



## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)

Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського  
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інфокомунікаційна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Шумкову Івану Миколайовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження ефективності методів територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G  
затверджена наказом по університету від «19» жовтня 2023р. №1212 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22.01.2024р.
3. Вихідні дані до роботи: 1.Стандарт мобільного зв'язку 5G NewRadio 2. Методи оптимального розміщення об'єктів. Кластерні моделі територіального розміщення базових станцій з повторним використанням частотного ресурсу з частотним параметром  $C=2,3,7$ . Секторні типи антен з кутом основної пелюстки діаграми спрямованості  $360,120,60$  град. Геометричні моделі планування стільникових ґрат. Параметр середньоквадратичного відхилення потужності сигналу від 4 до 10 дБ (селище, передмістя, місто). Коефіцієнт згасання сигналу  $k=4$ .
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
  1. Аналіз системних підходів, щодо територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G.
  2. Методи територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G на основі використання геометричних моделей частотних кластерів.
  3. Математична модель територіального планування мережі мобільного зв'язку 5G при використанні перекриття зон базових станцій.

4 Методологія територіального планування мобільної мережі 5G на основі використання моделей фемтостільників.

5 Результати моделювання схем використання фемтостільників для мережі мобільного зв'язку 5G

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентаці: 1. Титул .2. Об'єкт, предмет, мета, методи дослідження. 3 Концепція планування базових станцій у мережах мобільного зв'язку 5G. 4 Порівняльний аналіз методів оптимального розміщення базових станцій у системах мобільного зв'язку. 5. Розробка блок-схеми генетичного алгоритму для розміщення базових станцій 5G. 6. Математична постановка задачі оптимізації розміщення базових станцій. 7. Результати моделювання. 8 Модель планування територіального розміщення базових станцій з частковим перекриттям зон обслуговування для мереж мобільного зв'язку 5G. 9. Графік ефективності використання моделі станцій з частковим перекриттям зон обслуговування. 10. Висновки.

#### 6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
Основна частина	професор, Москалець Микола Вадимович		22.01.2024

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	15.03.2023	Виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	28.03.2023	Виконано
3	Розробка 1 розділу	19.05.2023	Виконано
4	Розробка 2 розділу	01.06.2023	Виконано
5	Розробка 3 розділу	10.06.2023	Виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.06.2023	Виконано

Дата видачі завдання 19 жовтня 2023 року

Студент \_\_\_\_\_ Шумков І.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ професор Москалець М.В.  
(підпис) (посада, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить 107 с., 43 рис., 4 табл., 1 додаток, 23 джерела.

МЕРЕЖА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G, ТЕРИТОРІАЛЬНИЙ ПЛАН, КЛАСТЕРНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ, ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ПЛАНУВАННЯ, ВЗАЄМНІ ЗАВАДИ, ФЕМТОСТІЛЬНИКИ, КОЕФІЦІЄНТ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ, СТІЛЬНИКОВА СТРУКТУРА, СЕКТОРНІ АНТЕНИ

Мета роботи – розробка моделей територіальних планів для мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів та оцінка їх ефективності за параметрами: коефіцієнта повторного використання частотного ресурсу та відсотку невиконання показника якості рівня взаємних внутрішньо-системних завад.

Об'єкт дослідження – моделі територіальних планів мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів.

Предмет дослідження – оцінка ефективності методів територіального планування на основі частотних кластерів.

Методи дослідження – аналіз, формалізація, синтез, моделювання, порівняння.

Проводиться розробка питань ефективності методів територіального планування мережі мобільного зв'язку 5G на основі використання частотних кластерних моделей з метою створення ефективного територіального плану з високим коефіцієнтом повторного використання частотного ресурсу та низьким відсотком невиконання показника якості рівня взаємних внутрішньо-системних завад.

Здійснено математичне моделювання ефективності методів територіального планування мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів в пакеті Matlab. Отримано результати розрахунків моделей територіальних планів за ефективністю и надано рекомендації, щодо впровадження в системи мобільного зв'язку 5G.

## ABSTRACT

The explanatory note to the thesis contains 107 pages, 43 figures, 4 tables, 1 app., 23 sources.

5G MOBILE NETWORK, TERRITORIAL PLAN, CLUSTER MODELS, PLANNING METHODOLOGY, GEOMETRIC PLANNING MODELS, MUTUAL INTERFERENCE, FEMTOCELLS, FREQUENCY REUSE COEFFICIENT, CELL STRUCTURE, , SEC ROTARY ANTENNAS

The purpose of the work is to develop models of territorial plans for the 5G mobile communication network based on frequency clusters and evaluate their effectiveness according to the following parameters: the frequency resource reuse rate and the percentage of non-fulfillment of the quality indicator of the level of mutual intra-system interference.

The object of the research is models of territorial plans of the 5G mobile communication network based on frequency clusters.

The subject of the study is the assessment of the effectiveness of territorial planning methods based on frequency clusters.

Research methods – analysis, formalization, synthesis, modeling, comparison.

Issues of effectiveness of methods of territorial planning of 5G mobile communications network based on the use of frequency cluster models are being developed in order to create an effective territorial plan with a high rate of frequency resource reuse and a low percentage of non-fulfillment of the quality indicator of the level of mutual intra-system interference.

Mathematical modeling of the effectiveness of methods of territorial planning of the 5G mobile communication network based on frequency clusters in the Matlab package was carried out. The results of calculations of models of territorial plans by efficiency were obtained and recommendations were given regarding the introduction of 5G into mobile communication systems.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів .....	8
Вступ .....	9
1 Аналіз системних підходів, щодо територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G.....	11
1.1 Принцип роботи 5G .....	11
1.2 Параметри мережі .....	12
1.3 Частоти, що використовуються для нового стандарту 5G .....	14
1.4 Технології, що використовуються в 5G .....	15
1.5 Сценарії надання послуг мобільного зв'язку в мережах 5G .....	18
1.6 Варіанти застосування технологій для передачі послуг мультимедіа .....	19
1.7 Архітектура опорної мережі .....	20
1.8 Методи планування в технології 5G .....	24
1.8.1 Еволюція радіомережі .....	24
1.8.2 Розширений повітряний інтерфейс .....	25
1.8.3 Розумна антена нового покоління .....	26
1.8.4 Швидкість і стійкість завдяки розділенню площини SDN .....	28
1.8.5 Централізована архітектура – хмара RAN .....	29
1.8.6 Гетерогенний підхід – HetNets .....	32
2 Методи територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G на основі використання геометричних моделей частотних кластерів .....	36
2.1 Загальна геометрична модель використання частотних кластерів ..	36
2.2 Розрахунок параметрів моделей територіальних планів частотних кластерів з м'яким розподіленням частотного ресурсу.....	38
2.3 Розрахунок параметрів моделей територіальних планів частотних кластерів з дробовим розподіленням частотного ресурсу.....	48
2.4 Розрахунок параметрів моделей територіальних планів частотних кластерів з секторизацією антен віддалених користувачів.....	56
2.5 Результати математичного моделювання розрахунків параметрів	

ефективності територіальних планів мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів в пакеті Matlab.....	65
2.6 Аналіз ефективності моделей територіальних планів частотних кластерів.....	68
3 Математична модель територіального планування мережі мобільного зв'язку 5G при використанні перекриття зон базових станцій.....	69
3.1 Метод підвищення ефективності використання частотного ресурсу в системах безпроводового доступу 5G.....	70
3.2 Математична модель багаторазового перекриття зон діаграм спрямованості антен базових станцій в мережі мобільного зв'язку 5G.....	74
3.2 Аналіз отриманих результатів математичного моделювання.....	79
4 Методологія територіального планування мобільної мережі 5G на основі використання моделей фемтостільників.....	82
4.1 Схема повторного використання-1.....	82
4.2 Схема повторного використання-3.....	84
4.3 Схема м'якого повторного використання частот (SFR) .....	85
4.4 Схема часткового повторного використання частоти (PFR) .....	87
4.5 Схема з м'яким дробовим повторним використанням частоти (SFRR) .....	88
5 Результати моделювання схем використання фемтостільників для мережі мобільного зв'язку 5G .....	90
5.1 Ефективність покриття .....	90
5.2 Пропускна здатність .....	91
5.3 Якість обслуговування (QoS).....	91
5.4 Критерії справедливості індекс Джайна .....	92
5.5 Налаштування моделювання .....	93
5.6 Результати моделювання .....	95
5.7 Оптимізація внутрішнього радіусу схеми м'якого частотного сигналу (SFR) .....	101
Висновки .....	105
Перелік джерел посилань .....	106
Додаток А. Лістинг програми математичного моделювання розрахунків параметрів ефективності територіальних планів мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів в пакеті Matlab.....	109

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І  
ТЕРМІНІВ

АС – абонентська станція

АТС – автоматична телефонна станція

БС – базова станція

ДСА – діаграма спрямованості антени

МС – мобільна станція

ССЗ – стільникова сиситема зв'язку

ТЧП – територіально–частотний план

BTS – Basic Telephone Station – базова телефона станція

CDMA – Code Division Multiple Access – множинний доступ із кодовим поділом  
frequency reuse – повторне використання частоти

GSM – Global System for Mobile – глобальна система мобільного зв'язку

LTE – Long Term Evolution – довготривалий розвиток мобільних технологій

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System – універсальна мобільна телекомунікаційна система

MIMO – Multi-Input Multi-Output – система з багатьма входами та  
багатьма виходами

MS – Mobile Station – мобільна станція

NMT – Nordic Mobile Telephony – північна мобільна телефонія

## ВСТУП

В наш час, коли розвиток технологій безперервно визначає ритм суспільного прогресу, велика увага приділяється розвитку мереж мобільного зв'язку, зокрема технології 5G. Запровадження 5G вимагає не лише нових технічних рішень, але і ретельного територіального планування для забезпечення ефективного покриття та оптимального використання ресурсів. Методи ефективного територіального планування стають важливим аспектом у забезпеченні високоякісного зв'язку, мінімізації завад та оптимізації використання пропускну здатності.

У цьому контексті вивчення та розробка методів для ефективного територіального планування мереж 5G виявляється ключовим завданням. Відповідно до особливостей 5G, яке характеризується великою швидкістю передачі даних, великою кількістю підключених пристроїв та використанням різноманітних частотних діапазонів, важливо розробляти підходи, які враховують усі ці фактори. Впровадження технології 5G передбачає високу щільність базових станцій, що робить територіальне планування ключовим етапом. Оптиміальне розташування станцій, враховуючи густину населення, територіальні особливості та попит на зв'язок, є важливим для забезпечення стабільного з'єднання.

Методи ефективного територіального планування включають аналіз географічних обмежень, високочастотного спектра та потужності сигналу для максимального покриття та швидкості передачі даних. Оптимізація також враховує енергоефективність мережі, щоб забезпечити стале функціонування при високих технічних показниках. Крім того, важливо враховувати вимоги до висоти антен та максимізувати використання інфраструктури для зменшення впливу на навколишнє середовище. Ефективне територіальне планування 5G є стратегічним елементом розвитку міст та регіонів, сприяючи росту господарства та підвищенню якості життя населення.

У даному дослідженні розглядаються та проаналізуються різні методи ефективного територіального планування для мереж 5G, звертаючи увагу на їхню можливу застосовність, переваги та обмеження. Результати такого дослідження можуть служити основою для подальшого розвитку стратегій та стандартів, що сприятимуть успішному впровадженню та оптимізації мереж мобільного зв'язку 5G на різних територіях.

# 1 АНАЛІЗ СИСТЕМНИХ ПІДХОДІВ, ЩОДО ТЕРИТОРІАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

## 1.1 Принцип роботи 5G

5G працює відповідно до стандартів телекомунікацій, подібних до тих, що використовуються у LTE. Збільшення швидкості досягається за рахунок використання вищих частот, таких як міліметрові хвилі, які, незважаючи на велику швидкість передачі даних, мають обмежену проникненість та покриття. Архітектура мережі змінюється з великих веж на компактні вишки, а 5G працює у трьох діапазонах спектру: низькочастотному для широкого покриття, середньочастотному для високої швидкості та низької затримки, та високочастотному для надзвичайно високої швидкості з обмеженим покриттям. 5G використовується для покращення мобільного зв'язку за рахунок застосування високочастотних технологій, таких як міліметрові хвилі, які забезпечують значно вищу швидкість передачі даних. Це досягається за рахунок збільшення частоти, наприклад, в порівнянні зі стандартами, які використовуються для Wi-Fi або існуючих мобільних мереж.

Іншим важливим аспектом є зміна архітектури мережі: від великих веж, які забезпечували зв'язок на великій відстані, до багатофункціональних та малопотужних вишок, розміщених всюди. Така модель дозволяє покращити покриття та знизити затримку.

Застосування різних діапазонів спектру (низькочастотного, середньочастотного та високочастотного) в 5G дає можливість поєднати велику зону покриття з високою швидкістю передачі даних. Низькочастотний спектр забезпечує велике покриття, середньочастотний — високу швидкість та меншу затримку, а високочастотний — надзвичайно високу швидкість, але з обмеженим покриттям.

Масивні MIMO (Multiple Input Multiple Output) та формування променя відіграють важливу роль у покращенні ефективності мережі, дозволяючи створювати багато променів сигналу та фокусувати їх на окремих користувачах. Ці технології допомагають забезпечити стабільний та високопродуктивний зв'язок в умовах швидкозмінюючогося середовища [1].

5G, або п'яте покоління мобільного зв'язку, використовує величезний діапазон частот для забезпечення високошвидкісного та надзвичайно ефективного зв'я-

зку. Одним із ключових аспектів є використання міліметрових хвиль, які мають величезну пропускну здатність. Однак, вони також обмежені у покритті та проникненні, що призводить до необхідності встановлення багатофункціональних вишок на короткій відстані для забезпечення стабільного зв'язку.

Радикальна зміна архітектури мережі також є характерною для 5G. Замість великих веж, розташованих на великих відстанях, мережа 5G використовує компактні та малопотужні вишки, що забезпечують краще покриття та зменшують затримку.

Технології, такі як MIMO та формування променя, використовуються для максимізації ефективності зв'язку. MIMO дозволяє використовувати кілька антен для передачі та отримання даних одночасно, покращуючи якість сигналу. Формування променя використовує напрямлені сигнали, які фокусуються на конкретних користувачах, підвищуючи якість та швидкість зв'язку.

Три діапазони спектру - низькочастотний, середньочастотний та високочастотний - розширюють можливості 5G. Низькочастотний діапазон забезпечує велике покриття, середньочастотний — високу швидкість та меншу затримку, а високочастотний — надзвичайно високу швидкість з обмеженим покриттям. Ця гетерогенна комбінація дозволяє максимально використовувати потенціал 5G в різних умовах та локаціях.

## 1.2 Параметри мережі

Як показано на рис.1.1, згідно зі стандартами та вимогами, розробленими 3GPP, були визначені ключові характеристики для мережі 5G:

- 1) Пікова швидкість передачі даних у напрямку вниз – досягає 20 Гбіт/с, у напрямку вгору – до 10 Гбіт/с.
- 2) Мінімальна затримка у підсистемі радіодоступу для служб URLLC становить 0,5 мс, а для служб eMBB – 4 мс.
- 3) Максимальна щільність підключених до мережі IoT-пристроїв у міських умовах – 1 мільйон пристроїв на квадратний кілометр.
- 4) Забезпечення автономної роботи IoT-пристроїв протягом 10 років без підзарядки акумулятора.
- 5) Підтримка мобільності при максимальній швидкості переміщення об'єктів до 500 км/год.

6 Висока енергоефективність та безпека для здоров'я людини.

Мережа 5G надає операторам значні переваги, включаючи розширення функціональних можливостей та підвищення задоволеності користувачів. На діаграмі нижче представлені ключові параметри мережі IMT2020 (5G), порівняно з характеристиками IMT-Advanced (4G).



Рисунок 1.1 – Практичні переваги 5 G [1]

Мережа 5G представляє собою значний стрибок вперед у плані швидкості та продуктивності. Пікова швидкість передачі даних у 20 разів перевищує те, що пропонує 4G, досягаючи приблизно 20 Гбіт/с. Відмітна особливість полягає в тому, що швидкість для кінцевого користувача може легко досягати 100 Мбіт/с та вище. Мережа 5G демонструє ефективне використання радіочастотного спектру, дозволяючи передавати значно більше інформації на одиницю частоти порівняно з 4G - принаймні втричі більше.

Збільшена мобільність користувача вражає своєю високою швидкістю переміщення в зоні покриття мережі без втрат передачі між базовими станціями - до 500 км/год. Це важливо для використання послуг 5G у високошвидкісних поїздах та інших рухомих об'єктах. Зменшена затримка мережі 5G, менше 1 мс, робить її ідеальною для критично важливих комунікацій, відеоспостереження, та інших застосувань, де кожна мілісекунда має значення.

Значно підвищена щільність терміналів у мережі 5G - на порядок вища, може сягати кількох мільйонів пристроїв на 1 кв. км. Це означає, що навіть на обме-

женій площі може бути підключено багато десятків чи сотень мініатюрних пристроїв, таких як датчики IoT. Енергоефективність мережі 5G значно перевершує попередні покоління, а робоча ємність - швидкість передачі даних на кожен квадратний метр зони покриття - подвійна за рахунок значних технологічних вдосконалень.

### 1.3 Частоти, що використовуються для нового стандарту 5G

Впровадження технології 5G передбачає широкий спектр частот. Однак у діапазоні Sub-6, виникають труднощі із доступністю вільних частот. Застосування низьких частот у мережах 5G дозволяє забезпечити більшу площу покриття, при цьому не вимагаючи великих інвестицій. Це також забезпечує ефективне проникнення сигналів всередину приміщень, що має важливе значення для сценаріїв Інтернету речей. Низькочастотні частоти, такі як 700 МГц, відіграють важливу роль у системах зв'язку M2M, розумних містах та розумних будинках. Діапазон 3,4–3,8 ГГц може бути використаний для стабільного з'єднання об'єктів, таких як автономні машини, роботи та промислова автоматизація.

В стандарті 5G передбачається виділення безперервних смуг частот у діапазоні 300-400 МГц. Високочастотний спектр необхідний для досягнення великих швидкостей передачі. Високочастотний спектр є ключовим для забезпечення високих швидкостей передачі даних до 20 Гбіт/с у мережах 5G, особливо для надання послуг, таких як 3D-відео у форматі UHD, розширена реальність/віртуальна реальність (AR/VR), хмарні сервіси для роботи, та тактильний Інтернет. Для досягнення цих цілей розглядається можливість використання частотних діапазонів від 24,25 ГГц до 27,5 ГГц і від 37 ГГц до 43,5 ГГц.

Специфікації, розроблені 3GPP (3rd Generation Partnership Project), визначили нові смуги частот для 5G та розділили їх на два блоки: FR1 (частота до 6 ГГц) і FR2 (частота вище 6 ГГц). Використання вищої частоти дозволяє подолати проблеми, пов'язані з перешкодами в мережі, які у високочастотному діапазоні менше в порівнянні з низькочастотним. Застосування високочастотних діапазонів збільшує ширину радіоканалу, що призводить до підвищення швидкості передачі даних.

Технології в 5G дозволяють використовувати широку ширину радіоканалу для блоку FR1 до 100 МГц і для блоку FR2 від 50 до 400 МГц. На відміну від ме-

реж LTE, де ширина каналів обмежена значеннями 1.4, 3, 5, 10, 15 і 20 МГц, 5G використовує більші ширини, що сприяє значному підвищенню швидкості передачі даних.

#### 1.4 Технології, що використовуються в 5G

Для відповіді на зростаючі потреби у бездротовому зв'язку був створений стандарт 5G, відомий як "Нове радіо 5G" (5G NR). Розробка цього стандарту відбувалася, фактично, з чистого листа, з врахуванням усіх вимог мереж 5G та застосуванням передових технологій.

У 5G NR використовуються сучасні технології модуляції, формування хвиль та технології радіодоступу (RAT), спрямовані на покращення швидкості передачі даних та тривалості роботи батарей пристроїв 5G [2].

Однією з ключових особливостей технології 5G NR є оптимізована технологія OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів). OFDM, яка вже успішно використовується у 4G/LTE-A, представляє собою комбінацію модуляції та мультиплексування. У порівнянні з простим поділом радіосигналу на кілька паралельних частотних каналів, OFDM відрізняється ортогональністю, що створює груповий спектр сигналу OFDM.

Як показано на рис.1.2 ортогональність означає, що кожен сигнал на піднесучій має унікальну фазу, відрізняючи його від інших сигналів. Це дозволяє демультимплексору ефективно розділяти сигнали піднесучої, аналізуючи їх часові та частотні характеристики. Завдяки цим особливостям OFDM забезпечує високу ефективність передачі даних та оптимізацію використання радіочастотного спектру в мережах 5G.

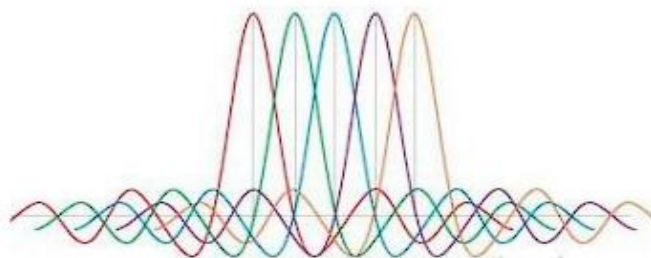


Рисунок 1.2 – Частотні канали, що перекриваються, з ортогональними несучими [2].

Вибір несучих у загальному спектрі звичайного багатоканального сигналу стає викликом через обмежені можливості сучасних смугових частотних фільтрів. Це обмеження вимагає широкого частотного розділення несучих, що обмежує збільшення їх кількості в певній смузі частот. У сигналі OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів) виділення несучих в груповому спектрі здійснюється за допомогою ортогональних перетворень сигналу. Це дозволяє перекривати спектри сусідніх несучих, що може істотно збільшити щільність частот у спектрі сигналу та підвищити ефективність використання спектра.

Щодо формування променя (Beamforming), ця технологія використовується для зменшення споживання енергії та підвищення дальності (рис.1.3). Вона дозволяє динамічно створювати радіопромінь для конкретного користувача. Базова станція визначає, звідки надходить сигнал і коли, використовуючи методи триангуляції для оцінки приблизного розташування. Наслідок - оптимальний шлях проходження сигналу. Це дозволяє покращити ефективність використання ресурсів та забезпечити кращу якість зв'язку, особливо у мобільних мережах, де потрібно здійснювати динамічне вирішення проблеми забезпечення стійкого зв'язку в різних напрямках.



Рисунок 1.3 – Формування променів Beamforming [2].

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - це метод обробки сигналів, що використовує просторове кодування для покращення ефективності передачі даних у безпроводових мережах (рис.1.4). Цей метод, який вже застосовується у мережах Wi-Fi та 4G, отримав значні поліпшення в стандарті 5G, зокрема в розрахованому на багато користувачів варіанті MU-MIMO (Multi-User MIMO).

У базових станціях 5G (gNB) антени складаються з матриці випромінюючих вузлів, що дозволяє створити просторові канали для підвищення рівня сигналу для конкретного користувача. MU-MIMO у 5G дозволяє ефективно взаємодіяти з

кількома користувачами одночасно, мінімізуючи вплив сигналу від інших користувачів на якість зв'язку.

Використання антен MIMO для генерації променів, відоме також як AAS (Active Antenna System), є технологією, яка вже давно присутня на ринку. Антени AAS MIMO розділяють зону покриття на комірки, що сприяє ефективнішому використанню діапазону та збільшенню кількості одночасно використовуваних каналів. У зв'язку з потребою в більш ефективному використанні спектра в перевантажених мережах, сучасні системи використовують динамічну генерацію цифрових променів для оптимізації використання доступного спектру.

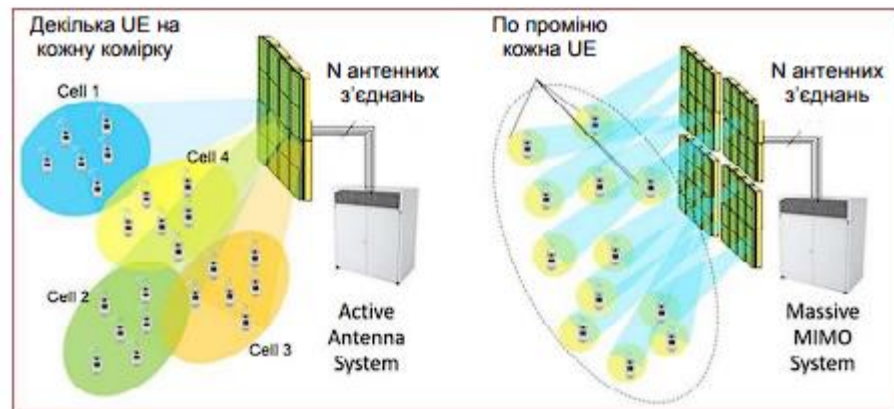


Рисунок 1.4 – 2D MIMO антена (ліворуч) та Massive MIMO антена (праворуч) [2].

Використання антен MIMO у міліметровому діапазоні FR2 набуває великої актуальності завдяки спрямованості міліметрових радіохвиль, яка досягається за рахунок збільшеної кількості антенних вузлів на одній антені. Утворення масивної антени MIMO зі збірки таких антенних вузлів (256 чи більше) дозволяє динамічно створювати численні сильні та точні промені у напрямках конкретних пристроїв. Шляхом керування фазою та амплітудою сигналів, така антена може оптимально налаштуватися для покращення якості зв'язку.

Технології спільного використання спектра (Spectrum sharing) стали важливим кроком у розвитку безпроводових мереж. Часто розподілені радіочастотні спектри не використовуються оптимально, і тому виникли технології, що дозволяють спільно використовувати цей спектр. Уніфікована міжчастотна взаємодія стала ключовим елементом взаємодії між частотними діапазонами, що додані до

5G NR. Це забезпечує ефективне перемикання між каналами при передачі між базовими станціями.

Впровадження малих стільникових станцій (Small cells) стало важливим рішенням для ущільнення мережевого покриття. Ці малі станції, легкі у встановленні та енергоефективні, можуть розміщуватися на стовпах вуличного освітлення, стінах будинків тощо, надаючи швидке та низькозатримкове покриття, особливо в областях, де потрібно динамічно розподіляти навантаження між антенами.

Система Network Slicing, або нарізка мережі, є концепцією, що дозволяє операторам розділити мережу на ізольовані шари, кожен з яких відповідає певному сценарію використання. Це важливо для побудови мережі 5G, яка може оптимізуватися для різних умов експлуатації. Однак цю концепцію можна реалізувати тільки з переходом до нового покоління ядра мережі.

Ці технологічні інновації в мережах 5G відіграють критичну роль у покращенні зв'язку та забезпеченні високої якості послуг у різних сценаріях використання.

### 1.5 Сценарії надання послуг мобільного зв'язку в мережах 5G

Деякі з розглянутих характеристик, таких як пропускна здатність та автономність, неможливо досягти одночасно, оскільки вони взаємовиключні. Проте ці параметри необов'язково повинні бути задоволені одним пристроєм одночасно. Ключова ідея полягає в розрізненні різних типів сценаріїв для надання мобільних послуг в залежності від важливості конкретного параметра [3].

Концепція нарізки мережі визначає можливість фізичного розділення архітектури 5G на віртуальні мережі або шари, призначені для конкретних варіантів застосування. Мережа розділяється на три основні сценарії використання:

1) eMBB (Enhanced Mobile Broadband): Цей сценарій орієнтований на надширокопasmуговий мобільний зв'язок і спрямований на високошвидкісний зв'язок для забезпечення ефективної передачі даних.

2) URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication): Цей сценарій спрямований на наднадійний зв'язок із низькою затримкою, що особливо важливо для застосувань, де важлива безперервність зв'язку та низька затримка, наприклад, в автономних транспортних засобах або в медичних системах.

3) mMTC (Massive Machine-Type Communications): Цей сценарій призначений для взаємодії між масовими машинами, такими як лічильники води, газу, контролери вуличного освітлення та інші IoT-пристрої. Для цього сценарію важлива велика кількість підключених пристроїв та їх автономність.

Спрямованість інтересів операторів мобільного зв'язку полягає в тому, що вони можуть вкладати у 5G тільки у ті сценарії, які відповідають їхнім конкретним бізнес-потребам. Наприклад, для масових машинних комунікацій (mMTC), які вимагають великої кількості підключених пристроїв з низьким енергоспоживанням, не потрібні великі інвестиції, що робить цей сценарій привабливим для операторів. У той час як сценарії URLLC та eMBB вимагають більших витрат і відповідають за високошвидкісний та наднадійний зв'язок відповідно.

### 1.6 Варіанти застосування технологій для передачі послуг мультимедіа

Бездротові мережі 5G можуть взяти на себе роль альтернативи провідному інтернету в наших домівках. Тепер, замість того, щоб проводити кабель у кожную квартиру, сигнал буде передаватися від вежі 5G до роутера, який роздаватиме його як звичайний домашній WiFi.

Зазвичай маршрутизатор 5G забезпечує швидкість завантаження 2-3 Гбіт/с. Це дозволяє операторам вирішити проблему "останньої милі" та значно знизити вартість прокладання кабелів. Це особливо актуально в місцях масового скупчення людей. Однією з головних переваг використання технології 5G є можливість вирішення проблеми перевантаження мережі в місцях з великою кількістю людей. Недавні тести, проведені Samsung та японським оператором KDDI на 30-тисячному стадіоні, підтверджують це, дозволяючи одночасну трансляцію відео 4K на кілька планшетів. Іншою інноваційною ідеєю є використання з'єднання 5G для розваг та комфорту пасажирів у залізничному транспорті. Тести, проведені компанією Samsung та KDDI, показали успішні результати на величезному відстані під Токіо, досягаючи швидкості 1,7 Гбіт/с та завантажуючи відео 8K та 4K.

Система "Connected car" також відкриває нові можливості для безпечного спілкування автомобілів між собою на великих швидкостях до 500 км/год. Це підвищує рівень безпеки на дорозі, дозволяючи автомобілям взаємодіяти та домовлятися про маневри. У сфері промислового виробництва, особливо при керуванні промисловими роботами, 5G може конкурувати з промисловим Ethernet за високі

вимоги до затримки та надійності. Використання бездротової мережі 5G може стати економічно ефективним рішенням для різноманітних завдань, від зв'язку між промисловими контролерами до сенсорних мереж.

В сфері Інтернету речей (IoT), 5G вирішить проблему різноманітних та погано підтримуваних стандартів зв'язку, що обмежують розвиток цієї галузі. Завдяки високій швидкості та низькій затримці, IoT може отримати новий поштовх у взаємодії між датчиками та інтелектуальними пристроями. У галузі охорони здоров'я, технологія 5G з можливістю наднадійного комунікаційного компонента із малою затримкою (URLLC) відкриває нові перспективи для телемедицини, дистанційного відновлення та фізіотерапії за допомогою доповненої реальності. Лікарні можуть створити потужні сенсорні мережі для моніторингу пацієнтів, а страхові компанії можуть використовувати дані для кращого контролю та управління лікуванням. У відео трансляції та стрімінгу, 5G відкриває можливості для високоякісного 8K-відео, роблячи його стандартом для міст і передмість. Застосування систем відеоспостереження з інтелектуальним розпізнаванням осіб стає більш доступним на всіх континентах завдяки високій швидкості передачі даних без особливих вимог до затримки.

Іншим інтересним аспектом використання 5G є концепція Sky Office, де ноутбук, оснащений вбудованим модемом 5G, може передавати обчислювальну потужність у хмару. Це відкриває нові можливості для роботи з хмарними сховищами та програмами віддалено. В галузі віртуальної та доповненої реальності, 5G дозволяє подальше розвиток цих технологій, забезпечуючи мінімальну затримку та високу швидкість передачі даних. Це може призвести до нових досягнень у сферах розваг та ігор, зокрема в іграх з тактильним інтернетом (TI).

Нарешті, в галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), 5G може дозволити керування безпілотниками на великій відстані з мінімальною затримкою, що робить їх більш ефективними у різних областях, від розваг до рятувальних операцій.

## 1.7 Архітектура опорної мережі 5G

У мережевій архітектурі 5G виділяється особливість, яка полягає в тому, що традиційна концепція "мережевої архітектури", що ґрунтується на апаратних рішеннях, більше не є актуальною. Точніше, 5G часто називається не просто мере-

жею, але системою чи платформою, де основний акцент робиться на програмних рішеннях, а не апаратних. У випадку побудови 1/2/3/4G мережі важливим було апаратне забезпечення (пристрої), тоді як платформа 5G розроблялася з урахуванням програмних рішень, таких як програмні визначені мережі (SDN) і віртуалізація мережевих функцій (NFV).

Функції 5G реалізуються через віртуальні мережеві функції (VNF), які діють у віртуалізованій інфраструктурі NFV. Важливо відрізнити VNF як функцію від NFV як технології. VNF представляє собою конкретну функцію, тоді як NFV – це технологія. Остання впроваджується в інфраструктуру фізичного центру обробки даних (DC) на базі стандартного комерційного обладнання (COTS), яке включає сервери, комутатори та системи зберігання

Великий крок вперед полягає в тому, що традиційне обладнання мереж мобільного зв'язку замінюється програмними об'єктами, які працюють на стандартних серверах та віртуальних машинах. Зокрема, використання програмних контейнерів і архітектури мікросервісів є актуальними для реалізації програмних функцій.

Архітектура мережі розподіленого мобільного доступу (D-RAN) з мереж 4G еволюціонує в архітектуру централізованого RAN (C-RAN). У свою чергу, в архітектурі 5G, ключові мережеві функції втілюються у центральному хмарі (Cloud RAN) на віртуальних машинах. Технології Edge Cloud, Mobile Edge Cloud (MEC) та Fog Cloud також відіграють важливу роль у розвитку мереж 5G (рис.1.5).

Важливим елементом вирізання мережі (Network Slicing) є віртуалізація мережі на основі NFV/SDN. Ця технологія важлива для забезпечення ефективної мережі 5G, яка може надавати різні "срізи" для різноманітних видів послуг та застосунків.

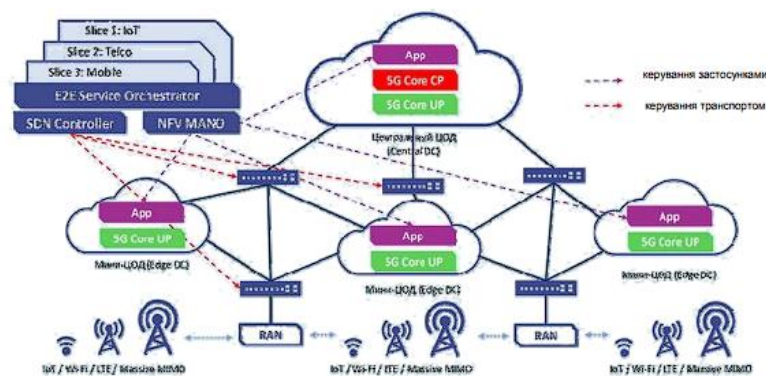


Рисунок 1.5 – Загальна архітектура мережі 5 G [3].

Технологія Network Slicing в 5G дозволяє ефективно використовувати єдиний мережевий ресурс для логічного розділу мережі, адаптованого для різних типів послуг. Це стосується високоякісного UHD відео, голосових послуг 5G та Інтернету речей з великою кількістю датчиків. Всі ці послуги, які використовують технологію Network Slicing, працюють в єдиної фізичній інфраструктурі, включаючи центральні та прикордонні хмарні центри обробки даних, а також "туманну" інфраструктуру (Fog Computing) для Massive IoT та промислового Інтернету речей.

Це спрощує переосмислення та використання наявної апаратної та програмної інфраструктури, дозволяючи гнучко реалювати ресурси. Крім того, такий підхід сприяє зменшенню як інвестиційних, так і експлуатаційних витрат на будівництво та управління мережею.

Ключові принципи архітектури 5G включають розподіл вузлів мережі на "площину користувача" та "площину управління", гнучке масштабування та розгортання, поділ мережі з урахуванням послуг для різних груп користувачів. Також важливі аспекти - віртуалізація мережевих функцій (VNF), підтримка хмарних обчислень (fog computing) та конвергентна архітектура, що об'єднує різні типи мереж доступу в єдину базову мережу. Реалізація цих принципів робить мережі 5G унікальними та готовими до майбутніх викликів у світі зв'язку.

## 1.8 Методи планування в технології 5G.

З вимогами субмілісекундної затримки та обмеженням смуги пропускання в традиційному бездротовому спектрі стільникові мережі тепер готові порушити мережеву парадигму, орієнтовану на базову станцію (BS). На рис. 1.6 зображено цей поступовий рух від мережі, орієнтованої на BS, до мережі, орієнтованої на пристрій.

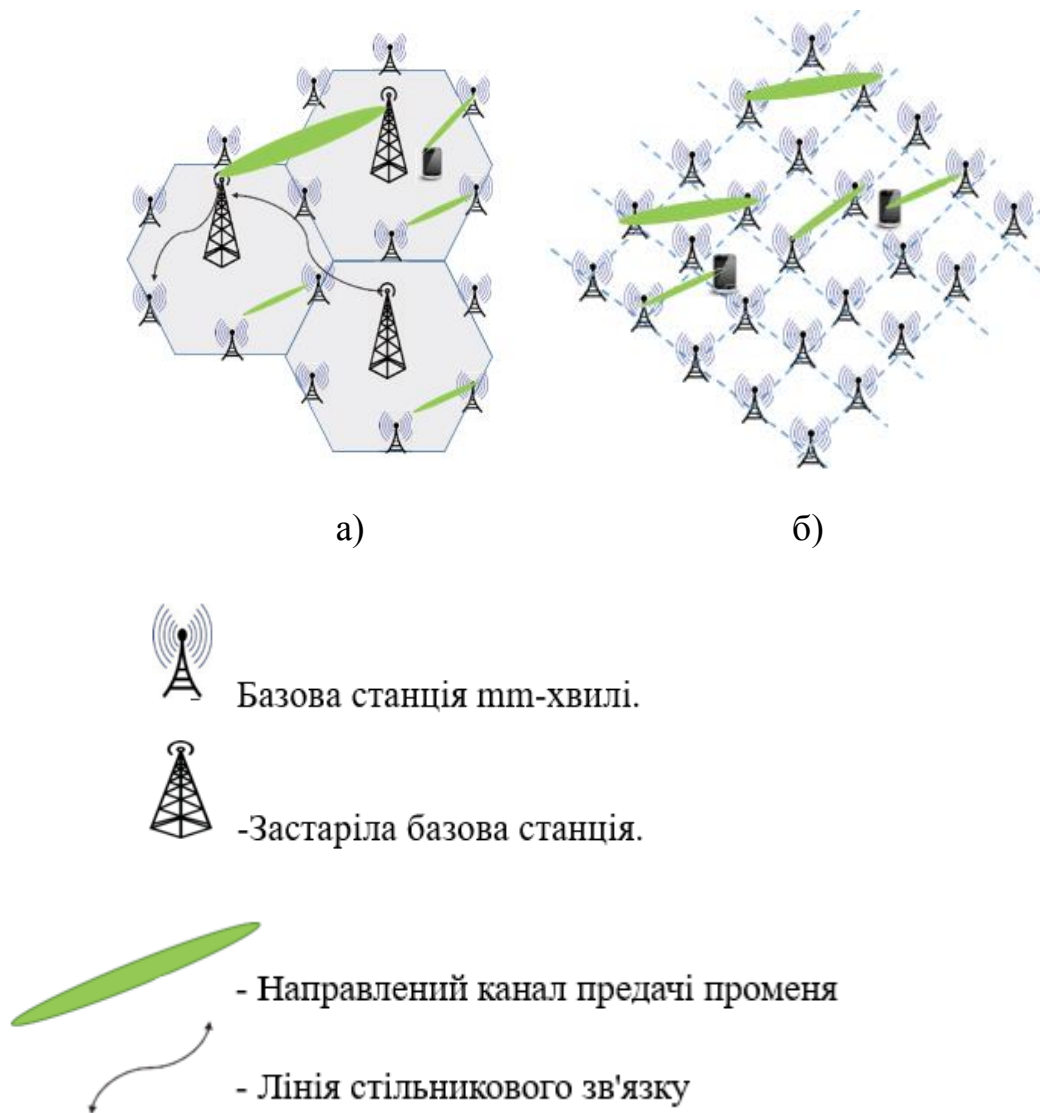


Рисунок 1.6 – Гібридна мережева архітектура mm-хвиль  
а) гібридна мережа як з mm-хвилею, так і з безпроводовим зв'язком,  
б) автономна дрібноствільникова мережа mm-хвиль [3].

Збільшення попиту галуззю безпроводового зв'язку спонукало до переходу до розгортання значно менших стільників від початкового макро-гексагонального покриття. Сьогодні дослідники зосереджені на способах проектування мереж, орієнтованих на користувача. Користувач більше не є остаточним рішенням бездротової мережі, але очікується, що він бере участь у зберіганні, ретрансляції, доставці вмісту та обчисленнях у мережі.

Очікується, що майбутні мережі з'єднуватимуть різні вузли в різній близькості. Розгортання малих, мікро-, піко- та фемтосот вже триває. Таким чином, щільні мережі 5G матимуть високі перешкоди в одному каналі, що поступово зробить поточний радіоінтерфейс застарілим. Це підштовхує концепцію сектор-

них і спрямованих (орієнтованих на енергію) антен, на відміну від вікових всеспрямованих антен. Тому множинний доступ з космічним розділенням (SDMA) і ефективна конструкція антени є вкрай необхідними. Очікується, що відокремлення користувачьких і керуючих рівнів, а також бездоганна взаємодія між різними мережами зміцнять основу для систем 5G. У цьому розділі ми обговорюємо вимоги до архітектури мережі 5G, зміни в радіоінтерфейсі та дизайн розумних антен. Також обговорюються нові технології, такі як SDN, Cloud-RAN і HetNets.

### 1.8.1 Еволюція радіомережі

Загальна структура безпроводових мереж 5G порушує правила стільникової концепції, орієнтованої на BS, і рухається до топології, орієнтованої на пристрій [4]. Мережа 5G передбачає використання більш високих частот для зв'язку. Поширення та проникнення сигналу мм-хвиль у зовнішньому середовищі досить обмежені. Таким чином, компонування вузлів не може відповідати традиційному стільниковому дизайну або навіть будь-якому певному шаблону. Раппапорт і його група пропонують спеціальний макет вузла для розробки радіомережі 5G. Наприклад, надщільне розгортання необхідне в областях, де потрібна висока швидкість передачі даних, таких як станції метро, торгові центри та офіси. Зв'язок прямої видимості (LOS) має беззаперечну перевагу над зв'язком поза прямою видимістю (NLOS). З іншого боку, відбиті, розсіяні та дифраговані сигнали все ще можуть мати достатню енергію, яку необхідно досліджувати, коли LOS повністю заблоковано [4].

Стільникова технологія 5G повинна працювати з величезною кількістю користувачів, різноманітними пристроями та різноманітними послугами. Тому першочерговою проблемою є інтеграція базових станцій 5G із застарілими стільниковими мережами (наприклад, 4G, 3G і 2G). Фарук і його команда з Samsung Electronics, пропонують різні конфігурації, такі як BS-системи ММ-хвиль, інтегровані з системами 4G і міліметрові автономні системи. Великі переваги формування променя розширюють покриття, одночасно зменшуючи перешкоди та покращуючи якість зв'язку на краях стільника. Ця функція дозволяє BS-сіткам мм-хвиль забезпечувати низьку затримку та економічно ефективні рішення. На рис. 6 (А) показано гібридну систему мм-хвиль (5G) і застарілої мережі 4G. Він пропонує дворезимний модем, що дозволяє користувачеві перемикатися між двома ме-

режами для кращого досвіду. Альтернативно, спектр мм-хвиль також може використовуватися лише для передачі даних, тоді як керуюча та системна інформація може передаватися за допомогою традиційних мереж 4G. З іншого боку, як показано на рис. 6(B), автономні системи 5G працюють виключно на мм-хвилях. Такі системи передбачають використання однакового діапазону міліметрових хвиль як для зворотного зв'язку, так і для безпроводового доступу. Концепція вузьких променів дозволяє прийнятне перекриття спектру, а також покращує якість зв'язку між мережами BS та великою кількістю користувачів. Таким чином, очікується, що радіомережі в зв'язку 5G будуть значно відрізнятися від традиційних мереж. Еволюція радіо також змінила б схеми радіоінтерфейсу.

### 1.8.2 Розширений повітряний інтерфейс

Невеликі довжини радіохвиль міліметрового діапазону вимагають малих розмірів антени. Це дозволяє використовувати велику кількість менших антен. Контроль фази та амплітуди сигналу за допомогою антенної решітки допомагає посилити електромагнітні хвилі в бажаному напрямку, пригнічуючи в усіх інших напрямках [4]. Це зумовлює необхідність впровадження спрямованих радіоінтерфейсів. На рис. 1.7 показано цю зміну радіоінтерфейсу з всенаправленої передачі на спрямовану.

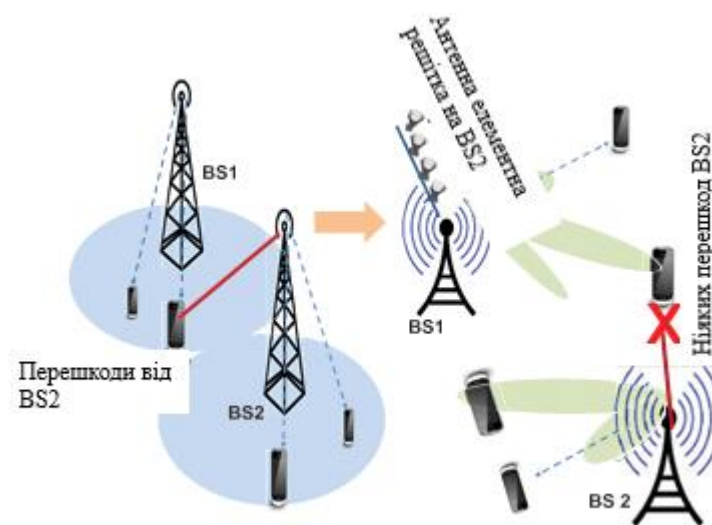


Рисунок 1.7 – Звичайні всеспрямовані антени та спрямовані антени з інтелектуальним формуванням променя[4].

Високоспрямовані діаграми спрямованості можуть бути забезпечені за допомогою методів адаптивного формування променя, що призвело до впровадження множинного доступу з просторовим розділенням (SDMA). Ефективний SDMA покращує повторне використання частоти для антен, що формують промінь, як у передавача, так і в приймача. Ми відкладаємо деталі підготовки антени, формування променя та SDMA до розділу III та розділу IV відповідно.

Однак апаратні проблеми, точніше, високе енергоспоживання компонентами змішаного сигналу можуть обмежити ці переваги. Можливо, неможливо підключити кожну антену до високошвидкісних аналого-цифрових (A/D) і цифро-аналогових (D/A) перетворювачів. Гібридна архітектура, що об'єднує аналогове та цифрове формування променя з оптимальними вагами формування променя, може забезпечити можливі рішення. Подробиці концепцій аналогового та цифрового формування променя обговорюються в [4]. Секторизація BS на кілька секторів також зменшує апаратні обмеження. Однак це створює додаткові проблеми в синхронізації та передачі даних, які необхідно вирішити. Оптимальна конфігурація антени для різних методів формування променя покращує продуктивність. Наприклад, рупорні антени на передавачі, патч-антени на приймачі та спеціальні антенні решітки у високих містах для вертикального керування променем дозволять забезпечити ефективний зв'язок. Велике розгортання базової станції та потреба в зв'язку LOS може бути полегшена за рахунок розділення висхідної та низхідної лінії зв'язку. Кілька вузлів можуть сприяти різним передачам для використання різних шляхів зв'язку в різних умовах каналу. Розуміння фундаментальних методів директивного радіоінтерфейсу разом із його досягненнями заклало б міцну основу для ефективного зв'язку 5G.

### 1.8.3 Розумна антена нового покоління

Успішне розгортання мереж 5G залежить на ефективну конструкцію антенної решітки. Це використовує переваги зміни радіоінтерфейсу. Для реалізації можливостей SDMA слід використовувати систему багатопроменевої інтелектуальної антенної решітки. Розумні антени допомагають зменшити перешкоди, зберігаючи оптимальну зону покриття та знижуючи потужність передачі як мобільного телефону, так і базової станції. Крім того, для того самого розміру фізичної апертури, більше енергії може передаватися на вищій частоті за допомогою вузьких

променів. Реалізація розумної антени дозволяє використовувати той самий канал різними променями [5]. Це зменшує одну з головних проблем безпроводового зв'язку: перешкоди в одному каналі. Використання антен, що формують промінь, із частковим коефіцієнтом навантаження ще більше зменшує проблему інтерференції в одному каналі. Застосування високоспрямованих пучків не обов'язково вимагає будь-якого дробового навантаження. Витрати на інфраструктуру та складні операції перешкоджають невибіркового використанню спрямованих антен. Однак навіть менш складні антени здатні забезпечити значний приріст пропускної здатності [5]. Тому розумна конструкція антени, оптимізована за посиленням спрямованості, вартістю та складністю, є дуже важливою для розвитку безпроводового зв'язку 5G (рис.1.8).

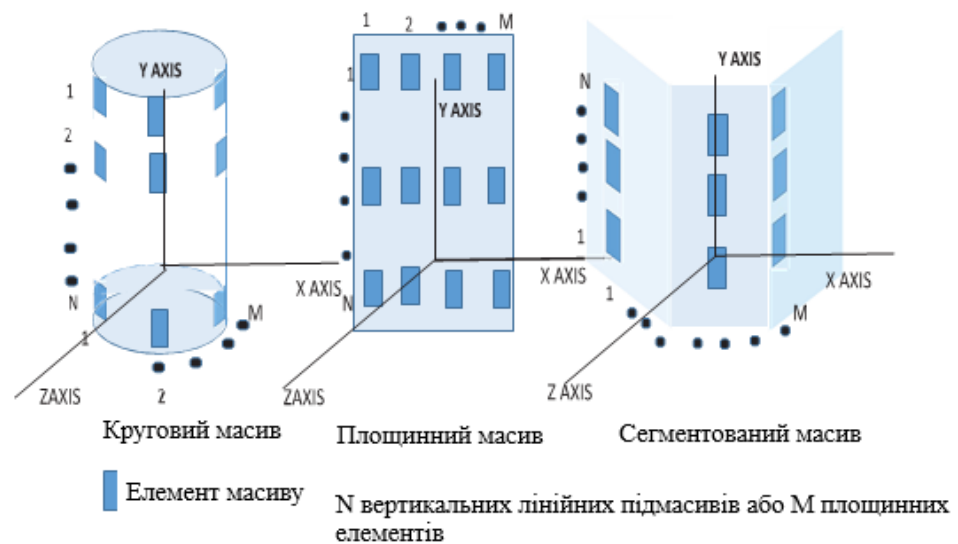


Рисунок 1.8 – Три основні конфігурації решітки для інтелектуальних антен [5].

Вертикальні планарні підматриці спрямовують пучки в горизонтальній площині шляхом зміни ваги, пов'язаної з елементами підматриці. Конфігурації підматриці мають вирішальне значення для керування променем. На рис. 8 показано три різні варіанти розміщення підматриці антени: (i) кругова, (ii) плоска та (iii) сегментована. Краще покриття кругового підматриця робить його більш придатним для безпроводового зв'язку. У той час як кривизна дозволяє керувати ширшим променем, лінійні конфігурації мають кращу спрямованість, але обмежений діапазон кутів сканування. Замість кругової або лінійної, прості сегментовані

конфігурації також можуть бути ретельно розроблені для досягнення необхідного рівня спрямованості та діапазону сканування. Як правило, рупорні антени мають більший коефіцієнт підсилення порівняно з іншими антенами. Решітка рупорних антен забезпечує високу вихідну потужність, необхідну для БС [5]. Простір, розмір і потужність є обмеженнями для мобільного пристрою. Отже, більш прості патч-антени є придатними кандидатами для пристроїв [5]. Загалом простір, а не розмір, обмежує розгортання складних розумних антен як на BS, так і на MS. Проте експерименти Samsung на частотах 28 ГГц із патч-антенами в популярному телефоні показали обнадійливі результати.

#### 1.8.4 Швидкість і стійкість завдяки розділенню площини—SDN

Зміни в архітектурі та радіоінтерфейсі роблять упор на невеликі комірки та збільшення кількості антен. Конфігурація та обслуговування багатьох серверів і маршрутизаторів у такому щільному розгортанні 5G є складним завданням. Software Design Network (SDN) пропонує спрощене рішення для цієї складної проблеми. SDN розглядає поділ між площиною управління та даних, що забезпечує швидкість і гнучкість у мережах 5G [5]. Рис.1.9 зображує поділ сигналів користувача та сигналів керування.

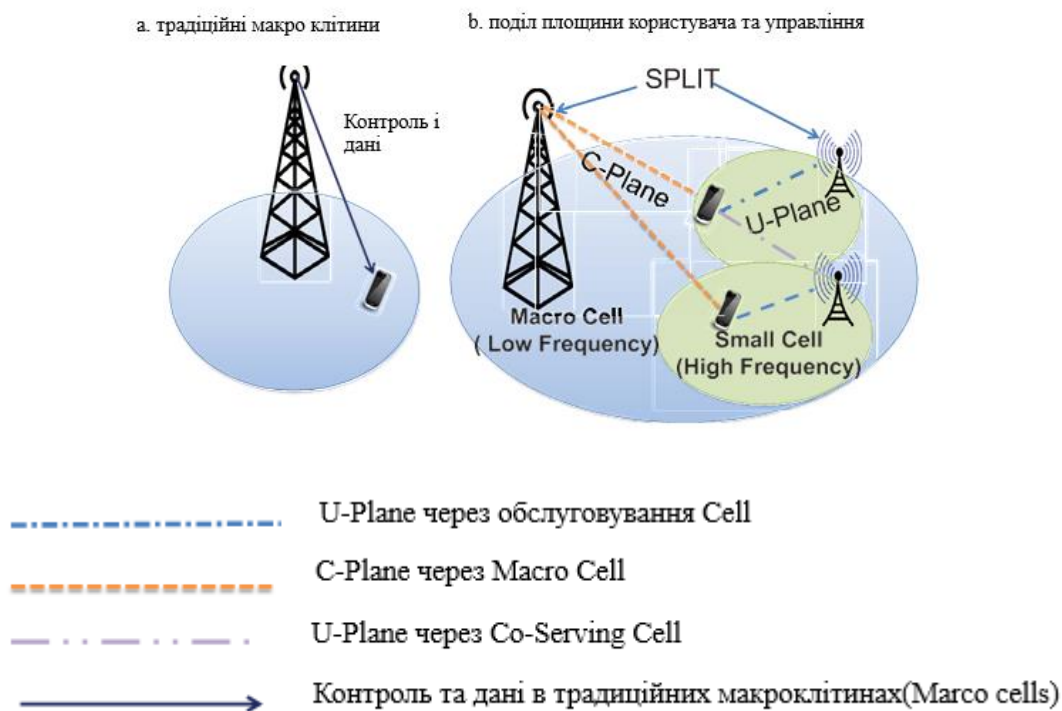


Рисунок 1.9 – Розділення площини керування та площини користувача[6,7].

Таким чином, збільшення потужності рівня користувача стає незалежним від ресурсів рівня керування. Це надає мережі 5G велику кількість даних у потрібних місцях без накладних витрат на площину керування. SDN роз'єднує площини даних і керування за допомогою програмних компонентів. Ці компоненти програмного забезпечення відповідають за керування площиною керування, тим самим зменшуючи апаратні обмеження [6.7]. Взаємодія між двома площинами досягається за допомогою відкритих інтерфейсів, таких як Open Flow. Це також полегшує перемикання між різними конфігураціями.

SDN може переходити через рівні OSI для реконструкції мереж для повного автоматизованого адміністрування. Надлишкові інтерфейси зменшуються контролерами, які призначають політику маршрутизаторам для функцій моніторингу. SDN, що застосовується до мереж радіодоступу (RAN), представляє себе як рішення SON. Алгоритми SON оптимізують RAN за допомогою координації контрольної площини при грубій гранулярності, залишаючи без впливу площину тонких гранульованих даних. Незважаючи на те, що SON забезпечує високі переваги, покращення в площині даних вимагає взаємодії кількох BS для передачі даних. Координована багатоточкова передача (CoMP) полегшує спільну передачу даних у дуже тонкому часовому масштабі. Cloud RAN також пропонує життєздатне рішення шляхом децентралізації площини даних. Дані та керуючі сигнали можна направляти через різні вузли, різний спектр і навіть різні технології для керування щільністю та різноманітністю мережі.

### 1.8.5 Централізована архітектура – хмараRAN

Мережа хмарного радіодоступу (C-RAN) вирішує деякі основні проблеми, пов'язані зі збільшенням вимог до високих швидкостей передачі даних [7]. Індустрія безпроводового зв'язку працює над заходами для підвищення пропускної здатності мережі шляхом додавання більшої кількості осередків, впровадження методів MIMO, створення складної структури HetNets і розгортання малих осередків. Однак перешкоди між осередками, CAPEX і Operating Expenditure (OPEX) перешкоджають цим зусиллям. C-RAN пропонує покращити архітектуру системи, мобільність, продуктивність покриття та енергоефективність, одночасно знижуючи вартість розгортання та експлуатації мережі [7]. C-RAN базується на централізації та віртуалізації. Ресурси базової смуги

об'єднуються в блоці базової смуги (BBU), розташованому у віддаленому центральному офісі (не на стільникових вузлах). У традиційних стільникових мережах Інтернет-протокол, багатопрокольна функціональність і Ethernet поширені аж до віддалених стільникових сайтів. На рис. 1.10 показано типову архітектуру C-RAN з BBU з багатьох віддалених сайтів, зосередженими у віртуальному пулі BBU

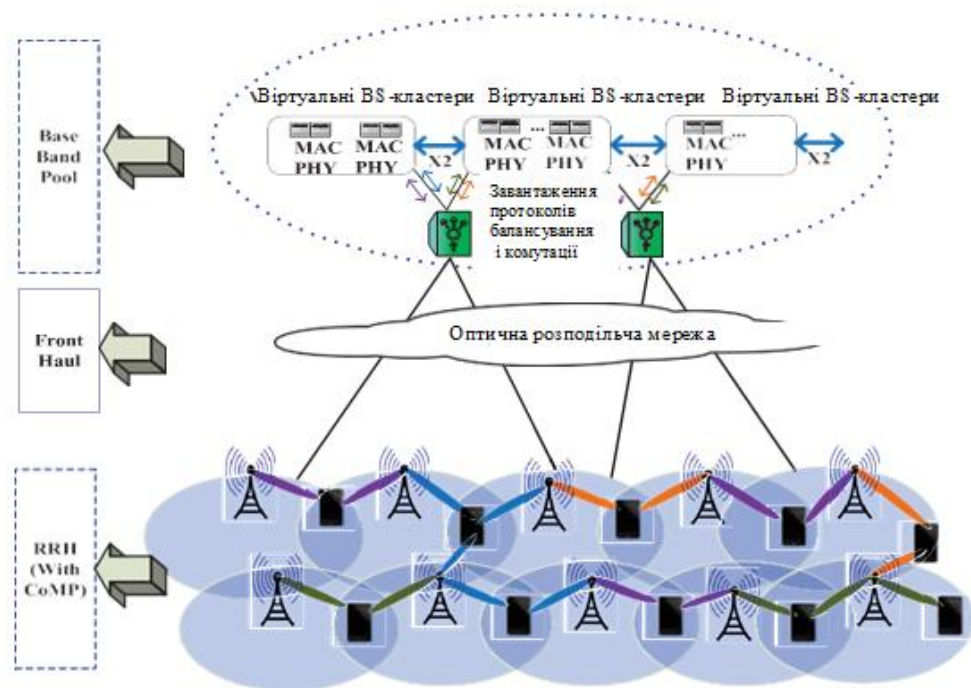


Рисунок 1.10 – Архітектура мережі хмарного радіодоступу (C-RAN) [8]

Це призводить до статистичного мультиплексування, енергоефективної роботи та економії ресурсів [8]. Віртуальні пули BBU додатково сприяють масштабованості, зниженню витрат, інтеграції різних сервісів і скороченню витрат часу на польові випробування [8]. Віддалені радіоголовки (RRH), що складаються з компонентів приймача, підсилювачів і дуплексерів, забезпечують цифрову обробку, аналого-цифрові перетворення, посилення потужності та фільтрацію. RRH підключаються до пулу BBU одномодовим волокном зі швидкістю передачі даних вище 1 Гбіт/с.

Ця спрощена архітектура BS прокладає шлях до щільного розгортання 5G, роблячи її доступною, гнучкою та ефективною. Потужні можливості хмарних обчислень можуть легко обробляти всі складні процеси керування. China Mobile рішуче підтримує C-RAN, оскільки він покращує основи для побудови мережі, роз-

гортання, структури витрат і гнучких послуг для кінцевих користувачів. Протокол спільного використання інфраструктури, запропонований Мохаммадом Баніказемі з IBM, забезпечує економічно ефективні рішення для щільного розгортання разом із зворотною сумісністю.

Завдяки перенесенню радіочастотного інтерфейсу на VBU радіочастоти генеруються в самому VBU. Передача здійснюється через спільне хмарне радіо по оптоволоконній інфраструктурі.

Це дозволяє використовувати аналогову радіочастоту, допомагаючи багатьом службам і операторам співіснувати без будь-яких істотних перешкод [8]. Крім того, SDN створює опції для плавного об'єднання хмарних програм із бездротовими мережами через програмовані інтерфейси. Останні дослідження запропонували віртуальні мережі на основі SDN із хмарою як основою. Розгортання малих клітинок іноді може бути складним, дорогим і обмеженим топологією сайту. Це робить мережу зворотного зв'язку для малих стільників критично важливою інфраструктурою.

Найбільш прийнятною є гетерогенна технологія транзитного зв'язку, яка об'єднує як фіксований широкосмуговий доступ, так і бездротовий транспортний зв'язок LOS. Таким чином, стандартизований інтерфейс необхідний для проектування та оптимізації RAN разом із мережею зворотного зв'язку.

Динамічна адаптація вузлів маршрутизації, запропонована Пітером Ростом з NEC Europe Laboratories, розглядає RAN як службу (RANas) для гнучкості централізації RAN. Концепція RANas пропонує централізовану хмарну платформу з функціями упаковки та доставки в залежності від фактичних вимог мережі. Обмеження пропускної спроможності та оптимізація системного рівня висхідної лінії зв'язку C-RAN вивчаються за практичних обмежень кінцевої пропускної здатності зворотного зв'язку в [8].

Стратегія ретрансляції стиснення та прямої передачі розглядається для передачі стиснутої версії отриманих сигналів від базових станцій до центрального процесора. Рівень шуму квантування, створюваного стисненням, вважається ключовим параметром у проектуванні транспортного зв'язку. Радіодоступ на основі хмарних обчислень заохочує спільний пул настроюваних ресурсів, що дозволяє мінімізувати зусилля щодо розгортання, управління та експлуатації.

### 1.8.6 Гетерогенний підхід – HetNets

Ще один спосіб впоратися з вибухом безпроводового трафіку, який очікується у зв'язку 5G, – це розгортання великої кількості малих комірок, що створює гетерогенні мережі (HetNets) [8]. HetNets, як правило, складаються з невеликих комірок, які мають низьку потужність передачі, окрім застарілих макрокомірок. Завдяки розгортанню малопотужних невеликих базових станцій пропускна здатність мережі покращується, а покриття розширюється до дірок покриття. Крім того, перекриття всіх малих, піко-, фемто-стільників з існуючими макро-сотами призводить до покращеного та ефективного повторного використання частот [8]. На рис. 1.11 показано концепцію HetNets. Розгортання HetNets вимагає скоординованої роботи між традиційними макросотами та малими клітинками для зменшення взаємних перешкод.

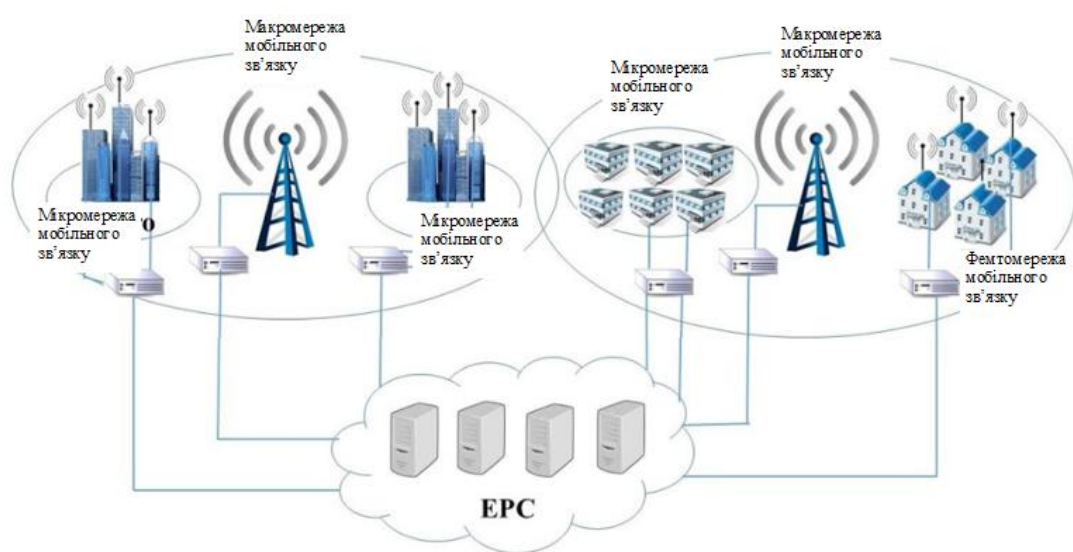


Рисунок 1.11 – Координаційні комірки в архітектурі HetNet [8]

Дослідники з Університету Манітоби, Канада, наголошують на багаторівневих мережах і покращенні перешкод для зв'язку 5G. Різні проблеми управління перешкодами в гібридних мережах 5G розглядаються в [8]. Взаємодія між макро-стільниками та осередками другого рівня в 5G HetNets вирішується за допомогою протоколу зворотного дуплексного зв'язку з розділенням часу (TDD) у [8]. Це полегшує локальну оцінку як внутрішньорівневих, так і міжрівневих каналів. У зворотному режимі TDD BS працює в низхідній лінії зв'язку, коли доступ до малих стільникових каналів (SCA) працює у висхідній лінії зв'язку, і навпаки.

Дослідники з Qualcomm Technologies Inc. і Samsung Mobile Solutions Lab наголошують на техніках керування перешкодами як у мережі, так і на пристрої [59]. Удосконалений приймач із можливостями використовувати переваги структури сигналів перешкод (включаючи сузір'я модуляції, схему кодування, розподіл каналів і ресурсів) вважаються ключовими драйверами. Невідповідна технологія радіодоступу (RAT) може створити непотрібні накладні сигнали. Щоб пом'якшити ці проблеми в мульти-RAT, в [8] запропоновано ефективні рішення щодо передачі даних RAT і оптимізований розподіл спільних ресурсів. Одночасне використання кількох RAT покращує пропускну здатність і підключення. Однак спільне використання кількох мереж не привернуло великої уваги дослідників. Інтелектуальне з'єднання між кількома RAT обіцяє подальше покращення потужності та покриття в HetNets. У [9] автори представляють різні схеми управління радіоресурсами для фемтосотових HetNets.

Міжрівневі та однорівневі перешкоди розглядаються, зберігаючи при цьому оптимізоване використання радіоресурсів, справедливість і QoS. Різні алгоритми планування частоти та методи повторного використання частоти покращують продуктивність HetNet [9]. Стратегії розподілу спектральних ресурсів також представляють потенціал вирішення проблеми перешкод. Кооперативні та розподілені алгоритми управління радіоресурсами для забезпечення випадкового розгортання HetNet обговорюються в [9].

Робота в [64] пропонує оптимізацію асоціації BS і пристроїв у низхідних HetNets за пропорційним критерієм справедливості. Загальна структура зелених HetNets для балансування енергоефективності та спектральної ефективності представлена в [65]. Дворівнева гетерогенна мережа, запропонована в [9], обіцяє покращену продуктивність мережі за рахунок спільного розміщення Massive MIMO BS і малопотужних SCA. У той час як масивний MIMO отримує звичайні переваги, забезпечуючи покриття мобільного зв'язку поза приміщеннями, SCA, оснащені когнітивними та кооперативними функціями, діють як головні драйвери пропускну здатності для користувачів з обмеженою мобільністю в приміщеннях і на вулиці.

Однак транспортний зв'язок є одним із основних вузьких місць у щільному розгортанні SCA. На відміну від застарілої дротової транзитної мережі, SCA, ймовірно, будуть підключені через ненадійну бездротову інфраструктуру транзитної мережі. Очікується, що характеристики частоти помилок, затримки, потуж-

ності та вартості розгортання відрізнятимуться від випадку до випадку. Таким чином, бездротові канали зворотного зв'язку забезпечують життєздатну та економічну альтернативу.

Для спрощеного розгортання, експлуатації, управління та цілодобової оптимізації HetNets у [9] пропонується хмарна платформа. Крім того, інтелектуальна передача обслуговування та керування розташуванням на основі хмари можуть забезпечити безперебійне підключення в HetNets. Таким чином, ми вважаємо, що неоднорідне підключення малих клітинок є основним будівельним блоком нової архітектури 5G. Спрямованість і конструкція малих комірок разом із прогресом у розподілі ресурсів є перспективними для вищого покриття та швидкості передачі даних зв'язку 5G. У таблиці 1.1 підсумовано основні роботи, пов'язані з архітектурою мережі 5G.

Таблиця 1.1 – Виконані пов'язані роботи в архітектурі мережі 5G

Робоча зона	Ключові моменти
Еволюція радіо-мережі	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Щільне розгортання декількох BS</li> <li>2. Обмежене проникнення мм-хвилі</li> <li>3. Зв'язок LOS/NLOS</li> <li>4. Автономна мм-хвиля/гібридна зі застарілою мережею.</li> </ol>
Розширений повітряний інтерфейс	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Електромагнітні хвилі, керовані антенним масивом</li> <li>2. Спрямоване випромінювання</li> <li>3. Проблеми з апаратним забезпеченням Beamforming</li> <li>4. Формування променя в аналоговому та цифровому домені</li> </ol>
Розумна антена наступного покоління	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вузкий промінь та можливості SDMA</li> <li>2. Круговий/планувальний/сегментований підмасив</li> <li>3. Застосування спеціального типу антени</li> </ol>
Розщеплення площини - SDN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Різні дані та площини управління</li> <li>2. Мережі проектування п.з. та відкритий потік</li> <li>3. SON для оптимізації RAN</li> <li>4. CoMP</li> </ol>

Продовження табл.1.1

Робоча зона	Ключові моменти
Централізована архітектура C-RAN	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Централізована платформа</li> <li>2. Блок базової смуги/голова радіоприймача</li> <li>3. RAN як послуга</li> <li>4. Зворотній та передній</li> </ol>
Гетерогенний підхід – HETNets.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Маленькі комірки з різною потужністю передачі</li> <li>2. Скоординована операція</li> <li>3. Втручання різноманітних клітин.</li> </ol>

Таким чином пов'язані роботи в архітектурі мережі 5G сприяють ефективному плануванню та оптимізації мережі.

## 2 МЕТОДИ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЧАСТОТНИХ КЛАСТЕРІВ

### 2.1 Загальна геометрична модель використання частотних кластерів

У зв'язку з тим, що в мережах мобільного зв'язку 5G враховано модель з м'яким розподіленням частотного ресурсу, в роботі запропоновано геометричну модель, щодо визначення відстаней між мобільним користувачем і базовою станцією, що повторює радіочастотний ресурс (рис.2.1).

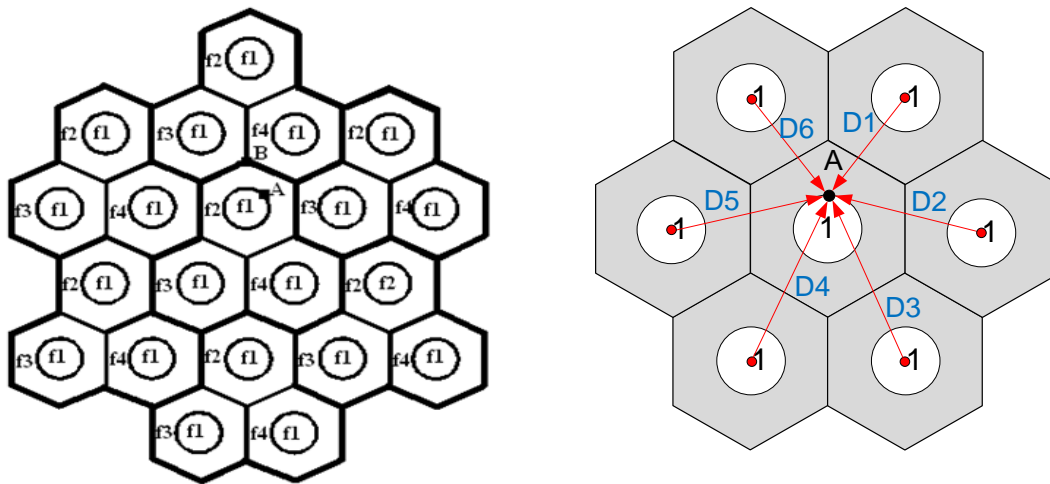


Рисунок 2.1 – Модель з м'яким розподіленням частотного ресурсу

Головною особливістю запропонованої геометричної моделі є те що частоти мобільних користувачів, які є наближеними до базової станції (ближні абоненти) зазначають вплив від базових станцій інших сусідніх комірок, де використовується частота  $F1$  (рис.2.1a). Характерною точкою для окреслення заводої ситуації є точка А. Для віддалени абонентів, які обслуговуються на межах макростільника, електромагнітний вплив завод визначається з боку інших комірок інших кластерів, де характерною точкою для мобільного користувача є точка В.

Методика розрахунку полягає у визначенні інтервалу захисної відстані  $D$  між потенційним розташуванням мобільного користувача (точка А або В) і подальшого знаходження відсотку невиконання відношення сигнал/(завада+шум) для певної моделі та розмірності частотного кластеру.

На основі математичного моделювання в пакеті Matlab проведемо розрахунок показника якості, а саме відсотка невиконання сигнал/(завада+шум) для 3-х моделей територіальних планів, з різними конфігураціями співвідношення зон покриття для ближніх та віддалених мобільних користувачів:

$$P(C) = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty e^{-\frac{x^2}{2}} dt \right] 100\% , \quad (2.1)$$

яке визначає відсоток часу  $P(C)$ , протягом якого відношення сигнал/взаємна перешкода  $\rho_0$  на вході приймача буде менше допустимого значення. Інтеграл (2.1) є табулірованою  $Q$  – функцією.

Нижня межа інтегрування в (2.1) визначається співвідношенням:

$$X = \frac{10 \lg \frac{1}{\beta_M} - \rho_0}{\alpha_p} , \quad (2.2)$$

де  $\rho_0$  - мінімально допустима величина відношення сигнал/взаємна перешкода, дБ;

$\beta_M$  - визначається виразом:

$$\beta_M = \sum_{i=1}^M \beta_i \exp\left(\frac{\gamma^2(\alpha^2 - \alpha_M^2)}{2}\right) , \quad (2.3)$$

В свою чергу, значення  $\alpha_p$  та  $\alpha_M$  визначаються формулами:

$$\alpha_p = \sqrt{\alpha^2 + \alpha_M^2} ,$$

$$\alpha_M^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left[ 1 + \left( e^{\gamma^2 \alpha^2} - 1 \right) \frac{\sum_{i=1}^M \beta_i^2}{\sum_{i=1}^M \beta_i} \right] , \quad (2.4)$$

де  $\alpha$  - параметр, що визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня сигналу в точці прийому (для стільникових систем  $\alpha = 6...12$  дБ), за технічним завданням  $\alpha = 9$  дБ;

$$\gamma = 0,1 \ln_{10} = 0,23.$$

Значення  $\beta_M$  і  $M$  залежать від виду діаграм спрямованості антен (ДСА), використовуваних на БС (кругова або секторна).

При використанні антен з круговою ДСА ( $\varphi=360$ ) і секторними ДСА ( $\varphi=120$  і  $\varphi=60$ ) значення  $M$  складають 6, 2 і 1 відповідно. Величина  $M$  визначає собою кількість базових станцій що «заважають», розташованих у сусідніх кластерах, а  $\beta_i$  - величину, зворотну відношенню потужності сигналу до потужності перешкод,

створюваних і-ою станцією що «заважає».

Значення  $\beta_i$  визначаються співвідношенням:

$$\beta_i = \left( \frac{D_{AC-BC_i}}{R} \right)^{-k} = \left( \frac{D_i}{R} \right)^{-k}. \quad (2.9)$$

Отримані значення  $\beta_i$  використовуються для визначення  $\beta_M$ ,  $\alpha_M$  та середнього значення відношення сигнал/завада на вході приймача АС:

$$\left( \frac{P_C}{P_{ВП}} \right) \text{дБ} = \bar{\rho} = 10 \lg \left( \frac{1}{\beta_M} \right). \quad (2.10)$$

Величина нижньої межі інтегрування у виразі (1) визначається співвідношенням:

$$X = \frac{\bar{\rho} - \rho_0}{\alpha_p}. \quad (2.11)$$

Знаючи величину  $X$ , по таблиці значень Q-функцій знаходимо відсоток часу, протягом якого відношення сигнал/перешкода на вхід приймача мобільної станції при обраній розмірності кластера  $C$  буде нижче припустимої величини  $\rho_0$ . Якщо виконується нерівність  $P(C) \leq P_t$ , то отримане значення частотного параметра  $C$  задовольняє заданим вимогам.

Якщо ж  $P(C) > P_t$ , то необхідно шукати нове значення розмірності кластера.

2.2 Розрахунок параметрів моделей територіальних планів частотних кластерів з м'яким розподіленням частотного ресурсу.

На рис.2.2 представлені територіальні моделі визначення захисних відстаней  $D_1, \dots, D_6$  для точки А при  $r=R/2$ .

$$D_1 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \frac{6R^2}{4}} \sqrt{\frac{7R^2}{4}} = \frac{1}{2}R,$$

$$\text{де } a = \frac{R\sqrt{3}}{2}.$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{5R}{2}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{5\left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \frac{R}{2}\sqrt{15},$$

$$\text{де } a = \frac{R\sqrt{3}}{2} \text{ 2-тому, що висота } = 2a.$$

$$D_3 = \sqrt{\left(\frac{R}{4} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 + 4R^2 + 2R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{10R^2}{4}} = R \sqrt{\frac{10}{4}} = \frac{R}{2} * \sqrt{10}.$$

$$D_4 = \sqrt{\left(\frac{R}{4} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 + 4R^2 + 2R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{10R^2}{4}} = R \sqrt{\frac{10}{4}}$$

$$= \frac{R}{2} * \sqrt{10}.$$

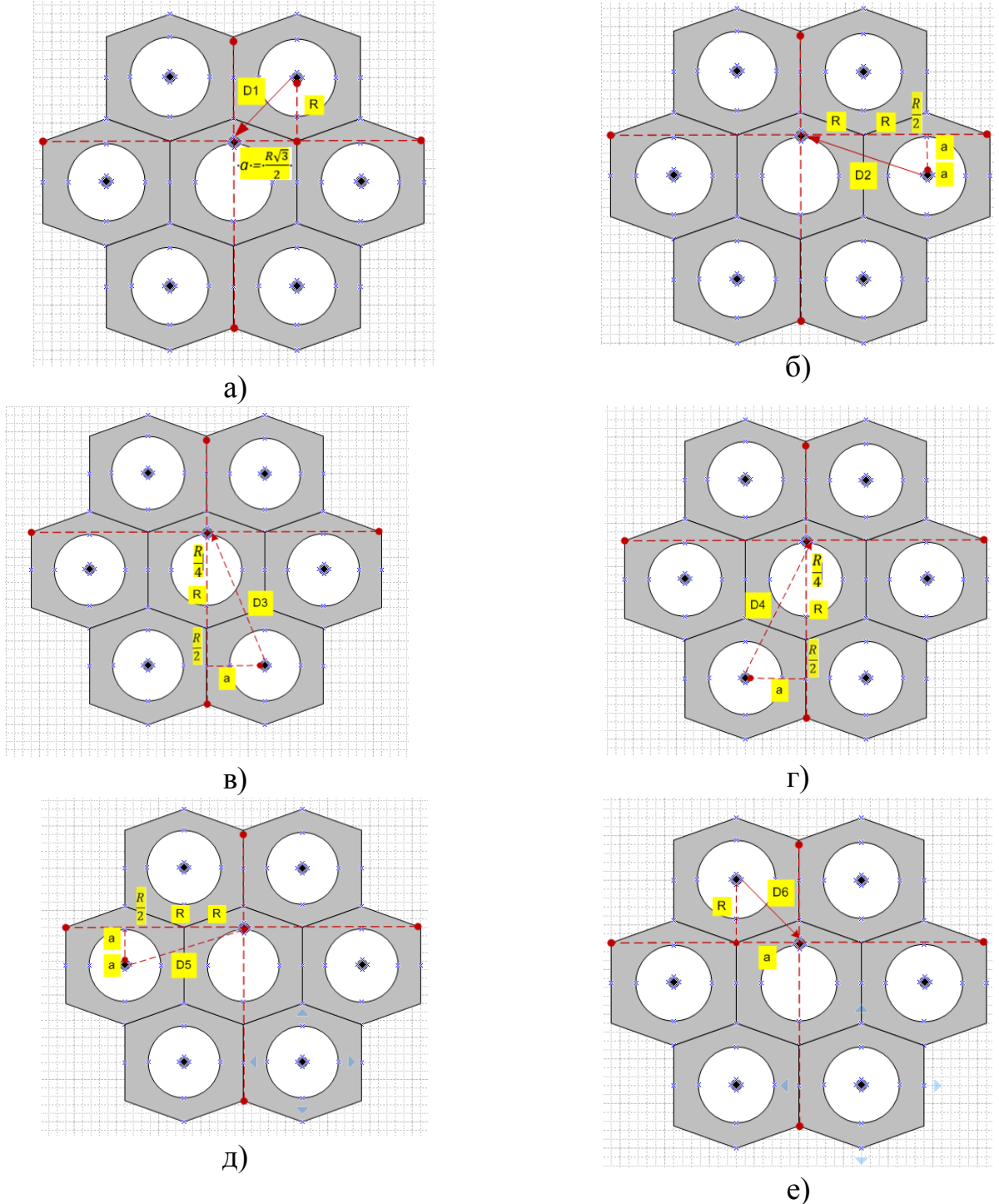


Рисунок 2.2 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=R/2$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{5R}{2}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{5\left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \frac{R}{2}\sqrt{15}.$$

$$D_6 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{7R^2}{4}} = \frac{1}{2}R\sqrt{7}.$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1... \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = 3.2 * 10^{-3} = 0.0032.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{\frac{R}{2}\sqrt{15}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{15}\right)^{-4} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{15}\right)^{-4} = 7.1 * 10^{-2} = 0.071.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left(\frac{R}{2} * \sqrt{10}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2} * \sqrt{10}\right)^{-4} = 1.6 * 10^{-2} = 0.016.$$

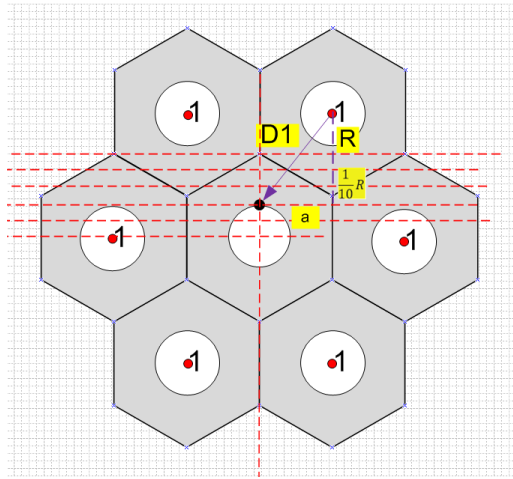
$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left(\frac{R}{2} * \sqrt{10}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2} * \sqrt{10}\right)^{-4} = 1.6 * 10^{-2} = 0.016.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left(\frac{R}{2}\sqrt{15}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{15}\right)^{-4} = 7.1 * 10^{-2} = 0.071.$$

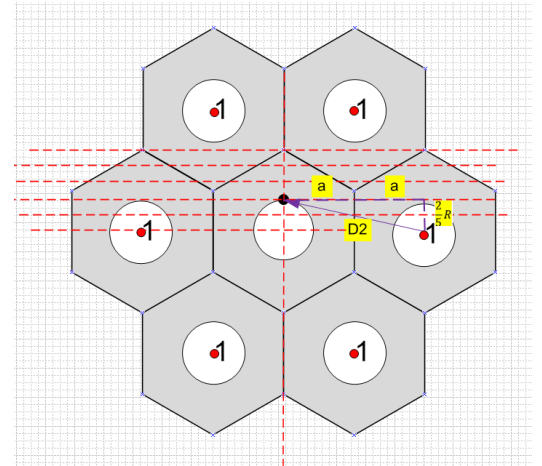
$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left(\frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = 3.2 * 10^{-3} = 0.0032.$$

На рис.2.3 представлені територіальні моделі визначення захисних відстаней  $D_1, \dots, D_6$  для точки А при  $r=2/5R$ .

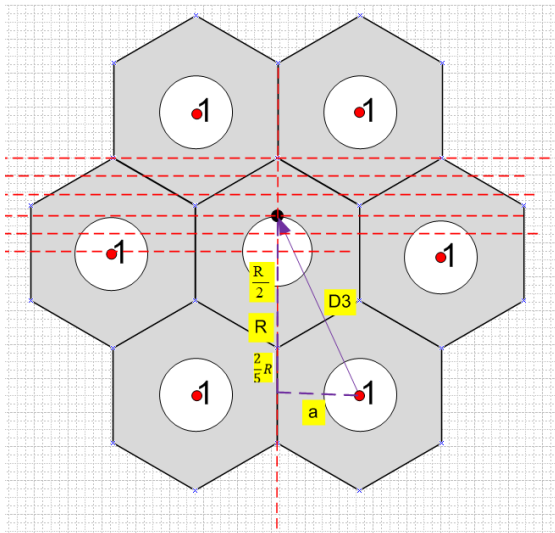
$$\begin{aligned} \sqrt{\left(R + \frac{R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} &= \sqrt{\left(\frac{11R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{121R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{121R^2 + 75R^2}{100}} = R \sqrt{\frac{196}{100}}. \end{aligned}$$



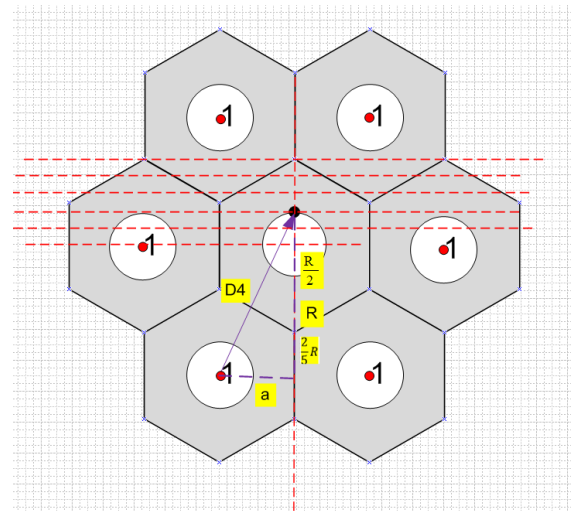
а)



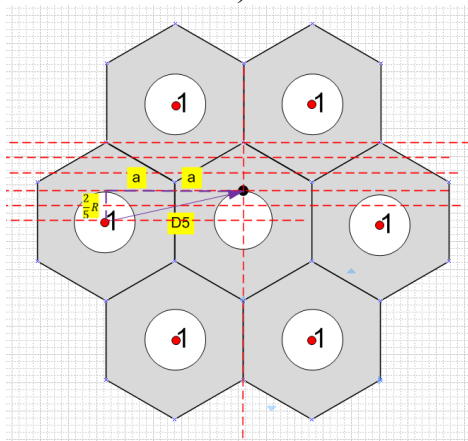
б)



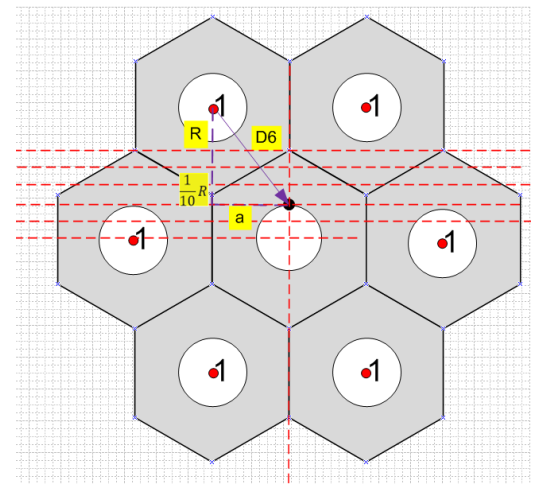
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.3 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней точки А при  $r=2/5R$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{2}{5}R\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{25} + 3R^2} = \sqrt{\frac{82R^2}{25}} = R\sqrt{\frac{82}{25}}$$

$$\begin{aligned} D_1 = D_3 &= \sqrt{\left(\frac{2}{5}R + R + \frac{1}{2}R\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 10R + 5R}{10}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{361R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{436R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{436}{100}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_4 &= \sqrt{\left(\frac{2}{5}R + R + \frac{1}{2}R\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 10R + 5R}{10}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{361R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{436R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{436}{100}} \end{aligned}$$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{2}{5}R\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{25} + 3R^2} = \sqrt{\frac{82R^2}{25}} = R\sqrt{\frac{82}{25}}$$

$$\begin{aligned} D_6 &= \sqrt{\left(R + \frac{R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{11R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{121R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{121R^2 + 75R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{196}{100}} \end{aligned}$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1.. \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{196}{100}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{196}{100}}\right)^{-4} = 2.6 * 10^{-2} = 0.02632.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{82}{25}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{82}{25}}\right)^{-4} = \left(\sqrt{\frac{82}{25}}\right)^{-4} = 9.6 * 10^{-2} = 0.09651.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{436}{100}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{436}{100}} \right)^{-4} = 5.2 * 10^{-2} = 0.052605.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{196}{100}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{196}{100}} \right)^{-4} = 2.6 * 10^{-2} = 0.02632.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{82}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{82}{25}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{82}{25}} \right)^{-4} = 9.6 * 10^{-2} = 0.09651.$$

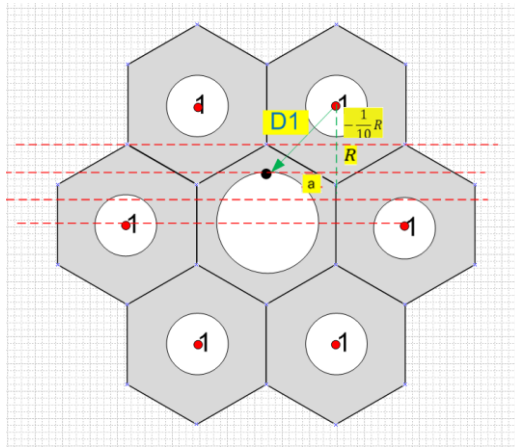
$$\beta_6 = \left( \frac{R\sqrt{\frac{196}{100}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{196}{100}} \right)^{-4} = 2.6 * 10^{-2} = 0.0263.$$

На рис.2.4 представлені територіальні моделі визначення захисних відстаней  $D_1, \dots, D_6$  для точки А при  $r=2/3R$ .

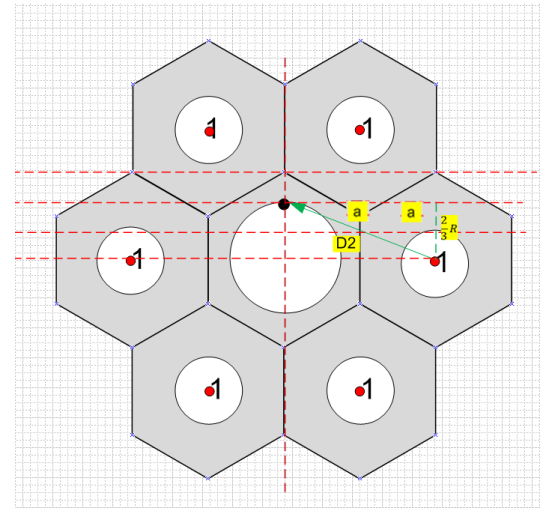
$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{\left(R - \frac{1R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{9R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{81R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{81R^2 + 75R^2}{100}} = \sqrt{\frac{156R^2}{100}} = R \sqrt{\frac{156}{100}}. \end{aligned}$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{9} + 3R^2} = \sqrt{\frac{31R^2}{9}} = R \sqrt{\frac{31}{9}}.$$

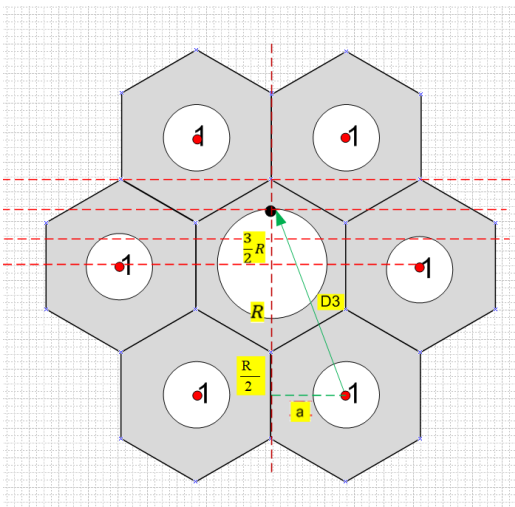
$$D_3 = \sqrt{\left(\frac{3R}{2}\right)^2 + R + \left(\frac{1R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{9R^2}{4} + R^2 + \frac{R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{17R^2}{4}} = R \sqrt{\frac{17}{4}}.$$



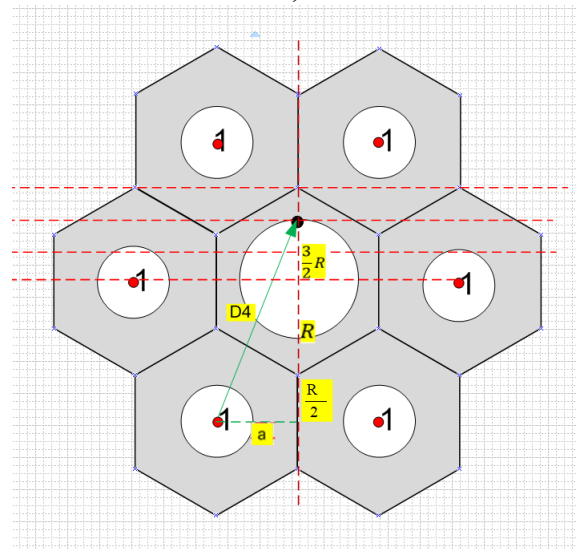
а)



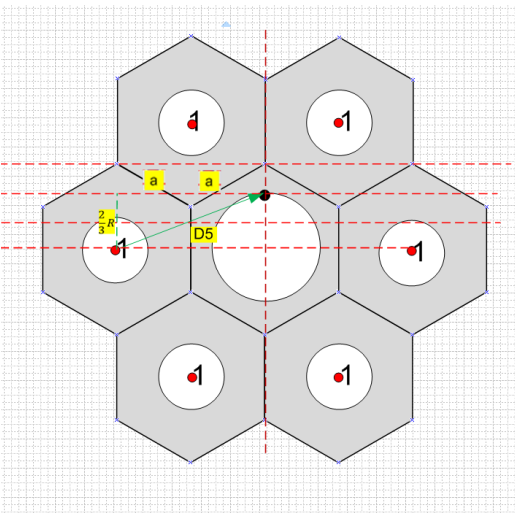
б)



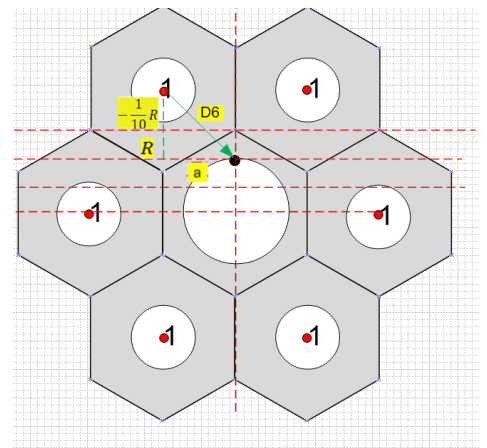
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.4 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней точки А при  $r=2/3R/$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_4 = \sqrt{\left(\frac{3R}{2}\right)^2 + R + \left(\frac{1R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{9R^2}{4} + R^2 + \frac{R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{17R^2}{4}} = R \sqrt{\frac{17}{4}}$$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{9} + 3R^2} = \sqrt{\frac{31R^2}{9}} = R \sqrt{\frac{31}{9}}$$

$$\begin{aligned} D_6 &= \sqrt{\left(R - \frac{1R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{9R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{81R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{81R^2 + 75R^2}{100}} = \sqrt{\frac{156R^2}{100}} = R \sqrt{\frac{156}{100}} \end{aligned}$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1... \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{156}{100}}}{R}\right)^{-K} = \left(R\sqrt{\frac{156}{100}}\right)^{-4} = 4.1 * 10^{-2} = 0.04109.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{31}{9}}}{R}\right)^{-K} = \left(R\sqrt{\frac{31}{9}}\right)^{-4} = \left(R\sqrt{\frac{31}{9}}\right)^{-4} = 8.4 * 10^{-3} = 0.008428.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{17}{4}}}{R}\right)^{-K} = \left(R\sqrt{\frac{17}{4}}\right)^{-4} = 5.5 * 10^{-3} = 0.005536.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{17}{4}}}{R}\right)^{-K} = \left(R\sqrt{\frac{17}{4}}\right)^{-4} = 5.5 * 10^{-3} = 0.005536.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{R \sqrt{\frac{31}{9}}}{R} \right)^{-K} = \left( R \sqrt{\frac{31}{9}} \right)^{-K} = \left( R \sqrt{\frac{31}{9}} \right)^{-4} = 8.4 * 10^{-3} = 0.008428.$$

$$\beta_6 = \left( \frac{R \sqrt{\frac{156}{100}}}{R} \right)^{-K} = \left( R \sqrt{\frac{156}{100}} \right)^{-4} = 4.1 * 10^{-2} = 0.04109.$$

Проведемо аналогічний аналіз для мобільних корситувачів на межах комірок, де характерною ознакою впливу вважатиметься точка В (рис.2.5).

$$D_1 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{28R^2}{4}} = \sqrt{7}R.$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{R}{2} + R + R\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R + 4R + 4R}{4}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{36R^2}{4}} = 3R.$$

$$D_3 = 4R.$$

$$D_4 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 R + R + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R + 4R + 4R}{4}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{36R^2}{4}} = 3R.$$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{28R^2}{4}} = \sqrt{7}R.$$

$$D_6 = 2R.$$

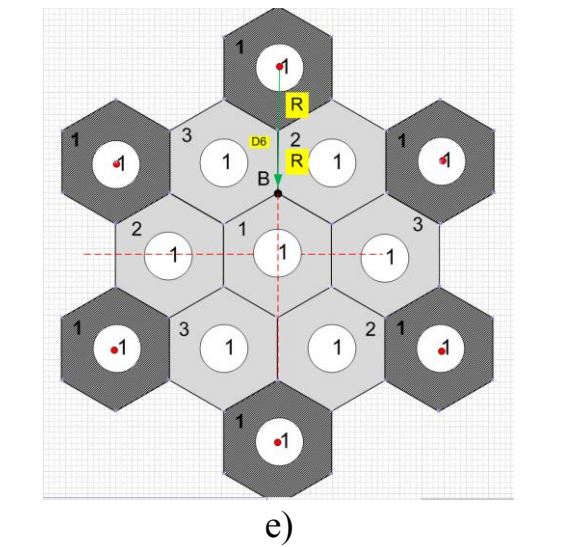
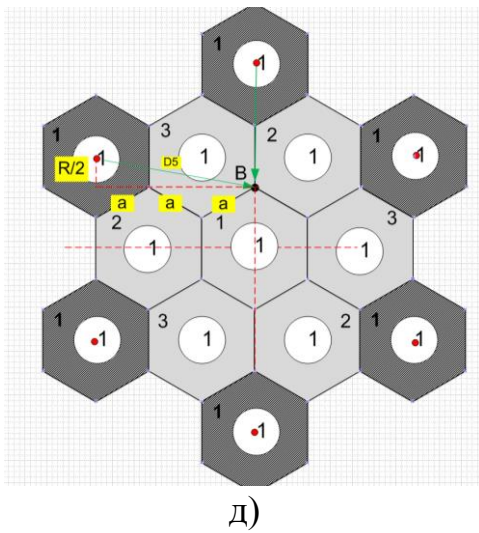
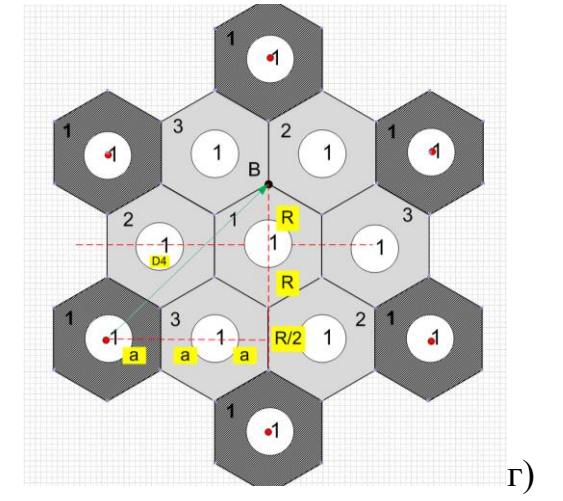
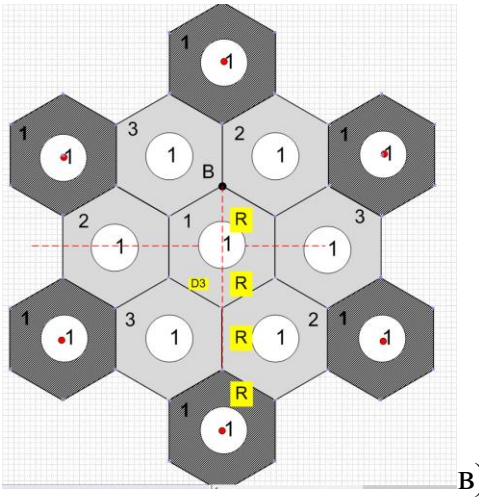
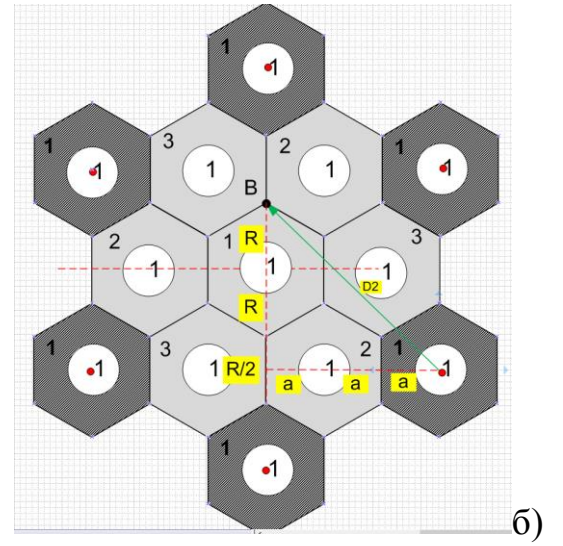
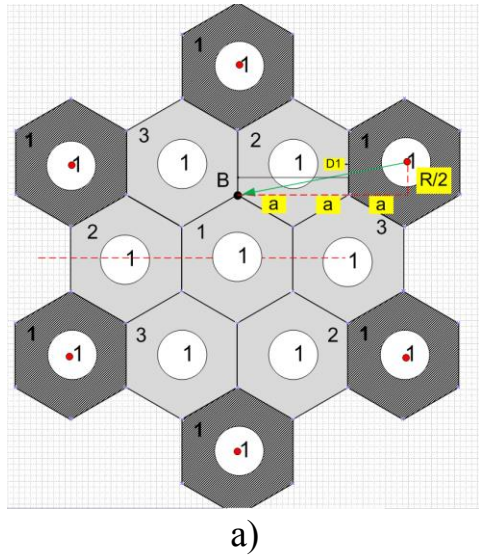


Рисунок 2.5 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки В

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1.. \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left( \frac{\sqrt{7}R}{R} \right)^{-K} = (\sqrt{7})^{-4} = 0.0204.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left( \frac{3R}{R} \right)^{-K} = (3R)^{-K} = (3R)^{-4} = 0.0123.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left( \frac{4R}{R} \right)^{-K} = (4)^{-4} = 0.003906.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left( \frac{3R}{R} \right)^{-K} = (3R)^{-K} = (3R)^{-4} = 0.0123.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{\sqrt{7}R}{R} \right)^{-K} = (\sqrt{7})^{-4} = 0.0204.$$

$$\beta_6 = \left( \frac{2R}{R} \right)^{-K} = (2)^{-4} = 0.0625.$$

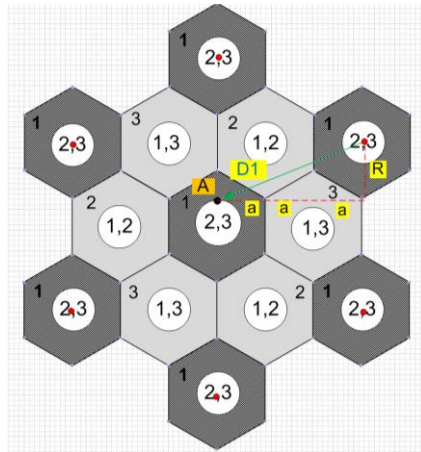
2.3 Розрахунок параметрів моделей територіальних планів частотних кластерів з дробовим розподіленням частотного ресурсу.

Проведемо аналогічний аналіз для точки А при  $r=R/2$  (рис.2.6).

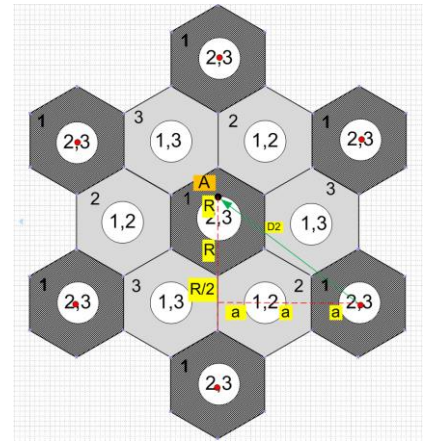
$$D_1 = \sqrt{R + \left(3 \frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R}{4} + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{31R^2}{4}} = R \sqrt{\frac{31}{4}}.$$

$$D_2 = \sqrt{R + R + \left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(3 \frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R + 4R + 4R}{4}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{36R^2}{4}} = 3R.$$

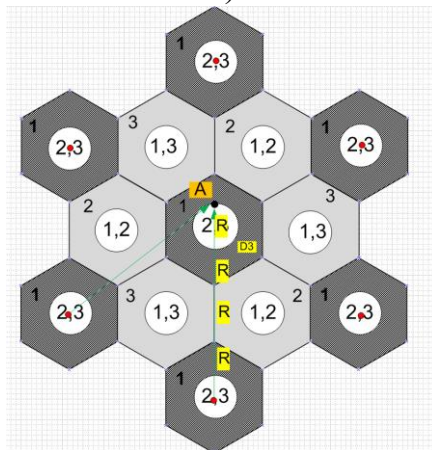
$$D_3 = \sqrt{R + R + R + \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R + 4R + 4R + 4R}{4}} = \sqrt{\frac{16R}{4}} = 2R.$$



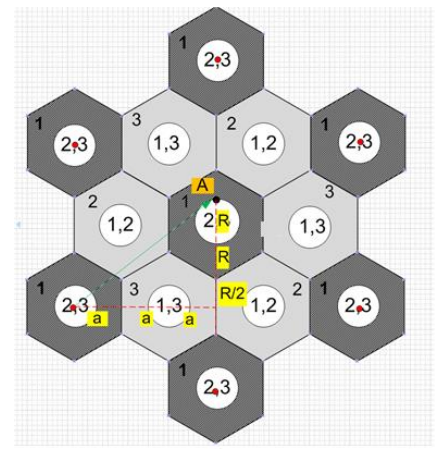
а)



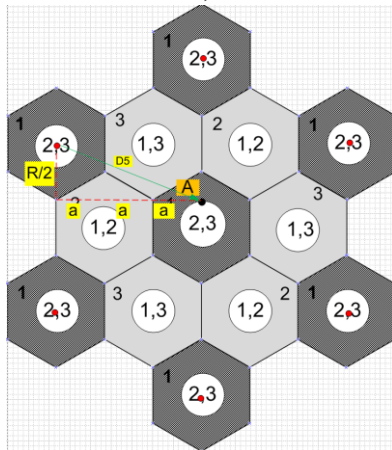
б)



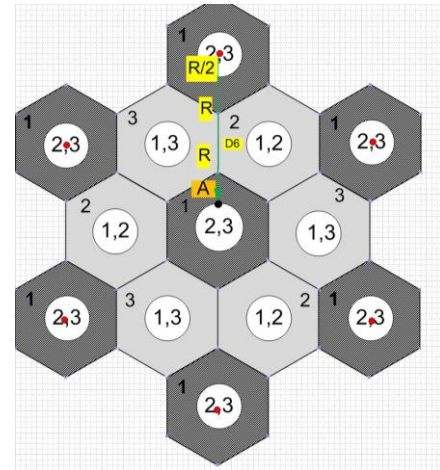
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.6 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=R/2$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_4 = \sqrt{R + R + \left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R + 4R + 4R}{4}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{36R^2}{4}} = 3R.$$

$$D_5 = \sqrt{R + \left(3 \frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R}{4} + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{31R^2}{4}} = R \sqrt{\frac{31}{4}}.$$

$$D_6 = \sqrt{R + R + R + \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R + 4R + 4R + 4R}{4}} = \sqrt{\frac{16R}{4}} = 2R.$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1.. \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{R \sqrt{\frac{31}{4}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{31}{4}}\right)^{-4} = 1.6 * 10^{-3} = 0.01664.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{3R}{R}\right)^{-K} = (3)^{-K} = (3)^{-4} = 1.234 * 10^{-2} = 0.01234.$$

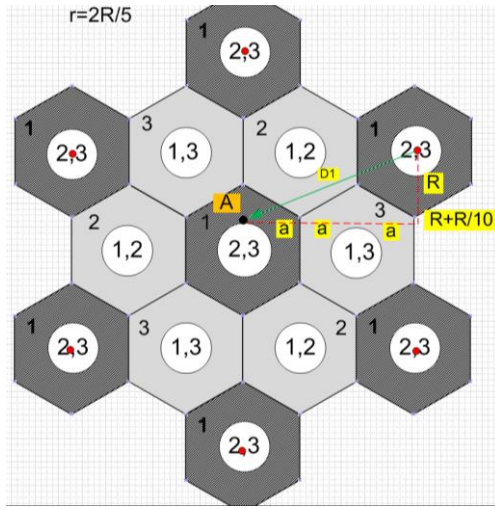
$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left(\frac{2R}{R}\right)^{-K} = (2)^{-4} = 2 * 10^{-2} = 0.0625.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left(\frac{3R}{R}\right)^{-K} = (3)^{-K} = (3)^{-4} = 1.234 * 10^{-2} = 0.01234.$$

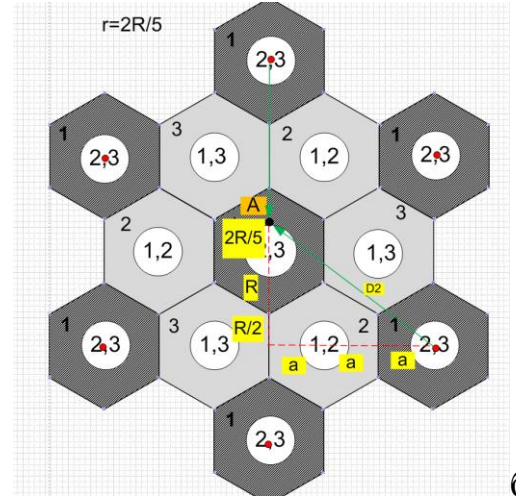
$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left(\frac{R \sqrt{\frac{31}{4}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{31}{4}}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{31}{4}}\right)^{-4} = 1.6 * 10^{-3} = 0.01664.$$

$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left(\frac{2R}{R}\right)^{-K} = (2)^{-4} = 2 * 10^{-2} = 0.062.$$

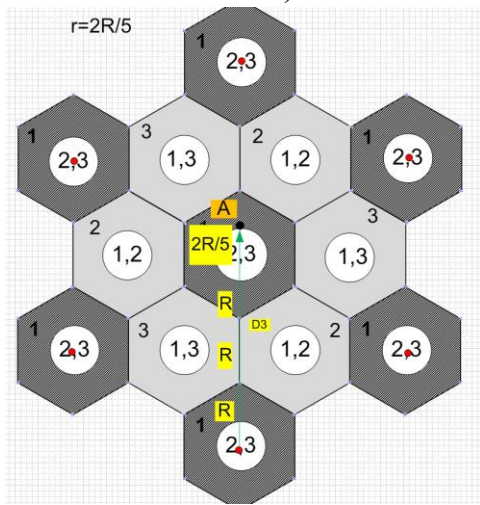
Проведемо аналогічний аналіз для точки А при  $r=2R/5$  (рис.2.7).



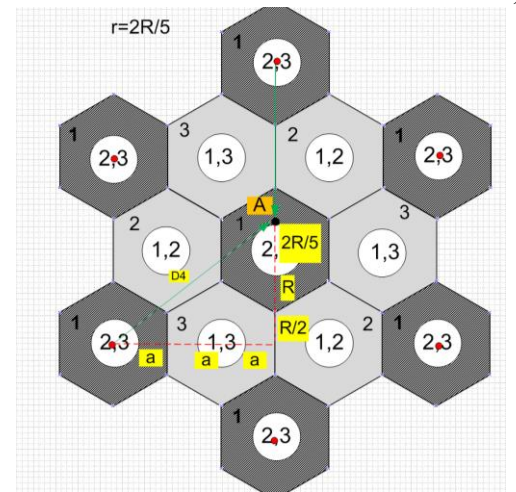
a)



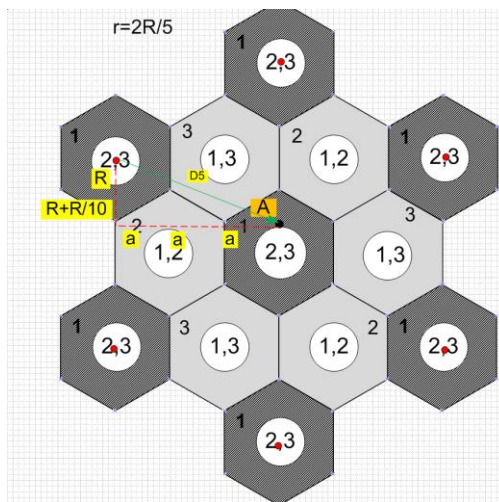
б)



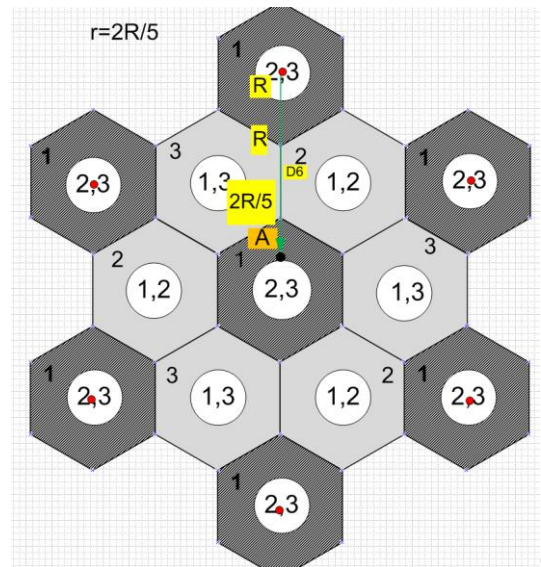
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.7 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r = 2R/5$

a)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_1 = \sqrt{\left(R + \frac{R}{10}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{11R}{10}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{121R^2 + 270R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{391}{100}}$$

$$\begin{aligned} D_2 &= \sqrt{\left(R + R + \frac{2R}{5}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{5R + 5R + 2R}{25}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{25R + 25R + 4R^2}{100} + \frac{270R^2}{4}} = \sqrt{\frac{324R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{81}{25}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_3 &= \sqrt{\left(R + R + R + \frac{2R}{5}\right)^2} = \sqrt{9R^2 + \frac{4R^2}{25}} = \sqrt{\frac{25 * 9R^2 + 4R^2}{25}} = \sqrt{\frac{175R^2 + 4R^2}{25}} \\ &= \sqrt{\frac{179R^2}{25}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_4 &= \sqrt{\left(R + R + \frac{2R}{5}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{25R + 25R + 10R}{25}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{25R + 25R + 4R^2}{100} + \frac{270R^2}{4}} = \sqrt{\frac{324R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{81}{25}} \end{aligned}$$

$$D_5 = \sqrt{\left(R + \frac{R}{10}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{11R}{10}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{121R^2 + 270R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{391}{100}}$$

$$D_6 = \sqrt{\left(R + R + \frac{2R}{5}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{1} + \frac{4R^2}{25}} = \sqrt{\frac{100R^2 + 4R^2}{25}} = R\sqrt{\frac{104}{25}}$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1... \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{391}{100}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{391}{100}}\right)^{-4} = 0.0654.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{81}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{81}{25}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{81}{25}} \right)^{-4} = 0.0952.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left( \frac{\sqrt{\frac{9R^2}{4}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{9}{4}} \right)^{-4} = 0.1975.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left( \frac{\sqrt{\frac{179R}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{9R}{4}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{9}{4}} \right)^{-4} = 0.1975.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{391}{100}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{391}{100}} \right)^{-4} = 0.0654.$$

$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{104}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{104}{25}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{104}{25}} \right)^{-4} = 0.0577.$$

Проведемо аналогічний аналіз для точки А при  $r=2R/3$  (рис.2.8).

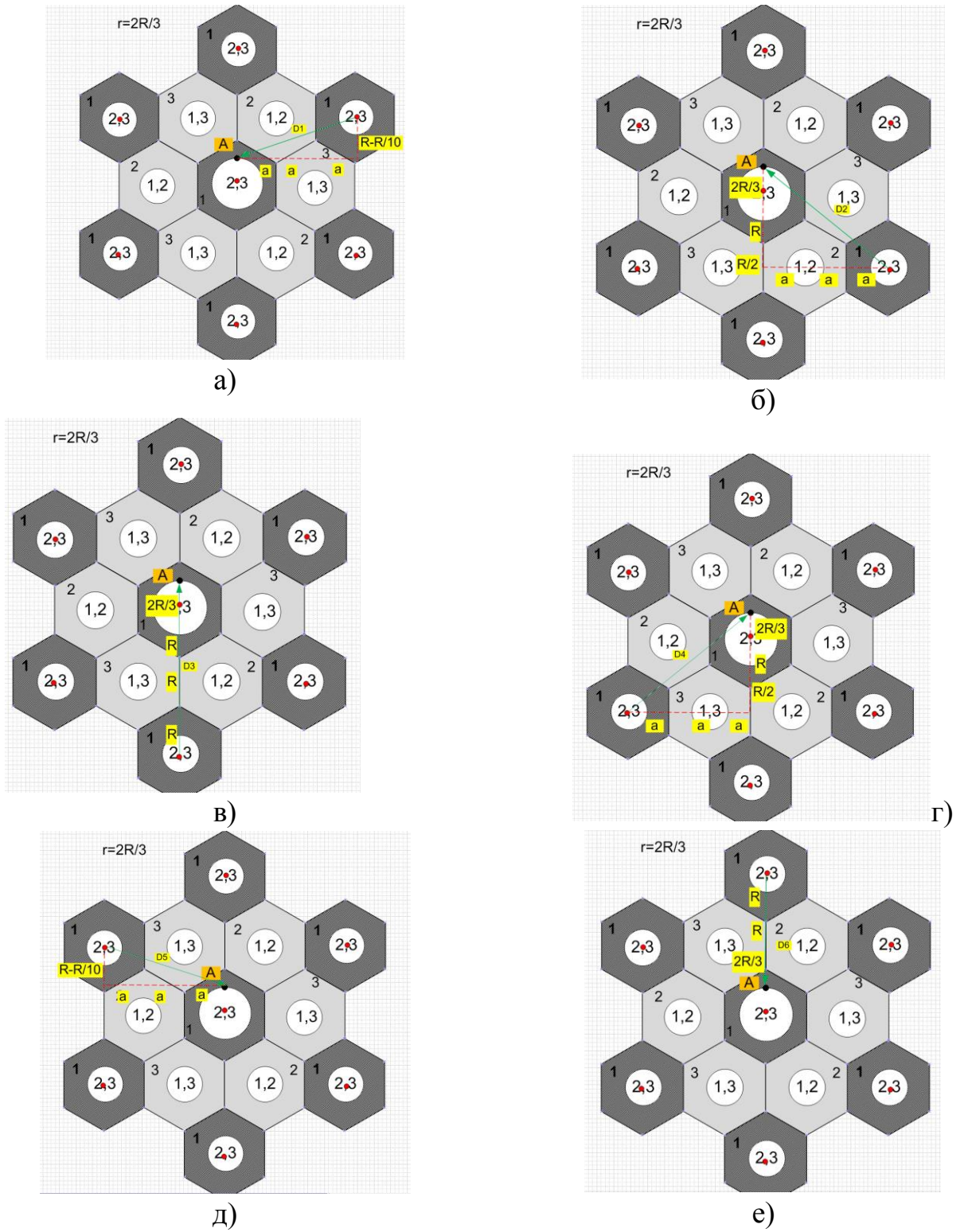


Рисунок 2.8 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=2R/3$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_1 = \sqrt{\left(R - \frac{R}{10}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{9R}{10}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{81R^2}{100} + \frac{27R^2}{4}}$$

$$= \sqrt{\frac{81R^2 + 270R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{351}{100}}.$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 6R + 3R}{6}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{16R + 36R + 9R}{6}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{61R^2 + 81R^2}{12}} = \sqrt{\frac{142R^2}{12}}.$$

$$D_3 = \sqrt{R + R + R + \left(\frac{2R}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{9R + 9R + 9R + 6R}{9}} = \sqrt{\frac{33R^2}{9}} = R\sqrt{\frac{33}{9}} = R\sqrt{\frac{11}{3}}.$$

$$D_4 = \sqrt{\left(R + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R + 4R + 4R}{4} + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{36R^2}{4}} = 3R.$$

$$D_5 = \sqrt{\left(R - \frac{R}{10}\right)^2 + \left(3\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{9R}{10}\right)^2 + \frac{27R^2}{4}} = \sqrt{\frac{81R^2}{100} + \frac{27R^2}{4}}$$

$$= \sqrt{\frac{81R^2 + 270R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{351}{100}}.$$

$$D_6 = \sqrt{\left(R + R + \frac{2R}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{9R + 9R + 6R}{9}} = \sqrt{\frac{24R^2}{9}} = R\sqrt{\frac{8}{3}}.$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1... \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{351}{100}}}{R}\right)^{-K} = \left(R\sqrt{\frac{351}{100}}\right)^{-4} = 0.08116.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left( \sqrt{\frac{142R^2}{12}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{142}{12}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{142}{12}} \right)^{-4} = 0.00714.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left( R \sqrt{\frac{11}{3}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{11}{3}} \right)^{-4} = 0.0743.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left( \frac{3R}{R} \right)^{-K} = (3)^{-K} = (3)^{-4} = 1.234 * 10^{-2} = 0.01234.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{R \sqrt{\frac{351}{100}}}{R} \right)^{-K} = \left( R \sqrt{\frac{351}{100}} \right)^{-4} = 0.08116.$$

$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left( \sqrt{\frac{142R^2}{12}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{142}{12}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{142}{12}} \right)^{-4} = 0.00714$$

2.4 Розрахунок параметрів моделей територіальних планів частотних кластерів з секторизацією антен віддалених користувачів.

Проведемо аналогічний аналіз розрахунків захисних відстаней для точки А при  $r=R/2$  (рис.2.9).

$$D_1 = \sqrt{(R)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{7R^2}{4}} = \frac{1}{2}R\sqrt{7}.$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \frac{6R^2}{4}} = \sqrt{\frac{7R^2}{4}} = \frac{1}{2}R\sqrt{7}.$$

$$D_3 = \sqrt{\left(\frac{R}{2} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 + 4R^2 + R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{9R^2}{4}}.$$

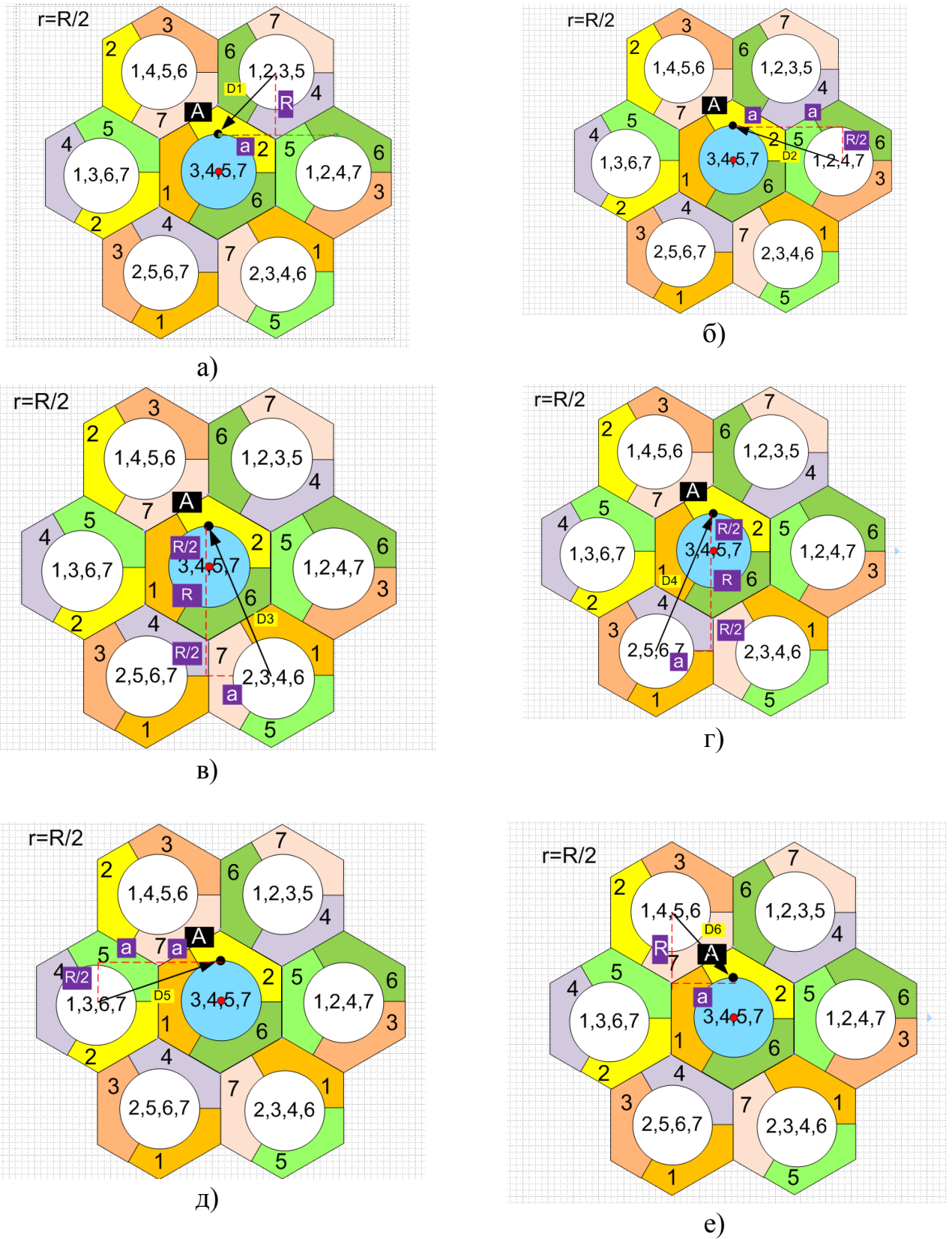


Рисунок 2.9 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=R/2$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_4 = \sqrt{\left(\frac{R}{2} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 + 4R^2 + R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{9R^2}{4}}.$$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R}{4} + \frac{6R^2}{4}} = \sqrt{\frac{7R^2}{4}} = \frac{1}{2}R\sqrt{7}.$$

$$D_6 = \sqrt{(R)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{7R^2}{4}} = \frac{1}{2}R\sqrt{7}.$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1.. \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = 0.3262.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = 0.3262.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left(\frac{\sqrt{\frac{9R^2}{4}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{9}{4}}\right)^{-4} = 0.1975.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left(\frac{\sqrt{\frac{9R^2}{4}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{9R^2}{4}}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{9}{4}}\right)^{-4} = 0.1975.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left(\frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = 0.08116.$$

$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left(\frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R}\right)^{-K} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = \left(\frac{1}{2}\sqrt{7}\right)^{-4} = 0.3265.$$

Проведемо аналогічний аналіз розрахунків захисних відстаней для точки А при  $r=2R/5$  (рис.2.10).

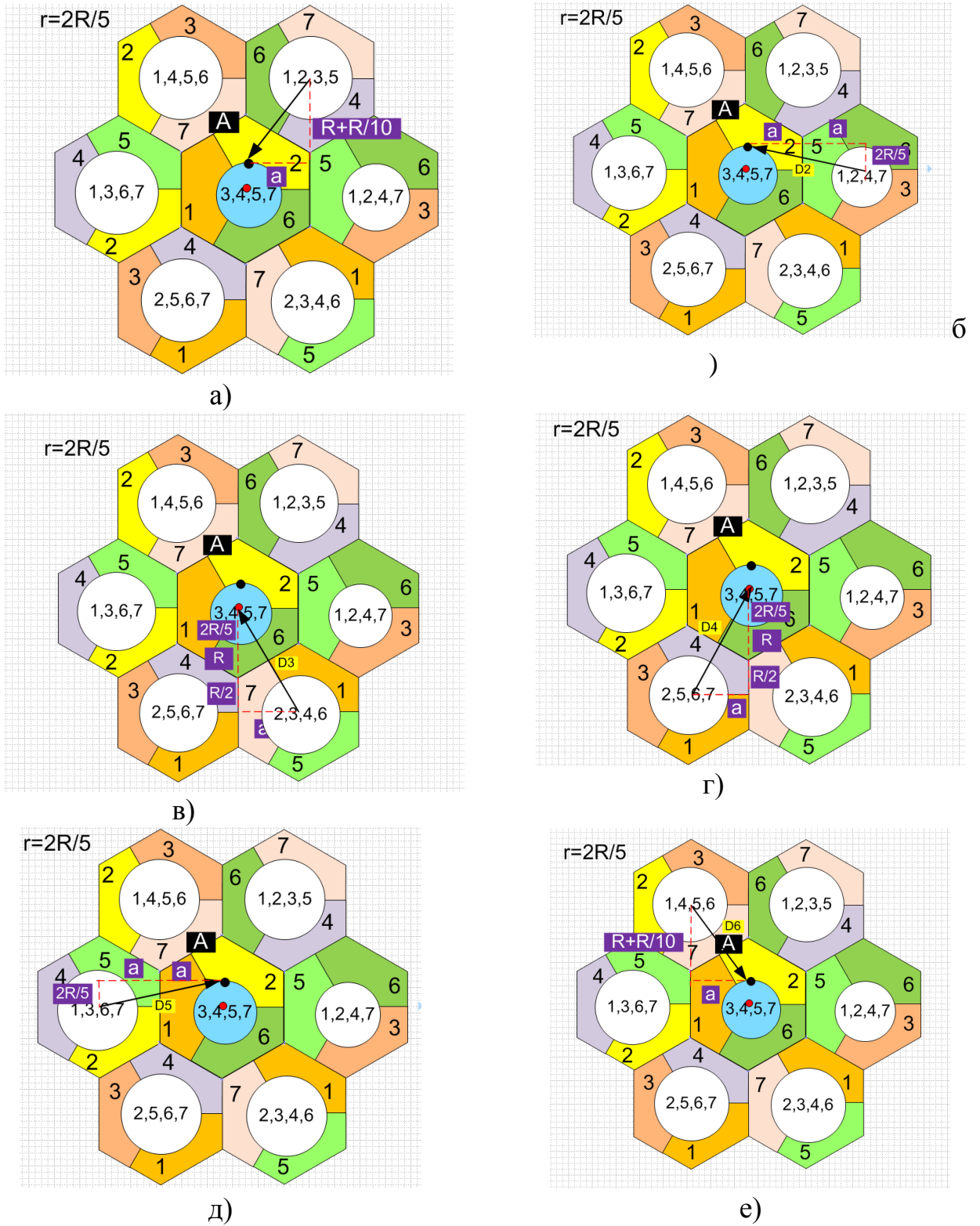


Рисунок 2.10 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=2R/5$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_1 = \sqrt{\left(R + \frac{R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{11R}{10}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{121R^2 + 75R^2}{100}} = \sqrt{\frac{196R^2}{100}}.$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{2R}{5}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{25} + \frac{6R^2}{4}} = \sqrt{\frac{16R^2 + 150R^2}{100}} = \sqrt{\frac{156R^2}{100}} = \sqrt{\frac{39R^2}{25}}.$$

$$\begin{aligned} D_3 &= \sqrt{\left(\frac{2}{5}R + R + \frac{1}{2}R\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 10R + 5R}{10}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{361R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{436R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{436}{100}} = R\sqrt{\frac{109}{25}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_4 &= \sqrt{\left(\frac{2}{5}R + R + \frac{1}{2}R\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 10R + 5R}{10}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{361R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{436R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{436}{100}} = R\sqrt{\frac{109}{25}}. \end{aligned}$$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{2R}{5}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{25} + \frac{6R^2}{4}} = \sqrt{\frac{16R^2 + 150R^2}{100}} = \sqrt{\frac{156R^2}{100}} = \sqrt{\frac{39R^2}{25}}.$$

$$D_6 = \sqrt{\left(R + \frac{R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{11R}{10}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{121R^2 + 75R^2}{100}} = \sqrt{\frac{196R^2}{100}}.$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокональної завади  $\beta_1... \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{\sqrt{\frac{196R^2}{100}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{196}{100}}\right)^{-4} = 0.26308.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{\sqrt{\frac{39R^2}{25}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{39}{25}}\right)^{-4} = \left(\sqrt{\frac{39}{25}}\right)^{-4} = 0.4109.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{109}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{109}{25}} \right)^{-4} = 0.0526.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{109}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{109}{25}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{109}{25}} \right)^{-4} = 0.0526.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{\sqrt{\frac{39R^2}{25}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{39}{25}} \right)^{-4} = 0.4109.$$

$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left( \frac{\frac{1}{2}R\sqrt{7}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{196}{100}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{196}{100}} \right)^{-4} = 0.26308.$$

Проведемо аналогічний аналіз розрахунків захисних відстаней для точки А при  $r=2R/3$  (рис.2.11).

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{\left(R - \frac{1R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{9R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{81R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{81R^2 + 75R^2}{100}} = \sqrt{\frac{156R^2}{100}} = R \sqrt{\frac{156}{100}} = R \sqrt{\frac{39}{25}}. \end{aligned}$$

$$D_2 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{9} + 3R^2} = \sqrt{\frac{31R^2}{9}} = R \sqrt{\frac{31}{9}}.$$

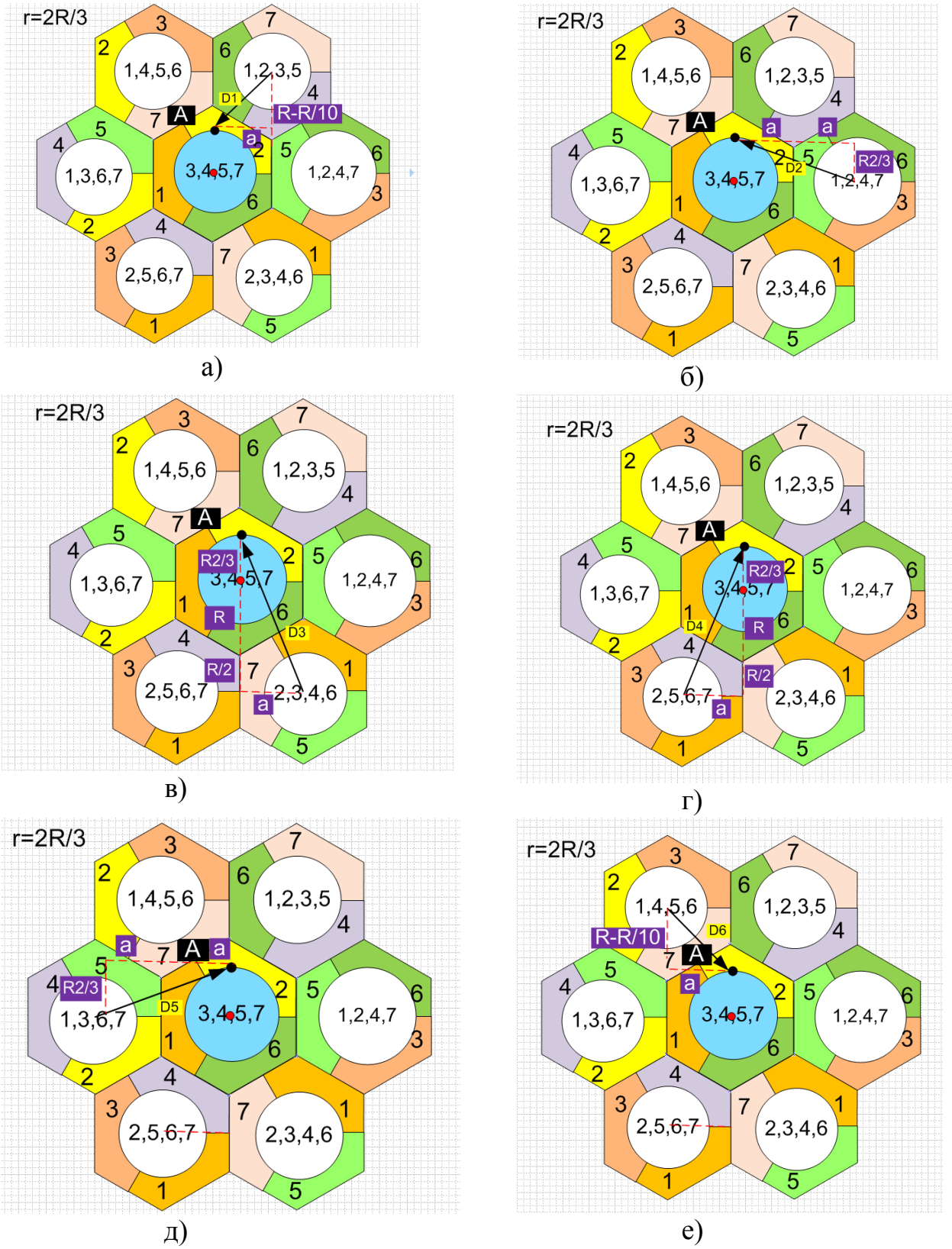


Рисунок 2.11 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=2R/3$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_3 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 6R + 3R}{6}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}} =$$

$$= \sqrt{\frac{16R^2 + 36R^2 + 9R^2}{12} + \frac{9R^2}{12}} = \sqrt{\frac{61R^2 + 9R^2}{12}} = \sqrt{\frac{70R^2}{12}}.$$

$$D_4 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3} + R + \frac{R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{4R + 6R + 3R}{6}\right)^2 + \frac{3R^2}{4}}$$

$$= \sqrt{\frac{16R^2 + 36R^2 + 9R^2}{12} + \frac{9R^2}{12}} = \sqrt{\frac{61R^2 + 9R^2}{12}} = \sqrt{\frac{70R^2}{12}} = \sqrt{\frac{35R^2}{6}}.$$

$$D_5 = \sqrt{\left(\frac{2R}{3}\right)^2 + \left(2\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{4R^2}{9} + 3R^2} = \sqrt{\frac{31R^2}{9}} = R\sqrt{\frac{31}{9}}.$$

$$D_6 = \sqrt{\left(R - \frac{1R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{9R}{10}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{81R^2}{100} + \frac{3R^2}{4}}$$

$$= \sqrt{\frac{81R^2 + 75R^2}{100}} = \sqrt{\frac{156R^2}{100}} = R\sqrt{\frac{156}{100}} = R\sqrt{\frac{39}{28}}.$$

Після отримання значень відстаней захисних інтервалів  $D_1..D_6$  знаходимо значення сокопальної завади  $\beta_1.. \beta_6$ :

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{39}{28}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{39}{28}}\right)^{-4} = 0.5154.$$

$$\beta_2 = \frac{D_2}{R} = \left(\frac{R\sqrt{\frac{31}{9}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{31}{9}}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{31}{9}}\right)^{-4} = 0.0842.$$

$$\beta_3 = \frac{D_3}{R} = \left(\frac{\sqrt{\frac{70R^2}{12}}}{R}\right)^{-K} = \left(\sqrt{\frac{70}{12}}\right)^{-4} = 0.0293.$$

$$\beta_4 = \frac{D_4}{R} = \left( \frac{\sqrt{\frac{35R^2}{6}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{35}{6}} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{35}{6}} \right)^{-4} = 0.0293.$$

$$\beta_5 = \frac{D_5}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{31}{9}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{31}{9}} \right)^{-4} = 0.0842.$$

$$\beta_6 = \frac{D_6}{R} = \left( \frac{R\sqrt{\frac{39}{28}}}{R} \right)^{-K} = \left( \sqrt{\frac{39}{28}} \right)^{-4} = 0.5154.$$

Проведемо аналогічний аналіз для мобільних корситувачів на межах комірок, де характерною ознакою впливу вважатиметься точка В (рис.2.12).

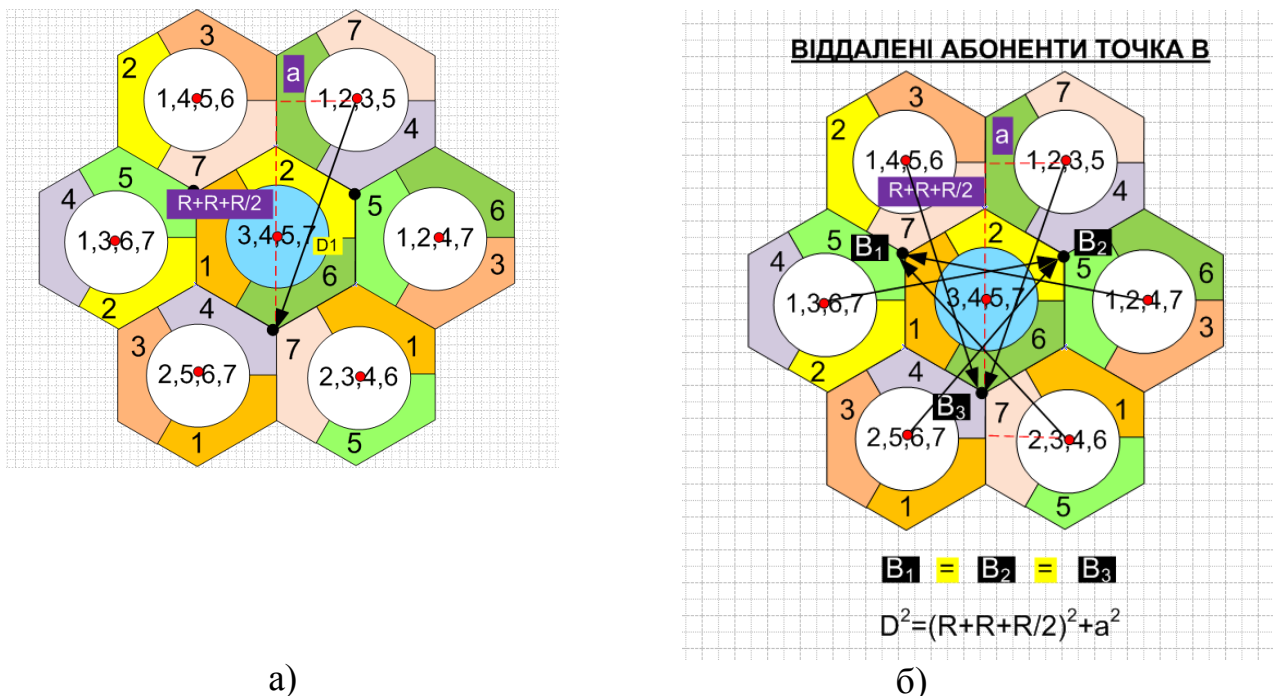


Рисунок 2.12 – Територіальні моделі визначення захисних відстаней для точки А при  $r=2R/3$

а)  $D_1$ , б)  $D_2$ , в)  $D_3$ , г)  $D_4$ , д)  $D_5$ , е)  $D_6$

$$D_1 = \sqrt{\left(R + R + \frac{1R}{2}\right)^2 + \left(\frac{R\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R^2 + 4R^2 + 4R^2}{4} + \frac{3R^2}{4}} = \sqrt{\frac{12R^2}{4}} = \sqrt{3R}.$$

Оскільки  $V_1 = V_2 = V_3$ , отримуємо, що  $D_1 = D_2 = D_3 = \sqrt{3R}$ ,

з цього слідує, що  $D1=D2=D3$ , тобто  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ .

$$\beta_1 = \frac{D_1}{R} = \left(\frac{\sqrt{3R}}{R}\right)^{-K} = (\sqrt{3})^{-4} = 0.11.$$

2.5 Результати математичного моделювання розрахунків параметрів ефективності територіальних планів мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів в пакеті Matlab

В таблиці 2.1 надаються результати розрахунків показника якості територіальних планів на основі частотних кластерів різних конфігурацій.

Таблиця 2.1 – Розрахунок показника якості невиконання сигнал/(завада+шум),  $P(C)$  для всіх моделей частотних кластерів

			Параметр нижньої межі інтеграла $P(C)$ , X	Значення табульованої Q-функції	Показник якості невиконання сигнал/(завада+шум), $P(C)$
Частотний параметр кластеру $C=3$ для $r=R/2$					
Модель кластеру з м'яким розподілом частотного ресурсу.	Діаграма спрямованості антени, град	$\varphi=360$	0.1642	0.4364	43.64
		$\varphi=120$	0.7609	0.4443	44.43
		$\varphi=60$	1.2993	0.0985	9.8
Частотний параметр кластеру $C=3$ для $r=2R/5$					
	Діаграма спрямованості антени, град	$\varphi=360$	0.7458	0.2297	22.97
		$\varphi=120$	0.1558	0.4404	44.04
		$\varphi=60$	0.4073	0.3446	34.4

Продовження табл.2.1

			Параметр нижньої межі інте- грала $P(C)$ , $X$	Значення та- бульованої $Q$ -функції	Показник якості не- виконання сиг- нал/(завада+шум), $P(C)$
Частотний параметр кластеру $C=3$ для $r=2R/3$					
	Діаграма	$\varphi=360$	0.2705	0.3936	39.36
	спрямова-	$\varphi=120$	0.2043	0.4207	42.07
	ності ан- тени, град	$\varphi=60$	0.2392	0.4090	40.90
Частотний параметр кластеру $C=3$ для $r=R/2$					
Модель класте- ру з дробо- вим ро- зподі- лом ча- стотно- го ресу- рсу.	Діаграма	$\varphi=360$	0.3428	0.3669	36.69
	спрямова-	$\varphi=120$	0.2043	0.4207	42.07
	ності ан- тени, град	$\varphi=60$	0.5035	0.3085	30.8
Частотний параметр кластеру $C=3$ для $r=2R/5$					
	Діаграма	$\varphi=360$	0.4928	0.3121	31.21
	спрямова-	$\varphi=120$	0.3460	0.3669	36.69
	ності ан- тени, град	$\varphi=60$	0.5804	0.5804	34.4
Частотний параметр кластеру $C=3$ для $r=2R/3$					
	Діаграма	$\varphi=360$	0.6228	0.2676	26.76
	спрямова-	$\varphi=120$	0.0168	0.4404	44.04
	ності ан- тени, град	$\varphi=60$	0.0178	0.4721	47.21

Продовження табл.2.1

			Параметр нижньої межі інтеграла $P(C)$ , $X$	Значення табульованої Q-функції	Показник якості невиконання сигнал/(завада+шум), $P(C)$	
Частотний параметр кластеру $C=3$ варіант1						
Модель кластеру з гібридним розподілом частотного ресурсу.	Діаграма спрямованості антени, град	$\varphi=360$	1.3231	0.0934	9.34	
		$\varphi=120$	0.8514	0.1977	19.7	
		$\varphi=60$	0.4617	0.3228	32.28	
	Частотний параметр кластеру $C=3$ варіант2					
	Діаграма спрямованості антени, град	$\varphi=360$	1.1776	0.1210	12.1	
		$\varphi=120$	0.7316	0.2327	23.27	
$\varphi=60$		0.7156	0.2389	23.89		

Підсумкові значення показника якості невиконання сигнал/(завада+шум),  $P(C)$  для всіх моделей частотних класерів зведено в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Значення показника якості невиконання сигнал/(завада+шум),  $P(C)$  для всіх моделей частотних кластерів з антенами  $\varphi=360$

		Варіант територіального плану		
Співвідношення радіусів зон покриття комірок $r/R$	Модель кластеру з м'яким розподілом частотного ресурсу.	Модель кластеру з дробовим розподілом частотного ресурсу.	Модель кластеру з секторизацією та гібридним розподілом частотного ресурсу.	
			Показник якості невиконання сигнал/(завада+шум), $P(C)$	
			Точка А	
$r=R/2$	43.64	36.69	9.34	
$r=2R/5$	22.97	31.21	12.1	
$r=2R/3$	39.36	26.76	8.69	
–	Точка В			
	30.8	30.8	4.8	

## 2.6 Аналіз ефективності моделей територіальних планів частотних кластерів

Проаналізуємо результати табл.2.1 і 2.2 п.2.5. Можна зробити наступні висновки:

1) Для всіх моделей територіальних планів з частотними кластерами з всеспрямованими антенами  $\varphi=360$  характерна низька якість зв'язку. Модель кластеру з м'яким розподілом частотного ресурсу демонструє кращі значення показника  $P(S)$  в порівнянні з методом дробового розподілу частот за рахунок більшого коефіцієнта частотної ефективності.

2) Значення співвідношення радіусів зон покриття комірок ближніх і віддалених абонентів  $r/R$  впливає на сигнально-завадвову обстановку в мережі для ближніх користувачів (Точка А). Оптимальне значення співвідношення радіусів зон покриття комірок ближніх для модель кластеру з м'яким розподілом частотного ресурсу складає  $r=2R/5$ , а для моделі кластеру з дробовим розподілом частотного ресурсу  $r=2R/3$ .

3) Для мобільних користувачів, що характеризуються, як віддалені (Точка В) найбільшу ефективність демонструє модель кластеру з секторизацією і гібридним розподілом частотного ресурсу.

4) Аналізуючі результати з табл.2.1 та табл.2.2 для всіх типів антен ( $\varphi = 360^\circ$ ,  $\varphi = 120^\circ$  та  $\varphi = 60^\circ$ ) можна сказати, що ефективність моделей кластерів з м'яким і дробовим розподілом частот низька і порівнянні з моделлю з секторизацією та гібридним розподілом частотного ресурсу.

### 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПЕРЕКРИТТЯ ЗОН БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

З урахуванням тенденції збільшення кількості користувачів мережі мобільного зв'язку 5G до ресурсів інтернет, доцільно здійснювати покриття території із перекриттям сусідніх зон обслуговування, що дозволяє здійснювати "хендовер" мобільного терміналу. Однак ці зони є зонами взаємних завад. Тому вимоги до зон перекриття різних безпроводових стандартів доступу різні. У цьому роботі досліджується можливість використання управління доступом у зонах перекриття підвищення пропускну здатність систем стандарту 5G [10,11].

У системах зв'язку 5G можливий режим "м'якого" хендовера, радіус зони зв'язку може досягати 1,9 радіусу стільника, і тому можливі зони з три- і чотири-разовим перекриттям (рис. 3.1). У системах, де режим хендовера "жорсткий", радіус зони зв'язку зазвичай не перевищує 1,3 радіусу стільника.

При знаходженні в зонах перекриття мобільна станція (МС) може працювати з будь-якою з базових станцій (БС) і навіть кількома. При цьому природно орієнтуватися на вибір найменш завантаженої БС, що дозволить найбільш рівномірно (раціонально) розподіляти навантаження і в кінцевому рахунку забезпечувати найбільшу ємність системи (здатність навантаження) при збереженні заданих характеристик за показниками відмов. Як модель системи масового обслуговування розглядатимемо модель з пуассонівським потоком вимог з інтенсивністю  $\lambda$ , показовим законом обслуговування з інтенсивністю  $\mu$  та дисципліною обслуговування з чистими втратами [10,11].

Алгоритм вибору в зоні перекриття конкретної БС здійснюється на основі аналізу абонентською станцією завантаження всіх доступних на поточний момент з точки простору БС (секторів БС). З них вибирається БС (сектор) із найменшим завантаженням. У разі рівності рівнів поточних завантажень БС може бути обрана абонентською станцією, наприклад на основі рандомізованої процедури.

### 3.1 Метод підвищення ефективності використання частотного ресурсу в системах безпроводового доступу 5G

Для ефективного використання частотного ресурсу системами безпроводового доступу 5G доцільно застосовувати модель повторного використання частот з урахуванням зон перекриття [12], що не враховується у існуючій методиці оцінки необхідного частотного ресурсу для систем безпроводового доступу, наведеної в Рекомендації МСЕ-Р М.1651 [12],

Будь-який оператор системи абонентського радіодоступу намагається забезпечити якомога більшу зону покриття для надання різних послуг зв'язку більшій кількості користувачів. Однак через безліч факторів, що впливають на розмір зони покриття, зробити це неможливо. У загальному випадку розрахунок зони обслуговування базової станції проводиться на основі енергетичного балансу радіолінії та вихідних даних про трафік роботи.

Залежно від отриманих результатів, вибирається найменша зона обслуговування. При цьому вибирається архітектура системи абонентського радіодоступу, визначається розмір кластера, кількість секторів у осередку, кількість частотних каналів у кластері.

Для реалізації комірчастої структури з отриманими параметрами кластера та секторів у соті потрібна деяка мінімальна кількість частотних каналів (табл.3.1).

Визначається відстань між базовими станціями, що працюють на частотах, що збігаються. При цьому доцільно використовувати критерій якості – відношення  $E_b/N_0$  (нормоване відношення середньої енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму):

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{i,j} = \frac{P_{i,j} \cdot \left(\frac{\Delta F}{R_{i,j}}\right)}{P_N + \chi_j + [P_{Rj} - P_{i,j}]}, \quad i_j = 1 \dots n_j \dots, \quad (3.1)$$

де  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{i,j}$  - показник якості радіолінії для  $i$ -го передавача в  $j$ -й осередку;

$P_{i,j}$  - потужність корисного сигналу для  $i$ -го передавача в  $j$ -й осередку;

$R_{i,j}$  - швидкість передачі  $i$ -го передавача в  $j$ -й осередку;

$\Delta F$  - ширина смуги частот;

$P_N$  - потужність шуму;

$\chi_j$  - коефіцієнт, який враховує інтерференційні перешкоди між кластерами стільників, що використовують одну і ту ж смугу частот,  $j$ -й осередку;

$n_j$  - максимальна кількість активних трансіверів у  $j$ -й осередку;

$P_{Rj}$  - загальна потужність у  $j$ -ї точки доступу.

Таблиця 3.1 – Співвідношення кількості каналів із розмірами кластера

Розмірність кластера, С	Мінімальна кількість частотних каналів при кількості секторів у соті		
	1	3	6
1	1	3	6
3	3	9	18
4	4	12	24
7	7	21	42
9	9	27	54

Потужність сигналу на вході  $j$ -ї БС від усіх трансіверів  $n_j$  в  $j$ -й осередку

$$P_{Rj} = \sum_{i,j}^n P_{i,j} \cdot \quad (3.2)$$

Потужність передачі  $i$ -го передавача в  $j$ -й осередку

$$P_{\text{Пері},j} = \frac{W_{i,j} P_{i,j}}{G_{\text{Пері},j} G_j} \cdot \quad (3.3)$$

де  $W_{i,j}$  - втрати на трасі від  $i$ -го передавача до  $j$ -ї БС;

$G_{\text{Пері},j}$  - коефіцієнт посилення  $i$ -го передавача;

$G_j$  - коефіцієнт посилення  $j$ -ї БС.

$$\chi_j = \sum_{l \neq j} \sum_{i=1}^{n_l} \frac{P_{\text{Пері},j} G_{\text{Пері},j}}{W_{i,j}} \cdot \quad (3.4)$$

де  $W_{i,j}$  - втрати на трасі між  $i$ -м трансівером  $l$ -ї комірки та  $j$ -й осередком;

$G_{\text{Пері},j}$  - коефіцієнт посилення  $i$ -го передавача в  $l$ -й осередку;

$P_{\text{Пері},j}$  - потужність передачі  $i$ -го передавача в  $l$ -й осередку.

Таким чином, формула для інтерференційної завади матиме вигляд:

$$\chi_j = \frac{\sum_{l \neq j} \frac{(P_N + \chi_j + P_{Rj}) G_{Перi,j}}{G_{Перi,j} G_j} \cdot \sum_{i=1}^{n_l} \frac{W_{i,j}}{W_{l,j}}}{\left( \frac{W}{\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{i,j} R_{i,j}} + 1 \right)}. \quad (3.5)$$

Введемо нове позначення  $S_{i,j}$ :

$$S_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_l} \frac{W_{i,j}}{W_{l,j}}}{\left( \frac{\Delta F}{\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{i,j} R_{i,j}} + 1 \right)}. \quad (3.6)$$

Коефіцієнт  $S_{i,j}$  показує вплив  $l$ -ї комірки на  $j$ -ю комірку. Як видно з отриманого рівняння, коефіцієнт  $S_{i,j}$  залежить тільки від втрат на трасі та виду послуг, що надаються. Отже, він дозволяє визначити вплив одного осередку на електромагнітну обстановку в іншому осередку[13].

У системах радіозв'язку для підвищення якості обслуговування зону обслуговування планують таким чином, щоб існувало перекриття сусідніх стільників. При цьому абоненти, що знаходяться в зоні перекриття, можуть обслуговуватися будь-якою з доступних точок доступу.

На рис. 3.1 представлена модель планування, що складається із семи комірок з максимальним коефіцієнтом перекриття  $N = 3$ .

Виклики із зони  $k$ -кратного перекриття буде заблоковано, якщо всі канали зв'язку  $k$ - доступні точки доступу будуть зайняті. Таким чином, ність  $P_k$  блокування заявок у зоні  $k$ -кратного перекриття може бути обчислена за такою формулою:

$$P_k = p^k(C), \quad k = \overline{1, K}, \quad (3.7)$$

де  $p(C)$ - Імовірність заняття всіх каналів.

Можливість блокування викликів  $P$  в соті можна отримати як суму ймовірностей блокувань в окремих зонах перекриття стільника:

$$P = \sum_{k=1}^K \frac{S_k^c}{S_c} P_k \quad (3.8)$$

де  $S_c$  - площа стільниці;  $S_k^c$  - площа зони  $k$ -кратного перекриття

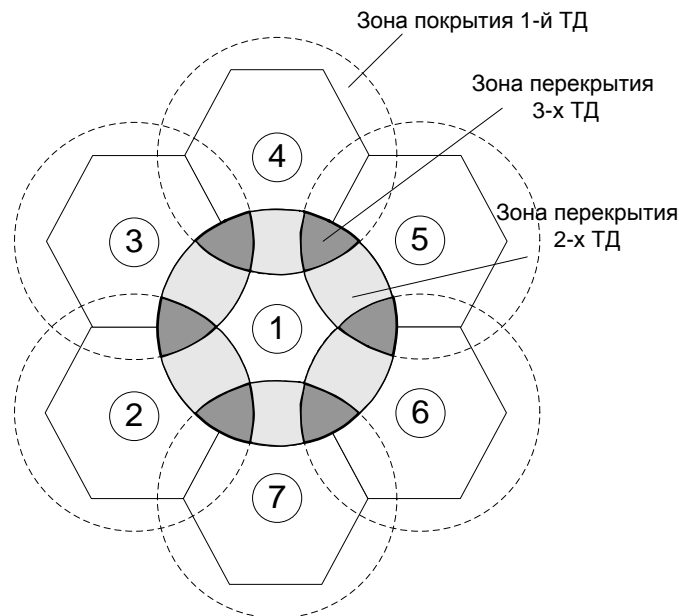


Рисунок 3.1 – Модель територіального планування БС мобільної мережі 5G з максимальним коефіцієнтом перекриття  $N = 3$ .

Визначення ймовірності блокування дзвінків у соті під час використання зон перекриття дозволяє точніше оцінити зміни функціонування системи мобільного зв'язку 5G порівняно з підходом, що застосовується операторами безпроводового доступу, наведеним у Рекомендації МСЕ-Р М.1651 [13].

Більше того, наявність зон перекриття дозволяє знизити можливість блокування викликів у соті.

Представлені алгоритми можуть бути використані для отримання більш точних оцінок щодо мінімально необхідного частотного ресурсу для систем мобільного зв'язку 5G.

Таким чином, пориста архітектура побудови мереж 5G різної ємності є дієвим механізмом збільшення ефективності їх функціонування.

При цьому розвиток мереж 5G має здійснюватися у напрямку від однорангових до мультирангових мереж. У період розгортання мереж 5G національні оператори мобільного зв'язку повинні враховувати можливості масштабування та гнучкості мережного системного обладнання.

3.2 Математична модель багаторазового перекриття зон діаграм спрямованості антен базових станцій в мережі мобільного зв'язку 5G

Для аналізу досяжного виграшу під час використання зон перекриття складемо рівняння балансу фаз при стаціонарному розподілі навантаження [13, 14] за умов суцільного однорідного покриття площі стільниками з перекриттям зон. Введемо такі позначення:  $k$  - кратність перекриття території, яка в прикладі (рис. 3.2) змінюється від 1 до 4 - максимально можливої кратності покриття території в стільниковій мережі;  $\lambda_k$ -сумарна інтенсивність вхідних запитів на площі радіозв'язку БС (сектору) з  $k$ -кратним покриттям.

Якщо прийняти модель з рівномірним розподілом щільності інтенсивності виникнення запитів на території, то

$$\lambda_k = \lambda_c \frac{S_k}{S_c} k_i \quad (3.9)$$

де  $c$  - загальна сумарна інтенсивність виникнення запитів на території одного виділеного сектора (стільники);  $S_k$  - площа виділеного сектора (стільники), на якій спостерігається  $k$ -кратне покриття;  $S_c$  – площа виділеного сектора (соти).

Фактично це означає, що інтенсивності ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) пропорційні відношенням площам  $k$ -кратних покриттів у межах зони радіозв'язку виділеної БС (сектору БС). Величина  $\lambda_k/k$  визначатиме інтенсивність виникнення запитів на території  $k$ -кратного покриття, що знаходиться виключно на території стільника (сектору

стільника), що відповідає структурі, представленій на рис. 3.2. Отже,  $\sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} = \lambda_c$  - Середня інтенсивність вхідного потоку в розрахунку на одну соту (сектор стільника).

Позначимо ймовірність знаходження в системі  $i$  вимог у режимі  $P_i$ , що встановився. За нескінченно малий інтервал часу  $(t, t + \Delta t)$  ймовірність наявності рівно  $i$  з'єднань (число вимог, що обслуговуються) в секторі може змінитися на:

1.  $(i + 1)P_{i+1}\mu\Delta t$  - після завершення обслуговування одного з  $(i + 1)$  з'єднань;

2.  $-iP_i\mu\Delta t$  - після завершення обслуговування одного з  $i$  з'єднань;

3.  $\lambda_k \sum_{l=1}^k \frac{P_{i-1}^l}{l} \left( \sum_{j=1}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{l-1} \Delta t$  - у разі виникнення нового запиту на з'єднання

на території з  $k$ -кратним покриттям, де була  $(i - 1)$  з'єднання;

$$4. \lambda_k \sum_{l=1}^k \frac{P_i^l}{l} \left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1} C_{k-1}^{l-1} \Delta l - \text{при використанні нового запиту на з'єднання на}$$

території з  $k$ -кратним покриттям, на якому було  $l$  з'єднань.

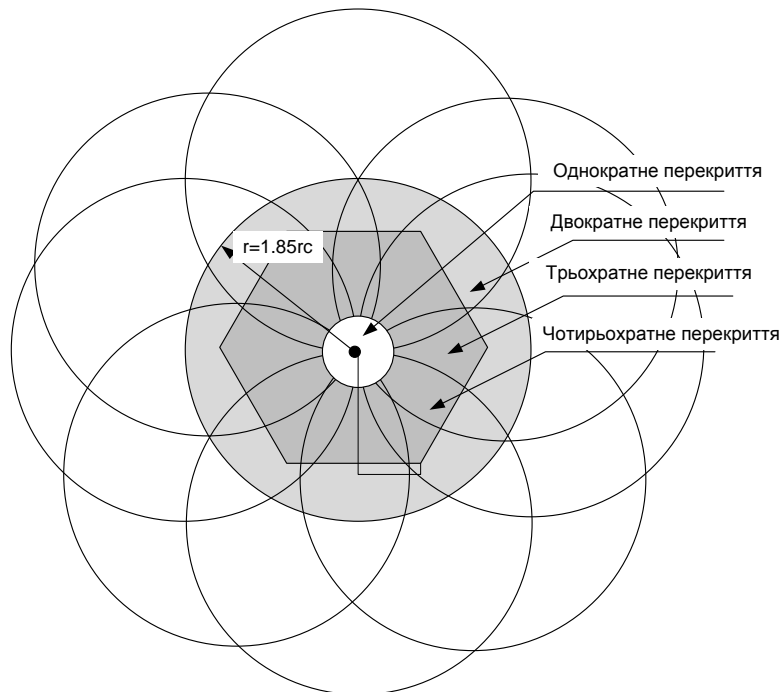


Рисунок 3.2 – Модель багаторазового перекриття зон діаграм спрямованості антен [15]

Наведені вирази справедливі за умови, що (при виникненні запиту на з'єднання на території з  $k$ -кратним покриттям) виділений для аналізу сектор БС (або БС) буде обраний, якщо:

– завантаження  $(k-1)$ -х «конкуруючих» секторів (БС) вище завантаження вибраного сектора (БС) (цей факт враховують ймовірності  $\left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^{k-1}$  або  $\left( \sum_{j=i+1}^N P_j \right)^{k-1}$ );

– завантаження  $(k-1)$ -х «конкуруючих» секторів (БС) вище завантаження вибраного сектора (БС) (цей факт враховують імовірнісні співмножники  $P_i^{l-1}$  і  $P_{i+1}^{l-1}$ ).

Численні  $C_{k-1}^{l-1}$  враховують кількість можливих комбінацій вибору  $(l-1)$ -го сектора (БС) з  $(k-1)$ -го «конкуруючих». Індекс  $l$  означає число секторів (БС) з однаковим мінімальним завантаженням, до якого відноситься  $l$  виділений для

аналізу сектор (БС). Тому множник  $1/l$  вказує на випадкове рівномірнісне правило вибору для підключення серед однаково завантажених секторів (БС).

Підсумувавши вирази переліку 1-4 і прирівнявши суму нулю, з урахуванням введених позначень отримаємо систему балансу фаз Ерланга в режимі, що встановився. Якщо покласти  $P-1 = 0$ , то вона набуває компактного вигляду:

$$\mu P_i i = \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} \left[ \left( \sum_{j=i-1}^N P_j \right)^k - \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^k \right]. \quad (3.10)$$

Потім, підсумувавши, ліві та праві частини за індексом  $i$  і скориставшись тим, що  $\sum_{i=1}^N (P_i i) = \langle i \rangle$  - середня кількість об'єднаних з'єднань (вимог), а від різниці в дужках залишиться тільки  $1 - P_N^k$ , Отримаємо:

$$\langle i \rangle = \frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} (1 - P_N^k) \approx \frac{\lambda_c}{\mu}, \quad (3.11)$$

тобто, у наближенні випадків з малими втратами, середнє навантаження може розраховуватися за формулою Літтла [15], що складається для моделі ізольованої стільниці. Далі у формулах під  $\langle i \rangle$  розуміється  $\lfloor \langle i \rangle \rfloor$  - Найближче ціле число.

Знайдемо значення  $\sum_{j=\langle i \rangle}^N P_j$  виходячи з того, що область максимальних значенні  $P_j$  визначається в режимі, що встановився, околицею. Для практичних програм область локального екстремуму буває дуже вузькою  $\langle i \rangle$ , і тому можна прийняти, що в області максимальних  $P_j$  справедливий вираз  $P_j \approx P_{j-1}$ . Це відповідає рівності:

$$\mu P_i i = \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} \left[ \left( \sum_{j=i-1}^N P_j \right)^k - \left( \sum_{j=i}^N P_j \right)^k \right] \approx \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} k P_{j-1} \left( \sum_{l=j}^N P_l \right)^{k-1} \approx \sum_{l=j}^N \frac{\lambda_k}{k} k P_j \left( \sum_{j=l}^N P_L \right)^{k-1}. \quad (3.12)$$

Скорочуючи ліву та праву частини на множник  $P_j$  та підставляючи  $j \approx \langle i \rangle \approx \frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k}$ , отримуємо:

$$\sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} \approx \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{k} k \left( \sum_{l=\langle i \rangle}^N P_l \right)^{k-1}. \quad (3.13)$$

Для практичних програм, як зазначалося вище, цілком доступно обмежитися наближенням  $\lambda_k \approx 0$  при  $k > 3$ . Тоді, вводячи змінну  $x = \sum_{l=\langle i \rangle}^N P_l$ , з (3) маємо:

$$\lambda c \approx \lambda_1 + \lambda_2 x + \lambda_3 x^2. \quad (3.14)$$

Його рішення дає:

$$\sum_{l=\langle i \rangle}^N P_l = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right) \sqrt{1 + \frac{1}{3 \left( 1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right)^2}} - \frac{1}{2} \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \quad (3.15)$$

Як видно із рис. 3.3 рішення знаходиться в межах значення 1/2.

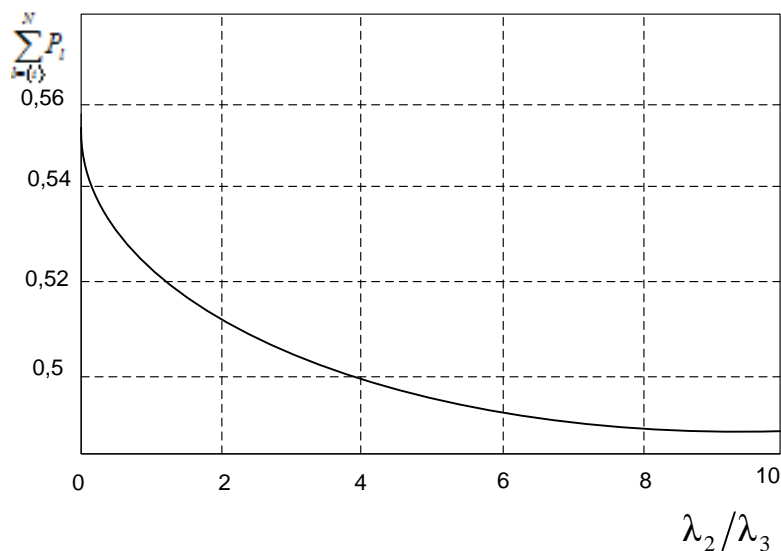


Рисунок 3.3 – Залежність середньої кількості об'єднаних сполук (вимог) від інтенсивностей  $\lambda_2/\lambda_3$  виникнення запитів у зонах дійного та потрійного покриття.

У припущенні рівномірної поверхневої щільності розподілу інтенсивності запитів, що входять, зручніше оперувати з площами багаторазового покриття всередині виділеної стільники [16]. При цьому в (3), (4) слід зробити замі-

$$\text{ни } \frac{\lambda_k}{k} \rightarrow S_k, \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \rightarrow \frac{2 S_2}{3 S_3}.$$

Знайдемо аналітичні співвідношення для  $S_1$ ,  $S_2$  і  $S_3$  при  $g_{sv}/g_c=r$ , що забезпечують  $S_4 = 0$ , які дозволять наближення кругових зон зв'язку проводити розрахунок технічних параметрів для оцінок граничних навантажень.

Легко показати, що суцільне покриття забезпечуватиметься лише при  $\gamma \geq 2/\sqrt{3} \approx 1,155$ , а зона з чотириразовим покриттям виникає при  $\gamma > \sqrt{3} \approx 1,732$ . Тому вважаємо  $1,115 \leq \gamma \leq 1,732$ . Опускаючи громіздкі математичні викладки, наведемо остаточні результати для площ, що цікавлять нас:

$$\frac{S_1}{S_2} = r^2 \left[ \frac{3 - \sqrt{3}\sqrt{r^2 - 1}}{r^2} - \sqrt{3} \arcsin\left(\frac{\sqrt{3} - \sqrt{r^2 - 1}}{2r}\right) \right].$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{3}r^2 \left[ \arcsin\left(\frac{\sqrt{r^2 - 1}}{r}\right) - 3 \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{r^2 - 1} - 1}{2r}\right) + \frac{2\sqrt{r^2 - 1} - \sqrt{3}}{r^2} \right]. \quad (3.16)$$

$$\frac{S_1}{S_2} = r^2 \left[ \sqrt{3} \arcsin\left(\frac{\sqrt{3}\sqrt{r^2 - 1} - 1}{2r}\right) - \frac{\sqrt{3}\sqrt{r^2 - 1} - 1}{r^2} \right].$$

Отримані співвідношення (3.16.) можна використовувати для розрахунку залежності  $\frac{2}{3} \frac{S_1}{S_2}$  від  $r$ , поданої на рис. 3.4. Як видно з рис.3.3, навіть за граничного

$\gamma = \sqrt{3}$  значення  $\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = \frac{2}{3} \frac{S_2}{S_3}$  залишається порядку 0,1, що забезпечує розрахунку

$$(4) \sum_{l=i}^N P_l \approx 0,57$$

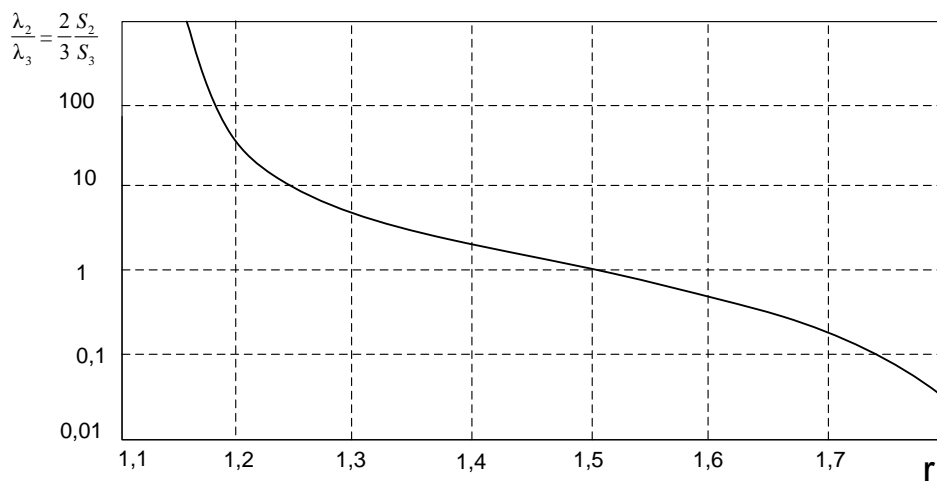


Рисунок 3.4 – Відношення площ території обслуговування БС до коефіцієнта перекриття зон ДНА

Таким чином, для технічних додатків цілком допустимо орієнтуватися на значення  $\sum_{l=i}^N P_l \approx 0,5$ . Виходячи з цього, можна формулу (3.12) записати в наближеній формі

$$\mu P_j j \approx \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{4^{k-1} k} k P_j = \frac{\lambda_c}{S_c} \sum_{k=1}^K \frac{k S_k}{4^{k-1}} P_{j-1}, \text{ при } j \gg \langle i \rangle \quad (3.17)$$

Далі, з урахуванням рівняння нормування для визначення  $P_0$  знаходимо розрахункову формулу для ймовірності повного завантаження БС (або сектора БС)

$$P_n = \frac{\lambda}{2} \left[ \frac{1}{N!} \left( \frac{\lambda}{c} \sum_{k=1}^K k \frac{(S_k / S_c)}{4^{k-1}} \right)^{N-(i)} \right. / \left. \sum_{j=(i)}^N \frac{1}{j!} \left( \frac{\lambda_c}{\mu_c} \sum_{k=1}^K k \frac{(S_k / S_c)}{4^{k-1}} \right)^{j-(i)} \right], \quad (3.18)$$

де  $S_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) – визначаються згідно (5);  $\lambda_c$  - інтенсивність вхідних запитів, розрахована на соту (або сектор стільниці при секторній організації покриття);  $\lambda$  - множник, що коригує, який введений для обліку всіх похибок, що виникають при виведенні формули. Порівнюючи результати розрахунку за формулою (3.18) і результати імітаційного моделювання, можна встановити, що значення множника, що коригує,  $\lambda$  слід вибирати рівним 0,5.

### 3.3 Аналіз отриманих результатів математичного моделювання

Результати оцінки ймовірності втрати з'єднань через перевантаження показані рис.3.5. Дані отримані шляхом моделювання роботи бездротової мережі зв'язку із запропонованим адаптивним алгоритмом доступу (на основі вибору найменш завантаженого сектора) та мережі 5G із традиційним вибором сектора БС, що має найбільший рівень ширококомовного каналу управління. На малюнку наведено і результати теоретичних розрахунків, виконаних за (3.9), а також криві, розраховані за формулою В. Ерланга для ізольованої стільниці (традиційний метод). Графіки побудовані для випадків,  $\gamma=1,3$  та  $\gamma=1,75$  у міській зоні. Моделювалася мережа Wi-MAX із покриттям 7/21 (трисекторна структура). У кожному секторі передбачалася можлива підтримка до 22 абонентських з'єднань ( $N = 22$ ), що відповідає трьом виділеним частотним каналам мережі. Середня тривалість абонентського з'єднання вибиралася 40 с. Кожна точка формувалася на основі обробки серії із 15000 з'єднань [17,18].

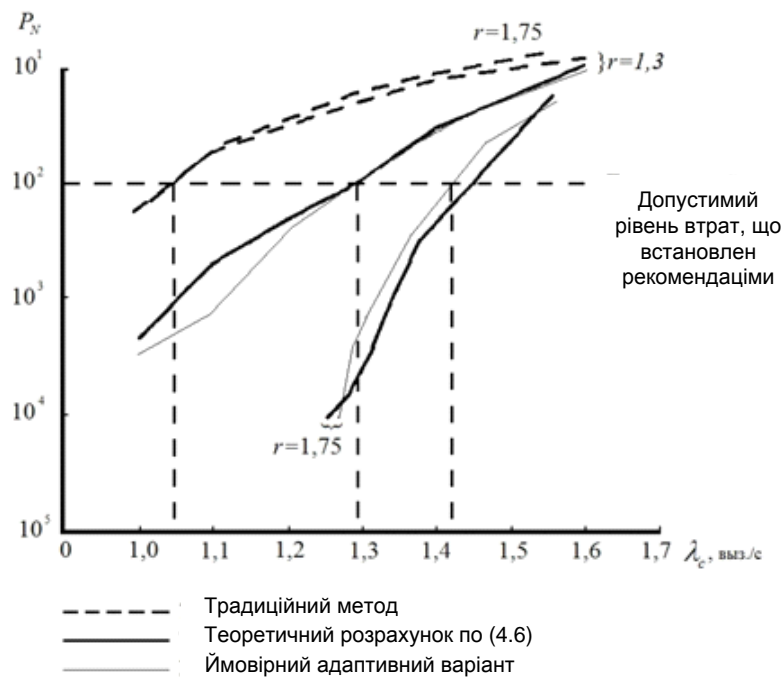


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності помилки від інтенсивності надходження заявок

Слід зазначити досить точне збіг теоретичних та експериментальних результатів для значень рівня втрат  $P_n$  в межах від  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-1}$ , що становлять найбільший практичний інтерес для мереж зв'язку WiMAX.

Для розглянутої моделі легко розрахувати граничний рівень навантаження на соту. При цьому припустимо, що обслуговування кожного виклику триває  $\mu = 40$  с, і врахуємо, що всього на БС є  $3 \cdot 22 = 66$  абонентських каналів.

Таким чином, при організації управління потоком вхідних запитів потенційно досягнемо рівень інтенсивності

$$\lambda_{c \max} = 66 / 40 = 1,65 [\text{выз./с/БС}] \quad (3.19)$$

Співвідношення (3.10) визначає ємність радіоканалу. Мрі традиційної організації доступу, як можна бачити з результатів експерименту, рівень втрат сполук через перевантаження порядку 0,01 забезпечується при  $\lambda_c = 1,04$  [викл./с/БС], тобто. середній рівень використання радіоканалу

$$\rho_{\text{станд}} \approx \frac{1,04}{1,65} 100\% \approx 63\% . \quad (3.20)$$

Застосування адаптивного алгоритму доступу при радіусі зв'язку, що перевищує стільниковий радіус в 1,3 рази, як видно з рис. 3.4 дозволяє досягти рівня ви-

користання радіоканалу

$$\rho(1,3) \approx \frac{1,29}{1,65} 100\% \approx 78,2\% . \quad (3.21)$$

Це означає, що можна підвищити ефективність використання радіоканалу на 15% шляхом удосконалення алгоритму організації доступу.

Якщо радіус зв'язку перевищує радіус стільники в 1,75 разів, то

$$\rho(1,75) \approx \frac{1,46}{1,65} 100\% \approx 88,5\% . \quad (3.22)$$

для мереж стандарту 5G потенційний рівень використання ресурсу радіоканалу більший, ніж для систем GSM, приблизно на 10%.

Аналітичне співвідношення для розрахунку рівня втрат у випадках використання адаптивного алгоритму доступу перевірялося при різних граничних значеннях абонентських з'єднань і було встановлено, що досить точний збіг даних теоретичного розрахунку та моделювання зберігається [18].

Отримані в результаті проведених досліджень розрахункові формули дозволяють оцінити вигреш та абонентської ємності безпроводових систем при використанні алгоритму вибору найменш завантаженої БС у зоні перекриття. Розрахунки та імітаційне моделювання показали, що в системі 5G при використанні алгоритму вибору вигреш в абонентській ємності може досягати 25%.

## 4 МЕТОДОЛОГІЯ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 5G НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ФЕМТОСТІЛЬНИКІВ

Схеми розподілу частот визначають процеси та алгоритми, які використовуються для ефективного використання обмежених частотних ресурсів як у макростільниках, так і у фемтостільниках у системі 5G. Основною метою будь-якої схеми розподілу частот є підвищення загальної продуктивності системи та максимізація спектральної ефективності обмеженої смуги частот.

Кожна з таких схем використовує відомий метод розподілу частот, зосереджуючись на підходах, що базуються на концепції повторного дробового використання частоти (FFR), яка була вперше запропонована у мережах GSM [19]. Цей підхід вирішує проблеми поганого покриття в зоні краю, які є значущими для будь-якої мобільної стільникової системи [19]. Далі у статті пропонуються методи розподілу частотних ресурсів для фемтостільників, щоб вони були взаємодійсовані з методами макростільників з метою підвищення загальної продуктивності системи. Важливо відзначити, що всі запропоновані схеми є статичними і не вимагають будь-якої сигналізації між макро- та фемтостільниками. У роботі використовуються також добре відомі схеми розподілу частот, такі як повторне використання-1, повторне використання-3, м'яке повторне використання частоти (SFR), часткове повторне використання частоти (PFR), і м'яке дробове повторне використання частоти (SFPR), кожна з яких докладно описана у даній главі.

### 4.1 Схема повторного використання-1

У цьому дослідженні аналізується схема повторного використання-1 для порівняння з іншими варіантами. Універсальна схема повторного використання, відома як Повторне використання-1, передбачає призначення всіх частотних ресурсів для повторного використання усіма макростільниками та фемтостільниками в системі. Основною перевагою цієї схеми є здатність використовувати всі доступні частоти, що призводить до збільшення спектральної ефективності обмеженої смуги пропускання. Це, однак, може призвести до збільшення міжсистемних завад у системі, оскільки всі макро- та фемтостільники одночасно використовую-

ють однакову пропускну здатність для обслуговування своїх підключених абонентів.

Схема повторного використання-1 може також породжувати проблеми з покриттям через низький коефіцієнт сигнал-шум та співвідношення сигнал-інтерференція (SINR) для тих абонентів, які знаходяться на краю зони покриття макростільників через вплив інтерференції від сусідніх макростільників [20]. Додатково, ця схема може викликати серйозні проблеми для внутрішніх абонентів, які знаходяться дуже близько до активних передавальних станцій фемтостільників.



Рисунок 4.1 – Схема повторного використання-1

На рис. 4.1 подається опис принципів функціонування схеми повторного використання-1. Згідно з цією схемою, всі макростільники використовують усю доступну смугу частот в однакових інтервалах часу з фіксованою потужністю передачі  $P_M$ . Фемтостільники також застосовують концепцію повторного використання-1, проте їх використання смуги частот відбувається схожим чином, але з обмеженою потужністю передачі, тобто  $P_M$ .

У цій схемі макростільники та фемтостільники розділяють однакові частотні ресурси в зазначені періоди часу. Макростільники використовують повний обсяг смуги частот з фіксованою потужністю передачі, тоді як фемтостільники, хоча також використовують усю смугу частот, обмежені у своїй потужності передачі, тобто  $P_F$ . Це є основним відзначенням роботи схеми повторного використання-1, яка сприяє ефективному використанню частотних ресурсів у системі макро- та фемтостільників.

## 4.2 Схема повторного використання-3

Для вирішення проблеми недостатнього покриття у крайовій зоні запропоновано використовувати коефіцієнти повторного використання, що перевищують значення, встановлені для повторного використання-1. Повторне використання-3 продемонструвало, що воно може забезпечити кращі результати порівняно з іншими варіантами коефіцієнтів повторного використання [20]. У схемі повторного використання-3 весь частотний діапазон рівномірно розподіляється на три піддіапазони, таким чином, що кожному стільнику відводиться тільки один із доступних піддіапазонів. Важливою особливістю цієї схеми є те, що частотний ресурс повторно використовується кожним третім стільником, а не кожним окремим стільником, як у випадку повторного використання-1.

Виявляється, що кількість міжстільникових завад (ICI) помітно зменшилася за рахунок того, що більшість домінуючих завад працюють на різних піддіапазонах. Однак спектральна ефективність обмежених частотних ресурсів також зменшилася, оскільки велика частина ресурсів витрачається для уникнення втручань через розподіл на різні піддіапазони.

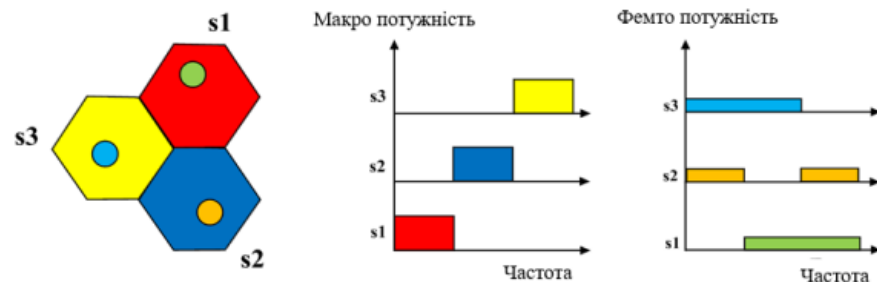


Рисунок 4.2 – Схема повторного використання-3

На рис. 4.2 розглядається принциповий принцип роботи схеми повторного використання-3. Кожен макростільник розділений на три відмінні сектори, і кожен із цих секторів обслуговується індивідуальною направленою антеною. Трьом секторам надають три різні піддіапазони таким чином, що завади обмежуються лише одним сектором (замість трьох у випадку повторного використання-1), який працює на тих самих піддіапазонах, що і сусідні макростільники. Рівень потужно-

сті передачі в кожному секторі встановлюється як  $3P$ , де  $P$  є еталонним рівнем потужності, використовуваним при передачі в схемі повторного використання-1.

У випадку роботи фемтостільників пропонується, щоб кожен фемтостільник у кожному секторі працював на двох залишкових піддіапазонах, які не використовуються макростільниками. Ця процедура забезпечує майже повне розділення частот між макростільниковою та фемтостільниковою мережами, хоча за рахунок спектральної ефективності відбувається деяке втрати внаслідок використання додаткових піддіапазонів.

#### 4.3 Схема м'якого повторного використання частот (SFR)

Важливо зазначити, що використання лише схеми повторного використання-1 призводить до значної кількості міжстільникових завад, тоді як використання схеми повторного використання-3 веде до низької спектральної ефективності та втрати частотних ресурсів. З цією метою було запропоновано [20] поєднання обох схем - повторного використання-1 та повторного використання-3 - в такий спосіб, що отримана схема є компромісом між двома різними підходами. Ця комбінована схема отримала назву "м'яке частотне повторне використання" (SFR) і може бути описана таким чином.

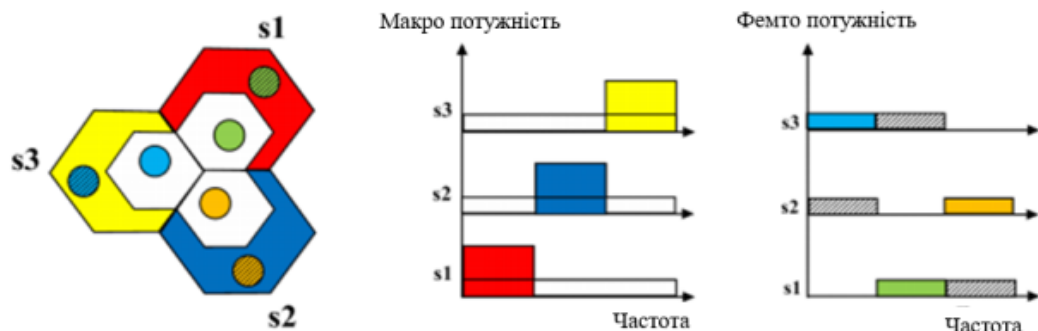


Рисунок 4.3 – Схема SFR

На рис.4.3 розглядається процес розподілу частот як для макростільників, так і для фемтостільників, впроваджених у схемі м'якого частотного повторного використання (SFR). Схема SFR розділяє зону покриття макростільника на дві області: внутрішню (центральну) та крайову, як видно на рис.4.3. Визначення центральної області здійснюється за допомогою радіуса від центру макростільни-

ка, де розташована макро-базова станція. Оптимальний радіус центральної області, який максимізує пропускну здатність системи, становить 63% радіуса стільника [20]. На основі цього розділення макростільника на центральну та крайову області абонентські станції класифікуються як центральні або крайові залежно від їх місця розташування в макростільнику.

Часовий інтервал розділений на дві частини. У схемі SFR перший часовий інтервал відводиться для доступу до центральних абонентських станцій, які можуть вільно використовувати всю ширину частот протягом цього періоду (використання, аналогічне повторному використанню-1). Другий часовий інтервал призначений для доступу до крайових абонентських станцій. Весь частотний ресурс у другому інтервалі поділяється порівну на три піддіапазони, щоб крайові абонентські станції кожного сектору макростільника могли отримати доступ тільки до одного із трьох доступних піддіапазонів частот (використання, аналогічне повторному використанню-3), як видно на рис 4.3. Рівень потужності передачі для крайової області встановлюється втричі вище, ніж для центральної області.

Подальше представлення схеми розподілу для фемтостільників вирішує завдання розподілу ресурсів, яке було описано у попередньому абзаці, і не вимагає жодної синхронізації або сигналізації між двома типами мереж. Фемтостільники також класифікуються на центральні та крайові відповідно до їхнього положення у макростільнику, як видно на рис. 4.3. Нехай весь спектр частот розділений порівну на три піддіапазони: А, В і С.

Центральні фемтостільники в кожному секторі працюють виключно в одному піддіапазоні, так що крайові абонентські станції в цьому секторі не мають доступу до цього піддіапазону і відрізняються від частотних піддіапазонів, які використовуються центральними фемтостільниками в сусідніх секторах на тому самому макростільнику. Крайові фемтостільники в кожному секторі можуть використовувати два піддіапазони, до яких не має доступу крайовий абонентський обладнання в цьому секторі. Загалом, піддіапазони, доступні через крайові абонентські станції в кожному секторі, заборонені для фемтостільників, щоб уникнути сильного втручання передачі.

Ця процедура розділення ресурсів між макро- та фемтостільниками створює ефективну схему управління завадами між макро- та фемтосистемами з наступних причин:

1) Завади між макро- та фемтостільниками у центральній області існують лише протягом першого часового інтервалу.

2) Фемтосистеми мають змогу використовувати лише  $1/3$  виділеної ширини смуги, зменшуючи фемто-макро-завади у центральній області до  $1/3$ , що вигідно, оскільки фемтостільники передають лише  $1/3$  смуги пропускання.

3) Міжкомпонентні завади між макро- та фемтостільниками через граничні фемтостільники зводяться до мінімуму завдяки віддаленості цих фемтостільників від центральної макро-БС, яка утворює завади.

4) Завади між фемтостільниками, що створюються граничними фемтостільниками, обмежені лише центральними абонентськими обладнаннями і невеликі завдяки низькій потужності фемтостільників.

#### 4.4 Схема часткового повторного використання частоти (PFR)

Один з варіантів реалізації концепції повторного використання дробової частоти (FFR) відомий як часткове повторне використання частоти (PFR). Цей метод був введений як засіб розподілу ресурсів у мережах макростільників. Концепція PFR в певному сенсі подібна до SFR, оскільки вона також розділяє зону покриття макростільників на центральну і крайову області, базуючись на тому самому оптимальному радіусі, що використовується в розділі 4.3.

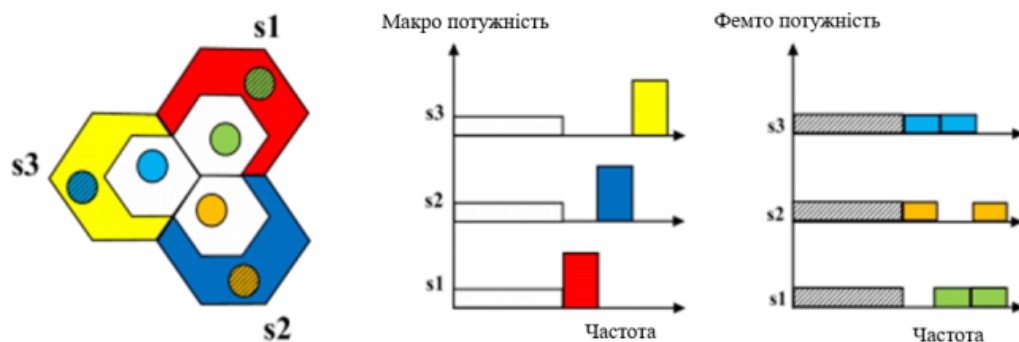


Рисунок 4.4 – Схема PFR

На рис. 4.4 детально розглядається процес розподілу частот для макростільників у концепції часткового повторного використання частоти (PFR). У цій схемі весь ресурс пропускної здатності системи розділений на 6 піддіапазонів, які поз-

начені як А, В, С, D, Е і F. Три з цих піддіапазонів (загальні піддіапазони) призначені для центрального МОК в будь-якому секторі, в той час як залишені три піддіапазони використовуються для доступу до граничного МОК у трьох різних секторах. Піддіапазон D, наприклад, може бути призначений граничному МОК у секторі 1. Рівень потужності передачі у піддіапазонах, що використовуються граничним МОК, складає  $2/3$  загальної потужності передачі, призначеної для макро-БС, тоді як у піддіапазонах для центрального МОК він становить  $1/3$ .

Також обговорюється процедура розподілу частот для фемтостільників, яка враховує розподіл ресурсів для макростільників, зазначений у попередньому параграфі. Центральні фемтостільники працюють на піддіапазонах, які не використовуються центральним МОК, в той час як крайові фемтостільники використовують ті ж самі піддіапазони, що і центральні фемтостільники, а також додаткові загальні піддіапазони. Ця схема дозволяє практично повністю відокремити частоти між різними мережами фемтостільникової системи, подібно до схеми повторного використання-3..

#### 4.5 Схема з м'яким дробовим повторним використанням частоти (SFRR)

М'яке дробове повторне використання частоти (SFRR) представляє собою інший варіант концепції динамічного розподілу ресурсів (FRR). Схоже на SFR і PFR, SFRR розділяє зону покриття макростільниками на дві основні області: центральну та крайову. Оптимальний радіус центральної області встановлено на рівні 63% від розрахованого радіуса внутрішнього кола. Концепція SFRR схожа на PFR, за винятком деяких особливостей, які будуть описані далі.

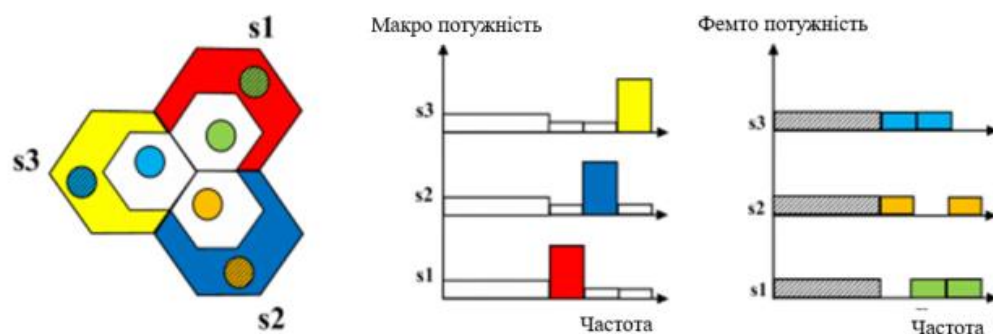


Рисунок 4.5 – Схема SFRR

На рис 4.5 зображено процес розподілу частот для макростільників, що використовується в схемі м'якого дробового повторного використання частоти (SFRR). Схоже на PFR, увесь пропуск пропускання системи розділений на 6 піддіапазонів. Три з цих піддіапазонів відведено для центрального МОК (загальні піддіапазони), а інші три піддіапазони розподілені між трьома різними секторами для граничного МОК (по одному піддіапазону на кожен). Головна відмінність між PFR і SFRR полягає в можливості центрального МОК будь-якого сектору отримувати доступ до двох додаткових піддіапазонів, відведених для граничного МОК інших двох секторів, але з обмеженою потужністю передачі для мінімізації завад. Це поліпшення має на меті підвищити ефективність використання спектра в порівнянні з PFR. Наприклад, якщо піддіапазон D призначено для граничного МОК у секторі 1, центральне МОК у секторі 1 може отримати доступ до загальних піддіапазонів A, B і C з певною потужністю, а також до піддіапазонів E і F, але з обмеженою потужністю для мінімізації завад. Четверть загальної потужності передачі, призначена для макро-БС, відведена для передачі по загальних піддіапазонах. Співвідношення рівня потужності передачі по піддіапазонах крайової області до рівня потужності передачі по двом додатковим піддіапазонам центральної області встановлено на рівні [10:1]

Рисунок 4.5 також ілюструє, що процес розподілу фемтостільників у схемі SFRR залишається незмінним порівняно з схемою PFR. Загалом можна визначити, що схема PFR є конкретним випадком загальної схеми SFRR, встановлюючи потужність додаткових піддіапазонів центральної області на нуль.

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ ВИКОРИСТАННЯ ФЕМТОСТІЛЬНИКІВ ДЛЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

### 5.1 Ефективність покриття

Ефективність покриття у фемтостільниковій мережі вимірюється за двома основними показниками карти SINR і 10%-ий SINR.

Карти SINR.

Ми поділили область інтересів (ROI) нашої мережі фемтостільників на невеликі квадратні пікселі, кожен розміром  $5\text{м} \times 5\text{м}$ . Кожен піксель представляється у декартових координатах  $x$ - $y$ . Ці координати дозволяють визначити відстань від різних пікселів до макро-базової станції, що має фіксоване розташування, або до випадково розташованих фемтосигналів у мережі. Кожен піксель відображає місцезнаходження фемтоклітини, якщо воно знаходиться в межах покриття фемтостільника, місцезнаходження внутрішньої клітини, якщо воно знаходиться всередині будинку, або місцезнаходження зовнішньої клітини на відкритій території в інших областях.

Використовуючи рівняння SINR та різні стратегії розподілу частот, ми можемо ефективно розрахувати значення SINR для кожного пікселя враховуючи його місце та застосовувану схему розподілу. Ці обчислені значення можна легко відобразити на картах SINR у декартових координатах  $x$ - $y$ , що відображають розподіл SINR як для внутрішніх, так і для зовнішніх клітин для кожної з розглянутих стратегій розподілу частот.

10%-ий SINR є ключовим показником для оцінки ефективності покриття в мережах фемтостільників. Низькі значення SINR часто є проблемою для об'єктів комунікації (ОК), які можуть бути внутрішніми об'єктами, розташованими на периферії стільників, віддаленими від обслуговуючих фемто-базових станцій або об'єктами внутрішнього та зовнішнього середовища, що впливають на передачу сильними завадами. Використовуючи 10%-ий SINR як ключовий показник, ми визначаємо характеристики покриття для всіх ОК в мережі фемтостільників. Даний показник обчислюється для різних стратегій розподілу частот та різних щільностей розгортання активних фемтостанцій.

## 5.2 Пропускна здатність

Ще одним аспектом, який аналізується в даному дослідженні, є продуктивність системи в плані пропускної здатності. Оцінка пропускної здатності системи залежить від вимірювань потужності користувачів. Розрахована ємність користувача для кожного об'єкта комунікації (ОК) визначає максимальну швидкість передачі даних, яку може досягти цей ОК, за умови, що він використовує всі доступні ресурси, які призначені для його обслуговуючої базової станції [21]. Підраховуючи потужність користувачів, яку досягають всі доступні ОК в мережі, ми можемо легко обчислити два середніх значення: середню потужність користувачів для об'єктів комунікації всередині будинків (МОК) та середню потужність користувачів для об'єктів комунікації зовні будинків (ФОК). Нарешті, загальна середня потужність користувачів усіх ОК в мережі виражається за допомогою середньозважених значень цих двох показників, використовуючи відповідне рівняння 5.1.

$$C_{\text{общ}} = \frac{N_{\text{МОК}} \times C_{\text{СКЕ}}^{\text{М}} + N_{\text{ФОК}} \times C_{\text{СКЕ}}^{\text{Ф}}}{N_{\text{МОК}} + N_{\text{ФОК}}}, \quad (5.1)$$

де:  $N_{\text{МОК}}$  і  $N_{\text{ФОК}}$  - кількість МОК і ФОК, доступних у мережах відповідно;  
 $C_{\text{СКЕ}}^{\text{М}}$  і  $C_{\text{СКЕ}}^{\text{Ф}}$  - це середня користувацька ємність МОК і ФОК відповідно;

Припустимо, що ця загальна середня користувацька ємність може висловлювати середню пропускну здатність всієї мережі. Розраховуємо, цю загальну середню пропускну здатність для різних схем розподілу частот і для різної щільності розгортання активних фемтостільників[21].

## 5.3 Якість обслуговування (QoS)

Показник якості обслуговування (QoS) у мережі фемтостільників вимірюється за допомогою ймовірності виникнення збоїв  $P_{\text{сб}}$ . Ця ймовірність визначається як ймовірність того, що всі об'єкти комунікації (МОК + ФОК) мають значення SINR, яке менше попередньо встановленого порогу SINR. Припустимо, що  $\gamma$  - це вектор, який включає всі розраховані значення SINR для МОК і ФОК, представлений як  $\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_M \ \gamma_{M+1} \ \gamma_{M+2} \ \dots \ \gamma_{M+F}]$ , де  $M$  і  $F$  - це

відповідно кількість МОК і ФОК у мережі. Тоді ймовірність виникнення збоїв може бути виражена математично за допомогою наступного виразу:

$$P_{сб} = P_r(\gamma < \gamma_{th}), \quad (5.2)$$

де:  $\gamma_{th}$  – порогове значення SINR.

Пояснення використання SINR для оцінки якості обслуговування (QoS) впливає з того, що значення SINR зазвичай відображають індикатор якості каналу (CQI). Об'єкти комунікації передають значення CQI як частину зворотного зв'язку на базову станцію (БС), яка обслуговує їх, для визначення схеми модуляції і кодування (MCS), що використовується в мережі 5G. MCS визначає швидкість передачі даних і, отже, впливає на QoS в мережі [21]. Ймовірність виникнення збоїв обчислюється для різних діапазонів порогових значень SINR та різних пропонуваніх схем розподілу частот.

#### 5.4 Критерії справедливості індекс Джайна

Справедливість мережі важлива, і лише висока пропускна здатність недостатня без гарантії рівного розподілу системних ресурсів. В нашій фемтостільниковій мережі 5G справедливість оцінюється за допомогою двох основних показників.

Індекс Джайна - це відомий параметр для вимірювання справедливості. Припустимо, ми маємо вектор  $C$ , який містить значення пропускної здатності користувачів, розраховані для МОК і ФОК у мережі, такий, що  $C = [C_1 C_2 \dots C_M C_{M+1} C_{M+2} \dots C_{M+F}]$ , де  $M$  і  $F$  - кількість МОК і ФОК відповідно. Індекс  $J$ , розрахований для цього вектора пропускної здатності користувачів, може бути виражений рівнянням 5.3.

$$J(C_1, C_2, \dots, C_M, C_{M+1}, \dots, C_{M+F}) = \frac{(\sum_{i=1}^{M+F} C_i)^2}{(M+F) \sum_{i=1}^{M+F} C_i^2} . \quad (5.3)$$

Індекс  $J$  розраховується для різних пропонуваніх схем розподілу частот та різної щільності розгортання активних фемтостільників.

Визначимо ще один показник для оцінки справедливості в мережі фемтостільників 5G, а саме - коефіцієнт справедливості. Цей коефіцієнт визначається як відношення 5%-ї ємності, розрахованої з вектора  $C$  (використовуваного для ро-

зрахунку індексу J), до загальної середньої потужності користувача, яка була обчислена в розділі 5.1.2. Математично це виражено у рівнянні 5.4.

$$\text{Коеф. справедливості} = \frac{5\% C_{\text{ємності}}}{C_{\text{заг}}} . \quad (5.4)$$

Коефіцієнт справедливості розраховується для різних запропонованих схем розподілу частот і для різної щільності активних фемтостільників.

### 5.5 Налаштування моделювання

Наша мобільна мережа 5G складається з семи макро базових станцій, і фемто базові станції випадковим чином розміщуються поблизу макро базових станцій. Кількість активних фемто базових станцій коливається від 30 до 180, з метою вивчення впливу різної щільності розгортання фемто базових станцій на загальну продуктивність мережі [22].

Максимально можлива кількість фемто базових станцій визначається у всіх можливих місцях розташування макро базових станцій, а зони покриття фемто станцій визначаються відповідно до цього. Максимально обслуговуюча потужність (МОП) або фемто обслуговуюча потужність (ФОП) розподіляється між доступними ресурсами для відповідної макро чи фемто базової станції. На кожній макро базовій станції встановлено три секторні антени для обслуговування трьох різних секторів. Максимальна дозволена потужність передачі для кожної секторної антени становить 20 Вт. Фемто базові станції використовують обмежену потужність передачі на рівні 20 мВт.

Модель каналу передбачає AWGN, і моделі втрат траєкторії обчислюються. Після цього значення SINR та пропускну здатності розраховуються для всіх обслуговуючих клітин, і, відповідно, використовуються для оцінки метрик продуктивності. Параметри системи моделювання подані в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Параметри моделювання

Параметр	Значення
Відстань між сайтами	1732 кв.м.
Модель поширення	Передмістя
Несуча частота	2 ГГц
Пропускна здатність	5 МГц
Розмір ШПФ	512
Відстань між піднесучими	15 кГц
Тип CP	Звичайний
Тепловий шум	-174 дБм/Гц
Затухання тіні SD	8 дБ
Параметр	Значення
Параметри eNB	
Кількість eNB	7
Кількість секторів на eNB	3
Максимальна потужність Tx	20 Вт
Максимальне посилення секторної антени	15 дБ
Антенa	$A(\theta) = -\min\{12\left(\frac{\theta}{90}\right)^2, 20\}$
Мінімальні втрати в муфті	70 дБ
Параметри HeNB	
Кількість HeNB на макростільник	30 ~ 180
Радіус фемтостільника	20 м
HeNB Tx Потужність	20 мВт
Посилення антени	0 дБ
Антена	Всеспрямована
Мінімальні втрати в муфті	40 дБ
Параметри ОК	
Посилення антени	0 дБ
Діаграма спрямованості антени	Всеспрямована
Коефіцієнт шуму прийому	9 дБ

## 5.6 Результати моделювання

На рисунку 5.1 представлена карта SINR для покриття Макро-Фемто з фокусом на макростанції у центрі для різних пропонованих схем розподілу частот з установленими 60 фемтостанціями. Комплексна карта відображає SINR для всіх можливих точок, за винятком зон покриття фемтостанцій, що представляють SINR для Фемто. На рисунку 5.1 розглядаються різні схеми розподілу частот, включаючи випадок вимкнених фемтостанцій та використання повторного використання-1. Рисунок 5.1 (а) показує, що схема повторного використання-1 добре покриває область центральної макростанції, але на краях виникають дірки через слабкий сигнал та ІСІ. Рисунок 5.1 (б) показує поліпшення продуктивності в області Фемто, але дірки в покритті на краях існують через некеровані завади між макро- та фемтостанціями. Рисунок 5.1 (в) та (г) представляють схеми повторного використання-3 та PFR, які ефективно усувають проблеми покриття на краях через повне розділення частот. Рисунок 5.1 (г) та (д) відображають показники SFR та SFFR відповідно, які також усувають дірки в покритті, забезпечуючи ефективність SINR.

На рисунку 5.2 представлена карта SINR для Макро в різних схемах розподілу частот із 60 фемтостанціями. Карта відображає всі можливі точки для Макро, при цьому зони покриття фемтостанцій вважаються внутрішніми для Макро, а не Фемто, як раніше. З рисунку 5.2 (б) видно, що схема повторного використання-1 погіршує ефективність внутрішніх зон через значні ІСІ та завади від фемтостанцій. Схеми повторного використання-3 та PFR надають найкращу ефективність, усуваючи проблеми з покриттям SINR.

Рисунок 5.3 показує карту SINR для Макро-Фемто з 150 фемтостанціями та вимкненими фемтостанціями для сценарію повторного використання-1. При щільному розгортанні фемтостанцій виникають проблеми міжрівневих завад, які заплутують сигнали. Пропоновані схеми розподілу частот вирішують ці проблеми, забезпечуючи задовільні рівні SINR, хоча існують сценарії дуже щільного розгортання, де міжрівневі завади залишаються проблемою.

Рисунок 5.4 досліджує ефективність внутрішніх МОК для сценарію з 150 фемтостанціями. Рисунок 5.4 (б) вказує на низьку ефективність внутрішніх МОК через сильні завади від сусідніх фемтостанцій. Схеми повторного використання-3

та PFR значно покращують ефективність в цьому випадку. Продуктивність SFR та SFFR нижча через спільне використання підканалів та між-фемтостанційні завади.

На рисунку 5.5 наведено відносні значення SINR (в децибелах) для 10% мережевих обслуговуючих клітин (МОК + ФОК) у порівнянні з кількістю активних фемтостанцій, що розгорнуті в мережі, за різними запропонованими схемами розподілу частот. Схема повторного використання-1 демонструє низькі значення 10%-вого SINR та, отже, непослідовну продуктивність, особливо при значній кількості активних фемтостанцій, де ефективність різко зменшується, як показано на графіку. Інші запропоновані схеми розподілу частот, такі як повторне використання-3 та PFR, суттєво покращують покриття та забезпечують стабільну продуктивність при збільшенні кількості активних фемтостанцій. Це пояснюється тим, що ці схеми (наприклад, повторне використання-3 та PFR) забезпечують ефективне частотне розділення між макро- та фемто-мережами. Щодо двох інших запропонованих схем розподілу частот, а саме SFR та SFFR, вони також забезпечують прийнятний рівень SINR для 10%, але нижчий, ніж у випадку повторного використання-3 та PFR.

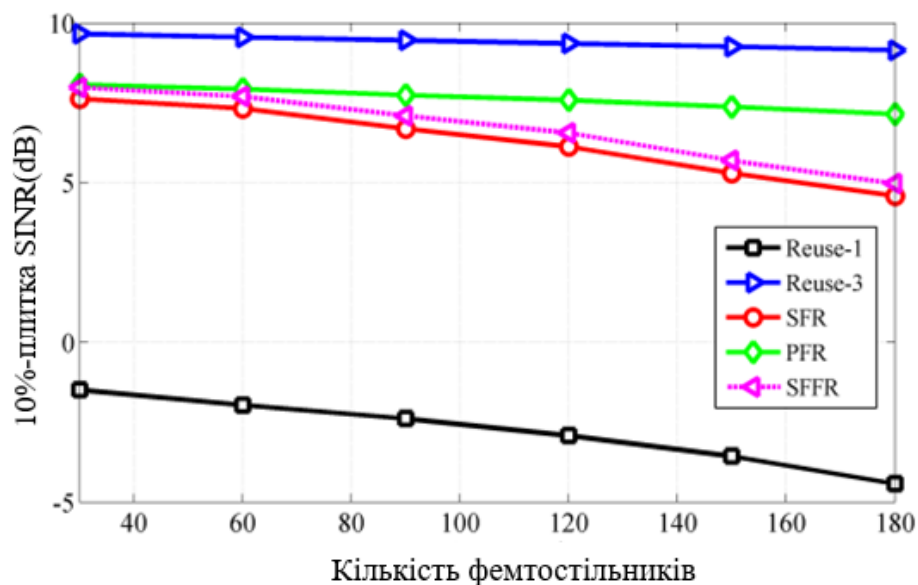


Рисунок 5.5 – 10%-ве SINR в залежності від кількості фемтостанцій

Метрикою, яку використовують для вимірювання пропускної здатності, є середня потужність користувача, яка розглядається у розділі 5.1.2. У рисунку 5.6 представлено середню пропускну здатність користувача (в мегабітах за секунду) в залежності від кількості активних фемтостанцій, розгорнутих у мережі, за різними схемами розподілу частот. Схема повторного використання-1 виявляється

найбільш ефективною лише для обмеженої кількості активних фемтостанцій. Це пояснюється тим, що потужність завад залишається обмеженою, і це може впливати на різні види обслуговуючих клітин [22]. Схема SFR продемонструвала найвищу продуктивність, особливо при збільшенні кількості активних фемтостанцій. З іншого боку, інші схеми, такі як повторне використання-3, PFR та SFFR, мають меншу спектральну ефективність, що впливає на загальну пропускну здатність в порівнянні з повторним використанням-1 та SFR. Рисунок 5.6 ілюструє, що при збільшенні кількості розгорнутих фемтостанцій загальна пропускна здатність системи може зростати, але середня пропускна здатність користувача може зменшуватися, особливо для схем повторного використання-1 та SFR.

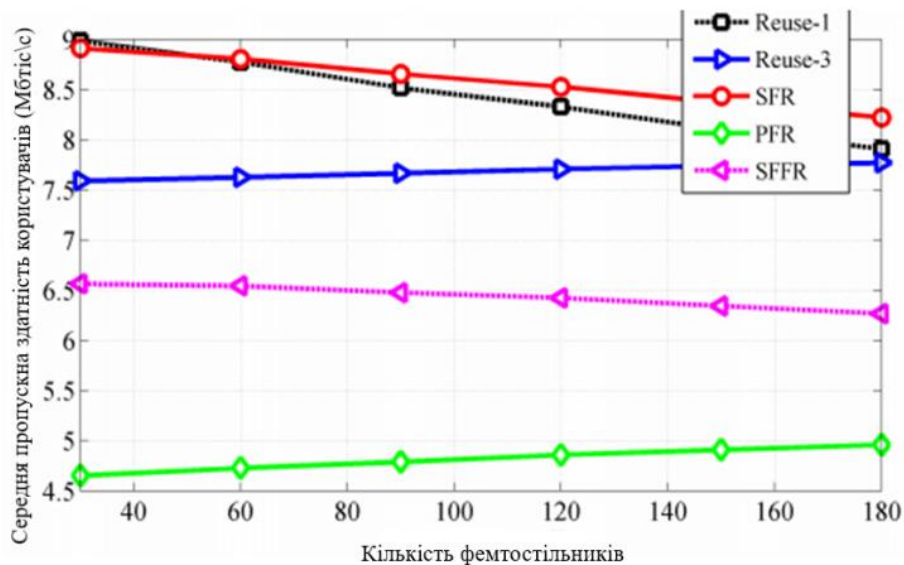


Рисунок 5.6 – Середня пропускна здатність користувачів в залежності від кількості фемтостільників

У якості метрики для оцінки якості обслуговування (QoS) використовується ймовірність збою, яка розглядається в розділі 5.1.3. На рисунку 5.7 представлена ймовірність виникнення збою в порівнянні зі заздалегідь визначеним пороговим значенням SINR. Кількість активних фемтостанцій встановлено на рівні 90.

Порогове значення SINR варіюється від -5 дБ до 30 дБ з кроком 5 дБ. Схема повторного використання-1 відзначається високою ймовірністю збою порівняно з іншими запропонованими схемами розподілу частот. Схема повторного використання-3, як і очікувалося, демонструє найвищу ефективність у відношенні якості обслуговування завдяки повному розділенню частот між макро- та фемтомережами, що призводить до значного зменшення міжрівневих завад. Інші запро-

поновані схеми розподілу частот (наприклад, SFR, PFR і SFFR) забезпечують практично такий же рівень ймовірності збою, який істотно нижчий, ніж у випадку повторного використання-1 і близький до повторного використання-3 для невеликих порогових значень SINR до 5 дБ.

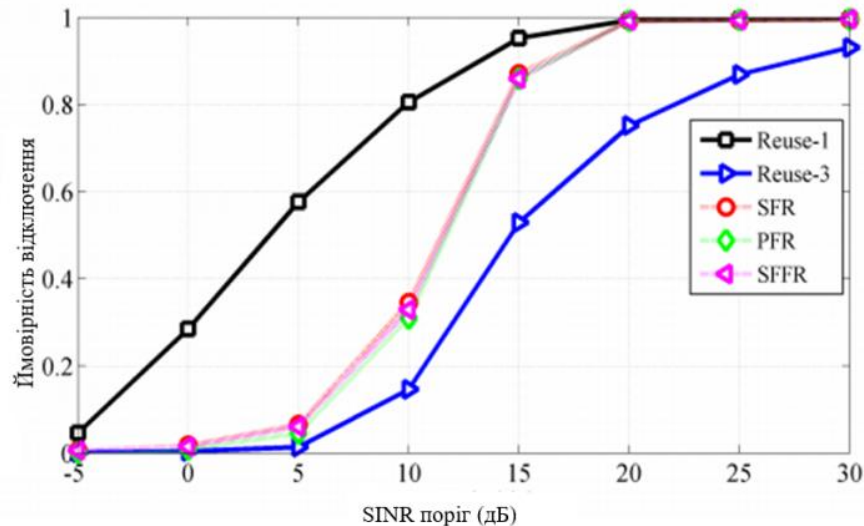


Рисунок 5.7 – Ймовірність збою в залежності від порогового значення SINR

Однією з основних метрик для оцінки справедливості є індекс  $J$ , який враховує значення ємності користувачів, як пояснено в розділі 5.1.4. На рисунку 5.8 відображено індекс  $J$  в залежності від кількості активних фемтостанцій для різних запропонованих схем розподілу частот.

Схеми повторного використання-3 та SFR виявляються найбільш ефективними з точки зору справедливості, хоча обидві дещо зменшуються при збільшенні кількості активних фемтостанцій. Інші запропоновані схеми (наприклад, повторне використання-1, PFR та SFFR) мають менші показники справедливості, як показано на рисунку 5.8. Також можна відзначити, що темп зменшення індексу  $J$  для схеми повторного використання-1 істотно вищий при збільшенні кількості активних фемтостанцій, порівняно з іншими двома схемами.

Ще однією ключовою метрикою для оцінки справедливості є коефіцієнт справедливості, який розглядається в розділі 5.4.

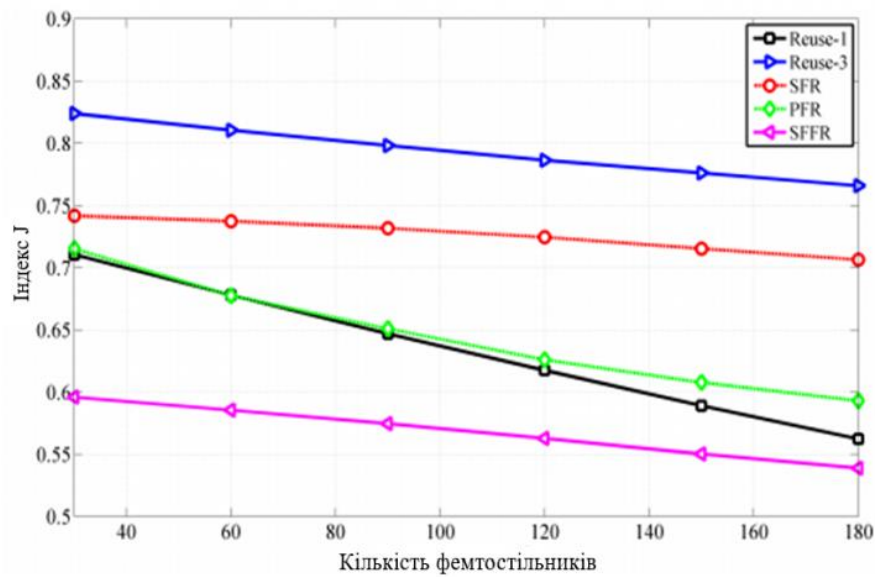


Рисунок 5.8 – Індекс J в залежності від кількості фемтостільників

На рисунку 5.9 відображено коефіцієнт справедливості в залежності від кількості активних фемтостанцій для різних схем розподілу частот. Аналогічно до результатів індексу J, схеми повторного використання-3 та SFR виявляються найбільш вдалими з точки зору справедливості, забезпечуючи майже рівномірну продуктивність при зростанні кількості активних фемтостанцій. Схеми PFR та SFFR також забезпечують рівноцінну ефективність в залежності від кількості активних фемтостанцій, хоча із меншими значеннями коефіцієнта справедливості, ніж у схем повторного використання-3 та SFR.

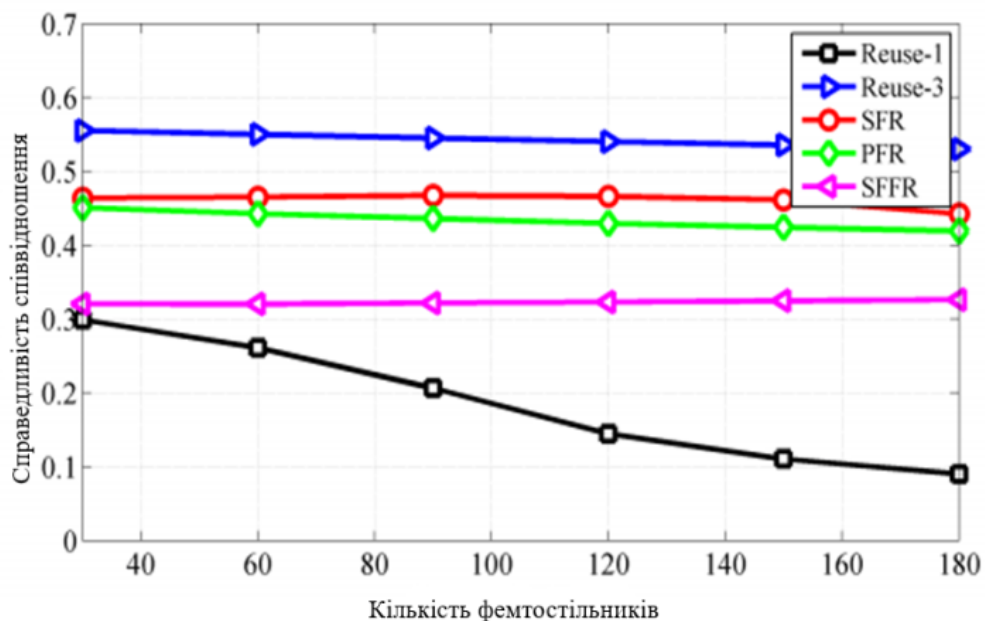


Рисунок 5.9 – Коефіцієнт справедливості в залежності від кількості фемтостільників

Зрештою, справедливість схеми повторного використання-1 суттєво погіршується при високій щільності фемтостанцій через непередбачені завади.

Для вибору найоптимальнішої схеми розподілу частот із запропонованих вище враховуємо компроміс між показником справедливості та показником пропускної здатності на підставі обчислених оцінок. Графіки 5.10 і 5.11 ілюструють цей компроміс для двох сценаріїв розгортання фемтостанцій. Сценарій з середньою щільністю фемтостанцій представлений на рисунку 5.10, де розгорнуто 90 активних фемтостанцій на кожному макростанції.

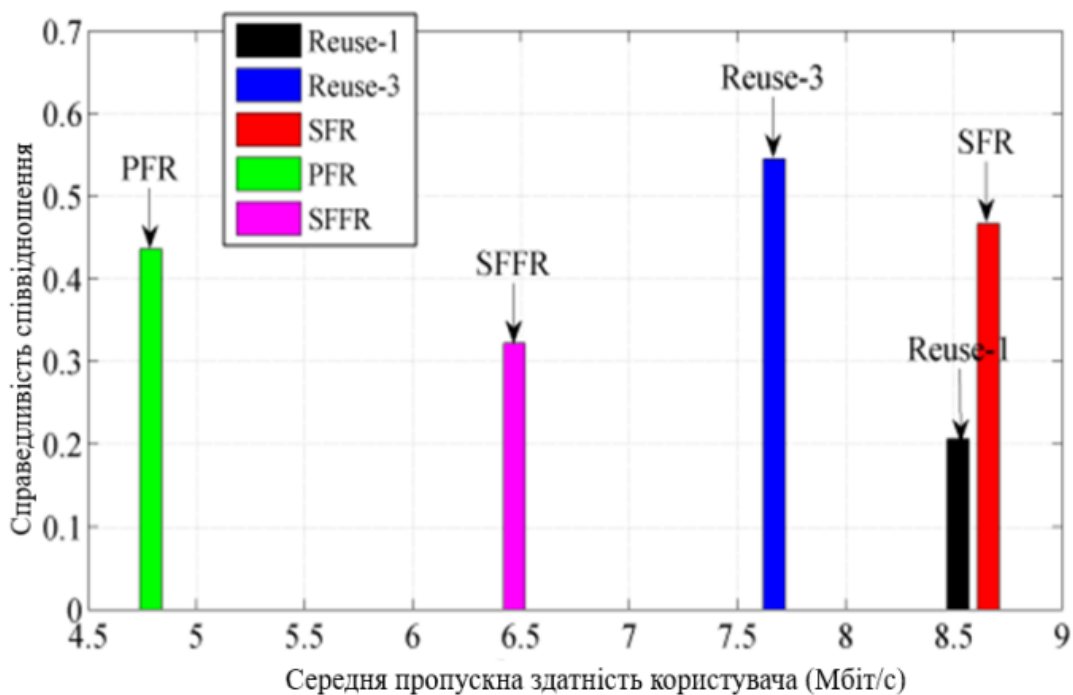


Рисунок 5.10 – Компроміс справедливості/пропускної здатності (90 активних фемтостільників)

Сценарій з високою щільністю фемтостанцій поданий на рисунку 5.11, де розгорнуто 150 активних фемтостанцій в межах кожного макростанції. Видно, що схеми повторного використання-3 та PFR можуть забезпечити велику справедливість, компенсуючи при цьому пропускну здатність. Схема повторного використання-1 забезпечує велику пропускну здатність за рахунок низького рівня справедливості та якості обслуговування.

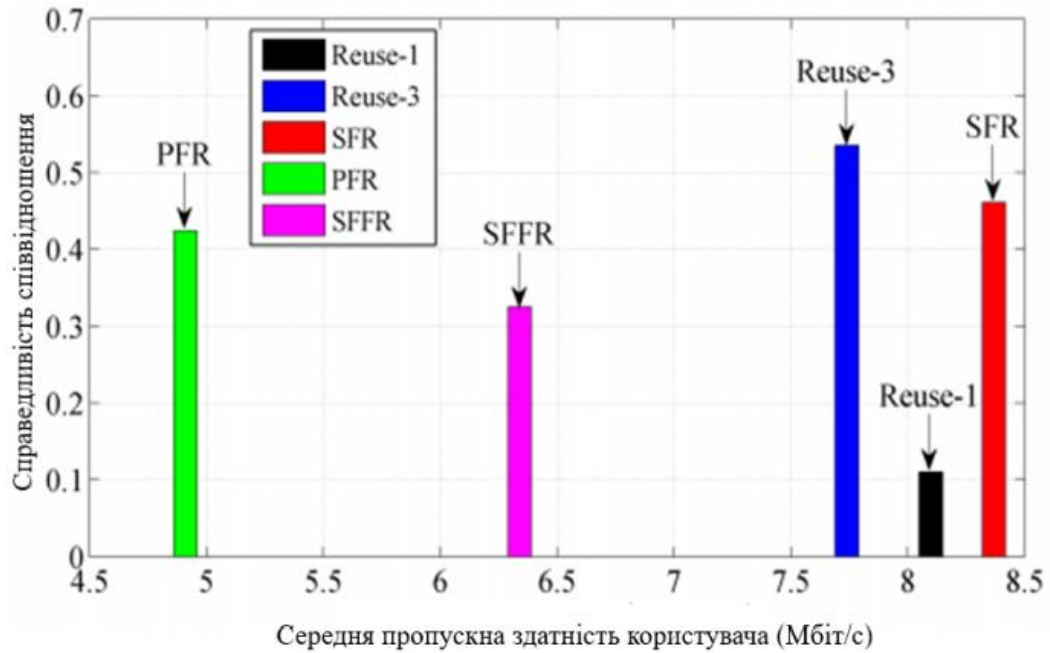


Рисунок 5.11 – Компроміс справедливості/пропускної здатності (150 активних фемтостільників)

Слід відзначити, що схема SFR може надати кращі показники пропускної здатності при прийнятному рівні справедливості, яке не значно відстоює від схем повторного використання-3 та PFR.

### 5.7 Оптимізація внутрішнього радіусу схеми м'якого частотного сигналу (SFR)

В заключенні розділу 5.3 можна зазначити, що використання запропонованої схеми SFR може представляти ефективний компроміс між забезпеченням справедливості та підвищенням продуктивності в нашій мережі фемтостанцій 5G.

Отже, у цьому відділі ми розглянемо можливість оптимізації радіуса внутрішньої області схеми SFR, використовуючи метод вичерпного пошуку, з метою досягнення максимальної продуктивності, як це показано нижче.

Вплив зміни радіуса внутрішньої області SFR на середню загальну потужність користувача представлено на рисунку 5.12. В цьому моделюванні внутрішній радіус SFR розглядається як змінна величина, яка змінюється від 50% до 90% радіусу стільника з кроком 5%. Два сценарії розгортання фемтостанцій

моделюються: менш щільний сценарій із 60 активними фемтостанціями та більш щільний сценарій із 150 активними фемтостанціями.

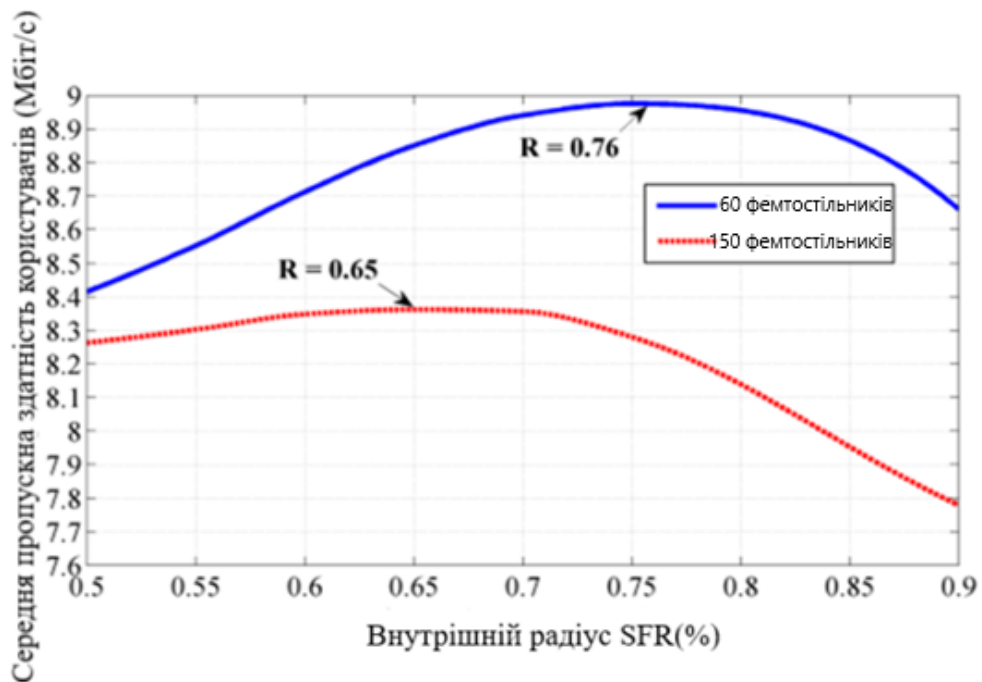


Рисунок 5.12 – Середня пропускну здатність користувачів в залежності від внутрішнього радіуса SFR

На рис. 5.12 відображено, що оптимальний внутрішній радіус, який максимізує загальну середню пропускну здатність користувачів і, відповідно, середню пропускну здатність, становить 76% від радіусу стільника для відносно невеликого сценарію розгортання. На тому ж графіку також вказано, що оптимальний внутрішній радіус, який максимізує загальну середню пропускну здатність користувачів і, отже, середню пропускну здатність, складає 65% радіусу стільника для випадку високого розгортання. Можна відзначити, що оптимальний радіус внутрішньої зони є параметром щільності розгортання і зменшується зі збільшенням кількості активних фемтостільників. Зменшуючи внутрішній радіус, більшість активних фемтостільників розглядаються як крайові, що можуть використовувати більше частотних піддіапазонів, ніж центральні фемтостільники, і, отже, мають вищу пропускну здатність [23].

Також досліджується вплив зміни радіусу внутрішньої зони (SFR) на показники справедливості. За використання однакових двох сценаріїв розгортання, вище згаданих, та одного й того ж діапазону внутрішніх радіусів SFR, на рис. 5.13

представлено співвідношення справедливості двох сценаріїв розгортання відносно радіусу внутрішньої зони SFR.

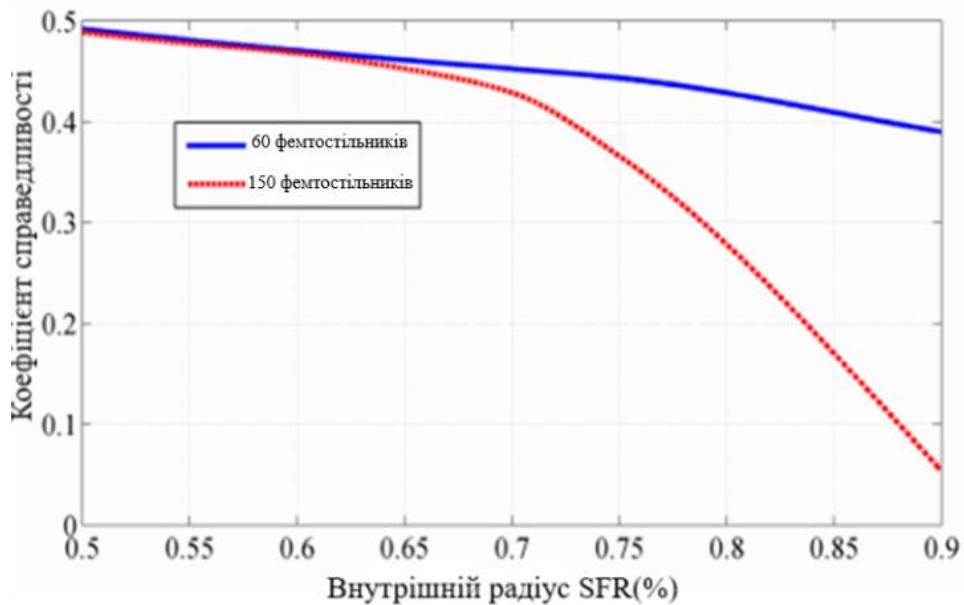
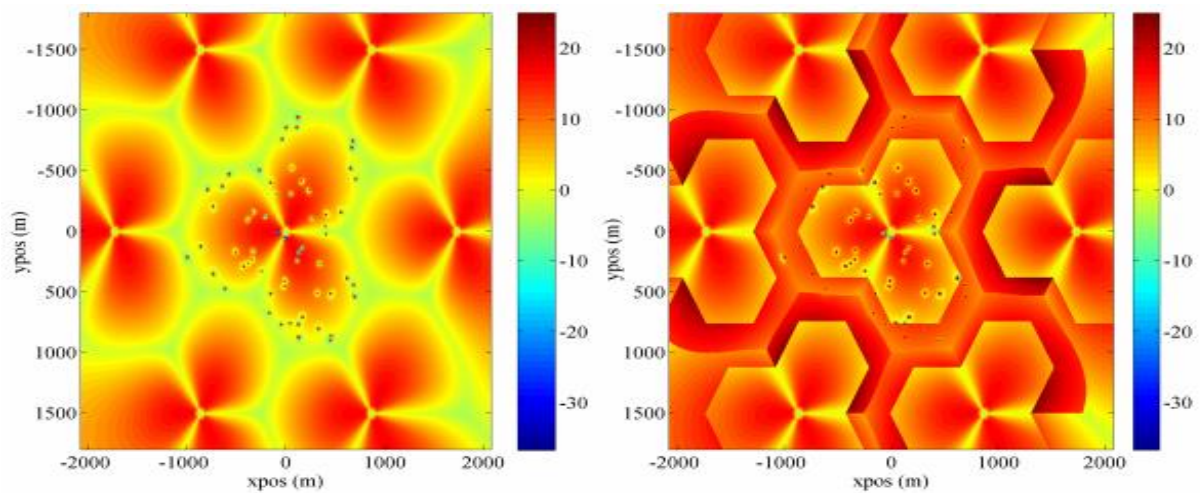


Рисунок 5.13 – Коефіцієнт справедливості в залежності від внутрішнього радіуса SFR

Рис. 5.13 вказує на те, що при реалізації менш амбіційного сценарію значення коефіцієнта справедливості значно не зменшується, оскільки внутрішній радіус SFR збільшується. У той же час ця ж фігура показує, що при більш високому сценарії розгортання коефіцієнт справедливості різко знижується через збільшення кількості перешкод [23]. З аналізу цієї діаграми також видно, що при двох оптимальних внутрішніх радіусах SFR, розрахованих у попередньому пункті як 76% та 65% від радіусу стільника, спостерігається невелике зниження коефіцієнта справедливості всього на 5% та 15% відповідно для двох сценаріїв розгортання. Ці висновки дозволяють зробити висновок, що обидва розраховані оптимальні внутрішні радіуси SFR, які становлять відповідно 76% і 65% радіусу стільника, забезпечують ефективні показники як щодо пропускну здатності, так і справедливості[23].

Завершуючи, порівнюємо розподіл SINR на рис. 5.14 між схемою повторного використання-1 із 60 активними фемтостанціями та запропонованою схемою

SFR із 60 активними фемтостанціями, використовуючи розрахований оптимальний внутрішній радіус SFR.



а) Схема повторного використання-1

б) Схема SFR

Рисунок 5.14 - Карта покриття макро-фемто SINR для схеми повторного використання-1 і SFR з оптимізованим внутрішнім радіусом (60 розгорнутих фемтостільників)

На рис. 5.14 (а) видно, що при використанні схеми повторного використання-1 спостерігається проблема з утворенням "дірок" у зоні покриття, яка відчутна як для макро- так і фемтостанцій. Ця проблема виникає як у межах покриття макростанцій, так і у зоні впливу фемтостанцій, за винятком областей, де відбувається перетин зон покриття фемтостанцій. На рис. 5.14 (б) можна побачити, що запропонована схема SFR із оптимізованим внутрішнім радіусом успішно вирішує проблему утворення "дірок" у крайових областях як для макро-, так і фемтостанцій. Щодо проблеми виникнення "дірок" у зоні впливу сусідніх фемтостанцій, вона залишається актуальною, проте це можна пом'якшити, використовуючи стратегії зниження міжфемтостанційних завад (IFI).

## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі досліджено ефективності методів територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G, визначили, що правильне та докладне планування є важливою передумовою успішного впровадження та оптимізації цієї передової технології.

Проведено розробку питань ефективності методів територіального планування мережі мобільного зв'язку 5G на основі використання частотних кластерних моделей з метою створення ефективного територіального плану з високим коефіцієнтом повторного використання частотного ресурсу та низьким відсотком невиконання показника якості рівня взаємних внутрішньо-системних завад.

Здійснено математичне моделювання ефективності методів територіального планування мережі мобільного зв'язку 5G на основі частотних кластерів в пакеті Matlab. Отримано результати розрахунків моделей територіальних планів за ефективністю і надано рекомендації, щодо впровадження в системи мобільного зв'язку 5G.

Наш аналіз різних методів показав, що ефективність територіального планування значно впливає на якість обслуговування, пропускну здатність та мінімізацію завад у мережах 5G. Враховуючи унікальні характеристики цієї технології, такі як висока швидкість передачі даних, велика кількість підключених пристроїв та використання різноманітних частот, важливо вдосконалювати і адаптувати методи планування для врахування цих факторів.

Проаналізовані методи, такі як оптимізація внутрішніх та зовнішніх радіусів покриття, впровадження схем використання фемтостанцій, виявилися ефективними у поліпшенні якості обслуговування та забезпеченні стабільної роботи мережі.

Однак важливо враховувати, що кожен регіон може вимагати індивідуального підходу до планування через різні умови та особливості. У майбутньому дослідницькому напрямку важливо продовжити розробку та вдосконалення методів територіального планування, щоб забезпечити оптимальне використання ресурсів та максимізувати переваги, які пропонує технологія 5G. Подальший розвиток цих підходів може сприяти створенню ефективних та надійних мереж мобільного зв'язку, що відповідають високим стандартам якості обслуговування в сучасному цифровому світі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mamta Agiwal, Abhishek Roy, and Navrati Saxena “Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, No. 3, Third quarter 2016, pp.1617-1655.
2. Nekovee M. “Radio Technologies for Spectrum Above 6 GHz - A Key Component of 5G” / Maziar Nekovee. – UK: Lead European 5G Research & Collaborations Samsung Electronics R&D, 2015. – 37 с.
3. Saad A. “5G mobile communications concepts and technologies”. Asif Saad. – 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, 2019. – 125 с.
4. 5G Physical Layer Principles, Models and Technology Components / [A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo та ін.]. – London Wall, London EC2Y 5AS, United Kingdom, 2018.
5. Mojtaba Vaezi, Amin Azari, Saeed R. Khosravirad, Mahyar Shirvanimoghaddam, M. Mahdi Azari, Danai Chasaki, IEEE, and Petar Popovski. “Cellular, Wide-Area, and Non-Terrestrial IoT: A Survey on 5G Advances and the Road Towards 6G”. IEEE, Communications Surveys & Tutorials. [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html) for more information. DOI 10.1109/COMST.2022.3151028.
6. Поповский В.В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах: учебник / В.В. Поповский, В. Ф. Олейник. – Харьков: СМІТ, 2011. – 362 с.
7. Поповский В.В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем: навч. Посібник / В.В. Поповський, С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник та ін.; під заг. ред. В.В. Поповського. – Харків: СМІТ, 2006. – 56
8. Amiri, I.; Dong, D.S.; Pokhrel, Y.M.; Gachhadar, A.; Maharjan, R.K.; Qamar, F. Resource Tuned Optimal Random Network Coding for Single Hop Multicast future 5G Networks. Int. J. Electron. Telecommun. 2019, 65, 463–469.
9. Bogale, T.E.; Le, L.B. Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: Potential benefits and challenges. IEEE Veh. Technol. Mag. 2016, 11, 64–75.
10. Chen, S.; Liang, Y.-C.; Sun, S.; Kang, S.; Cheng, W.; Peng, M. Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. IEEE Wirel. Commun. 2020,

27, 218–228.

11. Dahnil, D.P.; Hassan, R. Wireless Sensor Networks: A framework for community and educational gardens. *Adv. Sci. Lett.* 2018, 24, 1153–1157.

12. Elijah, O.; Rahman, T.A.; Orikumhi, I.; Leow, C.Y.; Hindia, M.N. An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. *IEEE Internet Things J.* 2018, 5, 3758–3773.

13. Faizan, Q. Enhancing QOS Performance of the 5G Network by Characterizing Mm-Wave Channel and Optimizing Interference Cancellation Scheme/Faizan Qamar. Ph.D. Thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 2019. *Electronics* 2020, 9, 1416 26 of 39.

14. Gachhadar, A.; Hindia, M.N.; Qamar, F.; Siddiqui, M.H.S.; Noordin, K.A.; Amiri, I.S. Modified genetic algorithm based power allocation scheme for amplify-and-forward cooperative relay network. *Comput. Electr. Eng.* 2018, 69, 628–641.

15. Gachhadar, A.; Qamar, F.; Dong, D.S.; Majed, M.B.; Hanafi, E.; Amiri, I.S. Traffic Offloading in 5G Heterogeneous Networks using Rank based Network Selection. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* 2019, 12.

16. Giordani, M.; Polese, M.; Mezzavilla, M.; Rangan, S.; Zorzi, M. Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Commun. Mag.* 2020, 58, 55–61.

17. Han, S.; Chih-Lin, I.; Xie, T.; Wang, S.; Huang, Y.; Dai, L.; Sun, Q.; Cui, C. Achieving High Spectrum Efficiency on High Speed Train for 5G New Radio and Beyond. *IEEE Wirel. Commun.* 2019, 26, 62–69.

18. Hashem, I.A.T.; Yaqoob, I.; Anuar, N.B.; Mokhtar, S.; Gani, A.; Khan, S.U. The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues. *Inf. Syst.* 2015, 47, 98–115.

19. Hassan, R.; Aman, A.H.M.; Latiff, L.A. Framework for Handover process using Visible Light Communications in 5G. In *Proceedings of the 2019 Symposium on Future Telecommunication Technologies (SOFTT)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 18–19 November 2019; pp. 1–4.

20. Hindia, M.N.; Qamar, F.; Abbas, T.; Dimiyati, K.; Abu Talip, M.S.; Amiri, I.S. Interference cancelation for high-density fifth-generation relaying network using stochastic geometrical approach. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2019, 15, 1550147719855879.

21. Hindia, M.N.; Qamar, F.; Rahman, T.A.; Amiri, I.S. A stochastic geometrical approach for full-duplex MIMO relaying model of high-density network.

Ad Hoc Netw. 2018, 74, 34–46.

22. Li, J.; Lei, G.; Manogaran, G.; Mastorakis, G.; Mavromoustakis, C.X. D2D communication mode selection and resource optimization algorithm with optimal throughput in 5G network. *IEEE Access* 2019, 7, 25263–25273.

23. Mohammed, N.A.; Mansoor, A.M.; Ahmad, R.B. Mission-Critical Machine-Type Communication: An Overview and Perspectives Towards 5G. *IEEE Access* 2019, 7, 127198–127216.