС знаходить декілька користувачів із різними вимогами до пропускної здатності для сервісів та перебувають у різних радіумовах, може виникнути ситуація, що фізично користувач не отримає бажаної пропускної здатності (5.13). Зокрема, таким пристроєм є користувач під номером 14. Можливості отримання необхідної пропускної здатності для користувачів (рис. 5.14).



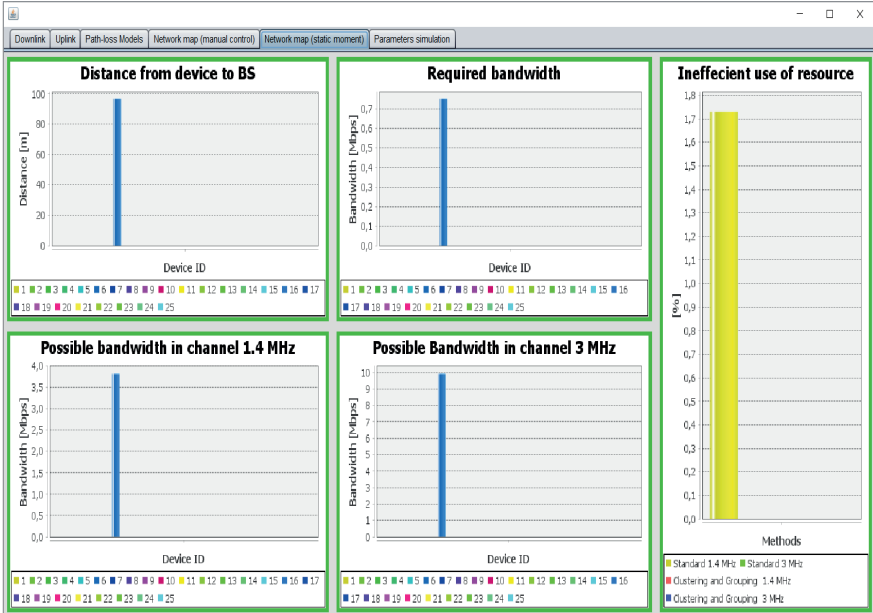


Рис. 5.12. Оцінка можливості отримання необхідної пропускної здатності при ширині каналу 1,4 МГц та 3МГц

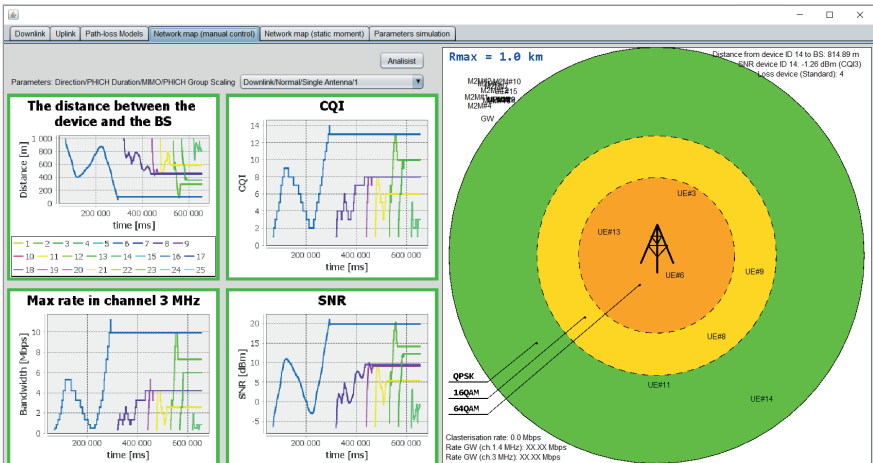


Рис. 5.13. Моделювання впливу зміни локалізації різних користувачів на параметр CQI, SNR та пропускну здатність в межах БС

Можливі пропускні здатності для користувачів в умовах однієї антени на передачу та прийом та різної ширини каналу показано у табл. 5.1.



Рис. 5.14. Оцінка можливості отримання необхідної пропускної здатності для користувачів, що обслуговуються БС при ширині каналу 1,4 МГц та 3МГц

Таблиця 5.1

### Можливі пропускні здатності для користувачів в умовах однієї антени на передачу та прийом та різної ширини каналу

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	Корисна швидкість, Мбіт/с							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,0094	0,1285	0,3342	0,5627	1,134	1,7053	2,2766	11,3828
2	0,0144	0,1977	0,5141	0,8657	1,7446	2,6235	3,5024	17,512
3	0,0232	0,318	0,8269	1,3923	2,8059	4,2195	5,633	28,1652
4	0,0371	0,5075	1,3196	2,2219	4,4778	6,7337	8,9895	44,9475
5	0,054	0,7398	1,9237	3,2391	6,5277	9,8163	13,1048	65,5242
6	0,0724	0,9919	2,5792	4,3429	8,752	13,1612	17,5704	87,852
7	0,091	1,2456	3,239	5,4538	10,9909	16,528	22,0652	110,3258
8	0,1179	1,6147	4,1987	7,0698	14,2475	21,4252	28,603	143,0149

*Продовження табл. 5.1.*

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	0,1482	2,0299	5,2784	8,8877	17,9112	26,9346	35,958	179,7902
10	0,1682	2,3034	5,9896	10,0853	20,3245	30,5638	40,803	204,0152
11	0,2047	2,8027	7,2877	12,2711	24,7296	37,1881	49,6466	248,233
12	0,2404	3,292	8,5602	14,4137	29,0475	43,6813	58,3151	291,5753
13	0,2786	3,816	9,9226	16,7078	33,6707	50,6336	67,5964	337,9822
14	0,3151	4,3152	11,2208	18,8936	38,0758	57,2579	76,44	382,2001
15	0,3422	4,6859	12,1848	20,5168	41,3469	62,177	83,007	415,0351

Для використання більшої кількості антен МІМО 8 на 8, що характерно для 5G мереж пропускна здатність збільшиться на 8 разів для кожного значення наведеного в таблиці вище. Таким чином, коли користувач знаходиться близько до базової станції для якого CQI дорівнює 15 та доступна для нього смуга становить 100 МГц то він зможе отримати швидкість  $415 \text{ Мбіт/с} \cdot 8 = 3,32 \text{ Гбіт/с}$ . Проте потрібно пам'ятати, що така швидкість буде надана при умові, що користувач перебуває під обслуговуванням базової станції лише один. Коли в таких самих радіоумовах буде знаходитись другий користувач, максимальна доступна пропускна здатність між ними двома поділиться порівно, за рахунок однакової частки виділення радіоресурсів (РБ) та становитиме відповідно  $1,16 \text{ Гбіт/с}$ . А коли користувачі знаходяться в різних зонах базової станції з різними радіоумовами, то процес розподілу ресурсів та максимально можлива пропускна здатність залежатиме від алгоритму планування ресурсів RR, PFR, MaxSNR(BestCQI).

### **5.3.2. Удосконалення методу повторного використання частот між сусідніми базовими станціями 5G на основі динамічного принципу розподілу спектра**

Також слід пам'ятати про те, що на практиці покриття сусідніх комірок 5G можуть перекриватись та виділення одних і тих же частотних ресурсів є не допустим у зв'язку із виникненням міжкоміркової інтерференції (рис. 5.15).

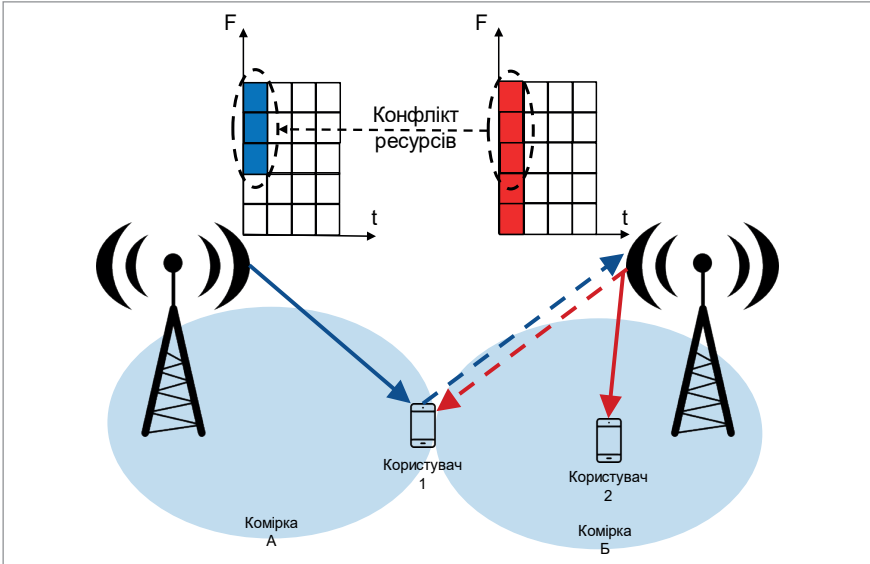


Рис. 5.15. Внутрішньокіліркові завади (інтерференція) у 5G

Схеми повторного використання частот є ефективними методами зменшення інтерференції в однорідних і неоднорідних стільникових мережах, оскільки вони забезпечують хорошу спектральну ефективність. У схемах повторного використання частот вся доступна смуга частот розбивається на більш вузькі підсмуги, кожна з яких виділяється кожній комірці в залежності від коефіцієнта повторного використання частки (FRF). Зі збільшенням значення FRF збільшується відстань між стільниками, які використовують одну і ту ж смугу частот, і, відповідно, зменшується рівень взаємних завад і навпаки.

Схема повторного використання частоти 1 (*reuse-1*), де кожна комірка повторно використовує всю смугу спектра, що дає високу пропускну здатність, але високий рівень завад на краю комірки.

Схема повторного використання частоти 3 (*reuse-3*), коли кожній комірці відводиться одна третина всієї смуги частот, що дозволяє повністю уникнути завад, але має дуже низьку спектральну ефективність.

Схема дробового повторного використання частот (FRR), де кожна комірка ділиться на внутрішню і зовнішню області з однаковою потужністю. Одна частина всієї смуги спектра призначається для внутрішньої області з FRF 1, в той час як решта спектра ділиться на три рівні під-

смуги і виділяється для зовнішніх областей з FRF 3. Схема FFR дозволяє досягти високої пропускну здатності і знизити рівень взаємних завад .

*Схема м'якого повторного використання частот (SFR).* Ця схема не тільки знижує рівень взаємних завад, але й підвищує SINR для користувачів на межі стільника (CEU) за рахунок збільшення їх потужності передавання (PCEU). У схемі SFR третина всієї смуги спектра призначається зовнішнім регіонам (FRF = 3) з більш високою PCEU, в той час як весь спектр може бути призначений користувачам центру стільника (CCU) з меншою потужністю передавання (PCCU).

Конструктивні параметри схеми повторного використання частот, такі як розмір внутрішньої і зовнішньої областей і виділені смуги частот для кожної з них, можуть динамічно коригуватися для поліпшення її характеристик з точки зору зниження ICI і ефективності використання спектра .

Основні схеми повторного використання частот проілюстровані нижче і представлені на рис. 5.16.

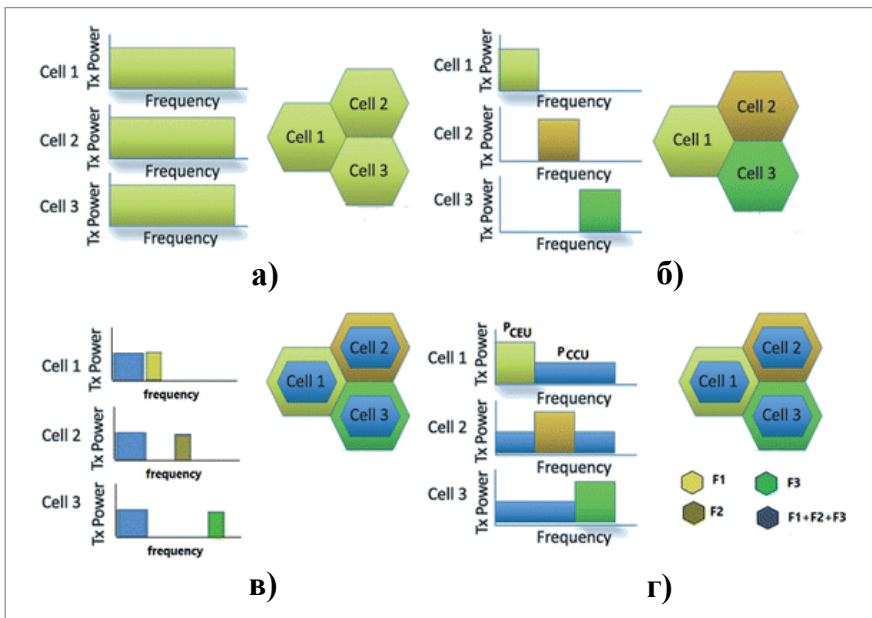


Рис. 5.16. Схеми повторного використання частоти [61].  
 а) повторне використання однієї частоти; б) повторне використання трьох частот; в) дробове використання частоти;  
 г) м'яке використання частоти

Однак, при динамічному попиті на трафік і щільному нерівномірному розподілі користувачького навантаження, відомі вищезгадані методи повторного використання частот призводять до низького завантаження спектра в одних стільниках і дефіциту спектра в інших. Через те, що виділення спектра між центральною і граничною коміркою відбувається статичним методом ефективність використання всього спектра зменшується.

В даній роботі запропоновано метод динамічного повторного використання частот для різних розмірів комірок, згідно з яким кожна комірка розбивається на дві зони – центральну та граничну.

Таким чином, призначення піднесучих відбувається в залежності від розташування користувача в тій чи іншій зоні. Коефіцієнт повторного використання частоти в центральній зоні дорівнює 1, отже, всі користувачі цієї зони у всіх сусідніх комірках отримують частоти з однієї смуги, а користувачі на краю осередку обслуговуються з коефіцієнтом повторного використання частоти, що дорівнює 3.

На відміну від відомого методу часткового повторного використання частот, де розподіл загальної смуги частот відбувається статично, запропонований метод динамічно визначає розподіл смуги частот між центральною зоною і зоною на краю стільника в залежності від розташування навантаження. Враховуючи те, що співвідношення сигнал/шум є гарним показником відстані між користувачем та БС, середнє отримане співвідношення сигнал/шум в середині стільника використовується для класифікації користувачів як гранична зона комірки (LCA) або центральна зона комірки (CCA). БС ідентифікує користувачів зі значенням співвідношення сигнал/шум, меншим за порогове значення, як користувачів у прикордонній зоні, тоді як користувачі зі значенням співвідношення сигнал/шум, більшим за порогове значення, ідентифікуються як користувачі в центральній зоні. Якщо користувачі нерівномірно розподілені в комірці, то кожна зона буде мати різну кількість користувачів. Отже, якщо кількість користувачів у зоні більша, то більша пропускна здатність необхідна для цієї зони, що, в свою чергу, вимагає більш широкої смуги пропускання каналу зв'язку. Для кожної зони важливо динамічно розподіляти спектр за потребою, а схема фіксованого та динамічного розподілу частот показана на рис. 5.17.

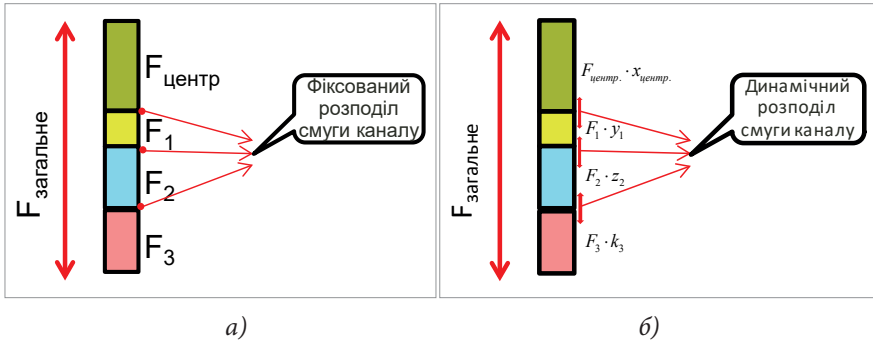


Рис. 5.17. а). Фіксований розподіл смуги частот між зонами комірок (існуючий підхід); б). Динамічний розподіл смуги частот між зонами комірок (запропонований підхід) [61]

Процентне співвідношення смуги частот при динамічному розподілі частот показано на рис. 5.18.

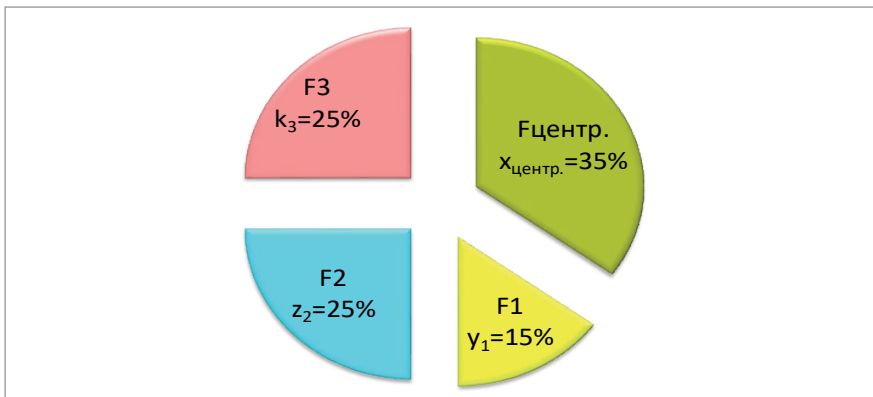


Рис. 5.18. Процентне співвідношення смуги частот при динамічному розподілі частот

Відповідно, запропоновано адаптивний метод управління ресурсами для існуючих мереж 5G, що дозволяє обслуговувати користувачів на границі стільника та в центральній зоні з необхідним рівнем якості. Крім того, уникаються невикористані ресурси мережі та міжстільникові перешкоди, а загальна пропускна здатність системи збільшується порівняно з існуючими методами. Таким чином, доцільним є проведення моделювання процесу розподілу ресурсів між користувачами із врахуванням схеми повторного використання частот та динамічним розподілом їх частки між граничними та центральними областями комірки.

### 5.3.3. Розробка імітаційної моделі для дослідження процесу розподілу ресурсів та повторного використання частот між сусідніми комітками мережі 4G/5G

Під час роботи буде продемонстрована вдосконалена вище розроблена імітаційна модель, яка дозволить дослідити процес розподілу ресурсів та повторного використання частот, зокрема:

- робота стандартної мережі без змін;
- робота стандартної мережі з модифікованим динамічним розподілом (зміна порядку обслуговування пакетів та введення можливості вибору якості обслуговування).

Основна ідея моделювання полягає в розрахунку необхідних ресурсів, що вимагаються користувачами базових станцій, та динамічному розподілі ресурсів мережі шляхом ефективного виділення ширини каналу між центральними та граничними зонами БС. А також моделювання націлене на дослідження зменшення енергетичного споживання мережі в умовах переведення їх у сплячий стан через відсутність в ній користувачів для обслуговування.

Далі ми розглянемо загальну структуру мережі та детально проаналізуємо кожну складову програми. Мережа моделюється за допомогою мови програмування JavaScript. Тому при детальному розгляді описуються всі класи програми та алгоритми їх функціонування, як окремо, так і в комплексі.

Перш ніж приступити до роботи, досліджується мережа ініціалізується. Тут налаштовується кількість базових станцій, діапазон частот, кількість користувачів та параметри. Крім того, встановлюються з'єднання між користувачами та базовими станціями і розраховуються ресурси.

При ініціалізації програма виконує безпосередньо моделювання мережі, яке можна розділити на наступні складові:

- Генерація навантаження користувачами мережі.
- Визначення місцезнаходження користувачів мережі.
- Розрахунок навантаження користувачів мережі.
- Розрахунок навантаження в різних зонах базової станції.
- Передача даних до загальної бази даних.



- ▶ Аналіз даних та формування динамічного коефіцієнта розподілу частот.
- ▶ Перерозподіл ресурсів базових станцій.
- ▶ Збір мережевої статистики та оновлення схем.

З кожною наступною ітерацією цикл повторюється і замикається.

На рис. 5.19 зображено модель мережі з базовими станціями. Також можна побачити динамічно розподілені ресурси, які формуються в цій мережі на кожній ітерації в залежності від навантаження на мережу. Кожне коло символізує зону покриття базової станції. Самі базові станції розташовані в центрі цих кіл. У центрі кола є дві зони, центральна (ЦПК) та гранична зона комірки (ГПК).

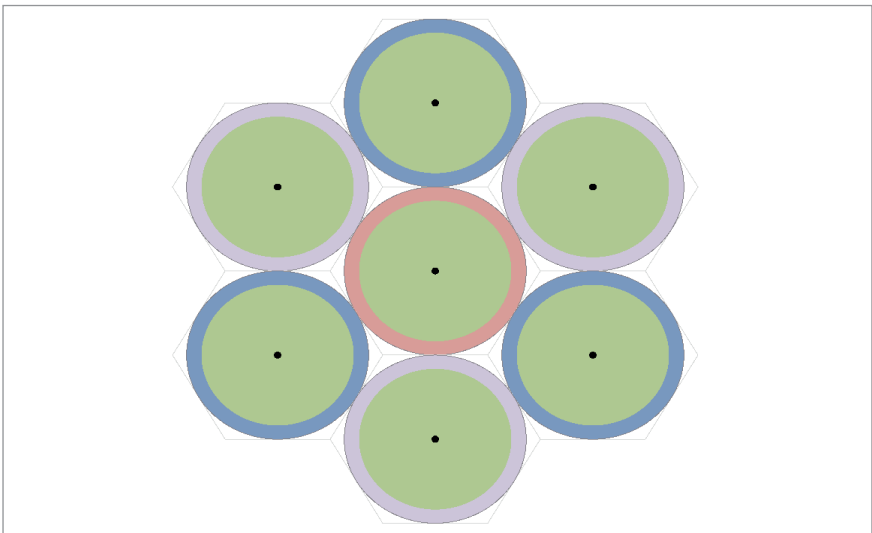


Рис. 5.19. Імітаційна модель досліджуваної 4G/5G мережі

### Генерація навантаження абонентами мережі

Генерація навантаження від абонентів відбувається в кілька етапів:

- ▶ Генерація сеансу і вибір його параметрів, таких як час використання сеансу, тип сервісу;
- ▶ Генерація трафіка для сесії до її закінчення;
- ▶ Після завершення – генерація нового трафіка з новими параметрами.

Існує сім типів послуг, які можуть передаватися мережею, обраною в цій програмі:

- ▶ потокове відео (480p);
- ▶ перегляд відео (720p);
- ▶ перегляд відео (1080p);
- ▶ відеоконференції;
- ▶ перегляд вебсторінок;
- ▶ e-mail;
- ▶ IP-телефонія.

Ймовірнісний розподіл використання послуг було обрано з урахуванням середнього використання абонентами сучасних мереж (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2

### Еквівалентний розподіл використання сервісів в мережі

Тип сервісу	Відсотковий еквівалент, %
Відео із розширенням 480p	30
Відео із розширенням 720p	15
Відео із розширенням 1080p	5
Відеоконференція	20
Перегляд вебресурсів	22
E-mail	21
VoIP	2

Усі види сервісу мають власний параметр, такий як необхідний трафік для стабільної роботи. Параметри представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

### Параметри сервісів

Послуги	Необхідний трафік для стабільної роботи(МБ/с)
Перегляд відео 480p	1
Перегляд відео 720p	4
Перегляд відео 1080p	10
Відеоконференція	5
Перегляд вебресурсів	2
E-mail	0.5
IP-телефонія	1

Після встановлення абонентом сеансу зв'язку на кожній мережевій ітерації будуть генеруватися сесії з відповідними параметрами.

### ***Визначення місцезнаходження абонентів в мережі***

У розробленій моделі кожен користувач містить власні дані про своє місцезнаходження. Відповідно, на кожній ітерації дані про місцезнаходження заносяться в базу даних. На кожній ітерації моделі місцезнаходження змінюється випадковим чином згідно з випадковим розподілом.

В процесі обробки цих даних відбувається їх зберігання та виведення графіків в залежності від кількості абонентів в зоні покриття базової станції. На графіках відображається кількість активних та пасивних абонентів. Таким чином, зберігається інформація по кожному абоненту, який в даний момент знаходиться в зоні покриття базової станції.

### ***Розрахунок абонентського навантаження мережі***

Кожен абонент запитує необхідні ресурси для визначення власних потреб, які заносяться в таблицю даних для кожної базової станції.

На кожній ітерації базова станція збирає всі дані від активних клієнтів і потім розраховує місцезнаходження користувача. Якщо користувач активний, тобто вимагає виділення ресурсів, виконується аналіз ресурсів, які запитує користувач. Також визначається, в якій зоні базової станції знаходиться користувач. В процесі обробки даних базової станції в розробленій моделі дані будуть зберігатися в базі даних для подальшого виведення графіків з інформацією про користувачів базової станції.

При використанні стандартного методу повторного використання ці дані часто не враховуються. При використанні запропонованого методу дані пропускаються через відповідний алгоритм. Більш детально робота нового методу буде розглянута пізніше.

### ***Розрахунок навантаження в різних зонах базової станції***

Кожна базова станція містить список користувачів, список активних та пасивних користувачів, ідентифікатор імені вузла та таблицю розподілу навантаження. Також базова станція має відповідні методи

для створення розрахунку зони, в якій знаходиться користувач. Зазначене необхідне для подальшого алгоритму, який буде полягати в аналізі зони, в якій знаходиться користувач, та ресурсів, які йому необхідні. Після чого відбувається підрахунок кількості активних абонентів в різних зонах базової станції.

### ***Відправлення даних до бази даних***

На кожній ітерації абоненти відправляють згенеровані дані на відповідну базову станцію, яка їх обслуговує. Після зчитування даних виконується аналіз ресурсів мережі та можливих вільних ресурсів. Для статистичних цілей абоненти зберігають метрики для кожної ітерації, такі як: середній час обслуговування пакетів; необхідна пропускна здатність, місцезнаходження, швидкість переміщення абонента, час конкретної сесії, кількість активних сесій.

### ***Аналіз даних та формування динамічного коефіцієнта розподілу частот***

Саме на цьому етапі проводиться аналіз отриманих даних по кожному користувачеві на базовій станції. Кожна базова станція, аналізуючи попередній коефіцієнт розподілу ресурсу базової станції та аналізуючи отримані від абонентів дані про їх місцезнаходження та їх потреби, робить висновок про необхідний коефіцієнт розподілу ресурсу базової станції. Якщо вона надає ресурси для задоволення потреб користувачів, базова станція робить висновок, що їй не потрібно змінювати коефіцієнт розподілу ресурсів. Якщо надані ресурси не відповідають потребам користувачів, співвідношення буде скориговано.

### ***Перерозподіл ресурсів базових станцій***

Після аналізу, обробки та перерахунку динамічного коефіцієнта розподілу частот проводиться перерозподіл ресурсів базових станцій. Таким чином, на центральну та граничну зони комірки буде виділятися інший спектр ресурсів, ніж раніше. Особливістю цього методу є те, що при динамічному розподілі ресурсів можна спрогнозувати втрати, які будуть отримані через невикориста-

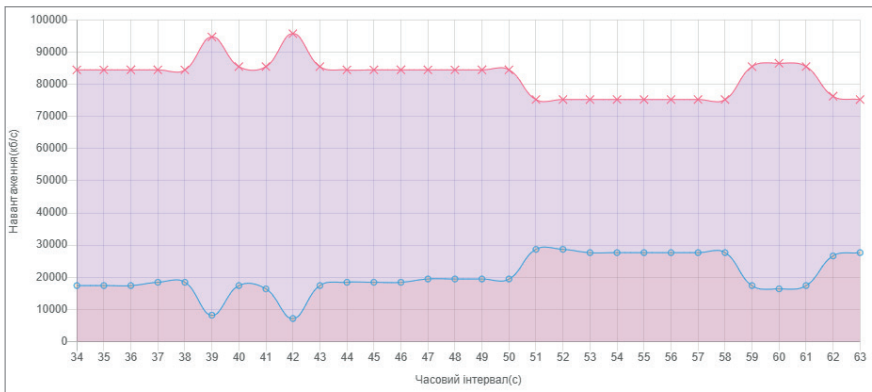
ні ресурси для центральної або граничної області комірки, і при необхідності розподілити ці ресурси відповідно на граничну або центральну область комірки. Основним недоліком цього варіанту є споживання додаткових ресурсів для виконання необхідних розрахунків. Оптимальним варіантом у цьому випадку є введення додаткового елементу мережі – контролера, який візьме на себе процес розрахунку та збору абонентської інформації, збору статистики, аналізу мережі тощо.

### ***Збір інформації для оновлення діаграм та відображення графіків***

У цій моделі кожна ітерація програми збирає дані про продуктивність мережі. По-перше, кожен абонент, як вже згадувалося раніше, надсилає на базову станцію інформацію про своє місцезнаходження та необхідний йому трафік. У свою чергу, базові станції отримують цю інформацію від кожного клієнта. Потім ця інформація аналогічним чином вноситься до бази даних, зібраної кожною базовою станцією. В результаті маємо перелік даних абонентів та їх активних підключень до мобільної мережі.

У цій моделі графіки відображають кілька основних типів інформації.

На рис. 5.20 показано розподіл навантаження в комірці для центральної області комірки та граничної області комірки відповідно.



*Рис. 5.20. Розподіл навантаження між центральною(червона) та граничною (синя) зоною комірки*

На рис. 5.21 виводимо розподіл активності користувачів відповідно до вибраної із семи БС.

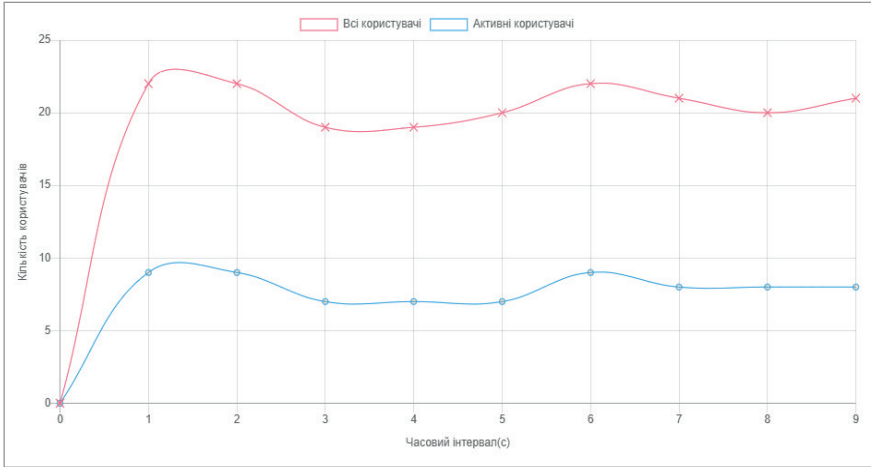


Рис. 5.21. Розподіл активності користувачів в мережі

Розподіл користувачів відповідно до їх розташування в комірці показано на рис. 5.22 для центральної області комірки та області на границі комірки відповідно.

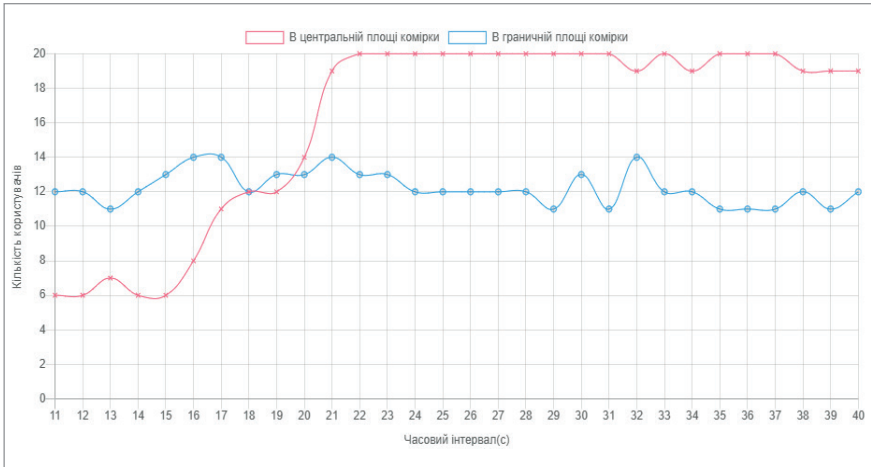


Рис. 5.22. Розподіл користувачів по місцезнаходженню

У наступному розділі проводитиметься дослідження запропонованих рішень щодо ефективного розподілу ресурсів між користувачами центральної та граничної зони обслуговування.

### 5.3.4. Інтерфейс імітаційної моделі мережі мобільного зв'язку для проведення дослідження щодо ефективності запропонованих рішень

В розділі представлено програму для проведення моделювання роботи мережі та отримані за її допомогою результати.

Вигляд програми в загальному вигляді наведено на рис. 5.23.



Рис. 5.23. Інтерфейс імітаційної моделі досліджуваної мобільної мережі

Інтерфейс програми розділений на дві області:

- ▶ імітаційна мобільна мережа, до складу якої входить 7 базових станцій;
- ▶ відображення графічної інформації обраної базової станції.

Ця програма оснащена графічним інтерфейсом користувача, за яким можна налаштувати інтенсивність навантаження та визначити кількість активних користувачів. До того ж, можна додати активних користувачів, клацнувши лівою клавішею мишки в межах області базової станції. Є змога графічно співставити запроповану модель з існуючою моделлю. Присутня також кнопка для зупинки або запуску відтворення моделі. Перемикач відповідає за спосіб розподілу. Активувати – активувати динамічний метод розподілу ресурсів. Деактивувати – активувати стандартний метод.

Передбачена можливість вибору базової станції, для якої буде виконуватися аналіз та відображення відповідних графіків.

Відображаються наступні графіки:

- Розподіл навантаження у комірці;
- Загальне навантаження у комірці;
- Число користувачів в комірці;
- Розподіл абонентів;
- Активний трафік.

Секції цієї програми загалом можна класифікувати як основні та додаткові.

Додаткові секції включають в себе ті, що показують мережеву статистику, але не залежать від застосовуваного методу розподілу. Іншими словами, при зміні цього методу інформація на цих вкладках буде залишатися незмінною. Вони передбачені для відображення більш детальної статистики мережі. Розглянемо ці вкладки не перемикаючи метод обслуговування пактів.

Основними секціями вважаються ті, у яких дані змінюються при переході методу обслуговування пакетів даних у мережі. Вони несуть найбільшу інформаційну цінність, тому що дозволяють порівнювати ефективність методів пакетного обслуговування. Виходячи з даних, наведених на цих вкладках, виконаємо зіставлення двох методів – традиційного та запропонованого. Розглянемо результати функціонування мережі, представлені на даних вкладках, при перемиканні способу обслуговування.

---

#### **5.4. Дослідження ефективності методу дробового повторного використання частот з статичним та динамічним розподілом ресурсів між граничною і центральною зоною базової станції**

Основним показником ефективності запропонованого методу є показник, який відображає відсоток зниження пропускної здатності. Даний показник відображає на скільки зменшується пропускна здатність абонента, який знаходиться у мобільній мережі. Зменшення пропускної здатності відбувається через надмірну концентрацію абонентів в базовій станції та некоректний розподіл ресурсів самої базової станції. Запропонована модель буде працювати таким чином, що



буде покращувати цей показник, тобто відбудеться зменшення відсотку зниження пропускної здатності, за рахунок динамічного розподілу ресурсів та простою ресурсів, які не використовуються.

Для дослідження ефективності методу розглянуто декілька випадків модуляції мережі мобільного зв'язку:

- Користувачі рівномірно розподілені в мережі і навантаження рівномірно сконцентроване у всіх зонах комірки.
- Користувачі розподілені в зоні центральної комірки, а навантаження зосереджене в зоні центральної комірки.
- Користувачі розподілені в граничному просторі комірки, а навантаження зосереджене в граничному просторі комірки.

Розглянемо кожну ситуацію окремо, щоб проаналізувати переваги розробленого методу порівняно з існуючим.

***Користувачі рівномірно розподілені по мережі, а навантаження рівномірно сконцентроване у всіх зонах комірок***

#### ***Опис ситуації***

Ситуація передбачає мобільну мережу, в котрій користувачі рівномірно розподілені по всій мережі. Навантаження в цій ситуації буде також рівномірним. Навантаження в центральній зоні комірки менше максимально допустимої пропускної здатності для центральної зони комірки, а навантаження в граничній зоні комірки менше максимально допустимої пропускної здатності для граничної зони комірки.

#### ***Відтворення ситуації з використанням запропонованої моделі***

Під час завантаження програми розподіл користувачів буде наближеним до цієї ситуації. Тому, дивлячись на розподіл користувачів в зоні дії базової станції, слід звернути увагу на кількість користувачів центральної та прикордонної зони дії базової станції. Для налаштування моделі можна додати користувачів власноруч в потрібну зону дії базової станції.

#### ***Результати моделювання***

На рис. 5.24 показано розподіл абонентів у зоні покриття базової станції. На цьому рисунку також показано площу центральної комірки та граничну площу комірки. Абоненти розподілені за законом нормального розподілу.

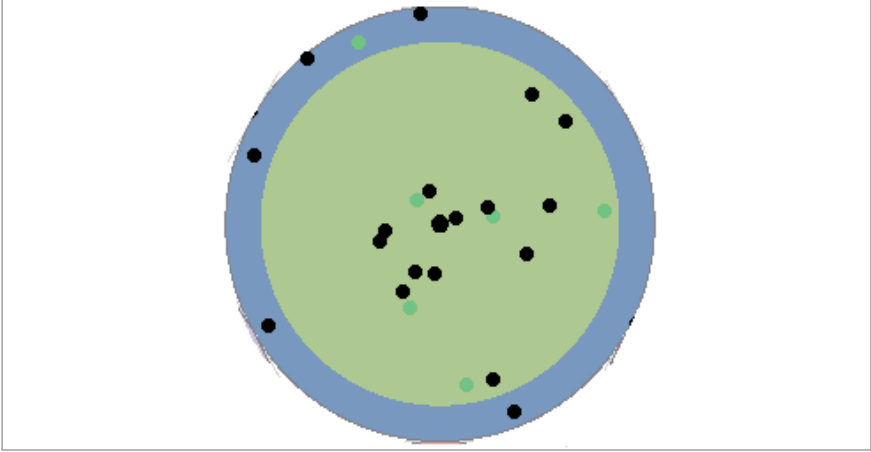


Рис. 5.24. Розподіл абонентів у зоні покриття базової станції

На рис. 5.25 показано розподіл абонентів в центральній області комірки та в граничній області комірки в залежності від відповідного часового інтервалу.

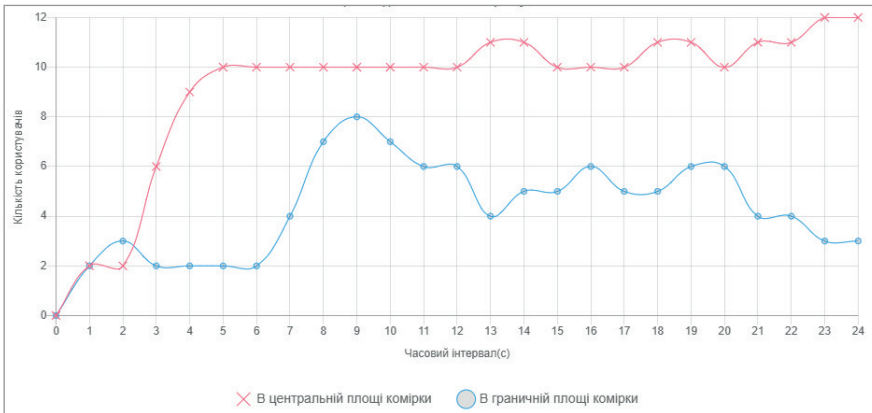


Рис. 5.25. Розподіл абонентів у зоні дії базових станцій відповідно до зон дії базових станцій

На рис. 5.26 показано завантаження базової станції в залежності від відповідного часового інтервалу.

На рис. 5.27 показана діаграма навантаження базової станції. У створеній моделі ця діаграма динамічно змінюється в кожний момент часу. На діаграмі показано навантаження на базову станцію з центральної зони комірки та граничної зони комірки.

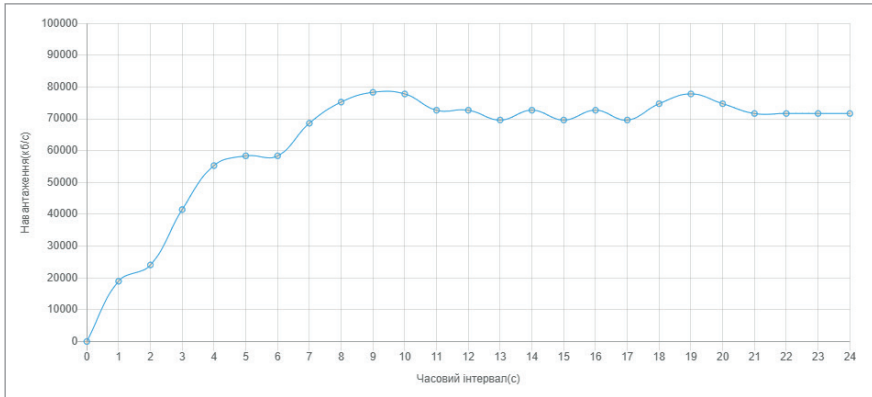


Рис. 5.26. Навантаження базової станції

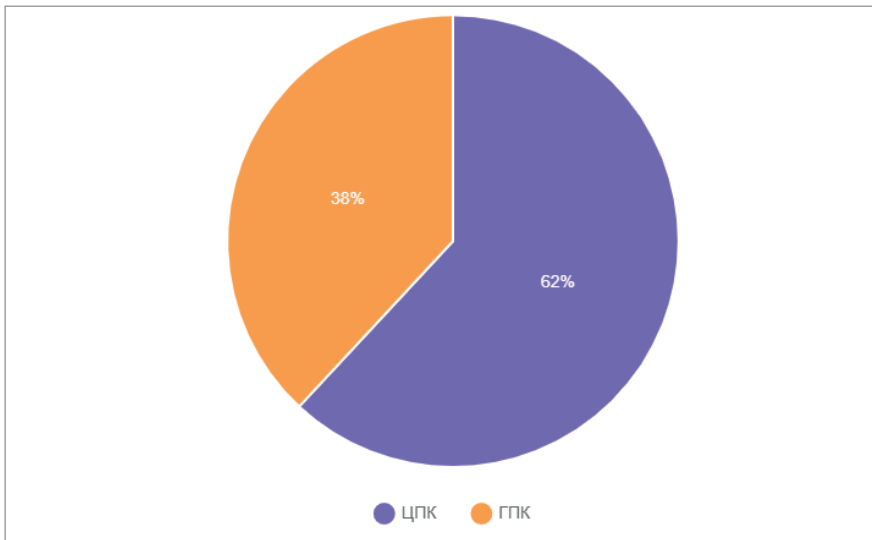


Рис. 5.27. Діаграма розподілу навантаження базової станції

На рис. 5.28 показано розподіл навантаження базової станції, де навантаження в ЦПК – це навантаження, що генерується споживачами в центральній зоні комірки, а навантаження в ГПК – це навантаження, що генерується споживачами в граничній зоні комірки. При цьому спостерігається, що навантаження у двох зонах комірки менше максимально можливої потужності для відповідної зони. Відповідно до цього, можна зробити висновок, що динамічний розподіл ресурсів у даному випадку не потребує застосування.

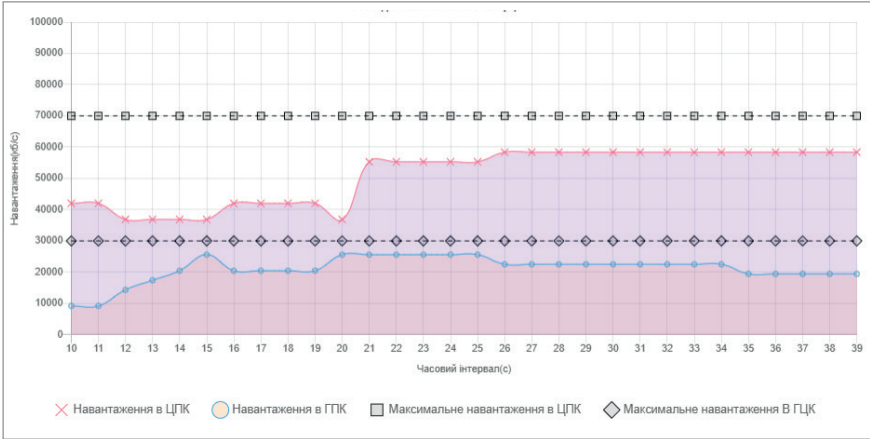


Рис. 5.28. Розподіл навантаження на базовій станції

На рис. 5.29 показано розподіл ресурсів базової станції, який в цьому випадку є статичним на всьому часовому інтервалі. Якщо включити в запропоновану модель динамічний розподіл ресурсів, то графік не зміниться, оскільки не було необхідності змінювати коефіцієнт розподілу ресурсів на всьому часовому інтервалі.

На рис. 5.30 показана схема розподілу ресурсів базової станції. У розробленій моделі ця діаграма динамічно змінюється в кожен момент часу. На діаграмі показано розподіл ресурсів базової станції з центральної зони комірки та граничної зони комірки відповідно.

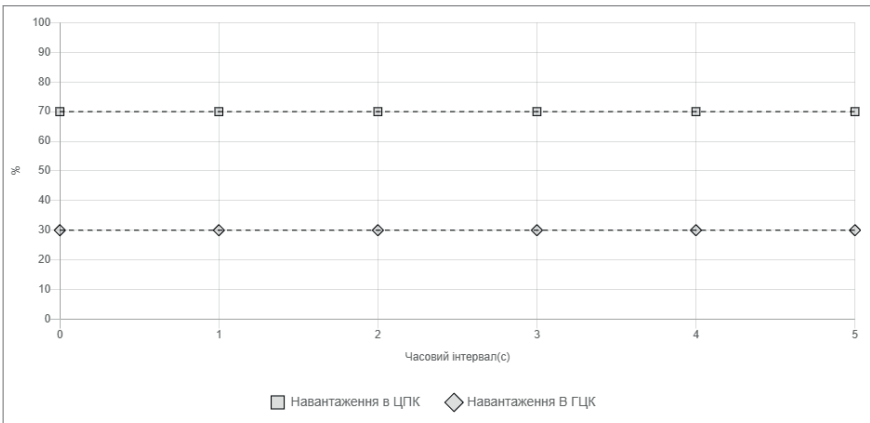


Рис. 5.29. Розподіл ресурсів базової станції

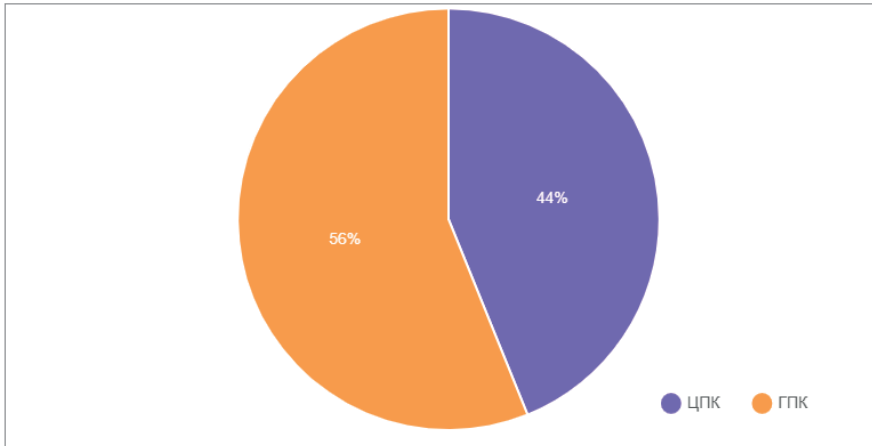


Рис 5.30. Діаграма розподілу ресурсів базової станції

При цьому базова станція працює коректно, правильно виділяючи свої ресурси між абонентами в центральній зоні комірки і абонентами в граничній зоні комірки.

#### **5.4.1. Моделювання та дослідження методу динамічного розподілу ресурсів в умовах, коли більшість користувачів розподілені в центральних зонах комірки**

##### ***Опис ситуації***

Ситуація стосується мережі мобільного зв'язку, де користувачі нерівномірно розподілені в мережі. Зокрема, більшість користувачів будуть розташовані в центральній частині комірки. Дана ситуація може наступити в результаті якоїсь події, наприклад, концерту або спортивного заходу. В цьому випадку навантаження також буде сконцентровано в центральній зоні комірки. При моделюванні навантаження в центральній зоні комірки буде перевищувати максимально допустиму потужність для центральної зони комірки, а навантаження в граничній зоні комірки буде менше максимально допустимої потужності в граничній зоні комірки.

##### ***Відтворення ситуації за допомогою запропонованої моделі***

При перегляді розподілу користувачів на території базової станції потрібно звернути увагу на кількість користувачів в центральній

і граничній площах базової станції. Для коректування моделі можна додати користувачів вручну в потрібну площу базової станції.

### Результати моделювання

На рис. 5.31 показано розподіл абонентів у зоні покриття базової станції. Можна відзначити, що концентрація абонентів у центрі комірки значно вища, ніж концентрація абонентів на границях комірки.

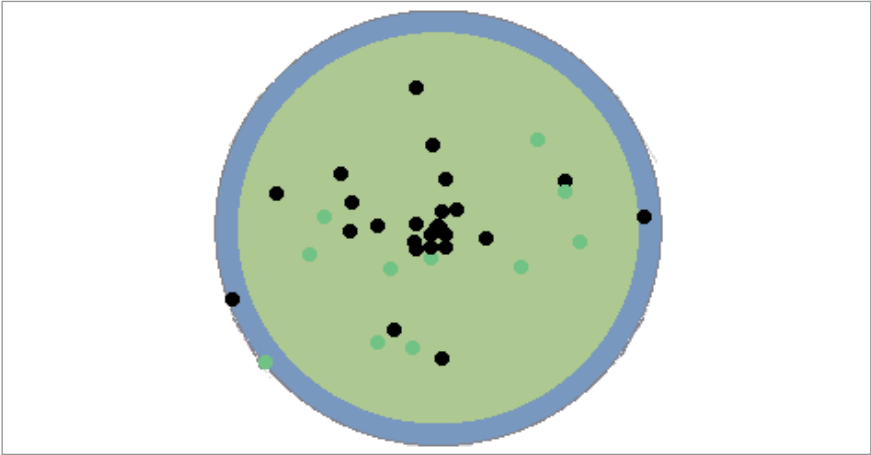


Рис. 5.31. Розподіл абонентів у зоні покриття базової станції – концентрація абонентів у центрі комірки

На рис. 5.32 показано розподіл активних та пасивних абонентів у зоні дії базової станції.

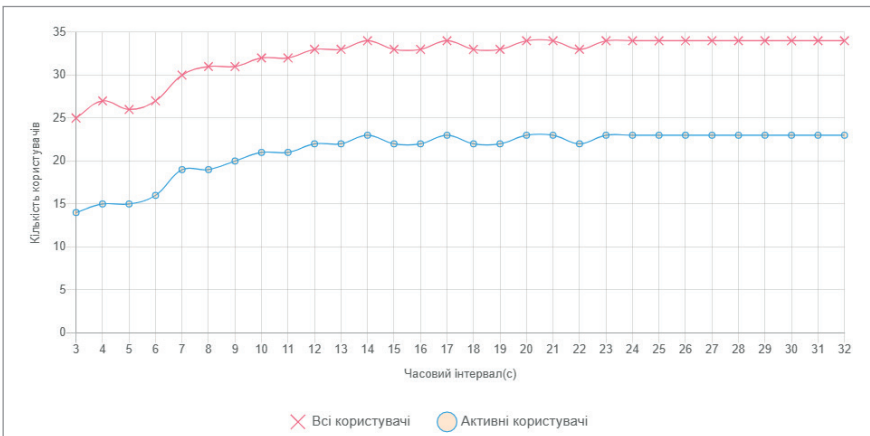


Рис. 5.32. Розподіл активних та пасивних абонентів у зоні покриття базової станції

На рис. 5.33 показано розподіл активних абонентів у зоні центральної комірки та у зоні граничної комірки у залежності до певного часового інтервалу. У цьому моделюванні кількість абонентів у центральній зоні стільникового зв'язку знаходиться в межах 20 абонентів, а для граничної зони стільникового зв'язку кількість абонентів знаходиться в межах 3–4 абонентів.

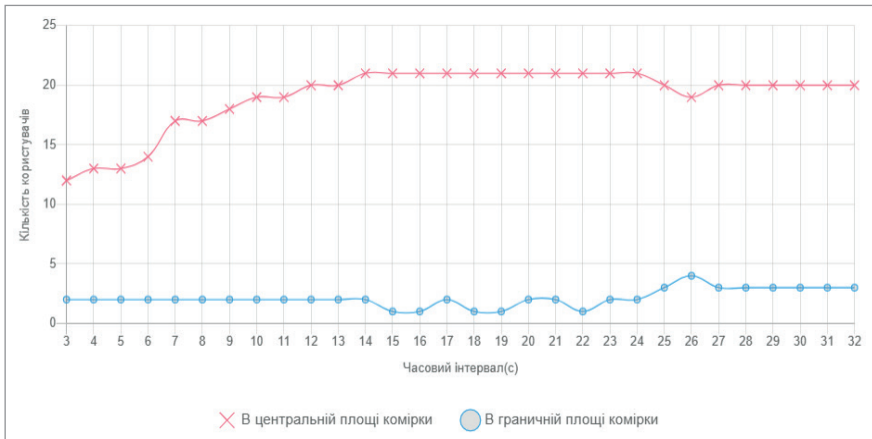


Рис. 5.33. Розподіл абонентів у зоні дії базових станцій за районами розташування базових станцій

На рис. 5.34 показано динаміку навантаження на базову станцію. Видно, що зі збільшенням кількості користувачів в зоні дії базової станції зростає і навантаження.

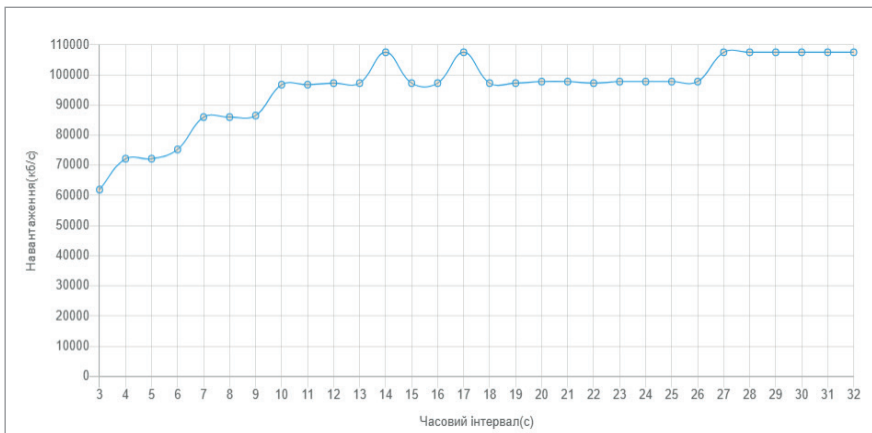


Рис. 5.34. Завантаженість базових станцій

На рис. 5.35 показана динаміка навантаження на базову станцію в залежності від площі комірки.

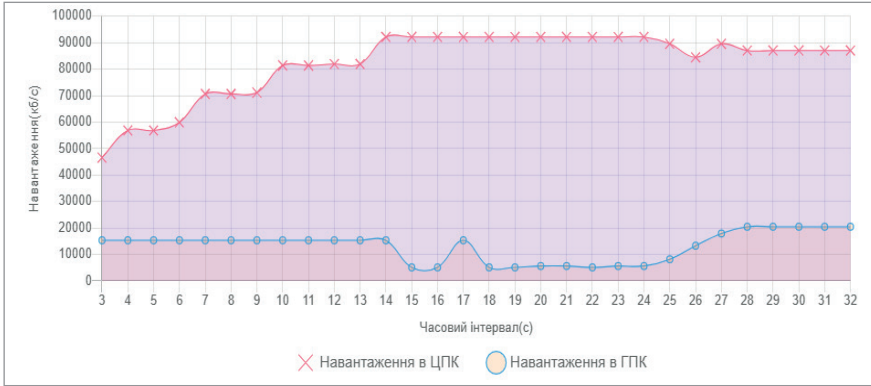


Рис. 5.35. Динаміка навантаження в центральній та граничній зоні комірки

На рис. 5.36 показано розподіл навантаження та ресурсів базової станції для звичайного методу. Можна спостерігати, що в деякий період часу навантаження в центральній зоні комірки перевищить максимальну пропускну здатність.

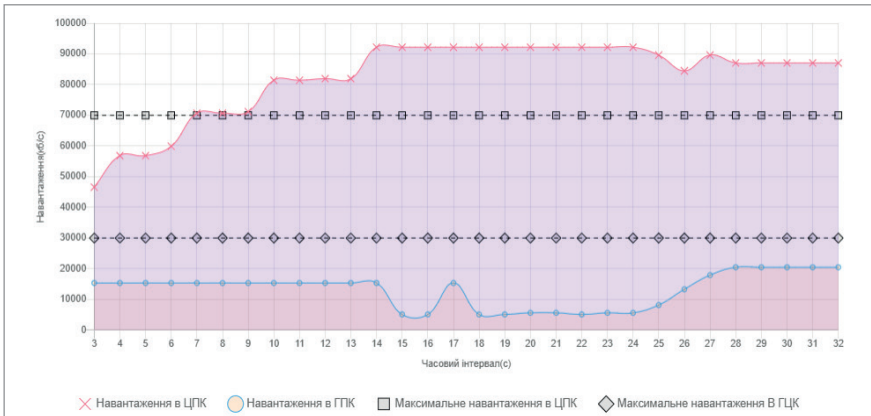


Рис. 5.36. Динаміка навантаження та розподіл ресурсів базової станції

В даному прикладі для користувачів в центральній зоні комірки базової станції будуть спостерігатися втрати при передаванні внаслідок того, що максимальна ширина смуги пропускання дозволяє підтримувати навантаження в 70 Мбіт/с.



На рис. 5.37 показано динаміку відсотка зниження пропускну здатності центральної зони комірки. Значення коливається від 0 % до 32 %.

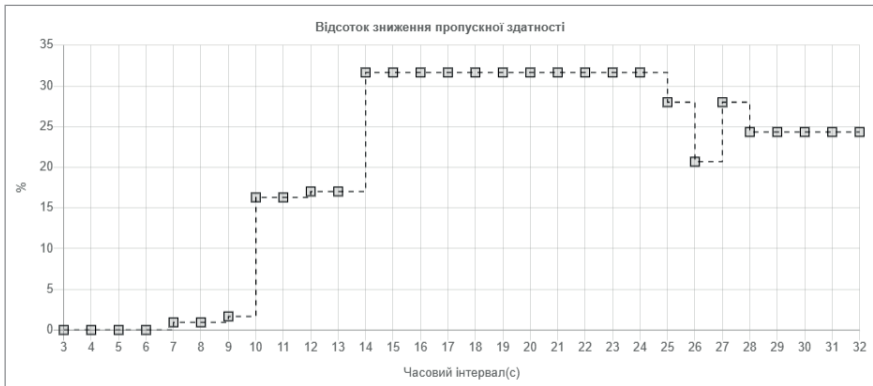


Рис. 5.37. Динаміка відсотку зниження пропускну здатності центральної зони комірки

Пропонована модель використовує алгоритм, який дозволяє розподіляти мережеві ресурси в залежності від навантаження на конкретній ділянці. На рисунках 5.38 та 5.39 наведено результати роботи запропонованого алгоритму моделі, а саме динаміку трафіка розподілу ресурсів базової станції. У момент збільшення навантаження в зоні центральної комірки відбувається перерозподіл ресурсів базової станції.

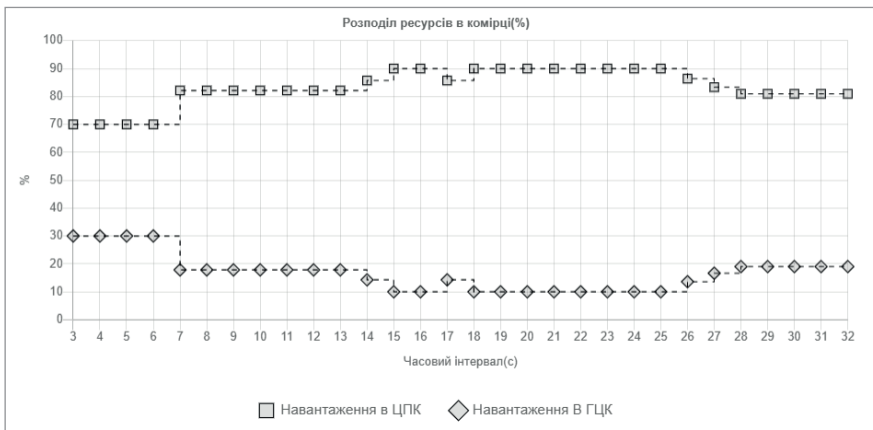


Рис. 5.38. Динаміка розподілу ресурсів базової станції при використанні запропонованого методу

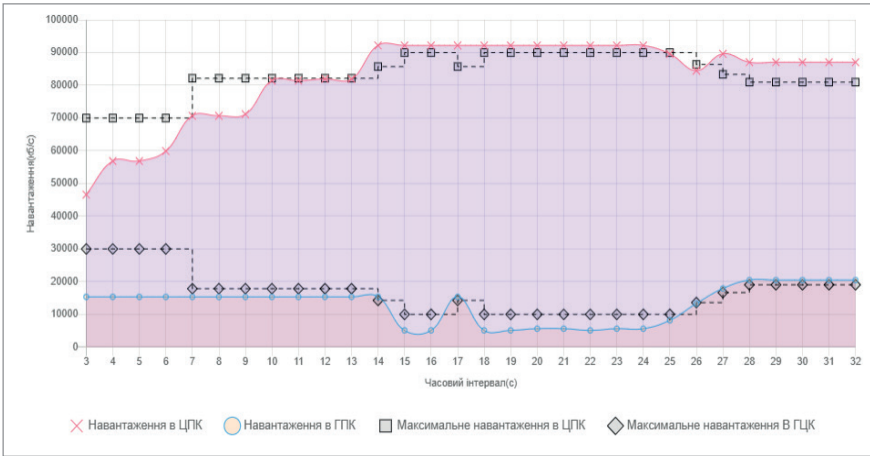


Рис. 5.39. Розподіл навантаження та ресурсів базової станції з використанням запропонованого методу

На рис. 5.40 наведено динаміку відсотка зниження пропускної здатності за запропованою моделлю. Значення коливається від 0 до 8 %. Зменшення пов'язано з використанням нерозподілених мережевих ресурсів.

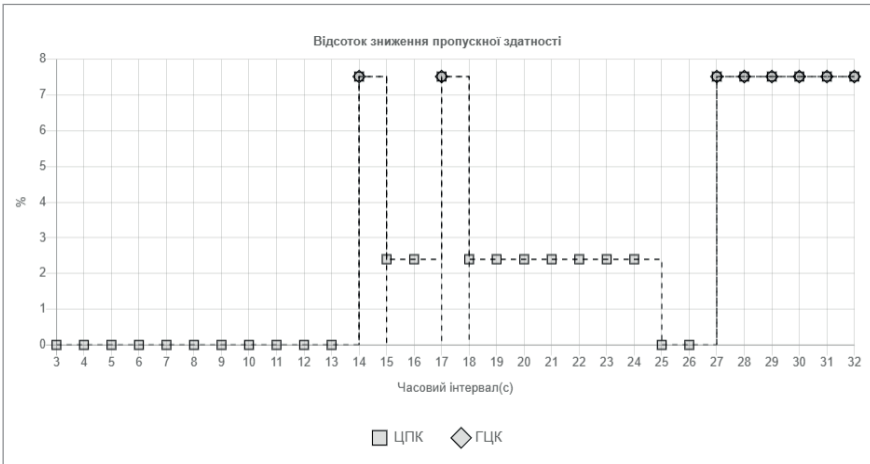


Рис. 5.40. Динаміка відсотка зниження пропускної здатності з використанням запропонованого методу

Результатом використання запропонованого методу є можливість досягти покращення швидкості зниження пропускної здатності. Під час моделювання було виявлено, що при використанні

стандартного методу розподілу ресурсів відсоток зниження пропускну здатності буде коливатися від 0 до 32 %, але при використанні запропонованого методу розподілу мережевих ресурсів відсоток зниження пропускну здатності було покращено до значень 0–8 %. Однак, слід зауважити, що у стандартному методі відсоток зниження пропускну здатності буде актуальним лише для абонентів центральної зони комірки, натомість у запропонованому методі цей ефект буде спостерігатися як для абонентів граничної зони комірки, так і для абонентів центральної зони комірки.

---

#### **5.4.2. Моделювання та дослідження методу динамічного розподілу ресурсів в умовах, коли більшість користувачів розподілені в граничних зонах комірки**

##### ***Опис ситуації***

Ситуація пов'язана з мережею мобільного зв'язку, де абоненти нерівномірно розподілені в мережі. Зокрема, більшість абонентів будуть знаходитися в граничній зоні дії мобільного зв'язку. Навантаження в цьому випадку також буде зосереджене в області границі комірки. В ході моделювання навантаження в граничній зоні комірки буде перевищувати максимально допустиму пропускну здатність для центральної зони комірки, а навантаження в граничній зоні комірки буде менше максимально допустимої пропускну здатності в граничній зоні комірки.

##### ***Відтворення ситуації за допомогою запропонованої моделі***

При розгляді розподілу користувачів в зоні дії базової станції слід звернути увагу на кількість користувачів в центральній та граничній зоні дії базової станції. Для налаштування моделі можна додати абонентів власноруч в необхідну зону дії базової станції.

##### ***Результати моделювання***

На рис. 5.41 показано розподіл абонентів у зоні покриття базової станції. Можна відзначити, що концентрація абонентів у граничній зоні комірки значно вища, ніж концентрація абонентів у центральній зоні комірки.

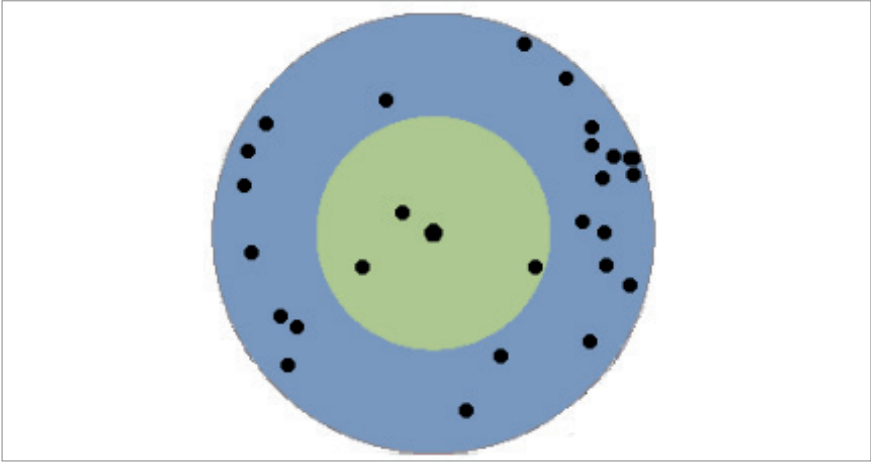


Рис. 5.41. Розподіл абонентів в зоні покриття базової станції – концентрація абонентів в граничній зоні комірки

На рис. 5.42 показано розподіл активних та пасивних абонентів у зоні дії базової станції.

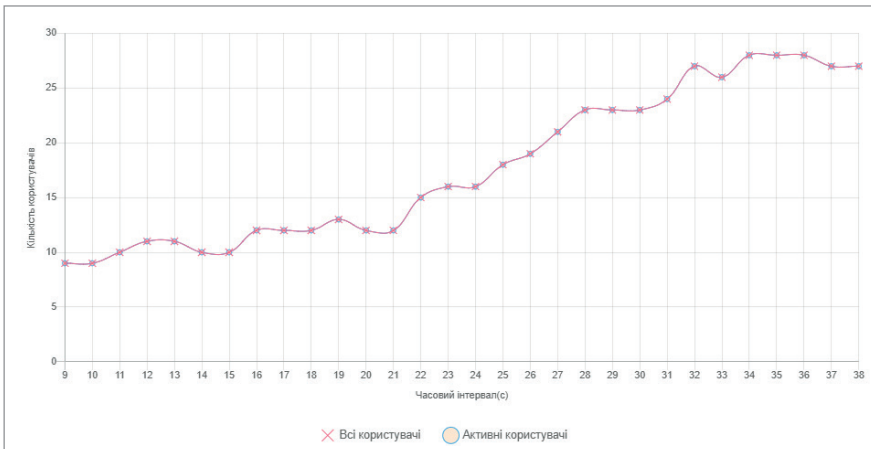


Рис. 5.42. Розподіл абонентів у зоні покриття базової станції

На рис. 5.43 показано розподіл активних абонентів у центральній зоні покриття та граничній зоні покриття мобільного зв'язку за відповідний часовий інтервал. У цьому моделюванні кількість абонентів у граничній зоні комірки знаходиться в радіусі 20 користувачів, а для центральної зони комірки кількість абонентів знаходиться в радіусі 5–6 абонентів.

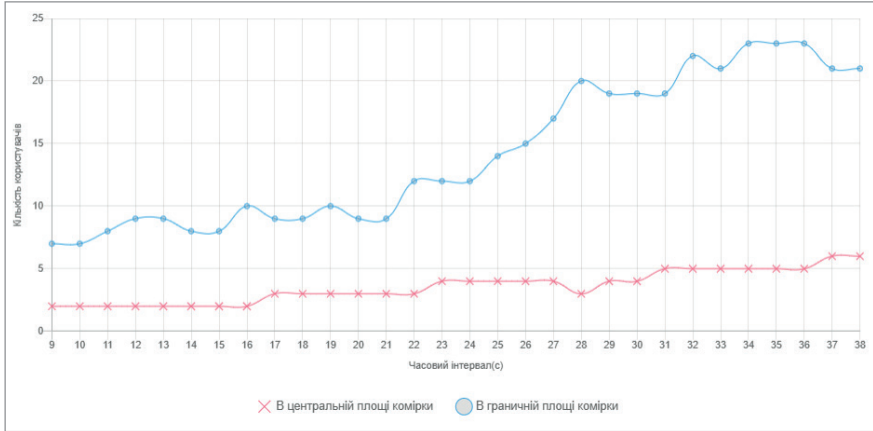


Рис. 5.43. Розподіл абонентів у зоні покриття базових станцій за площею базових станцій

На рис. 5.44 показано динаміку навантаження на базову станцію. Видно, що зі збільшенням кількості абонентів в зоні дії базової станції зростає і навантаження.

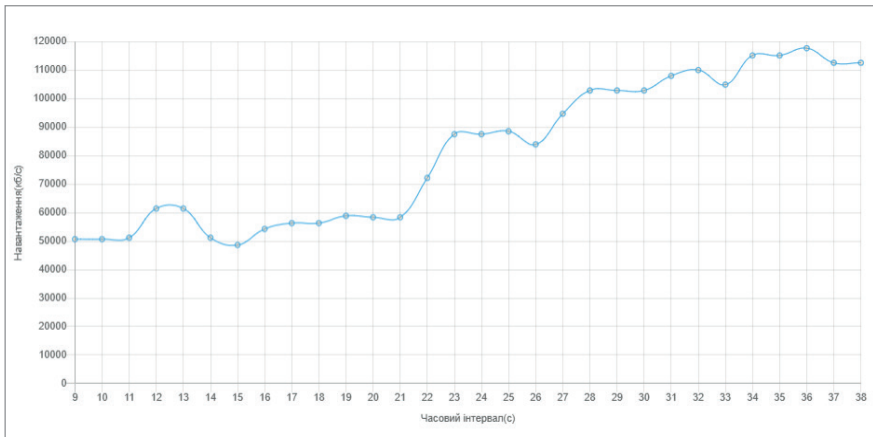


Рис. 5.44. Навантаження базової станції

На рис. 5.45 показана динаміка навантаження на базову станцію в залежності від площі комірки.

На рис. 5.46 представлено розподіл навантаження та ресурсів базової станції при стандартному методі.

Спостерігається, що в будь-який момент часу навантаження в граничній зоні комірки перевищує максимальну пропускну здатність

для граничної зони комірки. А для абонентів центральної зони комірки пропускна здатність значно більша, ніж навантаження в центральній зоні комірки. Відповідно, виникає ситуація, коли для абонентів граничної зони комірки спостерігається дефіцит ресурсів базових станцій, а для абонентів центральної зони комірки спостерігається простій мережевих ресурсів.

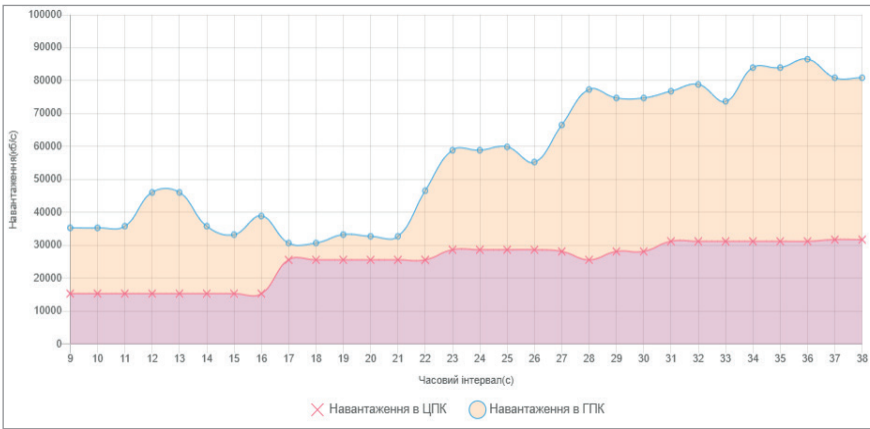


Рис. 5.45. Динаміка навантаження в центральній та граничній зоні комірки

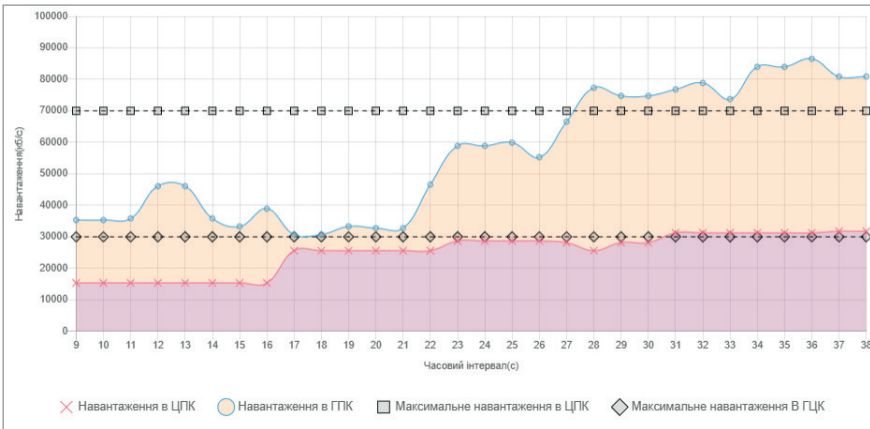


Рис. 5.46. Динаміка навантаження та розподіл ресурсів на базовій станції

При цьому для абонентів, що знаходяться в граничній зоні комірки базової станції, будуть спостерігатися втрати при передаванні через те, що максимальне значення смуги пропускання дозволено підтримувати навантаження в 30 Мбіт/с.

На рис. 5.47 можна спостерігати динаміку відсотка зниження пропусної здатності для граничної зони комірки. Значення коливається від 0 % до 200 %.

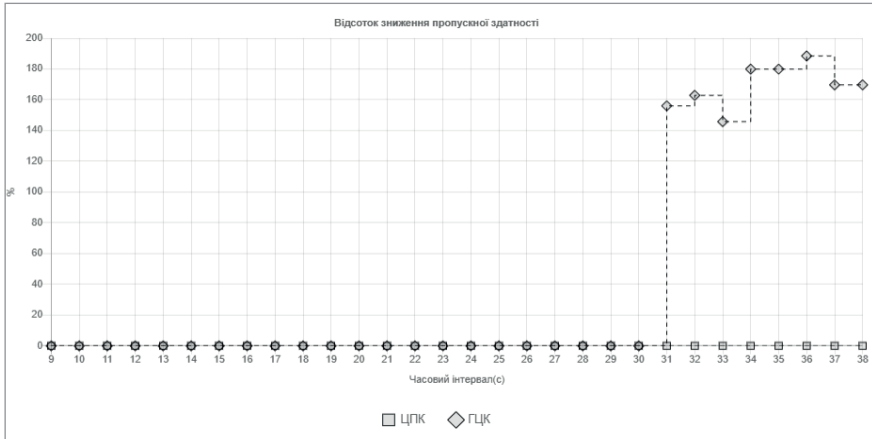


Рис. 5.47. Динаміка відсотка зниження пропусної здатності в ЦПК

Пропонований метод дозволяє розподіляти мережеві ресурси в залежності від навантаження на конкретній ділянці. На рис. 5.48 та 5.49 наведено результати роботи алгоритму запропонованого методу, а саме динаміку руху розподілу ресурсів базових станцій. Під час збільшення навантаження в зоні центральної комірки відбувається перерозподіл ресурсів базової станції.

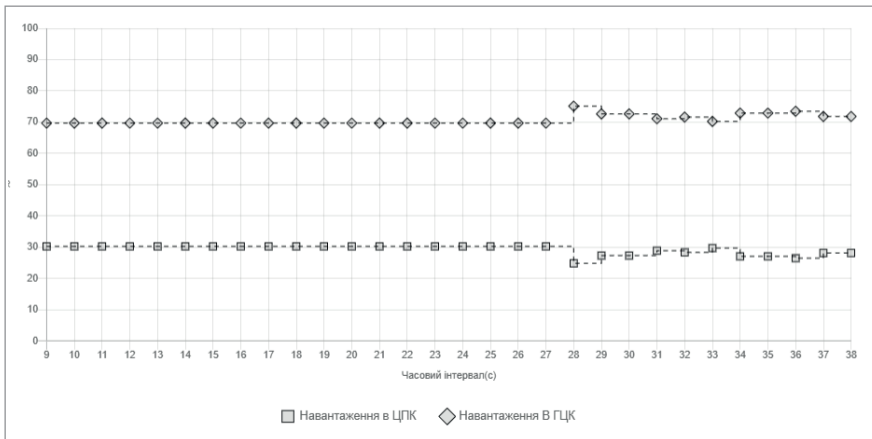


Рис. 5.48. Динаміка розподілу ресурсів базової станції при використанні запропонованого методу

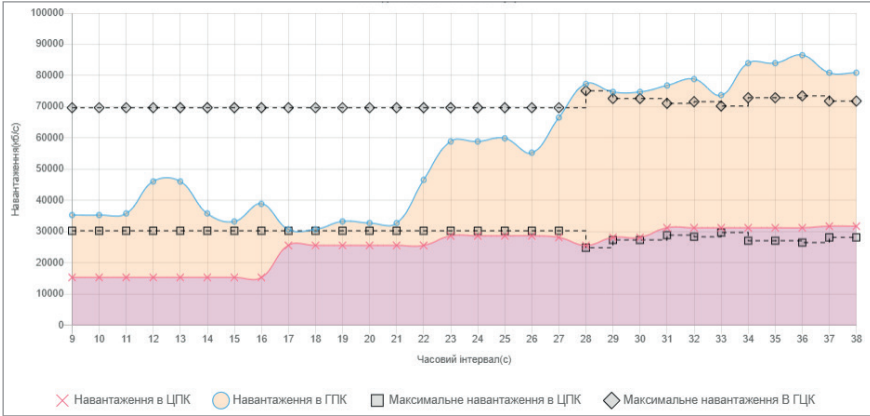


Рис. 5.49. Розподіл навантаження і ресурсів базової станції при використанні запропонованого методу

На рис. 5.50 можемо спостерігати динаміку показника відсотку зниження пропускної здатності при використанні запропонованої моделі. Значення варіюється в межах від 0 до 18 %. Зниження відбувається за рахунок використання нерозподілених ресурсів мережі.

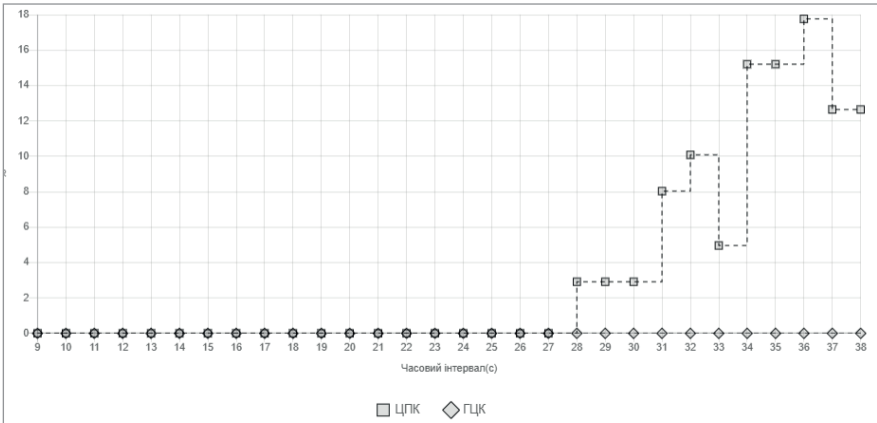


Рис. 5.50. Динаміка відсотка зниження пропускної здатності при використанні запропонованого методу

Результатом використання алгоритму є можливість досягти покращення відсотка зниження пропускної здатності. В ході моделювання було виявлено, що відсоток зниження пропускної здатності буде коливатися від 0 до 200 % при стандартному методі розподілу



ресурсів, але завдяки використанню запропонованого методу розподілу мережевих ресурсів, відсоток зниження пропускної здатності було покращено до значень 0–18 %. Однак, слід зауважити, що у стандартному методі відсоток зниження пропускної здатності буде актуальним лише для користувачів на границі комірки, в той час як у запропонованому методі цей ефект буде присутнім як для користувачів на границі комірки, так і для користувачів в центрі комірки.

### 5.5. Дослідження методу динамічного розподілу радіоресурсів для зменшення енергоспоживання в мережах 5G Advanced з урахуванням вимог QoS

У роботі проведено моделювання та дослідження методу ефективного розподілу радіо ресурсів для зменшення енергетичного споживання мереж 4G/5G. Суть даного методу полягає у тому, що аналізується вхідне навантаження на комірки базової станції, відповідно коли на базових станціях спостерігається відсутність активних користувачів в зоні їх покриття, то базова станція переводиться в енергозберігаючий стан. Таким чином, розглянемо наступний сценарій моделювання, показаний на рис. 5.51.

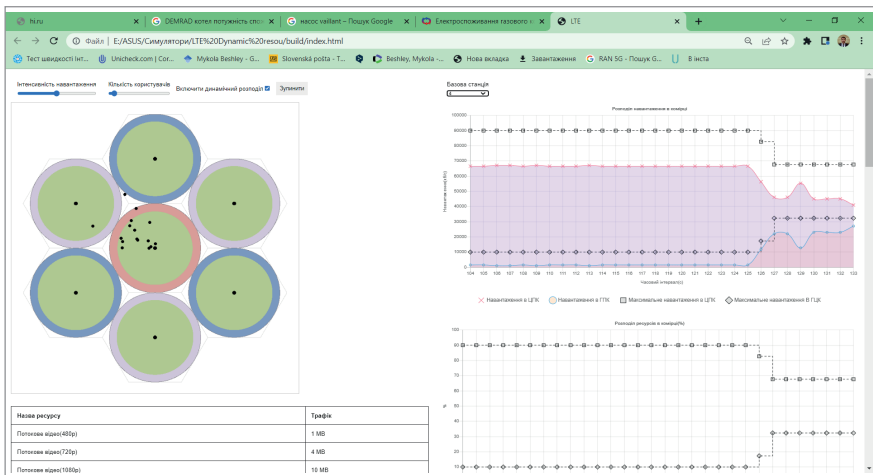


Рис. 5.51. Аналіз локалізації користувачів на базових станціях та навантаження на БС №4

Основне навантаження спостерігається на базовій станції під номером 4, де більшість користувачів залишаються до 126 секунди модельного часу. При традиційному методі повторного використання частот зі статичним розподілом ресурсів, навантаження, створене користувачами, не перевищувало допустимих меж. Однак на 127 секунді автоматично активувався запропонований метод динамічного розподілу ресурсів, який адаптує частку ширини каналу залежно від локалізації користувачів між центральними та граничними зонами комірок. Це дозволяє забезпечити надання якісних послуг, оскільки загальне навантаження, яке генерують користувачі, не перевищує встановлених норм. Таким чином, кожен користувач отримує необхідну пропускну здатність для забезпечення якісного обслуговування.

Крім того, деякі базові станції, зокрема під номерами 2 та 4, обслуговують відносно невелику кількість користувачів у даному сценарії. На рис. 5.52 показано навантаження, яке створюється користувачами на базовій станції №2. А на БС №4 можна спостерігати, як із зміною локалізації користувачів динамічно змінюється розподіл ресурсів між центральною і граничною зонами для забезпечення вимог QoS, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

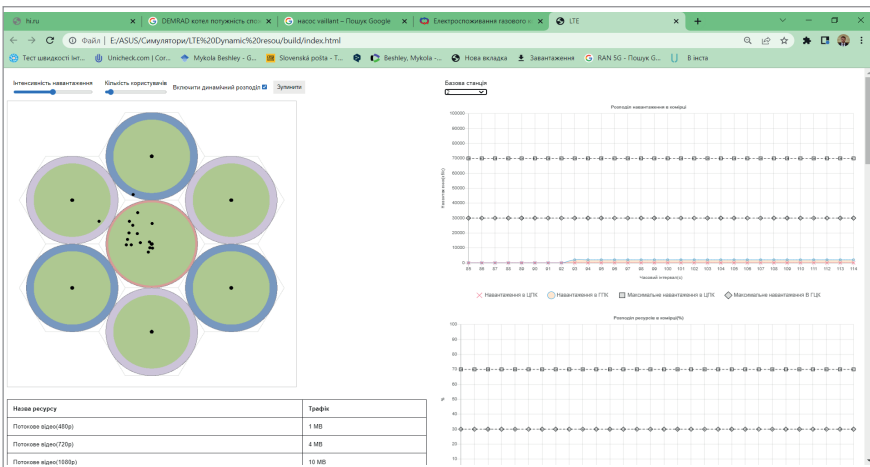


Рис. 5.52. Аналіз локалізації користувачів на базових станціях та навантаження на БС №2

Спостерігаючи за процесом міграції користувачів між ансамблем базових станцій, можна помітити поступовий перехід частини користувачів на обслуговування базовими станціями під номерами 2 та 4. Це чітко видно на рис. 5.53, де показано, як зростає навантаження на комірку під номером 2 у відповідь на зміну кількості користувачів, що її обслуговують. Також варто звернути увагу на ситуацію з базовою станцією під номером 4. Кількість користувачів у центральній зоні цієї базової станції зменшується, водночас у граничній зоні відбувається збільшення кількості підключень. Це вказує на те, що зміна локалізації користувачів впливає на розподіл ресурсів між різними зонами базової станції.

Завдяки запропонованому методу перерозподілу, базова станція під номером 4 може ефективно балансувати навантаження між центральною та граничною зонами, що дозволяє уникнути перевантажень і забезпечити стабільний зв'язок у різних зонах покриття. Це особливо важливо в умовах зростання кількості підключених користувачів та динамічної зміни їхнього розташування протягом часу. Такий підхід підвищує не лише якість обслуговування, а й загальну стійкість і надійність мобільної мережі, забезпечуючи її оптимальну роботу навіть в умовах високого навантаження.

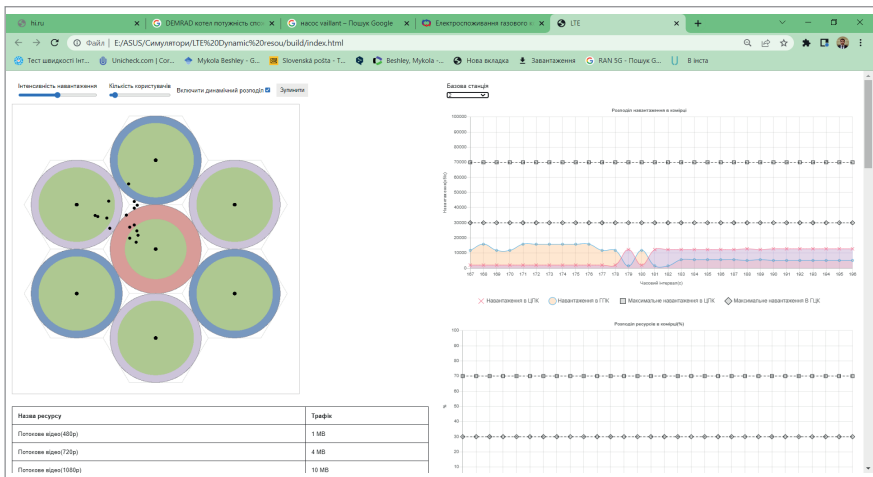


Рис. 5.53. Аналіз роботи методу у процесі міграції користувачів між базовими станціями

На рис. 5.54 показано оцінку навантаження та процес розподілу ресурсів згідно запропонованого методу на БС№4 та рис. 5.55 аналогічно показано результати для БС№1.

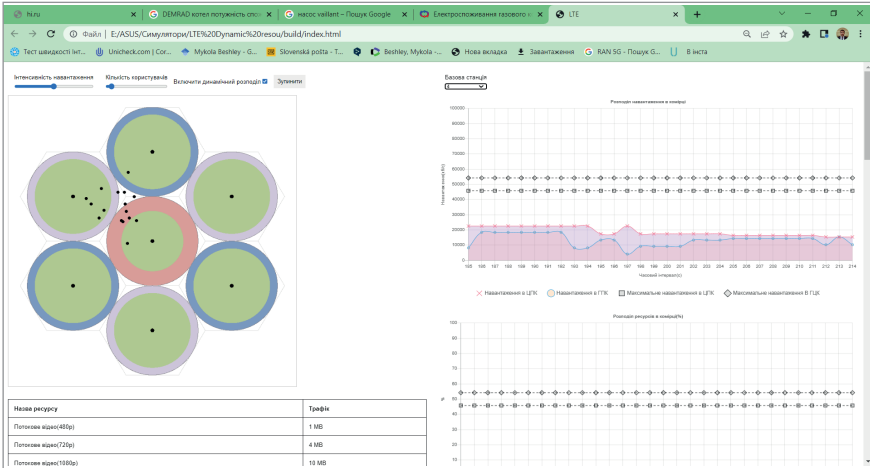


Рис. 5.54. Аналіз роботи методу та оцінка навантаження на БС№4 у процесі міграції користувачів між базовими станціями

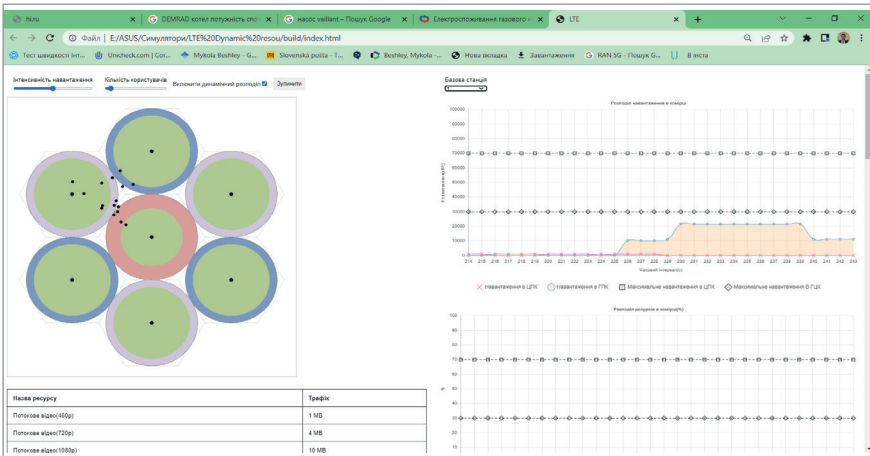


Рис. 5.55. Аналіз роботи методу та оцінка навантаження на БС№2 у процесі міграції користувачів між базовими станціями

Досліджуючи функціонування мережі протягом тривалого періоду спостережень, можна зробити висновок, що з ансамблю 7 базових станцій користувачі мігрували між базовими станціями під номерами 1, 2 та 4, тоді як на базових станціях під номерами 3, 5, 6 та 7

навантаження було відсутнє. Таким чином, протягом цього періоду запропонований у роботі підхід дозволяє перевести зазначені базові станції у неактивний енергозберігаючий режим. У результаті цього загальне енергоспоживання мережі зменшується на 57 %, забезпечуючи при цьому виконання вимог QoS (рис. 5.56).



Рис. 5.56. Порівняння енергетичного споживання мережі при традиційному та запропонованому методі розподілу ресурсів

# ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗГОРТАННЯ ПРИВАТНИХ МЕРЕЖ 5G ADVANCED ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ

### 6.1. Особливості використання приватних мереж 5G для підприємств

З поглибленням нового витку глобальної технологічної революції та промислової трансформації нове покоління інформаційних технологій, представлених 5G, промисловим Інтернетом, штучним інтелектом тощо, все більше стає ключовою рушійною силою цифрових трансформацій економіки та суспільства.

Міністерство цифрової трансформації планує запуск пілотного проекту 5G у 2024 році, а також вже розпочато підготовчі заходи на корпоративному рівні. Однак, російська агресія відволікла увагу від нормативно-правового врегулювання питань, пов'язаних із впровадженням 5G. Розпорядження Кабінету Міністрів від 2020 року передбачають лише початкові кроки, залишаючи багато невирішених питань щодо їх реалізації.

Міжнародний досвід показує, що для успішного розвитку 5G потрібна не лише тактика, але й комплексна національна стратегія, яка включає законодавство, інвестиції, стандартизацію та безпеку мереж. Україна поки що на початковому етапі, тоді як в ЄС 5G є пріоритетом з 2015–2016 років.

Доцільно вивчити досвід ЄС, узгодити національну політику з європейськими стандартами для інтеграції у майбутню 5G/6G екосистему, та розвивати партнерства в рамках ініціатив, як-от «Європейські інтелектуальні мережі та послуги» та «Державно-приватне партнерство в галузі 5G».

Також варто оцінити переваги 5G-рішень для післявоєнного відновлення та підвищення стійкості телекомунікацій на різних об'єктах (індустріальних, транспортних, гуманітарних), з акцентом на автоматизацію та економічність за допомогою приватних 5G-мереж.

Технологія 5G забезпечує можливість високошвидкісного з'єднання, значного зростання обсягів даних, потокового передавання,

швидкого та безперервного обміну та перегляду вебсторінок для всіх. Додатки 5G означають неймовірні можливості для бізнесу, дому, споживачів та громад, забезпечуючи ключові функціональні драйвери, включаючи наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), вдосконалений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) та масовий зв'язок машинного типу (mMTC). Мережі 5G є рушійною силою наступного покоління додатків, таких як промисловий Інтернет речей (IIoT), автономні транспортні засоби, ігри з доповненою реальністю (AR) тощо [62]. 5G підтримує варіанти використання в широкому спектрі галузей, таких як виробництво, комунальні послуги, сільське господарство та муніципалітети, допомагаючи організаціям скоротити витрати, підвищити ефективність та покращити якість обслуговування клієнтів.

Приватна мережа 5G Advanced [63] – це автономна виділена мережа для приватного використання. Як важливий компонент цифрової трансформації, приватний 5G забезпечує ті ж технологічні переваги, що і загальнодоступний 5G, але дає більше контролю над мережею, включаючи політику обслуговування, безпеку, послуги та дані. Мережа 5G Advanced пропонує більшу гнучкість, ніж традиційні мережі 5G, наприклад, кращі варіанти покриття для віддалених додатків, менше технічних проблем для великих приміщень і доступ до більшої кількості спільного спектра. Оскільки попит з боку критично важливих підприємств стимулює початкові інвестиції, Міжнародна корпорація даних (IDC) прогнозує, що світовий ринок приватної мережевої інфраструктури 5G досягне \$ 5,7 млрд у 2024 році [64]. Згідно з опитуванням, до 2028 року обсяг ринку приватних мереж 5G досягне \$ 14,28 млрд, а середньорічний темп зростання (CAGR) – 39,7 % у період з 2021 по 2028 рік [65].

Цифрова трансформація прискорює потребу в передових мережевих технологіях, оскільки підприємства хочуть скористатися перевагами високої продуктивності та низької затримки мереж 5G [66]. Критично важливі для бізнесу дані та доступ до мережі повинні бути захищеними і не залежати від перебоїв у роботі публічних мереж. Ця потреба стимулює розвиток приватних мереж. Приватна мережа дає можливість безпечно і автономно обмінюватися

даними, і вона ніколи не зачіпає загальнодоступний Інтернет. Комп'ютери підключаються до цієї мережі тільки учасникам, і компанія отримує більше точок доступу для легкого та безпечного обміну інформацією. Як результат, розгортання приватних мереж зростає в геометричній прогресії, і вони розкривають можливості мережі для надання безпечних, надійних і масштабованих рішень [67]. Підприємства також мають більше контролю над приватними мережами, ніж над загальнодоступними, включаючи рівні обслуговування, доступ до даних, відмовостійкість і безпеку. Такі технології, як Ethernet, Wi-Fi і нещодавно LTE, широко використовуються як технологічні рішення для приватних мереж, а тепер до них додалася ще й 5G – приватна мережа 5G в термінології 3GPP, яка називається непублічною мережею (Non-Public Network, NPN) [68]. Отже, загальнодоступною мережею буде мережа, якою користуватимуться звичайні абоненти, які мають підписку на оператора мобільного зв'язку (MSP).

Приватні мережі 5G (також звані NPN) – це віртуальні або фізичні стільникові системи, встановлені для приватного використання урядами, підприємствами та іншими установами. Вони охоплюють зони покриття будь-якого розміру, від внутрішніх до зовнішніх, від малих до великих, завдяки поєднанню різних типів радіосигналів.

Приватні мережі 5G або NPN можуть бути розгорнуті як в повністю приватному режимі (тобто локально), так і в гібридному режимі (тобто інтегровані з мережею MSP), щоб дозволити MSP контролювати свою поточну мережу і спектральні активи [69]. Вона контролює локалізовані малі стільники, мікровежі і периферійні обчислення з багаторазовим доступом (MEC), щоб забезпечити покриття мережі 5G і зв'язок, як зменшена версія загальнодоступної мережі стільникового зв'язку. Це проілюстровано на рис. 6.1. Вона забезпечує критично важливий голосовий зв'язок, передачу даних і відеозв'язок у формі Push to Talk (PTT) і Voice over LTE (VoLTE). Рішення для приватної мережі 5G використовує технології стільникового зв'язку 5G і 4G LTE і дозволяє MSP розгорнути ексклюзивну підписку на приватну мережу для своїх торгових майданчиків, вихо-



дячи з особливостей своєї мережі і стратегії підприємства. Ключові характеристики мереж 5G, такі як висока доступність мережі, наднизька затримка, можливість агрегації великих обсягів даних і висока щільність пристроїв, легко поєднуються зі зростаючими вимогами Індустрії 4.0 [70]. Мережевий і телекомунікаційний гігант Ericsson визначив 5 ключових вимог до приватних мереж 5G. Промисловість оцифровує свої процеси і модернізує свої приватні мережі. Мережі повинні бути стійкими, безпечними, високопродуктивними і перспективними, щоб забезпечити виконання критично важливих для бізнесу і місії операцій [71].

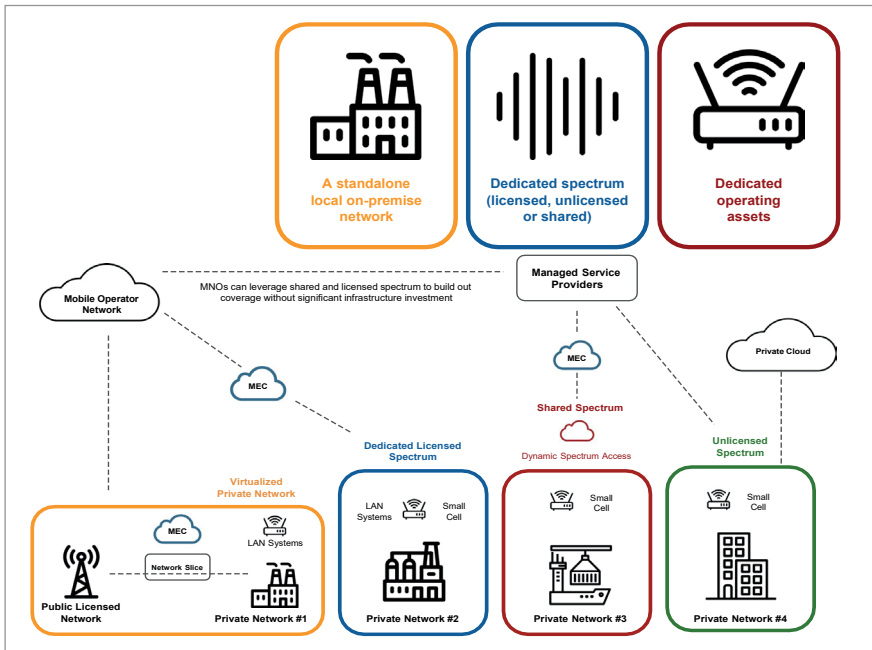


Рис. 6.1. Загальна архітектура приватних мереж 5G

Приватна мережа 5G повинна мати повний контроль над покриттям, користувачами, пристроями, якістю обслуговування (QoS), підвищеною безпекою, гнучким розгортанням для будь-яких ситуацій. Основні вимоги до можливостей з точки зору бізнесу та місії проілюстровані в таблиці 6.1.

Технологія 5G як приватна мережа 5G є цікавою пропозицією з такими перевагами 5G, як затримка менше 1 мс, надійність,

що перевищує 99,999 %, і висока швидкість передавання даних в діапазоні до 10 Гбіт/с [72]. Останній глобальний стандарт 5G від 3GPP перевершує Wi-Fi та 4G LTE, але також має інші переваги. Наприклад, щільність з'єднання пристроїв збільшилася вдесятеро порівняно з 4G LTE, що робить 5G привабливим і потенційним для масового розгортання IoT. Тому 5G ідеально підходить для розгортання приватних мереж з великою кількістю кінцевих пристроїв для промисловості, охорони здоров'я та інших підприємств. Крім того, 5G може підтримувати розгалуження мережі, щоб полегшити оператору приватної мережі управління мережею і контроль над нею. Приватні мережі 5G мають нові функції (перелічені в таблиці 6.2), які конденсуються в прями прибутки для цифрових підприємств [73].

Таблиця 6.1

### Вимоги до приватних мереж 5G

Вимоги	Опис
Надійність	Повинна забезпечувати наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), пропускну здатність, достатнє покриття мережі та надійну функцію хендвера для підвищення надійності передавання трафіка даних з точки зору фіксованої тривалості, обсягу та ймовірності успішного передавання
Висока доступність	Повинна обіцяти максимальну доступність для кінцевого користувача завдяки надійним рішенням. Час простою може бути зведений до нуля завдяки створенню резервних критично важливих елементів і обслуговуванню системи управління
Безпека	Повинна забезпечувати повну наскрізну безпеку та конфіденційність інфраструктури, даних та персоналу від загроз. Повинна відповідати принципам безпеки тріади ЦРУ, а саме: конфіденційності, цілісності та доступності
Взаємодія/сумісність	Інтеграція з публічними мережами 5G для забезпечення безперервності послуг для критично важливих додатків (автономні транспортні засоби), які можуть потребувати переходу з приватної мережі в загальнодоступну

Таблиця 6.2

**Ключові фактори, що сприяють розвитку приватних мереж 5G**

Водії	Опис
1	2
Гарантоване покриття	Використання у віддалених та малодоступних районах, всередині приміщень/всередині будівель, безперешкодна мобільність
Управління мережею	Контроль над ресурсами, операціями та управлінням мережею
Продуктивність	Профілі для підтримки вимогливих додатків і гарантії QoS
Пріоритизація трафіка для захисту даних кінцевих користувачів	Управління ідентифікацією та доступом (IAM), конфіденційність і цілісність даних визначають пріоритети додатків на основі трафіка, ізолюють трафік на основі бізнесу технічних потреб
Налаштування	Забезпечити відповідність підприємства його бізнес-потребам
Наднизька затримка	Затримка менше 1 мс

Приватні мобільні мережі 5G – це система 5G, персоналізована для конкретного підприємства або промислового використання, наприклад, в охороні здоров'я, промислового Інтернету речей (IIoT), де певні вимоги, такі як затримка, безпека, QoS тощо, відіграють важливу роль. З використанням сучасних систем мобільного зв'язку, таких як 5G або LTE, приватні мережі будуються для спеціальних резидентних додатків, таких як завод, лікарня, аеропорт або сільське господарство. Приватні мережі 5G призначені для бізнес-ринків і забезпечать трансформацію способу надання мобільних послуг. Клієнтами та одержувачами послуг є галузі або підприємства, які пов'язані з конкретними додатками, вимогами та місцезнаходженням. Конфіденційність є важливою особливістю цих мереж, де комунікація закінчується в межах установи або підприємства і не залежить від залучення мережі мобільного зв'язку загального користування оператора. Наприклад, підприємство впроваджує інфраструктуру, а оператор мобільного зв'язку, який має ліцензію на використання спектра, здає йому в оренду смугу частот. Підприємство використовує отриману приватну мережу для надання послуг.

## 6.2. Дослідження методів розгортання приватних 5G мереж для підприємств

Реалізація виділеної приватної мережі 5G для підприємства може бути здійснена за допомогою декількох варіантів. Вона може належати самому підприємству або управлятися оператором мобільного зв'язку і може використовувати ліцензований, неліцензований за схемами, такими як New Radio Unlicensed (NR-U), ліцензований доступ з підтримкою (LAA), або спільний доступ з використанням спектра за схемами, такими як Citizens Broadband Radio Service (CBRS), і ліцензійний спільний доступ (LSA) [74]. Як показано на рис. 6.2, вони можуть варіюватися від повністю автономної, поєднаної з мережею загального користування оператора, розбивки мережі на частини, специфічної для 5G, до спільного використання мережі радіодоступу (RAN). Вибір розгортання для підприємства приймається на основі наступних характеристик:

- Власник і управління спектром (транспортна/радіо/основна мережа) – оператор мобільного зв'язку/підприємство/третя сторона/власник приміщення.
- Ліцензований, неліцензований або спільний спектр.
- Вимоги до пропускну здатності/якості обслуговування або будь-які інші виділені ресурси.
- Одне приміщення або кілька приміщень.

Характеристики, визначені 3GPP [74] для забезпечення роботи приватних мереж 5G, проілюстровані на рис. 6.3. Ці характеристики дозволяють розглядати приватний 5G як хорошу заміну Wi-Fi 6 або дротовим рішенням у приватному/вертикальному секторі. Технологія 5G є визначеною 3GPP, масштабованою, гнучкою і перспективною, з високопродуктивним радіозв'язком, доповненим для місцевих послуг. Для приватних мереж 5G підходять наступні аспекти:

Функції безпеки і чітко визначена мобільність, які відповідають конкретним вимогам для певного застосування (наприклад, автоматизація виробництва).

Такі функції, як програмне ядро, централізоване управління, поділ площини управління (CP) і площини користувача (UP), віртуалізація, самоорганізуючі мережі (SON) дозволяють їй виділятися.

Гнучкість за рахунок методів доступу до спектра, високі характеристики продуктивності, визначені для класу URLLC. Для вимог ПоТ приватний 5G забезпечить високу точність позиціонування [75].

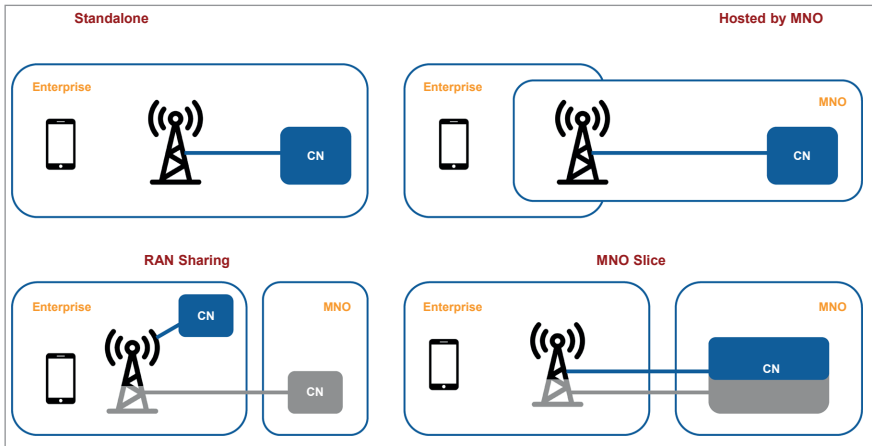


Рис. 6.2. Варіанти розгортання приватних мереж 5G

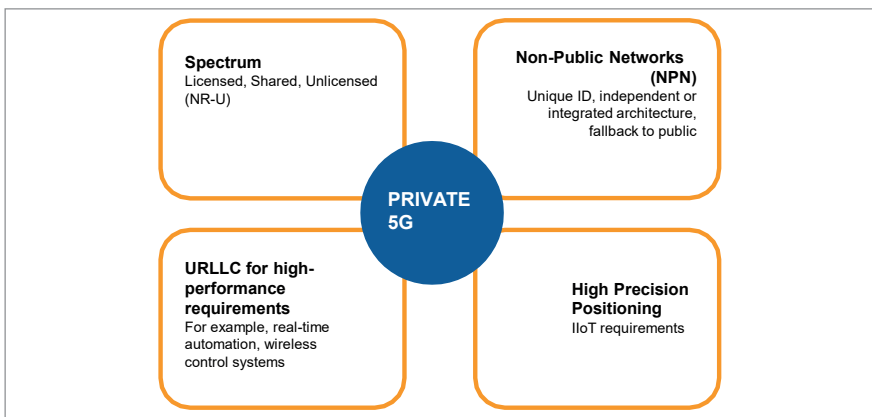


Рис. 6.3. Характеристики 3GPP для приватних мереж 5G

Технологія 5G надає ще одну функцію, яка називається непублічною мережею (NPN), тобто визначеною 3GPP назвою для приватної мережі 5G. Вона дозволяє розгорнути виділену мережу 5G для приватного використання. З точки зору 3GPP, існує дві версії розгортання NPN, а саме: Standalone NPN (SNPN) та Public Network Integrated NPN (PNINPN) [76], як показано на рис. 6.4. Різниця між ними розглянута в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

## Порівняння архітектур

Особливості	Автономний NPN (SNPN)	Інтегрована мережа загального користування NPN (PNI-NPN)
Тип	Фізична особа	Інтегрований
Розгортання та експлуатація	Розгортається та експлуатується оператором NPN, отже, не взаємодіє з оператором мобільного зв'язку/SP (провайдером послуг)	Розгортається за підтримки оператора мобільного зв'язку/SP
Спектр	Власні, неліцензійні, спільні	Спектр MNO, неліцензований, спільний
Пристрої/Сімки/Підписки	Власна відповідальність (одна або декілька підписок NPN на кожне користувачьке обладнання (UE))	Різні підходи, такі як спільне використання RAN, спільне використання RAN і ядра (на основі виділеного спектра, розбиття мережі тощо)
Роумінг	Без роумінгу	Стандартний роумінг
Інвестиції	Високі капітальні та низькі операційні витрати	Низькі капітальні та високі операційні витрати
Безпека	Власна відповідальність	Наскрізний захист від оператора мобільного зв'язку

Архітектурні аспекти приватних мереж 5G представлені 3GPP. Як обговорювалося вище, приватні мережі 5G можуть бути розгорнуті двома способами, а саме: незалежна приватна мережа (SNPN) та інтегрована приватна мережа (PNI-NPN) (Рис.6.4). У першому варіанті фізично ізольований 5G (приватна мережа 5G) розгортається без участі оператора зв'язку. Цей принцип 5G може бути побудований як самим підприємством, так і оператором. Останній розгортається шляхом спільного використання ресурсів мережі загального користування оператора між підприємствами з використанням таких підходів, як спільне використання RAN, спільне використання RAN і площини управління, спільне використання RAN і ядра, розбиття мережі на частини і т. д. У цьому варіанті оператори будуватимуть приватні мережі 5G для підприємств. Різні типи розширених варіантів розгортання перераховані нижче і продемонстровані на рис. 6.5.

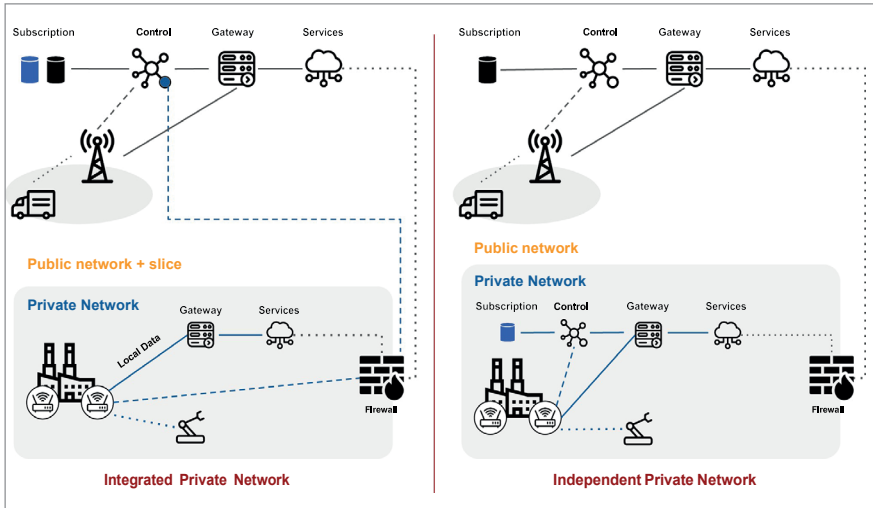


Рис. 6.4. Інтегровані та незалежні приватні мережі 5G

- Незалежна приватна мережа 5G на підприємстві (повністю приватна, локальна частота 5G, без спільного використання).
- Незалежна приватна локальна мережа 5G від оператора (повністю приватна, ліцензована частота, без спільного використання).
- Спільне використання RAN та сигналізації.
- Нарізка мережі (спільне використання RAN та ядра).
- Спільне використання RAN та площини керування.

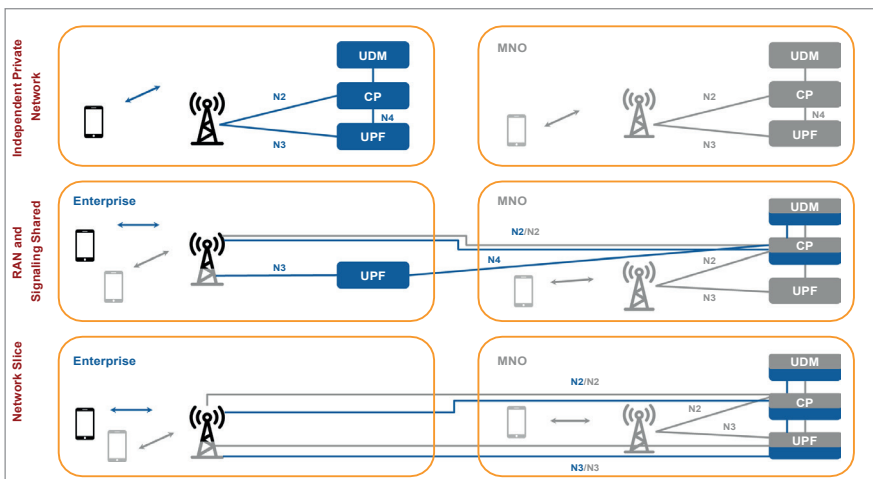


Рис. 6.5. Розширені варіанти розгортання приватних мереж 5G

*Незалежна приватна мережа 5G підприємства.* Приватна мережа, розгорнута підприємством (включає UDM, 5G Core CP, UPF, gNB) в межах своїх приміщень (будівлі) і повністю ізольована від загальнодоступної мережі оператора. Використовується місцева частота 5G, а не ліцензована частота оператора. Інформація про підписку та користувачів буде зберігатися локально на підприємствах. Підприємство також здійснює контроль над мережею і послугами передавання даних, а отже, мережа функціонує у виділеному спектрі.

*Незалежна приватна мережа 5G від оператора.* Ця мережева архітектура схожа на попередню модель. Єдина відмінність полягає в тому, що локальна мережа 5G на підприємстві будується і експлуатується оператором мобільного зв'язку з його індивідуальним ліцензованим частотним спектром 5G. Тут використовується спільний радіочастотний діапазон і сигналізація, UDM, 5G Core CP і UPF встановлюються в межах підприємства, а отже, мережеві послуги обробляються локально [76]. Базові станції наступного покоління 5G (gNB) і спектр поділяються між публічною і приватною мережею (так зване спільне використання радіочастотного діапазону). Оператор мобільного зв'язку буде керувати мережею і користувачем. Трафік приватної мережі (приватний слайс) і загальнодоступної мережі розподіляється між приватними UPF на підприємстві і UPF на периферії хмари оператора відповідно.

*Нарізка мережі (RAN і спільне використання ядра).* У цьому варіанті [77] UDM, CP і UPF розгортаються в периферійній хмарі оператора, а всередині підприємства реалізується тільки gNB. Приватна і загальнодоступна мережі спільно використовують «логічно відокремлене ядро 5G і RAN» (UDM, UPF, 5G Core CP і gNB). Ця концепція використовується для розуміння того, що віртуальна мережа для певного застосування логічно від'єднана від інших віртуальних мереж, що називається наскрізним (E2E) мережевим розгалуженням (End-to-End).

*Усередині підприємства вбудовані виділені UPF і gNB.* UDM і 5G Core CP, що підтримуються в периферійній хмарі оператора, використовуються спільно між публічними і приватними мережами. UDM, 5G Core CP і gNB розділені логічно, а UPF – фізично. Трафік приватної



мережі (приватний слайс) і трафік загальнодоступної мережі доставляється до приватної UPF на підприємстві і UPF в периферійній хмарі оператора відповідно. Дослідження переваг і недоліків найбільш важливих варіантів розгортання проілюстровано в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

### Варіанти приватних мереж 5G

Моделі розгортання	Плюси	Мінуси
Незалежна приватна 5G локальна мережа на підприємстві	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Конфіденційність і безпека: трафік даних, інформація про підписку та роботу тощо</li> <li>– Автономне забезпечення QoS</li> <li>– Наднизька затримка (всі компоненти поруч)</li> <li>– Відсутність абонентської плати для користувачів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Потреба у кваліфікованому оперативному персоналі (підприємства повинні мати кваліфікованих інженерів)</li> <li>– Висока вартість спектра/ліцензії</li> </ul>
Спільне використання RAN та сигналізації	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Зниження капітальних витрат</li> <li>– Конфіденційність і безпека: трафік даних</li> <li>– Наднизька затримка</li> <li>– Ліцензований спектр від MNO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Інформація про підписку, що зберігається в оператора мобільного зв'язку</li> <li>– Потреба у кваліфікованому персоналі (усунення несправностей)</li> <li>– Абонентська плата для користувачів</li> <li>– Залежність від мережі оператора для сигналізації</li> </ul>
Нарізка мережі (спільне використання RAN та ядра)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Логічна ізоляція від публічної мережі</li> <li>– Нижчі капітальні витрати</li> <li>– Ліцензований спектр від MNO</li> <li>– SLA, що підтримується для мережі оператором</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Залежність від оператора мобільного зв'язку для QoS та відсутність фізичного розділення</li> <li>– Вища затримка</li> <li>– Інформація про підписку зберігається у оператора мобільного зв'язку</li> <li>– Абонентська плата для користувачів</li> </ul>

### 6.3. Дослідження обмежень та проблем розгортання 5G у приватному промисловому секторі

Попит на пропускну здатність мережі стрімко зростає. Згідно зі звітом Cisco [78], очікується, що до 2025 року мобільний трафік даних досягне 1000 ексабайт на рік. У 2017 році середній трафік на одного мобільного користувача в місяць становив близько 2,3 ГБ, а до 2025 року, за оцінками, він становитиме близько 13,3 ГБ на місяць. Для вирішення цієї проблеми розпочалася нова ера 5G, і оператори мобільного зв'язку прискорюють розгортання мереж 5G. На глобальному рівні приватні мережі 5G є відносно новою технологією, і реальні розгортання вже відбуваються. Однак проблеми, пов'язані з використанням спектра, вартістю, браком знань, потенційно можуть стати обмежувачими факторами. У цьому підрозділі розглядаються ключові обмеження або проблеми, пов'язані з приватним розгортанням 5G.

*Регуляторні проблеми.* Для мереж 5G необхідний більший радіочастотний спектр, але він не є легкодоступним ресурсом. Більша його частина залежить від «ліцензованого спектра». Необхідно розглянути весь спектр ефективного використання спектра [79]. З винайденням 5G NR-U, неліцензованого спектра, розгортання приватних мереж 5G стане простим для управління підприємствами.

*Технічні виклики.* Використання вищого частотного діапазону (5 ГГц і вище) призводить до вищих швидкостей передавання даних. Ці вищі швидкості передавання даних можуть зменшити загальну затримку мережі до 1 мілісекунди (теоретично) для мереж 5G. Діапазон покриття цих вищих частот набагато менший, що є ще однією серйозною проблемою. Збільшення кількості веж стільникового зв'язку вирішить цю проблему.

*Інтеграційні виклики.* Інтеграція між спектральними активами, технологічними компонентами, вимогами, варіантами використання, додатками і номенклатурою є ще одним серйозним викликом. Приватні інтегратори мобільних мереж 5G потрібні для побудови мережі для конкретного випадку.

*Брак кваліфікованих мережевих фахівців.* Оператори мобільного зв'язку планують розгортати 5G якомога швидше, а отже, для

впровадження цієї новітньої технології потрібні кваліфіковані мережеві інженери. Більшість підприємств не мають кваліфікованих фахівців у своєму штаті і шукають талановитих працівників або навчають наявний персонал.

*Державні регуляторні стандарти і політика.* Завдяки державним регуляторним нормам і політиці розгортання 5G відбуватиметься різними темпами з певними змішаними і спільними рисами в різних країнах. Це означає, що кожна країна та/або континент мають власний набір регуляторних стандартів і норм, навіть, якщо технічні параметри є досить загальними. Такий поступовий характер розгортання 5G створює ще одну значну проблему. Оператори повинні дотримуватися державних регуляторних стандартів, встановлених для надання послуг мобільного зв'язку 5G клієнтам.

---

#### **6.4. Аналіз спектра для розгортання приватних 5G-мереж в Україні з урахуванням досвіду ЄС**

Більшість безпроводних мережевих систем залежать від радіохвиль, які можуть передавати сигнали туди і назад між пристроями клієнта і постачальником послуг мобільного зв'язку. Щоб запустити ці системи, такі компанії, як Київстар, Лайфсел або Vodafone, повинні купити місце в радіочастотному спектрі. Частота (кількість циклів на секунду) для 5G вимірюється в герцах (Гц) і виражається в кілогерцах (кГц, тобто 1000 Гц), мегагерцах (МГц, 1 мільйон Гц) або гігагерцах (ГГц, 1 мільярд Гц). Радіочастота варіюється від 3 кГц до максимального значення 3000 ГГц. Радіочастотний спектр зазвичай поділяють на три групи: високочастотний (від 24 до 100 ГГц), низькочастотний (нижче 1 ГГц) і середньочастотний (від 1 до 7 ГГц). Більшість країн розглядають спектр як природний ресурс, і його використання вимірюється відповідними національними органами, які розподіляють ресурси відповідно до потреб країни.

Традиційно безпроводна індустрія зосереджувалася на ліцензованому спектрі, але в 5G існує три категорії спектра (як показано на рис. 6.6): ліцензований спектр, спільний спектр і неліцензований спектр [80–82]. Неліцензований спектр є важливим і може

бути використаний будь-ким і будь-коли. У цьому підрозділі роботи окреслено ключові позиції приватного спектра 5G, які зосереджені на сферах, де регулятори, уряди та мобільна індустрія повинні співпрацювати, щоб реалізувати високоефективні приватні мережі 5G.

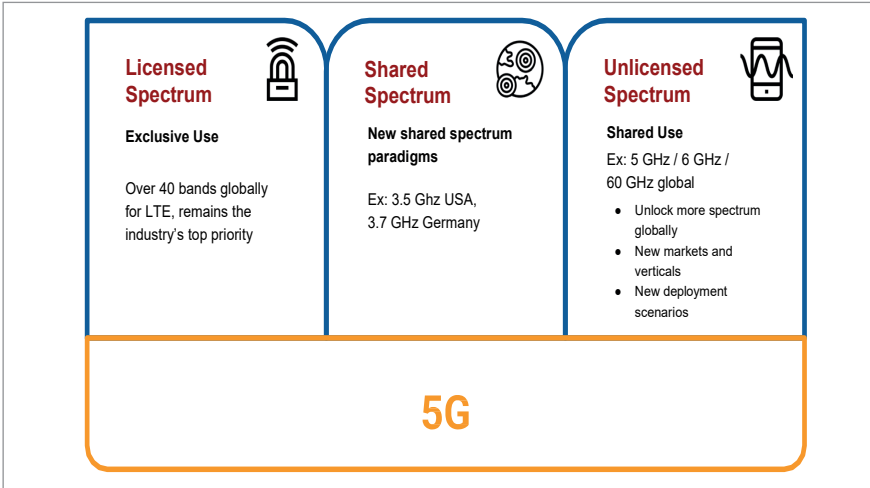


Рис. 6.6. Туни спектра 5G

Спільний спектр для мереж 5G. Світовий розподіл спектра 5G охоплює широкий діапазон від 410 до 52 600 МГц. Верхня межа спектра припадає на міліметровий діапазон, що є унікальним для технології 5G. Зазвичай він забезпечує наднизьку затримку і високу пропускну здатність для додатків, заснованих на його високій пропускну здатності. Приватні мережі 5G потребують і використовують спектр у різних частотних діапазонах, на яких діють різні ліцензійні умови. Підприємства управляють своєю мережею в ліцензованому спектрі і потребують ліцензії від власника ліцензії, зазвичай оператора мобільного зв'язку (MNO) або від національного регулятора. Ця модель, заснована на ліцензованому спектрі, збережеться і в приватних мережах 5G. Однак з'являється ціла низка нових варіантів вибору спектра, що сприятиме швидкому впровадженню технології на рівні приватних мереж.

5G NR-неліцензований спектр. 5G New Radio Unlicensed (NR-U) – це новий стандарт і важлива віха в реалізації передбачення ви-

сокопродуктивних мобільних мереж 5G у неліцензованому спектрі, який усуває залежність від ліцензованих операторів. Він може забезпечити вищу швидкість передавання даних, більшу надійність, наднизьку затримку, підвищену доступність і величезну пропускну здатність мережі. NR-U може допомогти розвивати приватні мережі з можливостями 5G і послабити спектральні обмеження для забезпечення високопродуктивних можливостей 5G. У специфікаціях 5G NR Release 16 [83] 5G NR-U визначається як основний глобальний стандарт стільникового зв'язку з автономним і прив'язаним використанням неліцензованого спектра. Ця специфікація дозволяє мобільним пристроям отримати доступ до 400 МГц неліцензованої смуги частот у низхідному каналі та 100 МГц неліцензованої смуги частот у висхідному каналі. 3GPP Release 16 починається з 5G NR-U в неліцензованому діапазоні 5 ГГц. Стандарт 5G NR-U розробляється для підтримки нового неліцензованого діапазону 6 ГГц, за яким слідує діапазон міліметрових хвиль 60 ГГц, що розробляється в рамках релізу 17. Неліцензований діапазон 6 ГГц забезпечує нову пропускну здатність для мереж 5G і Wi-Fi, а також гнучкі способи його використання у зовнішньому і внутрішньому середовищі. Схема перспективного неліцензованого спектра 6 ГГц для релізу 3GPP представлена на рис. 6.7.

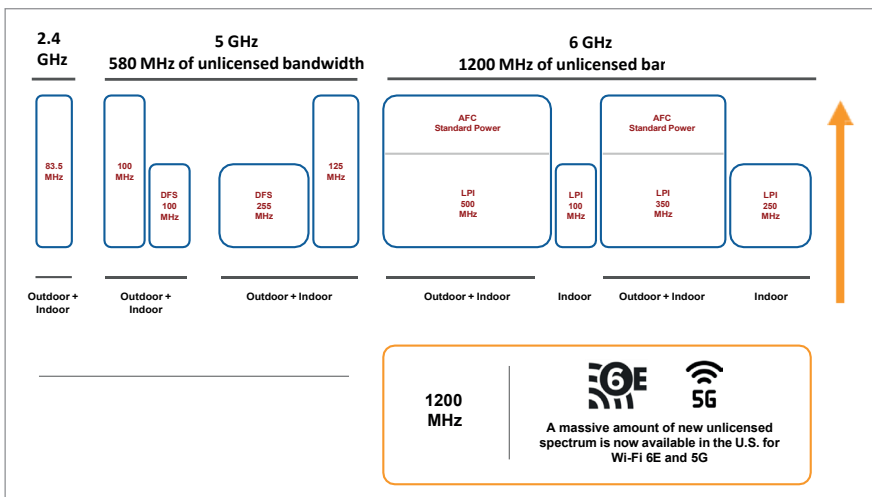


Рис. 6.7. Розгляд неліцензійного спектра 5G NR

За допомогою автономного NR-U можна легко розгортати приватні мережі 5G. Цей автономний NR-U був розроблений і призначений для співпраці з іншими неліцензійними технологіями, такими як Wi-Fi, і розширення простих процедур встановлення, за які цінується Wi-Fi. Це дає змогу підтримувати розвантаження мобільності та використання мереж з нейтральним хостом. Завдяки цим перевагам, автономний NR-U включає в себе можливості високопродуктивного 5G для приватних мереж для підприємств, не вимагаючи ліцензованого спектра [84].

---

### **6.5. Метод сегментавання мережі 5G для приватного розгортання в індустріальній сфері**

Оператори мобільного зв'язку змушені починати розгортати рішення для розбиття мережі на сегменти вже зараз, щоб скористатися можливостями, які надає 5G для бізнесу [85-87]. Ключовим фактором успіху є здатність швидко реагувати на потреби клієнтів в економічно вигідний спосіб. Однак складність управління багатьма сегментами і клієнтами загрожує всій бізнес-моделі 5G. Автоматизація управління всім життєвим циклом сегмента основної мережі дозволяє подолати цю проблему. Розподіл мережі на фрагменти передбачає взяття однієї фізичної мережі і розбиття її на віртуальні фрагменти, кожним з яких можна керувати незалежно. Кожен слайс може мати виділені ресурси (ядро, доступ і транспорт), які не використовуються в інших слайсах, і тому вони можуть бути оптимізовані для задоволення різноманітних вимог до продуктивності, які є частиною екосистеми 5G. Ці слайси мережі – це наскрізна концепція, необхідна клієнтам для їхніх численних наскрізних, окремих незалежних, логічних мереж [88]. Кожна з цих мереж називається слайсом мережі, і оператор може створити декілька таких слайсів, наприклад, RAN, ядро і транспортний слайс. Кожен окремий домен має контролер, контролер RAN, контролер ядра, транспортний контролер і наскрізний оркестратор.

Існує три сценарії використання, розроблені Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ) і нещодавно прийняті Проектом партнерства 3-го покоління (3GPP) як три стандартизовані слайси мережі. Приватні мережі 5G створюватимуть набір сегментів мережі

для кожного з цих сценаріїв використання, як показано на рис. 6.8. Перший з них, який називається розширеним мобільним широко-смуговим зв'язком (eMBB), призначений для надання послуг, які зазвичай використовують 4G для перегляду вебсторінок, потокового відео, трафіка для поштових додатків і додатків, які часто вимагають дуже високої пікової швидкості передавання даних. Можливо, вони не надто чутливі до затримок, але дуже імпульсні за своєю природою. Друга категорія різних варіантів нарізки називається наднадійні комунікації з низькою затримкою (URLLC), яка включає клас додатків, таких як безпілотні автомобілі, віртуальна або доповнена реальність, для ефективної роботи яких потрібен дуже жорсткий час затримки в обидва боки (RTT). Деякі з цих додатків є критично важливими і потребують високого рівня надійності. Наступний слайс називається масовими комунікаціями машинного типу (mMTC), які включають в себе категорію послуг, таких як Інтернет речей (IoT), де нам потрібно з'єднати величезну кількість пристроїв. Ці пристрої, по суті, можуть не вимагати надзвичайно високої швидкості передавання даних або низької затримки. Це можуть бути короточасні пристрої з низькою пропускнуою здатністю, які можуть не мати специфічних характеристик, притаманних багатьом з них, але не обов'язково високих швидкостей передавання даних – «розумні» міста, «розумні» будинки, «розумні» носимі пристрої є прикладом таких пристроїв.

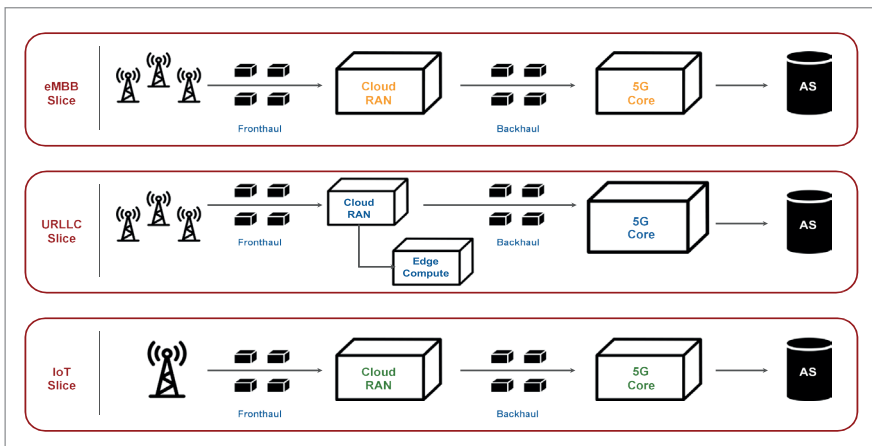


Рис. 6.8. Нарізка безпривідної мережі 5G для eMBB, URLLC та mMTC

Логічний потік наскрізного слайсу мережі для інформаційно-обслуговуючої частини клієнта (скажімо, Honda) проілюстровано на рис. 6.9. Бюджет для слайсу мережі за угодою про рівень обслуговування (SLA) становить 10 Мбіт/с. Портал клієнта надсилає запит оператору. Оператор, використовуючи свої схеми або шаблони слайсу мережі, генерує профайл слайсу мережі. І після цього він проходить через різні декомпозиції, запускаючи різні дії в мережі. Перше, що він робить, це надсилає запит до оркестру віртуалізації мережевих функцій (NFVO), який створює віртуальну RAN, віртуальне ядро або і те, і інше, якщо це необхідно. Друга частина надсилає запит до контролера RAN на створення слайсу RAN і надання індивідуальності обладнанню RAN. З тієї ж причини він надсилає запит на контролер ядра 5G, щоб створити слайс ядра, який є особистістю в ядрі. Нарешті, він надсилає запит на контролер транспортного слайсу для створення зв'язку між ним, RAN і ядром. На цьому етапі він зшиває всі ці слайси, створюючи єдиний наскрізний слайс мережі для конкретного клієнта, який відноситься до типу послуг, описаного вище.

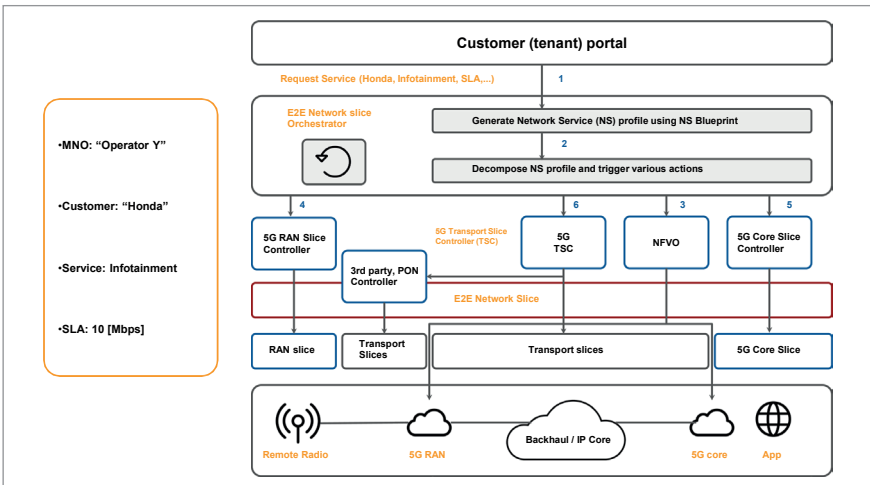


Рис. 6.9. Логічний поділ наскрізного слайсу мережі

Бізнес-клієнти можуть використовувати нарізку мережі для задоволення своїх специфічних потреб, маючи доступ до високо-конфігурованих мереж. SLA можна використовувати для управління послугами в ефективний, своєчасний, економічно ефективний і



своєчасний спосіб. Такі галузі промисловості, як автомобільна, логістична, охорона здоров'я і благополуччя, фінансова, «розумні» міста, промисловість 5.0 тощо, матимуть високий потенціал для застосування мережевого розгалуження. Однак підприємства надають перевагу приватним мережам 5G, а не сегментаванню мережі на частини через потенційні ризики безпеки, пов'язані з придбанням фрагментів з публічних мереж 5G оператора. Крім того, приватні мережі 5G можуть будуватися і контролюватися підприємствами з використанням власного спектра. Рішення підприємства щодо вибору між поділом мережі на сегменти або приватною мережею 5G значною мірою залежатиме від вартості, зрілості та довіри до технології.

Розробка і розгортання мережевих послуг традиційним способом з використанням виділеної інфраструктури є повільним і дорогим процесом, який все більше не відповідає потребам бізнесу, що прагне гнучкості та оперативності. Висока вартість підключення та складне обслуговування, пов'язане з використанням пропріетарних рішень, є ключовими проблемами, з якими стикається промисловість у процесі цифрової трансформації. Підприємства можуть керувати своїм наскрізним зв'язком за допомогою спеціальної інфраструктури, розгорнувши приватну мережу 5G.

Приватна мережа 5G як послуга (5G-NaaS) – це інтерфейс прикладного програмування (API) на вершині мережевого оркестратора, який дозволяє стороннім клієнтам з відповідними ІТ-навичками вимагати певні мережеві послуги, налаштовані відповідно до їхніх бізнес-потреб. Він розробляє індивідуальні шаблони, доступні для бізнес-клієнтів, щоб вказати різні вимоги з точки зору місця розташування, тривалості, QoS, додаткових послуг тощо. Модель 5G-NaaS від провайдера може бути «нульовим капіталовкладенням», підписка на неї може стати ключовим інструментом для клієнтів у їхній глибокій трансформації з обмеженим бюджетом. Це комплексне кероване рішення, яке дає змогу операторам мобільного зв'язку та малим і середнім підприємствам швидко і безпечно надавати послуги приватних мереж 5G, як показано на рис. 6.10. Це може звільнити клієнтів від будь-якого типу прив'язки до постачальника, забезпечити більшу гнучкість, конкурентне ціноутворення, економічно ефективно

масштабування та швидке впровадження інновацій, що може значно знизити витрати. Провайдери 5G-NaaS можуть допомогти підприємствам скористатися приватною мережею 5G операторського класу для роботи критично важливих додатків з низькою затримкою, високою пропускну здатністю, наскрізною безпекою та розширеним покриттям. Вони також можуть забезпечити безпечну і швидку мобільність між кількома корпоративними сайтами. Переваги 5G-NaaS для оператора мобільного зв'язку включають :

- Спрощена експлуатація та управління.
- Гнучкі моделі розгортання.
- Інтегрована мобільність оператора.
- Глибоке розуміння бізнесу.
- Найнижча вартість входу.
- Потужні, масштабовані та гнучкі.
- Конфіденційність даних.

У серпні 2021 року компанія NTT, міжнародний постачальник бізнес-рішень і технологій, представила приватну платформу 5G-мережі як послуги (5GNaaS), яка отримала назву NTT P5G [89]. Вона забезпечить приватну мережу продуктивністю, безпекою, контролем і повним покриттям.

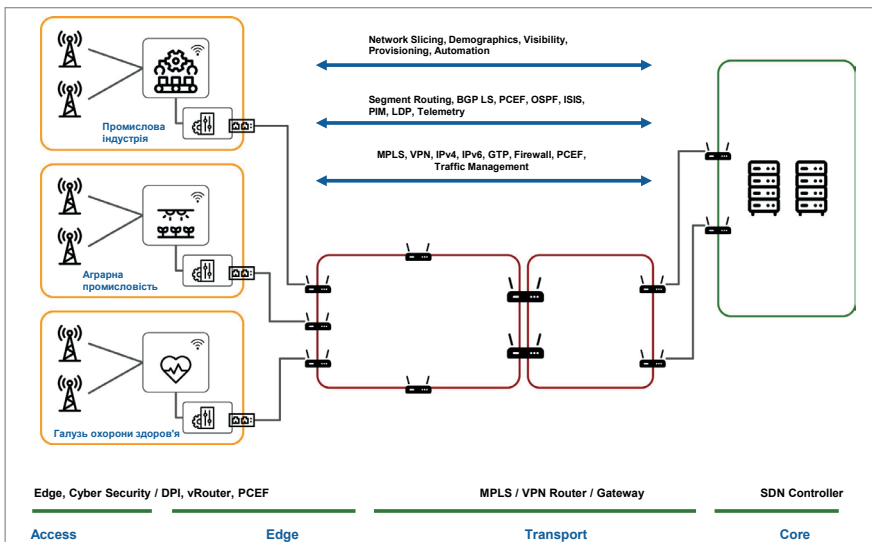


Рис. 6.10. Приватна мережа 5G як послуга (5G-NaaS)

Як обговорювалося в попередньому розділі, розгортання приватної мережі 5G, як правило, може вписуватися в одну з двох категорій: незалежна фізично ізольована або інтегрована з ресурсами загальнодоступної мережі 5G оператора. В обох випадках повноцінна приватна мережа 5G може бути розгорнута підприємством з gNB, 5GC CP, UDM, MEC і UPF у своїх приміщеннях. Оператори пропонують мережеві ресурси (і ліцензований спектр), необхідні для цих приватних проектів 5G, а також інші послуги, такі як управління мережею, допомога з обладнанням і планування. Однак оператори відіграють незначну роль або взагалі не беруть участі у розгортанні приватних мереж 5G для підприємств, які натомість орієнтуються на перевірених постачальників 5G, таких як Nokia, Ericsson, Huawei, Qualcomm тощо [90]. У цьому розділі розглядаються різні послуги та можливості, що надаються операторами мобільного зв'язку.

*Розподіл мережі на частини.* Це може бути використано для створення сегментів або фрагментів мереж операторів для різних сценаріїв використання або додатків, підприємств або профілів клієнтів. Для локального розриву можна розглядати сегментування по всій країні, а оператори наступного покоління мають потенціал для географічного сегментування, з різними конфігураціями мережі та зовнішнім контролем, наданим третім сторонам.

*Лізинг спектра.* Лише деякі оператори мають ліцензії на використання вітчизняного спектра, які можуть бути використані для розгортання приватних мереж 5G в особливо віддалених районах, таких як порти, трубопроводи, сільськогосподарські угіддя, шахти тощо. Спектр може бути закріплений за бізнесом або підприємством через оренду або місцевий перепродаж.

*Кампусні мережі.* Виділена мережева інфраструктура на місці може бути надана великим підприємствам, таким як аеропорти, лікарні та виробники. Можна покрити як зовнішні, так і внутрішні території, а для повсюдного покриття можна додати спеціальне додаткове радіообладнання. Для кращого адміністративного контролю та прав підприємствам може бути запропонована незалежна локальна основна мережа або окремий віртуальний хмарний екземпляр. Якщо

залучити оператора мобільного зв'язку, буде простіше взаємодіяти локальній мережі 5G з глобальною мережею.

*Спільні внутрішньо-будинкові системи.* Оператори будуть співпрацювати для створення, фінансування та спільного використання безпроводних рішень для внутрішніх приміщень на користь клієнтів. У Великобританії Форум технічної специфікації спільних операторів (Joint Operator Technical Specification – JOTS) допомагає операторам та їх партнерам впроваджувати високоякісні спільні безпроводні приватні мережі 5G [91].

*Розгортання та експлуатаційні послуги.* Оператори надають набір компонентів мережевих послуг для розгортання приватних мереж 5G. Вони можуть проектувати і розгортати мережеві системи, але дозволяти своєму технічному персоналу володіти, управляти і експлуатувати їх. Різні інші керовані послуги, такі як управління абонентами, безпека, радіочастотне планування, можуть надаватися операторами [92].

*Хмарні функції.* Приватна мережа 5G може бути побудована з використанням численних операційних систем, програмних компонентів, ядра 5G, радіоінфраструктури, взаємозв'язку з іншими мережами, дотримання нормативних вимог і так далі. Деякі постачальники намагаються запропонувати хмарні компоненти безпосередньо підприємствам. Оператори мають справу з власними багатокористувачькими хмарними ресурсами, можливо, розміщеними у власній інфраструктурі ЄС [93].

---

## **6.6. Цифровізація інфраструктури України за допомогою приватних мереж 5G**

5G може змінити правила гри для бізнесу, сприяючи підвищенню ефективності інновацій та трансформації в різних галузях. Приватні мережі 5G створені, щоб допомогти вам скористатися можливостями в різних секторах, таких як виробництво, логістика та ланцюги поставок, роздрібна торгівля, охорона здоров'я, транспорт та багато інших. Приватні мережі 5G, що стимулюють такі інновації, як покращена автоматизація, краща прозорість в управлінні ланцюгами поставок

і нові способи надання покращеного клієнтського досвіду, можуть мати вирішальне значення для великого бізнесу. Приватну мережу 5G можна розглядати як мережеву послугу наступного покоління для бізнесу, що сприяє зниженню операційних витрат, ефективності та підвищенню рівня бізнес-функцій – від мобільної робочої сили до віддалених операцій і ланцюгів поставок для виробництва. У цьому розділі надано короткий огляд основних приватних прикладів використання 5G у 5 різних галузях.

*Інновації в охороні здоров'я.* Охорона здоров'я є одним з найбільших адресних ринків серед 10 промислових секторів, які були проаналізовані. Критично важливою особливістю ІТ-інфраструктури охорони здоров'я є мережеве з'єднання. 5G допомагає надавати безпечні, надійні, ефективні та якісні медичні послуги для всіх. Трансформація лікарняних мереж за допомогою приватних мереж 5G має важливе значення для підвищення надійності, максимізації покриття та збереження надійної безпеки. Приватні мережі 5G пропонують автономний, підключений кампус безпечного, наднадійного бездротового середовища, що дозволяє датчикам і пристроям Інтернету речей обмінюватися даними один з одним. Наприклад, лікарня в Ухані, Китай, епіцентрі глобального спалаху Covid-19, розгорнула парк роботів для надання допомоги медичним працівникам і пацієнтам, використовуючи такі характеристики технології 5G, як надійність, швидкість і якість. Малайзійська поліція використовувала безпілотники на базі технології 5G з технологією теплового зондування над великим натовпом для безконтактного вимірювання температури тіла. Перша в світі приватна медична мережа 5G була запущена компанією China Telecom і Другою університетською лікарнею Західного Китаю, провінція Сичуань, у 2019 році. Вона дозволить передавати величезні обсяги даних на високій швидкості і з низькою затримкою, а лікарі зможуть консультуватися зі своїми колегами в 27 інших населених пунктах. Завдяки широкому спектра можливостей 5G, приватні мережі 5G будуть орієнтовані на кілька окремих випадків використання, таких як дистанційні консультації, мобільні обходи палат, дистанційна хірургія, реагування на надзвичайні ситуації, безпроводна спеціалізована діагностика,

внутрішньолікарняний моніторинг тощо у сфері охорони здоров'я. Це відіграватиме вирішальну роль у виявленні нових рішень у діагностичній, профілактичній та терапевтичній допомозі.

*Громадський транспорт – аеропорти.* Приватні безпроводні рішення промислового класу є рушійною силою Індустрії 4.0 сьогодні і цифрової революції 5G завтра. Конкуренція за розгортання приватних 5G в аеропортах вже почалася. Сучасний цифровий аеропорт вимагає підтримувати рух і безпеку для всіх типів пасажирів, авіакомпаній, клієнтів, роздрібних орендарів, компаній, що займаються наземним обслуговуванням і обробкою багажу, а також гостей. Приватні безпроводні мережі 5G забезпечують наднадійний, безпечний зв'язок, який гарантує оперативну та ситуаційну обізнаність операційного центру аеропорту (АРОС) для підвищення ефективності, автоматизації та реагування. Ericsson розгорне приватну мобільну мережу 5G в аеропорту Парижа для Air France, Hub One і Groupe ADP, яка охопить аеропорти Париж-Орлі, Париж-Шарль де Голль і Париж-Ле Бурже. Nokia у партнерстві зі шведською телекомунікаційною компанією Telia створить першу в світі приватну мережу в аеропорту Гельсінкі у Фінляндії для покращення роботи аеропорту та обслуговування пасажирів [54]. Мережа, готова до 5G, буде запущена в аеропорту Брюсселя спільно з Nokia та оператором Citymesh. Приватні мережі 5G допомагають аеропортам мінімізувати залежність від сторонніх операторів мобільного зв'язку і дають можливість розробити надійну і безпечну інфраструктуру для досягнення цифрової трансформації.

*Промисловість 4.0.* 5G є критично важливим каталізатором для Індустрії 4.0. Згідно з дослідженням GSMA, мережева технологія 5G у поєднанні з Інтернетом речей, штучним інтелектом (ШІ), великими даними та периферійними обчисленнями, як очікується, стане ключовим фактором розвитку Індустрії 4.0. Мережі 5G розширять можливості бізнесу за межами виробничих цехів, включаючи дистрибуцію, ланцюги поставок, складування та обслуговування клієнтів. Інтегроване рішення 5G може забезпечити надійний і безпечний наскрізний зв'язок для підвищення продуктивності всього підприємства. Підприємства почали віддавати перевагу приватним домашнім бездротовим мережам 5G, а не операторам мобільного зв'язку. При-

ватна модель пропонує численні суттєві переваги, такі як контроль і захист інформації, можливість оптимізації мереж під свої ексклюзивні вимоги, гнучкість модернізації/реконфігурації відповідно до зростаючих бізнес-цілей. Шведський виробник Ericsson запустив попередню версію 5G з метою укладення угод з Індустрією 4.0. Він об'єднався з російською компанією «Мобільні телесистеми» (МТС) для розгортання своєї першої приватної мережі з підтримкою 5G, яка буде використовуватися найбільшим у світі виробником золота, компанією «Поліметалл». Nokia і China Unicom розгорнули приватну мережу 5G для заводу BMW в китайській провінції Ляонін для надання інтелектуальних виробничих послуг. Це забезпечить зв'язок з низькою затримкою для відеоспостереження, периферійних обчислень з багаторазовим доступом для обробки та аналізу даних ближче до місця їх використання.

*Точне землеробство.* Сільське господарство стає цифровим, і в майбутньому фермерське господарство буде використовувати більше даних і менше хімікатів. Нові технології, такі як 5G та Інтернет речей, дозволяють на практиці досягти більшої ефективності, захисту навколишнього середовища та сталості. Можливості 5G та обробка даних у режимі реального часу призведуть до революції в аграрному секторі. Сенсорні дані з полів можуть допомогти фермерам визначити потребу у воді на певних ділянках, наявність захворювань або необхідність боротьби зі шкідниками. Технологія 5G полегшує масштабування мереж, що містять велику кількість пристроїв Інтернету речей, автономних роботів, дронів, а отже, може назавжди змінити сільське господарство і фермерство. Приватні мережі 5G принесуть різні переваги, такі як управління даними в сільському господарстві, контроль якості врожаю, управління витратами, ефективність бізнесу тощо.

*Виділена приватна мережа 5G розгортання.* Підприємства повинні вирішити, як забезпечити різні приватні варіанти використання 5G, які забезпечать реальну рентабельність інвестицій (ROI). Деякі підприємства вже почали досліджувати і, в деяких випадках, розгорнули їх. Це приносить користь кожній галузі завдяки покращеному покриттю, швидкості та пропускну здатності 5G.

Хоча не кожне підприємство потребує 5G, майже всі великі бізнес-середовища, які потребують надійної та стабільної роботи, високої доступності, отримують вигоду від приватного 5G.

*Аспекти безпеки приватних мереж 5G.* Багато підприємств вважають, що наявність приватної мережі 5G забезпечує їм безпеку. Однак, при переході до бездротового зв'язку поверхня атаки може бути перебільшена з різних причин, таких як фізичне переміщення пристроїв в мережі, розширення експозиції IoT, виробники IoT, оператори мобільного зв'язку/провайдери, постачальники, продавці і так далі. Приватні мережі 5G стають значною частиною критично важливої інфраструктури підприємства і його повсякденних операцій, що робить аспекти безпеки набагато важливішими. Надійний рівень безпеки має вирішальне значення. Безпека приватних мереж 5G може бути забезпечена за допомогою двокомпонентного підходу: 1) цілісність і доступність загальнодоступної мережі повинні бути збережені; 2) для захисту екосистем, що базуються на можливостях 5G, бажано надавати додаткові послуги безпеки.

Застосування безпеки також базується на базовій архітектурі мережі. Основними компонентами приватної мережі 5G є площини управління і користувача (CP і UP) ядра 5G, мережа радіодоступу (RAN) і периферійні обчислення з множинним доступом (MEC). Як обговорювалося в розділі «Сценарії розгортання», розгортання мережі, незалежної від оператора, є одним з найкращих архітектурних рішень для приватної мережі 5G. У ній всі три компоненти (RAN, ядро 5G, MEC) фізично ізольовані від загальнодоступної мережі 5G оператора. Інший варіант передбачає розгортання логічно ізольованої мережі, залежної від оператора, де деякі або всі компоненти можуть бути в загальнодоступній мережі 5G. Перший варіант є більш безпечним, але другий – більш економічно вигідним. Кожен варіант розгортання можна розглядати з точки зору підприємства та оператора, оскільки такі профілі, як контроль, кастомізація, складність та гнучкість, будуть відрізнятися для кожного типу. Ключові зони кібернетичної цікавості, на які слід звернути увагу в мережах 5G.

У порівнянні з корпоративними Wi-Fi додатками, приватні мережі 5G пропонують більше переваг. Їх легко розгортати, вони



менш вразливі до перешкод, їх важче підслуховувати і вони більш надійні. Експерти в галузі 5G прогнозують, що Wi-Fi і приватний 5G можуть забезпечити спільні переваги. Телекомунікаційні компанії мають можливість запропонувати безпеку як послугу (SecaaS), як додаток до приватної мережі 5G.

Сьогодні 5G розгортається по всьому світу з широким впровадженням набагато швидше, ніж попередні покоління. З'явилося багато нових можливостей і засобів для принципово нових випадків використання, які були неможливі в попередніх поколіннях. Сотні мільйонів пристроїв вже поставлені і мільярди будуть поставлені в найближчі кілька років, а отже, це значний прогрес, який перевищує темпи будь-якого іншого попереднього покоління, яке ми бачили. У той же час, архітектура і моделі розгортання RAN розвиваються так само швидко. Сьогодні більша частина світу базується на традиційних архітектурах RAN, де існують в основному закриті системи, що включають базову мережу, яка може мати дещо відкритий інтерфейс через транзитну мережу до RAN, але вся RAN реалізується, як правило, одним постачальником або невеликою кількістю постачальників, які тісно співпрацюють з багатьма пропрієтарними інтерфейсами. З початком переходу до 5G з'являються проекти з відкритим вихідним кодом, такі як Magma core, srsRAN, Aether, особливо в телекомунікаційному світі [94].

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РОЗГОРТАННЯ ПРИВАТНИХ МЕРЕЖ 5G ADVANCED НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ СЕГМЕНТАВАННЯ NETWORK SLICING

---

### **7.1. Метод інтелектуального розгортання приватних мереж 5G Advanced на основі технології сегментавання**

Розподіл мережі на сегменти 5G – це революційна концепція, яка може змінити спосіб використання безпроводних мереж зв'язку в різних галузях, включаючи «розумні» мережі та промислові послуги. З появою технології 5G розгалуження мережі стало реальністю, що дозволяє операторам розділити мережу на віртуалізовані, незалежні і безпечні сегменти для задоволення різноманітних потреб різних галузей.

У контексті Smart Grid мережеве розгалуження дозволяє створювати виділені канали зв'язку для критично важливих мережевих додатків, таких як віддалений моніторинг, управління та автоматизація. Використовуючи технологію розгалуження мережі 5G, оператори «розумних» мереж можуть підвищити надійність, ефективність і безпеку мережі, що має важливе значення для задоволення зростаючих потреб сучасного суспільства в енергії.

Аналогічно, в секторі промислових послуг розгалуження мережі 5G може забезпечити кастомізовані і виділені сегменти мережі для підтримки різних варіантів використання, таких як автоматизація виробництва, віддалений моніторинг активів і управління ланцюгами поставок. Це може дозволити галузям підвищити ефективність, скоротити час простою і оптимізувати свої операції, забезпечивши високоякісну і надійну інфраструктуру бездротового зв'язку.

Загалом, розбиття мережі на сегменти 5G має величезний потенціал для Smart Grid і промислових послуг, пропонуючи новий рівень гнучкості, масштабованості та ефективності бездротового зв'язку. Оскільки впровадження технології 5G продовжує зростати,

ми можемо очікувати, що з'являться більш інноваційні варіанти використання і додатки, які зможуть отримати вигоду від можливостей мережевого розгалуження. Зокрема, актуальним завданням є дослідження процесу розгортання віртуальних мереж в межах однієї фізичної інфраструктури 5G, розділеної на загальнодоступну для користувачів і приватну для Smart Grid і промислових додатків. Це, в першу чергу, найбільш оптимальний та економічно вигідний підхід до організації мереж 5G різного призначення. Адже розгортання окремих приватних мереж 5G на різних апаратно-програмних інфраструктурах вимагає перегляду частотного планування, коли фізичне розташування промислових підприємств і систем генерації енергії знаходиться в межах одного міського району. Однією з проблем, яка може виникнути при розгортанні спільної структури розгалуження мережі Smart Grid і промислових послуг в 5G, є необхідність забезпечити доступ різних послуг до необхідних мережевих ресурсів при збереженні бажаного рівня ізоляції та безпеки. Це вимагає розробки відповідних механізмів сегментації мережі і стратегій управління ресурсами, які можуть збалансувати суперечливі вимоги різних сервісів, такі як затримка, надійність і пропускна здатність. Крім того, розгортання загальної системи мережевого сегментування може вимагати координації між різними зацікавленими сторонами, такими як телекомунікаційні оператори, постачальники енергії та промислові компанії, щоб забезпечити конфігурацію та оптимізацію мережевої інфраструктури відповідно до конкретних потреб кожного сервісу.

Хоча технологія розбиття мережі на сегменти може здаватися привабливою, продуктивність окремих сегментів може бути недостатньою, якщо кожному сегменту не виділено необхідних мережевих ресурсів. Для вирішення цієї проблеми може бути використана модель виділених ресурсів, в якій кожному сегменту виділяються фіксовані та достатні ресурси. Тим не менш, ця модель розподілу ресурсів не дозволяє коригувати виділені ресурси протягом життєвого циклу, що потенційно може призвести до марної трати ресурсів у разі зміни попиту на ресурси сегмента. По суті, моделі розподілу ресурсів бракує гнучкості та еластичності.

Однією з можливих альтернатив моделі виділених ресурсів є модель спільних ресурсів. У цій моделі кожен фрагмент може гнучко регулювати виділені йому ресурси, що забезпечує високу еластичність і масштабованість. Однак важливо враховувати, що загальна кількість ресурсів в мережі обмежена, тому якщо одному зрізу виділити надмірну кількість ресурсів, інші зрізи можуть відчувати дефіцит ресурсів і не надавати задовільного сервісу користувачам. Зокрема, для критично важливих послуг Smart Grid і промислових послуг, таких як наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC), ресурси повинні бути виділені в достатній кількості, щоб забезпечити надійність і якість обслуговування. При використанні моделі розподілених ресурсів важливо враховувати час, необхідний для коригування виділених ресурсів для кожного зрізу. Це може зайняти значний час, тому ресурси слід розподіляти заздалегідь, враховуючи майбутні потреби зрізів. Важливо також пам'ятати про можливість марнування ресурсів, якщо їх розподілити занадто рано, або про недостатність ресурсів, якщо їх розподілити занадто пізно. Таким чином, для ефективного розподілу ресурсів можна прогнозувати попит на послуги і проактивно розподіляти ресурси, але при цьому необхідно враховувати кількість сегментів і час, необхідний для коригування ресурсів, щоб забезпечити якість і надійність надання послуг користувачам.

Зокрема, з практичної точки зору доведено, що чим більше незалежних сегментів організовано в 5G, тим більша ймовірність неефективного використання спільних ресурсів і тим більше часу потрібно для динамічного перерозподілу ресурсів між віртуальними сегментами. Такі фактори негативно впливають на якість обслуговування критично важливих сервісів. Тому завдання інтелектуального розподілу радіоресурсу ускладнюється при організації зрізу мережі різного призначення через дворівневий пріоритет, який необхідно враховувати в такій системі. Перший рівень пріоритету стосується різних зрізів, які мають власний пріоритет відповідно до домовленостей між власником сегмента і провайдером мережі, тобто міжзрізовий пріоритет. Другий рівень стосується пріоритету серед користувачів/датчиків одного

сегмента, тобто внутрішньо-сегментного пріоритету. Сучасні системи 5G можуть максимізувати якість обслуговування користувачів, але вони не можуть виконувати інтелектуальний розподіл ресурсів в середовищах з мережевим розшаруванням. Це обмеження пов'язане з тим, що розподіл ресурсів в системах 5G виконується шляхом присвоєння пріоритету сервісу, запитуваному користувачьким обладнанням (UE). Такий підхід не працює, якщо різні пристрої можуть належати до різних сегментів з різними пріоритетами. Розподіл ресурсів між такими пристроями повинен здійснюватися з урахуванням пріоритету сегмента, до якого вони належать, а також пріоритету послуги для дотримання вимог QoS.

Дослідження показали, що більшість наукових робіт, пов'язаних з розгалуженням мережі 5G, зосереджені на організації окремих віртуальних сегментів, призначених для трьох типів послуг з різними вимогами, а саме: *розширеного мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB)*, *міжмашинного зв'язку (mMTC)* та *наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC)*. При такій організації мережі виникає ситуація, коли послуги з однаковими вимогами від різних приватних мереж, включаючи Smart Grid і промислове виробництво, будуть передаватися в межах одного віртуального сегмента.

З точки зору конфіденційності та ізоляції трафіка такі рішення є неефективними для компаній, які орендують загальну мережеву інфраструктуру 5G. Саме тому ми вважаємо, що в контексті «розумних» мереж і промислових застосувань існує особлива потреба у відокремленні потоків трафіка, пов'язаних з критичною інфраструктурою, від потоків, пов'язаних із загальним використанням Інтернету. Цього можна досягти, розгорнувши в інфраструктурі 5G приватну віртуальну мережу, зарезервовану виключно для інтелектуальних мереж, промислового виробництва та громадського користування. По суті, наш підхід до поділу мережі передбачає організацію трьох логічних екземплярів віртуальної мережі, кожен з яких незалежно експлуатується різними орендарями, співіснує в межах однієї інфраструктури і динамічно розподіляє доступні фізичні ресурси. Ми пропонуємо унікальний

підхід до інтелектуального розподілу радіоресурсів, що враховує як пріоритет різних сегментів, так і пріоритет пристроїв всередині сегмента для задоволення вимог до якості обслуговування (QoS) для різних типів трафіка.

Перш за все, розглянемо основні вимоги QoS для «розумних» мереж і промислових сервісів. У сучасному розумній цифрова екосистема «розумних» мереж складається з п'яти фаз: *генерація, передача, перетворення, розподіл та споживання*. На основі нашого дослідження ми визначили чотири типові сценарії надання послуг інтелектуальних мереж, для яких може знадобитися бездротовий зв'язок 5G. Ці сценарії включають інтелектуальну автоматизацію розподілених фідерів, точне управління навантаженням на мілісекундному рівні, збір інформації про низьковольтні розподільні системи та розподілені джерела живлення. У промислових цифрових екосистемах використовуються такі послуги, як управління рухом промислових роботів, дистанційне керування машинами, відеоспостереження, дистанційна діагностика та технічне обслуговування. Кожен з цих видів послуг має свої вимоги до затримок і надійності передачі, що, відповідно, вимагає окремого визначення пріоритетів при розподілі ресурсів у зрізі мережі. Вимоги до різних сервісів Smart Grid показано у табл. 7.1. та для промислових сервісів у табл. 7.2.

Таблиця 7.1

### Вимоги до різних сервісів Smart Grid

Електронні сервіси	Вимоги до затримки	Вимоги до надійності	Пріоритет обслуговування
Інтелектуальна розподілена автоматизація фідерів	Високі (<10 мс)	Високі	Високий (L1)
Точне керування навантаженням на мілісекундному рівні	Високі (<20 мс)	Високі	Середній/високий (L2)
Збір інформації про низьковольтні розподільні системи	Середні (<1 хв.)	Середні	Середній (L3)
Розподілені джерела живлення	Низькі (не визначено)	Низькі	Низький (L4)

**Вимоги до різних промислових сервісів**

Електронні сервіси	Вимоги до затримки	Вимоги до надійності	Пріоритет обслуговування
Керування рухом промислових роботів	Високі	Високі	Високий
Дистанційне керування машинами	Високі	Високі	Середній/ Високий
Відеоспостереження	Низькі	Середні	Середній
Дистанційна діагностика та обслуговування	Середні	Високі	Середній/ Низький

На рис. 7.1 показано наш сценарій розгортання приватних віртуальних мереж в інфраструктурі 5G, які зарезервовані виключно для «розумних» мереж, промислового виробництва та публічного використання. Для віртуальних сегментів «розумних» мереж та промислового виробництва детально показані основні види послуг та їх пріоритети, які потребують зв'язку по каналах 5G.

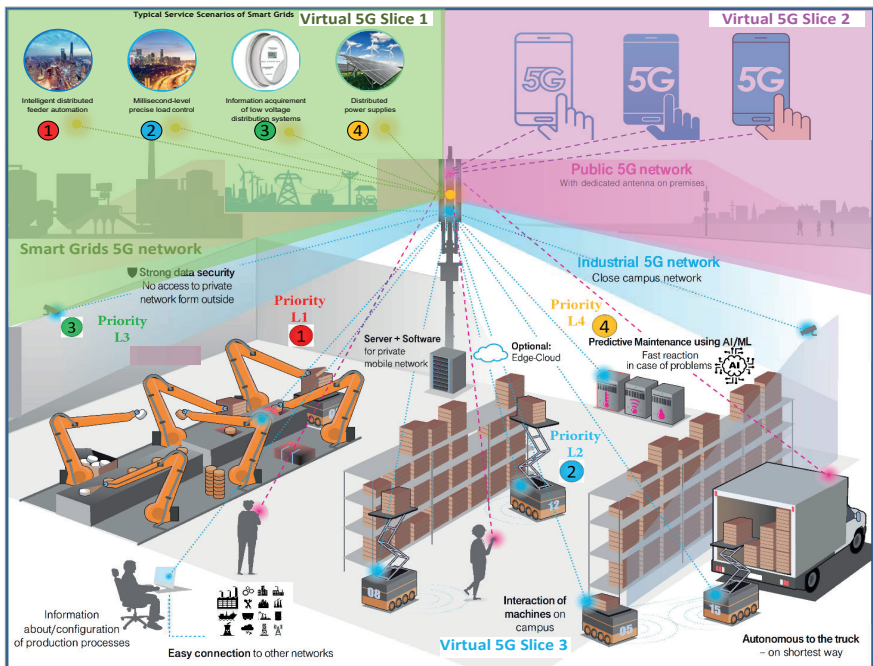


Рис. 7.1. Виробничий процес з використанням промислової приватної мережі 5G [89, 91]

Наскрізна віртуалізація інфраструктури 5G є ключовою технологією для забезпечення необхідної ізоляції між сегментами мережі, яка гарантує, що операції одного сегмента не впливають на продуктивність і функціональність інших сегментів. Віртуалізація здійснюється для різних доменів, таких як радіорелейний зв'язок, транспортні мережі, а також периферійні та хмарні обчислення. Зокрема, на рівні RAN здійснюється віртуалізація блоків фізичних ресурсів (PRB), що дозволяє розподіляти пропускну здатність радіоканалу між різними віртуальними мережами. Протокол OpenFlow дозволяє створювати віртуальні мережі за допомогою програмно-визначених мереж (SDN) в транспортних мережах. Технології віртуальних машин і контейнерів Docker дозволяють віртуалізувати обчислювальні ресурси в периферійних і хмарних обчисленнях. У своїй роботі ми обмежуємося віртуалізацією лише на рівні RAN. Оскільки віртуалізація RAN має першорядне значення під час розбиття мережі на сегменти, забезпечуючи виконання потенційно жорстких вимог усіх сегментів (наприклад, затримки та пропускну здатності) через безпроводний інтерфейс 5G за рахунок спільного використання радіоресурсів між сегментами мережі. Якщо віртуалізація в домені RAN організована погано і не відповідає необхідним вимогам до послуг, то подальша віртуалізація доменів транспортних і обчислювальних ресурсів мережі втрачає сенс.

У своїй роботі для віртуалізації домену RAN ми модифікуємо відомий брокер сегментів мережі 5G [95], включаючи в нього модуль штучного інтелекту. Основна роль інтелектуального брокера полягає в динамічному розподілі спільних радіоресурсів між сегментами мережі, виділяючи для кожного з них орендовану пропускну здатність. Для цього брокер аналізує вхідні вимоги Угоди про рівень обслуговування (SLA), пов'язані із запитами на орендовані фрагменти мережі, і розподіляє необхідну частку фізичних ресурсних блоків із загального пулу.

Для реалізації цієї ідеї ми розробляємо чотири додаткові модулі для брокера мережевого розшарування: 1) модуль прогнозування, який прогнозує трафік мережевих зрізів на основі історичного трафіка, 2) модуль пріоритетного управління доступом до мереже-



вих зрізів, який дає можливість на основі аналізу пріоритетів зрізу динамічно перерозподіляти між ними ресурси в умовах порушення SLA, 3) модуль планувальника мережевих зрізів, який відповідає за дотримання узгоджених SLA та повідомляє модулю прогнозування про відхилення від них, 4) а також модуль розумного планування розподілу ресурсів в середині зрізу з урахуванням пріоритетів сервісу, який дає можливість забезпечити необхідні вимоги QoS для критично важливих сервісів в умовах нестачі фізичних радіоресурсів. Структурно-функціональна схема пропонованої віртуалізованої програмно-конфігурованої мережі 5G показано на рис. 7.2.

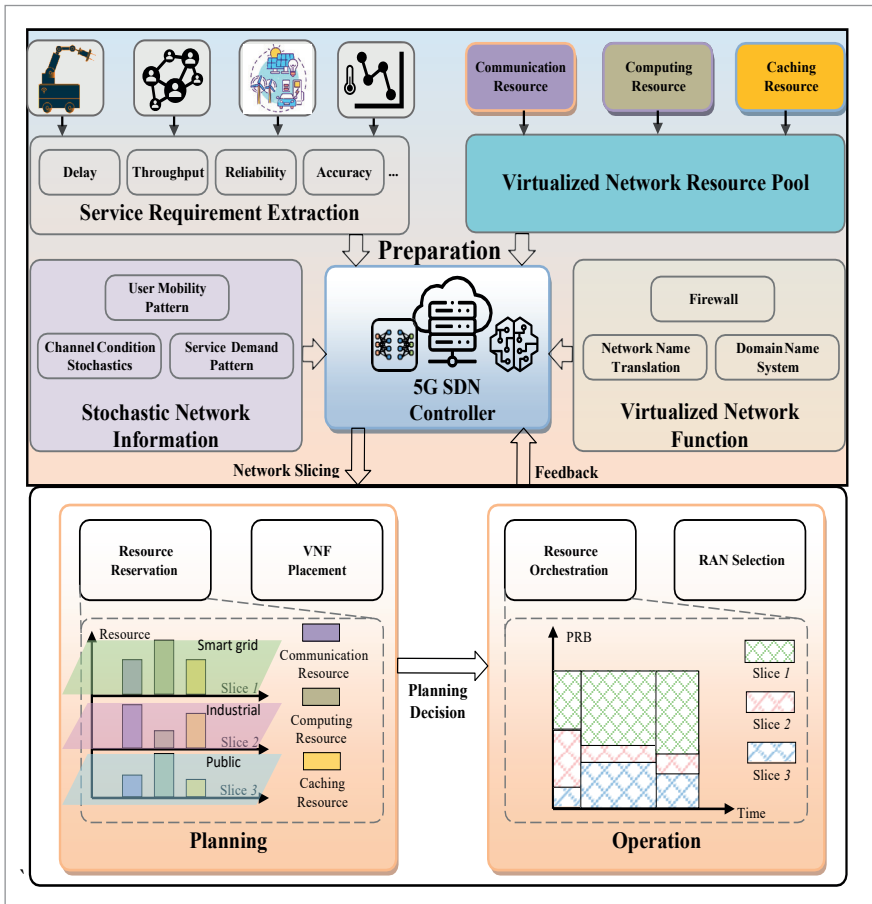


Рис. 7.2. Структурно-функціональна схема пропонованої віртуалізованої програмно-конфігурованої мережі 5G

У роботі ми пропонуємо метод інтелектуального прогнозування трафіка на основі алгоритмів штучного інтелекту, який дає змогу передбачити загальний попит на трафік в конкретній зоні покриття 5G, а також попит на кожен окремий сегмент віртуалізованої мережі. Поєднання інтелектуального прогнозування та класифікації трафіка використовується для підтримки спільного використання ресурсів, динамічного створення та управління сегментами, ізоляції сегментів мережі, управління мобільністю, безпеки, віртуалізації та розподілу безпроводних ресурсів з метою забезпечення надійного та якісного зв'язку для автоматизованих систем управління промисловим виробництвом.

Логічна мережева нарізка радіоресурсів дозволяє оператору мобільного зв'язку надавати частину радіоресурсів базової станції операторам віртуальних мереж у вигляді зрізу мережі для приватного використання. Такий підхід розгортання мережі буде важливим для операторів мобільного зв'язку, оскільки з'явиться можливість по-різному стягувати плату за кожний сегмент, і навіть коригувати витрати за кожен мережевий зріз, що приведе до балансу між прибутковістю бізнесу та задоволенню потреб клієнтів.

Нарізка мережі на рівні радіодоступу мережі 5G здійснюється за допомогою блоків фізичних ресурсів (PRBs) (рис. 7.3).

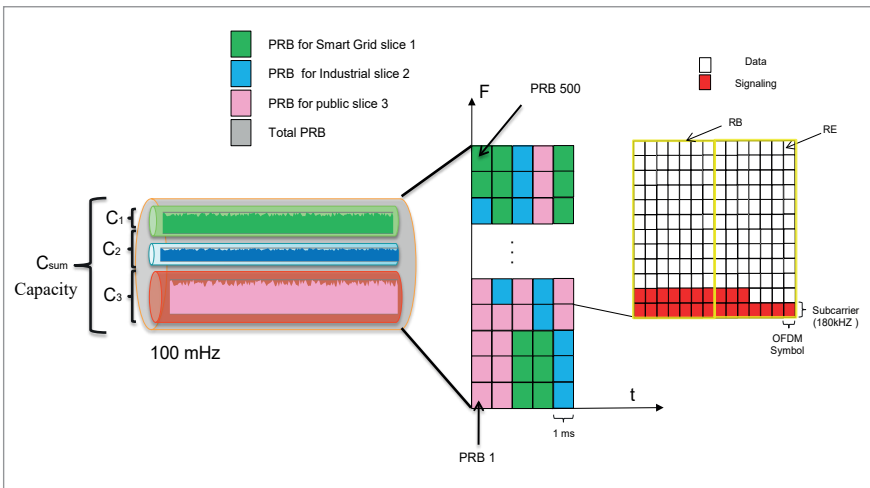


Рис. 7.3. Нарізка мережі на рівні радіодоступу 5G [89]

Кожна PRB складається з 2 ресурсних блоків (RBs). Кожен RB складається з 12 піднесучих і 7 OFDM символів на звичайному циклічному префіксі. Таким чином, кожен PRB передає  $12 \cdot 7 \cdot 2 = 168$  ресурсних блоків (RE) за 1 мс. Кожен RE може передавати 2, 4, 6, 8 біт в залежності від модуляції (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM відповідно). У кожному PRB частина RE зарезервована для передачі службових даних, а саме 24 REs. Допустимі діапазони частот 5G: 1,4, 3, 5, 10, 15, 20, 100 МГц, залежно від антени пристрою користувача.

Для організації інтелектуальної мережевої нарізки ми модифікували та інтегрували додатковий елемент в архітектуру віртуалізованої мережі 5G, а саме менеджера нарізки (Slicing Manager), який підсумовує пропускну здатність всіх радіоресурсів RRH і розподіляє загальну пропускну здатність між орендарями, що беруть участь у нарізці. Для простоти розуміння роботи інтелектуального управління ресурсами припускається, що загальна максимальна пропускну здатність БС (базової станції 5G)  $C$  є постійною і являє собою загальний обсяг радіоресурсів, що підлягають розподілу. В той час, як реальна пропускну здатність БС залежить від багатьох факторів, в тому числі від стану каналів зв'язку.

Нехай на БС активовано  $K$  зрізів, позначимо їх множину через  $\xi$ ,  $|\xi| = K$ . Нехай пропускну здатність зрізу дорівнює  $C_{K[Gbps]} \geq 0$ ,  $K \in \xi$  і  $\sum_{K \in \xi} C_K \leq C$ . Позначимо кількість користувачів/пристроїв у зрізі  $K$  через  $N_K$ , а кількість користувачів/пристроїв у всіх зрізах  $N$ . Припустимо, що користувач 5G eNodeB може підтримувати тільки одне з'єднання і тільки в одному зрізі. Нехай пропускну здатність  $T_{K[Gbps]}$ , що надається кожному користувачеві/пристрою в зрізі  $K$ , є результатом рівномірного розподілу пропускну здатності зрізу.

$$T_K = \frac{C_K}{N_K}, K \in \xi \quad (7.1)$$

В реальності не всі користувачі/пристрої зрізу отримують однакову пропускну здатність, враховуючи стан радіоканалів, але розподіл ресурсів всередині зрізу також різний. Позначимо вектор-стовпець пропускну здатності через  $\Sigma T_N = (T_N)_{K \in \xi}$ .

Припустимо, що згідно з угодою про рівень обслуговування (SLA) між власником мережі та орендарем сегмента, середня пропускну

здатність  $0 < T_K^{min} \leq T_K$  не повинна опускатися нижче заздалегідь визначеного порогового значення, якщо кількість користувачів/пристроїв у сегменті не перевищує певну заздалегідь визначену кількість  $T_K^{const}$ . Порогове значення відповідає мінімальній пропускній здатності в сегменті  $K$ , необхідній для задоволення вимог до якості обслуговування (QoS).

Крім того, передбачається, що для забезпечення ефективного використання радіоресурсів, SLA також визначає максимальну пропускну здатність користувачів для кожного зрізу  $T_K < T_K^{max} \leq C$ .

Він визначається сервісом, що надається в зрізі, і зазвичай відповідає тому значенню, що надання швидкості передачі даних вище максимальної не призведе до жодного поліпшення QoS або QoE (Quality of Experience) для користувача. Позначимо вектори-стовпчики мінімальної  $T^{min} < (T_K^{min})_{K \in \xi}$  та максимальної  $T^{max} < (T_K^{max})_{K \in \xi}$  швидкості передачі даних. Очевидно, що ізоляція продуктивності мережевого зрізу не може бути гарантована для необмеженого трафіка у всіх зрізах через обмеження пропускної здатності, тому вважається, що ізоляція зрізу забезпечується до тих пір, поки кількість користувачів/пристроїв у цьому зрізі не перевищує заданий поріг

$$0 \leq N_K^{const} \leq \left\lfloor \frac{C}{T_K^{min}} \right\rfloor \quad (7.2)$$

Цей поріг можна задати як ємність зрізу  $C_{K[Gbps]}^{const}$ , або як частку  $\tau_s$  від загальної ємності  $\tau_K = \frac{C_K^{const}}{C}$ . Тоді  $N_K^{const} = \left\lfloor \frac{\tau_K C}{T_K^{min}} \right\rfloor$ .

Зауважимо, що  $0 \leq \tau_K \leq 1$  для всіх  $K \in \xi$  і  $0 \leq \sum_{K \in \xi} \tau_s \leq K$ . Це означає, що дозволено додаткове резервування ресурсів, і загальна ємність зрізів, узгоджених в SLA, може бути більшою за  $C_K$ .

Припустимо, що кожному зрізу присвоєно пріоритет  $p_K \in N$ , де  $p_K = 1$  це найвищий пріоритет  $P_{[1 \times K]}$ . Пріоритети застосовуються для розподілу пропускної здатності згідно укладеного контракту лише у випадку надлишкового резервування, коли два або більше зрізів конкурують за резервну пропускну здатність. Отже, ми можемо очікувати, що для критичних зрізів він дорівнюватиме  $\tau_K$  або буде близьким до 1.

Схема динамічного розбиття на зрізи забезпечує гнучке ізолювання продуктивності зрізу на основі параметрів,  $T_K^{max}$ ,  $T_K^{min}$ ,  $(\tau_K)_{K \in \xi}$ ,  $p_K$ .

Схема передбачає динамічне призначення пропускнуї здатності зрізам відповідно до їхніх потреб, виражених у кількості користувачів N. Щоб гарантувати ефективне використання ресурсів, орендована пропускна здатність не є строго гарантованою для відповідного зрізу; зріз має пріоритет перед іншими зрізами на цю пропускну здатність при розподілі ресурсів.

Інтелектуальна схема планування з декількома пріоритетами повинна бути розроблена в контексті різних галузевих сценаріїв і різних вимог до якості обслуговування [92]. При обмежених радіоресурсах всередині сегмента інтелектуальна схема планування розподілить РБ між різними сегментами 5G, щоб задовольнити високопріоритетні вимоги до обслуговування інтелектуальних виробничих підприємств і гнучкого використання ресурсів. Як приклад, на рис. 7.1. показано виробничий процес, де в приватній секції промислової мережі 5G є пристрої і сервіси, які вимагають різних норм QoS. Зокрема, віддалені кооперативні роботи вимагають наднизької затримки і високої надійності, для чого необхідний високий пріоритет (пріоритет L1) розподілу ресурсів. Взаємодія машин в кампусі має пріоритет L2. Відеокамери вимагають високої пропускнуї здатності, але не таких високих вимог до затримок і втрати даних (пріоритет L3). Давачі збору статистики та прогнозування виробничих процесів мають найнижчий пріоритет обслуговування (пріоритет L4). Пріоритети обслуговування розділені на чотири класи і показані у табл. 7.1 та табл. 7.2. Відповідно до запропонованого методу, ресурсні блоки всередині зрізу будуть розподілені відповідно до пріоритету сервісу. У роботі запропоновано алгоритми управління пріоритетами IoT в середині промислового сегмента віртуалізованої 5G мережі.

#### *Для IoT класу L1*

Коли алгоритм ініціюється, базова станція спочатку чекає на запит на передачу даних від пристрою (блок 1). Після отримання запиту система негайно аналізує пріоритет пристрою, який ініціює цей запит. Якщо пристрій має найвищий пріоритет (L1), відбувається перевірка черги та доступних мережевих ресурсів для обробки запиту на передачу даних (блок 2). У випадку наявності достатніх ресурсів, базова станція налаштовується на передачу даних (крок 3), і на

IoT-пристрій надсилається відповідний сигнал та запит на передачу інформації (крок 4). Після успішної передачі система зберігає статистику передачі для подальшого аналізу та прогнозування активності пристрою (блок 12), що є важливим етапом для оптимізації роботи мережі та прогнозування її завантаження.

У випадку, якщо ресурси виявляються недоступними, алгоритм переходить до перевірки можливості вивільнення ресурсів за рахунок низькопріоритетних пристроїв класу L3 (блок 7). Якщо така можливість є, система відкладає обробку запитів пристроїв класу L3, реорганізовує чергу (блок 8) і знову повертається до налаштування базової станції для передачі даних (блок 3). Якщо ресурси у виділеному сегменті мережі IoT для промислового використання залишаються недостатніми навіть після реорганізації черги, алгоритм ініціює пошук вільних ресурсів в інших сегментах базових станцій 5G (блок 5), які мають необхідні резерви для підтримки передачі.

У разі виявлення вільного сегмента (блок 6), віртуальна ділянка мережі реконфігурується, резервуються ресурси для промислових IoT-сервісів (блок 7), і надсилається запит на передачу даних на IoT-пристрій (блок 9). Після успішної передачі знову записується статистика роботи системи для подальшого аналізу (блок 12). Якщо ж ресурси у вільному сегменті також відсутні, послуга з'єднання передається до загального каналу зв'язку (блок 10), і IoT-пристрій обслуговується як звичайний абонент мобільної мережі (блок 11). Після успішної передачі на цьому етапі також відбувається запис статистичних даних, які допоможуть у майбутніх налаштуваннях і прогнозуванні навантаження мережі (блок 12). Блок-схема алгоритму управління ресурсами в межах віртуального сегмента промислової 5G для пріоритетних сервісів IoT класу L1 показано на блок-схемі рис. 7.4.

#### *Для IoT класу L2*

Коли алгоритм запускається, базова станція eNodeB очікує на запит на підключення (блок 1). Після обробки всіх запитів аналізується клас підключених пристроїв і трафік, який вони будуть передавати. Всі підключені пристрої ставляться в чергу відповідно до класів, до яких вони належать (в порядку пріоритету). На основі отриманих даних перевіряється наявність ресурсів для передачі

трафіка від пристроїв класу L2 (блок 2). Якщо ресурсів достатньо, застосовується алгоритм (L1) (блок 3). Якщо ресурсів недостатньо, аналізується черга і визначається час затримки передачі (блок 4). Перевіряється наявність ресурсів в межах допустимої затримки для даного класу (блок 5). Якщо ресурсів достатньо для передачі трафіка в межах допустимого часу затримки, IoT-пристрій додається до черги і переходить до (алгоритму L1) (блок 6→3). В іншому випадку перевіряється можливість вивільнення ресурсів за рахунок пристроїв класу L3 (блок 7). Якщо ресурси можуть бути вивільнені, то IoT-пристрій L3 відкладається, а черга реорганізується (блок 8). Далі (блок 6→3). Якщо ресурси не можуть бути звільнені, елемент Slice Manager шукає додаткові доступні ресурси серед інших віртуальних сегментів 5G (блок 9). Потім він перевіряє, чи може трафік передаватися в межах допустимих затримок і втрат при використанні додаткових ресурсів (блок 10). Якщо це можливо, елемент Slice Manager резервує ресурси в альтернативному сегменті і переналаштовує логічний розподіл радіоресурсів для організації приватного промислового сегмента в межах базової станції 5G (блоки 11-12). Потім IoT-пристрої налаштовуються на роботу з новим IoT-сегментом, що містить додаткові ресурси (крок 13). Після цього статистика зберігається для подальшого прогнозування (крок 14). Якщо це неможливо, доступний ресурс зберігається у власній черзі (блок 15). Здійснюється конфігурація базової станції (блок 16). IoT-пристрій також налаштовується на передачу через деякий час (блок 17). Тоді статистика записується для подальшого прогнозування (блок 14). Нарешті, алгоритм повертається на початок алгоритму (блок 18). Блок-схема алгоритму показана на рис. 7.5.

#### *Для IoT класу L3*

Запустивши алгоритм, базова станція очікує на запит на передачу даних (блок 1). Визначається пріоритет пристрою – L3. Аналізується черга та мережеві ресурси для передачі даних (блок 2). Якщо ресурси доступні, базова станція налаштовується (блок 3), а сигнальні дані та запит на передачу надсилаються на IoT-пристрій (блок 4). Після успішної передачі записується ста-

тистика (блок 8) для подальшого прогнозування активності IoT-пристрою. Якщо доступних ресурсів недостатньо, аналізується черга і резервуються ресурси на найближчий час (блок 5). Налаштовується базова станція для передачі даних (блок 6) і визначається час затримки  $t$ , після якого відбудеться передача. Дані про тривогу, час затримки  $t$  і запит на передачу надсилаються на IoT-пристрій (блок 7). Після успішної передачі відбувається запис статистики (блок 8). Алгоритм завершується (блок 9). Блок-схема алгоритму показана на рис. 7.6.

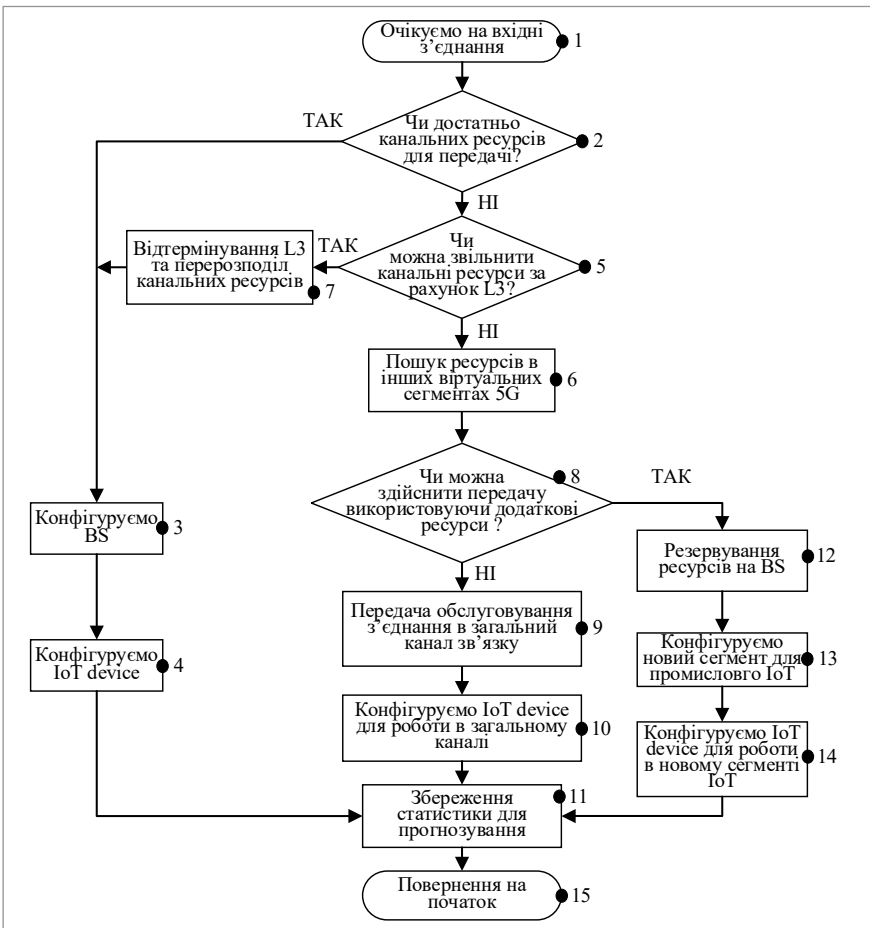


Рис. 7.4. Блок-схема алгоритму управління ресурсами в межах віртуального сегмента промислової 5G для пріоритетних сервісів IoT класу L1



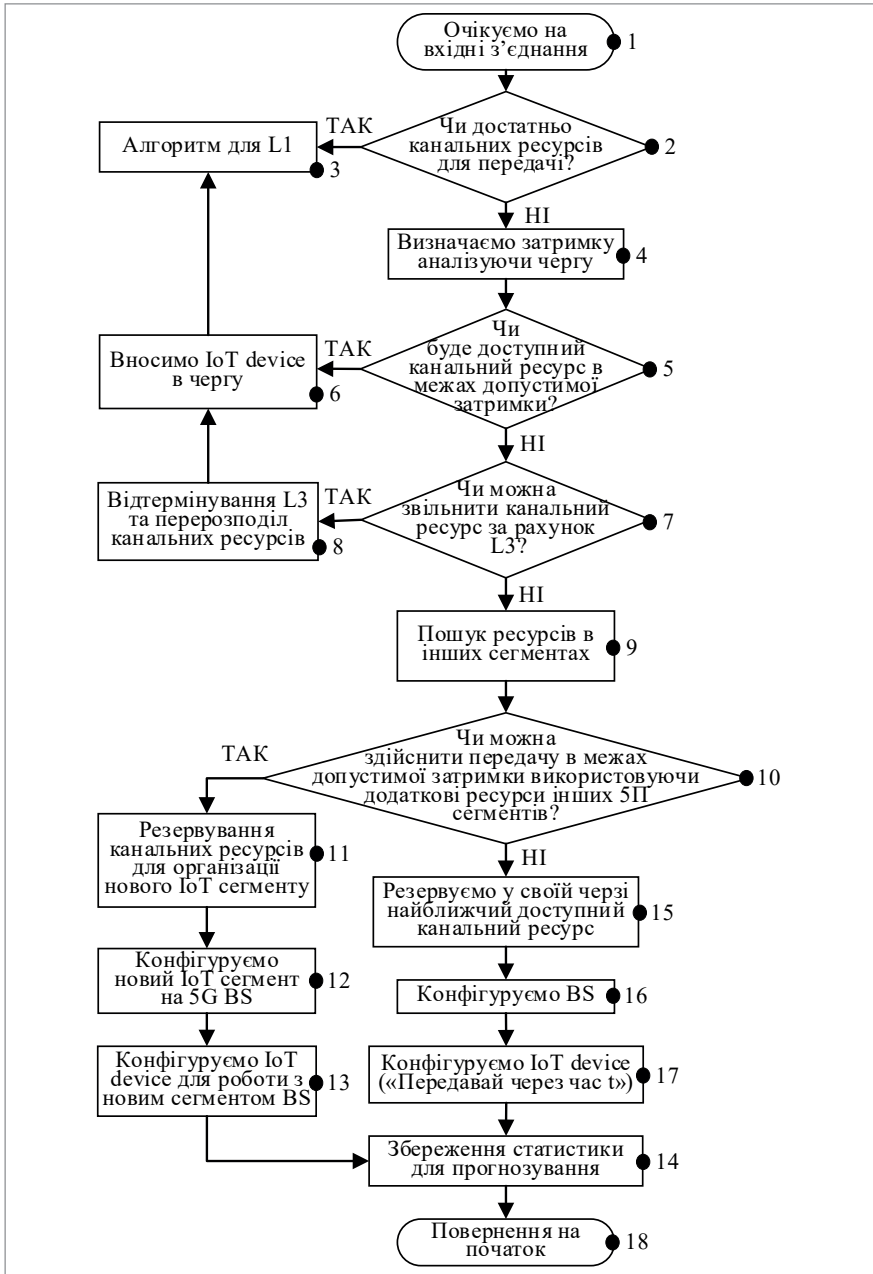


Рис. 7.5. Блок-схема алгоритму управління ресурсами в межах віртуального сегмента промислової 5G для пріоритених сервісів IoT класу L1

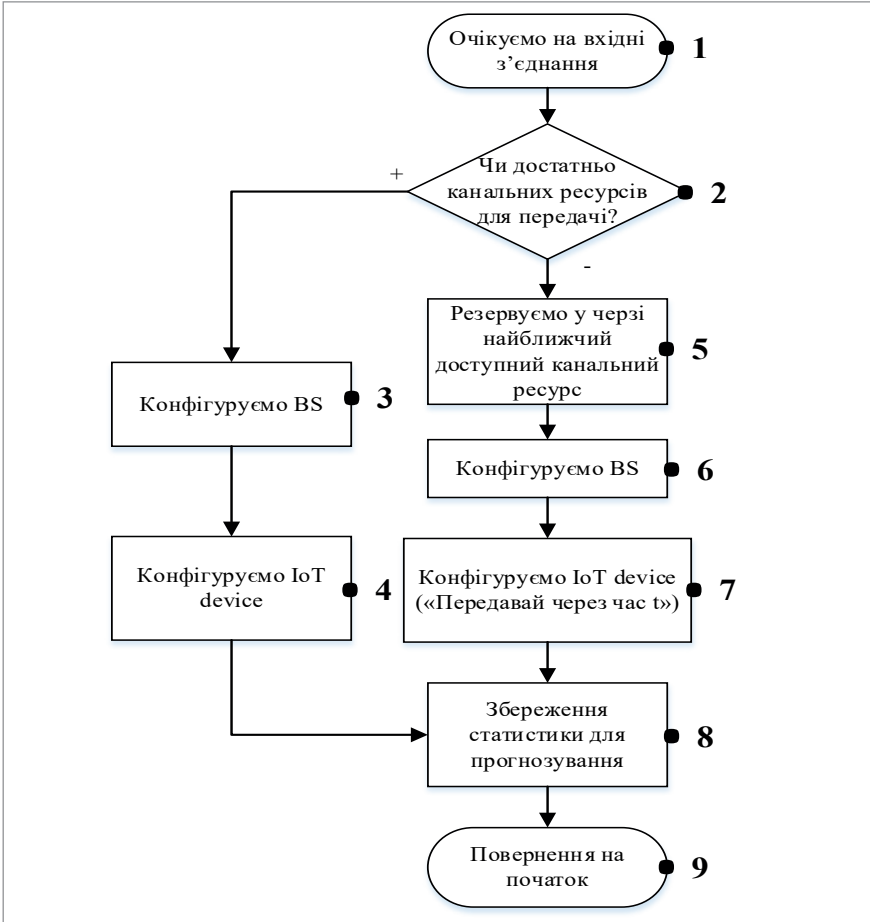


Рис.7.6. Блок-схема алгоритму управління ресурсами для IoT класу L3

Для IoT класу L4

Коли алгоритм запускається, базова станція очікує на запит на передачу даних (блок 1). Пріоритет пристрою виявляється L4. Аналізуються черга і мережеві ресурси для передачі даних (блок 2). Якщо ресурси доступні, базова станція налаштовується (крок 3), а сигнальні дані та запит на передачу надсилаються на IoT-пристрій (крок 4). Після успішної передачі записується статистика (блок 5) для подальшого прогнозування активності IoT-пристрою. Якщо доступних ресурсів недостатньо, передача даних не виконується. Пристрій отримує відмову в обслуговуванні (блок 6). Зберігається статистика

невдалої передачі (блок 5). Алгоритм завершується (блок 7). Блок-схема алгоритму показана на рис. 7.7.

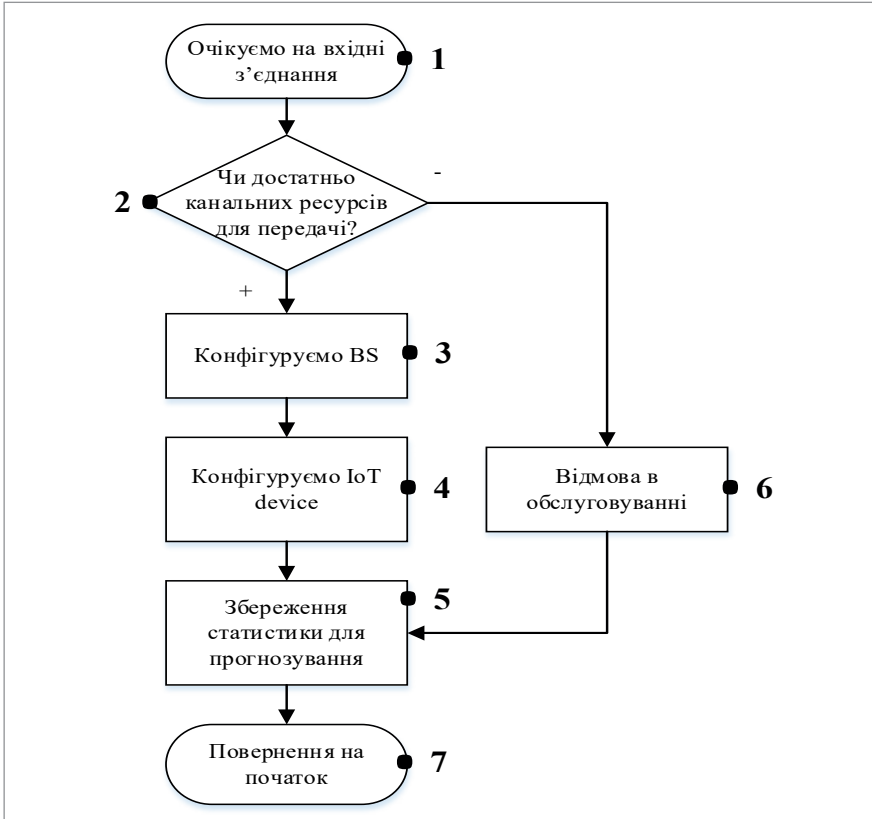


Рис. 7.7. Блок-схема алгоритму управління ресурсами для IoT класу L4

Для організації динамічного виділення пропускної здатності між різними віртуальними сегментами мережі запропонований метод базується на прогнозуванні навантаження мережі на кожен мережевий фрагмент, виходячи з попередньої інформації про входні з'єднання, і відслідковується, який “мережевий сегмент” на виході використовується найбільше. Таким чином у елемента Slicing Manager з'являється інформація про прогнозоване значення кількості користувачів/пристроїв у різні моменти часу. Така інформація є необхідною для динамічного розподілу радіоресурсів між конкретними віртуальними сегментами 5G мережі. Ця інформація подається у вигляді

частки розподілу користувачів між мережевим віртуальним шарами (зрізами) та відповідно, знаючи конкретні вимоги до пропускної здатності мережі кожного користувача/пристрою для кожного із сегмента (зрізу), виділяється необхідна для них пропускна здатність із загального пулу ресурсів.

На рис. 7.8 представлена архітектура системи, яка поєднує концепцію Network Slicing із моделями LSTM для обробки різних сегментів даних. Спочатку на вхід подаються дані, які система отримує для подальшої обробки. Потім використовується технологія Network Slicing, яка розподіляє ці вхідні дані між кількома логічними сегментами або «зрізами» мережі.

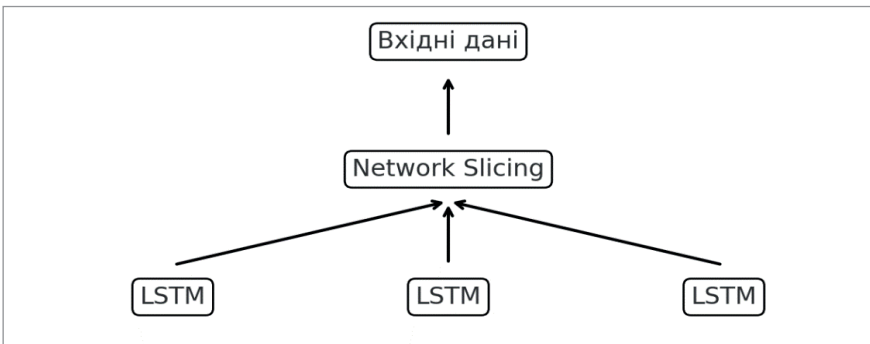


Рис. 7.8. Блок-схема прогнозування ресурсів для віртуальних сегментів 5G мережі

Кожен сегмент може відповідати певному типу даних або групі користувачів, що дозволяє більш ефективно опрацьовувати інформацію. Після цього кожен сегмент даних надходить до своєї окремої LSTM-моделі. LSTM-моделі спеціалізуються на аналізі часових рядів, зберігаючи довгострокові залежності в послідовних даних, що робить їх особливо корисними для прогнозування або інших завдань, пов'язаних з обробкою послідовної інформації. Таким чином, ця архітектура дозволяє ефективно обробляти різні сегменти даних, використовуючи переваги мережевого сегментування та можливості LSTM-моделей.

Архітектура нейронної мережі складається з кількох LSTM-блоків по 256 нейронів кожен, які обробляють послідовні дані, захоплюючи довгострокові залежності (рис. 7.9).

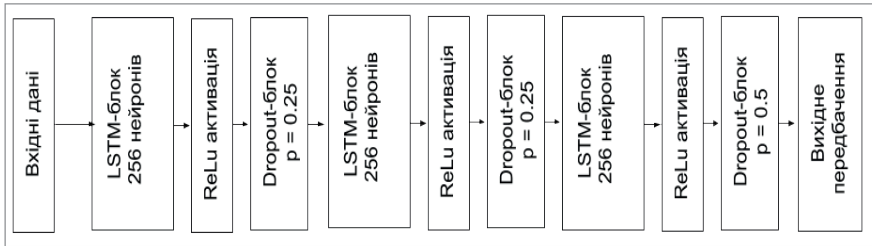


Рис. 7.9. Блок-схема запропонованої архітектури LSTM

Між LSTM-блоками використовуються шари активації ReLU для додання нелінійності та Dropout-блоки (з ймовірністю 0.25 і 0.5) для запобігання перенаванчненню. На виході мережі формується передбачення на основі оброблених даних.

## 7.2. Розробка імітаційної моделі для дослідження процесу сегментавання мережі 5G

Для розробки симулятора використано Python – потужну та універсальну мову з численними пакетами для різних завдань, включаючи моделювання дискретних подій і машинне навчання. Для створення моделі застосовано об’єктно-орієнтоване програмування (ООП) через його зручність для роботи з концепціями та їх взаємозв’язками, що забезпечує легкість у майбутніх оновленнях і розширеннях. Для симуляції дискретних подій використано пакет SimPy, який надає всі необхідні інструменти, включаючи клас Process і методи PEM (Process Execution Method), для моделювання подій за розкладом. Документація коду виконана за допомогою pydoctor.

На рис. 7.10 показані деякі з основних концепцій, що використовуються в простій симуляції. Одна комірка може обслуговувати одну або більше груп UE. Кожна група UE має певну кількість UE з визначеним профілем трафіка. Профіль трафіка описується параметрами потоку пакетів. Потік пакетів транспортується по безпроводному каналі. Оскільки Py5cheSim фокусується на радіочастині мережі, розглядаються тільки радіоносії. Кожен UE, підключений до комірки, має радіозв’язок з якістю, заданою

SINR UE. Пакети обробляються за допомогою спрощення стеку протоколів радіоінтерфейсу і передаються по повітрю через транспортні блоки, використовуючи ресурси з частотно-часової сітки, як показано на схемі.

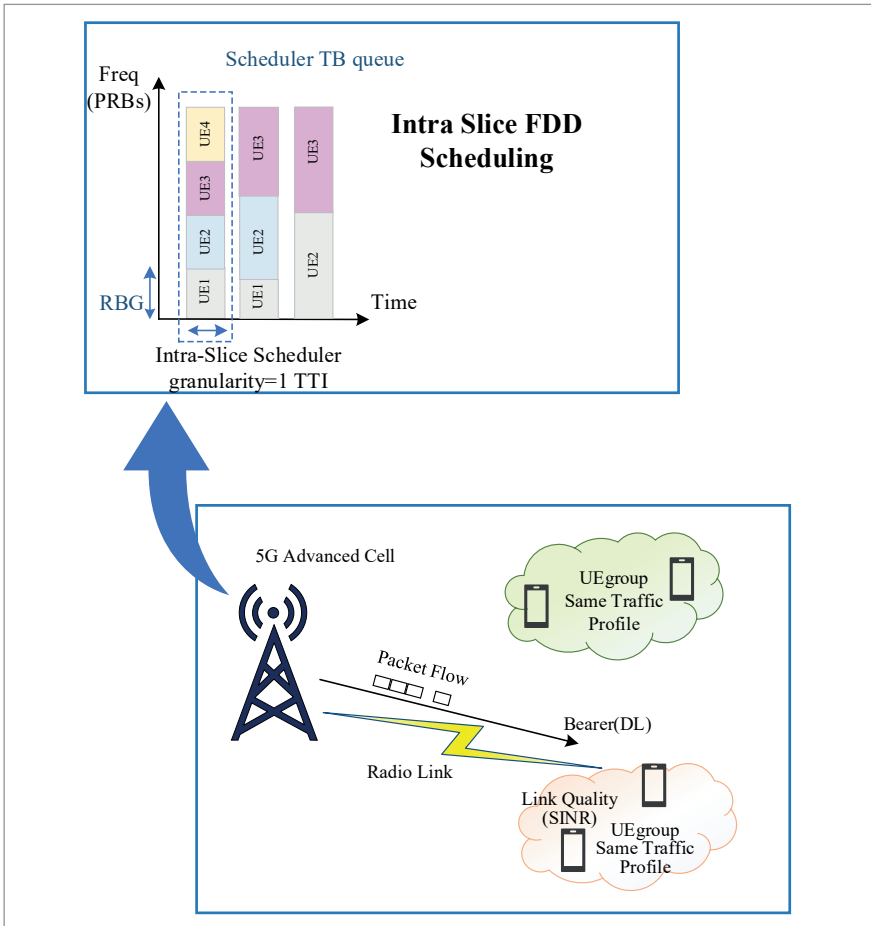


Рис.7.10 Загальна схема основних функцій Py5cheSim

Py5cheSim побудовано на наступних модулях:

- *UE.py*. Параметри UE та генерація трафіка.
- *Cell.py*. Конфігурація комірок та управління статистикою.
- *Slice.py*. Конфігурація слайсів.
- *IntraSliceSch.py*. Реалізація базового внутрішньо-сегментного планувальника.

- *InterSliceSch.py*. Базова реалізація міжсегментного планувальника.
- *Scheds Intra.py*. Реалізація внутрішньосегментних планувальників.
- *Scheds Inter.py*. Реалізація інших міжсегментних планувальників.
- *Imulation.py*. Скрипт симуляції. Він налаштовує та запускає симуляцію.
- *Results.py*. Надає допоміжні методи для представлення результатів моделювання та налаштування профілів трафіка.
- *LSTM.py*. Забезпечує можливість прогнозування навантаження.

Перші п'ять модулів формують ядро симулятора і містять кілька класів, як показано на рис. 7.11 та 7.12.

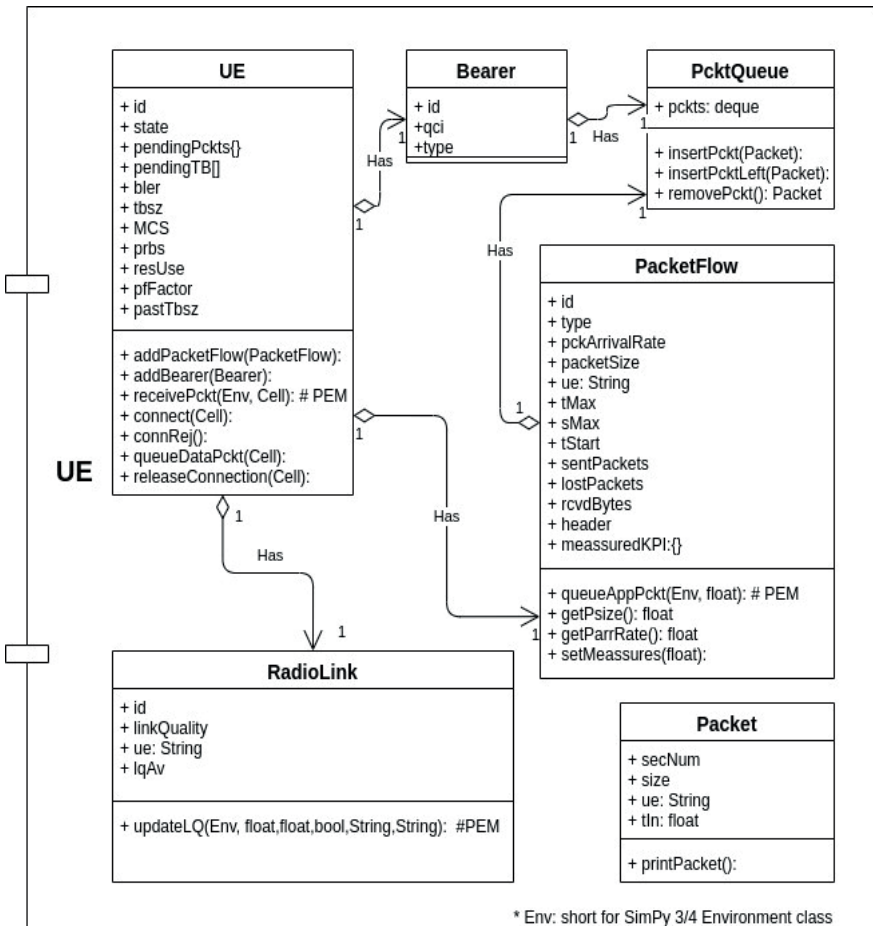
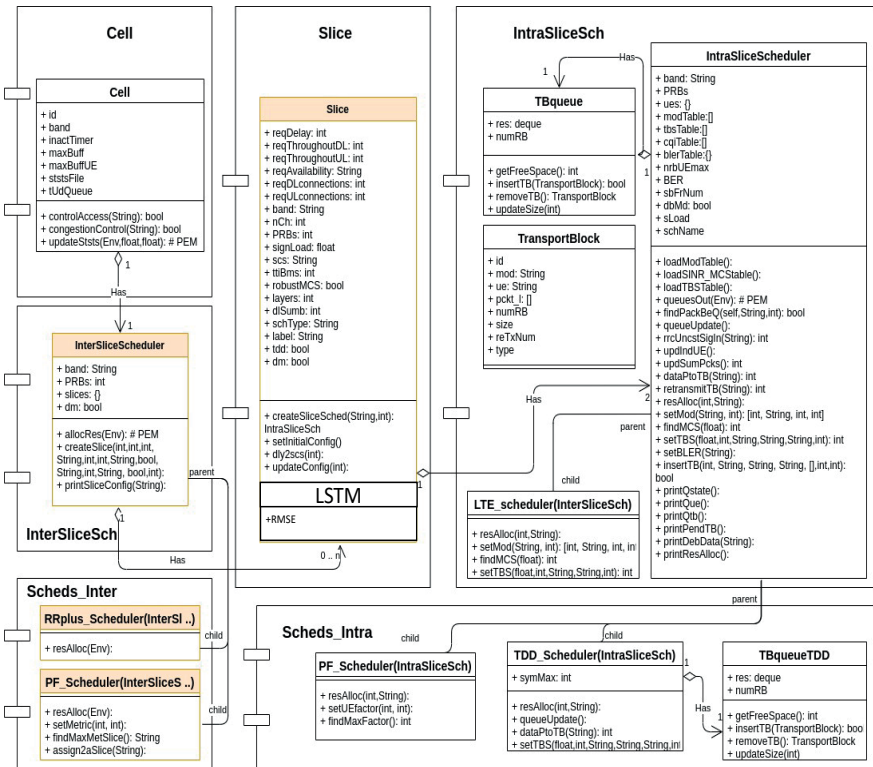


Рис. 7.11. Діаграма класів модулів UE/IoT

Модулі `IntraSliceSch.py` та `InterSliceSch.py` реалізують базові планувальники для одного та кількох сегментів з алгоритмом Round Robin, що використовується за замовчуванням. Для реалізації інших планувальників можна використовувати модулі `Scheds Intra.py` та `Scheds Inter.py`, де класи успадковуються від базового планувальника і можуть перезаписувати метод `resAlloc`. Такий підхід спрощує додавання нових планувальників. Завдяки тому, що ключові абстракції мережевої моделі зосереджені в ядрі симулятора, для запуску симуляції або інтеграції нового планувальника не потрібно глибоких знань у цій сфері. `Py5Gsim` забезпечує зручну платформу для реалізації алгоритмів планувальників 5G простим та зрозумілим способом.



\* Env: short for SimPy 3/4 Environment class

Рис. 7.12. Діаграми класів модулів `Cell`, `Slice` та `Schedulers`. (Помаранчеві класи розроблено для підтримки мережевого сегментування)



Модуль UE.pu містить все, що пов'язано з властивостями і поведінкою UE, носіями і трафіком. Зокрема, клас PacketFlow відповідає за створення різних потоків трафіка, з точки зору часу між прибуттям пакетів та їх розміру, а також збирає такі основні лічильники продуктивності:

- відправлені пакети
- отримані пакети
- отримано байт

Використовуючи цей лічильник, метод setMeasures обчислює основні показники продуктивності UE, що розглядаються на даний момент:

- Втрата пакетів ( %)
- Пропускна здатність користувача (Мбіт/с)

Профілі трафіка, відмінні від описаних, можна визначити, змінивши спосіб генерації пакетів, переписавши методи getPsize та getParrRate з класу PacketFlow.

Два класи було розроблено як відправну точку для підтримки міжсегментного планування: InterSliceScheduler та Slice. Перший реалізує безпосередньо базовий міжсегментний планувальник, оскільки він динамічно розподіляє смугові PRB між різними сконфігурованими Сегментами. Другий керує вимогами до Slices і перетворює їх у конфігурацію Slices. Для кожного Slice буде створено два нових екземпляри класу IntraSliceScheduler (один для планування DL, інший для планування UL), які працюватимуть відповідно до конфігурації Slice.

Клас LTE-планувальник успадковує від класу IntraSliceScheduler, перезаписуючи метод setMod для реалізації LTE-планувальника з урахуванням основних відмінностей від NR щодо вибору MCS, розрахунку TBS та перевантаження сигналізації. Таким чином, симуляції LTE можна виконувати, створюючи один сегмент з планувальником LTE. Процес роботи планувальника із чергами можна побачити на рис. 7.13.

Додаток генерує потік пакетів за допомогою методу queueAppPckt. Кожен пакет зберігається у черзі додатків, який першим з'являється. Потім, коли UE досягає стану RRC-з'єднання в комірці, вста-

новлюється DRB і його пакети потрапляють до черги пред'явника через метод `receivePckt`. Потім планувальник призначає ресурси для всіх активних носіїв і бере звідти пакети для створення ТВ з відповідним MCS згідно з SINR UE на даний момент, і поміщає їх у чергу планувальника за допомогою методу `queueUpdate`. Нарешті, планувальник бере ТВ з черги на кожному TTI і надсилає їх через повітряний інтерфейс. ТВ успішно приймаються з ймовірністю 1-BLER.

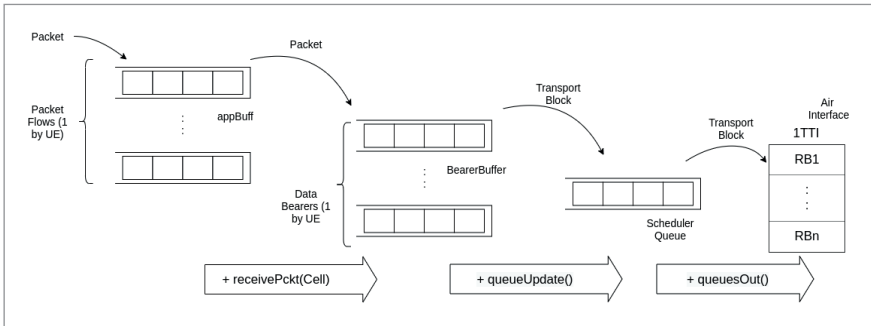


Рис. 7.13. Управління чергами в планувальнику 5G

Файл `simulation.py` не містить класів, оскільки він був розроблений як скрипт на мові `python` для налаштування та запуску симуляції. Він виводить середні результати моделювання в термінал в кінці моделювання. Файл симуляції також запускає обробку статистики трафіка для створення різних видів графіків, щоб показати результати симуляції за допомогою модуля `Results.py`. Останній модуль містить декілька допоміжних методів для обробки KPI показників та створення графіків, а також клас для управління групами UE, для яких виконується симуляція.

### 7.3. Функціональні можливості імітаційної моделі 5G

На даний момент симулятор підтримує тільки канал UL або DL з боку UE, а ACK у зворотному напрямку не розглядається. Крім того, процедури HARQ також не розглядаються для зменшення складності реалізації. Для UL і DL застосовуються однакові таблиці MCS, а накладні витрати вводяться в розрахунок розміру ТВ відповідно до оцінки пропускної здатності.

### *Різні профілі трафіка*

Симулятор підтримує різні конфігурації профілів трафіка для груп абонентів. Профіль трафіка задається в термінах середнього розміру пакета (в байтах) та швидкості прибуття (в мс). Пакети розміру  $S$  надходять зі швидкістю  $R$ .  $S$  і  $R$  – випадкові величини з розподілом Парето, середнє значення яких дорівнює розміру пакета, встановленому для симуляції, і урізаному до подвоєного значення. Ця модель трафіка ґрунтується на моделі потокового трафіка. Трафік різної інтенсивності можна враховувати, задаючи  $S$  і  $R$  в групі UE в сценарії моделювання.

### *Генерація SINR*

Оскільки основною метою Py5Gsim було надання інструменту для тестування різних методів планування за допомогою аналізу пропускнуої здатності стільників, моделювання радіоканалів не було пріоритетом. На відміну від попередньої імітаційної моделі, дана модель в основному приймає значення SINR UE як вхідні дані. Навантаження на стільник не впливає на SINR, тому що передбачається, що активність користувачів не матиме значущих змін під час моделювання. Також припускається, що під час моделювання UE не будуть рухатися, тому SINR UE не матиме значущих змін під час моделювання. Крім того, припускається, що значення SINR однакові вздовж робочої смуги, тому немає різниці між різними SINR для кожного користувача.

У файлі моделювання можна задати початкове значення SINR. Симулятор підтримує два варіанти початкового налаштування SINR: всі UE використовують однакове налаштоване значення, або кожен UE в групі UE має різне початкове значення SINR в діапазоні від 5 дБ до налаштованого максимуму. Потім SINR змінюється з часом відповідно до гаусівського розподілу з центром у початкових значеннях з невеликою дисперсією. Режим дуплексування встановлюється в залежності від діапазону стільника, обраного для моделювання. У діапазонах MmWave використовується TDD, середні та низькі діапазони можуть використовувати FDD або TDD. У цьому випадку режим дуплексування можна вибрати у файлі симуляції. Для діапазонів FR1 симулятор не перевіряє відповідність між обраним діапазоном і

режимом дуплексування, а також між діапазоном і налаштованою смугою пропускання. Причина полягає в тому, щоб дозволити симуляцію для більшої кількості сценаріїв, ніж вже стандартизовано.

### Нарізка мережі

Py5Gsim надає базову реалізацію RAN Slicing як основну функцію, використовуючи дворівневий планувальник, що складається з планувальника всередині сегмента та планувальника між сегментами. Перший орієнтований на вирішення розподілу ресурсів між різними UE з одного сегмента, а другий – на розподіл ресурсів між різними сегментами, інстанційованими на комірці. На міжсегментному рівні ресурси – це доступні смуги PRB комірки. На Рис. 7.14 показано основну ідею, що лежить в основі цієї первинної реалізації RAN Slicing.

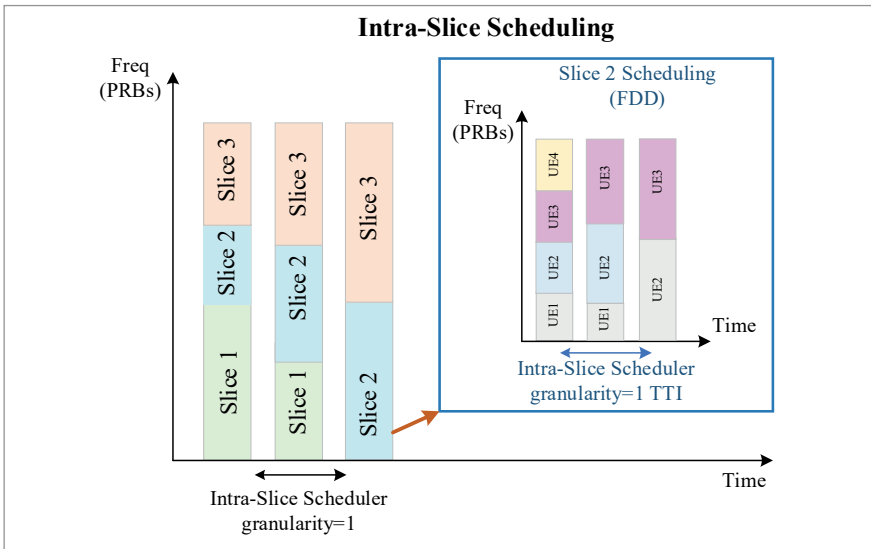


Рис. 7.14. Базова схема управління ресурсами для міжсегментного та внутрішньо сегментного планування в мережі

Кожен сегмент має набір вимог і конфігурацію. Конфігурація встановлюється автоматично в залежності від вимог Slice щодо затримки, смуги, навантаження на трафік, можливостей і доступності UE. Для кожного Slice нумерація/SCS/TTI, режим дуплексування, алгоритм роботи планувальника та навантаження на сигналізацію встановлюються в момент ініціалізації в методі `setInitialConfig` з класу

Slice. Більше деталей можна додати до реалізованого відображення, модифікувавши цей метод. У цій першій версії Py5cheSim алгоритми внутрішньо- та міжсегментного планувальника вказуються як вхідні дані у сценарії моделювання. Виділений сегмент PRB може динамічно змінюватися відповідно до рішення міжсегментного планувальника з конфігурованою часовою деталізацією. У цій першій версії реалізовано лише найпоширеніші традиційні планувальники, але нові алгоритми планувальників можуть бути легко додані шляхом успадкування від базових планувальників Round Robin і перезапису методів, задіяних у процесі розподілу ресурсів (resAlloc).

#### *Підтримка декількох нумерологій*

Кожен сегмент підтримує будь-яку з нумерологій, показаних в табл. 7.3. Разом з SCS, ТТІ і тривалість слоту встановлюються в термінах оброблюваних слотів/мс. Наразі нумерологію Slice встановлено відповідно до необхідної затримки. Таблиця 7.3 показує налаштоване відображення між вимогами затримки RAN та конфігурацією SCS для Slice. Зауважте, що розглянуті пороги були визначені з урахуванням аналізу затримок та результатів, представлених в [95], припускаючи середні значення для таймінгів планування, і пряму залежність від тривалості слоту та, як наслідок, від SCS.

Таблиця 7.3

#### **Вимоги до затримки для впровадження відображення SCS**

Вимога затримки (мс)	$\leq 2.5$	$\leq 5$	$\leq 10$	$> 10$
SCS (кГц)	120	60	30	15

#### *256QAM*

У реальних системах для UL і DL використовуються різні таблиці MCS, але в цій першій версії Py5cheSim в обох напрямках використовується лише таблиця MCS 2 для DL, щоб забезпечити результати, які можна порівняти з результатами, отриманими за допомогою 5G-LENA. Це пов'язано з тим, що 5G-LENA додає лише таблиці MCS для DL 1 і 2 з 3GPP TS 38.214 [29], як можна побачити у файлах nr-eesm-t1 і nr-eesm-t2 з джерела модуля. Однак, нові таблиці MCS для UL можуть бути легко додані в Py5cheSim за допомогою простих модифікацій у базового внутрішньосегментного планувальника.

### *Агрегація несучих*

На даний момент симулятор підтримує агрегацію носіїв, як визначено в конфігураційному файлі, без балансування навантаження між ними. Агреговані джерела носіїв доступні для розподілу ТБ під одним і тим же об'єктом комірки. Це просто працює як збільшення пропускної здатності комірки, хоча в реальних мережах несучі різних комірок можуть бути об'єднані, і UE може використовувати їх ресурси відповідно до налаштованої політики балансування навантаження і своїх можливостей.

### *SU/MU-MIMO*

Використання SU/MU-MIMO можна налаштувати у файлі моделювання разом з кількістю шарів, що розглядаються. У випадку SU-MIMO, виділені ресурси для UE будуть помножені на кількість шарів  $i$ , відповідно, на пропускну здатність UE. У випадку MU-MIMO, незважаючи на те, що ресурсів також буде більше, розподілений RB для UE зберігається, тому більше UE може бути вирішено в тому ж TTI. В обох випадках передбачається, що всі UE в групі і комірки підтримують налаштовану схему. У реальних мережах використання MIMO буде залежати від умов радіозв'язку, які вимірюються в термінах індикації рангу, а також від можливостей UE і мережі.

### *Різні реалізації планувальника*

За замовчуванням обидва планувальники, як IntraSlice, так і InterSlice, реалізують алгоритм Round Robin. Однак, на даний момент також реалізовано пропорційний справедливий планувальник, і інші алгоритми планування можуть бути додані при розробці дочірнього класу `intraSliceSched` класу `intraSliceSched`. Алгоритми планувальника IntraSlice та InterSlice можна задати у файлі конфігурації.

---

## **7.4. Опис алгоритмів планування розподілу ресурсів в імітаційній моделі 5G**

У цьому розділі представлені основні абстракції, зроблені зі стандарту за допомогою реалізованої моделі в симуляторі для планувальників 5G і LTE.

### Модельовання 5G

У випадку базового внутрішньоканального плануувальника 5G застосовуються наступні міркування щодо проектування:

- Розподіл MCS базується виключно на SINR UE. Таблиці SINR-MCS були створені за допомогою прикладу cttc-nr-demo.cc з 5G для широкого діапазону SINR.

У прикладі cttc-nr-demo.cc модель BLER задано як ns3:NrEesmCcT2, а модель АМС як Nr>ErrorModel. Це означає, що розподіл MCS здійснюється динамічно, щоб утримувати BLER нижче 10 %, а таблиця MCS 2 з 3GPP TS 38.214 [59] буде використовуватися для включення модуляції 256QAM.

- Розподіл швидкості кодування каналу ( $R$ ) і кількості біт на символ ( $Q_m$ ) здійснюється із роботи [59], припускаючи, що використання 256QAM можливе для UL і DL. Зауважимо, що таблиці MCS для UL фактично не включають 256QAM. Додавання іншої таблиці MCS для UL може бути розглянуто для майбутніх удосконалень, і це можна легко зробити, як було сказано в попередньому розділі.
- Для розрахунку TBS було застосовано процедуру, описану в 3GPP TS 38.214 [59]

$$TBS = N_{info} = N_{RE} \times R \times Q_m \times l \quad (7.3)$$

де  $l$  – кількість шарів, що використовуються у випадку SU-MIMO.  $R$  та  $Q_m$  визначаються з таблиці MCS, як зазначено вище.  $N_{RE}$  визначається за формулою де  $n_{PRB}$  – кількість PRB, виділених для UE.  $\overline{N}_{RE}$  оцінюється як видно з рівняння 7.5, щоб уникнути додавання додаткових таблиць.

$$N_{RE} = \overline{N}_{RE} \times n_{PRB} \quad (7.4)$$

$$\overline{N}_{RE} = \min(156, 12 \times SlotSymbols \times (1 - OH)) \quad (7.5)$$

де  $\overline{N}_{RE}$  представляє кількість елементів ресурсів, що використовуються для PDSCH або PUSCH. Передбачається, що кількість накладних символів у PRB  $12 \times SlotSymbols \times OH$  відповідає встановленій у розрахунку пропускної здатності 3GPP TS 38.306. Тобто, у FR1  $OH$  дорівнює налаштований як 0,14 для DL і 0,08 для UL. У FR2  $OH$  налаштований як 0,18 для DL і 0,10 для UL. Важливо зазначити, що накладні витрати, які розглядаються включають в себе все можливе

використання ресурсів для інших речей, відмінних від PDSCH і PUSCH (SSB, PHICH канали і сигнали). У реальних мережах ці канали та сигнали матимуть змінні накладні витрати, але у цій версії Py5cheSim було зроблено останнє припущення для спрощення реалізації.

- Схема розподілу ресурсів відповідає підходу стандарту: при розподілі частотного ресурсу використовується тип 0. Розмір RBG залежить від розміру смуги, що використовується в 3GPP TS 38.214 [59]. Також можливе виділення всієї смуги для кожного RE на основі ГТТ. Виділення ресурсу для UE здійснюється, коли для цього є доступні ресурси, без урахування часових параметрів планування, визначених стандартом (K0, K1, K2), знову ж таки, з метою спрощення. У майбутніх версіях Py5cheSim з підтримкою вимірювання затримок це буде враховано.
- У часовій області при використанні TDD підтримуються різні типи слотів шляхом зміни кількості символів DL, що відображаються в одному слоті. Розподіл ресурсів тут здійснюється з деталізацією слоту за замовчуванням, і передбачається, що різні UE будуть використовувати різні промені, а використання формування променя не впливає на розподіл ресурсів, окрім оціночного, з урахуванням накладних витрат, які будуть розглянуті пізніше. Як наслідок, розподіл ресурсів в комірці TDD буде відбуватися тільки в часовій області. Початковий розподіл символів DL/UL визначається відповідно до співвідношення в профілях трафіка і кількості або UE, сконфігурованих в кожному напрямку. У цій версії Py5cheSim розподіл символів DL/UL є статичним.

Динамічний розподіл DL/UL символів можна реалізувати в новому міжшаровому планувальнику, просто створивши новий клас, який успадковується від `interSliceScheduler` і перезаписавши метод `resAlloc`.

- Пакети в буфері Bearer можуть бути фрагментовані та об'єднані, щоб поміститися в TBS.

#### *Моделювання планування LTE*

У випадку базового планувальника LTE застосовуються наступні міркування щодо проектування:



- Для планувальника LTE розглядався тільки DL, оскільки планувальник LTE був розроблений на початку проекту тільки для перевірки базової структури.
- Спектральна ефективність була розрахована за допомогою рівняння закону Шеннона, налаштованих BER і UE SINR, як видно з рівняння 7.6.

$$SpecEff = \log_2 \left( 1 - \frac{SINR}{\frac{\ln 5 \times BER}{1.5}} \right) \quad (7.6)$$

SINR генерується для кожного UE за допомогою генератора SINR в модулі results.py, а BER задається в класі планувальника LTE.

- CQI встановлюється відповідно до спектральної ефективності, розрахованої перед використанням таблиці cqiTable.
- Використовуючи квантовану спектральну ефективність з таблиці cqiTable, індекс MCS і TBS (Transport Block Size) визначається з таблиці modTable за допомогою процедури і таблиці, представленої в R1-081483 (як в модулі lena від ns3). З таблиці MCS, представленої в R1-081483 [59], отримують індекс MCS для спектральної ефективності. Таблиця modTable в Py5cheSim містить отримане відображення між спектральною ефективністю та індексом TBS.
- Використовуючи індекс TBS, TBS отримують з таблиці tbsTable.
- Кількість PRB, що виділяється кожному UE, встановлюється в методі resAlloc. PRB розподіляються за допомогою RBG, який залежить від доступної пропускну здатності. Для PDSCH завжди передбачався тип розподілу ресурсів 0.
- Пакети в буфері Bearer можуть бути фрагментовані та об'єднані, щоб поміститися в TBS.
- BLER визначається користувачем за допомогою blerTable в залежності від SINR, виділеної MCS та налаштованого BER. blerTable базується на результатах, отриманих при запуску модуля lena для тих самих вхідних даних.
- Py5cheSim підтримує два можливих алгоритми планування: внутрішньо- та міжшарове планування:
- Round Robin.

- Пропорційний справедливий з конфігурованими експонентами. Нижче коротко описано варіанти реалізації внутрішньо- та між-сегментного планування в 5G.

*Внутрішньосегментні планувальники*

Для симуляції FDD розподіл ресурсів для різних UE тут здійснюється в термінах PRB. Підтримуються наступні алгоритми планування.

- Round Robin: різним користувачам з активними носіями та непорожніми буферами виділяється однакова кількість ресурсів, без жодних переваг між собою. Це планувальник за замовчуванням, реалізований у планувальнику LTE та intraSlice Scheduler. Зауважте, що навіть, якщо немає ніяких переваг, користувачі з нижчим SINR, як правило, використовують більше ресурсів, ніж користувачі з вищим SINR, тому що перші заповнюють буфер носія пакетами частіше, ніж другі.
- Пропорційно-справедливий, з експонентами, що налаштовуються: ресурси комірки в кожній ТТІ виділяються користувачеві, який має найбільше співвідношення між фактично досягнутою пропускнуною спроможністю та минулою пропускнуною спроможністю:

$$\frac{\text{actualThroughput}^{\text{numExp}}}{\text{pastThroughput}^{\text{denExp}}} \quad (7.7)$$

Існують різні способи обчислення минулої пропускнуної здатності в поточній бібліографії. У цій реалізації минула пропускуна здатність є середнім значенням між пропускнуною здатністю, досягнутою протягом конфігурованої кількості підкадрів через атрибут promLen класу PF Scheduler.

Зауважте, що оскільки для чисельника та знаменника у метричному виразі можна налаштувати різні експоненти, можна отримати різні планувальники. Наприклад, задавши numExp = 1, а denExp = 0, можна отримати результати роботи планувальника з максимальною швидкістю.

Для симуляцій TDD розподіл ресурсів здійснюється з деталізацією ТТІ по всій смузі. Наразі підтримується лише Round Robin TDD планувальник. Інші алгоритми можуть бути додані як нові класи, успадковані від класу TDD планувальника, зокрема, що базуються у нашому випадку на LSTM модулі прогнозування навантаження.

*Планувальники між сегментами мережі*

Планувальник між сегментами розподіляє ресурси для кожного сегмента з налаштованою часовою деталізацією, завжди довшою за максимально можливий TTI. Ресурси – це піддіапазон, призначений для кожного слайсу, в термінах PRB (Physical Resource Blocks – блоки фізичних ресурсів). Максимальний TTI – це час, отриманий з мінімальної конфігурації інтервалу між піднесучими, який дорівнює 1 мс, що відповідає 15 кГц. Для міжканального планувальника на даний момент підтримуються наступні алгоритми:

- Round Robin: розподіляє статично однакову кількість PRB для кожного визначеного сегмента, незалежно від розміру буфера несучої в кожному сегменті. Реалізовано у класі `interSliceScheduler` як планувальник за замовчуванням.

*Нові алгоритми*

Нові алгоритми можна реалізувати, розширивши цей клас у модулі `Scheds Inter`.

*Scheds Inter*

- Round Robin Plus: виділяє однакову кількість ресурсів для кожного сегмента з пакетами у буферах носія UE. Якщо у сегменті немає пакетів у жодному з буферів носіїв UE, він не буде розглядатися для розподілу ресурсів, і ресурси будуть розподілені між іншими сегментами.
- Пропорційний справедливий, зі змінними експонентами: розподіляє ресурси комірки на основі співвідношення між поточною можливою пропускною спроможністю сегмента в термінах середнього можливого TBS UE і минулою пропускною спроможністю сегмента в термінах отриманих байт, як показано у наступному рівнянні:

$$\frac{\text{averageUeTBS}^{\text{numExp}}}{\text{receivedBytes}^{\text{denExp}}} \quad (7.8)$$

Симулятор дозволяє конфігурувати часову гранулярність для рішення `InterSlice`-планування, встановивши атрибут гранулярності в класі `interSliceScheduler`. Він також дозволяє налаштувати тривалість

(у секундах) історії отриманих байт для врахування при обчисленні метрики, задавши атрибут `rcvdBytesLen` у класі планувальника PF.

---

## 7.5. Моделювання та дослідження методу інтелектуального прогнозування та розподілу трафіка між віртуальними сегментами мережі 5G

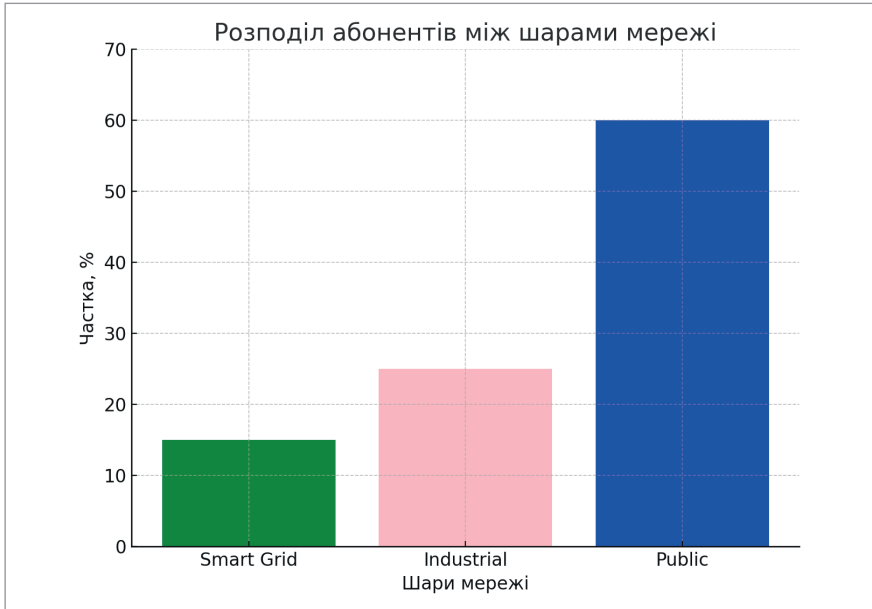
Ми припустили, що розподіл абонентів між сегментами мережі виглядає наступним чином:

- Smart Grid (зелена заливка) займає приблизно 15 % від загальної кількості абонентів. Цей шар орієнтований на забезпечення мереж розумного управління енергетичними ресурсами, де користувачі мають специфічні вимоги до надійності та швидкості зв'язку.
- Industrial (рожева заливка) охоплює близько 25 % абонентів. Цей шар обслуговує промислові підприємства, де використовується Інтернет речей (IoT) для автоматизації виробничих процесів та забезпечення безперервної роботи критичних систем.
- Public (синя заливка) включає найбільшу частку абонентів – приблизно 60 %. Цей шар призначений для обслуговування широкої публіки, включаючи приватних осіб, бізнеси та громадські організації, що потребують стабільного і доступного зв'язку.

Частка розподілу навантаження між сегментами 5G мережі показано на рис. 7.15.

Припущення про такий розподіл абонентів між шарами є важливим з кількох причин. По-перше, воно дозволяє зрозуміти, як розподіляється навантаження між різними сегментами мережі, що є ключовим для планування та управління ресурсами. По-друге, знаючи передбачуваний розподіл абонентів, оператори можуть ефективніше оптимізувати мережеві ресурси, забезпечуючи достатню пропускну здатність і якість обслуговування для кожного шару. По-третє, таке припущення допомагає прогнозувати майбутнє навантаження на мережу, що дає змогу заздалегідь планувати необхідні вдосконалення та інвестиції в інфраструктуру. Дане припущення сприяє прийняттю

стратегічних рішень щодо розвитку мережі 5G, таких як посилення інфраструктури у певних сегментах або визначення пріоритетів для інвестування ресурсів.



7.15. Частка розподілу навантаження між сегментами 5G мережі

### 1. Методика прогнозування за допомогою LSTM:

Перед початком навчання моделі було проведено підготовку даних. Використані часові ряди представляли навантаження в різних сегментах мережі, таких як Smart Grid, Industrial, і Public. Важливим кроком було нормалізація даних за допомогою методу мінімаксу (MinMaxScaler), що дозволило привести дані до діапазону  $[0, 1]$  та забезпечило швидшу та ефективнішу роботу моделі.

### 2. Архітектура моделі LSTM:

Згідно з рисунком, модель складалася з трьох основних блоків LSTM по 256 нейронів у кожному, між якими використовувались шари активації ReLU та Dropout.

LSTM-блоки відповідали за збереження та аналіз часових залежностей у даних.

ReLU активація після кожного блоку LSTM допомагала моделі обробляти нелінійні залежності.

Dropout-блоки з різними значеннями ймовірності ( $p=0.25$ ,  $p=0.5$ ) застосовувалися для регуляризації, вимикаючи певний відсоток нейронів під час навчання, що допомагає уникнути перенавчання.

### 3. Навчання моделі:

Дані було розділено на навчальний, валідаційний та тестовий набори. Використовувався алгоритм оптимізації Adam, який сприяє швидкій та стабільній конвергенції. Функцією втрат була Mean Squared Error (MSE), що дозволило мінімізувати середньоквадратичну помилку між фактичними та передбаченими значеннями.

### 4. Параметри моделі:

Кожен LSTM-блок складався з 256 нейронів, що дозволяло моделі обробляти великі обсяги даних і знаходити складні часові залежності.

Dropout-блоки з ймовірністю вимикання нейронів 0.25 та 0.5 забезпечували регуляризацію і допомагали моделі уникати перенавчання.

Використання активації ReLU допомагало покращити здатність моделі обробляти нелінійні залежності в даних.

### 5. Прогнозування та результати:

Після тренування модель показала результати прогнозування, що оцінювалися за допомогою метрик MAE та RMSE. Модель ефективно прогнозувала навантаження на мережу з мінімальними помилками, що підтверджує правильність використаної методики і архітектури (рис. 7.16).

На графіках показано прогнозоване та фактичне навантаження на мережу для трьох шарів: Smart Grid, Industrial та Public. Розглянемо кількісні результати та їх значення. Для Smart Grid шару діапазон навантаження коливається від 40 до 65 одиниць. Модель досить точно передбачає зміни навантаження, хоча є деякі відхилення від фактичних значень. Це свідчить про здатність моделі захоплювати загальні тенденції, проте можливі труднощі з прогнозуванням короткострокових піків або спадів. У Industrial шарі діапазон навантаження варіюється від 25 до 50 одиниць. Прогнозовані значення майже збігаються з фактичними, що вказує на високу точність моделі, хоча під час різких змін навантаження можуть виникати незначні відхилення. Щодо Public шару, навантаження коливається між 55 і 70 одиницями. Тут модель також

демонструє хорошу точність, хоча в періоди зростання чи спаду навантаження можуть спостерігатися невеликі відхилення. В цілому, результати свідчать про те, що модель LSTM ефективно справляється з прогнозуванням навантаження в різних шарах мережі, забезпечуючи точні прогнози, які допомагають операторам мережі краще управляти ресурсами та планувати необхідні вдосконалення інфраструктури.

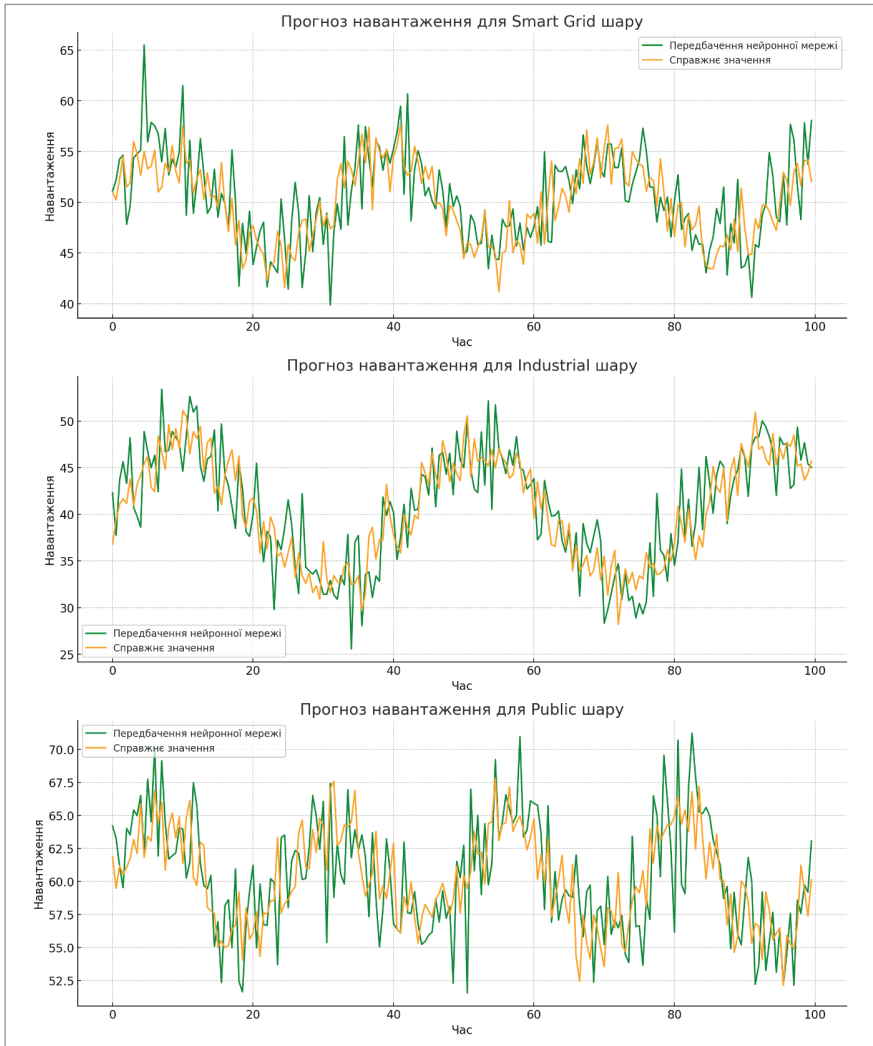


Рис. 7.16. Прогнозування навантаження в мережних сегментах 5G

Зокрема, в рамках розробленої імітаційної моделі можна вибирати напрямок передачі каналу вгору/вниз, тривалість циклічного префікса, кількість антен для передачі та прийому, а також смугу пропускання. Модель реалізує гіпервізор (Slicing Manager), який відповідає за розбиття мережі на сегменти та динамічний інтелектуальний розподіл ресурсів. У межах кожного зрізу також програмно реалізовано планувальник ресурсів. Модель графічно відображає відстань користувачів/пристроїв до базової станції, зміну параметра SNR відповідно, на основі чого базова станція 5G перераховує і визначає значення параметра CQI (рис.7.17). Для кожного значення CQI призначається схема модуляції-кодування відповідно до стандарту, що впливає на максимальну смугу пропускання, яку базова станція може виділити пристрою в межах зрізу. Модель також має можливість надавати пріоритети пристроям, що генерують повідомлення.

Дослідження параметрів QoS виконано для віртуального зрізу промислової мережі 5G. Моделювання виконується для наступних сценаріїв.

**Сценарій 1.** Досліджуються параметри QoS (затримка та втрати) послуг при низькому та високому навантаженні на зрізі промислового виробництва. На рис. 7.18 створено період низького навантаження тривалістю 0-3 секунди та оцінено втрати та затримки всіх 4 класів повідомлень (L1, L2, L3 та L4). Для L1 прийнятною є затримка 10 мс. Для класу L2 допустима затримка не повинна перевищувати 20 мс. За цей період моніторингу втрата даних відсутня, а затримки для всіх повідомлень (1-250 номерів повідомлень) знаходяться в межах допустимих норм.

**Сценарій 2.** Якщо при подальшому зростанні навантаження вимоги до затримок і втрат порушуються, на даний зріз виділяються додаткові ресурси резервування з інших зрізів, якщо вони доступні. Як бачимо, протягом наступних 3–8 секунд навантаження зростає, ресурсів у зрізі стає недостатньо, і, як наслідок, виникають значні втрати та затримки у всіх 4 класах повідомлень 251–1000. Як наслідок, гіпервізор VBU 5G автоматично виділяє більше ресурсів на зріз (синя крива) (рис. 7.18). Якщо виділених ресурсів в межах промислового



зрізу достатньо, то відбувається якісне обслуговування. А саме, при виділенні додаткових ресурсів для зрізу протягом 4,6–8 секунд, затримка і втрати повідомлень 1001–1250 знаходяться в межах норми. Лише спостерігаються деякі втрати для повідомлень класу L4, які мають найнижчий пріоритет і не є чутливими до втрат.

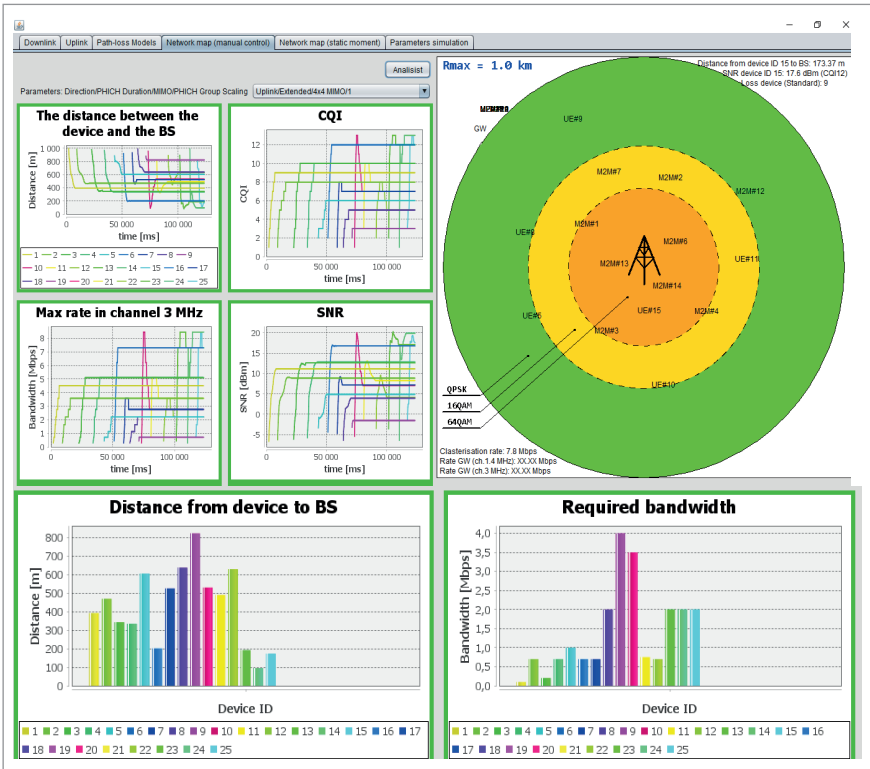


Рис. 7.17. Імітаційна модель з нарізкою мережі 5G [95]

**Сценарій 3.** Якщо виділених ресурсів недостатньо при подальшому зростанні навантаження, це призводить до деградації норм QoS. У межах певного зрізу вмикається метод інтелектуального розподілу ресурсів і планування з урахуванням пріоритетності сервісів. Зокрема, ми бачимо, що протягом наступних 8–9 секунд зі збільшенням навантаження фіксується зростання затримок і втрат для всіх 1251–1500 повідомлень, включаючи L1 і L2, які є чутливими до втрат і затримок. При цьому на 9 секунд застосовується метод інтелектуального розподілу ресурсів і планування з урахуванням пріоритетності послуг.

Відповідно, на 9–12 секундах для повідомлень класу L1–L2 затримка забезпечується в межах норми. Це відбувається за рахунок того, що некритичні повідомлення L4 втрачаються, а L3 вимушено затримуються в черзі (рис. 7.18).

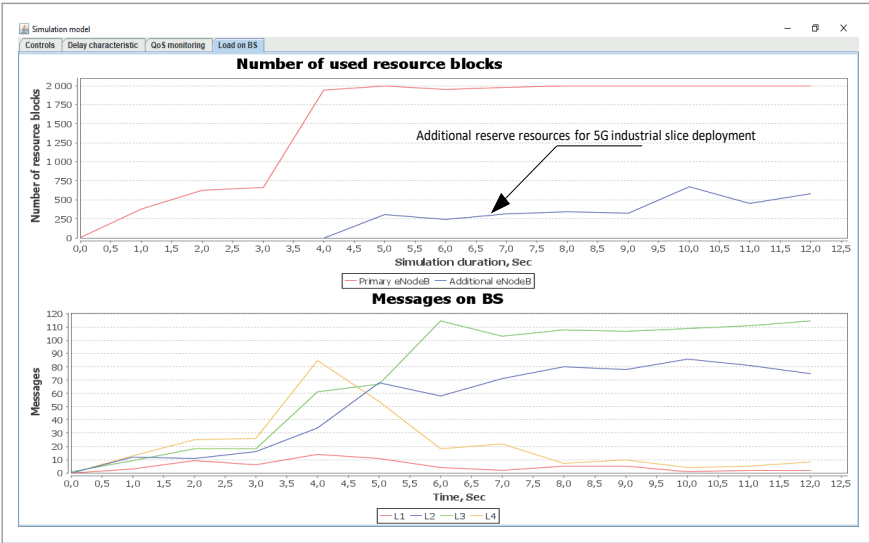


Рис. 7.18. Процес управління радіоресурсом для промислового з'риву мережі 5G при зміні навантаження на мережу [95]

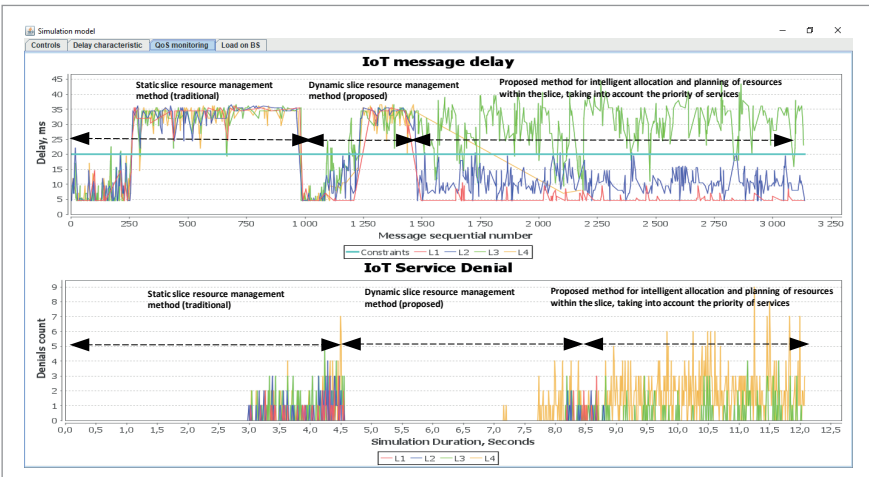


Рис. 7.19. Порівняння ефективності запропонованого методу з традиційним підходом за критеріями затримки та відмови в обслуговуванні [95]

На основі розробленої імітаційної моделі мережі 5G було виявлено, що одночасне використання динамічного управління ресурсами між зрізами та пріоритетного планування ресурсів всередині зрізу дозволяє зменшити середню затримку передачі критичних до затримок URLLC повідомлень до 3 разів у порівнянні з існуючим методом управління ресурсами (рис. 7.19).

Загалом, результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції запропонованих методів у мережі 5G, що дозволить операторам забезпечити більш гнучке та ефективне управління ресурсами, а також підготувати мережу до викликів майбутнього цифрового світу.

## ВИСНОВОК

У монографії проведено комплексний аналіз поточного стану, викликів та перспектив впровадження технології 5G в Україні, а також розглянуто основні технології та методи розгортання мереж 5G Advanced. Впровадження 5G в Україні є стратегічно важливим кроком для модернізації національної економіки та підвищення її конкурентоспроможності на світовій арені. Незважаючи на значні перешкоди, такі як технічні та безпекові виклики, а також економічна нестабільність, країна має потенціал для успішної інтеграції цієї передової технології. Окрім технологічних аспектів, особливу увагу приділено питанням регуляторного середовища та необхідності залучення інвестицій у розвиток інфраструктури. Розглянуто технології, такі як віртуалізація функцій мережі, використання міліметрових хвиль, Massive MIMO та методів множинного доступу (NOMA), а також впровадження програмно-конфігурованих мереж (SDN), які стануть основою для створення високошвидкісних, надійних та ефективних мереж мобільного зв'язку нового покоління в Україні.

У межах дослідження технології 5G виконано аналіз методів управління радіоресурсами та принципів модуляції, які є ключовими для ефективного функціонування мережі. Детально розглянуто алгоритми адаптивного управління модуляцією та кодуванням, що дозволяють оптимізувати розподіл ресурсів між користувачами залежно від умов радіоканалу. Окрім цього, досліджено механізми зворотного зв'язку, які забезпечують обмін інформацією між користувачами та базовими станціями, що сприяє підвищенню надійності та швидкості передачі даних. Всі ці аспекти відіграють важливу роль у забезпеченні високої якості обслуговування (QoS) в мережах 5G.

Досліджено різні аспекти мережевого планування, зокрема покриття, пропускну здатність, оптимізацію та управління ресурсами, з демонстрацією ефективності програмного забезпечення Atoll у вирішенні цих завдань, що є особливо важливим для майбутнього розгортання 5G Advanced. Запропоновано інтеграцію штучного інтелекту в програмне забезпечення Atoll для створен-

ня інтелектуального підходу до планування та оптимізації мереж мобільного зв'язку. Особливу увагу приділено розробці модуля штучного інтелекту на основі алгоритму LSTM, який дає змогу здійснювати точний аналіз обсягу генерованого трафіка в режимі реального часу. Вдосконалено існуючу модель прогнозування мобільного трафіка LSTM шляхом ретельного налаштування гіперпараметрів, що призвело до підвищення точності прогнозування на 5,01 % і скорочення часу обробки на 36 %. Впроваджені вдосконалення дадуть змогу операторам ефективніше управляти мережевими ресурсами, підвищуючи продуктивність мережевої інфраструктури та забезпечуючи кращу якість обслуговування для кінцевих користувачів, що є критично важливим для успішного впровадження 5G Advanced.

Описано деякі з найвідоміших планувальників для мереж 5G Advanced та їхні основні характеристики, з акцентом на необхідності динамічного компромісу між спектральною ефективністю та енергоспоживанням. Для подолання цього недоліку запропоновано новий метод, який дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів залежно від навантаження на мережу. Запропонований метод динамічно коригує баланс між енергоефективністю та пропускнуою здатністю системи, забезпечуючи високу якість обслуговування у різних умовах навантаження. У ситуаціях низького навантаження метод спрямований на максимальну енергоефективність за рахунок надлишку радіоресурсів, тоді як в умовах високого трафіка основна увага приділяється збереженню пропускнуої здатності для підтримки QoS. Основною інновацією методу є адаптація розподілу ресурсів під навантаження користувацького трафіка, зокрема через активацію та деактивацію базових станцій для підвищення енергоефективності мережі. Крім того, виявлено, що нерівномірний розподіл абонентського навантаження між сусідніми стільниками може призводити до низького використання спектра в одних зонах і його дефіциту в інших. Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод динамічного повторного використання частоти для різних розмірів комірок, який дозволяє ефективніше розподіляти спектр між центральними та граничними зонами комірки. Результати мо-

делювання показали, що запропонований метод значно знижує коефіцієнт зниження пропускної здатності, досягаючи вдвічі більшого приросту, коли користувачі концентруються в центральній зоні, і в п'ять разів більшого, коли користувачі концентруються в граничній зоні. Крім того, дослідження показали, що запропонований метод не лише забезпечує відповідність вимогам QoS за критерієм пропускної здатності, але й мінімізує енергоспоживання мережі на 57 % завдяки адаптації до місцезнаходження користувачів та їхнього навантаження в умовах низького трафіка. Ці рішення сприяють створенню більш ефективної та надійної мережі 5G Advanced, здатної задовольнити сучасні вимоги користувачів і зменшити енергоспоживання.

Досліджено різноманітні методи розгортання приватних мереж 5G з метою надання науковцям, розробникам та дослідникам можливості швидко зрозуміти їхні функціональні можливості, уникнувши необхідності вивчати стандарти, специфікації або документацію. Обговорено ключові цілі та вимоги до проектування приватних мереж 5G Advanced для України, висвітлені різні сценарії їх розгортання, а також розглянуті аспекти спектра, безпеки та якості обслуговування. Зазначено декілька прикладів успішного використання цих мереж у підприємницькому середовищі, щоб продемонструвати їхню спроможність задовольняти вимоги та надавати послуги, які активно використовуються в різних галузях світу. Представлено кілька майбутніх напрямків досліджень, в яких наголошується на проблемах розгортання приватних мереж 5G для сталого розвитку України.

Розроблено новий метод управління ресурсами в мережах 5G Advanced, який базується на використанні штучного інтелекту для динамічного сегментавання мережі та пріоритетного планування ресурсів. Запропоновано дворівневу систему пріоритетів, що включає міжсегментний та внутрішньосегментний рівні, що дозволяє оптимально розподіляти ресурси між різними сервісами з урахуванням їхньої критичності. Інтеграція ШІ в процес управління ресурсами дає змогу ефективно адаптувати мережу до змінних умов, забезпечуючи високу якість обслуговування, надійність та безпеку,

що є критично важливими для Smart Grid та промислових послуг. Проведена оцінка продуктивності запропонованого підходу показала, що запропонований метод перевершує традиційні методи сегментації мережі за показниками QoS, використання ресурсів та масштабованості, що підтверджує ефективність та новизну розробленого рішення.

Результати, наведені в монографії, можуть стати фундаментом для подальших наукових досліджень, спрямованих на вдосконалення процесу впровадження технології 5G в Україні. Проведені дослідження мають потенціал для суттєвого впливу на оптимізацію технічних та організаційних аспектів розгортання мереж 5G, забезпечуючи їх відповідність найкращим світовим практикам та інноваційним підходам. Крім того, ці результати можуть стати вагомим аргументом при розробці державної політики у сфері електронних комунікацій, допомагаючи інтегрувати глобальні тенденції та передові технологічні рішення з національними пріоритетами та особливостями. Таким чином, вони сприятимуть не лише технічному прогресу, але й стратегічному розвитку інфраструктури електронних комунікацій в Україні, забезпечуючи її готовність до викликів і можливостей, які несе із собою ера 5G Advanced.

## ПОДЯКА

*Розділ 1 та 2 виконано за підтримки проєкту № 0123U100232 «Розроблення інноваційних методів та засобів розгортання інтелектуальної інформаційної інфраструктури для подвійного використання в умовах цифрової трансформації України».*

*Розділ 3, 4 та 5 виконано за підтримки проєкту № 0123U101692 «Стратегічні напрямки, методи і засоби цифровізації та інтелектуалізації енергетичних систем з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій».*

*Розділ 6 виконано за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 0123U103529 (2022.01/0009) «Оцінювання та прогнозування загроз відбудові та сталому функціонуванню об'єктів критичної інфраструктури» за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».*

*Розділ 7 виконано за підтримки проєкту № 0122U000817 «Розроблення інноваційних методів та моделей побудови індустріально-орієнтованих інформаційно-комунікаційних систем для модернізації цифрових інфраструктур промисловості».*



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Питання забезпечення реалізації Закону України “Про електронні комунікації” : Постанова Каб. Міністрів України від 09.02.2022 р. № 107 : станом на 4 лип. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/107-2022-п#Text>
2. Міністерство цифрової трансформації України. (2023). Стратегія розвитку електронних комунікацій до 2030 року. URL: <https://thedigital.gov.ua/storage/uploads/files/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F:15:05.pdf>
3. Про електронні комунікації : Закон України від 16.12.2020 р. № 1089-IX : станом на 1 лип. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20#Text>
4. MarketNet. (н.д.). Технології 2G, 3G, 4G, 5G: MIMO, частоти LTE. URL: <https://marketnet.com.ua/novosti-i-stati/tehnologii-2g-3g-4g-5g-mimo-chastoty-lte.html>
5. Mobile network architecture evolution toward 5G / P. Rost et al. *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54, no. 5. P. 84–91. URL: <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7470940>
6. Shetty R. S. 5G Overview. *5G Mobile Core Network*. Berkeley, CA, 2021. P. 1–67. URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6473-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6473-7_1)
7. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. Further 5G evolution and the first step toward 6G. *5G/5G-Advanced*. 2024. P. 661–668. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13173-8.00030-x>
8. Mohamed K. S. 5G Mobile Communications: Fundamentals, Key Enabling Technologies, Challenges, Opportunities, Future Trends. *Wireless Communications Systems Architecture*. Cham, 2022. P. 143–164. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-19297-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19297-5_7)
9. 5G Small Cell Transmission Point Density Planning / A. Yazar et al. *2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Turkiye, 5–8 July 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/siu59756.2023.10224031>
10. Ultra-Dense Network Architecture and Technologies for 5G / S. Chen et al. *5G Mobile Communications*. Cham, 2016. P. 403–429. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_15)
11. Time-domain ICIC and optimized designs for 5G and beyond: a survey / L. Liu et al. *Science China Information Sciences*. 2018. Vol. 62, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1007/s11432-017-9477-4>
12. Chen W., Ahmad I., Chang K. Co-channel interference management using eICIC/FeICIC with coordinated scheduling for the coexistence of PS-LTE and LTE-R networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and*

- Networking*. 2017. Vol. 2017, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0822-6>
13. Multi-Connectivity for 5G Networks and Beyond: A Survey / T. Sylla et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 19. P. 7591. URL: <https://doi.org/10.3390/s22197591>
  14. 3-D-MIMO With Massive Antennas Paves the Way to 5G Enhanced Mobile Broadband: From System Design to Field Trials / G. Liu et al. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. Vol. 35, no. 6. P. 1222–1233. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2017.2687998>
  15. Yadav R., Tripathi A. 3D MIMO Beamforming Using Spatial Distance SVM Algorithm and Interference Mitigation for 5G Wireless Communication Network. *Journal of Cases on Information Technology*. 2022. Vol. 24, no. 4. P. 1–26. URL: <https://doi.org/10.4018/jcit.296717>
  16. Mao Y., Clerckx B. Multiple Access Techniques. *5G and Beyond*. Cham, 2020. P. 63–100. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8_3)
  17. Razavi R., Dianati M., Imran M. A. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Radio Access. *5G Mobile Communications*. Cham, 2016. P. 135–163. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_6)
  18. Alhamad R. Adaptive NOMA/OMA for wireless communications. *Signal, Image and Video Processing*. 2021. Vol. 15, no. 7. P. 1469–1475. URL: <https://doi.org/10.1007/s11760-021-01879-5>
  19. Valastro G. C., Panno D., Riolo S. A SDN/NFV based C-RAN architecture for 5G Mobile Networks. *2018 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT)*, Tangier, 20–22 June 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/mownet.2018.8428882>
  20. Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks / S. Manap et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 131202–131223. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3002252>
  21. AL-nasrawi M. KPI analysis of 4G/5G networks. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2024. Vol. 1, no. 7. P. 69–73. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.07.15>
  22. Murjikneli G., Begiashvili K. Investigation Carrier Aggregation in 4G LTE and 5G NR Networks. *GEORGIAN SCIENTISTS*. 2024. URL: <https://doi.org/10.52340/g.s.2024.06.02.29>
  23. Ma J. Wideband Millimeter-Wave Phased Arrays and Carrier Aggregation for 5G and Beyond. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, no. 1. P. 3. URL: <https://doi.org/10.1109/tmmt.2020.3043030>
  24. Arunruangsirilert K., Wongprasert P., Katto J. Performance Evaluation of Uplink 256QAM on Commercial 5G New Radio (NR) Networks. *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Dubai,

- United Arab Emirates, 21–24 April 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/wcnc57260.2024.10570635>
25. SQIMWAY. (н.д.). NR Capability. URL: [https://www.sqimway.com/nr\\_capability.php](https://www.sqimway.com/nr_capability.php)
  26. On the Comparison of Optimal NOMA and OMA in a Paradigm Shift of Emerging Technologies / J. Ghosh et al. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 11616–11632. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3146349>
  27. Sauter M. Long Term Evolution (LTE) und LTE-Advanced. *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*. Wiesbaden, 2022. P. 1–114. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-36963-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-36963-7_1)
  28. Millimeter-Wave Dual-Band MIMO Channel Capacity Analysis Based on Climate Data: A Samsun Province Case Study / A. F. Kola et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 10. P. 2273. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12102273>
  29. Kizilirmak R. C. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks. *Towards 5G Wireless Networks - A Physical Layer Perspective*. 2016. URL: <https://doi.org/10.5772/66048>
  30. Ramos A. R. Cellular Planning and Optimization for 4G and 5G Mobile Networks : master's thesis. 2019. URL: <http://hdl.handle.net/10400.6/10065>
  31. Djalma de Melo Carvalho Filho, Alencar M. S. d. Cellular Network Planning. River Publishers, 2022.
  32. Smart Planning, Design, and Optimization of Mobile Networks Ecosystem Using AI-Enhanced Atoll Software / H. Beshley et al. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Cham, 2024. P. 668–697. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_32)
  33. Atoll-based Propagation Model Correction and Actual Measurement / J. Zhang et al. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chengdu, China, 20–22 December 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/iaeac47372.2019.8997802>
  34. Abdelgalil M. E., A/Nabi D. A. B. LTE Performance and Analysis using Atoll Simulation. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2014. Vol. 9, no. 6. P. 68–72. URL: <https://doi.org/10.9790/1676-09636872>
  35. Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks / A. Masiuk et al. *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 23–26 February 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset.2016.7452145>
  36. Hilt A. Availability and Fade Margin Calculations for 5G Microwave and Millimeter-Wave Anyhaul Links. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 23. P. 5240. URL: <https://doi.org/10.3390/app9235240>

37. Boutiba K., Bagaа M., Ksentini A. Optimal radio resource management in 5G NR featuring network slicing. *Computer Networks*. 2023. P. 109937. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109937>
38. Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the New of M2M/IoT Multi-Service Gateway / H. Beshley et al. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyna, Ukraine, 26 February – 2 March 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/cadsm.2019.8779270>
39. Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation / I. Kahalo et al. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2–6 July 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879923>
40. A novel power consumption optimization framework in 5G heterogeneous networks / K. Venkateswararao et al. *Computer Networks*. 2022. P. 109487. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109487>
41. Carrier Aggregation With Optimized UE Power Consumption in 5G / R. Joda et al. *IEEE Networking Letters*. 2021. Vol. 3, no. 2. P. 61–65. URL: <https://doi.org/10.1109/lnet.2021.3076409>
42. Balancing QoS and power consumption in programmable 5G infrastructures / A. Carrega et al. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2018. Vol. 29, no. 11. P. e3425. URL: <https://doi.org/10.1002/ett.3425>
43. Beshley M., Kryvinska N., Beshley H. Energy-Efficient QoE-Driven Radio Resource Management Method for 5G and Beyond Networks. *IEEE Access*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3228758>
44. Gkonis P. K., Trakadas P. T., Kaklamani D. I. A Comprehensive Study on Simulation Techniques for 5G Networks: State of the Art Results, Analysis, and Future Challenges. *Electronics*. 2020. Vol. 9, no. 3. P. 468. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9030468>
45. Resource Allocation Schemes for 5G Network: A Systematic Review / M. A. Kamal et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 19. P. 6588. URL: <https://doi.org/10.3390/s21196588>
46. Sharmila M., Satyanarayana R. V. S. Resource allocation schemes in 5G: survey and challenges. *i-manager's Journal on Communication Engineering and Systems*. 2022. Vol. 11, no. 2. P. 25. URL: <https://doi.org/10.26634/jcs.11.2.18984>
47. Review of 5G C-RAN Resource Allocation / L. O. Chenke et al. *ICST Transactions on Mobile Communications and Applications*. 2023. Vol. 7, no. 4. P. e5. URL: <https://doi.org/10.4108/eetmca.v7i4.3263>

48. NVIDIA. (2024). GPU-Based 100  $\mu$ s Scheduling for 5G NR. Be6-pecycp. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/gpu-based-100-%C2%B5s-scheduling-gr-5g-nr/>
49. Intelligent resource management for 5G / Z. Liu et al. *Wireless Networks*. 2020. Vol. 26, no. 3. P. 1535–1536. URL: <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02270-x>
50. Gao, Z., Liu, W., & Wang, X. (2023). *5G Advanced: Wireless Channel Virtualization and Resource Mapping for Real-Time Spectrum Sharing*. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.05271>
51. Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay / H. Beshley et al. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336397>
52. Radio Resource Management Methods for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in 5G LTE Narrowband Industrial Internet of Things / R. Wang et al. *2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 21–25 September 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/aict52120.2021.9628913>
53. Chataut R., Akl R. An Efficient and Fair Scheduling for Downlink 5G Massive MIMO Systems. *2020 IEEE Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS)*, Waco, TX, USA, 26–28 May 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/wmcs49442.2020.9172382>
54. Ezeribe B. An Improved Proportional Fair Scheduling Algorithm for Downlink LTE Cellular Network. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2021. Vol. 9, no. 10. P. 1522–1534. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.38642>
55. Li J. 5G NR Cell Search and Random Access. *5G and Beyond*. Cham, 2021. P. 333–355. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8_11)
56. Li L., Shao W., Zhou X. A flexible scheduling algorithm for the 5th-generation networks. *Intelligent and Converged Networks*. 2021. Vol. 2, no. 2. P. 101–107. URL: <https://doi.org/10.23919/icn.2020.001>
57. Scheduling Algorithms for 5G networks and beyond: Classification and Survey / A. Mamane et al. *IEEE Access*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3174579>
58. Gueguen C., Manini M. Fairness-Energy-Throughput Optimized Trade-off in Wireless Networks. *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Maui, HI, 5–8 March 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/icnc.2018.8390238>
59. QoS-Aware Optimal Radio Resource Allocation Method for Machine-Type Communications in 5G LTE and beyond Cellular Networks / H. Beshley et

- al. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/9966366>
60. 5G multi-tier radio access network planning based on voronoi diagram / J. Su et al. *Measurement*. 2022. Vol. 192. P. 110814. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110814>
61. Lam S. C., Tran X. N. Fractional Frequency Reuse in Ultra Dense Networks. *Physical Communication*. 2021. Vol. 48. P. 101433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101433>
62. Lee C.-K., Yu L. A multi-level perspective on 5G transition: The China case. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. Vol. 182. P. 121812. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121812>
63. Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape / M. Wen et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2022. Vol. 16, no. 1. P. 7–25. URL: <https://doi.org/10.1109/jstsp.2021.3137669>
64. Shirer, M. (2020). *Worldwide private LTE/5G infrastructure forecast, 2020–2024*. IDC: The premier global market intelligence company. URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US47085720>
65. Makhija D. 5G Communication Systems: Network Slicing and Virtual Private Network Architecture. *ITM Web of Conferences*. 2023. Vol. 54. P. 02001. URL: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20235402001>
66. Enterprise Approach: Performance Analysis of Wi-Fi 6 and 5G Private LAN with Micro-Slicing Feature / V. Sathya et al. *IEEE Access*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3445295>
67. The future of Industry 4.0: private 5G networks / P. D. Selvam et al. *Advanced Signal Processing for Industry 4.0, Volume 1*. 2023. P. 3–1–3–25. URL: <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-5247-5ch3>
68. 3GPP Non-Public Network Security / A. Jerichow et al. *Journal of ICT Standardization*. 2020. P. 57–76. URL: <https://doi.org/10.13052/jicts2245-800x.815>
69. Choudhari C. S., Patil R. A., Saraf S. Deployment of 5G Core for 5G Private Networks. *2022 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech)*, Pune, India, 23–24 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/i4tech55392.2022.9952900>
70. Artificial Intelligence in Industry 4. 0 and 5G Technology / J. Thomas et al. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2022.
71. Beyond private 5G networks: applications, architectures, operator models and technological enablers / M. Maman et al. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2021. Vol. 2021, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-02067-2>
72. Winnie Owoko. Exploring the technological advancements and security issues of 5G. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 23, no. 2. P. 812–846. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2367>

73. Ahmadi S. 5G Network Architecture. *5G NR*. 2019. P. 1–194. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102267-2.00001-4>
74. Casetti C. 5G Consolidates Deployment by Targeting New Bands [Mobile Radio]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2021. Vol. 16, no. 4. P. 6–11. URL: <https://doi.org/10.1109/mvt.2021.3116735>
75. 5G Industrial IoT / W. Lei et al. *Wireless Networks*. Cham, 2021. P. 515–532. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73703-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73703-0_9)
76. Rahmawati P., Nashiruddin M. I., Nugraha M. A. Capacity and Coverage Analysis of 5G NR Mobile Network Deployment for Indonesia's Urban Market. *2021 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, Bandung, Indonesia, 27–28 July 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iaict52856.2021.9532574>
77. Network slicing: a next generation 5G perspective / P. Subedi et al. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2021. Vol. 2021, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01983-7>
78. Cisco: 2020 CISO Benchmark Report. *Computer Fraud & Security*. 2020. Vol. 2020, no. 3. P. 4. URL: [https://doi.org/10.1016/s1361-3723\(20\)30026-9](https://doi.org/10.1016/s1361-3723(20)30026-9)
79. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice / M. Shafi et al. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. Vol. 35, no. 6. P. 1201–1221. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2017.2692307>
80. Ahmadi S. Operation in Unlicensed and Shared Spectrum. *5G NR*. 2019. P. 845–912. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102267-2.00008-7>
81. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. Spectrum for 5G. *5G/5G-Advanced*. 2024. P. 29–41. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13173-8.00021-9>
82. Saha R. K., Cioffi J. M. Dynamic Spectrum Sharing for 5G NR and 4G LTE Coexistence -A Comprehensive Review. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2024.3351528>
83. 5G NR Release 16: Start of the 5G Evolution / S. Parkvall et al. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2020. Vol. 4, no. 4. P. 56–63. URL: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.011.1900018>
84. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. NR in Unlicensed Spectrum. *5G NR*. 2021. P. 381–418. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822320-8.00019-2>
85. Kholidy H. A. A Smart Network Slicing Provisioning Framework for 5G-based IoT Networks. *2023 10th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS)*, San Antonio, TX, USA, 23–25 October 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/iotsms59855.2023.10325712>
86. Pal P., Misra O., Shahid M. Network Slicing In 5G Architecture: Applications And Services. *NIET Journal of Engineering and Technology*. 2023. Vol. 12, no. 01W. P. 34–40. URL: <https://doi.org/10.62797/njet.vol.12.issue.01w.005>

87. Network Slicing / A. Khan et al. *5G Networks*. New York, 2024. P. 171–194. URL: <https://doi.org/10.1201/9788770042109-9>
88. Wu Y.-S., 吳亞璇. Slicing Network Function Orchestration and Resource Management Optimization in 5G C-RANs : thesis. 2019. URL: <http://ndltd.ncl.edu.tw/handle/bh85rr>
89. Elbehery K., Elbehery H. 5G as a Service (5GaaS). *International Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2019. Vol. 6, no. 8. P. 22–30. URL: <https://doi.org/10.14445/23488549/ijece-v6i8p104>
90. Banda L., Mzyece M., Mekuria F. 5G Business Models for Mobile Network Operators—A Survey. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 94851–94886. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3205011>
91. Joint Technical Advisory Committee. Radio Spectrum Conservation; a Program of Conservation Based on Present Uses and Future Needs. Creative Media Partners, LLC, 2023.
92. Shukla D., Sawarkar S. D. A study of wireless network evolution from 4G to 5G: standalone vs non-standalone. *2022 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, Bangalore, India, 23–25 December 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/smartgencon56628.2022.10084020>
93. Sivaraj R., Mohapatra P. Future Radio Access, Wi-Fi-LTE, LTE-Advanced: The Path to 5G. *Optical Networks*. Cham, 2017. P. 3–41. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42822-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42822-2_1)
94. Securing 5G OpenRAN with a Scalable Authorization Framework for xApps / T. O. Atalay et al. *IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications*, New York City, NY, USA, 17–20 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/infocom53939.2023.10228961>
95. Industrial 5G Private Network: Architectures, Resource Management, Challenges, and Future Directions / W. Ruoxi et al. *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 22–26 February 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766945>



**Г. В. Бешлей, М. М. Климаш, М. І. Бешлей**

**МЕТОДИ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ  
5G ADVANCED ДЛЯ РОЗВИТКУ  
ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ  
УКРАЇНИ**

**Монографія**

Додрукарська підготовка:  
*Лілія Ребрик*

Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 18.  
Наклад 300 прим. Зам. №18-09

Видавець  
ДП «Експрес-об'ява»  
вул. Бульварно-Кудрявська, 26, Київ-54, 01054.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4770 від 23 вересня 2014 р.

Вигоготовлювач  
ДП "Інфотех"  
вул. Дегтярівська, 15 А, м.Київ