

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології
ORAN»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТСМ-23м
спеціальності 172 – Електронні комунікації
та радіотехніка

Токовий Ю.В.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ
Михалевський Д.В.
« 16 » 12 2024 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Семенов А.О.
« 16 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17- Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 - Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

"24" 09 2024 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Токовому Юрію Вадимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від "17" 09 2024 року № 310

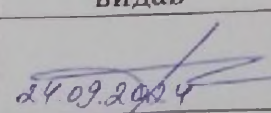
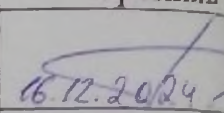
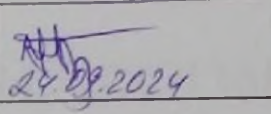
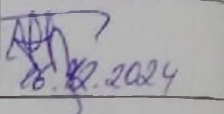
2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи ширина каналу передавання при діапазоні робочих частот FR1 ((Sub-6 GHz): 410 МГц – 7125 МГц) – 100 МГц; ширина каналу передавання при діапазоні робочих частот FR2 ((mmWave): 24,25 ГГц – 52,6 ГГц) – 400 МГц; користувацька пропускна здатність в залежності від кількості антен та ширини каналу - 20 Гбіт/с; сукупна пропускна здатність базової станції залежно від кількості RU і DU - від 10 Гбіт/с до 100 Гбіт/с; формат модуляції - 256-QAM; кількість антен (MIMO) - конфігурації від 2x2 до 64x64 MIMO; типова конфігурація для FR2 - Massive MIMO 32x32 або 64x64; сигнальна затримка FR1: <10 мс; сигнальна затримка FR2 для критично важливих застосувань: <1 мс; пропускна здатність інтерфейсу eCPRI залежно від кількості користувачів і антен - від 10 Гбіт/с до 25 Гбіт/с; щільність пристроїв FR1 - до 1 млн пристроїв на квадратний кілометр; щільність пристроїв FR2 - до 10 млн пристроїв на квадратний кілометр; потужність сигналу передавача (TX Power) - FR1: до 40 Вт (20-46 дБм); потужність сигналу передавача (TX Power) – FR2: до 1 Вт (0-30 дБм).

4. Зміст текстової частини: дослідження перспектив розвитку відкритої RAN; аналіз інформаційних технологій RAN в мережах 5G та OPEN RAN; особливості застосування RAN в безпроводних мережах; економічне обґрунтування доцільності реалізації науково-дослідної роботи

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Узагальнена архітектура SDN; високорівнева архітектура RAN в мережах
сегмент RAN з використанням розподіленої архітектури gNB; розподі
топології RAN; структура побудови мережі RAN; архітектура системи
розподіленим RAN; архітектура системи з централізованим RAN; архітект
системи з хмарним RAN; архітектура DSS на основі RIC.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	 24.09.2024	 16.12.2024
Економічна частина	Буреннікова Н.В., професор кафедри ЕПВМ	 24.09.2024	 16.12.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	16.09.2024р.	
3.	Дослідження перспектив розвитку відкритої RAN	12.10.2024р.	
4.	Аналіз інформаційних технологій RAN в мережах 5G та OPEN RAN	30.10.2024р.	
5.	Особливості застосування RAN в безпроводних мережах	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент

(підпис)

Токовий Ю.В.

Керівник роботи

(підпис)

Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Токовий Ю.В. Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 133 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 66 назв; рис.: 27; табл. 11.

Дослідження присвячено аналізу можливостей підвищення ефективності безпроводних мереж за допомогою використання технології Open Radio Access Network (ORAN). У роботі розглядаються основні принципи та архітектура ORAN, що базується на відкритих інтерфейсах і стандартах, які сприяють інтеграції рішень від різних постачальників. Особливу увагу приділено ключовим аспектам, таким як оптимізація радіоресурсів, зниження затримок і підвищення масштабованості мереж.

Запропоновано підхід до інтеграції інтелектуальних алгоритмів на основі штучного інтелекту та машинного навчання для адаптивного управління трафіком і оптимізації продуктивності мережі. Проведено порівняльний аналіз традиційних RAN-архітектур із ORAN, визначено переваги відкритої екосистеми для забезпечення економічної ефективності та прискорення впровадження інновацій.

Результати дослідження демонструють, що впровадження технології ORAN може суттєво підвищити ефективність безпроводних мереж, зокрема в умовах зростання обсягу трафіку та впровадження новітніх сервісів, таких як IoT і 5G. Отримані висновки можуть бути корисними для розробників і операторів телекомунікаційних систем у процесі модернізації мереж.

Метою роботи є підвищення ефективності безпроводних мереж шляхом впровадження та оптимізації технології Open Radio Access Network (ORAN), яка

забезпечує відкритість, гнучкість і масштабованість радіомереж. Це передбачає дослідження архітектурних особливостей ORAN, розробку підходів до інтеграції інтелектуальних алгоритмів для оптимізації використання ресурсів мережі, зниження затримок, підвищення пропускної здатності та адаптації мережі до динамічних умов експлуатації. Основні завдання наукової роботи:

1. Провести огляд існуючих підходів до побудови радіомереж, зокрема традиційних RAN-архітектур, їхніх переваг та недоліків.
2. Дослідити концепцію, архітектуру та функціональні компоненти Open Radio Access Network, включаючи відкриті інтерфейси та роль віртуалізації.
3. Розробити підходи до використання штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації управління ресурсами, адаптації до змін трафіку та покращення продуктивності мережі.
4. Провести комп'ютерне моделювання або симуляції для оцінки впливу ORAN на продуктивність мережі в різних сценаріях.
5. Здійснити порівняльний аналіз традиційних RAN-архітектур із ORAN за ключовими показниками ефективності, такими як затримки, пропускна здатність, гнучкість і економічна ефективність.
6. Сформулювати практичні рекомендації для впровадження ORAN у безпроводні мережі, зокрема для операторів телекомунікацій та розробників обладнання.
7. Проаналізувати можливості застосування ORAN у контексті новітніх технологій, таких як IoT, 5G і майбутні покоління мобільного зв'язку.

Робота містить чотири розділи. У першому розділі проведено дослідження перспектив розвитку відкритої RAN.

У другому розділі виконано аналіз інформаційних технологій RAN в мережах 5G та OPEN RAN.

У третьому розділі дослідженні особливості застосування RAN в безпроводних мережах.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ABSTRACT

UDC 621.396

Tokovy Y.V. Improving the efficiency of wireless networks based on ORAN technology. Master's qualification work in the specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 133 c.

In Ukrainian. Bibliography: 66 titles; Figures: 27; Table 11.

The research is devoted to the analysis of the possibilities of increasing the efficiency of wireless networks by using the Open Radio Access Network (ORAN) technology. The paper discusses the basic principles and architecture of ORAN, which is based on open interfaces and standards that facilitate the integration of solutions from different vendors. Particular attention is paid to key aspects such as optimization of radio resources, reduction of delays and increase of network scalability.

An approach to integrating intelligent algorithms based on artificial intelligence and machine learning for adaptive traffic management and network performance optimization is proposed. A comparative analysis of traditional RAN architectures with ORAN is carried out, and the advantages of an open ecosystem are identified to ensure cost-effectiveness and accelerate the introduction of innovations.

The results of the study demonstrate that the introduction of ORAN technology can significantly improve the efficiency of wireless networks, in particular in the context of traffic growth and the introduction of the latest services such as IoT and 5G. The findings can be useful for developers and operators of telecommunication systems in the process of network modernization.

The aim of the work is to increase the efficiency of wireless networks by implementing and optimizing the Open Radio Access Network (ORAN) technology, which provides openness, flexibility and scalability of radio networks. This involves studying the architectural features of ORAN, developing approaches to integrating intelligent algorithms to optimize the use of network resources, reduce latency,

increase throughput, and adapt the network to dynamic operating conditions. The main tasks of the research work are:

1. To review existing approaches to building radio networks, including traditional RAN architectures, their advantages and disadvantages.
2. To investigate the concept, architecture and functional components of the Open Radio Access Network, including open interfaces and the role of virtualization.
3. To develop approaches to the use of artificial intelligence and machine learning to optimize resource management, adapt to traffic changes, and improve network performance.
4. Conduct computer modeling or simulations to evaluate the impact of ORAN on network performance in various scenarios.
5. Perform a comparative analysis of traditional RAN architectures with ORAN in terms of key performance indicators such as latency, throughput, flexibility, and cost-effectiveness.
6. To develop practical recommendations for the implementation of ORAN in wireless networks, in particular for telecommunications operators and equipment developers.
7. Analyze the possibilities of using ORAN in the context of the latest technologies, such as IoT, 5G and future generations of mobile communications.

The paper consists of four sections. The first section studies the prospects for the development of the open RAN.

The second section analyzes RAN information technologies in 5G and OPEN RAN networks.

The third section studies the features of RAN application in wireless networks.

Section 4 provides an economic justification for the feasibility of this research work.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	9
1 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІДКРИТОЇ RAN	20
1.1 Особливості розвитку відкритих мереж RAN.....	21
1.2 Безпекові аспекти	27
1.3 Комерційне використання технології	29
1.4 Висновки до розділу 1	30
2 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ RAN В МЕРЕЖАХ 5G ТА OPEN RAN.....	31
2.1 Віртуалізація програмного та апаратного забезпечення мереж.....	31
2.2 Хмарний доступ до конфігурованих обчислювальних ресурсів мережі.....	35
2.3 Програмно-визначені мережі.....	39
2.4 Мережа радіодоступу наступного покоління.....	44
2.5 Обґрунтування розподіленої архітектури gNB.....	47
2.6 Варіанти топології розподіленої архітектури мережі	52
2.7 Розвиток фронтального зв'язку: eCPRI.....	55
2.8 Розвиток архітектури базової станції телекомунікаційної мережі	58
2.9 Віртуалізована RAN (vRAN).....	68
2.10 Висновки до розділу 2	69
3 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ RAN В БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ..	72
3.1 Особливості впровадження компонентних технологій 5G.....	74
3.2 Оптимізація MU-MIMO.....	78
3.3 Управління інформаційним трафіком.....	82
3.4 Динамічне спільне використання спектра.....	87
3.5 Оптимізація розподілу ресурсів NSSI.....	92
3.6 Висновки до розділу 3	97
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	100
4.1 Оцінювання наукового ефекту.....	100

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	103
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	104
4.2.2 Відрахування на соціальні заходи	107
4.2.3 Сировина та матеріали.....	107
4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	109
4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	110
4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	111
4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	112
4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	113
4.2.9 Службові відрядження.....	114
4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	115
4.2.11 Інші витрати.....	115
4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	115
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	117
4.4 Висновок до розділу 4.....	118
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121
Додаток А Ілюстративна частина.....	127
Додаток Б Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи.....	133

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- 1G - перше покоління мобільного зв'язку
- 2G - друге покоління мобільного зв'язку
- 3G - третє покоління мобільного зв'язку
- 3GPP - третє покоління мобільного зв'язку партнерський проект
- 4G - четверте покоління мобільного зв'язку
- 5G - п'яте покоління мобільного зв'язку
- 5GS - система 5G
- 6G - шосте покоління мобільного зв'язку
- AI - штучний інтелект
- AMF - функція управління доступом і мобільністю (5G)
- API - інтерфейс прикладного програмування
- AR - доповнена реальність
- BBU - блок базового діапазону
- CA - агрегація операторів зв'язку
- CAPEX - капітальні витрати
- CDMA - множинний доступ з кодовим поділом каналів
- CI - хмарна інфраструктура
- CM - управління конфігурацією
- CN - основна мережа
- CNF - функція хмарної мережі
- CoMP - координувана багатоточкова точка (передача/прийом)
- CPRI - загальний радіоінтерфейс загального користування
- CPU - центральний процесор
- C-RAN - хмарний RAN
- DL - низхідний канал зв'язку
- DSS - динамічний розподіл спектру
- eSIM - вбудована SIM-карта
- ETSI - Європейський інститут телекомунікаційних стандартів

E-UTRAN - розвинена універсальна наземна мережа радіодоступу (4G)

FDMA - множинний доступ з частотним розділенням каналів

FFT - швидке перетворення Фур'є

FR - діапазон частот

GPS - система глобального позиціонування

GPU - графічний процесор

GSM - глобальна система мобільного зв'язку (2G)

GUI - графічний інтерфейс користувача

HSM - апаратний модуль безпеки

IDS - система виявлення вторгнень

IEEE - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки

IEFG Фокус-група із залучення промисловості (Альянс O-RAN)

iFFT - інвертоване швидке перетворення Фур'є

IoT - інтернет речей

ISO - Міжнародна організація зі стандартизації

MCE - Міжнародний союз електрозв'язку

ITU-T - Сектор стандартизації електрозв'язку MCE

KPI - ключовий показник ефективності

L1 - рівень 1

LTE-A - LTE вдосконалений (4G)

MAC - контроль доступу до середовища

MEC - периферійні обчислення з множинним доступом

ML - машинне навчання

NB-IoT - вузькосмуговий IoT

NE - мережевий елемент

NF - мережева функція

NG-RAN - мережа радіодоступу наступного покоління

NMS - система управління мережею

NSA - неавтономний (4G, 5G)

OFDM - ортогональний мультиплекс з частотним розділенням каналів

O-RAN - відкритий альянс RAN

PHY - фізичний рівень

QoS - якість обслуговування

RAN - мережа радіодоступу

SA - автономний (5G)

SDN - програмно-визначені мережі

TDM - мультиплексування з часовим поділом

TDMA - множинний доступ з часовим розділенням каналів

VLAN - віртуальна локальна мережа

VM - віртуальна машина

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність стандартизації систем мобільного зв'язку є надзвичайно важливою в умовах сучасного розвитку телекомунікацій. Стандартизація спрямована на досягнення високого рівня сумісності між різними компонентами мережі, що дозволяє операторам мобільного зв'язку створювати гнучкі та ефективні мережі, використовуючи обладнання від різних постачальників. Це є ключовою перевагою для операторів, оскільки дозволяє вибирати найбільш ефективні та економічно вигідні рішення, оптимізуючи витрати і підвищуючи ефективність обслуговування.

Однак, як зазначено, на практиці досягнення повної сумісності між компонентами радіомережі доступу (RAN) виявилось досить складним. Це пов'язано з тим, що обладнання, розроблене різними постачальниками, часто глибоко інтегроване в архітектуру мережі, що ускладнює або робить неможливим поєднання їх рішень у межах однієї системи RAN. Таке становище породжує технічні обмеження і залежність операторів від одного постачальника, що суперечить основним цілям стандартизації.

Ситуація стала поштовхом до розвитку нових концепцій, таких як Open RAN (відкрита радіомережа доступу), що ставить за мету відкрити інтерфейси між різними компонентами радіомережі, забезпечуючи справжню інтероперабельність обладнання від різних постачальників. Open RAN допомагає зменшити монополію окремих постачальників і стимулювати конкуренцію, що може призвести до зниження витрат і пришвидшення технологічних інновацій.

Таким чином, стандартизація та розвиток таких концепцій, як Open RAN, є критично важливими для досягнення справжньої інтероперабельності та гнучкості в мобільних мережах наступного покоління, таких як 5G.

Останні зусилля галузі мобільного зв'язку щодо розширення специфікацій 3GPP для архітектури радіомережі доступу (RAN) є важливим кроком до підвищення гнучкості та інтероперабельності мереж. Стандартизація

інтерфейсів всередині RAN дозволяє операторам здійснювати дезагрегацію (розподіл на компоненти) мережі на набір сумісних елементів. Це значно змінює ринок і відкриває нові можливості для залучення різних зацікавлених сторін.

Головний ефект дезагрегації полягає в тому, що нові гравці можуть спеціалізуватися на окремих компонентах RAN, а не пропонувати повний стек рішень. Це абстрагування контактних точок (тобто стандартних інтерфейсів між компонентами) створює умови для більшої прозорості та інтеоперабельності системи. Таке середовище сприяє конкуренції, оскільки оператори мобільного зв'язку отримують можливість вибирати компоненти від різних постачальників, що відповідають їхнім конкретним потребам.

Крім того, дезагрегація RAN підтримує інновації, оскільки компанії можуть зосередитися на покращенні окремих елементів системи, а не цілої архітектури. Це призводить до збільшення кількості доступних рішень для операторів, що дозволяє їм бути більш гнучкими при розгортанні мереж і адаптувати їх під специфічні сценарії, наприклад, для різних географічних регіонів або типів трафіку. Впровадження цієї моделі на практиці дозволяє операторам мобільного зв'язку краще керувати витратами та продуктивністю мереж, одночасно отримуючи можливість розгортати індивідуальні рішення для спеціальних умов, таких як підвищена щільність абонентів або вимоги до низької затримки.

Нове середовище мобільних мереж, зокрема концепція Відкритого радіочастотного доступу (Open RAN), дійсно знаходиться на початкових етапах свого розвитку, незважаючи на активні зусилля галузі щодо його впровадження. Open RAN стає все більш реальним завдяки ряду практичних розгортань та прогресу в стандартизації, але, як ви правильно зазначили, цей процес стикається з низкою складних викликів.

Однією з ключових проблем є те, що нові компоненти Open RAN, зокрема радіоінтелектуальний контролер (RIC), поки що не можуть повністю реалізувати свій потенціал. RIC дозволяє використовувати штучний інтелект і машинне навчання для оптимізації управління радіомережами, але на даному етапі оператори ще навчаються працювати з цими технологіями. Оскільки рішення на

базі штучного інтелекту передбачають складні варіанти використання, інтеграція їх у повсякденні операційні процеси вимагає часу.

Ще одним викликом є перехід до віртуалізації RAN. Традиційна архітектура радіомереж значною мірою залежить від спеціалізованого обладнання, тоді як віртуалізовані мережі покладаються на програмні рішення, що працюють на стандартному апаратному забезпеченні. Це потребує від операторів нових навичок у сферах оркестрування та управління віртуалізованими компонентами. Оркестрування є ключовою частиною цього процесу, оскільки дозволяє керувати різними компонентами мережі, їхнім масштабуванням, оновленням і підтримкою з єдиного централізованого рішення.

Крім того, для реалізації повного потенціалу Open RAN необхідно продовжувати роботу над стандартизацією інтерфейсів, щоб забезпечити справжню інтероперабельність між різними постачальниками обладнання. Це особливо важливо для впровадження нових можливостей, таких як динамічна оптимізація радіоресурсів і підвищена ефективність мережі через застосування інтелектуальних алгоритмів.

Незважаючи на ці виклики, Open RAN має значний потенціал для зміни ринку мобільних мереж, стимулюючи інновації, зниження витрат і більшу гнучкість для операторів. Проте цей перехід вимагає часу і ґрунтовної підготовки з боку всіх учасників ринку.

Розгортання концепції Відкритої радіомережі доступу (Open RAN) є складним процесом, який вимагає не лише технологічних інновацій, але й вдосконалених методів вимірювання, тестування та оптимізації. Ці аспекти є ключовими для забезпечення надійної продуктивності системи не лише на етапі розробки, але й протягом усього життєвого циклу мережі.

RAN є найбільш витратною частиною мобільної мережі, на яку припадає близько 70% капітальних інвестицій оператора. Це робить вимоги до якості та ефективності мережі надзвичайно високими. Для належного функціонування Open RAN потрібні вдосконалені методики тестування і моніторингу на

кожному етапі: від дослідно-конструкторських випробувань до постійної оптимізації після розгортання.

Незважаючи на активний розвиток і зростання кількості публікацій, практичні деталі впровадження Open RAN і її реальні можливості залишаються недостатньо висвітленими. Основні виклики включають:

1. Стандартизація та сумісність: Як інтегрувати рішення від різних постачальників з мінімальними проблемами, пов'язаними з інтероперабельністю.

2. Продуктивність мережі: Необхідно чітко розуміти, як Open RAN впливатиме на продуктивність у реальних умовах, включаючи затримки, пропускну здатність і управління радіоресурсами.

3. Методики тестування: Відсутність конкретних публікацій і практичних посібників, які б детально описували процеси тестування та вимірювання ефективності Open RAN, є серйозною перешкодою для її масштабного впровадження. Необхідні нові підходи до тестування віртуалізованих компонентів, оркестрації та роботи мережі в динамічних умовах.

4. Впровадження штучного інтелекту: Хоча Open RAN передбачає використання технологій штучного інтелекту для покращення управління мережею, оператори поки що не мають достатнього досвіду для впровадження таких рішень на практиці. Необхідні дослідження та конкретні сценарії, які б показували ефективність таких рішень.

Зважаючи на важливість цих питань, галузь активно працює над розробкою нових стандартів і методик, що забезпечать успішне розгортання Open RAN. Однак для того, щоб ця концепція набула повного визнання та стала широко впроваджуваною, потрібен час для вирішення вказаних проблем та створення надійної бази знань і практичних рекомендацій.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень показує, що мобільні мережі пройшли значну еволюцію з моменту свого створення у 1980-х роках. Кожне нове покоління зв'язку (від 2G до 5G) спирається на досягнення попередніх версій, щоб покращити продуктивність, пропускну здатність і якість послуг для кінцевих користувачів. П'яте покоління (5G) стало важливим етапом

на цьому шляху, пропонуючи нові можливості завдяки технологіям віртуалізації та стандартизації.

П'яте покоління (5G), на відміну від своїх попередників, суттєво змінило підхід до побудови мережевої архітектури. Одним із ключових інноваційних рішень 5G стало впровадження архітектури, заснованої на послугах (SBA), що дозволяє операторам гнучкіше керувати мережею. Цей підхід сприяє більш ефективному управлінню ресурсами і спрощенню процесів інтеграції нових функцій.

До недавнього часу мобільні оператори традиційно керували комплексом апаратних і програмних рішень, що були тісно інтегровані і фіксовані у своїй функціональності. Віртуалізація мережевих функцій (NFV) стала новим кроком в еволюції мобільного зв'язку. Вона дозволила операторам переміщати мережеві функції з апаратного забезпечення на програмне, що дає можливість запускати різні мережеві функції на загальному обладнанні, тим самим знижуючи витрати і підвищуючи гнучкість.

Однією з найбільш значущих інновацій стало впровадження концепції Open RAN (відкритої радіомережі доступу), яка зосереджена на відкритті інтерфейсів між різними компонентами радіомережі. Це дозволяє операторам мобільного зв'язку інтегрувати рішення від різних постачальників, що зменшує залежність від окремих виробників і стимулює конкуренцію. Оператори отримують більшу свободу у виборі компонентів мережі, що дозволяє їм створювати більш ефективні та індивідуальні рішення для різних сценаріїв використання.

Стандартизація також продовжує відігравати важливу роль в еволюції мереж. Існуючі органи стандартизації, такі як 3GPP, постійно оновлюють моделі мережевої архітектури, щоб врахувати зміни, пов'язані з віртуалізацією та Open RAN. В результаті оператори мають більше можливостей для гнучкого проектування та розгортання своїх мереж, адаптуючи їх до зростаючих вимог ринку і користувачів.

Таким чином, сучасні дослідження вказують на те, що 5G та технології, такі як Open RAN і віртуалізація мережевих функцій, стали важливими

інструментами для мобільних операторів, що дозволяють їм ефективніше розвивати свої мережі і підвищувати їхню гнучкість, продуктивність і масштабованість [1].

Радіомережа є однією з найскладніших і найважливіших частин будь-якої бездротової комунікаційної системи через свою непередбачуваність і динамічні зміни умов радіоінтерфейсу. Такі змінні, як відхилення пікового і середнього навантаження, впливають на продуктивність мережі, і їх важко точно передбачити. Це створює виклики для операторів при плануванні та забезпеченні стабільної якості обслуговування.

Бюджет радіолінії допомагає операторам робити прогнози на основі середньої ситуації, проте існують багато непередбачуваних аспектів, які можуть вплинути на кінцеву якість радіосигналу. Наприклад, вплив перешкод, погодних умов або змін у щільності користувачів у певній зоні може значно змінювати продуктивність мережі.

Незважаючи на ці труднощі, нові технологічні концепції, такі як Open RAN та віртуалізація мереж, можуть підвищити продуктивність радіомереж за рахунок більш оптимальної адаптації до змінних умов. Open RAN дозволяє оператору більш гнучко керувати мережею, вибираючи різні компоненти системи, що можуть краще відповідати поточним вимогам пропускну здатності або продуктивності. Це, в свою чергу, сприяє зниженню витрат та підвищенню ефективності мережі.

Однак, одна з головних проблем традиційних радіомереж полягає в їх закритій архітектурі. Інтерфейси та системи управління радіомережами зазвичай контролюються обмеженою кількістю постачальників інфраструктури, що ускладнює доступ до ринку новим гравцям. Це створює монополію певних компаній на ринку обладнання для радіомереж, що зменшує інновації та обмежує можливості впровадження альтернативних рішень.

Open RAN частково вирішує цю проблему, оскільки спрямований на відкриття інтерфейсів між компонентами системи, що дозволяє різним постачальникам обладнання брати участь у створенні інфраструктури. Це не

лише сприяє конкуренції, але й стимулює впровадження нових рішень, таких як алгоритми на основі штучного інтелекту для оптимізації радіоресурсів та підвищення продуктивності.

Впровадження Open RAN може допомогти операторам вирішити проблеми з непередбачуваністю радіоінтерфейсу за рахунок динамічного управління ресурсами та більш гнучких моделей розгортання. Важливо відзначити, що така відкритість також може прискорити впровадження інновацій та нових технологій у радіомережах, надаючи операторам більшу свободу у виборі рішень та постачальників [2].

Відкрита RAN (Open RAN) дійсно починає ставати реальністю після кількох років концептуальних дискусій, особливо завдяки розгортанню другої фази системи 5G. Одним із ключових факторів, що стимулює цей процес, є діяльність Альянсу O-RAN, який розробив нові специфікації, що доповнюють стандарти 3GPP. Це дозволяє ще більше відокремити компоненти радіомережі доступу (RAN) і відкриває нові можливості для впровадження інноваційних рішень.

Специфікації O-RAN створюють стандартизовані інтерфейси, які дозволяють різним постачальникам обладнання та програмного забезпечення пропонувати сумісні модулі, які можна легко інтегрувати в єдину систему RAN. Це дає операторам більше свободи у виборі постачальників і дозволяє використовувати модулі від різних компаній, що забезпечує гнучкість та інтероперабельність.

Одним із ключових досягнень O-RAN є створення умов для участі не лише традиційних постачальників телекомунікаційного обладнання, але й нових гравців на ринку. Це дозволяє нетрадиційним зацікавленим сторонам — таким як компанії з галузей ІТ, хмарних технологій і штучного інтелекту — брати участь у створенні компонентів для радіомереж. Такий підхід сприяє розвитку більш конкурентного ринку та стимулює інновації, що, своєю чергою, може призвести до зниження витрат і підвищення ефективності мережі.

Розширення сценаріїв розгортання Open RAN також сприяє гнучкості у розбудові мереж, дозволяючи операторам адаптувати інфраструктуру під

конкретні умови та потреби. Наприклад, завдяки цьому можна краще обслуговувати густонаселені міські райони або спеціалізовані сценарії з низькою затримкою, що особливо важливо для другої фази розгортання 5G.

Таким чином, Open RAN не тільки розвиває архітектуру мобільних мереж, але й створює можливості для широкого кола учасників ринку. Це робить мережі майбутнього більш гнучкими, відкритими та інноваційними [3].

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження та розробка підходів до підвищення ефективності безпроводних мереж на основі впровадження технології Open Radio Access Network (ORAN). Це включає аналіз архітектури ORAN, оптимізацію використання мережевих ресурсів, впровадження інтелектуальних алгоритмів управління та оцінку їх впливу на продуктивність і надійність сучасних безпроводних мереж.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1. Провести аналіз існуючих досліджень і рішень у сфері безпроводних мереж та технології ORAN, визначити їх переваги, недоліки та потенційні напрямки вдосконалення.
2. Вивчити структурні особливості ORAN, включаючи відкриті інтерфейси, функціональні компоненти (CU, DU, RU) та їх взаємодію з традиційними RAN-архітектурами.
3. Дослідити, як використання технології ORAN впливає на ключові показники ефективності мережі, такі як пропускна здатність, затримки, енергоспоживання та гнучкість.
4. Розробити або адаптувати алгоритми штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) для оптимізації управління ресурсами в ORAN.
5. Здійснити порівняння продуктивності мереж на основі ORAN із традиційними RAN-архітектурами, зокрема за такими параметрами, як вартість впровадження, масштабованість і підтримка інноваційних сервісів (IoT, 5G).
6. Сформулювати практичні рекомендації для впровадження технології ORAN в існуючі та перспективні безпроводні мережі.

7. Проаналізувати переваги впровадження ORAN з точки зору зниження витрат, підвищення швидкості впровадження інновацій та створення конкурентних переваг для операторів зв'язку.

Об'єктом дослідження є безпроводні телекомунікаційні мережі, зокрема їхня архітектура, продуктивність і ефективність функціонування в умовах впровадження технології Open Radio Access Network (ORAN).

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні рішення, спрямовані на підвищення ефективності безпроводних мереж шляхом впровадження та оптимізації технології Open Radio Access Network (ORAN).

Методи досліджень базуються на використанні: методів математичного моделювання для аналізу та оптимізації архітектури мережі ORAN, визначення оптимальних параметрів роботи та прогнозування поведінки системи в різних умовах; комп'ютерного моделювання для створення віртуальних середовищ, в яких можна протестувати різні сценарії роботи мережі, оцінити вплив змін конфігурації та визначити потенційні вузькі місця; алгоритмічних методів для розробки ефективних алгоритмів управління ресурсами, маршрутизації даних, балансування навантаження та оптимізації енергоспоживання в мережах ORAN; експериментальних методів для проведення польових випробувань та лабораторних тестів, що дозволяють перевірити теоретичні моделі та алгоритми в реальних умовах роботи безпроводних мереж; методів оцінювання продуктивності для вимірювання ключових показників ефективності (KPI) мережі, таких як пропускна здатність, затримка, надійність та якість обслуговування, з метою визначення областей для покращення; методів економічного аналізу для оцінки витрат та вигод впровадження технології ORAN, визначення економічної доцільності проектів, а також аналізу впливу на загальну вартість володіння (TCO) безпроводними мережами; методів багатокритеріального аналізу для прийняття комплексних рішень, що враховують одночасно різні фактори та критерії, такі як технічні характеристики, економічна ефективність, екологічний вплив та соціальні аспекти.

Кожен із зазначених методів відіграє важливу роль у комплексному підході до підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN. Математичне та комп'ютерне моделювання дозволяють створювати точні моделі та симуляції, які допомагають у плануванні та оптимізації мережі. Алгоритмічні методи сприяють розробці інтелектуальних рішень для управління ресурсами. Експериментальні методи забезпечують перевірку теорій у реальних умовах, а методи оцінювання продуктивності допомагають вимірювати досягнення поставлених цілей. Економічний аналіз гарантує, що впровадження нових технологій є фінансово обґрунтованим, а багатокритеріальний аналіз забезпечує збалансоване прийняття рішень з урахуванням різних аспектів.

Новизна одержаних результатів:

1. Дослідження перспектив розвитку відкритої RAN (перший розділ):
 - Проведено поглиблений аналіз сучасного стану розвитку відкритої архітектури RAN, що включає оцінку її ключових переваг та недоліків.
 - Вперше систематизовано перспективні напрями інтеграції ORAN з іншими технологіями, такими як MEC (Mobile Edge Computing), IoT та 6G.
 - Обґрунтовано необхідність використання відкритої архітектури RAN для зниження витрат на інфраструктуру та підвищення гнучкості мереж.
2. Аналіз інформаційних технологій RAN у мережах 5G та ORAN (другий розділ):
 - Виконано порівняльний аналіз традиційних RAN і відкритих ORAN з точки зору продуктивності, гнучкості та вартості впровадження.
 - Запропоновано нові підходи до побудови архітектури ORAN у мережах 5G, що враховують специфіку їх розподіленої структури.
 - Удосконалено методики оцінки ефективності взаємодії різних компонентів ORAN (RU, DU, CU) із залученням сучасних алгоритмів оптимізації.
3. Дослідження особливостей застосування RAN у безпроводних мережах (третій розділ):
 - Вперше досліджено вплив відкритих протоколів та інтерфейсів ORAN на ефективність управління безпроводними мережами.

- Розроблено методи оптимізації розподілу ресурсів і зниження затримок у середовищі ORAN для сценаріїв із високою щільністю трафіку.

- Проаналізовано проблеми енергоефективності компонентів ORAN та запропоновано шляхи їх вирішення за допомогою інтелектуальних алгоритмів.

4. Економічне обґрунтування доцільності реалізації роботи (четвертий розділ):

- Виконано комплексний економічний аналіз впровадження ORAN у безпроводні мережі, зокрема оцінено витрати на обладнання, програмне забезпечення та експлуатацію.

- Вперше розроблено модель розрахунку рентабельності інвестицій (ROI) для впровадження ORAN у операторів мобільного зв'язку.

- Доведено, що впровадження ORAN дозволяє значно знизити операційні витрати та підвищити конкурентоспроможність телекомунікаційних компаній.

Робота інтегрує міждисциплінарний підхід до вирішення задач підвищення ефективності безпроводних мереж за допомогою ORAN, включаючи технічні, економічні та інноваційні аспекти. Вперше виконано детальний аналіз застосування ORAN у різних сценаріях безпроводних мереж з обґрунтуванням їх ефективності та доцільності реалізації. Результати дослідження можуть бути використані як основа для подальших наукових і практичних розробок у сфері телекомунікацій.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)» у 2024 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 2 тезах науково-технічної конференції.

1 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІДКРИТОЇ RAN

Перспективи розвитку Відкритої RAN (Open RAN) виглядають дуже обнадійливими, оскільки ця технологія трансформує ринок мобільного зв'язку, надаючи нові можливості як операторам, так і постачальникам обладнання. Основні перспективи розвитку Open RAN можна розділити на кілька ключових напрямів:

Один із головних аспектів Open RAN полягає в децентралізації ринку постачальників телекомунікаційного обладнання. Відкриті стандарти дозволяють операторам використовувати рішення від різних постачальників, що сприяє зниженню залежності від великих виробників і, відповідно, призводить до зниження витрат на обладнання та інфраструктуру. Це також стимулює конкуренцію на ринку, оскільки на нього можуть вийти нові гравці, пропонуючи інноваційні та спеціалізовані рішення. Open RAN пропонує операторам більшу гнучкість у налаштуванні та розгортанні мереж, оскільки вони можуть вибирати компоненти, що найкраще відповідають їхнім потребам. Це особливо важливо при розгортанні мереж 5G у різних географічних та економічних умовах, оскільки оператори можуть підлаштовувати мережу під специфічні сценарії, такі як міські райони з високою щільністю користувачів або віддалені регіони з обмеженою інфраструктурою. Однією з ключових перспектив розвитку Open RAN є інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (ML) у процеси управління радіомережами. Використання радіоінтелектуального контролера (RIC) дозволяє операторам автоматизувати управління мережею та оптимізувати її продуктивність у режимі реального часу. Це дає змогу поліпшити якість обслуговування користувачів, ефективніше використовувати радіочастотний спектр та мінімізувати затримки. Open RAN відкриває можливості для створення спеціалізованих рішень у таких галузях, як Інтернет речей (IoT), індустрія 4.0 та розумні міста. Відкриті стандарти дозволяють адаптувати мережі під специфічні вимоги нових сценаріїв використання, таких як автономні транспортні засоби, віддалене управління виробництвом та системи

на основі доповненої реальності. Завдяки Open RAN очікується прискорення впровадження 5G, оскільки оператори отримують більше свободи в управлінні інфраструктурою. Відкриті стандарти дозволяють адаптувати мережі для ефективнішого використання нових можливостей 5G, таких як низька затримка та висока пропускна здатність, що особливо важливо для нових індустрій та високотехнологічних додатків [4].

Зусилля міжнародних організацій, таких як Альянс O-RAN і 3GPP, спрямовані на подальшу стандартизацію та поширення Open RAN на глобальному рівні. Це відкриває нові можливості для операторів у різних регіонах, особливо в країнах, що розвиваються, де зниження вартості інфраструктури є важливим фактором для розгортання сучасних мереж. Таким чином, перспективи розвитку Open RAN вказують на трансформацію мобільних мереж і створення більш відкритої, гнучкої та інноваційної екосистеми. Це дозволить операторам підвищити ефективність своїх мереж, впроваджувати нові технології та швидше адаптуватися до змін на ринку.

1.1 Особливості розвитку відкритих мереж RAN

На шляху до відкритих мереж RAN (Open RAN) телекомунікаційна галузь робить суттєві кроки, спрямовані на створення більш гнучких, доступних і конкурентних мереж. Впровадження Open RAN кардинально змінює підхід до побудови мобільної інфраструктури, дозволяючи операторам обирати різних постачальників для різних компонентів мережі, що сприяє зниженню витрат та інноваціям.

Стандартизація є ключовим етапом на шляху до впровадження Open RAN. Альянс O-RAN та 3GPP активно працюють над розробкою відкритих інтерфейсів, які дозволяють інтегрувати компоненти від різних постачальників у межах однієї мережі. Це дозволяє уникати залежності від єдиного постачальника і створює більш відкриту екосистему для інновацій.

Традиційні мережі RAN здебільшого контролюються кількома великими постачальниками інфраструктури, що обмежує конкуренцію і стримує інновації. Open RAN відкриває ринок для нових гравців, включаючи розробників програмного забезпечення, компанії з хмарних обчислень і штучного інтелекту. Це сприяє появі нових бізнес-моделей і розширенню можливостей для інновацій у галузі.

Використання штучного інтелекту (ШІ) і машинного навчання (ML) у рамках Open RAN відкриває можливості для оптимізації управління мережею. Системи на основі ШІ, такі як радіоінтелектуальні контролери (RIC), дозволяють автоматизувати процеси і ефективніше розподіляти радіоресурси, що покращує продуктивність мережі та зменшує затримки.

Віртуалізація мережевих функцій (NFV) є ще одним важливим етапом на шляху до Open RAN. Вона дозволяє переносити мережеві функції з фізичного обладнання на програмні рішення, що працюють на стандартному "залізі". Це знижує витрати на обладнання, спрощує управління і прискорює розгортання нових послуг.

Open RAN тісно пов'язана з розвитком 5G, оскільки багато операторів планують розгорнути свої мережі 5G саме з використанням відкритої архітектури. Це дає їм змогу максимально використовувати переваги 5G, такі як низька затримка, висока пропускна здатність і підтримка мільйонів пристроїв у мережі.

Незважаючи на значні переваги, впровадження Open RAN стикається з низкою викликів, серед яких складність інтеграції рішень від різних постачальників, забезпечення сумісності та безпеки мережі. Однак активна робота над стандартами та зусилля щодо тестування та випробувань нових рішень допомагають подолати ці проблеми. Очікується, що в міру розвитку технологій і стандартів ці виклики будуть поступово вирішуватися, що дозволить прискорити впровадження Open RAN у глобальному масштабі. Відкрита RAN стає стратегічним напрямком розвитку телекомунікацій, оскільки забезпечує операторам більшу свободу вибору, гнучкість у розгортанні мереж та

можливість впровадження новітніх технологій. Шлях до Open RAN вже відкритий, і його впровадження обіцяє змінити інфраструктуру мобільних мереж на краще. Еволюція до розгортання відкритих мереж RAN може бути представлена основними фазами, які зображені на рисунку 1.1. Нижче наведено перелік ключових аспектів цих етапів, як вони інтерпретуються в роботах [4, 5]:

Відкрита архітектура RAN розвивається через кілька етапів, і ключовими серед них є відкритий фронтальний канал (етап 1) та відкритий блок базової смуги (етап 2)**. Ці етапи стосуються інтеграції різних компонентів радіомережі доступу (RAN) через стандартизовані інтерфейси, що сприяє інтероперабельності та більшій гнучкості для операторів.

Етап 1: Відкритий фронтальний канал (Open Fronthaul). На цьому етапі блок базового діапазону (BBU), який відповідає за цифрову обробку сигналів, підключається до радіоагрегата (RU) через відкритий інтерфейс. Зазвичай, BBU базується на пропрієтарних апаратних платформах, але впровадження відкритого інтерфейсу між RU та DU (блок розподілу даних) дозволяє інтегрувати рішення різних постачальників.

Цей етап передбачає використання інтерфейсу прямого зв'язку для передачі даних між RU та DU, що реалізує один із ключових варіантів архітектурного розділення RAN, відомого як Split 7-2x. Це розділення забезпечує баланс між вимогами до пропускної здатності і продуктивністю мережі.

Для того щоб цей відкритий фронтальний канал дійсно працював на практиці, необхідно, щоб постачальники обладнання підтримували сумісність цього інтерфейсу. Це означає, що рішення від різних постачальників можуть бути інтегровані в єдину мережу без прив'язки до одного виробника.

Етап 2: Відкритий блок базової смуги (Open Baseband Unit). На цьому етапі радіоагрегат (RU) підключається до блоку розподілу даних (DU), який, в свою чергу, підключається до блоку централізованого управління (CU). Важливою відмінністю цього етапу є те, що DU і CU працюють на основі комерційно готових апаратних платформ (COTS), що знижує витрати на спеціалізоване обладнання та дозволяє використовувати універсальні апаратні рішення. Таке

рішення створює можливість для операторів гнучко керувати різними частинами мережі, використовуючи загальні платформи, що підтримують кілька функцій RAN. Інтеграція відкритих інтерфейсів на цьому рівні дозволяє забезпечити повну сумісність між різними компонентами мережі.

Переваги такої архітектури:

1. Сумісність між постачальниками: Відкриті інтерфейси дозволяють оператору інтегрувати різні компоненти від кількох виробників, що створює конкурентний ринок і зменшує залежність від окремих постачальників.

2. Зниження витрат: Використання комерційних апаратних рішень (COTS) знижує витрати на закупівлю та обслуговування спеціалізованого обладнання.

3. Гнучкість і масштабованість: Оператори можуть гнучко масштабувати свої мережі, адаптуючи їх під різні сценарії, використовуючи універсальні апаратні платформи.

Попри всі переваги, залишається кілька викликів:

- Необхідність стандартизації: Для успішної інтеграції різних компонентів необхідні чіткі стандарти, які будуть підтримуватися всіма постачальниками.

- Технічна інтеграція: Забезпечення безперебійної роботи різних рішень від кількох постачальників вимагає високого рівня технічної інтеграції та тестування. Успішне впровадження обох етапів є важливим кроком на шляху до повного використання можливостей Open RAN, що сприятиме підвищенню ефективності та гнучкості мобільних мереж.

Впровадження відкритих інтерфейсів, зокрема F1, є критично важливим для забезпечення взаємодії між різними постачальниками обладнання (CU і DU). Це дозволяє операторам обирати найкращі рішення для своїх потреб, що підвищує конкуренцію та інноваційність на ринку. Для справжньої інтероперабельності постачальники повинні дотримуватись відкритих стандартів, що дозволяє безперешкодно інтегрувати різні компоненти в єдину мережу. Перехід від пропрієтарних рішень до комерційно доступного апаратного забезпечення (COTS) зменшує витрати та ризики, пов'язані з залежністю від одного постачальника, і дозволяє швидше впроваджувати нові технології. Розділення

функцій управління (CU-CP) та обробки користувачів (CU-UP) підвищує гнучкість мережі та спрощує оновлення окремих компонентів без впливу на всю систему. RIC відіграє ключову роль в управлінні ресурсами та оптимізації мережі. Він забезпечує аналітику в реальному часі і дозволяє реалізувати самооптимізацію, що є важливим для підтримки високої якості обслуговування. Застосування периферійної хмари для розміщення CU і RIC забезпечує зменшення затримок і оптимізацію обробки даних, що є критично важливим для багатьох сучасних застосувань, таких як IoT і автономні системи [6].

Основні кроки дезагрегації:

- Впровадження відкритих стандартів та інтерфейсів.
- Перехід до модульних архітектур, що дозволяє легко інтегрувати нові технології.
- Використання COTS для зниження витрат і ризиків.
- Створення RIC для оптимізації управління мережею.
- Розміщення компонентів у периферійній хмарі для покращення швидкості та зменшення затримок.

Цей сценарій дезагрегації та відкритості не лише підвищує ефективність мереж, але й створює нові можливості для впровадження інновацій у галузі телекомунікацій. Слід зазначити, що розробка інтерфейсів для відкритого управління всіма відповідними компонентами відіграє важливу роль у реалізації концепції O-RAN на практиці. Якщо звернути увагу на рисунок 1.1, то окрім зображених інтерфейсів, М-площина магістралі O-RAN таким чином з'єднується з об'єктами O-RAN, апаратним забезпеченням COTS (O-хмара), а також з основним сегментом мережі.

Наведемо основні переваги відкритих інтерфейсів у архітектурі O-RAN, які сприяють інноваціям і знижують залежність від окремих постачальників.:

1. Відкриті інтерфейси дозволяють різним постачальникам обладнання легко взаємодіяти, що створює здорове конкурентне середовище на ринку.
2. Наявність відкритих стандартів відкриває можливості для нових компаній, які можуть пропонувати спеціалізовані рішення.

Завдяки відкритим стандартам, різні компоненти мережі можуть працювати разом, що знижує ризик технічних проблем і підвищує надійність системи. Наведемо кілька ключових моментів, які можна підкреслити:

1. Відкриті стандарти забезпечують сумісність між різними компонентами мережі, що знижує ризик технічних проблем і підвищує загальну надійність системи.

2. Рух Open RAN стимулює співпрацю між операторами, постачальниками обладнання, розробниками програмного забезпечення та іншими зацікавленими сторонами. Це веде до створення інноваційних рішень.

3. Використання відкритих інтерфейсів та архітектури O-RAN дозволяє реалізовувати різні застосунки, такі як IoT і 5G, що допомагає операторам швидше реагувати на зміни ринкових умов.

4. Рух Open RAN і альянс O-RAN сприяють загальній трансформації телекомунікаційних мереж, роблячи їх більш відкритими та інноваційними.

Ці аспекти підкреслюють важливість Open RAN для майбутнього телекомунікаційної інфраструктури. Якщо вам потрібна допомога в деталізації або розширенні цієї теми, дайте знати!

1.2 Безпекові аспекти

Open RAN дозволяє залучати більше учасників, включаючи нових постачальників технологій і стартапи, що може призвести до інновацій і зниження витрат. Однак з цим також приходить необхідність у строгих заходах контролю. З відкритими інтерфейсами і протоколами виникає ймовірність нових уразливостей. Наприклад, зловмисники можуть намагатися експлуатувати слабкі місця в інтеграції різних компонентів або використовувати недоліки в безпеці програмного забезпечення, щоб отримати несанкціонований доступ. Відкритість мережі може ускладнити процеси ідентифікації та автентифікації користувачів і пристроїв. Без належних механізмів захисту, атаки можуть бути націлені на легітимні елементи мережі. Збільшення кількості учасників та інтеграцій може

призвести до ризиків витоку або компрометації даних. Важливо забезпечити шифрування та безпечну передачу даних, щоб захистити чутливу інформацію.

Важливо розробити та впровадити чіткі стандарти безпеки для Open RAN, щоб всі учасники екосистеми дотримувались однакових вимог і практик безпеки. Загалом, хоча Open RAN відкриває нові можливості для телекомунікаційної інфраструктури, він також ставить нові виклики в плані безпеки, які потрібно вирішити для забезпечення надійної та безпечної роботи мережі.

Open RAN стикається з багатьма вже відомими ризиками, які були присутні в попередніх розгортаннях RAN. Це включає вразливості, пов'язані з конфіденційністю, доступом і цілісністю даних. Окрім загальних загроз, Open RAN піддається новим або більш вираженим ризикам, які можуть виникати через впровадження нових технологій, таких як штучний інтелект і хмарні технології. Наприклад, алгоритми штучного інтелекту можуть бути використані для автоматизації, але можуть також містити вразливості, які можуть бути експлуатовані.

Включення вимог до безпеки в технічні специфікації O-RAN є важливим кроком у пом'якшенні нових ризиків. Це забезпечує структуру для впровадження найкращих практик безпеки на всіх етапах розгортання та експлуатації мережі. Постійний моніторинг технологічного ландшафту є критично важливим для виявлення нових загроз і вразливостей. Це дозволяє швидко реагувати на потенційні атаки та підтримувати безпечний стан мережі.

Співпраця та обмін інформацією між усіма учасниками (операторами, постачальниками, регуляторами) можуть суттєво підвищити рівень безпеки. Створення платформ для обміну інформацією про вразливості, атаки та відповідні заходи допоможе підвищити загальний рівень захисту у всій екосистемі. Важливість регулярних оновлень та патчів для забезпечення безпеки не можна недооцінювати. Це допоможе уникнути використання відомих вразливостей зловмисниками. Узагальнюючи, розгортання Open RAN може сприяти підвищенню гнучкості та інновацій у телекомунікаційних мережах, але вимагає активної роботи над безпекою, щоб захистити інфраструктуру та дані.

Постійне вдосконалення безпеки, обмін інформацією та дотримання специфікацій O-RAN є ключовими для успішного впровадження цієї концепції [8].

1.3 Комерційне використання технології

Початковий етап розгортання Open RAN у 2023 році відзначається відносною стабільністю. Це свідчить про те, що оператори обережно підходять до впровадження нових технологій, оцінюючи їх ефективність та ризики.

Перші кроки до O-RAN були зроблені Rakuten, яка впровадила 5G MIMO RRH на основі рішень Intel та NEC. Це стало одним із перших комерційних впроваджень Open RAN у світі.

- Deutsche Telekom (1Q 2021): Запуск O-RAN у 25 містах на базі рішень Mavenir показує, як великі оператори почали експериментувати з відкритими технологіями.

- Vodafone UK (1Q 2022): Запуск комерційного майданчика 5G O-RAN з використанням рішень Samsung, Dell і Intel підтверджує зростаючий інтерес до Open RAN серед операторів.

- DISH Network (2Q 2022): Впровадження загальнонаціональної мережі 5G O-RAN з використанням рішень Mavenir і Samsung підкреслює амбіційний підхід DISH Network до впровадження нових технологій, зокрема через використання хмарної платформи AWS.

Багато з цих розгортань використовують хмарні рішення, що підкреслює важливість віртуалізації та гнучкості в архітектурах Open RAN. Це дозволяє знижувати витрати та швидше адаптувати мережі до змінюваних умов ринку.

Важливим аспектом є співпраця з різними постачальниками, такими як Mavenir, AltioStar, Samsung, Nokia, Intel, що створює різноманіття технологій і рішень у межах Open RAN. Ці спостереження свідчать про те, що Open RAN поступово входить у mainstream, але процес залишається контрольованим і

стратегічним, що дозволяє операторам впроваджувати нові технології з урахуванням їхніх специфічних потреб та викликів безпеки [9].

1.4 Висновки до розділу 1

Open RAN (Open Radio Access Network) представляє собою інноваційний підхід до архітектури бездротових мереж, що базується на принципах відкритості, модульності та інтероперабельності. Це дозволяє операторам легко інтегрувати рішення від різних постачальників, підвищуючи гнучкість і знижуючи витрати. Основні організації, що займаються розробкою стандартів для Open RAN, включають 3GPP та O-RAN Alliance.

3GPP (3rd Generation Partnership Project) відповідає за створення технічних специфікацій для мобільних технологій, включаючи 4G (LTE) та 5G. Включає специфікації для радіоінтерфейсів, архітектури мережі та управління. Зокрема, 3GPP визначає стандарти для інтерфейсів між різними модулями Open RAN. Постійно оновлює специфікації відповідно до нових вимог ринку та технологічного прогресу.

O-RAN Alliance консолідує зусилля операторів, постачальників обладнання та програмного забезпечення для створення відкритих стандартів RAN. Формує специфікації для архітектури Open RAN, модулів, інтерфейсів, а також концепцій управління та оркестрації. Підтримує створення тестових майданчиків для перевірки інтероперабельності компонентів від різних постачальників.

Open RAN є важливою ініціативою, яка надає можливість розробки відкритих стандартів для бездротових мереж. Завдяки організаціям, таким як 3GPP і O-RAN Alliance, та зусиллям у стандартизації модулів і інтерфейсів, Open RAN може забезпечити гнучкість, інновації та ефективність у розгортанні бездротових мереж. Важливим аспектом є також інтероперабельність, яка є критично важливою для успішної інтеграції компонентів від різних постачальників.

2 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ RAN В МЕРЕЖАХ 5G ТА OPEN RAN

Перед аналізом еволюції радіомереж доступу (RAN) від 4G до 5G та впровадження відкритих архітектур O-RAN, важливо розглянути ключові технологічні засоби, розроблені у сфері інформаційних технологій (ІТ), які суттєво вплинули на розвиток мобільних систем зв'язку.

Розвиток інформаційних технологій сприяв створенню більш гнучких, масштабованих та деагрегованих архітектур для комп'ютерних і електронних систем. Хоча ці інновації спочатку використовувалися переважно в ІТ-секторі, останніми роками їх інтегрують у телекомунікаційні системи, відкриваючи нові можливості для вдосконалення мереж доступу.

У цьому розділі описані ІТ-технології, які стали основою для розвитку 5G RAN і O-RAN:

- Віртуалізація забезпечує гнучке управління ресурсами за допомогою абстрагування апаратного забезпечення, що дозволяє динамічно змінювати конфігурацію мереж.

- Хмарні технології сприяють централізації та обробці великих обсягів даних із можливістю їх масштабування відповідно до потреб мережі.

- Програмно-конфігуровані мережі (SDN) дозволяють розділити рівні управління і передачі даних, забезпечуючи динамічне управління трафіком і підвищену адаптивність мережі. Ці інструменти виступають базою для впровадження відкритих, інтероперабельних і динамічних мереж O-RAN, що змінюють підхід до побудови сучасних мобільних систем [6, 7].

2.1 Віртуалізація програмного та апаратного забезпечення мереж

Віртуалізація означає «моделювання програмного або апаратного забезпечення, на якому працює інше програмне забезпечення» або «використання рівня абстракції для моделювання обчислювального обладнання

таким чином, щоб на одному комп'ютері могло працювати декілька операційних систем» [8]. У контексті телекомунікаційної мережі технологія віртуалізації застосовується таким чином, що відбувається розділення програмного та апаратного рівнів, як показано на рис. 2.1. У той час як традиційне мережеве обладнання постачається у вигляді «чорної скриньки» з програмним і апаратним забезпеченням, об'єднаним разом, віртуалізація дозволяє програмним мережевим функціям працювати на пулі загальних готових апаратних ресурсів. Це називається віртуалізацією мережевих функцій (Network Function Virtualization, NFV) і визначається як «принцип відокремлення мережевих функцій від апаратного забезпечення, на якому вони працюють, за допомогою методів віртуалізації» [9-11].

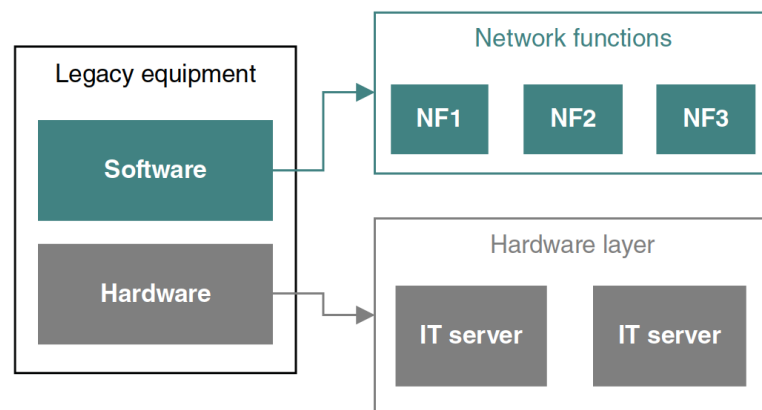


Рисунок 2.1 – Концепція віртуалізації мережевих функцій

Розділення апаратного та програмного рівнів у рамках концепції NFV (Network Functions Virtualization) відкриває значні переваги для телекомунікаційної галузі. Основні вигоди включають:

- Використання стандартного готового обладнання дозволяє досягти ефекту масштабу та значно знижує витрати на придбання та експлуатацію апаратних ресурсів.

- Завдяки відокремленню розробки програмного забезпечення від апаратного забезпечення, розгортання нових мережевих функцій стає більш швидким і гнучким.

- Підтримка багатоверсійності та багатокористувацької оренди дозволяє ефективно ділити ресурси між різними послугами та клієнтами.

- Створення відкритої екосистеми спрощує доступ до ринку малим компаніям, стимулюючи конкуренцію та інновації.

Архітектуру NFV визначає Група галузевих специфікацій (ISG) NFV Європейського інституту телекомунікаційних стандартів (ETSI). Її ключові компоненти:

- Програмні модулі, які реалізують специфічні мережеві функції, відокремлені від апаратного забезпечення.

- Інфраструктура NFV (NFVI): фізичні сервери, мережі та системи зберігання даних, на яких працюють VNF.

- Система управління та оркестрування (MANO): забезпечує управління, моніторинг і координацію VNF та NFVI.

Цей підхід сприяє більшій гнучкості, масштабованості та ефективності телекомунікаційних мереж, відкриваючи нові перспективи для їх оптимізації та інноваційного розвитку. Детальна архітектура показана на рисунку 2.2.

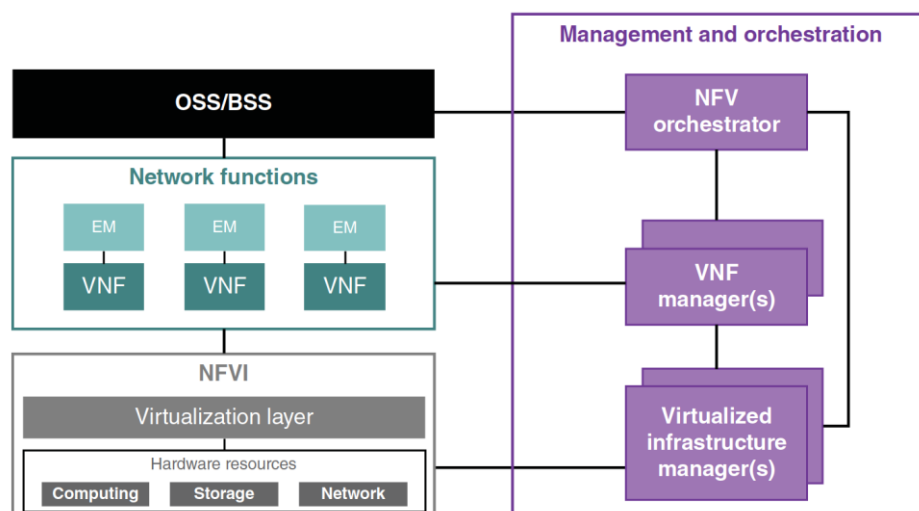


Рисунок 2.2 – Архітектура NFV

Архітектура NFV (Network Functions Virtualization) включає кілька ключових вузлів, кожен із яких виконує специфічні функції:

- VNF (Virtualized Network Functions): програмна реалізація мережевих функцій, які раніше виконувалися на спеціалізованому апаратному забезпеченні.

- EM (Element Management): система управління елементами, яка забезпечує контроль над одним або декількома VNF, підтримуючи їхню функціональність та продуктивність.

- NFVI (NFV Infrastructure): об'єднує апаратні ресурси (обчислювальні, сховища, мережеві компоненти) та програмне забезпечення для їхньої абстракції. Завдяки цьому VNF може взаємодіяти з інфраструктурою як із єдиною системою.

- Менеджер віртуалізованої інфраструктури (VIM): забезпечує управління ресурсами NFVI та координує взаємодію VNF із цими ресурсами.

- Менеджер VNF: відповідає за життєвий цикл VNF, включаючи створення, оновлення та обробку запитів.

- NFV-оркестратор: організує управління інфраструктурою NFV, мережевими та програмними ресурсами для забезпечення безперервної роботи мережевих послуг.

- OSS/BSS (Operational Support Systems / Business Support Systems): інтерпонує NFV у бізнес- і експлуатаційні процеси, забезпечуючи узгодженість роботи мережевих функцій і сервісів.

У телекомунікаціях NFV став критично важливим для реалізації мереж 5G, зокрема в контексті радіодоступу (RAN). У мережах 4G було впроваджено базове розділення між радіочастотними блоками (RRH) та блоками обробки базових сигналів (BBU). Мережі 5G підняли цей підхід на новий рівень, розділивши BBU на розподілені блоки (DU, Distributed Units) і централізовані блоки (CU, Centralized Units). Розподіл DU і CU підвищує гнучкість і масштабованість розгортання RAN, дозволяючи оптимізувати використання ресурсів. NFV дає змогу реалізувати цю архітектуру, забезпечуючи віртуалізацію функцій і їх динамічне управління в умовах високих вимог 5G до пропускної

здатності, затримки та масштабованості. Таким чином, NFV не лише спрощує управління складними мережами, а й дозволяє інтегрувати інноваційні підходи до розгортання та обслуговування мобільних систем нового покоління.

2.2 Хмарний доступ до конфігурованих обчислювальних ресурсів мережі

Хмаризація передбачає застосування технологій хмарних обчислень для надання послуг, що базуються на ефективному управлінні обчислювальними ресурсами. Хмарні обчислення визначаються як модель, яка забезпечує зручний мережевий доступ на вимогу до спільного пулу конфігурованих обчислювальних ресурсів (серверів, сховищ, мереж тощо). Ці ресурси можуть швидко надаватися та звільнятися з мінімальними зусиллями з боку управління або взаємодії з постачальником послуг [14].

Основні характеристики хмарних технологій:

- Спільне використання ресурсів: обчислювальні потужності, сховища та мережі доступні для кількох користувачів одночасно.
- Гнучкість і масштабованість: ресурси можна легко налаштовувати під змінні потреби користувачів.
- Доступність на вимогу: користувач отримує доступ до ресурсів через мережу, зазвичай за допомогою Інтернету, без необхідності фізичного контролю.

У традиційних системах локальні сервери виділялися для конкретних завдань або послуг із фіксованими ресурсами. Хмаризація централізує ці сервери у великих дата-центрах ("серверних фермах"), де об'єднані ресурси стають доступними для спільного використання. Це дозволяє:

- Оптимізувати використання апаратного забезпечення.
- Скоротити витрати на підтримку інфраструктури.
- Забезпечити швидке масштабування під нові потреби користувачів.

На прикладі (зображеного на рисунку 2.3) можна побачити, як централізація серверів із спільним використанням ресурсів змінює підхід до надання послуг. Хмаризація зменшує залежність від локальних серверів, спрощує управління та

забезпечує економію масштабів. У сфері телекомунікацій хмаризація є основою для реалізації технологій 5G і O-RAN. Централізоване управління ресурсами та їх спільне використання дозволяють адаптувати інфраструктуру до високих вимог пропускної здатності, низької затримки та динамічного управління послугами, необхідними для сучасних мобільних мереж.

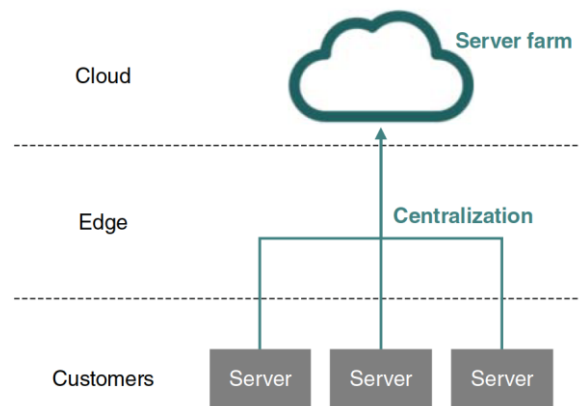


Рисунок 2.3 – Узагальнена структура концепції хмарних технологій

Хмаризація дозволяє реалізувати низку важливих переваг, які роблять її ефективним рішенням для багатьох галузей, зокрема телекомунікацій:

1. Користувачі можуть самостійно отримувати доступ до обчислювальних ресурсів за потребою без необхідності взаємодії з технічним персоналом постачальника послуг.
2. Послуги доступні через різноманітні пристрої, включаючи смартфони, планшети, ноутбуки тощо, завдяки універсальним інтерфейсам доступу.
3. Ресурси обчислювальної інфраструктури постачальника об'єднуються для обслуговування кількох користувачів одночасно. При цьому користувач не знає точного фізичного розташування ресурсів, але може вибирати географічний рівень їхнього розміщення (наприклад, країну або регіон).
4. Ресурси можуть бути динамічно масштабовані відповідно до потреб користувачів, що дозволяє легко адаптуватися до змін попиту.

5. Хмарні системи автоматично контролюють, вимірюють і звітують про використання ресурсів, забезпечуючи прозорість як для постачальника послуг, так і для користувачів.

Незважаючи на переваги, централізація в хмарних обчисленнях має певні недоліки:

- Затримка: через віддаленість серверів хмари затримка може бути більшою, ніж у локальних рішень, що впливає на швидкість реагування системи.

- Безпека та конфіденційність: деякі користувачі стурбовані тим, що їхні дані зберігаються та обробляються поза межами власної інфраструктури. Для вирішення цих проблем введено концепцію периферійної хмари (Edge Cloud). У ній деякі функції хмари розгортаються ближче до клієнтів — на межі мережі.

Переваги периферійної хмари:

- Зменшення затримки завдяки географічному наближенню серверів до кінцевих користувачів.

- Покращення безпеки, оскільки дані можуть оброблятися локально, без передачі до централізованих центрів обробки даних.

- Швидше реагування на запити клієнтів, що є важливим для критичних додатків, таких як системи IoT, автономні транспортні засоби тощо.

На рисунку 2.4 (умовно) показано, як периферійна хмара інтегрується в традиційну хмарну інфраструктуру, доповнюючи її функції. Таким чином, периферійна хмара стає важливим компонентом сучасних телекомунікаційних систем, особливо в умовах підвищених вимог до продуктивності мереж 5G.

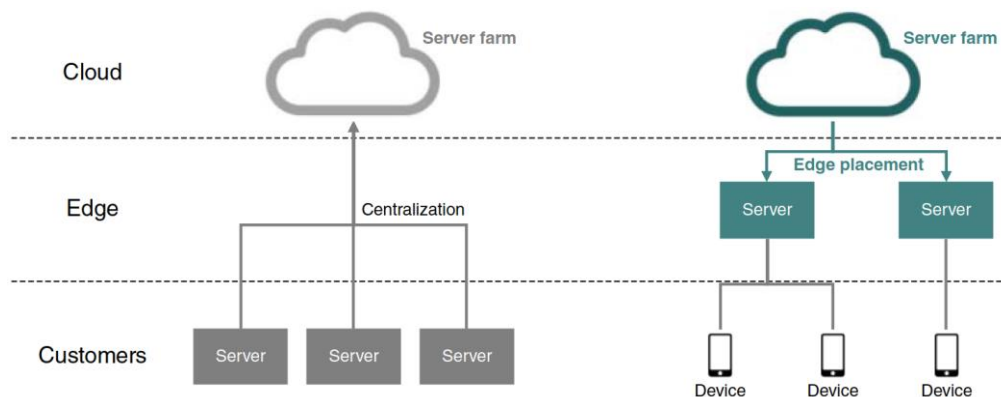


Рисунок 2.4 – Хмарні та периферійні обчислення

Периферійні обчислення (Edge Computing) є концепцією, яка передбачає розміщення функціональності традиційних хмарних центрів обробки даних ближче до кінцевих користувачів — на межі мережі. Усе, що виходить за межі традиційних центрів обробки даних, можна вважати периферією [15].

У мобільних мережах периферійні обчислення реалізуються через розгортання хмарних і мережевих функцій на рівні RAN (Radio Access Network). Переміщення функцій ближче до користувачів дозволяє значно зменшити затримки, що важливо для додатків, чутливих до часу, таких як автономні автомобілі, розширена реальність (AR) або інтернет речей (IoT). Частина трафіку може оброблятися локально на рівні RAN, знижуючи навантаження на центральні хмарні ресурси.

Периферійні обчислення не лише підтримують ефективність мобільних мереж, але й відкривають нові можливості:

1. RAN із вбудованими обчислювальними потужностями може використовуватися для розгортання нових типів сервісів, які потребують швидкої обробки даних.

2. Завдяки периферії мобільні мережі можуть обслуговувати специфічні потреби таких галузей, як медицина (віддалена хірургія), транспорт (інтелектуальні транспортні системи) або промисловість (автоматизація виробничих процесів). Переваги периферії для користувачів та операторів.

- Для користувачів:
 - Менші затримки, швидший доступ до послуг.
 - Підвищена якість обслуговування, особливо для додатків, чутливих до часу.
- Для операторів:
 - Оптимізація використання ресурсів.
 - Можливість пропонувати нові послуги та монетизувати інфраструктуру периферії.

У мережах 5G периферійні обчислення відіграють ключову роль, оскільки вони сприяють реалізації концепцій ультранизької затримки та високої

пропускної здатності. У перспективі 6G технології периферії можуть стати основою для підтримки інтеграції штучного інтелекту та обробки великих даних безпосередньо на рівні користувацьких пристроїв і мереж. Периферійні обчислення є потужним інструментом для розвитку не лише телекомунікаційної інфраструктури, а й суміжних галузей, що змінює підхід до використання мереж і відкриває нові горизонти інновацій [16].

2.3 Програмно-визначені мережі

Технологія SDN (Software-Defined Networking, програмно-конфігуровані мережі) є революційним підходом до управління мережами, заснованим на ідеї розділення двох основних площин мережевого обладнання: площини керування (control plane) та площини пересилання (data plane).

Площина керування відповідає за прийняття рішень щодо маршрутизації, тобто визначає, як і куди направляти мережеві пакети. У традиційних мережах ці рішення приймаються на кожному мережевому пристрої (наприклад, комутаторі чи маршрутизаторі) індивідуально, виходячи з локальної інформації.

Площина пересилання виконує функцію фізичного пересилання даних. Вона слідує інструкціям, які надає площина керування, і фактично здійснює передачу даних через мережу.

У традиційному мережевому обладнанні ці дві площини є інтегрованими. Це означає, що кожен пристрій приймає рішення самостійно, що може бути ефективним для невеликих або простих мереж, але менш оптимальним для великих і складних середовищ.

SDN пропонує альтернативний підхід: централізацію площини керування. Це означає, що замість того, щоб кожен пристрій керувався самостійно, всі рішення приймаються централізованим контролером SDN, який має глобальний (або майже глобальний) огляд стану всієї мережі.

Переваги SDN.

1. Легкість внесення змін у мережеву політику через програмне забезпечення без необхідності змінювати фізичну інфраструктуру.

2. Централізоване управління забезпечує ефективнішу оптимізацію маршрутів, балансування навантаження та підвищення загальної продуктивності мережі.

3. Автоматизація полегшує автоматизацію завдань, таких як конфігурація мережі, виявлення несправностей та оновлення.

4. Масштабованість дозволяє краще управляти великими мережами.

Таким чином, SDN сприяє створенню більш гнучких, ефективних та масштабованих мереж, адаптованих до сучасних вимог. Ця зміна зображена на рисунку 2.5.

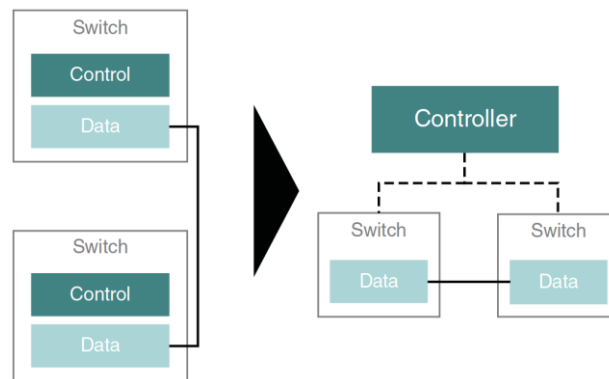


Рисунок 2.5 – Спрощена архітектура SDN

Архітектура SDN (програмно-конфігурованих мереж) відкриває можливість значного підвищення ефективності управління мережею завдяки централізації площини управління та дезагрегації рівнів. Основні переваги такого підходу можна сформулювати так:

1. Мережеве управління може бути безпосередньо запрограмоване під конкретні потреби замовника або користувача. Це дає можливість мережі гнучко адаптуватися до змін у потоках трафіку чи вимогах. Завдяки автоматизованим програмам, створеним мережевими адміністраторами, процес управління стає швидшим і менш залежним від стороннього пропрієтарного програмного забезпечення.

2. Централізована площина управління забезпечує загальний огляд всієї мережі, дозволяючи здійснювати глобальну оптимізацію, наприклад:

- Оптимізацію маршрутизації.
- Балансування навантаження.
- Підвищення ефективності використання ресурсів.

3. SDN дозволяє клієнтам безпосередньо конфігурувати та програмувати мережу. Це змінює парадигму управління: мережа підлаштовується під потреби клієнта, а не навпаки. Замовник отримує більше свободи у використанні ресурсів, зокрема для створення спеціалізованих рішень.

4. Інтеграція автоматизованих інструментів у SDN спрощує операції та дозволяє зменшити витрати на обслуговування.

Таким чином, архітектура SDN стає завершеною тоді, коли користувачі чи клієнти можуть самостійно програмувати та налаштовувати мережу згідно зі своїми вимогами. Це підхід, який відповідає сучасним тенденціям індивідуалізації та автоматизації в IT-інфраструктурі. Рисунок 2.6 відображає цю концепцію, демонструючи взаємодію клієнтів із централізованою системою управління мережею [17].

Архітектура SDN включає чотири основні площини: даних, керування, управління та застосування. Кожна з них має свою специфічну роль у функціонуванні мережі, а взаємодія між ними здійснюється за допомогою різних інтерфейсів.

Площина даних (Data Plane).

- Функція: Виконує передачу даних, обробляючи пакети відповідно до інструкцій, отриманих від площини управління.

- Рівень фізичної реалізації: Комутатори, маршрутизатори та інші мережеві пристрої.

Площина управління (Control Plane).

- Функція: Забезпечує виконання налаштованих політик та керує сутностями площини даних, визначаючи маршрути передачі інформації та способи обробки трафіку.

- Взаємодія: Інтерфейс між площиною управління і даних відомий як API південний інтерфейс (Southbound API).

- Реалізація: Контролери SDN (наприклад, OpenFlow).

Площина додатків (Application Plane).

- Функція: Дає можливість користувачам і споживачам програмувати та конфігурувати мережу відповідно до угод про рівень обслуговування (SLA).

- Передача SLA: Умови SLA передаються в площину управління для забезпечення їх виконання на інших рівнях.

- Взаємодія: З площиною управління комунікує через північний інтерфейс (Northbound API).

Площина керування (Management Plane).

- Функція: Контролює і забезпечує налаштування політик у площині управління та забезпечує глобальне управління мережею.

- Роль: Оркестрація та інтеграція операцій мережі, що охоплюють інші площини.

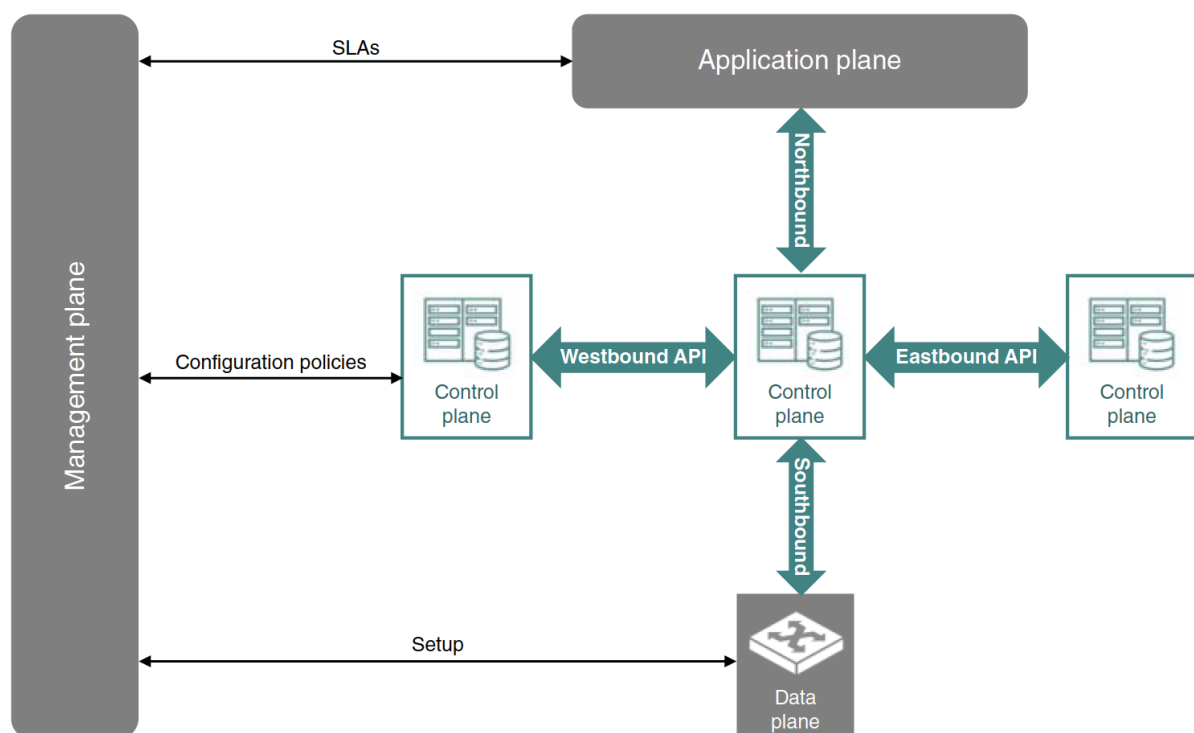


Рисунок 2.6 – Узагальнена архітектура SDN

Різні інтерфейси використовуються для забезпечення взаємодії між площинами:

1. Південний інтерфейс (Southbound API):

- Для комунікації між площиною управління та площиною даних.
- Наприклад, протокол OpenFlow.

2. Північний інтерфейс (Northbound API):

- Для комунікації між площиною управління та площиною додатків.
- Дозволяє розробникам створювати додатки для управління мережею.

3. Східний/західний інтерфейс (East/West API):

- Забезпечує взаємодію між кількома контролерами SDN у площині управління.

- Наприклад, для координації між регіональними контролерами.

Переваги такого поділу.

- Модульність: Кожна площина виконує чітко визначені функції, що полегшує розробку та управління.

- Гнучкість: Легко інтегрувати нові рішення та адаптувати мережу до нових вимог.

- Оптимізація: Централізоване управління та динамічне налаштування політик дозволяють ефективніше використовувати ресурси.

Архітектура SDN забезпечує чітке розмежування функцій і потужний набір інструментів для реалізації програмованих, адаптивних і ефективних мереж.

У контексті мобільних мереж SDN (Software-Defined Networking) інтегрується для оптимізації роботи мереж та впровадження інноваційних рішень у таких аспектах:

1. Мережі п'ятого покоління побудовані за принципом «хмарних» мереж. Основна мережа функціонує як віртуалізована хмарна інфраструктура, де управління і площина даних роз'єднані. Це сприяє гнучкості та масштабованості мережі, що особливо важливо для підтримки різних сценаріїв використання (наприклад, URLLC, eMBB, mMTC).

2. У системах четвертого покоління реалізується концепція поділу площини управління і площини даних, відома як CUPS (Control and User Plane Separation). Цей підхід дозволяє мережам 4G частково використовувати принципи SDN шляхом дезагрегації управлінських і користувацьких функцій, що підвищує ефективність і знижує затримки.

3. У мережах 5G стандартизовано використання північного інтерфейсу (Northbound Interface) та API, що дозволяє зовнішнім додаткам та сервісам отримувати доступ до функціоналу мережі 3GPP. Це відкриває нові можливості для інтеграції сторонніх рішень, таких як IoT-додатки, сервісів з використанням штучного інтелекту, та інших інновацій. Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість та швидкість адаптації до змін у потребах користувачів і технологічних вимогах [18].

2.4 Мережа радіодоступу наступного покоління

Технічні специфікації 5G, вперше опубліковані 3GPP у червні 2018 року, описують архітектуру та функціонування системи 5G (5GS), яка складається з двох основних компонентів:

1. Базова мережа (5GC, 5G Core) є центральним елементом 5G, який забезпечує підтримку управління мобільністю, маршрутизації даних, безпеки та інших функцій. Вона була спроектована для підтримки концепції CUPS (Control and User Plane Separation), що забезпечує гнучкість і ефективність роботи мережі.

2. Мережа радіодоступу наступного покоління (NG-RAN) об'єднує два типи радіодоступу:

- Новий радіоінтерфейс (NR, New Radio) – створений спеціально для 5G для забезпечення високої швидкості, низької затримки та підтримки великої кількості пристроїв.

- LTE (4G) – використовується для забезпечення сумісності із застарілими пристроями.

У рамках NG-RAN визначені два типи базових станцій:

- gNB – забезпечують доступ через новий радіоінтерфейс NR.
- ng-eNB – еволюція базових станцій 4G, які використовують LTE для радіодоступу.

Інтерфейси в NG-RAN.

- NG-інтерфейс забезпечує підключення базових станцій gNB і ng-eNB до ядра 5G. Він розділений на два рівні:

- Рівень управління – підключення до функції управління доступом і мобільністю (AMF, Access and Mobility Management Function).
- Рівень користувача – забезпечує передачу даних до функції, яка відповідає за обробку користувацького трафіку (рисунк 2.7).

- Xn-інтерфейс використовується для з'єднання між базовими станціями NG-RAN. Це вдосконалена версія інтерфейсу X2, який виконує аналогічну функцію в мережах LTE, сприяючи координації та безшовній передачі трафіку між базовими станціями. Така архітектура забезпечує не лише підтримку сучасних вимог до мережі, а й плавний перехід від технологій 4G до 5G, що є важливим для операторів зв'язку та користувачів [19].

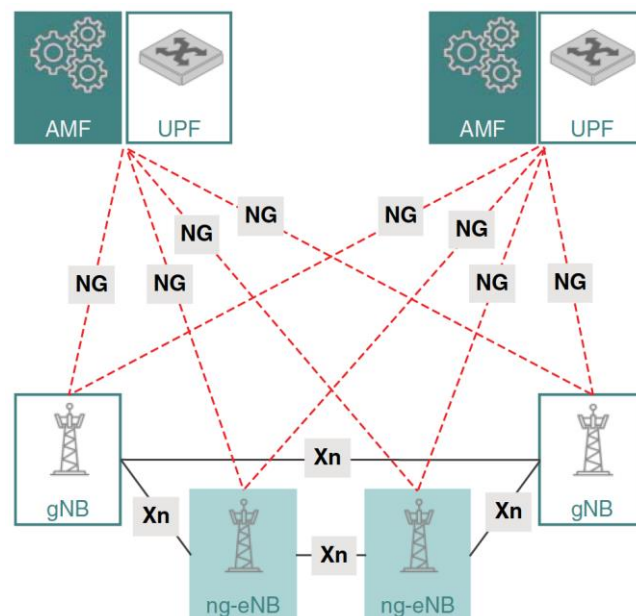


Рисунок 2.7 – Високорівнева архітектура RAN в мережах 5G

Перехід до 5G має свої унікальні особливості, які значно відрізняються від попередніх переходів між поколіннями мобільних мереж. Ключовою характеристикою цього переходу є можливість використання існуючої інфраструктури 4G для поступового впровадження 5G.

Модель 5G NSA була визначена 3GPP наприкінці 2017 року. Вона дозволяє базовим станціям з підтримкою 5G NR (New Radio) підключатися до існуючого ядра 4G (Evolved Packet Core, EPC) та взаємодіяти з базовими станціями LTE. Це рішення стало революційним завдяки наступним перевагам:

- Використання існуючої інфраструктури 5G NSA дозволяє операторам мобільного зв'язку використовувати вже розгорнуті 4G RAN і EPC, що знижує витрати на впровадження.

- Завдяки збереженню 4G-ядра, впровадження 5G RAN із підтримкою NR можливе значно швидше, ніж у разі повного переходу на нову архітектуру.

- Використання NR дозволяє забезпечити вищу швидкість передачі даних і збільшити кількість одночасно підключених пристроїв, особливо в місцях із високим попитом.

До кінця 2022 року всі мобільні оператори, які розгорнули 5G у всьому світі, використовували модель 5G NSA як початкову фазу. Це було зумовлено:

- Економічною ефективністю впровадження NSA вимагає мінімальних удосконалень наявного обладнання.

- Гнучкістю впровадження: оператори могли поступово оновлювати свої мережі, додаючи підтримку 5G NR лише там, де це найбільш необхідно, наприклад, у великих містах або густонаселених районах.

- Мінімізацією ризиків: плавний перехід із використанням вже відпрацьованих елементів 4G знижує технічні ризики впровадження нової технології.

Попри численні переваги, модель 5G NSA має обмеження:

- Залежність від 4G ядра: архітектура NSA обмежує використання деяких ключових функцій 5G, таких як ультранизька затримка та повна підтримка мільйонів IoT-пристроїв.

- Поступовий перехід до Stand-Alone (SA): повноцінні можливості 5G (напр., мережевий поділ, Network Slicing) реалізуються лише після переходу на модель 5G SA з використанням нового ядра 5G Core. Модель 5G NSA стала ефективним стартом для масового впровадження 5G, дозволяючи операторам адаптуватися до нових вимог ринку поступово, з мінімальними витратами та високою швидкістю розгортання [20].

2.5 Обґрунтування розподіленої архітектури gNB

Еволюція архітектури мобільних мереж від 4G до 5G призвела до значних змін у дизайні базових станцій, спрямованих на подолання обмежень попередніх рішень і забезпечення більшої гнучкості, масштабованості та багатовендорної сумісності. У системах 4G базова станція (eNB) була розділена на дві частини:

- BBU (Baseband Unit) – обробляє сигнали.
- RRH (Remote Radio Head) – відповідає за передачу та прийом радіосигналів. Цей підхід, хоч і забезпечив можливість централізації обробки для кількох RRH, мав недоліки:
 - Відсутність стандартизації: використання CPRI (Common Public Radio Interface) як інтерфейсу між BBU та RRH супроводжувалося пропрієтарними адаптаціями постачальників, що унеможливлювало багатовендорну інтеграцію.
 - Монолітна архітектура: незважаючи на частковий поділ, багато функцій залишалися жорстко пов'язаними.

У 5G концепція дезагрегації була розширена та деталізована. Базова станція gNB тепер складається з трьох окремих модулів:

1. CU (Central Unit) – Центральний блок.
2. DU (Distributed Unit) – Розподілений блок.
3. RU (Radio Unit) – Радіомодуль.

RU виконує функції, аналогічні RRH у 4G. Відповідає за передачу та прийом радіосигналів, забезпечуючи фізичний радіоінтерфейс.

- DU виконує функції реального часу, пов'язані з обробкою сигналів та управлінням радіоресурсами. DU зазвичай розташований ближче до RU для мінімізації затримок.

- CU обробляє дані нереального часу, отримані з основної мережі (низхідна лінія) або підготовлені до передачі (висхідна лінія). CU може обслуговувати кілька DU і легко віртуалізується, що покращує гнучкість і масштабованість.

У 5G робота концепції CUPS (Control and User Plane Separation) була розширена від ядра до CU. Центральний блок поділяється на:

- CU-UP (User Plane) – відповідає за обробку користувацького трафіку.
- CU-CP (Control Plane) – виконує функції управління.

Ці частини взаємодіють через стандартизований інтерфейс E1.

- F1-інтерфейс забезпечує зв'язок між CU і DU, розділений на:

- F1-C – для управління.
- F1-U – для передачі даних.

Ця архітектура робить 5G RAN більш гнучкою, відкритою до багатовендорних рішень і здатною адаптуватися до різних сценаріїв використання. Впровадження стандартизованих інтерфейсів, таких як E1 і F1, сприяє досягненню сумісності між обладнанням різних постачальників, що є критично важливим для масштабного розгортання 5G (рис. 2.8).

Архітектура 5G RAN із поділом на DU (Distributed Unit) і RU (Remote Unit) дозволяє підвищити ефективність мережі, але водночас вимагає врахування кількох ключових технічних аспектів, таких як затримки, пропускна здатність магістрального з'єднання та енергоефективність [21].

Особливості взаємодії DU і RU.

1. DU і RU виконують функції, які потребують мінімальних затримок для забезпечення ефективного радіозв'язку. Наприклад, обробка сигналів у реальному часі є критичною для таких функцій, як управління радіоресурсами та кодування сигналів.

2. Для забезпечення функціональності системи 5G DU і RU повинні обмінюватися великими обсягами даних. У повністю розвинених системах

пропускна здатність магістрального з'єднання між RU і DU може сягати десятків Гбіт/с, що висуває високі вимоги до інфраструктури передачі даних.

3. 3GPP не задає жорстких специфікацій щодо розподілу функцій між DU і RU, а надає рекомендації. Це залишає простір для адаптації архітектури залежно від конкретних потреб і можливостей.

- Більше обробки в RU знижує вимоги до пропускної здатності магістрального з'єднання, оскільки попередня обробка сигналів виконується безпосередньо на RU.

- Більше обробки в DU дозволяє централізувати обробку, що спрощує масштабування та управління, але вимагає високошвидкісного магістрального з'єднання.

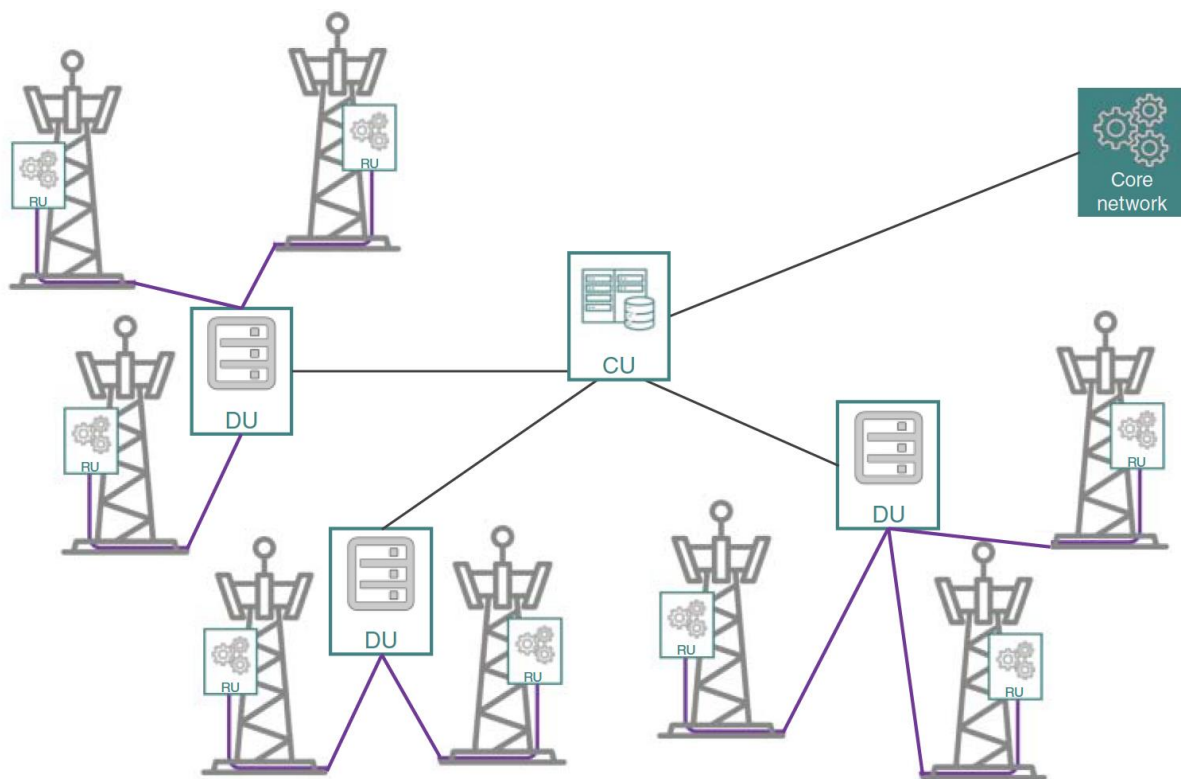


Рисунок 2.8 – Сегмент RAN з використанням розподіленої архітектури gNB

DU піддається віртуалізації, що дає можливість:

- Розгортати функціональність DU у центрах обробки даних із використанням стандартного обладнання (COTS, Commercial Off-The-Shelf).

- Підвищувати гнучкість і масштабованість, зменшуючи витрати на розгортання і модернізацію мережі. Один віртуалізований DU може обслуговувати кілька RU, оптимізуючи використання ресурсів.

Розподіл функціональності між DU і RU залежить від таких факторів:

- Пропускна здатність магістрального з'єднання: Мінімізація обсягу даних, які передаються між RU і DU, може значно знизити вимоги до з'єднання.

- Енергоефективність RU: Оскільки RU не підлягає віртуалізації, його конструкція повинна бути максимально енергоефективною та економічною, оскільки велика кількість RU у мережі може значно вплинути на загальну вартість володіння (TCO).

Загальні переваги архітектури DU-RU.

- Можливість централізованої обробки і віртуалізації DU сприяє зменшенню капітальних витрат (CAPEX) і операційних витрат (OPEX).

- Один DU може обслуговувати декілька RU, що забезпечує гнучкість при розгортанні мереж.

- Завдяки стандартизованим інтерфейсам, таким як F1, оператори можуть використовувати обладнання різних постачальників. У підсумку, оптимальний розподіл функціональності між DU і RU є одним із ключових завдань при розробці та розгортанні 5G RAN, оскільки від нього залежить ефективність, вартість і продуктивність мережі.

Розділена архітектура 5G та віртуалізація мережі RAN є ключовими інноваціями, які не лише знижують витрати на розгортання мереж, але й забезпечують більшу гнучкість і адаптивність до різноманітних ринкових вимог. У міру розвитку технологій LTE Advanced і 5G, мобільні системи стають здатними обслуговувати широкий спектр сценаріїв використання, кожен із яких має унікальні вимоги до мережі. Попри те, що сучасний споживчий ринок переважно орієнтований на такі стандартні послуги, як голосовий зв'язок, обмін повідомленнями і передача даних, подальше впровадження 5G обіцяє розширення спектра варіантів використання. Це включає спеціалізовані рішення

для Інтернету речей (IoT), периферійних обчислень (MEC) та інших інноваційних сфер [22].

Наприклад:

- Мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) акцентує увагу на швидкості передачі даних, щоб забезпечити якісний користувацький досвід.
- IoT-пристрої вимагають низького енергоспоживання та стабільного покриття для ефективної роботи на великих територіях.
- Середовища периферійних обчислень (MEC) потребують мінімальної затримки та високої надійності для підтримки критично важливих додатків.

Таким чином, 5G дозволяє створювати мережі, що відповідають специфічним запитам окремих секторів, забезпечуючи гнучкість і високу ефективність у різних умовах.

Як показує досвід з 4G, розробка і розгортання мережі RAN для задоволення різнорідних вимог, таких як потреби звичайних користувачів і Інтернету речей (IoT), часто є компромісним рішенням. Це означає, що система працює ефективно, але не оптимально для всіх можливих сценаріїв використання. Однак у 5G завдяки дезагрегації функцій RAN і переходу від апаратного забезпечення до програмного забезпечення з'являється можливість адаптувати мережу до конкретних потреб кожного типу користувача.

Концепція Network Slicing грає ключову роль у цьому процесі. Вона дозволяє створювати "віртуальні підмережі", кожна з яких оптимізована для певного сценарію використання. Спочатку ця концепція була реалізована на рівні базової мережі, але тепер вона поступово охоплює й 5G RAN, що значно розширює її функціональність.

Переваги віртуалізованої RAN (vRAN):

1. Завдяки віртуалізації ресурси можна ефективно перенаправляти туди, де вони потрібні в конкретний момент. Це дозволяє зменшити втрати пропускну здатності та уникнути перевантажень.
2. Оптимізація використання. Прикладом є "приливний ефект", коли CU (Centralized Unit) може динамічно адаптуватися до змін трафіку в житлових або

ділових районах залежно від часу доби. Це мінімізує кількість розірваних з'єднань і покращує загальну продуктивність мережі.

3. vRAN дозволяє знизити витрати на апаратне забезпечення та краще масштабувати мережу, зменшуючи потребу в надмірному резервуванні ресурсів.

Таким чином, 5G RAN, з використанням Network Slicing і віртуалізації, забезпечує інноваційний підхід до адаптації мережі, який поєднує ефективність, гнучкість і можливість задовольняти специфічні потреби різних користувачів [23].

2.6 Варіанти топології розподіленої архітектури мережі

При впровадженні мережі RAN із розділеними функціональними блоками, оператори мають вибір між двома основними топологіями: повністю розподіленою та повністю централізованою (рис. 2.9).

Повністю розподілена топологія: Усі функції RAN розміщуються на периферійних вузлах (базових станціях). Такий підхід мінімізує залежність від транспортної мережі, оскільки більшість обробки даних виконується локально. Однак він менш ефективний з точки зору масштабованості та управління ресурсами, а також вимагає значних інвестицій у потужності кожної базової станції.

Повністю централізована топологія: Усі або більшість функцій RAN зосереджені в центральних обчислювальних вузлах (ЦОВ). Це забезпечує високу масштабованість, зручність управління та спрощує оновлення програмного забезпечення. Проте такий підхід залежить від високопродуктивної транспортної мережі з низькою затримкою, що може значно збільшити початкові витрати на її розгортання.

Вибір оптимальної топології залежить від таких факторів:

1. Централізація та чутливість до затримок: Деякі функції, наприклад, обробка сигналів фізичного рівня (PHY), дуже чутливі до затримок і вимагають

мінімальної відстані між вузлом обробки та користувачем. Це обмежує можливість повної централізації.

2. Наявність транспортної інфраструктури: Для централізованих рішень потрібна оптична або інша високошвидкісна транспортна мережа з низькою затримкою, яка не завжди доступна, особливо у віддалених регіонах.

3. Складність і вартість: Централізація може скоротити операційні витрати завдяки кращому управлінню ресурсами, але вимагає значних початкових інвестицій у створення інфраструктури. Розподілені рішення простіші в реалізації, але дорожчі в обслуговуванні.

4. Сценарії використання: Для міських районів, де затримка є менш критичною, централізація може забезпечити кращу ефективність. У сільських районах, де пріоритетом є покриття, розподілена топологія може бути більш доцільною. Таким чином, оператори часто комбінують обидва підходи, використовуючи гібридні моделі, щоб максимально адаптуватися до локальних умов і вимог користувачів [24].

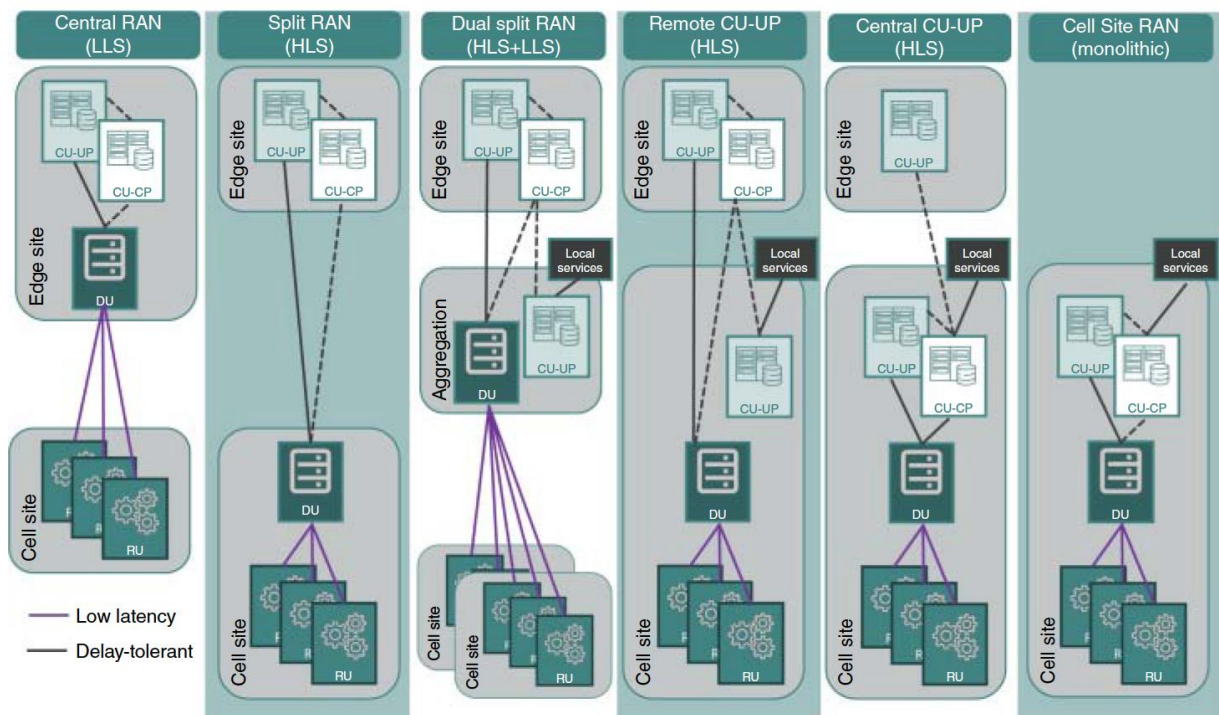


Рисунок 2.9 – Розподілені топології RAN

Топологія RAN на високому рівні може бути класифікована залежно від типу поділу функціональності, реалізованого в мережі, зокрема за варіантами, визначеними 3GPP. Основні конфігурації включають високорівневий поділ (HLS) та низькорівневий поділ (LLS).

Основні характеристики:

- Високорівневий поділ (High-Level Split, HLS):
 - Функції центрального блоку (CU) фізично відокремлені від решти компонентів RAN.
 - Найбільш розповсюджений варіант поділу — варіант 2, який повністю стандартизований 3GPP.
 - Забезпечує значну централізацію управління та дозволяє більш гнучко оптимізувати ресурси мережі.
 - Потребує високошвидкісного з'єднання між CU і периферійними компонентами (DU/RU), оскільки більшість функцій RHY залишаються на периферії.
- Низькорівневий поділ (Low-Level Split, LLS):
 - Розподіл функціональності відбувається на рівні нижчих шарів моделі OSI (фізичний або MAC рівні).
 - Цей підхід є переважним для таких ініціатив, як O-RAN Alliance, які зосереджуються на стандартизації інтерфейсів між DU і RU.
 - Дозволяє інтегрувати обладнання різних виробників та забезпечує гнучкість у побудові мереж.
 - Вимагає низької затримки в транспортній мережі, оскільки багато функцій RHY виконуються в централізованих вузлах.

Комбіновані підходи:

Розгортання RAN часто поєднує HLS і LLS, особливо в дезагрегованих мережах, де центральний блок (CU), розподілений блок (DU), та радіоблок (RU) фізично розташовані у різних місцях. Це забезпечує максимальну гнучкість і дозволяє налаштовувати мережу під конкретні сценарії використання [25].

Приклади топологій за NGMN:

Альянс NGMN (Next Generation Mobile Networks) додатково деталізував можливі топології, запропонувавши кілька варіантів конфігурацій для різних сценаріїв:

- Централізація функцій RRU у CU з підвищеними вимогами до оптичної інфраструктури.
- Розподілені RRU-функції на рівні DU для сценаріїв із меншими вимогами до затримки.
- Гібридні топології, що дозволяють балансувати між затримкою, вартістю і масштабованістю мережі.

Переваги і виклики:

- HLS: Простота в управлінні, висока масштабованість, але залежність від транспортної мережі.
- LLS: Краще підходить для критично важливих застосувань із низькою затримкою, але вимагає складної інфраструктури. Таким чином, вибір між HLS, LLS або їхньою комбінацією залежить від специфічних потреб оператора, інфраструктурних обмежень та цілей розгортання [26].

2.7 Розвиток фронтального зв'язку: eCPRI

Технологія радіодоступу LTE постійно еволюціонувала, переходячи від базового LTE до LTE Advanced і LTE Advanced Pro. Це дозволило суттєво збільшити максимальну пропускну здатність базових станцій. Основними причинами стали вдосконалення цифрової обробки сигналів, використання більших антенних масивів (технологія MIMO) та перепрофілювання частотних діапазонів, що спочатку використовувалися для старіших стандартів мобільного зв'язку. Такі зміни спричинили значне збільшення обсягу переданої інформації між віддаленими радіомодулями (RRH) і блоками обробки сигналів (BBU) [27].

У той час як LTE Advanced Pro працював із значним збільшенням кількості антен і пропускну здатності, розвиток 5G вимагав ще більших вдосконалень. 5G передбачає використання масивів з десятками антенних елементів (масивні

МІМО-системи) і більші обсяги трафіку, що зробило традиційний CPRI (Common Public Radio Interface) недостатньо ефективним.

У 2017 році для вирішення цієї проблеми провідні постачальники телекомунікаційного обладнання, такі як Ericsson, Huawei, NEC і Nokia, розробили специфікації оновленого протоколу eCPRI (enhanced CPRI). Головними перевагами eCPRI є:

- Зменшення вимог до пропускної здатності в 10 разів завдяки переходу на пакетний транспорт (Ethernet або IP).
- Покращена синхронізація, що дозволяє зменшити затримку та джиттер.
- Гнучкість мережі, яка забезпечується підтримкою багатоточкових з'єднань між елементами eREC (evolved REC) і eRE (evolved RE).

Ці вдосконалення відкривають нові можливості для гнучкого масштабування та ефективного розгортання мобільних мереж нового покоління.

Переваги гнучкого розподілу функціональності:

1. Мінімізація вимог до транспортної мережі:

- Якщо більша частина функцій фізичного рівня переноситься на eRE, це дозволяє знизити вимоги до пропускної здатності магістральної мережі між RRH і BBU, а також збільшити відстань між ними.

- Такий підхід доцільний для середовищ з обмеженими мережевими ресурсами або великими географічними відстанями.

2. Зменшення складності та витрат на обладнання eRE:

- У випадку перенесення основної обчислювальної функціональності на eREC спрощується конструкція і зменшується вартість eRE.

- Це вигідно, оскільки eRE зазвичай розташовані на базових станціях, де фізична модернізація може бути складною.

3. Гнучкість у модернізації:

- Концентрація більшої кількості функцій у BBU (через eREC) дозволяє легко впроваджувати нові функції, як-от агрегацію несучих (CA), координовану багатоточкову передачу (CoMP) або управління МІМО, шляхом оновлення програмного забезпечення BBU.

- Це економічно ефективніше та логістично простіше, оскільки один BBU може обслуговувати кілька антенних систем.

Реалізовані функції фізичного рівня:

- Агрегація несучих (CA): об'єднання кількох частотних діапазонів для збільшення пропускної здатності.
- Координована багатоточкова передача (CoMP): забезпечення більш стабільного зв'язку через координацію між кількома базовими станціями.
- Управління MIMO: оптимізація роботи множинних антен для збільшення продуктивності та якості передачі даних.

Таким чином, eCPRI надає операторам мобільного зв'язку можливість адаптувати інфраструктуру до конкретних умов, збалансовуючи вимоги до пропускної здатності, витрати на обладнання та гнучкість модернізації. Це робить протокол надзвичайно важливим для ефективного впровадження 5G-мереж (рис. 2.10) [28].

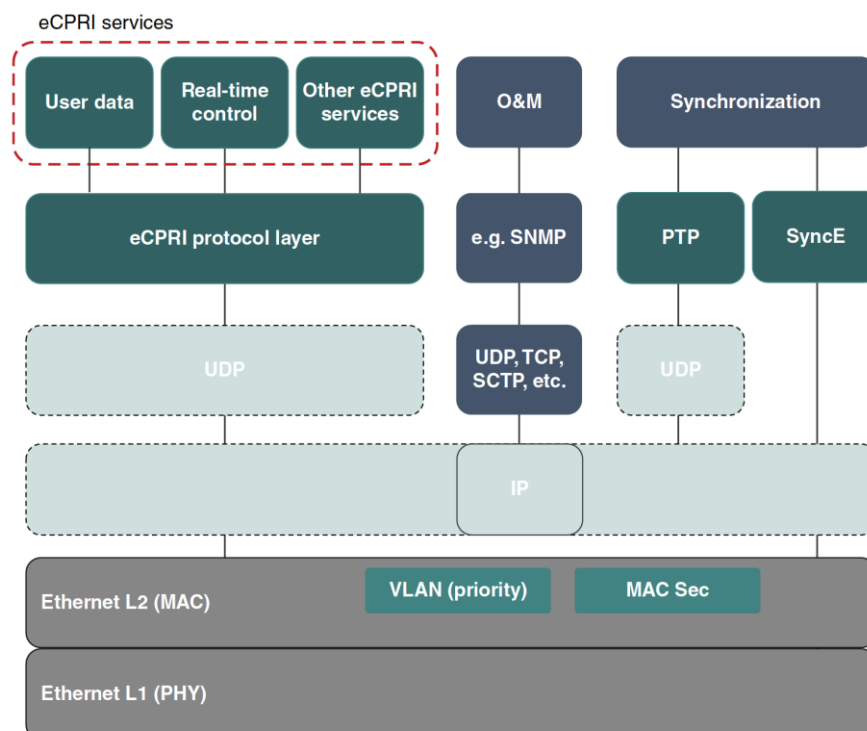


Рисунок 2.10 – Архітектура інтерфейсу eCPRI

Отже, одним із ключових нововведень протоколу eCPRI порівняно з попередником CPRI є можливість гнучкого розподілу функціональності фізичного рівня між компонентами мережі: eREC (розташований на BBU) і eRE (розташований поблизу антенної системи). Це нововведення забезпечує три варіанти розподілу функцій фізичного рівня, кожен із яких має свої унікальні переваги та недоліки, зокрема щодо вимог до пропускної здатності, синхронізації та структури транспортної мережі [29].

2.8 Розвиток архітектури базової станції телекомунікаційної мережі

Архітектура базових станцій зазнала значної трансформації протягом останніх років, відображаючи вплив сучасних технологій і концепцій, таких як віртуалізація та хмарні обчислення. Перехід до віртуалізованої RAN (vRAN) став ключовим етапом цієї еволюції [30]. Етапи еволюції до vRAN:

1. У традиційній архітектурі всі функції базової станції (BBU та RRH) інтегровані в одному фізичному модулі. Це забезпечує високу продуктивність, але є неефективним у великих мережах через високу вартість обладнання та обмежену масштабованість.

2. Архітектура C-RAN (Centralized RAN):

- В C-RAN функції BBU централізовані в одному вузлі, а RRH розміщені поблизу антен. Це знижує витрати на обладнання та спрощує управління мережею.

- Головний виклик: високі вимоги до транспортної мережі (зокрема, пропускної здатності й затримок).

3. З розвитком технологій віртуалізації з'явилася можливість розділити функціональність BBU на віртуалізовані компоненти, розміщені у стандартному серверному обладнанні (COTS – Commercial Off-The-Shelf). Це стало основою для vRAN.

4. Всі функції BBU виконуються у вигляді програмного забезпечення на віртуалізованій платформі. Це забезпечує високу гнучкість, масштабованість і можливість швидкого оновлення.

Основні особливості vRAN:

1. Можливість динамічного розподілу функцій між фізичним обладнанням (RRH) і віртуалізованими блоками (vBBU), залежно від потреб мережі.
2. Використання стандартного серверного обладнання зменшує витрати на закупівлю та обслуговування обладнання.
3. Завдяки SDN і NFV (Network Function Virtualization) vRAN забезпечує легке впровадження нових функцій і адаптацію до змін у навантаженні.
4. Оператори можуть використовувати різні конфігурації залежно від вимог географії, пропускної здатності або затримок.
5. Оскільки функції виконуються у вигляді програмного забезпечення, vRAN дозволяє швидко інтегрувати нові технології без необхідності заміни фізичного обладнання.

Ключова відмінність між різними архітектурами RAN полягає у способі розподілу функцій між RRH та BBU (чи vBBU). Як показано на рисунку 2.11 (який ви можете надати для детального опису), цей розподіл впливає на:

- Вимоги до транспортної мережі.
- Витрати на обслуговування.
- Гнучкість і масштабованість мережі.

Завдяки цим етапам еволюції RAN оператори можуть ефективно впроваджувати інновації, адаптуючи свою інфраструктуру до зростаючих вимог сучасних мобільних мереж, таких як 5G. Високорівнева візуалізація еволюції архітектури RAN зображена на рисунку 2.11, де можна помітити, що різниця полягає в тому, як розділені RRH і BBU [31].

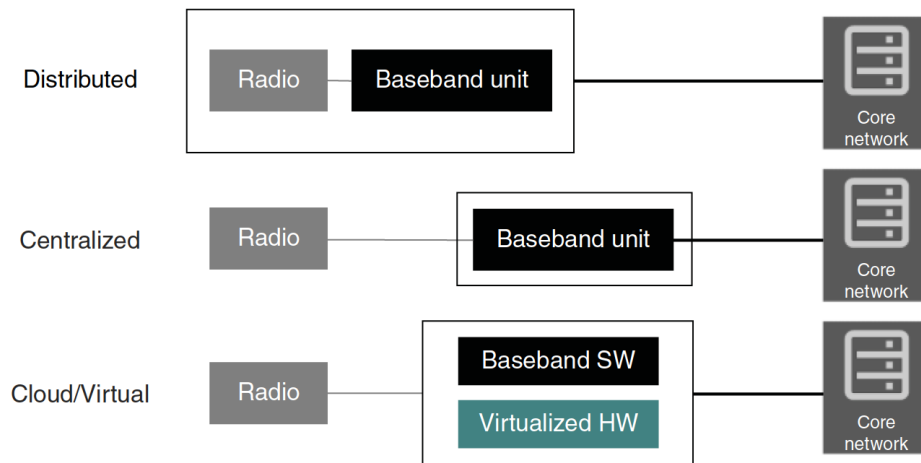


Рисунок 2.11 – Структура побудови мережі RAN

У розподіленій архітектурі RAN (Distributed RAN, або D-RAN) радіомодулі (RRH) і блоки базової обробки (BBU) розташовані фізично разом, як правило, поблизу антенної системи. Цей підхід є класичним і широко застосовувався до впровадження централізованої та віртуалізованої RAN. Особливості Distributed RAN:

1. У D-RAN RRH і BBU зазвичай розташовані на одному майданчику, наприклад, у нижній частині антенної щогли. Це дозволяє використовувати короткі кабелі або оптоволоконні з'єднання, що мінімізує затримки та втрати сигналу (рис. 2.12).

2. D-RAN ідеально підходить для покриття великих площ, наприклад, у сільській місцевості або для надання покриття на автомагістралях, де щогли розташовані на значній відстані одна від одної.

3. Переваги:

- Мінімальні вимоги до мережі зв'язку між RRH і BBU: невелика відстань між модулями спрощує координацію та синхронізацію.

- Простота налаштування: координація між RRH і BBU не вимагає складних налаштувань транспортної мережі.

- Надійність: оскільки все обладнання знаходиться на одному майданчику, менша ймовірність виникнення затримок або втрат через проблеми у транспортній мережі.

4. Недоліки:

- Висока вартість розгортання: кожна стільникова станція повинна мати власний BBU, що підвищує капітальні витрати.

- Складність масштабування: окреме обслуговування BBU для кожної станції ускладнює модернізацію та масштабування мережі.

- Менша гнучкість: через фіксовану конфігурацію складніше інтегрувати нові функції без фізичного оновлення обладнання.

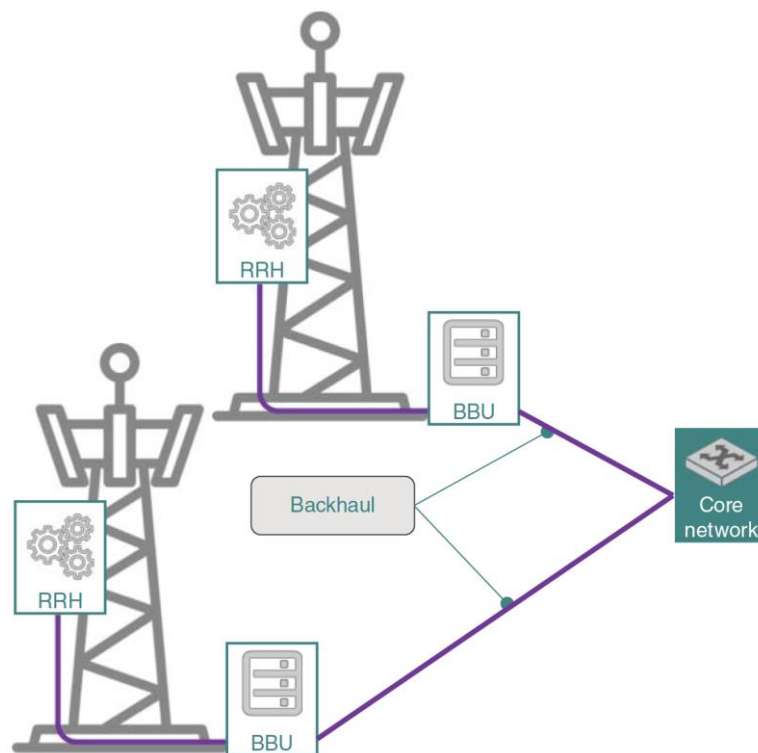


Рисунок 2.12 – Архітектура системи з розподіленням RAN

Розподілена RAN підходить для регіонів, де важлива стабільність зв'язку, але немає необхідності в централізованій обробці даних, наприклад, у віддалених чи сільських зонах із низьким навантаженням. На відміну від D-RAN, архітектури C-RAN та vRAN дозволяють централізувати обчислювальні

ресурси, зменшуючи витрати на обладнання і спрощуючи модернізацію. Однак вони вимагають високошвидкісної транспортної мережі з мінімальними затримками, що може бути проблематично в певних умовах. Таким чином, D-RAN залишається актуальною для сценаріїв, де важлива проста і стабільна інфраструктура, хоча її ефективність знижується у порівнянні з сучасними підходами в урбанізованих або високонавантажених мережах [32].

Розподілена архітектура RAN (D-RAN) була домінуючою в епоху раннього розвитку мобільного зв'язку, особливо для стандарту 2G. У той час базові станції зазвичай поєднували RRH (радіомодуль) і BBU (блок обробки сигналів) на одному майданчику, що відповідало технологічним і експлуатаційним вимогам того періоду.

Причини поширеності D-RAN у 2G:

1. Низькочастотні спектри:

- Технологія 2G працювала в низьких частотних діапазонах (зазвичай нижче 1 ГГц), що забезпечувало широке покриття і хорошу проникність сигналу, особливо в сільській місцевості.

- Великий радіус дії дозволяв мінімізувати кількість базових станцій.

2. Основними послугами були голосові дзвінки та короткі текстові повідомлення (SMS), які мали низькі вимоги до пропускну здатності та затримок.

3. У той час інфраструктурні рішення були відносно простими, і розміщення всіх функцій базової станції на одному майданчику було оптимальним за вартістю й експлуатацією.

Виклики сучасного використання D-RAN:

1. В епоху 3G, 4G і 5G мережі працюють у ширшому спектрі частот, включаючи середні й високі діапазони. Для їх ефективного використання потрібна більша кількість базових станцій, що значно ускладнює впровадження D-RAN.

2. Складність розгортання:

- У сучасних умовах придбання нових майданчиків для D-RAN стає все більш складним і дорогим. Це обумовлено високою вартістю:

- Пасивних елементів інфраструктури (щогли, корпуси, системи охолодження).

- Оренди землі або приміщень для встановлення обладнання.

3. Якщо оператор використовує D-RAN для різних поколінь мереж (наприклад, 2G, 3G, 4G), йому потрібно встановлювати окремі RRH і BBU для кожного покоління. Це створює надлишкові витрати та ускладнює управління.

4. Розподілене розташування кожної базової станції підвищує енергетичні витрати, що є важливим фактором у сучасних мережах, орієнтованих на ефективність.

Сучасні архітектури, такі як C-RAN та vRAN, дозволяють централізувати обчислювальні функції й зменшити залежність від фізичного обладнання на кожному майданчику. Це вирішує багато проблем D-RAN:

- Зниження витрат на обладнання та його обслуговування.

- Підвищення гнучкості розгортання та модернізації.

- Оптимізація використання спектра через координацію ресурсів.

Хоча D-RAN залишається доцільною для окремих випадків (наприклад, сільські райони або автомагістралі), для щільнонаселених зон і сучасних мереж її використання стає менш ефективним. Тому оператори все частіше відмовляються від цієї архітектури на користь централізованих і віртуалізованих підходів [33].

Централізована RAN (C-RAN) стала наступним етапом еволюції архітектури базових станцій, спрямованим на підвищення ефективності використання ресурсів і гнучкості розгортання мереж. Вона вирішує багато проблем, властивих D-RAN, завдяки централізації функцій обробки сигналів.

Основні особливості централізованої RAN:

1. Розподіл компонентів:

- RRH (радіомодуль) розташовується поблизу антенної системи, виконуючи функції, пов'язані з радіочастотами.

- BBU (блок обробки сигналів) переміщений у централізоване місце і відповідає за обробку сигналів від декількох RRH, об'єднаних в одній або кількох базових станціях.

2. Оскільки на сайті розташовані лише RRH і антени, він стає компактнішим і дешевшим. Це дозволяє розміщувати базові станції у важкодоступних або нетрадиційних місцях (наприклад, у приміщеннях, на фасадах будівель або стовпах освітлення).

3. Зосередження обчислювальних ресурсів в одному місці дозволяє оптимізувати їх використання, легко впроваджувати нові функції та зменшувати загальні витрати на обслуговування.

Переваги централізованої RAN:

1. Центральна обробка дозволяє динамічно розподіляти ресурси між базовими станціями залежно від навантаження.

2. Менша кількість обладнання на сайті знижує витрати на обслуговування та інфраструктуру (наприклад, енергоспоживання, охолодження).

3. Централізована обробка дозволяє реалізувати сучасні функції, такі як координована багатоточкова передача (CoMP) або агрегація несучих (CA), для кращого управління інтерференцією та збільшення пропускної здатності.

4. Оновлення функціональності здійснюється шляхом оновлення центрального BBU, а не фізичної заміни обладнання на численних сайтах.

Недоліки централізованої RAN:

1. З'єднання між RRH і BBU, яке тепер може досягати кількох кілометрів, вимагає високої пропускної здатності та мінімальної затримки. Це зазвичай забезпечується лише за допомогою оптоволоконних з'єднань.

2. Віддалене розташування RRH і BBU ускладнює їхню координацію, особливо в умовах високих затримок або ненадійного транспортного каналу.

3. Забезпечення відповідної пропускної здатності для передачі даних між RRH і BBU може потребувати значних інвестицій у транспортну інфраструктуру.

Централізована RAN найбільше підходить для урбанізованих районів, де потрібне щільне розташування базових станцій. Також вона ефективна в місцях із високим трафіком, де можна централізовано оптимізувати ресурси для обробки великих обсягів даних. C-RAN стала важливим кроком у напрямку більш гнучкої та економічної архітектури RAN. Її переваги очевидні в умовах високонавантажених мереж, однак виклики, пов'язані з вимогами до транспортної мережі, потребують значних інвестицій у інфраструктуру, зокрема оптоволоконну. Це прокладає шлях до більш просунутих рішень, таких як віртуалізована RAN (vRAN) і хмарна RAN (Cloud RAN), що вирішують більшість обмежень C-RAN. (рисунок 2.13) [34].

Централізована RAN (C-RAN) набула популярності з впровадженням нових поколінь мобільного зв'язку, особливо з приходом 4G, оскільки зростання попиту на передачу даних вимагало значного розширення пропускної здатності та збільшення кількості базових станцій. Однак, через фізичні та економічні обмеження, розгортання розподілених базових станцій RAN стало менш практичним, що зробило C-RAN оптимальним рішенням для багатьох сценаріїв.

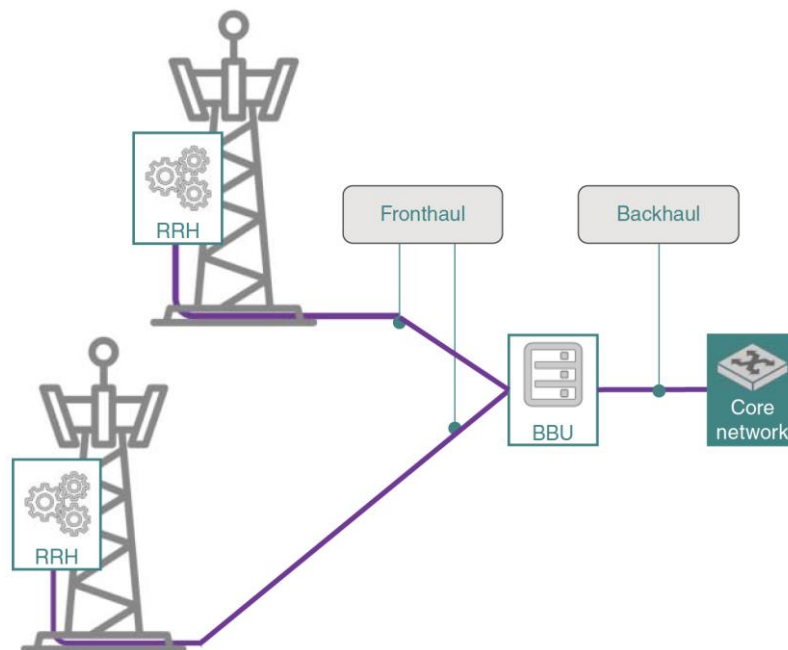


Рисунок 2.13 – Архітектура системи з централізованим RAN

Причини переходу до C-RAN в епоху 4G:

1. Високошвидкісна передача даних вимагає використання більш високих частот, які забезпечують ширші спектральні діапазони, але мають менший радіус дії. Це змушує операторів ущільнювати мережі шляхом додавання базових станцій.

2. У багатьох випадках розміщення нових базових станцій є фізично неможливим (наприклад, в історичних або густо забудованих районах) або економічно недоцільним через високу вартість оренди, будівництва або обслуговування.

3. C-RAN дозволяє встановлювати компактні та менш затратні RRH у місцях із високою щільністю користувачів, забезпечуючи при цьому централізовану обробку даних для кількох RRH через спільний BBU.

4. У централізованій архітектурі RRH і BBU зазвичай постачаються одним виробником, що забезпечує високу сумісність між компонентами системи [35].

Перехід до централізованої RAN і її похідних (vRAN, Cloud RAN) дозволив операторам адаптувати свої мережі до вимог сучасного мобільного зв'язку, забезпечуючи:

- Оптимізацію витрат,
- Гнучкість у розгортанні,
- Здатність ефективно обслуговувати зростаючий трафік даних.

Однак впровадження цих технологій вимагає інвестицій у транспортну інфраструктуру, що залишається важливим викликом для багатьох операторів. Хмарна RAN стає ключовим рішенням для 5G, оскільки вона дозволяє ефективно підтримувати масштабованість і високі показники продуктивності мережі (рис. 2.14). Її також іноді називають віртуалізованою RAN [36].

Одним із ключових етапів розвитку централізованої RAN є її віртуалізація та інтеграція з хмарними технологіями. У vRAN функції BBU виконуються віртуально, на стандартному серверному обладнанні, замість спеціалізованого апаратного забезпечення. Це дозволяє гнучко розподіляти обчислювальні ресурси. Хмарна RAN (Cloud RAN):

- Вона є наступним кроком після vRAN, де BBU повністю віртуалізована і розміщена в хмарній інфраструктурі. Це забезпечує такі переваги:

- Оператори можуть використовувати хмарну інфраструктуру, щоб об'єднувати обчислювальні потужності для обслуговування великої кількості базових станцій.

- Мережеві функції можуть бути налаштовані та масштабовані відповідно до потреб, наприклад, збільшення обчислювальної потужності під час пікових навантажень.

- Завдяки централізації та використанню стандартного серверного обладнання замість спеціалізованого.

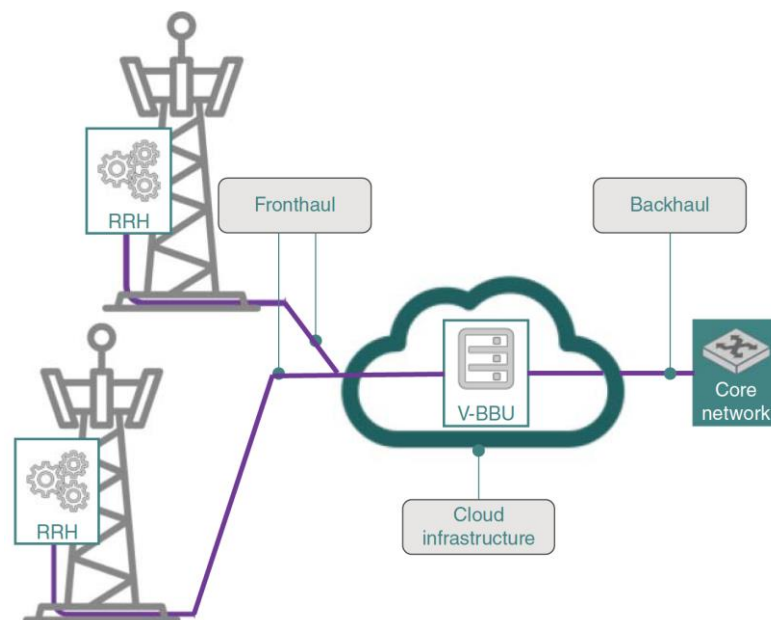


Рисунок 2.14 – Архітектура системи з хмарним RAN

Переваги хмарної RAN:

- Швидке впровадження нових функцій завдяки програмному оновленню мережевих функцій.

- Використання централізованого управління для ефективнішого розподілу ресурсів і зниження інтерференції.

- Завдяки меншій залежності від фізичного обладнання на місці та використанню загальної хмарної інфраструктури.

Недоліки хмарної RAN:

- Високі вимоги до транспортної мережі: Необхідність оптоволоконних каналів із низькою затримкою для підключення RRH до віртуалізованих BBU.

- Складність впровадження: Інтеграція хмарної інфраструктури з існуючими мережами потребує значних зусиль і інвестицій [37].

2.9 Віртуалізована RAN (vRAN)

Віртуалізована радіомережа доступу (vRAN) дійсно є еволюційним кроком у розвитку радіомереж. Основна ідея vRAN — перенесення функцій обробки сигналів і управління з апаратного забезпечення на програмне, що працює у віртуалізованому середовищі. Завдяки цьому підходу вдається досягти таких ключових переваг:

1. Завдяки відділенню програмного забезпечення від апаратного забезпечення можливо оновлювати функціонал BBU (Baseband Unit) без заміни фізичного обладнання. Це сприяє зменшенню капітальних витрат (CAPEX) і операційних витрат (OPEX).

2. Інтеграція принципів DevOps, SDN (Software-Defined Networking) та управління життєвим циклом дозволяє автоматизувати процеси розгортання, обслуговування та модернізації мережі.

3. Завдяки віртуалізації можливо окремо масштабувати площину управління (Control Plane) та площину користувача (User Plane), залежно від потреб. Це дозволяє ефективніше використовувати ресурси, оскільки не потрібно збільшувати одну площину разом із розширенням іншої.

4. Використання хмарної архітектури дозволяє об'єднувати ресурси з різних вузлів, що забезпечує їх оптимальне використання. Це особливо важливо для сценаріїв із нерівномірним навантаженням на мережу [38].

Таким чином, vRAN є не лише технічним оновленням, а й стратегічним інструментом для операторів мобільних мереж, який забезпечує більшу ефективність, зменшення витрат та адаптивність до змін у технологічному ландшафті (приклад показаний на рис. 2.15) [39].

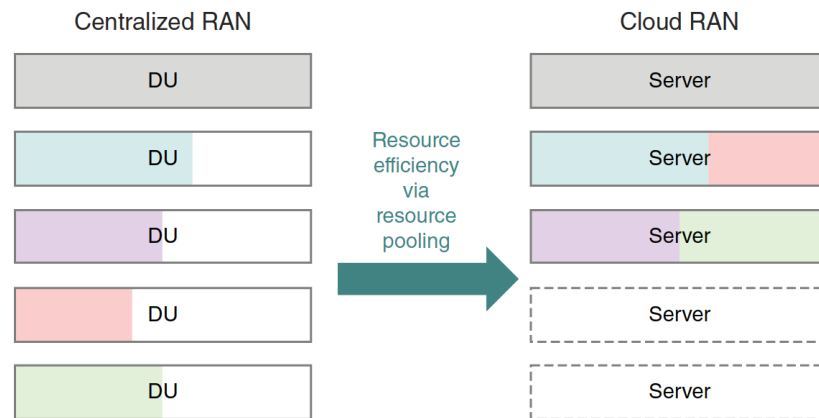


Рисунок 2.15 – Використання ресурсів з об'єднанням

2.10 Висновки до розділу 2

Впровадження технологій ІТ-індустрії в телекомунікаційну галузь дійсно стикається з унікальними викликами, пов'язаними з жорсткими вимогами до надійності, доступності та відмовостійкості. Основні аспекти, які визначають ці виклики та компроміси, можна узагальнити наступним чином:

1. Вимоги до надійності та доступності

- П'ять дев'яток (99.999%) означають максимально допустиму тривалість простою системи лише 27 секунд на рік, що є набагато вищим стандартом, ніж у традиційних ІТ-системах.

- Відмовостійкість і миттєве відновлення після збоїв є критично важливими, особливо в умовах постійного обслуговування користувачів і підтримки екстрених служб.

2. Виклики чистої форми vRAN

- Повна віртуалізація (тобто перенесення всіх функцій на комерційне готове обладнання (COTS)) стикається з такими проблемами:

- Нестача продуктивності для критичних обчислювальних завдань. Деякі алгоритми, такі як оцінка каналу, контроль потужності або швидке перетворення Фур'є (FFT), вимагають високої продуктивності та низьких затримок, які важко забезпечити тільки програмними засобами.

- Висока залежність від апаратних прискорювачів. Хоча віртуалізація забезпечує гнучкість, апаратні рішення (FPGA, ASIC) залишаються ключовими для виконання ресурсоємних обчислень у реальному часі.

3. Поєднання апаратних та програмних рішень

- Гібридний підхід, який передбачає використання апаратних прискорювачів разом із віртуалізованими елементами, є оптимальним компромісом на сьогодні.

- Апаратні прискорювачі забезпечують виконання критичних завдань із жорсткими вимогами до затримки.

- Віртуалізовані елементи забезпечують гнучкість, масштабованість і можливість оновлення.

4. Вплив SDN та NFV

Використання технологій SDN (Software-Defined Networking) та NFV (Network Functions Virtualization) може компенсувати обмеження ІТ-систем:

- Мікросервісна архітектура та розподіл навантаження дозволяють уникати єдиної точки відмови.

- Механізми оркестрації та автоматизації можуть підвищити надійність через резервування та швидке відновлення після збоїв.

5. Перспективи повної софтверизації

- Хоча софтверизація є кінцевою метою, її впровадження вимагає подальшого розвитку COTS-обладнання, вдосконалення алгоритмів оптимізації програмного забезпечення та інтеграції нових технологій, таких як GPU та DPUs.

- У майбутньому можна очікувати, що віртуалізація досягне рівня, який дозволить ефективно працювати навіть критичним алгоритмам, але для цього потрібні інновації в апаратному забезпеченні та програмних платформах.

Таким чином, телеком-галузь рухається до віртуалізації, однак її повномасштабне впровадження потребує ретельного балансу між ефективністю, продуктивністю та вимогами до надійності.

3 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ RAN В БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ

Open RAN (відкрита RAN) є важливим кроком у розвитку радіомереж завдяки своїй відкритій архітектурі, яка сприяє створенню інноваційних варіантів використання та підтримці традиційних сценаріїв. Її успіх залежить не лише від технологічних досягнень, але й від здатності впроваджувати ці досягнення в реальні бізнес-сценарії. Розглянемо ключові аспекти та варіанти використання Open RAN.

Основні варіанти використання Open RAN зосереджені на покращенні базових можливостей мережі та взаємодії з користувачами:

1. Покращення взаємодії з клієнтами

- Використання аналітики даних і штучного інтелекту (AI) для адаптації до потреб клієнтів у реальному часі.
- Оптимізація якості обслуговування (QoS) через автоматизоване управління параметрами мережі.

2. Оптимізація розгортання мережі

- Автоматизація процесу планування, розгортання та налаштування мережі за допомогою AI/ML (машинного навчання).
- Зменшення витрат і часу на розгортання через підтримку мультивендорних рішень.

3. Розширені можливості RAN

- Нарізка мережі (Network Slicing): створення віртуальних сегментів мережі для підтримки різних сценаріїв обслуговування (IoT, автономний транспорт, високошвидкісний мобільний зв'язок).
- Спільне використання ресурсів: об'єднання інфраструктури між операторами для зменшення витрат і покращення покриття.

Галузеві варіанти використання Open RAN орієнтовані на конкретні сфери та прикладні сценарії [40]:

1. Мобільний зв'язок

- Покращення продуктивності мереж 5G через інтеграцію AI для динамічного управління спектром.

- Надання гнучких можливостей масштабування для покращення роботи в умовах пікового навантаження (наприклад, під час великих подій).

2. Приватні мережі для вертикальних компаній

- Розгортання приватних 5G-мереж для підприємств у таких галузях, як виробництво, охорона здоров'я, логістика.

- Підтримка специфічних вимог до продуктивності, безпеки та локалізації даних.

3. Інтелектуальне управління RAN

- Програмованість мережі: Open RAN дозволяє розробляти додатки для налаштування функцій RAN під специфічні потреби.

- Реалізація **RIC (RAN Intelligent Controller) для централізованого управління та оптимізації мережі.

Ключові переваги Open RAN для бізнесу

- Інновації через відкритість: підтримка мультивендорних рішень стимулює конкуренцію і розвиток.

- Зниження витрат: економія на інфраструктурі завдяки модульності та спільному використанню ресурсів.

- Гнучкість і адаптивність: можливість швидко впроваджувати нові послуги і підтримувати індивідуальні запити клієнтів.

Open RAN не лише змінює підхід до створення мереж, але й відкриває нові бізнес-моделі, які забезпечують гнучкість і масштабованість. Її впровадження сприяє створенню конкурентоспроможної екосистеми, яка дає змогу операторам реагувати на сучасні виклики та можливості [41].

3.1 Особливості впровадження компонентних технологій 5G

Архітектура O-RAN є інноваційною концепцією, яка має на меті підвищити гнучкість і ефективність розгортання та управління мережами 5G, зокрема в аспекті технології mMIMO (Massive Multiple-Input Multiple-Output). Ось основні аспекти взаємодії O-RAN та mMIMO:

Технологія mMIMO в 5G - формування променя (Beamforming): Використання декількох антен для створення вузькоспрямованих променів дозволяє забезпечити ефективніше передавання даних до користувачів, зменшуючи інтерференцію та покращуючи якість зв'язку.

- Виклики у використанні mMIMO:
 - Складність налаштування через велику кількість параметрів.
 - Можливість фіксованих обмежень, накладених виробниками.
 - Необхідність адаптації до різних сценаріїв розгортання (макростільники, 3D-стільники тощо).

Архітектура Open RAN забезпечує гнучкий і модульний підхід завдяки інтеграції наступних компонентів:

1. SMO (Service Management and Orchestration):
 - Відповідає за збір даних (конфігурацій, вимірювань, показників продуктивності) з мережі.
 - Використовує ці дані для налаштування оптимальних параметрів променя на вузлах RAN або передає дані до RIC.
2. RIC (RAN Intelligent Controller):
 - Non-RT RIC (Non-Real-Time RIC): Здійснює довгострокову оптимізацію, аналізує великі обсяги даних, навчає AI/ML моделі.
 - Near-RT RIC (Near-Real-Time RIC): Виконує швидкі налаштування (наприклад, в діапазоні 10 мс – 1 с), оптимізує формування променів, адаптуючи мережу до поточної ситуації.

Інтелектуальні можливості O-RAN.

- AI/ML для адаптації: Збирання даних від SMO та RAN дозволяє тренувати AI/ML моделі для побудови більш оптимальних конфігурацій mMIMO. Наприклад, це може бути коригування діаграми спрямованості для покращення обслуговування в реальному часі [42].

- Гнучкість налаштувань: Рішення на основі O-RAN дозволяють операторам самостійно адаптувати параметри системи без жорсткої прив'язки до обмежень виробника.

Потенційні переваги для 5G.

1. Оптимізація продуктивності mMIMO навіть у багатопостачальницькому середовищі.

2. Динамічне управління трафіком та розподілом спектра (DSS).

3. Підвищення ефективності енергозбереження та локального позиціонування в закритих приміщеннях. Це дозволяє архітектурі O-RAN сприяти створенню більш інтелектуальних, масштабованих та адаптивних мереж нового покоління, що є важливим для успішної еволюції 5G. (див. ліву частину рисунку 3.1 для концепції GoB).

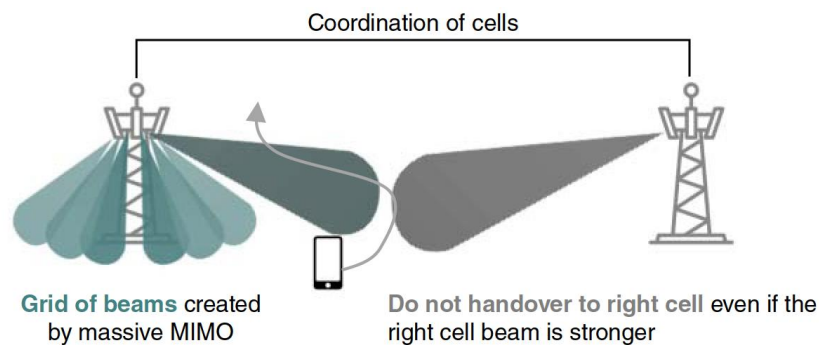


Рисунок 3.1 – Особливості застосування технології GoB та MRO

Оптимізація мобільності та формування променя за допомогою архітектури O-RAN є одним із ключових аспектів ефективного використання технологій 5G, особливо mMIMO. Важливу роль у цьому процесі відіграють не-

RT RIC (не в реальному часі) та майже-RT RIC (близький до реального часу) [43].

Розглянемо ці процеси детальніше:

1. Роль майже-RT RIC у MRO (Mobility Robustness Optimization) - оптимізація мобільності променя:

Майже-RT RIC відповідає за збір даних із вузлів RAN (наприклад, показники продуктивності та стан мобільності) для навчання моделей AI/ML. Це дозволяє:

- Підвищити надійність мобільності користувачів.
- Уникнути зайвих хендоверів (наприклад, ситуації, коли хендовер до комірки із сильнішим сигналом не покращує якість обслуговування).
- Управляти променями так, щоб забезпечити мінімальні перешкоди для якості обслуговування під час переходів.

Якщо пристрій краще обслуговується поточною коміркою навіть із слабшим сигналом, майже-RT RIC гарантує, що хендовер не буде ініційовано, враховуючи глобальні налаштування SMO.

Навчання моделей AI/ML:

- Майже-RT RIC забезпечує динамічну адаптацію параметрів променя відповідно до умов мобільності.
- Моделі AI/ML навчено визначати оптимальні параметри хендоверів та формування променів для вузлів RAN.

2. Взаємодія не-RT RIC та майже-RT RIC:

- Працює в довгостроковій перспективі та зосереджується на глобальній оптимізації формування променів.
- Збирає великі обсяги даних від SMO, вузлів RAN та додатків.
- Тренує AI/ML моделі для оптимізації mMIMO (наприклад, GoB - Grid of Beams, сітка променів).
- Результати моделей надсилаються SMO для впровадження.

Майже-RT RIC:

- Фокусується на поточній оптимізації (наприклад, в діапазоні від 10 мс до 1 с).

- Реалізує висновки моделей, оптимізуючи мобільність та конфігурацію променів у реальному часі.

3. Взаємодія вузлів RAN з RIC та SMO. Вузли RAN збирають ключові показники ефективності, такі як:

- Продуктивність формування променів.
- Параметри мобільності променів.
- Ці дані надсилаються до RIC (не-RT та майже-RT) та SMO, щоб:
 - Забезпечити актуальність моделей AI/ML.
 - Перенавчати моделі за потреби.
 - Внести зміни до конфігурацій відповідно до результатів оптимізації.

4. Потоки високого рівня оптимізації формування променів.

1. Оптимізація формування променів через не-RT RIC:

- Не-RT RIC отримує дані, тренує моделі AI/ML та розробляє довгострокові стратегії оптимізації (наприклад, конфігурація GoB).
- SMO впроваджує ці стратегії через налаштування вузлів RAN.

2. Оптимізація MRO через майже-RT RIC:

- Майже-RT RIC виконує реальну адаптацію мобільності та управління променями.
 - Забезпечує високу якість обслуговування, узгоджуючи локальні налаштування з глобальними конфігураціями SMO.

5. Переваги запропонованого підходу:

- Можливість швидкої адаптації до змін у мережевих умовах.
- Зменшення навантаження на мережу шляхом уникнення зайвих хендверів.
- Використання AI/ML для прогнозування та адаптації мережевих параметрів.
- Гарантія стабільної якості обслуговування для користувачів. Цей підхід створює умови для реалізації потужних функцій O-RAN, роблячи мережі 5G більш адаптивними та продуктивними [44].

3.2 Оптимізація MU-MIMO

Технологія mMIMO (Massive MIMO) у багатокористувацькому режимі (MU-MIMO) забезпечує значне підвищення продуктивності завдяки здатності обслуговувати декілька користувачів одночасно за допомогою формування незалежних променів (див. рис. 3.2). Це дозволяє значно покращити ємність мережі та якість обслуговування. Водночас варіативність мобільності користувачів створює певні виклики, які можуть бути вирішені завдяки інтелектуальним можливостям архітектури Open RAN (O-RAN). Основні переваги MU-MIMO з використанням mMIMO [45].

1. Формування декількох променів завдяки використанню великої кількості антен, стільник може формувати вузькоспрямовані промені, кожен з яких спрямований на окремого користувача.

- Це знижує інтерференцію між користувачами.
- Забезпечує ефективніше використання спектра.

Збільшення ємності стільника:

- Завдяки незалежній обробці сигналів для кожного користувача можна обслуговувати більше активних з'єднань одночасно.

- Це особливо важливо для сценаріїв із високою щільністю користувачів.

3. Поліпшення якості обслуговування (QoS): Спрямовані промені забезпечують стабільніший зв'язок для кожного користувача, навіть в умовах високого завантаження мережі.

Виклики, пов'язані з мобільністю користувачів. Гетерогенність сценаріїв мобільності:

- Користувачі можуть бути стаціонарними, повільно переміщатися (пішоходи) або рухатися на високій швидкості (наприклад, у транспорті).

- Для кожного типу мобільності потрібні різні підходи до формування променя, управління інтерференцією та хендоверами.

- Динамічні зміни у траєкторіях користувачів:

- Швидкі зміни положення користувачів можуть створювати складнощі в адаптації променів у реальному часі.

- Високошвидкісні користувачі (наприклад, у поїздах) можуть швидше залишати зону покриття одного променя, що створює ризик втрати зв'язку. Інтелектуальні можливості Open RAN дозволяють ефективно враховувати мобільність користувачів і забезпечувати адаптивне управління променями:

1. Інтеграція AI/ML:

- Моделі машинного навчання (ML), створені не-RT RIC, здатні прогнозувати поведінку користувачів із різною мобільністю.

- Наприклад, система може заздалегідь адаптувати промені для високошвидкісного користувача, забезпечуючи плавний перехід між зонами покриття.

2. Майже-RT RIC:

- Виконує оптимізацію в реальному часі для управління променями з урахуванням поточної мобільності користувачів.

- Здатний динамічно коригувати діаграму спрямованості антен залежно від положення і швидкості користувача.

3. Управління променями:

- Промені можуть бути налаштовані для надання ширшого покриття для високошвидкісних користувачів, що зменшує кількість хендверів.

- Для стаціонарних або повільно рухомих користувачів можуть застосовуватися вузькі та високоефективні промені.

4. Оптимізація інтерференції:

- Завдяки точному налаштуванню променів можна мінімізувати інтерференцію між сусідніми променями та стільниками.

- Це дозволяє забезпечити стабільність зв'язку навіть у складних умовах.

5. Адаптація до умов мережі:

- SMO (Service Management and Orchestration) збирає глобальні дані про продуктивність мережі та передає їх до RIC для оптимізації.

- Це дозволяє враховувати такі фактори, як щільність користувачів, рівень завантаження та сценарій мобільності.

Архітектура Open RAN надає ефективні інструменти для вирішення проблем, пов'язаних із різною мобільністю користувачів у середовищі MU-MIMO [46-52]. Завдяки інтеграції AI/ML, управлінню променями через RIC і адаптивному підходу до конфігурації мережі, O-RAN забезпечує:

- Підвищення якості обслуговування для користувачів.
- Максимізацію використання ресурсів мережі.
- Зменшення впливу інтерференції та підвищення стабільності зв'язку. Це робить O-RAN важливим компонентом для розвитку інтелектуальних і гнучких мереж 5G.

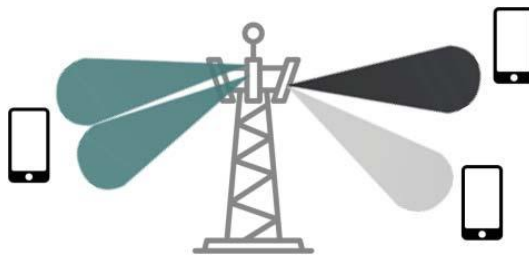


Рисунок 3.2 – Особливості застосування технології MU-MIMO

Сценарій використання MU-MIMO у системі Open RAN із залученням RIC near-RT є важливим елементом оптимізації продуктивності мережі. Нижче представлено детальний опис процесу, що враховує ключові етапи та функціональні обов'язки кожного компонента.

Ключова роль RIC near-RT у MU-MIMO. RIC near-RT (ближній до реального часу RAN Intelligent Controller) виконує низку завдань, спрямованих на оптимізацію роботи вузлів RAN у рамках сценарію MU-MIMO. Основні функції включають:

- Збір інформації від вузлів RAN.
- Аналіз отриманих даних і розрахунок оптимальних конфігурацій.

- Надання вузлам RAN рекомендацій щодо ефективного розподілу ресурсів і управління променями.

1. Початковий етап: Збір даних.

- RIC near-RT ініціює періодичний запит до вузлів RAN (O-CU, O-DU) для отримання ключової інформації:

- Стан користувачького обладнання (UE) включає положення користувачів, рівень їх мобільності, якість сигналу та потреби в ресурсах.

- Якість каналу (CQI): Дані про якість зв'язку між UE та базовою станцією для кожного користувача.

- Конфігурація комірки: Налаштування радіоресурсів, поточний розподіл спектра, інтерференція та інші параметри.

- Трафік: Вимоги до пропускної здатності, поточне навантаження на комірку та пріоритети обслуговування.

Вузли RAN (O-CU та O-DU) надають цю інформацію у відповідь, забезпечуючи оновлення даних у RIC near-RT.

2. Аналіз і розрахунок оптимальних параметрів. На основі зібраної інформації RIC near-RT виконує обробку за допомогою алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання (AI/ML). Основні задачі:

- Розподіл частотних і часових ресурсів:

- Визначення, які ресурси слід виділити конкретному користувачеві для мінімізації інтерференції та максимізації пропускної здатності.

- Формування та управління променями:

Оптимізація параметрів антен для кожного користувача з урахуванням їхнього стану та характеристик каналу.

- Пріоритезація:

- Визначення порядку обслуговування користувачів на основі їхніх потреб (наприклад, низька затримка для відеодзвінків).

- Адаптація до змін:

- Постійне коригування параметрів у відповідь на динамічні зміни у мережі (наприклад, переміщення користувачів).

3. Надання рекомендацій вузлам RAN. Після розрахунку оптимальних параметрів RIC near-RT передає рекомендації вузлам RAN, включаючи:

- Розподіл ресурсів: Частотні, часові та просторові ресурси для конкретних UE.
- Параметри антен: Діаграма спрямованості, потужність сигналу та характеристики променів.
- Управління трафіком: Пріоритети для обслуговування різних типів даних (URLLC, eMBB тощо).

4. Реалізація рекомендацій вузлами RAN. Вузли RAN (O-CU, O-DU) отримують та реалізують рекомендації, включаючи:

- Налаштування радіоресурсів відповідно до оптимальних параметрів.
- Управління променями для забезпечення ефективного зв'язку.
- Моніторинг результатів та зворотній зв'язок для RIC near-RT.

Цикл збору даних, аналізу та корекції повторюється періодично, щоб забезпечити актуальність параметрів у динамічних умовах. RIC near-RT постійно вдосконалює свої моделі AI/ML для підвищення точності рекомендацій [53-58].

Переваги використання RIC near-RT у MU-MIMO.

1. Забезпечення високої ємності та продуктивності для користувачів.
2. Завдяки точному управлінню променями та ресурсами.
3. Швидке реагування на зміни у станах UE та умовах мережі.
4. Використання AI/ML для вдосконалення процесів оптимізації.

Ця модель роботи RIC near-RT дозволяє максимально використати потенціал MU-MIMO, підвищуючи якість обслуговування та ефективність використання ресурсів у мережах 5G.

3.3 Управління інформаційним трафіком

Подвійне підключення з декількома RAT (MR-DC) є важливою складовою архітектури 5G, що дозволяє об'єднувати ресурси мережі для забезпечення більшої пропускної здатності, низької затримки та підвищеної надійності.

Архітектура O-RAN додає інтелектуальні функції управління трафіком, які допомагають реалізувати переваги MR-DC, забезпечуючи ефективне використання ресурсів і виконання вимог QoS.

MR-DC (Multi-RAT Dual Connectivity) дозволяє користувачеві одночасно використовувати ресурси з різних радіотехнологій (наприклад, NR і LTE) через головний вузол (Master Node, MN) та вторинний вузол (Secondary Node, SN).

- NR E-UTRA Dual Connectivity (NE-DC): Комбінація 5G NR та LTE для покращення продуктивності.

- Типи трафіку: MR-DC має вирішити, який тип трафіку (наприклад, eMBB, URLLC, mMTC) буде обслуговуватися через головний вузол (MCG) або вторинний вузол (SCG).

Ключові виклики MR-DC.

1. Розподіл трафіку:

- Визначення, який сегмент трафіку спрямовувати до NR або LTE, залежно від типу даних (QoS), затримки та пропускної здатності.

- Наприклад, трафік із низькими затримками (URLLC) може бути спрямований через NR, а великий обсяг даних (eMBB) — через LTE.

2. Гарантування якості обслуговування для кожного типу трафіку навіть за умов високого навантаження або змін мобільності користувача.

3. Координація між технологіями LTE та NR для запобігання втратам трафіку або зниженню якості зв'язку.

4. Як обраний маршрут трафіку вплине на загальну продуктивність базової станції, враховуючи використання радіоресурсів, інтерференцію та завантаження мережі.

Архітектура O-RAN додає інтелектуальні можливості, які забезпечують проактивне управління трафіком для MR-DC:

1. Використання RIC near-RT. RIC near-RT збирає дані в реальному часі та виконує оперативну оптимізацію:

- Моніторинг стану трафіку та QoS:

Отримання даних про трафік, стан UE, параметри каналу та завантаження вузлів RAN.

- Рішення про маршрутизацію:

Алгоритми AI/ML дозволяють RIC near-RT приймати рішення про те, чи слід спрямовувати трафік через NR або LTE.

- Наприклад, eMBB трафік може бути перенаправлений через SCG (LTE), якщо NR перевантажений (рис. 3.3) [59-61].

2. SMO (Service Management and Orchestration) забезпечує глобальну координацію:

- Глобальний моніторинг продуктивності:

Аналіз довгострокових трендів у навантаженні на мережу для визначення стратегій оптимізації.

- Планування ресурсів: SMO може передавати рекомендації до RIC near-RT для адаптації стратегії маршрутизації трафіку.

3. Інтеграція AI/ML. Моделі AI/ML забезпечують:

- Прогнозування: Аналіз історичних даних для прогнозування майбутніх навантажень.

- Адаптація: Коригування параметрів маршрутизації в реальному часі для динамічного балансування QoS.

4. Гнучке управління трафіком. Замість реактивного підходу, O-RAN пропонує:

- Проактивне управління: Рішення приймаються на основі прогнозів і аналітики.

- Динамічний розподіл ресурсів: Розподіл радіоресурсів між NR і LTE відповідно до поточних вимог.

Високорівневий потік оптимізації трафіку в MR-DC.

1. Збір інформації: RIC near-RT отримує дані про QoS, стан каналу, мобільність UE та завантаження вузлів.

2. Алгоритми AI/ML оцінюють стан мережі та прогнозують майбутні навантаження.

3. RIC near-RT визначає, як розподілити трафік між MCG і SCG або між RAT (NR/LTE).

4. Вузли RAN застосовують оптимізовані налаштування, надані RIC near-RT.

5. Після реалізації параметрів проводиться оцінка продуктивності та коригування в разі потреби.

Переваги оптимізації MR-DC через O-RAN.

1. Зниження затримки, збільшення пропускну здатності та мінімізація інтерференції.

2. Адаптація до змін у мережі та мобільності користувачів.

3. Гарантоване виконання вимог QoS для різних типів трафіку.

4. Збалансований розподіл навантаження між NR і LTE, що підвищує продуктивність мережі в цілому. Завдяки інтеграції інтелектуальних функцій O-RAN, MR-DC стає більш ефективним і гнучким, забезпечуючи максимальну продуктивність мережі 5G та покращений користувацький досвід [62-64].

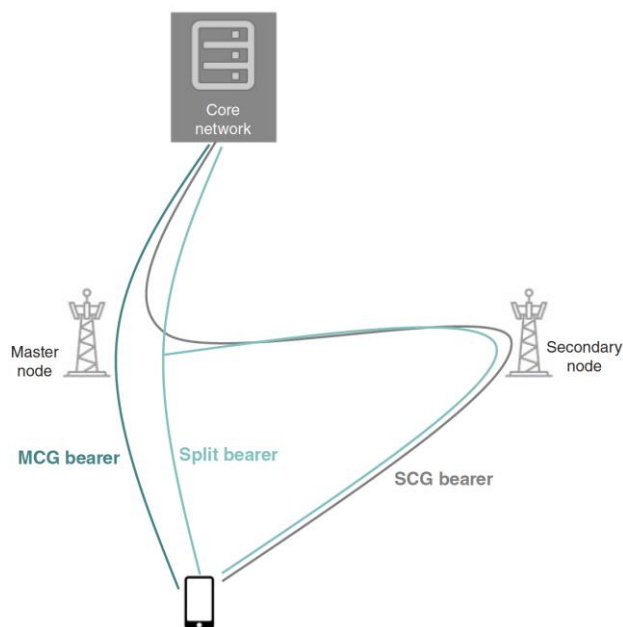


Рисунок 3.3 – Особливості застосування технології керування MR-DC

Процес управління трафіком у сучасних мережах радіодоступу (RAN) включає координацію між двома основними компонентами: non-RT RIC (не-реального часу RIC) і near-RT RIC (майже реального часу RIC), а також вузлами RAN. Наведемо ключові етапи цього процесу:

1. Збір даних і створення політики на non-RT RIC: Non-RT RIC виконує тривалі аналітичні завдання, включаючи аналіз продуктивності, вимірювань і конфігурацій. На основі цих даних розробляються політики управління трафіком. Наприклад:

- Рішення про розподіл площини управління (CP) або користувача (UP) між комірками.

- Налаштування параметрів для оптимізації обробки навантаження в мережі.

2. Передача політики до near-RT RIC: Non-RT RIC передає визначені політики до near-RT RIC для їх оперативного впровадження.

3. Застосування політики на near-RT RIC: Near-RT RIC отримує політику, інтерпретує її і виконує команди щодо конфігурації RAN. Це включає швидкі рішення на основі умов у мережі, таких як управління навантаженням чи обробка підключень у реальному часі.

4. Вузли RAN (наприклад, базові станції) виконують інструкції near-RT RIC, забезпечуючи застосування нових налаштувань або політик. Вони також продовжують збирати дані продуктивності й надсилати їх до системи керування та оркестрації (SMO).

5. Протягом усього процесу відбувається моніторинг ефективності застосованої політики. Коли політика більше не є актуальною або необхідною, вона видаляється, а ресурси перенаправляються відповідно до нових вимог. Цей підхід дозволяє мережам адаптуватися до змін у трафіку, забезпечувати якість обслуговування (QoS) і ефективно використовувати ресурси, зберігаючи при цьому високу продуктивність.

3.4 Динамічне спільне використання спектра

Динамічне спільне використання спектра (Dynamic Spectrum Sharing, DSS) — це ключова технологія, яка дозволяє мобільним операторам ефективно використовувати наявний радіочастотний спектр для одночасної підтримки мереж 4G LTE та 5G. Це досягається завдяки гнучкому розподілу радіоресурсів у реальному часі залежно від поточного навантаження в мережі.

Основні переваги DSS:

1. Оптимізація використання спектра: Оператори можуть використовувати існуючі частоти без потреби в нових частотних ліцензіях.
2. Плавний перехід до 5G: Технологія дозволяє поступово розгортати 5G без негативного впливу на існуючі 4G-мережі.
3. Гнучкість у розподілі ресурсів: DSS забезпечує адаптивний підхід, надаючи пріоритет тій технології (4G або 5G), яка в даний момент має вищий попит.

На рисунку 3.4 відображено процес динамічного розподілу радіоресурсів між мережами 4G та 5G. Наприклад, якщо спостерігається підвищене навантаження в мережі 5G, DSS може тимчасово зменшити обсяг ресурсів для 4G і навпаки. Це забезпечує кращу ефективність мережі, підвищує якість обслуговування користувачів і знижує витрати на побудову інфраструктури. DSS є важливим кроком на шляху до повного розгортання 5G-мереж у глобальному масштабі.

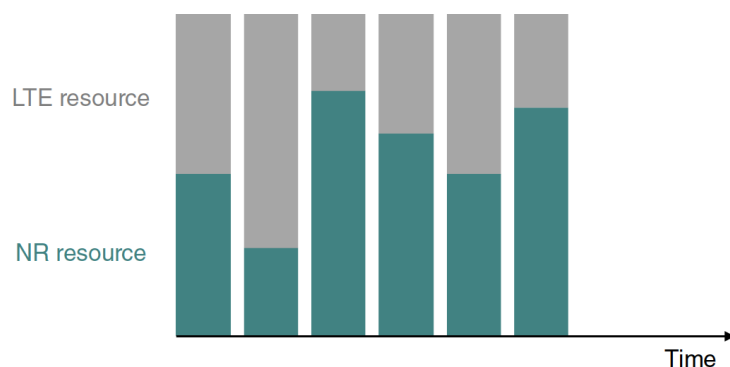


Рисунок 3.4 – Особливості динамічного розподілу частот

У контексті Open RAN підтримка технології DSS стає ще більш універсальною завдяки відкритій і гнучкій архітектурі мережі. Завдання полягає в тому, щоб забезпечити взаємодію обладнання від різних постачальників і розширити можливості оптимізації мережі через інтеграцію інтелектуальних компонентів.

Ключова роль RIC (RAN Intelligent Controller)

Open RAN використовує не-RT RIC (non-Real-Time RIC) і майже-RT RIC (near-Real-Time RIC) для управління та координації ресурсів. Ці компоненти дозволяють:

1. Прогнозувати трафік: На основі історичних даних і алгоритмів машинного навчання визначати, де й коли очікується пікове навантаження.
2. Динамічно розподіляти ресурси: Майже-RT RIC у реальному часі координує вузли 4G і 5G, використовуючи DSS для адаптації до змін у трафіку.
3. Оптимізувати роботу мережі: Не-RT RIC забезпечує довгострокове планування й політики для більш ефективного управління спектром.

На рисунку 3.5 схематично показано, як ці два компоненти взаємодіють для управління вузлами 4G та 5G RAN:

- Не-RT RIC працює на рівні менеджменту, аналізує великі обсяги даних, розробляє політики й алгоритми для DSS.

- Майже-RT RIC виконує ці політики в реальному часі, швидко реагуючи на зміни в умовах мережі.

Цей підхід дозволяє операторам використовувати переваги Open RAN, забезпечуючи гнучкість і масштабованість мережі, а також підвищуючи її ефективність і продуктивність. DSS у поєднанні з Open RAN дає можливість адаптуватися до вимог майбутніх мережевих навантажень, забезпечуючи якісний користувацький досвід.

Описана інтеграція DSS у контексті Open RAN демонструє потужну синергію між різними компонентами архітектури Open RAN, що дозволяє забезпечувати динамічний розподіл ресурсів і адаптацію мережі до змінних умов трафіку.

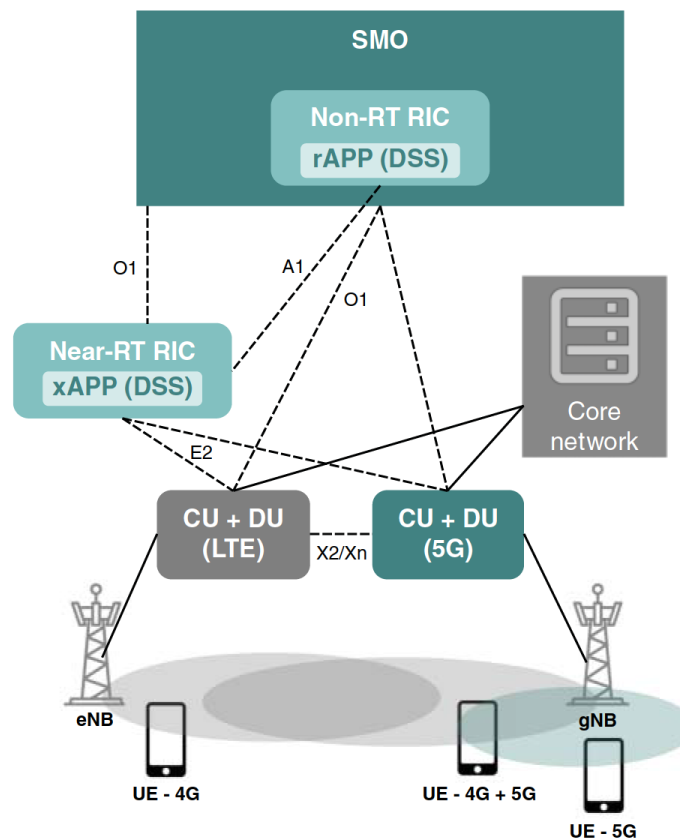


Рисунок 3.5 – Архітектура DSS на основі RIC

Роль не-RT RIC у контексті DSS:

1. Перетворення вимог SMO:

- Service Management and Orchestration (SMO) формулює вимоги до обслуговування, які пов'язані з DSS.

- Не-RT RIC адаптує ці вимоги у вигляді довгострокових політик розподілу ресурсів для 4G та 5G.

2. Розробка моделей AI/ML:

- Не-RT RIC створює й навчає моделі машинного навчання для майже-RT RIC.

- Забезпечує їхню перепідготовку, використовуючи зворотний зв'язок, отриманий від майже-RT RIC.

3. Якщо продуктивність мережі не відповідає ключовим показникам ефективності (KPI), не-RT RIC визначає, які заходи слід вжити.

Роль майже-RT RIC:

1. Інтерпретація політик:

- Отримує моделі ML і політики у вигляді xApps.
- Інтерпретує ці політики для управління розподілом ресурсів між різними технологіями радіодоступу (RAT).

2. Впровадження на рівні RAN: Перекладає специфічні політики RAT для застосування до вузлів RAN через інтерфейс E2.

3. Зворотний зв'язок із не-RT RIC**: Передає дані про ефективність моделей і політик, забезпечуючи їхнє постійне вдосконалення.

Участь вузлів RAN:

1. Інтерфейс E2:

- Отримують конфігурацію, пов'язану з DSS.
- Виконують політики, визначені майже-RT RIC.
- Збирають метрики управління ресурсами.

2. Інтерфейс O1: Передають зібрані метрики й дані до не-RT RIC для аналізу та вдосконалення моделей і політик. Переваги такої інтеграції:

1. Політики розподілу ресурсів коригуються в реальному часі на основі трафіку й KPI.

2. Завдяки постійному навчанню моделей забезпечується вдосконалення продуктивності мережі.

3. Open RAN дозволяє інтеграцію обладнання різних постачальників і масштабованість рішень. Цей підхід підсилює потенціал Open RAN як технологічної основи для розгортання інтелектуальних і адаптивних мереж майбутнього.

Високорівневий потік процесу DSS з використанням архітектури O-RAN і компонентів RIC демонструє, як різні системні рівні співпрацюють для динамічного розподілу спектра та оптимізації продуктивності мережі. Ось поетапний опис цього процесу:

1. Визначення політики DSS (ініціація) SMO (Service Management and Orchestration):

- Встановлює політики DSS, зокрема параметри розподілу спектра між 4G та 5G.

- Збирає дані про продуктивність мережі, стан вузлів, планування та інші показники з RAN (включаючи вузли O-RAN 4G і 5G).

- Розгортає ці політики в не-RT RIC.

2. Розробка та навчання моделі в не-RT RIC:

- Використовує зібрані дані від SMO та інших вузлів для розробки та навчання моделей AI/ML.

- Моделі враховують динамічний розподіл спектра, прогнозування трафіку та адаптацію до зміни KPI.

- Публікує готову модель та політику, які SMO розгортає в near-RT RIC.

3. Розгортання політики та моделей у near-RT RIC:

- Отримує політики DSS і модель AI/ML від не-RT RIC.

- Збирає конфігурації та параметри роботи вузлів E2 (O-CU, O-DU).

- Надає вузлам E2 параметри конфігурації, пов'язані з DSS.

4. Виконання моделі та управління в реальному часі вузлами E2 (O-CU, O-DU):

- Виконують отримані конфігурації для DSS.

- Збирають та звітують про показники продуктивності, стан і планування до near-RT RIC.

- Near-RT RIC:

- Використовує модель AI/ML для аналізу даних у реальному часі.

- Вносить зміни до конфігурацій вузлів E2, якщо виявлено відхилення від очікуваної продуктивності чи KPI.

5. Зворотний зв'язок та оновлення моделей:

- Near-RT RIC надає зворотний зв'язок щодо ефективності політик до не-RT RIC.

- SMO передає зібрані дані, пов'язані з продуктивністю DSS, до не-RT RIC.

- Оновлення моделей і політик:

- Не-RT RIC використовує ці дані для перепідготовки моделей AI/ML і вдосконалення політик DSS.

- Оновлені моделі та політики публікуються для подальшого розгортання. Переваги такого потоку.

1. Динамічне реагування на зміни в мережі завдяки злагодженій роботі компонентів O-RAN.

2. Моделі навчаються та вдосконалюються на основі реальних даних і KPI.

3. SMO виступає центральним вузлом для ініціації політик та збору даних, інтегруючи всі рівні мережі.

4. Відкрита архітектура O-RAN забезпечує підтримку обладнання від різних постачальників.

Цей процес ілюструє, як O-RAN дозволяє операторам ефективно інтегрувати DSS для покращення використання спектра та забезпечення високої продуктивності мережі [65].

3.5 Оптимізація розподілу ресурсів NSSI

Оптимізація розподілу ресурсів для екземплярів підмережі розрізу мережі (NSSI) є важливим завданням у рамках архітектури 5G, особливо в контексті Open RAN. Це забезпечує гнучкість мережі для обслуговування різноманітних сценаріїв використання, таких як широкосмгові послуги, IoT, і низьколатентні додатки (рис. 3.6).

1. Основні концепції NSSI та оптимізації ресурсів:

- Екземпляри зрізу мережі (NSI) і екземпляри підмережі зрізу (NSSI) дозволяють створювати логічні підмережі, адаптовані для конкретних варіантів використання.

- Кожен NSSI може мати різні вимоги до пропускної здатності, затримки, надійності тощо. Наприклад:

- Сенсорні мережі потребують низької затримки та мінімального обсягу даних.

- Відеострімінг вимагає високої пропускної здатності.
- Оптимізація NSSI включає динамічне налаштування ресурсів RAN для задоволення цих вимог.

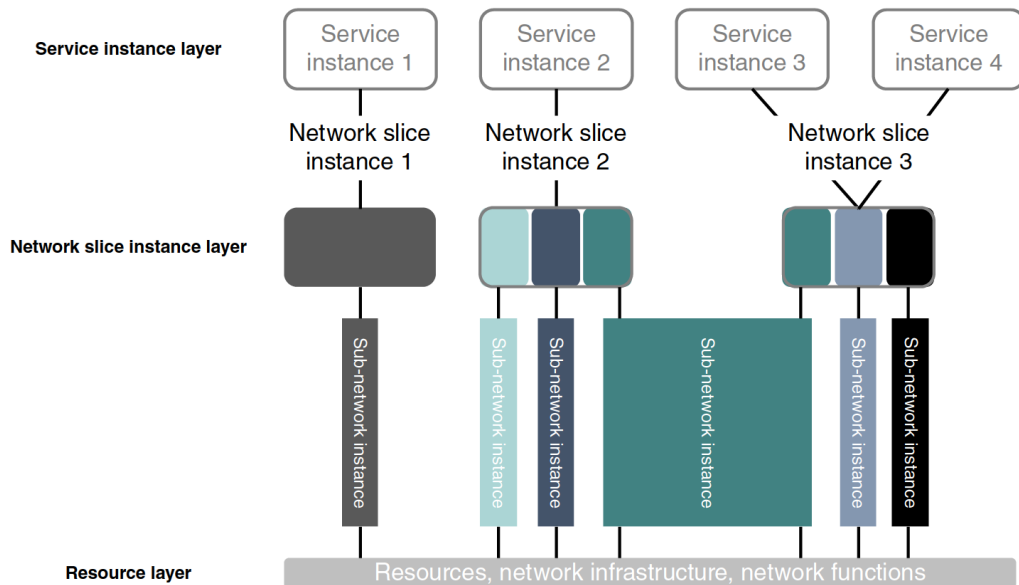


Рисунок 3.6 – Технології NSI та NSSI при реалізації мережевого розшарування

2. Ролі компонентів Open RAN, SMO (Service Management and Orchestration):

- Визначає політику квотування ресурсів NSSI за замовчуванням**. Ця політика використовується, якщо індивідуальні налаштування не задані під час створення зрізу.

- Надає високорівневі вказівки щодо пріоритизації ресурсів між NSSI у періоди пікового навантаження.

Не-RT RIC (non-Real-Time RIC):

- Збирає дані про продуктивність мережі та використання ресурсів від вузлів RAN.

- Використовує історичні вимірювання для навчання моделей AI/ML:

- Прогнозує попит на трафік для різних NSSI залежно від часу, місця та типу послуг.

- Визначає оптимальний розподіл ресурсів між NSSI на основі цих прогнозів.

- Публікує оновлені політики та конфігурації, які реалізуються у вузлах RAN.

Вузли RAN:

- Збирають та передають необхідні вимірювання про використання ресурсів, стан планування та продуктивність до не-RT RIC.

- Виконують конфігураційні оновлення, які забезпечують оптимізацію розподілу ресурсів між NSSI.

3. Потік процесу оптимізації NSSI.

1. Ініціація:

- SMO визначає початкову політику квотування ресурсів для NSSI.

- Розгортає політику в не-RT RIC, яка потім адаптується до реальних умов.

2. Збір даних та навчання моделей:

- Вузли RAN передають вимірювання про трафік, продуктивність і використання спектра.

- Не-RT RIC використовує ці дані для навчання моделей AI/ML, що прогнозують попит на ресурси для різних NSSI.

3. Визначення та впровадження політик:

- На основі прогнозів, не-RT RIC визначає, як розподілити ресурси між NSSI.

- Політики та параметри передаються до вузлів RAN через відповідні інтерфейси (наприклад, O1, E2).

4. Реалізація: Вузли RAN оновлюють свої конфігурації, впроваджуючи новий розподіл ресурсів.

5. Зворотний зв'язок та вдосконалення:

- Вузли RAN передають оновлені дані про продуктивність до не-RT RIC.

- Не-RT RIC використовує ці дані для перепідготовки моделей та вдосконалення політик.

4. Переваги оптимізації NSSI.

1. Адаптація до різноманітних сценаріїв:

- Мережа може одночасно обслуговувати широкосмуговий доступ, IoT і низьколатентні застосунки.

2. Високопріоритетні NSSI отримують більше ресурсів під час пікових навантажень.

3. Використання AI/ML дозволяє враховувати динаміку трафіку та оптимізувати розподіл спектра.

4. Open RAN забезпечує можливість інтеграції різного обладнання, сприяючи розгортанню нових NSSI. Ця архітектура робить Open RAN не лише гнучким інструментом для розгортання 5G, але й платформою для подальших інновацій у галузі управління зрізами мережі.

Високорівневий потік процесу оптимізації розподілу ресурсів між NSSI за допомогою не-RT RIC і вузлів RAN у контексті Open RAN і O-Cloud можна описати наступним чином:

1. Створення моделі AI/ML

- Не-RT RIC:

- Розробляє та тренує модель AI/ML, призначену для прогнозування моделей попиту на трафік для кожного NSSI.

- Навчання моделі базується на історичних даних про використання мережі та попит на трафік.

2. Збір даних від вузлів RAN:

- Збирають вимірювання продуктивності та інформацію про поточний стан мережі, зокрема:

- Завантаженість спектра.

- Затримки.

- Пропускна здатність для кожного NSSI.

- Передають ці дані до не-RT RIC.

3. Використання моделі AI/ML для Не-RT RIC:

- Аналізує зібрані дані, застосовуючи модель AI/ML для прогнозування майбутнього попиту на трафік для кожного NSSI.

- Висновки моделі (інференс) використовуються для визначення оптимальних дій.

4. Прийняття дій на основі висновків:

1. Реконфігурація атрибутів NSSI:

- Висновки моделі застосовуються до конфігурації NSSI.
- Не-RT RIC надсилає нові конфігураційні параметри до вузлів RAN.
- Вузли RAN:
 - Застосовують оновлені конфігурації, що забезпечують оптимальний розподіл ресурсів між різними NSSI.

2. Запит на зміну ресурсів O-Cloud:

- У разі недостатності ресурсів або необхідності масштабування, не-RT RIC звертається до функції управління та оркестрації O-Cloud:
 - Запитує зміну кількості ресурсів (наприклад, обчислювальних, мережевих чи зберігання), що виділяються для відповідного сегмента мережі.
 - Оновлення ресурсів відбувається на рівні O-Cloud, після чого зміни набувають чинності у відповідному NSSI.

5. Реалізація та оновлення конфігурацій вузлів RAN:

- У разі реконфігурації NSSI застосовують нові параметри для оптимізації продуктивності.
- У разі змін в O-Cloud отримують оновлені інструкції, відображаючи змінений розподіл ресурсів у своїй роботі.
- Цей процес триває циклічно: вузли RAN продовжують звітувати про свою продуктивність, щоб забезпечити постійний зворотний зв'язок для вдосконалення моделей та конфігурацій.

Ключові переваги підходу.

1. Мережа реагує на зміну попиту в реальному часі.
2. Реконфігурація NSSI дозволяє уникати недостатнього або надмірного виділення ресурсів.

3. Використання O-Cloud забезпечує гнучке розширення ресурсів за потреби.

4. Моделі AI/ML дають змогу передбачати трафік, що мінімізує ризики перевантаження.

Цей процес є ілюстрацією того, як Open RAN у поєднанні з O-Cloud і AI/ML сприяє створенню інтелектуальних і масштабованих мереж, здатних задовольнити різноманітні вимоги до послуг.

3.6 Висновки до розділу 3

Open RAN (Відкрита радіодоступна мережа) пропонує значні переваги завдяки своїм ключовим диференціаторам, які відкривають нові можливості для використання в сучасних і майбутніх мережах. Основні характеристики Open RAN включають:

1. Відкриті інтерфейси забезпечують можливість поєднання різного обладнання та програмного забезпечення:

- Open RAN забезпечує взаємодію компонентів RAN різних постачальників за допомогою відкритих стандартів інтерфейсів.

- Це сприяє зменшенню залежності від одного постачальника (vendor lock-in) та збільшенню конкурентоспроможності на ринку.

- Переваги:

- Оператори можуть вибирати найкращі рішення від різних постачальників.

- Зменшення витрат завдяки ширшому вибору постачальників і підвищеній конкуренції.

- Можливість створювати адаптивні рішення для специфічних потреб мереж.

2. Віртуалізація розділення апаратного та програмного забезпечення:

- Open RAN підтримує віртуалізовані функції, де програмне забезпечення може працювати на стандартному апаратному забезпеченні.

- Це дозволяє операторам уникати використання спеціалізованих пристроїв і замінювати їх більш універсальними серверами.

- Переваги:

- Зниження витрат:

- Використання стандартного апаратного забезпечення знижує витрати на впровадження та обслуговування.

- Масштабованість:

- Оператори можуть динамічно збільшувати або зменшувати ресурси залежно від навантаження.

- Інтеграція з периферійними хмарними сервісами:

- Підтримка обчислень на периферії (edge computing) для зниження затримок і покращення продуктивності.

3. Штучний інтелект та аналіз великих даних:

- Open RAN активно використовує технології AI/ML для моніторингу, аналізу та автоматизованого управління мережею.

- Завдяки інтелектуальному аналізу, мережа може адаптуватися до змін у реальному часі.

- Переваги:

- Автоматизація управління мережею:

- Зменшується потреба у ручному втручанні, що спрощує управління.

- Оптимізація продуктивності:

- Постійний аналіз і прогнозування дозволяють мережі працювати ефективніше, забезпечуючи високу якість обслуговування (QoS).

- Використання AI дозволяє уникати перевантаження або неефективного розподілу ресурсів.

Перспективні випадки використання Open RAN. Завдяки цим відмінностям, Open RAN є придатним для вирішення багатьох завдань у сучасних телекомунікаціях:

1. Доступ до мережевого інтелекту:

- Розробники можуть створювати кастомізовані рішення для конкретних мережевих задач, наприклад, автоматизацію оптимізації трафіку.

2. Розгортання мереж у віддалених регіонах:

- Зниження витрат на обладнання та можливість використовувати периферійні обчислення сприяють покращенню зв'язку у віддалених або сільських місцевостях.

3. Динамічне управління зрізами мережі (Network Slicing):

- Мережеві зрізи можна налаштовувати для обслуговування специфічних сценаріїв, таких як IoT, AR/VR або автономний транспорт.

4. Оптимізація енерговитрат:

- Використання AI/ML дозволяє зменшити енергоспоживання через динамічне вимкнення неактивних компонентів мережі.

Open RAN відкриває широкі перспективи для інновацій у телекомунікаціях, створюючи більш гнучкі, доступні й інтелектуальні мережі. Впровадження цих технологій стає ключовим фактором еволюції 5G і підготовки до 6G.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

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

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

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

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

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

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

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	60	50	60
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		56,7		

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

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

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	70	0	70
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	60	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	66,7		

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

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [66]:

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

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 56,7$, $k_{теор} = 66,7$ балів;

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

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 56,7 + 0,4 \cdot 66,7 = 60,67 \text{ балів.}$$

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

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN», даний рівень становить 60,67 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

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

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [66]:

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

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

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

$$Z_o = 18350,00 \cdot 11 / 22 = 8500,03 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	18350,00	772,73	11	8500,03
Інженер-дослідник телекомунікаційних систем	17500,00	750,00	22	16500,00
Технік 1-ї категорії	8500,00	681,82	11	7500,02
Всього				32500,05

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» розраховуємо за формулою:

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

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

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

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

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

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [66];

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

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

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,15 / (22 \cdot 8) = 57,50 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 57,50 \cdot 6,00 = 345,00 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Встановлення допоміжного обладнання	6,00	2	1,10	57,50	345,00
Інсталяція програмного забезпечення	5,60	4	1,50	78,41	439,09
Встановлення модулів	7,20	5	1,70	88,86	639,82
Монтаж імітаторів мереж	4,00	4	1,50	78,41	313,64
Формування бази даних результатів вимірювань	11,00	3	1,35	70,57	776,25
Підготовка приміщення	4,00	2	1,10	57,50	230,00
Всього					2743,80

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$З_{\text{доо}} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{\text{доо}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доо}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$З_{\text{доо}} = (32500,05 + 2743,80) \cdot 12 / 100\% = 4229,26 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

$$З_n = (З_o + З_p + З_{\text{доо}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (4.6)$$

де H_n – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$З_n = (32500,05 + 2743,80 + 4229,26) \cdot 22 / 100\% = 8684,08 \text{ грн.}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому

дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

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

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

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

n – кількість видів матеріалів;

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

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

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

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

$$M_1 = 2,0 \cdot 185,00 \cdot 1,11 - 0 \cdot 0 = 410,70 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний ECONOMIC (A4-500)	185,00	2,0	0	0	410,70
Папір для заміток ECONOMIC (A5)-60	125,00	3,0	0	0	416,25
Начиння канцелярське DATUM FX	210,00	3,0	0	0	699,30
Органайзер офісний DATUM Office	195,00	3,0	0	0	649,35

Картридж для принтера HP-210A	1460,00	1,0	0	0	1620,60
Диск оптичний VEKO-10 (CD-R)	27,00	5,0	0	0	149,85
Диск оптичний VEKO-W (CD-RW)	35,00	2,0	0	0	77,70
FLASH-пам'ять Kingstar (32 ГБ) Class 10	139,00	1,0	0	0	154,29
FLASH-пам'ять Kingstar (64 ГБ) Class 10 A	199,00	1,0	0	0	220,89
Всього					4398,93

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

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

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

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

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

$K_e = 1 \cdot 2999,00 \cdot 1,11 = 3328,89$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Контроллер Controller HD16qj	1	2999,00	3328,89
Маршрутизатор XA165G-Hn3D	1	2969,00	3295,59
Імітатор мережі	1	5200,00	5772,00
Всього			12396,48

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

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

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спеу}} = 3250,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 3607,50 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Термінал (імітатор навантаження - передавач сигналу мережі 5G)	1	3250,00	3607,50
Термінал (імітатор приймача сигналу 5G мережі)	1	2780,00	3085,80
Всього			6693,30

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

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

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

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7450,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8195,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет обробки даних	1	7450,00	8195,00
Програмне забезпечення підтримки мереж	1	4730,00	5203,00
Пакет Matlab 2020	1	5380,00	5918,00
Всього			19316,00

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

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

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

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

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

$$A_{обл} = (15640,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 434,44 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер	15640,00	3	1	434,44
Програмний центр обробки та виводу даних	28999,00	3	1	805,53
Місце інженера-дослідника	6899,00	5	1	114,98
Оргтехніка	7500,00	5	1	125,00
Пакет MATLAB SIMULINK	7580,00	3	1	210,56
Генератор сигналу цифровий	6800,00	5	1	113,33
Дослідницька лабораторія	299000,00	25	1	996,67
Всього				2800,51

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

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

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

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

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

$$B_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 562,18 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер	0,32	160,0	562,18
Програмний центр обробки та виводу даних	0,25	160,0	439,20
Генератор сигналу цифровий	0,11	50,0	60,39
Пристрої виводу інформації	0,32	3,2	11,24
Місце оператора спеціалізоване	0,05	160,0	87,84
Офісна оргтехніка	0,45	3,5	17,29
Термінал (імітатор навантаження - передавач сигналу мережі 5G)	0,09	100,0	98,82
Термінал (імітатор приймача сигналу 5G мережі)	0,08	100,0	87,84
Всього			1364,80

4.2.9 Службові відрядження

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

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

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

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

4.2.11 Інші витрати

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

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

$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ib}}{100\%}, \quad (4.13)$$

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

$$I_{\epsilon} = (32500,05 + 2743,80) \cdot 50 / 100\% = 17621,92 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

$$B_{нзв} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 108\%$.

$$B_{нзв} = (32500,05 + 2743,80) \cdot 108 / 100\% = 38063,35 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = З_o + З_p + З_{доп} + З_n + M + K_{в} + B_{стел} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_{в} + B_{нзв}. \quad (4.15)$$

$$B_{заг} = 32500,05 + 2743,80 + 4229,26 + 8684,08 + 4398,93 + 12396,48 + 6693,30 + 19316,00 + 2800,51 + 1364,80 + 0,00 + 0,00 + 17621,92 + 38063,35 = 150812,49 \text{ грн.}$$

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.16)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$3B = 150812,49 / 0,95 = 158749,99 \text{ грн.}$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

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

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

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

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.17)$$

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

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

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

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

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

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 158749,99$ грн;

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

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [66].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^2 \cdot 2 \cdot 4 / 158,7 \cdot 0,08 = 9,68.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» складають 158749,99 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

Робота Open RAN у поєднанні з сучасними дослідженнями 3GPP, зокрема Релізів 18 і 19, відкриває широкі можливості для впровадження передових сценаріїв використання. Далі наведено кілька потенційних варіантів, які можуть значно виграти від інтелектуальних і відкритих можливостей Open RAN.

Open RAN відкриває можливості для підтримки складних сценаріїв використання, таких як метавсесвіти, XR та мобільні ретранслятори. Завдяки відкритим інтерфейсам, віртуалізації та інтелектуальним можливостям мережа може ефективно адаптуватися до нових вимог, забезпечуючи оптимальну продуктивність і значно знижуючи витрати. Це робить Open RAN критично важливим компонентом майбутніх 5G і 6G-мереж.

За результатами дослідження перспектив розвитку відкритої RAN (перший розділ):

- Відкрита архітектура RAN (ORAN) має значний потенціал для підвищення ефективності безпроводних мереж завдяки стандартизації інтерфейсів, використанню програмного забезпечення з відкритим кодом та зниженню витрат на інфраструктуру.

- Основними напрямками розвитку ORAN є інтеграція з технологіями 5G/6G, впровадження штучного інтелекту для управління мережею та підвищення гнучкості розподілених архітектур.

- Встановлено, що впровадження ORAN сприятиме зниженню бар'єрів для входу нових учасників на ринок телекомунікацій та стимулюватиме інновації.

За результатами аналізу інформаційних технологій RAN у мережах 5G та ORAN (другий розділ):

- Технологія ORAN пропонує суттєві переваги у порівнянні з традиційними RAN за рахунок відкритості та модульності компонентів (RU, DU, CU).

- Виявлено, що використання ORAN у мережах 5G забезпечує підвищену ефективність управління ресурсами, зменшення затримок і покращення масштабованості.

- Проаналізовано ключові проблеми, пов'язані з інтеграцією ORAN у мережі 5G, зокрема сумісність різних компонентів та необхідність оптимізації інтерфейсів.

За результатами дослідження особливостей застосування RAN у безпроводних мережах (третій розділ):

- Встановлено, що ORAN є ефективним інструментом для покращення продуктивності безпроводних мереж завдяки можливості адаптації до змін умов роботи в реальному часі.

- Запропоновано нові підходи до управління радіоресурсами та енергоефективності, що враховують специфіку безпроводних мереж із високою щільністю користувачів.

- Розроблено рекомендації для підвищення надійності та якості обслуговування в безпроводних мережах на основі ORAN.

За результатами економічного обґрунтування доцільності реалізації роботи (четвертий розділ):

- Проведено економічний аналіз, який доводить, що впровадження ORAN дозволяє суттєво скоротити витрати на експлуатацію мереж, а також знизити залежність від постачальників обладнання.

- Показано, що технологія ORAN забезпечує швидку окупність інвестицій завдяки оптимізації використання ресурсів і гнучкості у розгортанні мереж.

- Розраховано, що впровадження ORAN економічно вигідне для операторів, особливо в умовах масштабного розвитку мереж 5G.

Робота підтверджує ефективність використання технології ORAN для підвищення продуктивності, енергоефективності та економічної доцільності безпроводних мереж. Запропоновані підходи та результати можуть бути застосовані на практиці для оптимізації роботи сучасних мереж 5G і підготовки до впровадження технологій 6G.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. O-RAN Alliance, “O-RAN specifications,” O-RAN Alliance, 2022. [Online]. Available: <https://www.o-ran.org/specifications>.
2. Open RAN Alliance, “Open RAN Alliance,” [Online]. Available: <https://www.o-ran.org/>.
3. Telecom Infra Project, “Telecom Infra Project: Who we are,” [Online]. Available: <https://telecominfraproject.com/who-we-are/>.
4. Telecom Infra Project, “Open RAN MoU Group Page,” [Online]. Available: <https://telecominfraproject.com/openran/>.
5. Open Networking Foundation, “ONF Mission,” ONF, [Online]. Available: <https://opennetworking.org/>.
6. Open RAN Policy Coalition, “Mission,” [Online]. Available: <https://www.openranpolicy.org/>.
7. Mavenir, “Open RAN by the Numbers,” Mavenir, [Online]. Available: <https://www.mavenir.com/resources/open-ran-by-the-numbers/>.
8. P. Lipscombe, Data Center Dynamics, 11 May 2023. [Online]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/how-real-is-open-ran/>.
9. S. Miles, “Open RAN equipment market forecast 2023–2030,” Electronic Specifier, 31 July 2023. [Online]. Available: <https://www.electronicspecifier.com/news/analysis/open-ran-equipment-market-forecast-2023-2030>.
10. TeckNexus, “5G Networks Magazine: Open RAN,” TeckNexus, June 2021. [Online].
11. Available: <https://tecknexus.com/5g-network/current-state-of-open-ran-countries-operators-deploying-trialing-open-ran/>.
12. Z. Ghadialy, “Introduction to O-RAN Philosophy,” Parallel Wireless, 14 April 2021. [Online]. Available: <https://www.parallelwireless.com/blog/introduction-to-o-ran-philosophy/>.

13. М. Васильківський, Д. Нікітович, і О. Болдирева, «Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах», ВОТТП, вип. 4, с. 5–17, Вер 2022.

14. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 32–39. doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39

15. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Нікітович, Д. (2023). Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж. Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41

16. М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, і М. Будащ, «Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML», ВОТТП, вип. 1, с. 89–100, Бер 2023. doi: 10.31891/2219-9365-2023-73-1-13

17. М. Васильківський, О. Болдирева, Д. Онищук, Ю. Гнатенко «Динамічна інформаційна мережа із вбудованим штучним інтелектом», КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (50), 36-45. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-05

18. М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак. «Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту», КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, 51 (Чер 2023), 139-147. doi: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-18.

19. М. Васильківський, Д. Нікітович, О. Болдирева, Н. Якубівська. «Інтелектуальні технології коригування фізичного рівня мобільних мереж», КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (51), 148-160. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-19

20. М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська, «Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН», ВОТТП, вип. 2, с. 112–124, Чер 2023. doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-15
21. Y. Yan, New WID on Rel-17 Enhancements of 3GPP Northbound Interfaces and Application Layer APIs, 3GPP, 2021.
22. 3GPP, “3GPP TS 38.300 v17.0.0 5G; NR; NR and NG-RAN Overall Description,” 2022.
23. 3GPP, “3GPP TS 38.401 v17.0.0 5G; NG-RAN; Architecture Description,” 2022.
24. M. Shelton, “Open RAN Terminology,” Parallel Wireless, 20 April 2020. [Online]. Available: <https://www.parallelwireless.com/open-ran-terminology-understanding-the-difference-between-open-ran-openran-oran-and-more/>. [Accessed 29 July 2020].
25. O-RAN Alliance, “O-RAN.WG1.Use-Cases-Detailed-Specification-v09.00,” 2022.
26. Connectivity Technology Blog, “CSI-RS vs SRS Beamforming,” 02 03 2021. [Online].
27. Available: <https://www.connectivity.technology/2021/02/csi-rs-vs-srs-beamforming.html>.
28. Ibrahim_Sayed, “Does massive MIMO Beamforming Optimization differ in Open RAN?,” 07 2022. [Online]. Available: <https://www.telecomhall.net/t/does-massive-mimo-beamforming-optimization-differ-in-open-ran/18721>.
29. Telecom Infra Project, “Network as a Service (NaaS) Site Economics,” 2021.
30. 3GPP, “TS 23.286 Application layer support for Vehicle-to-Everything (V2X) services; Functional architecture and information flows v17.4.0,” 2022.
31. GSMA 5G Transformation Hub, “How 5G can enable drones to perform key tasks,” 2022.
32. GSMA 5G Transformation Hub, “How 5G drones will help deliver digital twins,” 2022.

33. 3GPP, “TR 22.989 Study on Future Railway Mobile Communication System v19.2.0,” 2022.
34. 3GPP, “TR 22.890 Study on supporting railway smart station services v19.0.0,” 2022.
35. GSA, “Private Mobile Networks,” 2022.
36. 3GPP, “TS 22.261 Service requirements for the 5G system v18.6.1,” 2022.
37. Analysys Mason, “Open RAN vendors have an opportunity with private networks, regardless of their success with public 5G,” 2022.
38. Mavenir, “Private 5G: A new paradigm for network operators,” 2021.
39. G. Brown, “Open RAN for private 5G and venue networks,” LightReading, 19 01 2022. [Online]. Available: <https://www.lightreading.com/open-ran-for-private-5g-and-venue-networks-/a/d-id/774702>.
40. Jyrki Penttinen, Jari Collin, Jarkko Pellikka, “On Techno-Economic Optimization of Non-Public Networks for Industrial 5G Applications,” IARIA AICT 2023, 26 June 2023. [Online]. Available: https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=aict_2023_1_10_10003.
41. Telecom Infra Project, “Connected City Infrastructure Requirements for Dublin: TIP Requirements Document,” 2021.
42. 3GPP, SP-220353 New SID on Localized Mobile Metaverse Services (FS_Metaverse), 2022.
43. 3GPP, SP-221326 New WID: Architecture Enhancements for XR and media services (XRM), 2022.
44. 3GPP, SP-230105 Updated WID on Architecture Enhancements for Vehicle Mounted Relays (VMR), 2023.
45. 5G Americas, “The Evolution of Open RAN,” 2023.
46. S. Munir, “Introduction to Open RAN,” 2023.
47. GCC Open RAN Consortium, “Open RAN for Brownfield Operators Challenges and Opportunities,” 2022.

48. Spirent, “How to test Open RAN,” Spirent, 2022.
49. Spirent, “Will Your Open RAN Deployment Meet User Expectations?,” Spirent, 29 March 2023. [Online]. Available: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2217.
50. Vodafone, KeySight, “Open RAN Handbook,” Vodafone, KeySight, 2023. 7 DOCOMO, “5G Open RAN Ecosystem Whitepaper,” DoCoMo, June 2021. [Online].
51. Available: https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g_open_ran/OREC_WP_20230517095959.pdf.
52. O-RAN Alliance, “Overview of Open Testing and Integration Centre (OTIC) and O-RAN Certification and Badging Program – White Paper, April 2023,” O-RAN Alliance, April 2023. [Online]. Available: <https://www.o-ran.org/resources>.
53. O-RAN Alliance, “Testing & Integration,” O-RAN Alliance, [Online]. Available: <https://www.o-ran.org/testing-integration#learn-otic>.
54. O-RAN Alliance, “Overview of Open Testing and Integration Centre (OTIC) and O-RAN Certification and Badging Program,” O-RAN Alliance, 2023.
55. J. Choi, “AI-Native Open RAN for 6G,” 2023.
56. R. Xu, M. Scott and S. Mwanje, “Intent Driven Management,” 27 07 2023. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/intent>
57. Vodafone, NTT DOCOMO, “SMO Deployment Challenges in an Open RAN Environ-ment,” 2023.
58. Digital Intermediate Frequency Interoperability (DIFI) Consortium, “Digital Intermedi-ate Frequency Interoperability (DIFI) Consortium,” 1 October 2023. [Online]. Available: <https://dificonsortium.org/#:~:text=The%20mission%20of%20the%20Digital,IF%20signals%20and%20helps%20prevent>.
59. P. P. Juan Deaton, “Digital Transformation of Satellite Communication Networks,” March 2022. [Online]. Available: https://csi.ac.org/wp-content/uploads/2022/03/CSIAC_SOAR_Digital-Transformation_Deaton-004.pdf.

60. C. R. Andres, “AWS joins the Digital IF Interoperability (DIFI) Consortium,” 26 May 2022. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/blogs/publicsector/aws-joins-the-digital-if-interoperability-difi-consortium/>.
61. Avnet Silica, “The Open RAN System Architecture and mMIMO,” 21 November 2021. [Online]. Available: <https://www.avnet.com/wps/portal/silica/resources/article/open-ran-system-architecture-and-mmimo/>. 21 Ericsson, “Using 3GPP technology for satellite communication,” 1 June 2023. [Online].
62. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/3gpp-satellite-communication>.
63. V. C. M. B. e. a. U. Ingle, “Circularly Polarised Reconfigurable Antenna in 5G Appli-cation: A,” 5 May 2021. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=10638&context=libphilprac>.
64. TechLte World, “5G-NTN (Non-Terrestrial Networks) Overview,” 17 September 2023. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/5g-ntn-non-terrestrial-networks-overview-techlte-world/>.
65. 3GPP, “TR 38.821 V16.2.0: Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN), Release 16,” 3GPP, March 2023.
66. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ
ТЕХНОЛОГІЇ ORAN

назва магістерської кваліфікаційної роботи

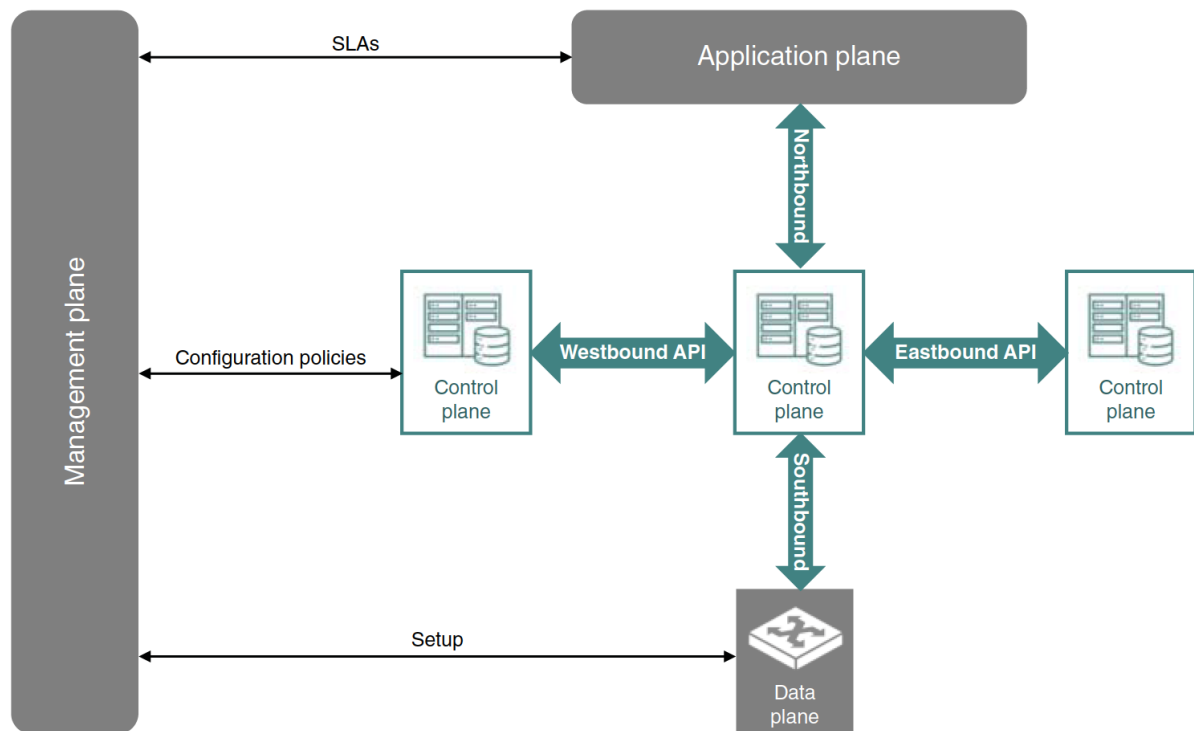


Рисунок 1 – Узагальнена архітектура SDN

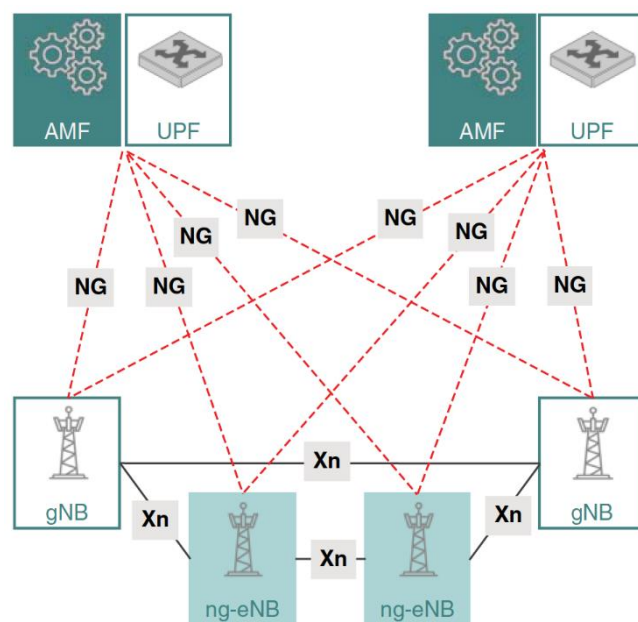


Рисунок 2 – Високорівнева архітектура RAN в мережах 5G

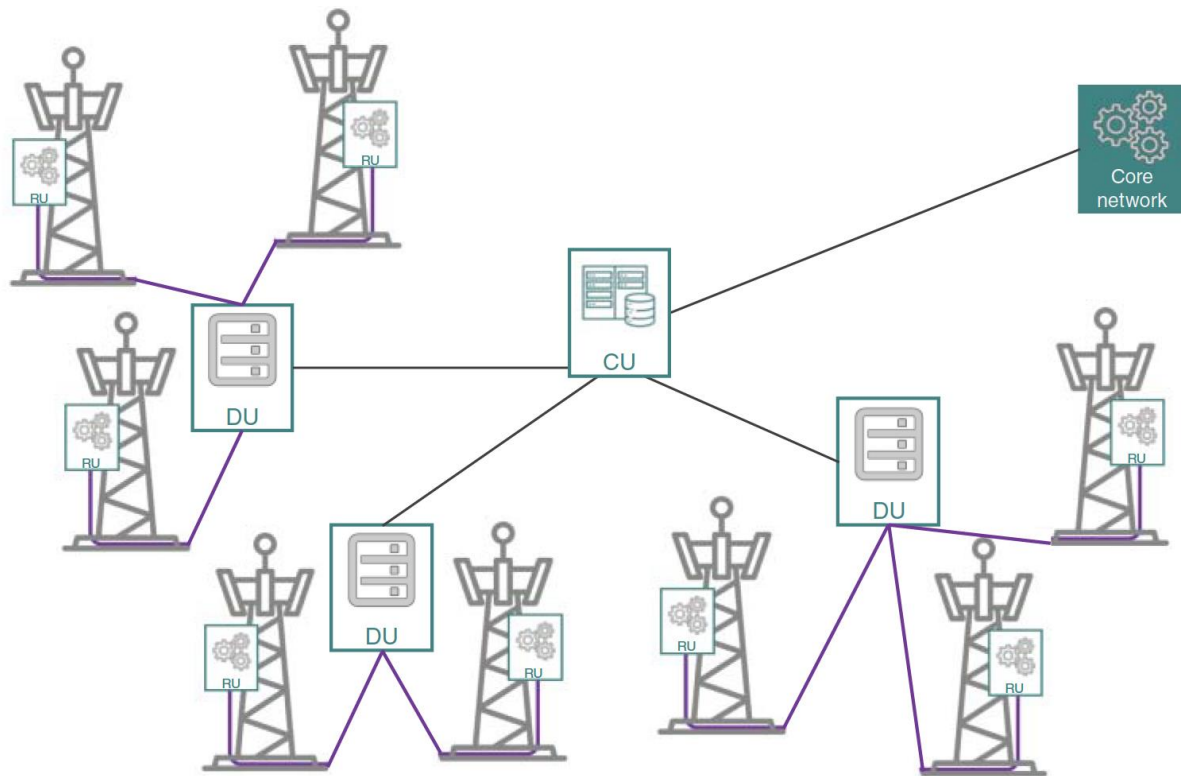


Рисунок 3 – Сегмент RAN з використанням розподіленої архітектури gNB

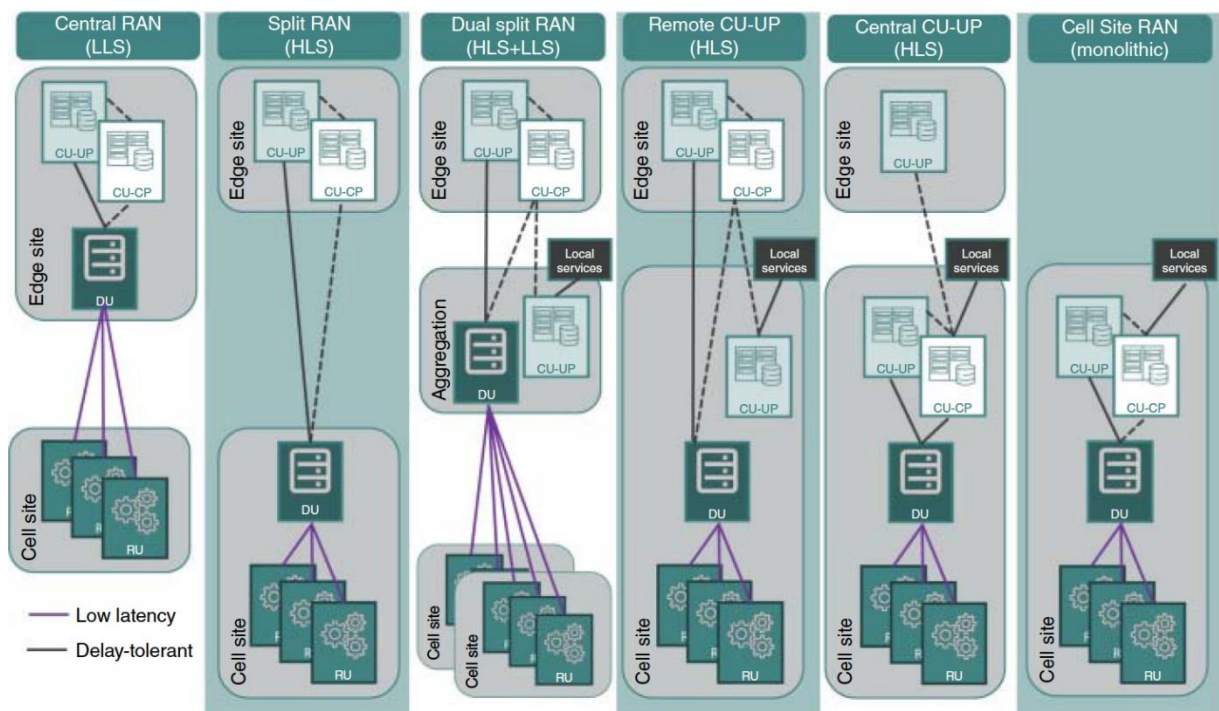


Рисунок 4 – Розподілені топології RAN

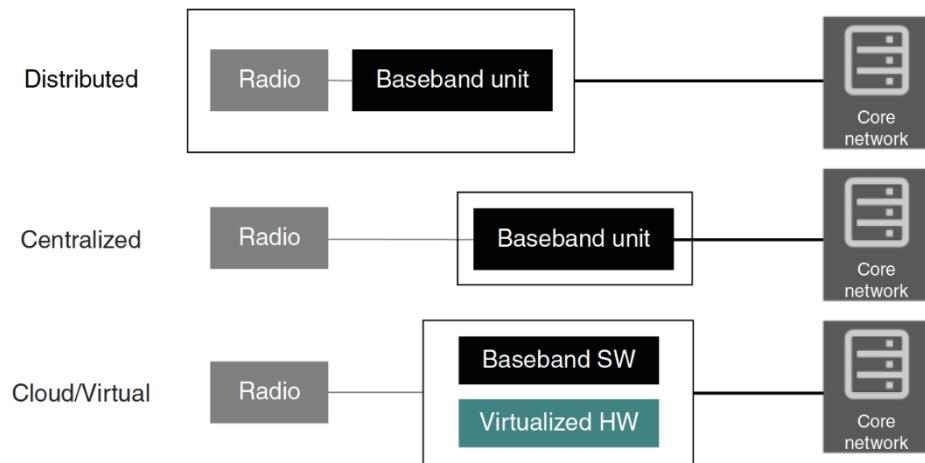


Рисунок 5 – Структура побудови мережі RAN

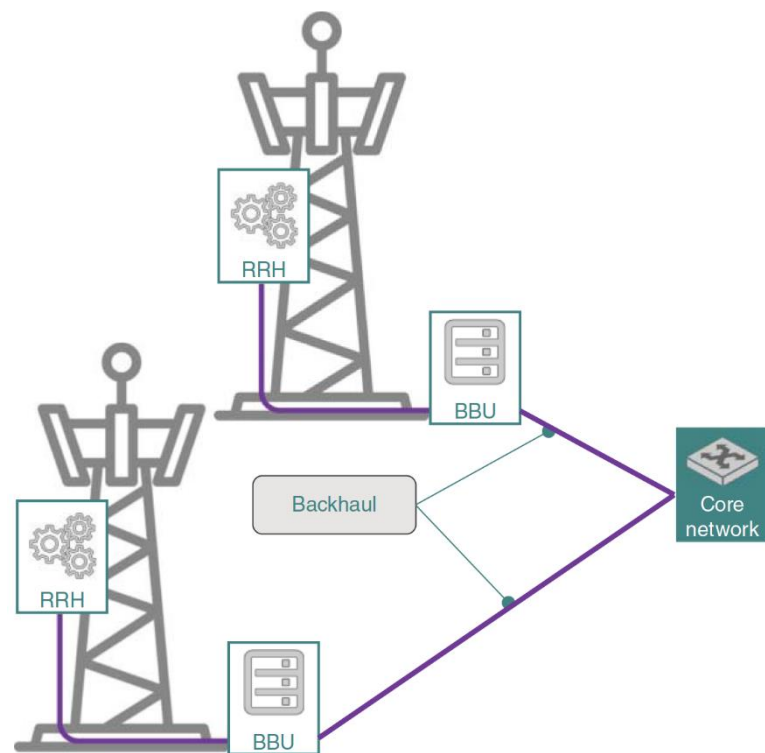


Рисунок 6 – Архітектура системи з розподіленням RAN

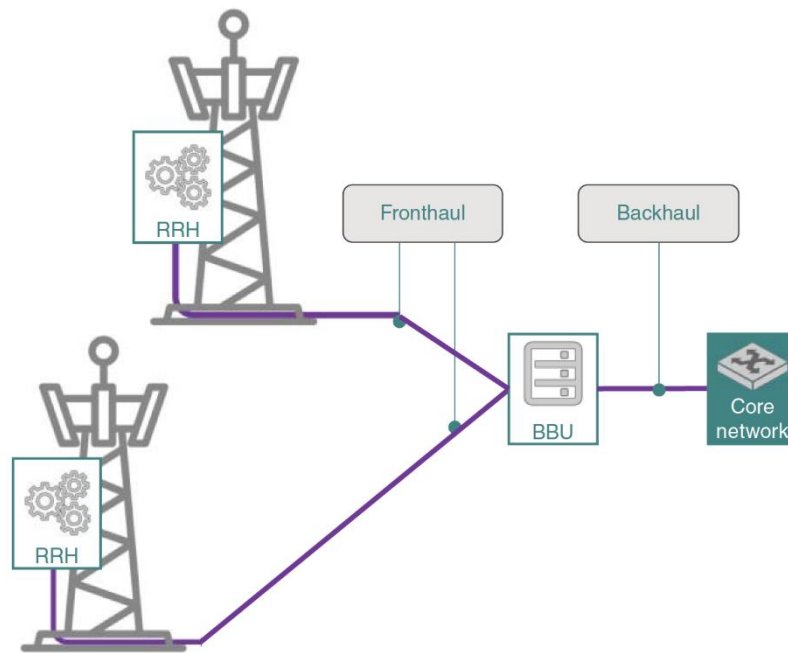


Рисунок 7 – Архітектура системи з централізованим RAN

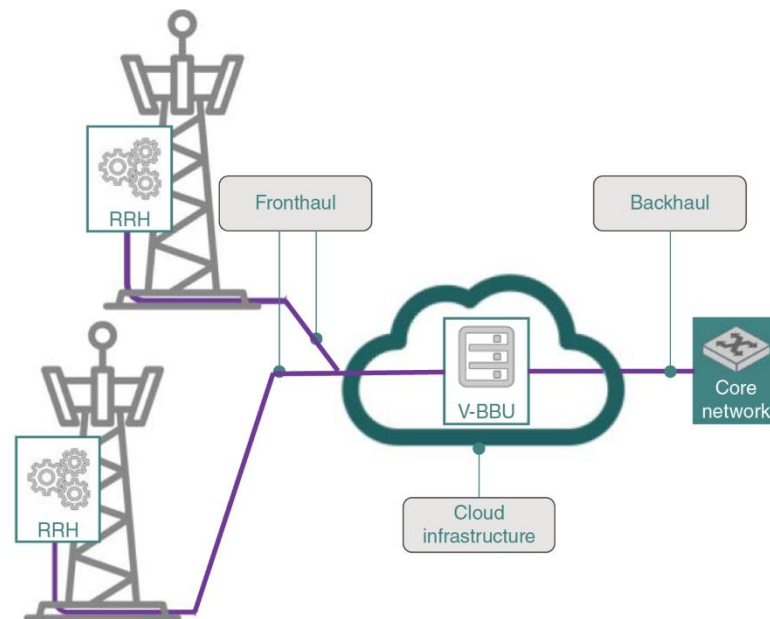


Рисунок 8 – Архітектура системи з хмарним RAN

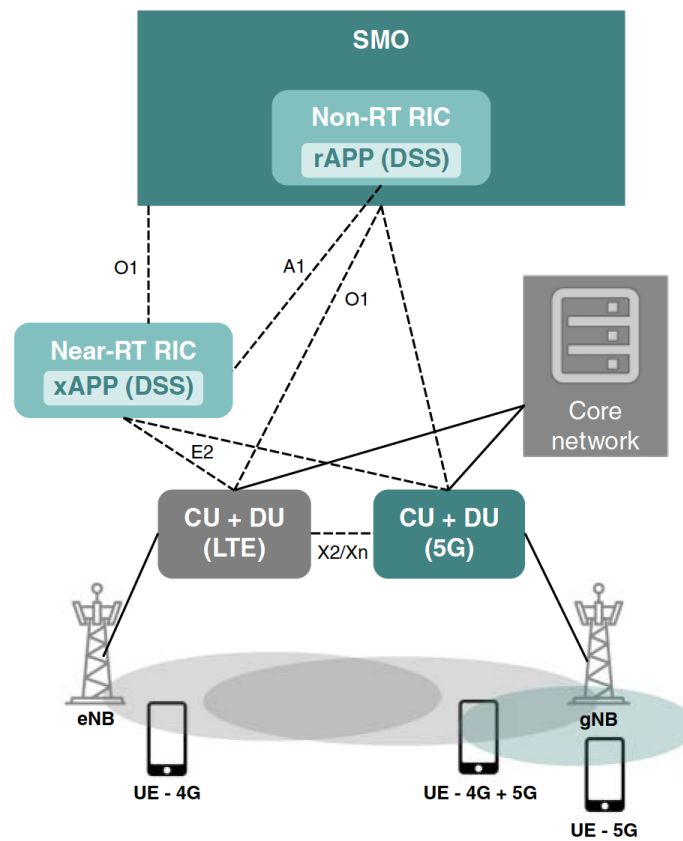


Рисунок 9 – Архітектура DSS на основі RIC

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підвищення ефективності безпроводних мереж на основі технології ORAN

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Михалевський Д.В., д.т.н., професор

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	99 %
Загальна схожість	1 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор

(підпис)

Токовий Ю.В.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)