ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Метод мережевої віртуалізації для розгортання SDN-мереж у телекомунікаційних системах п'ятого покоління»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

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



(підпис) Данило ДРОЗДОВ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Данило ДРОЗДОВ

Керівник: Назарій БЛАЖЕННИЙ

Рецензент: В. В. Вишнівський

Київ – 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
«___» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дроздову Данилу Дмитровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод мережевої віртуалізації для розгортання SDN-мереж у телекомунікаційних системах п'ятого покоління», керівник кваліфікаційної роботи Назарій БЛАЖЕННИЙ, PhD, затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Архітектура і загальні властивості SDN-мережі.
   2. Мережева топологія для моделювання 5G-середовища.
   3. Аналіз ефективності технологій мережевої віртуалізації для SDN-мереж у контексті 5G.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Огляд програмно-визначених мереж (SDN).
   2. Розробка сценаріїв тестування та моделювання мережевої інфраструктури.

3. Моделювання та тестування SDN-мереж із використанням технологій віртуалізації.

4. Перспективи подальшого розвитку технологій для телекомунікаційних систем.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	26.10.24	Викон.
2.	Концептуальні аспекти SDN мереж	29.10.24	Викон.
3.	Дослідження процесу мережевого планування SDN-мереж	01.12.24	Викон.
4.	Розробка сценаріїв тестування та моделювання мережевої інфраструктури	05.11.24	Викон.
5.	Аналіз отриманих даних за основними критеріями ефективності	11.12.24	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	25.12.24	Викон.
7.	Розробка презентації	26.10.24	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Данило ДРОЗДОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Назарій БЛАЖЕННИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Дроздова Данила Дмитровича

на тему: «Метод мережевої віртуалізації для розгортання SDN-мереж у телекомунікаційних системах п'ятого покоління»

Актуальність:

Тема дослідження є актуальною у зв'язку з активним впровадженням телекомунікаційних систем п'ятого покоління, які висувають високі вимоги до масштабованості, гнучкості та продуктивності мереж. Традиційні підходи до управління мережею стають недостатньо ефективними, що обумовлює потребу у використанні інноваційних рішень, таких як програмно-визначені мережі (SDN) та мережна віртуалізація.

Тому, тема магістерської роботи, є актуальною. Запропонована тема має практичне значення та є доцільною і своєчасною.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. У процесі дослідження можуть використовуватись симуляційні середовища, які не повністю відображають реальні умови функціонування 5G-мереж. Це може обмежити точність оцінки ефективності запропонованих технологій у реальних сценаріях.

2. Тема охоплює складну взаємодію SDN, мережевої віртуалізації та 5G-технологій, що потребує глибоких знань і доступу до спеціалізованого обладнання. Обмеженість ресурсів і часу може звузити масштаб дослідження.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «добре», а здобувач Дроздов Данило Дмитрович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: _____ _____

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Дроздов Д.Д. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Метод мережевої віртуалізації для розгортання SDN-мереж у телекомунікаційних системах п'ятого покоління

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Дроздов Данило Дмитрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Дроздова Данила Дмитровича на оцінку «добре» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Назарій БЛАЖЕННИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Дроздов Д.Д.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 91 стор., 32 рис., 14 табл., 32 дж.

Мета роботи – оцінити ефективність мережевої віртуалізації у контексті розгортання SDN-мереж у системах 5G.

Об'єкт дослідження - SDN-мережі у системах 5G.

Предмет дослідження – технології мережевої віртуалізації.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

1. У першому розділі були розкриті теми телекомунікаційних систем п'ятого покоління, програмно-визначених мереж SDN та мережевої віртуалізації 5G, розроблена порівняльна характеристика телекомунікаційних систем, виконане порівняння традиційних та SDN-мереж та описані переваги різних методів мережевої віртуалізації.

2. У другому розділі були розкриті теми вибору критеріїв для оцінки ефективності, проаналізовані інструменти моделювання та тестування SDN-мереж та розроблена експериментальна мережева топологія для оцінки ефективності технологій віртуалізації.

3. У третьому розділі виконано практичні дослідження результатів оцінки ефективності щодо впровадження технологій віртуалізації та створено таблицю порівняння витрат на традиційну мережу та віртуалізовану мережу SDN та побудовано графіки порівняння які наочно демонструють, що впровадження технологій віртуалізації у 5G-мережах призводять до підвищення ефективності використання ресурсів, зниження навантаження на сервери, прискореного масштабування мережі та швидкої окупності інвестицій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: 5G, SDN, МЕРЕЖНА ВІРТУАЛІЗАЦІЯ, ХМАРНІ ОБЧИСЛЕННЯ, МЕРЕЖЕВЕ УПРАВЛІННЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ МЕРЕЖ, МАСШТАБОВАНІСТЬ, ЗАТРИМКА В МЕРЕЖІ, ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 91 pages, 32 pictures, 14 table, 32 sources.

The purpose of the work - is to evaluate the effectiveness of network virtualization in the context of deploying SDN networks in 5G systems.

Object of research – SDN networks in 5G systems.

Subject of research – network virtualization technologies.

Summary of work: The following results were achieved in the master's work:

1. In the first section covered the topics of fifth generation of telecommunication systems, software-defined networks SDN and 5G network virtualization., developed a comparative characterization of telecommunication systems, compared traditional and SDN networks and described the advantages of various network virtualization methods.

2. In the second section, the topics of selecting criteria for evaluating efficiency were covered, tools for modeling and testing SDN networks were analyzed, and an experimental network topology was developed to evaluate the efficiency of virtualization technologies.

3. In the third section, practical studies of the results of the effectiveness assessment of the implementation of virtualization technologies are carried out and a table comparing the costs of a traditional network and a virtualized SDN network is created, and comparison graphs are drawn to clearly demonstrate that the implementation of virtualization technologies in 5G networks leads to increased resource efficiency, reduced server load, accelerated network scaling, and a quick return on investment.

KEYWORDS: 5G, SDN, NETWORK VIRTUALISATION, CLOUD COMPUTING, NETWORK MANAGEMENT, NETWORK PERFORMANCE, SCALABILITY, NETWORK LATENCY, FAULT TOLERANCE

ЗМІСТ

ВСТУП 9

1. Теоретичні основи мережевої віртуалізації та SDN у системах 5G 11

1.1. Телекомунікаційні системи п'ятого покоління 11

1.2. Програмно-визначені мережі SDN 22

1.3. Мережева віртуалізація 5G 29

2. Методика оцінки ефективності технологій мережевої віртуалізації у SDN-мережах 36

2.1. Вибір критеріїв для оцінки ефективності 36

2.2. Інструменти моделювання та тестування SDN-мереж 44

2.3. Розробка експериментальної мережевої топології для оцінки ефективності технологій віртуалізації 55

3. Аналіз результатів оцінки ефективності та рекомендації щодо впровадження технологій віртуалізації 61

3.1. Результати експериментальних досліджень 61

3.2. Порівняння ефективності SDN-мереж із використанням віртуалізації та без неї 65

3.3. Рекомендації щодо впровадження технологій віртуалізації у реальні телекомунікаційні системи 5G 73

ВИСНОВКИ 81

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 83

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 87

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток телекомунікаційних систем і впровадження технологій п'ятого покоління (5G) вимагають нових підходів до управління мережами, які забезпечують високу продуктивність, масштабованість і гнучкість. Традиційні мережеві архітектури не здатні повною мірою задовольнити вимоги 5G щодо низької затримки, високої пропускної здатності та інтеграції великої кількості пристроїв, таких як IoT. У цьому контексті програмно-визначені мережі (SDN) та технології мережевої віртуалізації стають ключовими інструментами для оптимізації мережевої інфраструктури.

Мережна віртуалізація забезпечує абстрагування фізичних ресурсів і їхню ефективну оркестрацію, тоді як SDN дозволяє централізоване управління мережею через динамічне налаштування маршрутів і політик. Разом ці технології значно підвищують адаптивність і ефективність управління мережею, що є критично важливим для забезпечення потреб 5G-мереж.

Дослідження ефективності технологій мережевої віртуалізації у поєднанні з SDN є актуальним, оскільки їх впровадження дозволяє знизити витрати, підвищити якість обслуговування користувачів і сприяє інноваціям у телекомунікаційній галузі. Це також відкриває нові можливості для інтеграції хмарних і крайових обчислень, що є основою для розвитку розумних міст, автоматизації промисловості та інших сучасних технологічних рішень. Таким чином, тема є актуальною як з точки зору наукових досліджень, так і практичного впровадження в реальних мережах.

Саме тому, згідно з актуальністю проблеми, була сформульована ***мета роботи***: Оцінити ефективність мережевої віртуалізації у контексті розгортання SDN-мереж у системах 5G.

Об'єкт дослідження: SDN-мережі у системах 5G.

Предмет дослідження: Технології мережевої віртуалізації.

Дослідження спрямоване на аналіз ефективності використання технологій мережевої віртуалізації у програмно-визначених мережах (SDN) для

телекомунікаційних систем п'ятого покоління (5G). Основною метою є визначення, наскільки ці технології покращують гнучкість, масштабованість та продуктивність мережевої інфраструктури в умовах високих вимог, характерних для 5G-мереж. Це включає вивчення взаємодії між компонентами SDN і віртуалізаційними рішеннями, таких як віртуалізовані мережеві функції (VNF) та їх вплив на загальну продуктивність мережі.

Під час роботи досліджуються критерії ефективності, такі як пропускна здатність, затримка, відмовостійкість та оптимізація ресурсів. Практична частина базується на моделюванні реальних мережевих сценаріїв за допомогою сучасних симуляційних платформ, таких як Mininet та OpenStack, із застосуванням SDN-контролерів. Це дозволяє провести порівняння мереж із впровадженими технологіями віртуалізації та без них, щоб оцінити їхні переваги в умовах типових для 5G-мереж навантажень.

Результати дослідження допоможуть сформулювати рекомендації для ефективного впровадження технологій SDN і віртуалізації у реальні телекомунікаційні мережі. Це сприятиме розв'язанню сучасних викликів у сфері управління складними мережевими інфраструктурами, підвищить їхню продуктивність та знизить витрати. Отримані дані можуть бути використані не лише в телекомунікаційних системах 5G, але й в інших сферах, що потребують високої гнучкості та масштабованості мереж.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕРЕЖЕВОЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ ТА SDN У СИСТЕМАХ 5G

1.1. Телекомунікаційні системи п'ятого покоління

За останні кілька десятиліть мобільний зв'язок зазнав значного розвитку, змінивши способи зв'язку, спілкування та доступу до інформації. Від перших мобільних телефонів розміром з цеглину з обмеженими можливостями до сучасних смартфонів з блискавичною швидкістю передачі даних - шлях мобільних мереж (рис. 1.1) був не просто дивовижним, а вражаючим.

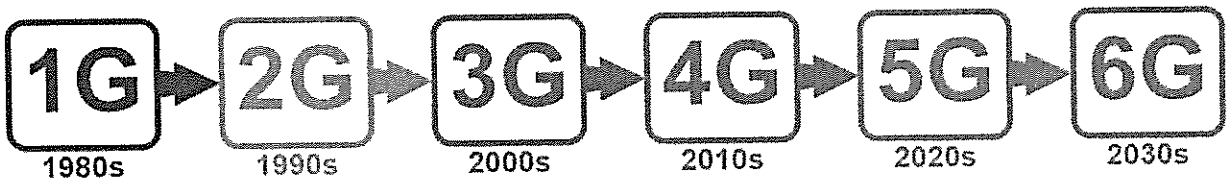


Рис. 1.1. Еволюція телекомунікаційних систем

Основи сучасних мобільних мереж були закладені ще в 1940-х роках з появою перших автомобільних телефонів, але знадобився певний час, щоб розвинути саму технологію для особистого користування. Ми можемо вважати 1980-ті роки першою справжньою віхою в розвитку мобільних мереж, які використовуються сьогодні.

Ці перші мобільні мережі, які ми зараз називаємо 1G, використовували аналогову технологію, і прикладами таких мереж були AMPS (Advanced Mobile Phone System) у Сполучених Штатах і NMT (Nordic Mobile Telephone System) в Європі.

1G був в першу чергу призначений для голосових дзвінків, а сама технологія була набагато простішою порівняно з наступними поколіннями. Мережі 1G мали ряд обмежень, аналогова технологія забезпечувала обмежену пропускну здатність і відносно низьку якість зв'язку. Мабуть, найбільшим обмеженням цих ранніх мереж

була повна відсутність безпеки, тобто дзвінки були схильні до підслуховування і перешкод.

У 1990-х роках з'явилися мобільні мережі 2G, які ознаменували собою значний стрибок уперед порівняно з обмеженнями їхніх попередників 1G. Мережі 2G перейшли на цифрові методи передачі даних, що призвело до низки вдосконалень, які зробили революцію в індустрії мобільного зв'язку. Використання цифрових сигналів зробило мережі 2G набагато ефективнішими, що дозволило збільшити кількість одночасних дзвінків і користувачів у мережі. Це покращення пропускної здатності, а також досягнення у зменшенні фізичних розмірів і вартості мобільних телефонів (рис. 1.2) мали вирішальне значення у вибуховому зростанні попиту на мобільні послуги.

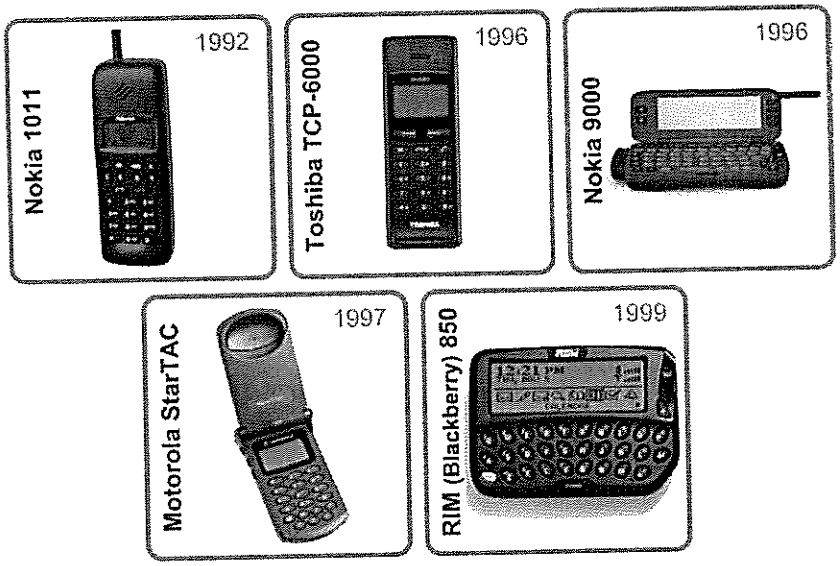


Рис. 1.2. Мобільні пристрої 1990-ті роки

Іншою визначальною особливістю стало впровадження SMS (Short Message Service), що дозволило користувачам вперше надсилати текстові повідомлення. Хоча ця функція була доступна з найпершої ітерації мережі GSM, вона не стала популярною до кінця 1990-х і 2000-х років, коли її використання різко зросло, оскільки вона ставала все більш популярним і економічно ефективним методом спілкування між користувачами.

У мережах 2G використовувалося кілька конкуруючих (і несумісних) технологій - від GSM, який спочатку був розгорнутий в Європі, але став популярним у всьому світі, до D-AMPS (цифрової еволюції попередньої технології AMPS) і cdmaOne (множинний доступ з кодовим поділом каналів) у США і до PDC (персональний цифровий стільниковий зв'язок) в Японії.

З початком нового тисячоліття з'явилися мережі 3G, які відкрили еру мобільного інтернету. Третє покоління мобільного зв'язку принесло швидшу швидкість передачі даних, що дозволило користувачам переглядати веб-сторінки, надсилати електронні листи та отримувати доступ до базового мультимедійного контенту на своїх телефонах. Цей прорив заклав основу для різноманітних мобільних додатків і сервісів, перетворивши мобільні пристрої на потужні інструменти для отримання інформації та розваг.

Однією з визначальних характеристик 3G стало значне збільшення обсягу даних (рис. 1.3) і нові можливості, які це сприяло. На початку розвитку 3G відеодзвінки між мобільними пристроями стали доступними, і очікувалося, що вони стануть значним фактором, який сприятиме поширенню 3G-пристроїв. Ця рання технологія відеодзвінків використовувала комутацію каналів і тарифікувалася похвилинно, що робило її дорогим варіантом. Проблема також полягала в тому, що багато з цих перших мобільних пристроїв 3G були оснащені простими камерами, а якість відео часто була низькою.

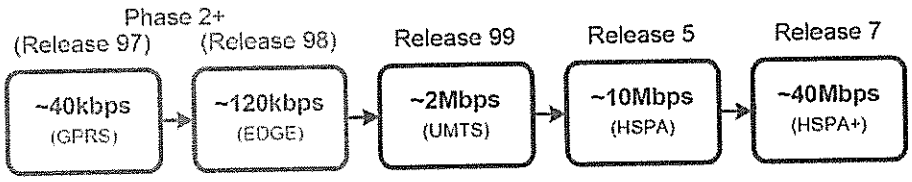


Рис. 1.3. Від 2G до 3G - підвищення швидкості передачі даних

Друга половина 2000-х років ознаменувалася появою смартфонів і магазинів додатків, які дозволили користувачам завантажувати додатки для розширення функціональності своїх телефонів.

Приблизно в 2010 році з'явилися мережі 4G, які ознаменували собою значний стрибок у розвитку мобільного зв'язку. 4G значно збільшив швидкість передачі даних (рис. 1.4) і зменшив затримки, зробивши реальністю потокове відео в реальному часі, онлайн-ігри та високоякісні відеодзвінки. Покращена швидкість передачі даних і низька затримка в мережах 4G мали глибокий вплив на екосистему мобільних додатків. Культура додатків вибухнула, з'явилася велика кількість мобільних додатків і сервісів, що задовольняють різноманітні потреби та інтереси. Розквітли магазини мобільних додатків, такі як App Store від Apple і Play Store від Google, пропонуючи користувачам доступ до широкого спектру додатків для продуктивності, розваг, соціальних мереж і багато чого іншого.

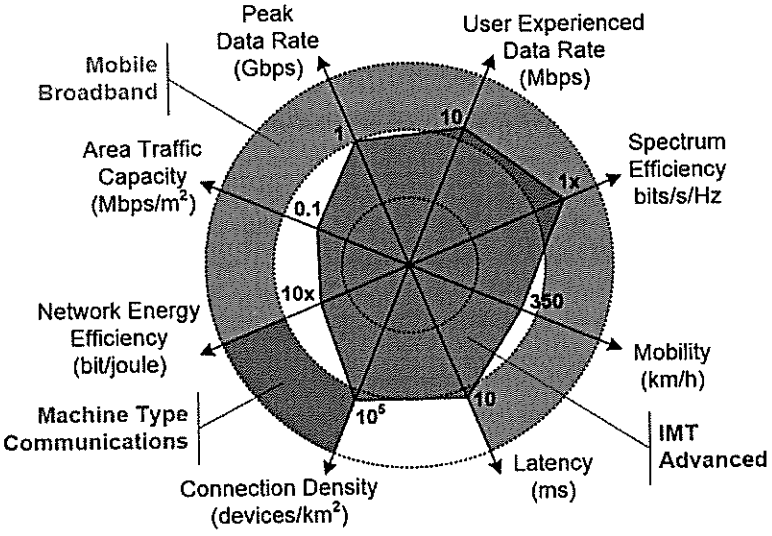


Рис. 1.4. Технічні вимоги 4G

Покращені можливості мереж 4G також стимулювали розвиток пристроїв і додатків Інтернету речей (IoT). Менша затримка і вища пропускна здатність дозволили обмінюватися даними між підключеними пристроями в режимі реального часу, створюючи нові можливості для «розумних будинків», пристроїв та інших інновацій у сфері IoT.

5G - це наступний крок в еволюції мобільного зв'язку. Він був розроблений, щоб забезпечити більшу швидкість передачі даних, меншу затримку і підвищену

надійність порівняно з попередніми поколіннями, що відкриває нові можливості використання і трансформує широкий спектр галузей.

Мережі 5G можуть підтримувати набагато більшу кількість пристроїв, ніж попередні покоління, а також можуть працювати з більш інтенсивними додатками, такими як віртуальна і доповнена реальність, автономні транспортні засоби та IoT (Інтернет речей). Завдяки 5G ми побачили нові інновації та можливості в різних ринкових вертикалях, таких як охорона здоров'я, виробництво, транспорт і розваги. 5G також є ключовим фактором для таких технологій, як периферійні обчислення і штучний інтелект. 5G продовжує зростати і розвиватися, оскільки оператори мобільного зв'язку (MSP) по всьому світу розгортають свої мережі 5G, і буде цікаво спостерігати за новими варіантами використання, які він відкриває в 2020-х роках. Існує ряд ключових технологій і функцій, унікальних для 5G (рис. 1.5), які є великою перевагою у використанні мереж цього типу.

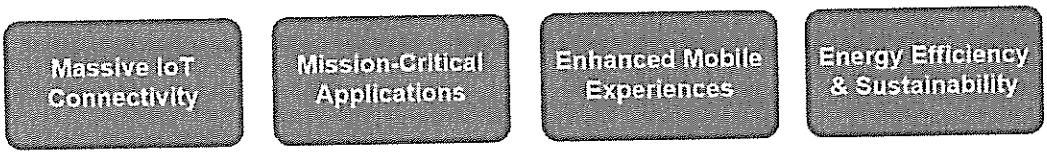


Рис. 1.5. Основні сценарії використання 5G

Масове підключення IoT: Інтернет речей (IoT) буде процвітати завдяки 5G. Здатність нового покоління підключати величезну кількість пристроїв одночасно призведе до створення «розумних» міст, «розумних» будинків і взаємопов'язаної екосистеми, яка змінить наш спосіб взаємодії з навколишнім середовищем. Від розумних приладів до автономних транспортних засобів, 5G стане основою повністю пов'язаного світу.

Застосування:

- Інтернет речей (IoT) – мільйони підключених пристроїв, сенсорів та датчиків для збору та аналізу даних.
- Розумні міста – вуличне освітлення, моніторинг транспорту, енергетичні системи та системи безпеки.

- Сільське господарство – відстеження стану полів, моніторинг тварин, автоматизовані системи зрошення.

Критично важливі додатки: Наднадійний зв'язок 5G з низькою затримкою (URLLC) відкриває можливості для критично важливих додатків, таких як дистанційна хірургія, автономне водіння і промислова автоматизація. Ці додатки вимагають реагування в режимі реального часу і максимальної надійності, а 5G забезпечує надійність, необхідну для їх підтримки.

Застосування:

- Системи екстреного реагування – зв'язок для служб швидкої допомоги, пожежних та поліції.
- Енергетичні мережі – управління енергетичними системами та оптимізація споживання ресурсів.
- Моніторинг навколишнього середовища – системи прогнозування катастроф та зменшення ризиків.

Покращений мобільний досвід: Оскільки доповнена реальність (AR) і віртуальна реальність (VR) стають все більш поширеними, 5G підніме ефект присутності на нові висоти. Поєднання високошвидкісної передачі даних і низької затримки уможливить безперебійну роботу додатків AR/VR, трансформуючи розваги, освіту і різні галузі.

Застосування:

- Стрімінг відео в 4K/8K – висока швидкість передачі даних дозволяє переглядати відео у надвисокій якості без затримок.
- Віртуальна та доповнена реальність (VR/AR) – інтерактивні ігри, онлайн-тури, тренування з використанням AR/VR.
- Хмарні ігри (Cloud Gaming) – можливість грати в сучасні ігри без завантаження та встановлення.

Розширення можливостей бізнесу: 5G відкриває величезні можливості для цифрової трансформації, змінюючи не тільки особистий досвід користувачів, а й сприяючи розвитку індустрій та економік.

- Логістика та склади – автоматизація процесів доставки та відстеження товарів у реальному часі.
- Фінансові технології (Fintech) – миттєві транзакції та захищені мобільні платежі.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика телекомунікаційних систем

	1G	*2G*	*3G*	*4G*	*5G*
Технології	AMPS (Advanced Mobile Phone System), NMT (Nordic Mobile Telephone)	GSM, CDMA, TDMA	UMTS (WCDMA), HSPA, CDMA2000	LTE, WiMAX	Масивний MIMO, mmWave, Network Slicing хмарні та крайові обчислення
Нові функції	Голосові дзвінки	SMS, GPRS, покращена якість голосу	Передача даних для мультимедіа, відеодзвінки, мобільний інтернет	Потокове відео у високій роздільній здатності, онлайн-ігри, VoLTE	Інтернет речей (IoT), VR/AR
Швидкість	-	До 64 кбіт/с	До 42 Мбіт/с	До 1 Гбіт/с	До 10 Гбіт/с
Переваги	Аналогові телекомуні	Цифрове кодуванн	Можливість доступу до	Висока пропускна	Підвищення продуктивно

	каційні стандарти		інтернету, запуск мобільних додатків	здатність, низька затримка	сті та ефективності мереж, підтримка навантажень

На (рис. 1.6) показана архітектура мережі 5G E2E, яка окреслює мережу 5G E2E. Архітектура наскрізної мережі 5G E2E складається з мережі радіодоступу наступного покоління (NG-RAN), периферійних обчислень з множинним доступом (MEC), віртуального ядра з розвиненою пакетною комутацією (vEPC), мережі передачі даних (DN) і хмарного сервісу.

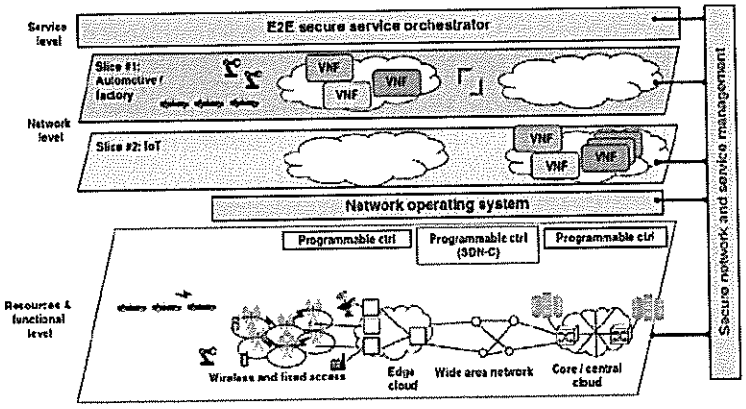


Рис. 1.6. Архітектура E2E в 5G

Мережеве розгалуження - це парадигма, яка дозволяє спільне використання ідентичної інфраструктури для надання диференційованих послуг 5G. Прикладом мережевого зрізу є наскрізна логічна мережа, описана на замовлення, яка відповідає необхідним мережевим характеристикам і пропонує певні послуги для обслуговування конкретних випадків використання (наприклад, голосовий зв'язок, потокове відео, електронна охорона здоров'я, автомобільний зв'язок). На (рис. 1.7) показано діаграму 3GPP для мережі з розрізом.

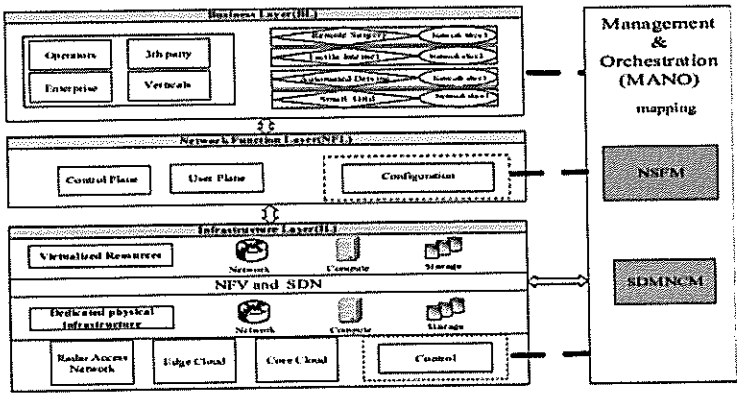


Рис. 1.7. Діаграма 3GPP для мережі з розрізом

Модель 5G складається з чотирьох рівнів: фізичного, мережевого, рівня відкритого транспортного протоколу та прикладного рівня. Функції кожного рівня описані нижче.

1. *Фізичний рівень*:

Фізичний рівень і рівень управління доступом до середовища, тобто рівень OSI 1 і рівень OSI 2, визначають бездротову технологію. Для цих двох рівнів мобільні мережі 5G, ймовірно, будуть засновані на відкритій бездротовій архітектурі. Передбачається, що ці два рівні будуть основою мобільної мережі 5G.

2. *Мережевий рівень*:

На мережевому рівні IP (Інтернет-протокол) використовується для маршрутизації даних від джерела до IP-пристрою призначення. Ipv4 та Ipv6 - дві найпоширеніші форми IP. Хоча IPv4 широко використовується, він має суттєві недоліки, такі як обмежений адресний простір і відсутність підтримки якості обслуговування (QoS). Ці проблеми були вирішені з IPv6, але мобільність залишається проблемою через обмін великими заголовками пакетів. Як наслідок, виробники телефонів 5G будуть використовувати IPv6 у своїх пристроях. Мобільний телефон 5G буде підтримувати бездротове мережеве середовище. У 5G мережевий рівень буде розділений на два підрівні, так звані нижній і верхній мережевий рівень. Мережа нижнього рівня призначена для кожного інтерфейсу, а мережа верхнього рівня - для мобільного терміналу. Між верхнім і нижнім мережевими рівнями середній рівень підтримує трансляцію адрес з IP-адрес верхнього мережевого рівня (Ipv6) на IP-адреси нижнього мережевого рівня (Ipv4

або Ipv6), а також забезпечує передачу даних між інтерфейсом і мобільним терміналом.

3. *Рівень відкритого транспортного протоколу (OTA)*:

Поєднання транспортного та сеансового рівнів. TCP використовується для з'єднання мережевих пристроїв в Інтернеті, забезпечуючи наскрізний зв'язок. Що стосується рівня OTA, то функціональність транспортного рівня відрізняється для бездротових мереж у порівнянні з дротовими мережами. Під час транспортування даних сегменти втрачаються, і передбачається, що вони втрачаються через перевантаження мережі. З іншого боку, в бездротових мережах будуть втрати через високий коефіцієнт бітових помилок в радіоінтерфейсі. Тому TCP використовується як для мобільних мереж, так і для бездротових мереж, через які втрачений або пошкоджений сегмент TCP може бути повторно переданий через бездротове з'єднання. Через більш високу швидкість завантаження та встановлення в 5G це є важливим фактором, який слід враховувати.

4. *Прикладний рівень*:

Найвищий рівень мережевого стеку 5G відповідає за надання найкращих послуг безпосередньо для процесів роботи додатків у різних мережах. Сьогоднішні користувачі мобільного інтернету вручну вибирають бездротовий порт для різних інтернет-сервісів, не маючи можливості використовувати історію QoS для вибору найкращого бездротового з'єднання для даної послуги. Телефон 5G дозволить проводити тестування якості послуг, а також зберігати дані вимірювань в інформаційних базах даних мобільних терміналів. Параметри QoS, такі як затримка, джиттер, втрати, пропускна здатність, надійність, будуть зберігатися в базі даних в мобільному телефоні 5G і використовуватися інтелектуальними алгоритмами, що працюють в мобільному терміналі як системні процеси, які в кінцевому підсумку забезпечать найкраще бездротове з'єднання з урахуванням необхідного QoS і особистих обмежень по витратах [18]. Прикладний рівень також шифрує і розшифровує дані, щоб забезпечити точний прийом і обробку зв'язку.

Впровадження 5G стикається з низкою викликів, зокрема:

1. Високі експлуатаційні витрати:

Щоб задовольнити попит на більш високу швидкість передачі даних, 5G вимагає вищих операційних витрат. Це пов'язано з кількома причинами, серед яких збільшення пропускної здатності, висока інфраструктура, високоенергетичні мережеві пристрої тощо. Витрати прямо пропорційні енергії, що споживається для передачі даних. Бездротова технологія 5G може зменшити енергію передачі на біт, але не може зменшити робочу енергію. Щоб знизити вартість мережі 5G, необхідно зробити технологію бездротового зв'язку енергоефективною.

2. Критичні виклики:

Електронні комунікації стикаються з деякими критичними проблемами, такими як термін служби батареї, обмежені обчислювальні можливості та сувора затримка.

3. Безпека та конфіденційність:

Бездротові мережі є відносно менш безпечними, ніж дротові, через легший доступ до них неавторизованих осіб. При обробці даних з облікових записів кількох користувачів може виникнути кілька проблем з безпекою. За одиницю часу передається багато даних, тому існує ймовірність кількох злочинних атак. Через велику пропускну здатність хакер може спробувати увійти в мережу. Через високе енергоспоживання можуть виникнути проблеми з нагріванням. Тому конфіденційність даних є ключовою особливістю мережі 5G.

4. Масове підключення:

Підключення стало справжнім викликом для M2M-комунікації, оскільки мобільний широкосмуговий зв'язок став більш доступним. Однак масове зростання трафіку, яке очікується від машинного зв'язку внаслідок мільярдів підключених пристроїв, призведе до перевантаження мережі. Отже, необхідне збільшення на кілька порядків зв'язності та пропускної здатності мережі, що може бути досягнуто за рахунок ущільнення мережі, щільного розгортання малих стільників.

5. Проблеми системи охорони здоров'я WBAN, що забезпечується мережею 5G:

Система охорони здоров'я WBAN складається з легких датчиків (внутрішньотілесних або натільних) на додаток до пристрою Інтернету речей,

підключеного до медичного сервера за допомогою 5G-зв'язку. Ці легкі датчики виявляють життєво важливі ознаки людського тіла і бездротово передають ці дані на пристрій Інтернету речей, який, в свою чергу, передає їх на медичний сервер через 5G-зв'язок. З боку WBAN основною проблемою є споживання енергії датчиками, оскільки заміна будь-якого датчика, коли він споживає свою енергію, може викликати у пацієнта сильне роздратування, якщо вузол знаходиться на тілі, або сильний біль, якщо він знаходиться в тілі. Крім того, збільшення кількості різноманітних легких датчиків може призвести до збільшення обсягу переданих даних, що може спричинити перевантаження радіомережі.

1.2. Програмно-визначені мережі SDN

Програмно-визначені мережі (SDN) — це сучасний підхід до управління мережами, який базується на відокремленні рівня управління мережею (control plane) від рівня пересилання даних (data plane). Це дозволяє централізовано керувати мережевими ресурсами за допомогою програмного забезпечення, роблячи мережі гнучкішими, адаптивними та простішими в обслуговуванні.

Першою системою SDN, яка набула популярності, став протокол OpenFlow з відкритим вихідним кодом, який був запущений у 2011 році. Зараз існує низка можливих моделей SDN, кожна з яких надає значні переваги порівняно з традиційними мережами.

У OpenFlow контролер SDN є площиною управління. Контролер SDN містить логіку і приймає рішення про те, як мережевий трафік повинен проходити між комутаторами. Контролер SDN встановлює з'єднання з кожним комутатором для передачі повідомлень. Це з'єднання використовує протокол управління передачею (TCP) і часто шифрується за допомогою захисту на транспортному рівні (TLS). Він використовує порт 6653, а попередні версії - 6633.

Контролер надсилає команди комутаторам OpenFlow, які обробляють мережеві дані. Команди OpenFlow змінюють таблицю маршрутизації потоків комутатора.

Таблиця потоків - це OpenFlow-еквівалент таблиць маршрутизації та переадресації MAC-адрес. Вона містить всі інструкції про те, як комутатор буде обробляти мережевий трафік.

Таблиця потоків містить багато рядків записів потоків, які вказують комутатору, як обробляти кожен пакет. Записи потоку можуть використовувати кожен рівень OSI пакета, включаючи збіг MAC-адреси, IP-адреси, протоколу або порту. Ці правила можуть бути багаторівневими і комбінованими для створення складних правил. Такий рівень гнучкості дозволяє кожному комутатору OpenFlow діяти як базовий брандмауер. Комутатори можуть перенаправляти пакети, які не відповідають жодному з правил, на контролер SDN, щоб той перевірив їх і створив для них нове правило потоку.

Таблиці можуть доставлятися проактивно або реактивно. У проактивному режимі контролер надсилає таблицю потоків усім комутаторам. У реактивному режимі контролер надсилає нові записи потоку лише за запитом комутатора. Це може допомогти зменшити обсяг даних, що зберігаються на кожному комутаторі, і підвищити продуктивність.

Контролер OpenFlow SDN може взаємодіяти з додатками вищого рівня. Ці додатки вищого рівня містять бізнес-логіку і можуть бути легше налаштовані технічним спеціалістом. Потім це передається на північний інтерфейс API до контролера. Потім контролер встановлює правила потоку.

Також, до мереж SDN, можна віднести протокол конфігурації мережі (NETCONF) - це XML-протокол для керування мережею з можливістю фільтрації. Він пропонує повністю програмовані засоби контролю та налаштування роботи мережевого обладнання. З його допомогою можна встановлювати параметри пристрою, отримувати значення параметрів і статистичну інформацію. Крім того, це скорочує час, відведений на управління налаштуванням мережевих пристроїв. У цьому випадку замість того, щоб налаштовувати все вручну, NETCONF робить це автоматично.

NETCONF - це протокол управління мережею, який використовує простий механізм віддаленого виклику процедур (RPC) для взаємодії з мережевими

пристроями. Він призначений для роботи з простим протоколом управління мережею (SNMP) і використовує формат кодування даних Extensible Markup Language (XML). Вона дозволяє мережевим адміністраторам віддалено налаштовувати, контролювати і усувати несправності мережевих пристроїв, що робить її цінним інструментом для управління великими і складними мережами.

- Використовується для безпечного з'єднання з пристроєм для виконання конфігурацій і отримання робочих даних.
- Він не визначає формат даних; цю відповідальність взяла на себе мова моделювання даних YANG (Yet Another Next Generation), описана IETF.
- Транспортування здійснюється за допомогою SSH-з'єднання через порт 830.

NETCONF є критично важливим для автоматизації мереж і широко використовується в SDN/NFV середовищах для централізованого управління конфігураціями. NETCONF включає принаймні одну систему керування мережею (NMS), яка керує мережевими пристроями. На наступній схемі зображено фундаментальну мережеву архітектуру протоколу конфігурації мережі.

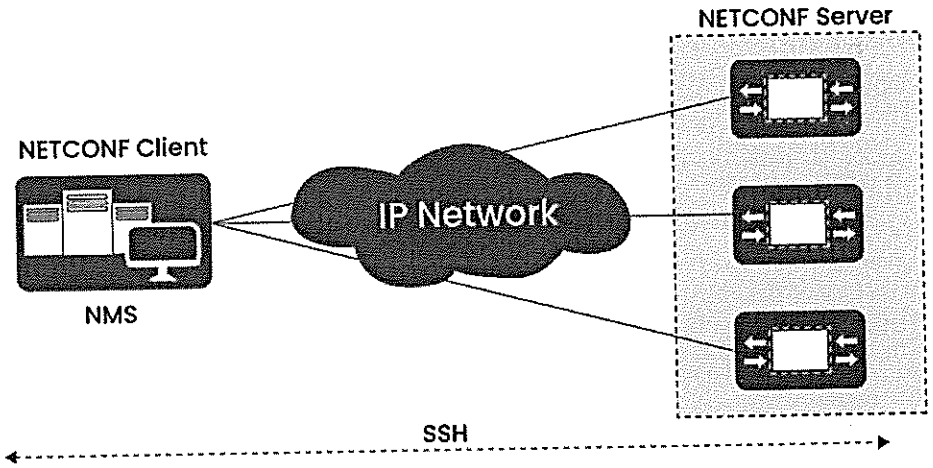


Рис. 1.8. Схема роботи протоколу NETCONF

Структура NETCONF складається з двох основних частин: клієнта і сервера.

Основні компоненти NETCONF:

1) Клієнт (Manager): Ініціює запити та надсилає команди.

2) Сервер (Agent): Виконує команди, повертає відповіді та змінює конфігурацію.

3) YANG: Модель даних для опису конфігурацій мережевих пристроїв.

Нижче наведено деякі з послуг, які може запропонувати клієнт:

- Використовує протокол конфігурації мережі для керування мережевим обладнанням.
- Щоб отримати інформацію про параметр або змінити його значення, RPC-запити надсилаються на сервер NETCONF.

Клієнт протоколу мережевої конфігурації надсилає запит на сервер, який потім аналізує запит, перш ніж відповісти клієнту.

Таблиця 1.2

Основні протоколи SDN

Протокол	**Призначення**	**Характеристики**	**Приклад використання**
OpenFlow	Управління трафіком між комутаторами	Стандартизований, підтримує комутатори L2/L3	Контроль маршрутизації в SDN-мережах
NETCONF	Конфігурація мережевих пристроїв	XML/REST, базоване API	Автоматизація налаштувань
gRPC	Взаємодія між компонентами SDN	Висока швидкість, масштабованість	Міжконтролерний обмін даними

Найбільша різниця між SDN і традиційними мережами полягає в тому, що SDN базується на програмному забезпеченні, а традиційні мережі, як правило, базуються на апаратному забезпеченні.

На відміну від SDN, традиційні мережі використовують маршрутизатори, комутатори та інше обладнання і фізичну інфраструктуру для створення з'єднань і управління мережею.

У порівнянні з традиційними мережами, SDN може краще взаємодіяти з обладнанням, яке використовує мережу. Замість використання фізичної інфраструктури, SDN дозволяє користувачам застосовувати програмне забезпечення для забезпечення нових пристроїв і дозволяє IT-адміністраторам спрямовувати мережеві шляхи і керувати мережевими послугами. Найбільша різниця між SDN і традиційною мережею полягає у віртуалізації. SDN створює абстрактну копію вашої мережі, коли вона віртуалізує вашу мережу.

Основні відмінності між SDN і традиційними мережами (табл. 1.3) полягають в їх архітектурі, площині управління, конфігурації та управлінні, програмованості, масштабованості, безпеці та вартості.

Таблиця 1.3

Порівняння традиційних та SDN-мереж

Критерій	**Традиційні мережі**	**SDN-мережі**
Управління	Розподілене (на пристроях)	Централізоване (контролер)
Гнучкість	Обмежена	Висока
Масштабованість	Складна	Легша, завдяки програмованості
Налаштування	Ручне	Автоматизоване через API
Вартість впровадження	Висока	Знижена

Порівняльний графік (рис. 1.9), ілюструє ефективність управління трафіком у традиційних мережах і SDN за трьома параметрами: затримка, масштабованість і ефективність. SDN демонструє значно кращі результати, особливо в

масштабованості та ефективності, що робить цю технологію більш придатною для сучасних мереж.

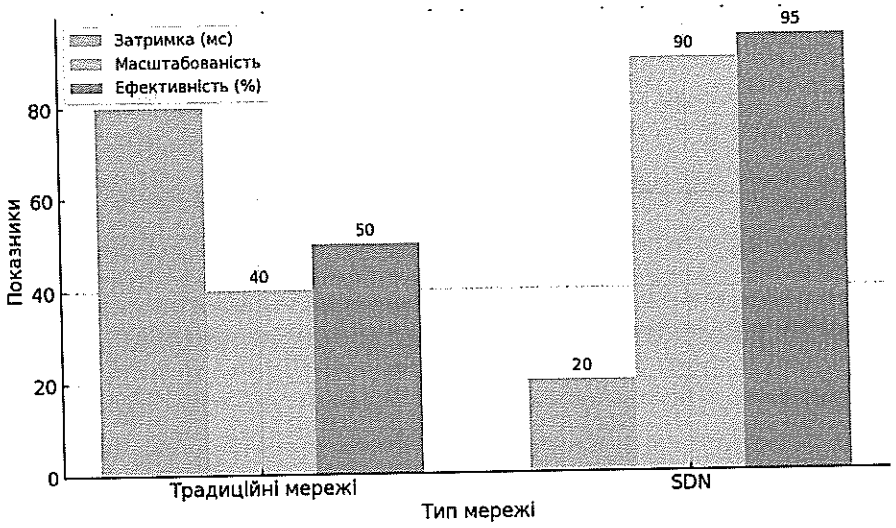


Рис. 1.9. Порівняння ефективності управління трафіком у мережах

Основна ідея SDN полягає в тому, щоб перенести площину управління з мережевого обладнання і забезпечити зовнішній контроль даних за допомогою логічної програмної сутності, яка називається контролером. Контролер, який керує потоком пакетів для забезпечення інтелектуальної мережі, знаходиться між мережевими пристроями та додатками. У цій архітектурі управління мережею стає програмованим. За допомогою контролера адміністратори зможуть легко керувати мережею 5G і впроваджувати нові послуги або зміни.

З цієї причини парадигма 5G SDN дозволить підвищити гнучкість і програмованість мереж 5G, подолавши розрив між потребами бізнесу і системами управління. Інтелектуальна, віртуалізована, програмована мережа 5G дозволить провайдерам впроваджувати інновації як у своїй діяльності, так і в пропозиції послуг. Вони зможуть надавати нові послуги на вимогу, тим самим підвищуючи свою загальну ефективність.

Важливою частиною технології 5G буде створення декількох ієрархій, які складають топологію мережі. У порівнянні з сьогоднішніми мережами з плоским ядром, 5G створює ієрархічні ядра. «Думайте про це як про множинну ієрархію кешів», - каже Радж Сінгх, генеральний директор групи бездротового

широкосмугового зв'язку в Cavium. Подібно до мереж доставки контенту, які кешують популярний контент на периферії, 5G кешуватиме контент локально.

Сотні вузлів можуть надсилати дані на контролер 5G SDN. Різні ієрархії міститимуть радіостанції RAN різного розміру. Крім того, залежно від географічного розташування, мережа матиме різні рівні ієрархії.

Цінність 5G SDN, особливо в поєднанні з віртуалізацією мережевих функцій (NFV) і віртуалізованими мережевими функціями (VNF) - полягає в її здатності забезпечити віртуалізацію мережі, автоматизацію і створення нових послуг на базі віртуалізованих ресурсів. Крім того, програмованість мережі 5G SDN уможливлює нові бізнес-моделі та сприяє зростанню доходів. Архітектура 5G SDN буде динамічною, легко керованою та економічно ефективною, що робить її ідеальною для динамічних, високошвидкісних сценаріїв використання 5G. Основні переваги SDN у 5G-мережах наведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Переваги SDN у 5G-мережах

Перевага	**Опис**
Мережна сегментація	Можливість створення віртуальних підмереж для окремих сервісів
Зменшення затримки	Інтеграція з крайовими обчисленнями для швидкої обробки даних
Оптимізація ресурсів	Централізоване управління дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси
Гнучкість в оновленні політик	Легке внесення змін у політики без перевантаження мережі

1.3. Мережева віртуалізація 5G

Мережева віртуалізація (Network Virtualization) — це технологія, що дозволяє створювати віртуальні мережі поверх фізичної інфраструктури. Вона дає змогу запускати кілька ізольованих мереж із власними політиками та конфігураціями на спільному обладнанні. У 5G мережі віртуалізація відіграє ключову роль у забезпеченні гнучкості, масштабованості та ефективного використання ресурсів.

Загальна концепція віртуалізації полягає в абстрагуванні апаратного забезпечення за допомогою програмного контролю. Сервери використовують віртуальні машини протягом десятиліть, дозволяючи програмним засобам надавати обчислювальне обладнання та керувати ним.

Таблиця 1.5

Порівняння традиційної та віртуалізованої мережі 5G

Критерій	**Традиційна мережа**	**Віртуалізована мережа (SDN/NFV)**
Архітектура	Жорстко інтегрована апаратна інфраструктура	Програмно-визначена, розділення контролю та передачі
Масштабованість	Обмежена фізичними ресурсами	Гнучка, масштабування через програмні рішення
Управління трафіком	Децентралізоване	Централізоване (SDN-контролер)
Модернізація	Тривалі та дорогі	Швидке, через оновлення
Ефективність використання ресурсів	Фіксоване розподілення	Динамічне перерозподілення
Розгортання нових послуг	Вимагає нових фізичних пристроїв	Можливе через програмне налаштування (NFV)

Продовження таблиці 1.5

Затримка (Latency)	Вища	Низька, завдяки розташуванню обчислень ближче до користувача
Безпека	Статична, обмежені засоби контролю	Динамічна, можливість створення ізольованих сегментів (Network Slicing)
Гнучкість	Низька	Висока, налаштування мережі відповідно до вимог

Віртуалізація мережі забезпечує програмний контроль над мережевим середовищем, дозволяючи мережевим адміністраторам конфігурувати та керувати мережевими ресурсами та сервісами, не торкаючись фізичного мережевого обладнання. Використовуючи мережеву віртуалізацію для відокремлення мережевого обладнання від логічної мережі та мережевого трафіку, що нею проходить, адміністратори можуть швидко виконувати ряд мережевих завдань і керувати мережевими операціями, які в іншому випадку вимагали б трудомісткої, схильної до помилок ручної реконфігурації.

Віртуалізація мережі дозволяє реалізувати наступні сценарії:

- Дві або більше фізичних мереж можна об'єднати в одну віртуальну мережу.
- Фізична мережа може бути розділена на окремі незалежні віртуальні мережі.
- Віртуальні машини можуть підключатися або мігрувати між доменами без реконфігурації мережі.

Віртуалізація мережі, яка відбувається між кінцевими точками сервера, називається зовнішньою мережевою віртуалізацією. Втім, віртуальні машини, які існують на даному сервері, можуть взаємодіяти на сервері за допомогою імітованої мережі всередині самого сервера, що називається внутрішньою мережевою віртуалізацією.

Віртуалізація 5G - це процес заміни апаратних мережевих функцій на програмні з метою кращої оптимізації мережі та підвищення ефективності, гнучкості та пропускної здатності інфраструктури.

Майбутній стандарт 5G обіцяє бум пропускної здатності мобільних мереж і вибух кількості підключених пристроїв Інтернету речей (IoT). За даними Nokia Bell Labs, очікується, що кількість пристроїв зросте з 1,6 мільярда у 2014 році до понад 20 мільярдів до 2020 року.

Мобільні оператори вже прагнуть збільшити свої інвестиції, щоб задовольнити постійно зростаючі потреби споживачів і бізнесу у зв'язку, тому цілком природно, що вони звертаються до технологій, які покращують інфраструктуру, таких як віртуалізація мереж (NV), програмно-визначені мережі (SDN) і віртуалізація мережевих функцій (NFV), щоб розвивати свій бізнес. Мережа 5G вимагатиме віртуалізації як в ядрі мережі, так і на її межі.

В ядрі мережі віртуалізація 5G використовуватиме мережеве розшарування для підтримки декількох віртуальних мереж в одній фізичній мережевій інфраструктурі. Нарізка мережі дозволяє логічно розділити мережу таким чином, щоб кожен фрагмент забезпечував унікальний зв'язок - але всі фрагменти працюють на одній спільній інфраструктурі. Таким чином, віртуалізація 5G забезпечує новий рівень гнучкості, дозволяючи операторам, наприклад, виділяти фрагмент мережі для певних типів пристроїв.

Для ефективної підтримки певних наборів послуг кожен фрагмент мережі матиме доступ до різних типів ресурсів, таких як інфраструктура (наприклад, VPN, хмарні сервіси) і функції мережевої віртуалізації (NV) (VNF). Завдяки віртуалізації 5G оператори зможуть створювати власні мережі з унікальним набором можливостей.

Віртуалізація стане важливим компонентом на межі мережі, а саме - віртуального розділення мережі мобільного радіодоступу (ran). Також за допомогою розбиття мережі на частини оператори зможуть створювати унікальні послуги, пристосовані до різних сценаріїв використання, таких як IoT, автоматизовані автомобілі, потокове відео і віддалене медичне обслуговування. Вони можуть

створювати віртуальні мережі для тих додатків, які можуть похвалитися окремими поєднаннями продуктивності, пропускної здатності, затримки, безпеки, надійності та покриття.

Завдяки можливості розгортання широкого спектру мережевих послуг на базі однієї фізичної мережі оператори зможуть диверсифікувати, розширювати і збільшувати свої потоки доходів у дуже економічно ефективний спосіб. У 5G віртуалізація покінчить з поняттям зв'язку, побудованого на єдиній інфраструктурі мобільної мережі, відкриваючи потенціал для екстремальної кількості і типів підтримуваних сценаріїв використання 5G.

Нові вимогливі додатки, що оперують великими обсягами даних і висувають високі вимоги до безпеки та надійності, потребують нової архітектури. 5G - це п'яте покоління мобільного зв'язку, яке намагається відповісти на ці потреби і стає глобальним мережевим стандартом. Для його розгортання використовуються три основні технології: SDN, NFV і Network Slicing - різновиди мережевої віртуалізації. Перенесення функцій мережевого обладнання на програмне забезпечення має очевидні переваги, однак це збільшує поверхню атаки на мережу, що вимагає врахування великої кількості та різноманітності загроз і пошуку відповідного захисту від них. З іншого боку, гнучкість архітектури на основі NFV забезпечує широкий спектр засобів захисту, які можуть зробити ці мережі навіть більш безпечними, ніж суто апаратні мережі, ціною певного ускладнення та підвищення продуктивності, але зберігаючи при цьому їх переваги гнучкості, адаптивності та швидкості створення і розгортання. Аналізуючи аспекти безпеки цих мереж, слід зазначити, що хоча ці мережі мають особливі характеристики, вони є лише ще одним прикладом систем, і до них застосовна велика частина теорії безпеки систем.

Віртуалізація мережевих функцій - це нова технологія, яка емулює мережеві апаратні ресурси за допомогою програмного забезпечення. Така емуляція забезпечує більш гнучкі та масштабовані мережеві послуги, скорочення витрат та швидшу конфігурацію мережі, що дозволяє телекомунікаційним операторам автоматично інстанціювати, надавати та керувати мережевими послугами (NS).

До технологій мережевої віртуалізації в 5G, можна віднести:

1. NFV (Network Functions Virtualization) – це віртуалізація мережевих функцій, таких як маршрутизація, балансування навантаження, захист мережі. Функції, що раніше працювали на фізичних пристроях, переносяться у програмне забезпечення та виконуються на стандартних серверах.

2. SDN (Software-Defined Networking) – процес відокремлення рівня управління мережею від рівня пересилання даних для централізованого управління ресурсами.

3. Network Slicing (сегментація мережі) – це коли мережа ділиться на логічні сегменти, кожен з яких оптимізований під конкретний сервіс. Наприклад, один сегмент може бути налаштований для низької затримки (автономні авто), інший — для широкосмугового доступу (відео).

Таблиця 1.6

Переваги різних методів мережевої віртуалізації (NFV, SDN, Network Slicing)

Критерій	**NFV (Network Function Virtualization)**	**SDN (Software-Defined Networking)**	**Network Slicing**
Основна ідея	Віртуалізація мережевих функцій на стандартному обладнанні	Розділення керуючої та користувацької площини	Логічний поділ фізичної мережі на віртуальні сегменти
Гнучкість	Висока, швидке впровадження нових функцій	Висока, централізоване управління мережами	Дуже висока, створення окремих сегментів для різних послуг
Масштабованість	Легке масштабування	Через централізований контроль	Відповідно до специфічних вимог

Продовження таблиці 1.6

Оновлення та модифікація	Просте через ПЗ	Оновлення контролера, швидке	Динамічне створення та налаштування сегментів
Вартість	Зниження витрат на обладнання	Зниження витрат завдяки меншій залежності від обладнання	Оптимізація використання ресурсів
Ефективність використання ресурсів	Висока	Висока	Максимальна завдяки поділу ресурсів
Безпека	Середня	Висока через централізований контроль	Дуже висока, ізоляція сегментів
Затримка (Latency)	Середня	Низька	Дуже низька у критичних сегментах
Застосування	Віртуалізація функцій (vEPC, vRouter)	Управління трафіком і топологією мережі	IoT, автономний транспорт, стрімінг з низькою затримкою

Архітектура віртуалізованої 5G-мережі базується на принципах програмно-визначених мереж (SDN), віртуалізації мережевих функцій (NFV) та сегментації мережі (Network Slicing). Це дозволяє створювати динамічні, масштабовані та ефективні мережі, які можуть адаптуватися до різних вимог користувачів і застосунків.

Основні компоненти архітектури:

- Інфраструктурний рівень (Infrastructure Layer) – який складається з фізичного обладнання, такого як сервери, комутатори, маршрутизатори та базові станції. Він забезпечує обчислювальні ресурси для віртуалізованих функцій.
- Рівень віртуалізації (Virtualization Layer) – використовує технології NFV для створення віртуальних мережевих функцій (VNF) на фізичних серверах. Гіпервізори, контейнери та SDN-контролери забезпечують гнучкість керування мережею.
- Оркестраційний рівень (Orchestration Layer) – відповідає за автоматизацію розгортання та управління VNF, використовуючи ONAP (Open Network Automation Platform) або Kubernetes. Дозволяє швидко адаптувати мережу до нових вимог.
- Рівень сервісів (Service Layer) – забезпечує кінцеві послуги користувачам (наприклад, автономний транспорт, AR/VR, IoT). Мережевий поділ (Network Slicing) дозволяє створювати окремі логічні мережі для різних сервісів з індивідуальними параметрами.

Мережева віртуалізація є ключовим компонентом розвитку телекомунікаційних систем п'ятого покоління (5G). Вона дозволяє оптимізувати використання апаратних ресурсів, підвищити гнучкість управління мережею та прискорити розгортання нових сервісів. Завдяки технологіям SDN, NFV та Network Slicing досягається розділення фізичної інфраструктури на віртуальні сегменти, що відповідають специфічним вимогам різних користувачів і застосунків.

Цей підхід забезпечує зниження витрат на обладнання та експлуатацію, підвищує масштабованість мережі та сприяє швидкій адаптації до зростаючого трафіку та нових технологічних викликів. У підсумку, мережева віртуалізація є невід'ємною складовою для забезпечення ефективної роботи 5G-мереж та створення інноваційної екосистеми для майбутніх цифрових послуг.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ МЕРЕЖЕВОЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ У SDN-МЕРЕЖАХ

2.1. Вибір критеріїв для оцінки ефективності

Оцінка продуктивності мережевих технологій є критичним етапом для визначення ефективності роботи мережі, її масштабованості та відповідності сучасним вимогам телекомунікаційних систем. Існує кілька підходів та методів, які дозволяють комплексно аналізувати різні аспекти мережі – від пропускної здатності до надійності та часу відгуку.

Існує три методи оцінки продуктивності, до них можна віднести:

1. *Аналітичні методи,* які засновані на математичних моделях і аналітичних розрахунках для прогнозування роботи мережі за різних умов. Вони використовуються для оцінки затримок, продуктивності та втрат пакетів. Наприклад: моделі Марковських ланцюгів для аналізу стану мережі.

2. *Методи симуляції*, які дозволяють відтворювати мережеві топології та трафік у віртуальному середовищі. Дані методи використовуються для тестування мереж перед їх реальним розгортанням. Приклади: Mininet, NS-3, OMNeT++, GNS3.

3. *Емпіричні методи*, включають в себе реальні тести в середовищі лабораторій або в існуючих мережах. Ці методики дозволяють отримати фактичні дані щодо продуктивності та виявити «вузькі місця» у мережі.

Приклади: Використовуються для аналізу SDN, NFV та Network Slicing у реальних сценаріях.

Таблиця 2.1

Ключові метрики оцінки продуктивності технологій мережевої віртуалізації

Метрики	**Опис**
Пропускна здатність (Bandwidth)	Визначає кількість даних, які можуть бути передані мережею за одиницю часу

Продовження таблиці 2.1

Затримка (Latency)	Час проходження пакета від джерела до одержувача
Час відгуку (Response Time)	Вимірює час, який потрібен системі для реагування на запити користувачів
Використання ресурсів	Ступінь завантаження мережевих компонентів (CPU, пам'ять, канали зв'язку)

До методик оцінки для SDN та віртуалізованих мереж, можна віднести такі:

- Performance Benchmarking – це порівняння продуктивності SDN-контролерів (OpenDaylight, ONOS, Floodlight) у різних мережевих сценаріях.

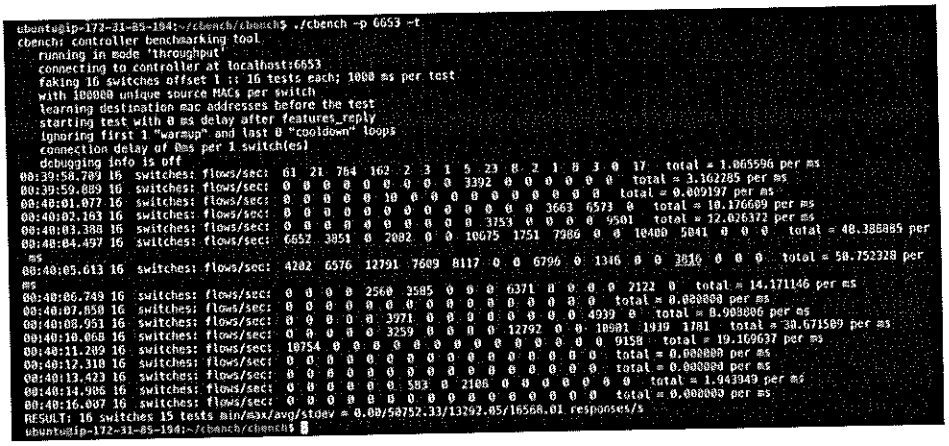


Рис. 2.1. Приклад використання Performance Benchmarking

- Flow Table Capacity Testing – це аналіз розміру та продуктивності таблиць потоків SDN-перемикачів.

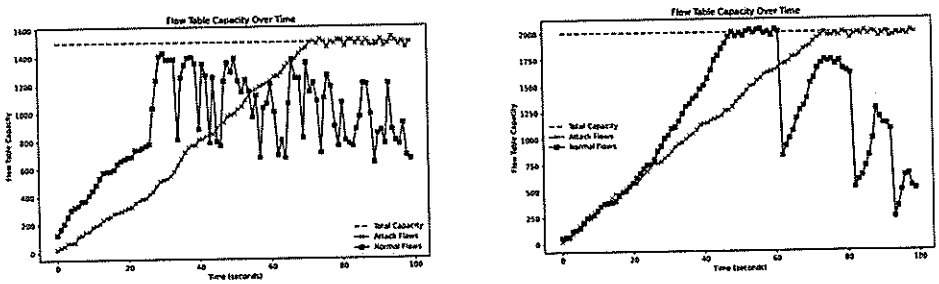


Рис. 2.2. Приклад аналізу Flow Table Capacity Testing

- Latency and Jitter Analysis – це визначення часу затримки та її коливань у динамічно керованих мережах SDN.

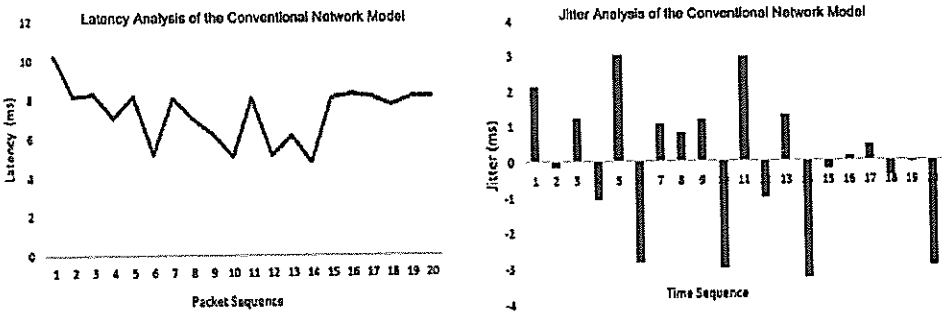


Рис. 2.3. Приклад Latency and Jitter аналізу

Оцінка продуктивності мережевих технологій регламентується міжнародними стандартами та рекомендаціями, розробленими провідними організаціями. Ці стандарти охоплюють різні аспекти – від тестування апаратного забезпечення до віртуалізованих функцій та програмно-визначених мереж (SDN). Нижче розглянуті ключові організації та їхній внесок у розвиток стандартів.

1. *ETSI* (Європейський інститут телекомунікаційних стандартів), розробляє стандарти для інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), що застосовуються в усьому світі, включаючи фіксований, мобільний, радіо-, конвергентний зв'язок, мовлення та Інтернет-технології. Дані стандарти сприяють розвитку технологій, на які покладаються бізнес і суспільство. Наприклад, стандарти ETSI для GSM™, DECT™, смарт-карт та електронних підписів допомогли революціонізувати сучасне життя в усьому світі.

ETSI офіційно визнана Європейським Союзом як Європейська організація зі стандартизації та є неприбутковою організацією, що налічує понад 800 організацій-членів з 67 країн світу та п'яти континентів. Членами організації є провідні світові компанії та інноваційні науково-дослідні організації. ETSI займається технічними питаннями, які будуть рушійною силою економіки майбутнього та покращать життя наступного покоління. Місія ETSI полягає в наданні платформи, де зацікавлені

сторони збираються разом і співпрацюють над створенням стандартів для систем і послуг інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), які використовуються в усьому світі.

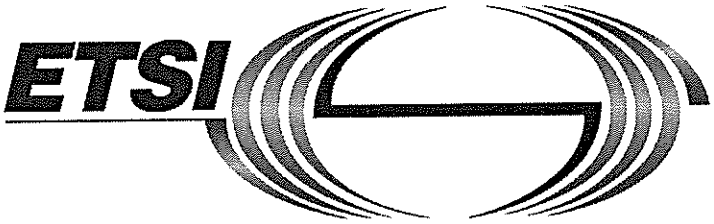


Рис. 2.4. Логотип ETSI

Основні стандарти та групи:

- ETSI NFV ISG (Industry Specification Group) - розробляють стандарти для впровадження NFV і також описують архітектуру NFV, методики тестування продуктивності та вимоги до програмних платформ. Документ: ETSI GS NFV-TST 001 – Методики тестування продуктивності NFV.
- ETSI ENI (Experiential Networked Intelligence) - визначає стандарти для застосування штучного інтелекту (AI) у керуванні мережами. Фокусується на адаптивності мереж та самонавчанні для підвищення ефективності.

Застосування:

Віртуалізовані 5G-середовища, де NFV відіграє ключову роль у створенні та управлінні мережевими функціями.

2. 3GPP — це спільний проект між групою телекомунікаційних асоціацій з початковою метою розробки глобально застосовних специфікацій для мобільних систем третього покоління (3G). Проект ґрунтувався на специфікаціях Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM) і Міжнародному союзі електрозв'язку (MCE) International Mobile Telecommunications-2000. Відтоді проект партнерства розширив свою спрямованість, включивши підтримку та розробку технічних специфікацій і звітів GSM.



Рис. 2.5. Логотип 3GPP

3GPP об'єднує організації зі стандартизації телекомунікацій у всьому світі, такі як Японська асоціація радіоіндустрії та бізнесу (ARIB) і Комітет телекомунікаційних технологій (TTC); Китайська асоціація стандартів зв'язку (CCSA); Асоціація телекомунікаційних технологій Південної Кореї (TTA); Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI); та Альянсу рішень для телекомунікаційної промисловості (ATIS) у США.

3GPP офіційно створено в грудні 1998 року, коли ETSI співпрацює з цими стандартами та телекомунікаційними організаціями з метою розвитку мереж 3G. Партнерство 3GPP базувалося на попередній стратегічній ініціативі щодо розвитку бездротового Інтернету між AT&T і Nortel Networks, яка згодом привернула глобальний інтерес кількох інших великих телекомунікаційних компаній. Форум стандартів для цієї ініціативи встановив, що ця мережа 3G буде заснована на GSM, який є європейським стандартом другого покоління (2G).

З моменту свого заснування 3GPP розробив найпоширеніший стандарт 3G, а також глобальні стандарти четвертого покоління (4G) і п'ятого покоління (5G).

Ключові специфікації:

- 3GPP Release 15-17, включають в себе специфікації для 5G NR (New Radio) та Core-систем. Воно стандартизує Network Slicing – сегментацію мережі для обслуговування різних типів трафіку (URLLC, eMBB, mMTC).
- TR 28.801, визначає вимоги до управління продуктивністю віртуалізованих мережевих функцій у 5G.

- TS 23.501 – це специфікація архітектури 5G Core, включаючи віртуалізацію мережевих функцій (VNF) та SDN.

Застосування:

- Впровадження та оптимізація 5G-мереж із застосуванням SDN/NFV.
- Оцінка продуктивності Network Slicing у реальних сценаріях.

3.Internet Engineering Task Force (IETF) — це велика відкрита міжнародна спільнота розробників мереж, операторів, постачальників і дослідників, які займаються розвитком архітектури Інтернету та безперебійною роботою Інтернету. Він відкритий для будь-якої зацікавленої особи. Заява про місію IETF задокументована в RFC 3935.

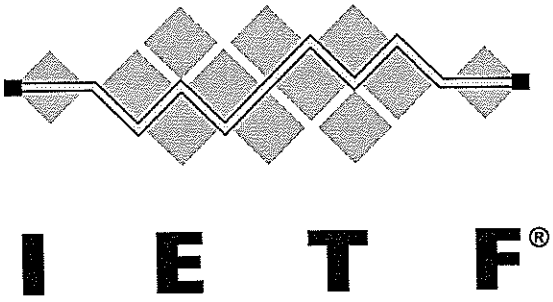


Рис. 2.6. Логотип IETF

Фактична технічна робота IETF виконується в робочих групах, які організовані за темами в кількох областях (наприклад, маршрутизація, транспорт, безпека тощо). Велика частина роботи виконується через списки розсилки. IETF проводить засідання тричі на рік.

Робочі групи IETF згруповані в зони та керуються регіональними директорами, або AD. AD є членами Керівної групи з розробки Інтернету (IESG). Нагляд за архітектурою здійснює Рада з питань архітектури Інтернету (IAB). IAB також розглядає апеляції, коли хтось скаржиться на невдачу IESG. Для цих цілей IAB та IESG створені Інтернет-суспільством (ISOC). Генеральний регіональний директор також є головою IESG та IETF і є членом IAB за посадою.

Управління розподілу номерів в Інтернеті (IANA) є центральним координатором для призначення унікальних значень параметрів для Інтернет-протоколів. IANA уповноважена Internet Society (ISOC) діяти як інформаційний центр для призначення та координації використання численних параметрів Інтернет-протоколу.

Ключові RFC:

- RFC 7426 – SDN Layers and Architecture Terminology, визначає архітектуру SDN та її компоненти (контролери, комутатори).
- RFC 8329 – Framework for NFV, описує основи віртуалізації мережевих функцій та їх інтеграцію в існуючі мережі.
- RFC 2544 – Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices, містить методики тестування продуктивності маршрутизаторів та комутаторів (latency, jitter, throughput).

Застосування:

- Тестування SDN-контролерів,
- Оцінка продуктивності OpenFlow-протоколів.

3. ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector) - це маловідома, хитка багатостороння організація, вперше створена для регулювання індустрії телеграм. Сьогодні він відповідає за майбутнє Інтернету, включаючи встановлення критичних стандартів і регулятивну діяльність 5G. Ця діяльність має особливий потенціал для впливу на країни, що розвиваються. ITU приваблює сильну активність (керівництво високого рівня та рівні навчальних груп низького рівня) стратегічних конкурентів США. Мандат організації, її склад і майбутня зміна керівництва в 2023 році роблять її надзвичайно важливою організацією для визначення та просування інтересів США.

ITU встановлює глобальні стандарти ІСТ і розробляє політику щодо низки критичних питань телекомунікацій, хоча це відбувається дифузно. Кожен із трьох технічних секторів ITU організовує «дослідницькі групи», що складаються з експертів, які збираються на зустрічах для обговорення технічних питань. Після

того, як резолюція отримує одноголосне голосування членів, вона фактично стає міжнародним правом, виконується та виконується на національному рівні.

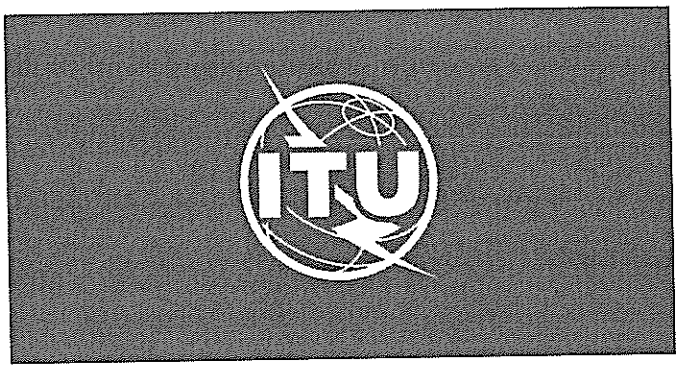


Рис. 2.6. Логотип ITU-T

Рекомендації дослідницьких груп нижчого рівня можуть стати кодифікованими правовими стандартами, яких зобов'язані дотримуватися всі держави-члени. Таким чином, щоб повністю зрозуміти повноваження та регуляторні можливості ITU, потрібно розуміти, що дискусії, які здаються короткозорими та технічними, мають наслідки для використання та застосування цифрових технологій у всьому світі. Рішення та результати ITU реалізуються через правила та норми національного рівня. Держави-члени несуть відповідальність за виконання умов резолюцій і звітування перед МСЕ про прогрес. Вони також впроваджуються через технічні стандарти та практику приватної промисловості. Правила МСЕ мають значення; вони визначають, який тип доступу до інформації ви маєте, коли відкриваєте Інтернет-браузер, або скільки ви платите за Netflix.

Ключові стандарти:

- Y.3100-Y.3170 - описує архітектуру 5G та мережеву віртуалізацію.
- Y.1564 – Ethernet Service Activation Testing (SAT) - методика для тестування продуктивності мереж Ethernet.
- G.8260 - описує стандарти для вимірювання продуктивності транспортних мереж (Packet Transport).

Застосування:

Тестування та оптимізація мереж 5G на рівні магістралей та фіксованих мереж.

Використання міжнародних стандартів дозволяє забезпечити високу якість мережевих сервісів, сумісність обладнання та програмного забезпечення різних виробників. Оцінка продуктивності SDN, NFV та мереж 5G спирається на вимоги ETSI, 3GPP, IETF та ITU-T, що гарантує відповідність сучасним викликам у сфері телекомунікацій.

2.2. Інструменти моделювання та тестування SDN-мереж

Моделювання програмно-визначених мереж (SDN) відіграє критичну роль у дослідженнях, тестуванні та впровадженні інноваційних рішень у мережевій сфері. Програмні платформи для моделювання дозволяють імітувати роботу SDN-контролерів, комутаторів та мережевих топологій, оцінювати продуктивність мережі, тестувати нові протоколи та алгоритми управління трафіком. Нижче наведено огляд найбільш популярних платформ для моделювання SDN.

1. Mininet – це найпопулярніша платформа для моделювання SDN-мереж, яка дозволяє створювати віртуальні мережі на одному фізичному хості. Це емулятор для розгортання великих мереж на обмежених ресурсах одного комп'ютера або віртуальної машини.

Емулятор Mininet дозволяє інтерактивно запускати немодифікований код на віртуальному обладнанні на простому ПК. Він забезпечує зручність та реалістичність за дуже низьку ціну.

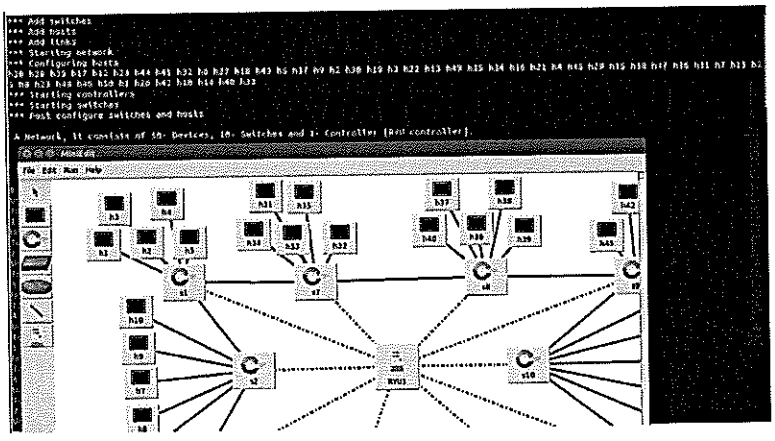


Рис. 2.7. Інтерфейс платформи Mininet

Особливості:

- Емулює комутатори, хости та контролери.
- Підтримує інтеграцію з OpenFlow SDN-контролерами (Floodlight, Ryu, ONOS).
- Легко налаштовується та дозволяє швидко створювати складні мережеві топології.
- Забезпечує низькорівневе тестування продуктивності мережі.

Застосування:

- Тестування SDN-додатків.
- Оцінка продуктивності протоколів (OpenFlow).

2. GNS3 (Graphical Network Simulator-3) – це симулятор мережевої інфраструктури, який дозволяє створювати віртуальні та реальні мережі шляхом інтеграції з Cisco IOS, Juniper та іншими мережевими ОС. GNS3 використовується сотнями тисяч мережевих інженерів по всьому світу для емуляції, налаштування, тестування та усунення несправностей віртуальних і реальних мереж. GNS3 дозволяє запускати як невеликі топології, що складаються лише з декількох пристроїв на ноутбуці, так і мережі з великою кількістю пристроїв, розміщених на декількох серверах або навіть у хмарі.

Його активно розробляють і підтримують, а його спільнота налічує понад 800 000 учасників. GNS3 використовується у компаніях по всьому світу, включаючи компанії зі списку Fortune 500.

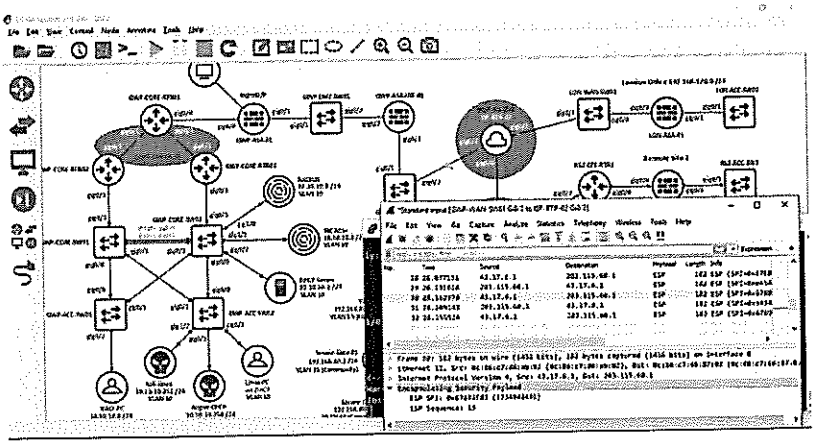


Рис. 2.8. Інтерфейс симулятора GNS3

Особливості:

- Підтримує віртуалізацію реального мережевого обладнання.
- Інтеграція з Docker та VMware.
- Можливість моделювати SDN-середовище через підключення до реальних контролерів.
- Підтримка сценаріїв для великих мережевих архітектур.

Застосування:

- Тестування SDN-інфраструктур із реальними образами Cisco IOS.
- Навчання та сертифікація мережевих інженерів.

3. NS-3 (Network Simulator 3) – це потужна симуляційна платформа, яка використовується для створення та аналізу мережевих протоколів, включаючи SDN та NFV. Це мережевий симулятор дискретних подій для інтернет-систем, призначений в першу чергу для дослідницького та освітнього використання. NS-3 - це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, ліцензоване за ліцензією GNU GPLv2 і підтримуване світовою спільнотою.

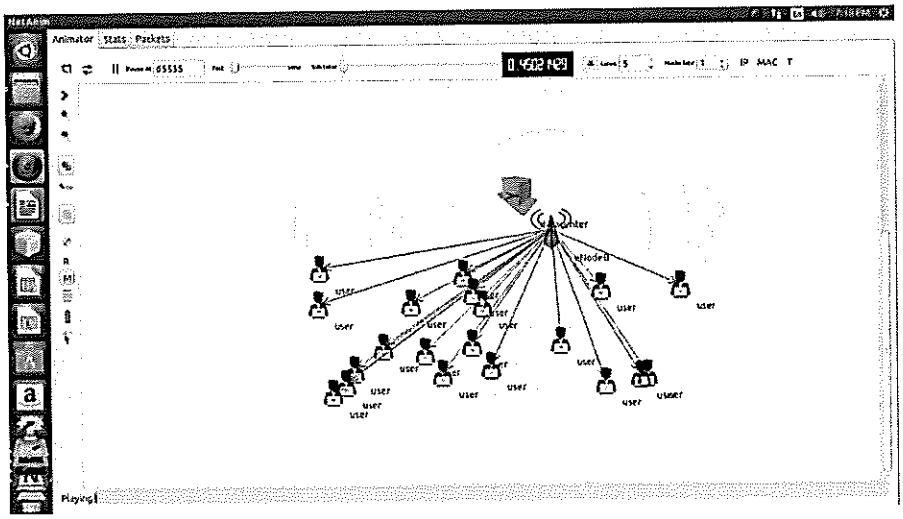


Рис. 2.9. Інтерфейс платформи NS-3

Особливості:

- Підтримує розробку та тестування мережевих протоколів з нуля.
- Дозволяє створювати великі топології з тисячами вузлів.
- Висока масштабованість та точність симуляцій.

- Включає модулі для SDN та 5G.

Застосування:

- Розробка нових SDN-протоколів та алгоритмів.
- Оцінка продуктивності SDN-контролерів.
- Дослідження поведінки мереж у великих масштабах.

4. EstiNet – це комерційний симулятор SDN та NFV, який поєднує функціональність NS-3 та Mininet. EstiNet використовує унікальну методологію моделювання повторного входу ядра, щоб дозволити немодифікованим реальним додаткам працювати на вузлах змодельованої мережі. В результаті, без будь-яких модифікацій, реальні контролери NOX/POX або Floodlight OpenFlow можуть легко працювати на хості в симуляційній мережі EstiNet для управління тисячами симульованих комутаторів OpenFlow. Він поєднує в собі переваги підходів симуляції та емуляції без відповідних недоліків.

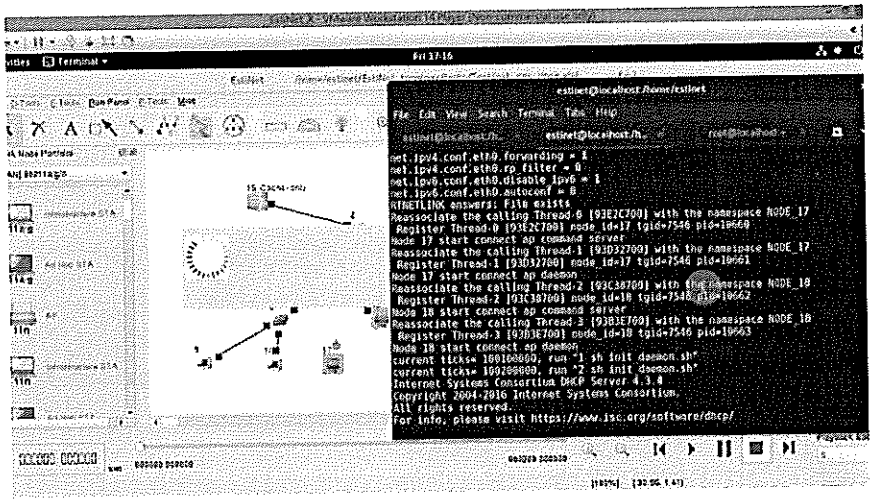


Рис. 2.10. Інтерфейс симулятора EstiNet

Особливості:

- Підтримка симуляції SDN-контролерів та OpenFlow-комутаторів.
- Можливість масштабування до тисяч вузлів.
- Точна емуляція мережевого трафіку та поведінки.

Застосування:

- Оцінка продуктивності SDN-контролерів у великих мережах.
- Тестування протоколів OpenFlow.

5. Ryu – це SDN-контролер на основі Python, який дозволяє швидко розробляти та впроваджувати SDN-додатки. Ryu Controller - це відкритий, програмно-визначений мережевий контролер (SDN), призначений для підвищення гнучкості мережі за рахунок спрощення управління та адаптації способу обробки трафіку. Загалом, контролер SDN є мозком середовища SDN, передаючи інформацію до комутаторів і маршрутизаторів за допомогою API в південному напрямку, і до додатків і бізнес-логіки за допомогою API в північному напрямку. Контролер Ryu Controller підтримується NTT і розгортається в хмарних дата-центрах NTT.

Контролер Ryu Controller надає програмні компоненти з чітко визначеними прикладними програмними інтерфейсами (API), які полегшують розробникам створення нових додатків для управління та контролю мережі. Цей компонентний підхід допомагає організаціям налаштовувати розгортання відповідно до своїх конкретних потреб; розробники можуть швидко і легко модифікувати існуючі компоненти або впроваджувати свої власні, щоб гарантувати, що базова мережа може задовольнити мінливі вимоги їхніх додатків.

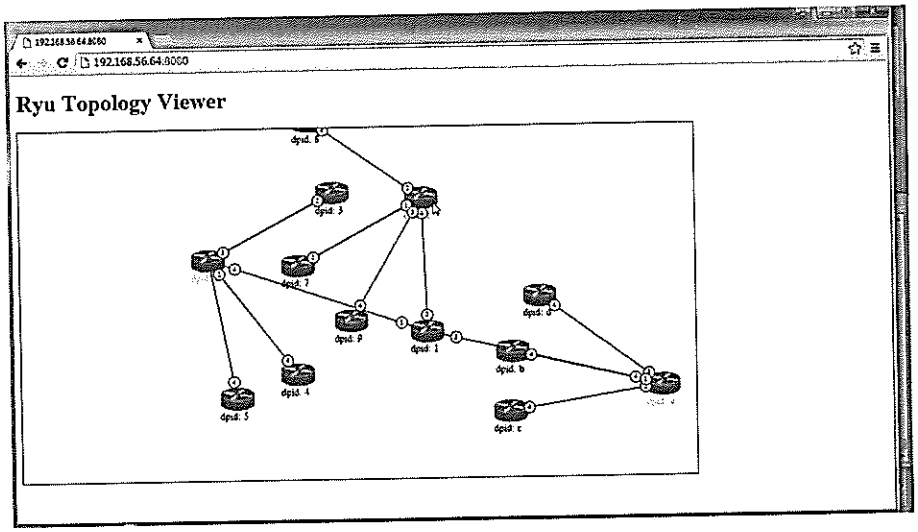


Рис. 2.11. Інтерфейс контролера Ryu

Особливості:

- Простота використання та розширення.

- Підтримка OpenFlow 1.3 та вищих версій.
- Можливість симуляції SDN-мереж разом із Mininet.
- Підходить для прототипування нових SDN-рішень.

Застосування:

- Розробка кастомних SDN-контролерів.
- Тестування SDN-додатків.

6. EVE-NG (Emulated Virtual Environment-Next Generation) – це візуальна платформа для створення симуляційних мереж, яка підтримує Cisco, Juniper та інше мережеве обладнання. EVE-NG дозволяє віртуалізувати багато мережевих пристроїв та операційних систем від таких виробників, як Cisco, Juniper тощо. Ця можливість дозволяє мережевим фахівцям відтворювати реальні мережі та проводити розширене тестування і усунення несправностей. Вам цікаво, як це впливає на навчання та розвиток? Що ж, це значно покращує навчальний процес для мережевих інженерів-початківців, надаючи їм практичний досвід у контрольованому середовищі.

Однією з визначних особливостей EVE-NG є її здатність безперешкодно інтегруватися як з відкритими, так і з пропрієтарними мережевими інструментами. Це сприяє створенню гнучкого та універсального середовища тестування.

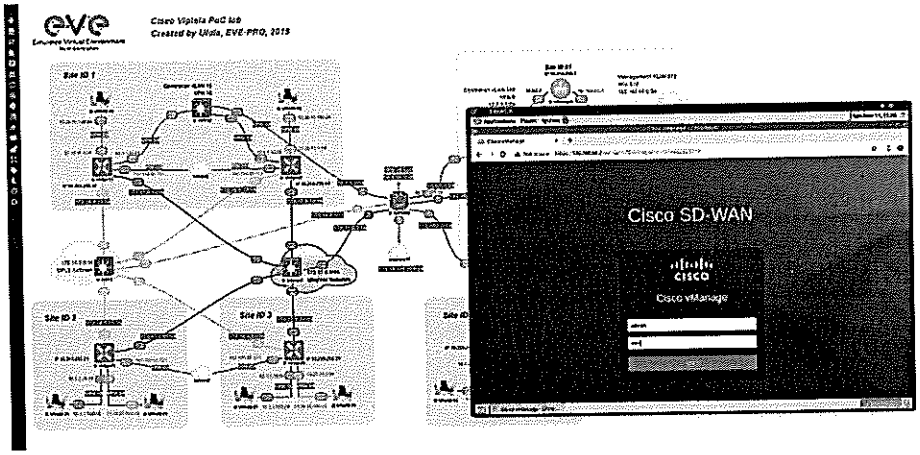


Рис. 2.12. Інтерфейс платформи EVE-NG

Особливості:

- Підтримка мультивендорної віртуалізації.

- Інтеграція із SDN-контролерами (OpenDaylight, ONOS).
- Можливість створення складних топологій.

Застосування:

- Навчання SDN та NFV.
- Створення прототипів мереж для операторів зв'язку.

Програмні платформи для моделювання SDN є важливими інструментами для дослідження новітніх мережевих технологій. Mininet залишається найпопулярнішою платформою завдяки своїй простоті та швидкості розгортання, тоді як NS-3 та EstiNet забезпечують більш масштабовані симуляції. Порівняння інструментів для моделювання SDN-мереж, наведено нижче (табл. 2.2)

Таблиця 2.2

Порівняння інструментів для моделювання SDN-мереж

Інструмент	**Призначення**	**Мова програмування**	**Масштабованість**	**Інтеграція з іншими інструментами**
Mininet	Емуляція SDN-мереж	Python	Висока	ONOS, ODL
NS-3	Мережеве моделювання	C++	Частково висока	Direct Code Integration
GNS3	Візуалізація мереж	Python	Висока	Cisco IOS, VMware
EstiNet	Емуляція та тестування SDN	C/C++	Висока	Інтеграція з Mininet

Продовження таблиці 2.2

Ryu	SDN-контролер	Python	Середня	OpenFlow, REST API
EVE-NG	Віртуалізація та моделювання мереж	Linux (GUI)	Частково висока	Cisco, Juniper, VMware

Тестування SDN-контролерів є важливою частиною процесу розгортання програмно-визначених мереж (SDN). Ефективна перевірка контролера дозволяє оцінити його продуктивність, масштабованість, затримки, відмовостійкість та ефективність управління трафіком. Нижче наведено огляд основних інструментів для тестування SDN-контролерів.

1. ODL (OpenDaylight Integration Testing) – це набір інструментів для тестування контролера OpenDaylight, одного з найбільш розповсюджених SDN-контролерів у великих мережах. Завдяки ODL функціональність контролерів знаходиться в буквальному сенсі в руках розробників додатків, на відміну від того, щоб бути жорстко запрограмованою (і, таким чином, обмеженою) розробниками контролерів. Ця унікальна гнучкість досягається завдяки розвиненому рівню абстракції послуг, керованому моделлю (MD-SAL).

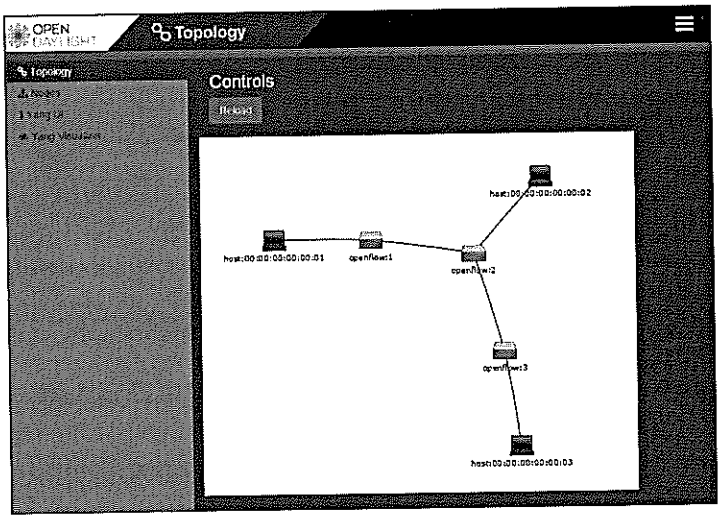


Рис. 2.13. Інтерфейс набору інструментів ODL

2.3. Розробка експериментальної мережевої топології для оцінки ефективності технологій віртуалізації

Розробка експериментальної мережевої топології необхідна для комплексного дослідження ефективності технологій віртуалізації у SDN-мережах. Основна мета полягає в отриманні практичних даних про те, як різні методи віртуалізації впливають на продуктивність мережі, її масштабованість та стійкість до навантажень.

SDN-мережі передбачають централізоване управління, що дозволяє швидко адаптуватися до змін у трафіку та підвищувати ефективність використання ресурсів. Віртуалізація дозволяє створювати логічні сегменти мережі без зміни фізичної інфраструктури, але це може супроводжуватися певними накладними витратами на продуктивність.

Оцінка ефективності експериментальної топології буде базуватися на вимірюванні наступних показників:

1. Пропускна здатність (Throughput): вимірюється у біт/с (bps) або пакети/с (pps), показує, скільки даних може бути передано мережею за одиницю часу і визначає ефективність використання каналів зв'язку.

2. Затримка (Latency): вимірюється у мілісекундах (ms), показує час, необхідний для проходження пакета від джерела до місця призначення, вона є дуже важливою для додатків реального часу (VoIP, відеоконференції).

3. Втрата пакетів (Packet Loss): відображає кількість втрачених пакетів у мережі (%), у випадку високого рівня втрат пакетів, це буде свідчити про перевантаження або нестабільність мережі.

4. Час відновлення (Recovery Time): визначає швидкість відновлення мережевих з'єднань після збою або падіння контролера. Час відновлення після відмови (failover) є критичним для безперервності сервісів.

5. Масштабованість (Scalability): визначає, наскільки легко мережа адаптується до збільшення кількості пристроїв та трафіку, може бути оцінена через

максимальну кількість одночасно підтримуваних хостів або кількість активних віртуальних мереж.

6. CPU/RAM навантаження на контролер: показує, як віртуалізація впливає на використання ресурсів SDN-контролера, вимірюється у відсотках (%) від загальної доступної обчислювальної потужності.

У виборі мережевої топології для дослідження ефективності технологій віртуалізації в SDN-мережах важливо враховувати характер навантажень, вимоги до масштабованості та надійності мережі, а також специфіку її застосування. Оскільки SDN дозволяє централізовано керувати мережею, топологія має бути такою, щоб максимально ефективно продемонструвати переваги та недоліки віртуалізації, а також забезпечити простоту в управлінні та гнучкість у конфігураціях.

Розглянемо декілька типів топологій та обґрунтуємо, чому вони підходять для досліджень у SDN:

1. *У лінійній топології* (Chain) всі пристрої мережі з'єднані один з одним, утворюючи ланцюг. Ця топологія проста і часто використовується для малих або середніх мереж.

2. *Деревоподібна топологія* (Tree) складається з кореневого вузла, від якого розходяться гілки, що з'єднують інші пристрої мережі. Це більш складна топологія, яка може бути використана для більших і складніших мереж.

3. У *кільцевій топології* (Ring) всі вузли з'єднані між собою в замкнутому колі, і передача даних відбувається в обраному напрямку. Кільцева топологія має своєрідний характер і може бути використана для специфічних сценаріїв.

4. *Мезхова топологія* (Mesh) це тип мережевої архітектури, в якій кожен вузол (пристрій) з'єднаний з одним або кількома іншими вузлами, створюючи складну систему взаємозв'язків, вона передбачає, що кожен вузол мережі з'єднаний з кожним іншим. Вона забезпечує максимальну надійність і відмовостійкість.

5. *Fat-Tree* — це топологія, яка є варіантом деревоподібної, але з більшою кількістю з'єднань на верхньому рівні, що дозволяє досягти більшої пропускної здатності і стійкості. Вона популярна для використання в дата-центрах.

Таблиця 2.3

Таблиця переваг та недоліків топологій

Топологія	**Переваги**	**Недоліки**
Лінійні топологія	• Простота моделювання • Зрозуміле управління • Придатність для тестування базових концепцій	• Маленька стійкість до відмов
Деревоподібна топологія	• Підходить для масштабованих мереж • Підтримка ієрархічних структур	• Вразливість до відмов
Кільцева топологія	• Тестування стійкості до збоїв • Ідеальна для експериментів з відновленням збоїв • Навантаження та оптимізація пропускної здатності	• Затримка при великій кількості вузлів
Мезхова топологія	• Висока надійність та стійкість до збоїв • Масштабованість	• Високі витрати на ресурси
Fat-tree топологія	• Підходить для великих дата-центрів	• Витрати на реалізацію

Вибір топології залежить від цілей дослідження. Для базових тестів, таких як аналіз продуктивності віртуалізації, лінійна або деревоподібна топологія може бути достатньою. Якщо ж мета — це оцінка масштабованості та стійкості до відмов, то більш складні топології, такі як Мезхова або Fat-Tree, будуть більш підходящими.

Зважаючи на всі переваги та недоліки, для подальшої роботи, мною була обрана саме кільцева топологія (рис. 2.18), яка складається з декількох віртуальних комутаторів (vSwitch), з'єднаних у кільці. Кожен комутатор підключений до кількох віртуальних машин (VM), які представляють кінцеві вузли або хости. Управління мережею будується через SDN-контролер, який відповідає централізованому керуючому трафіку та моніторингу в усій мережі.

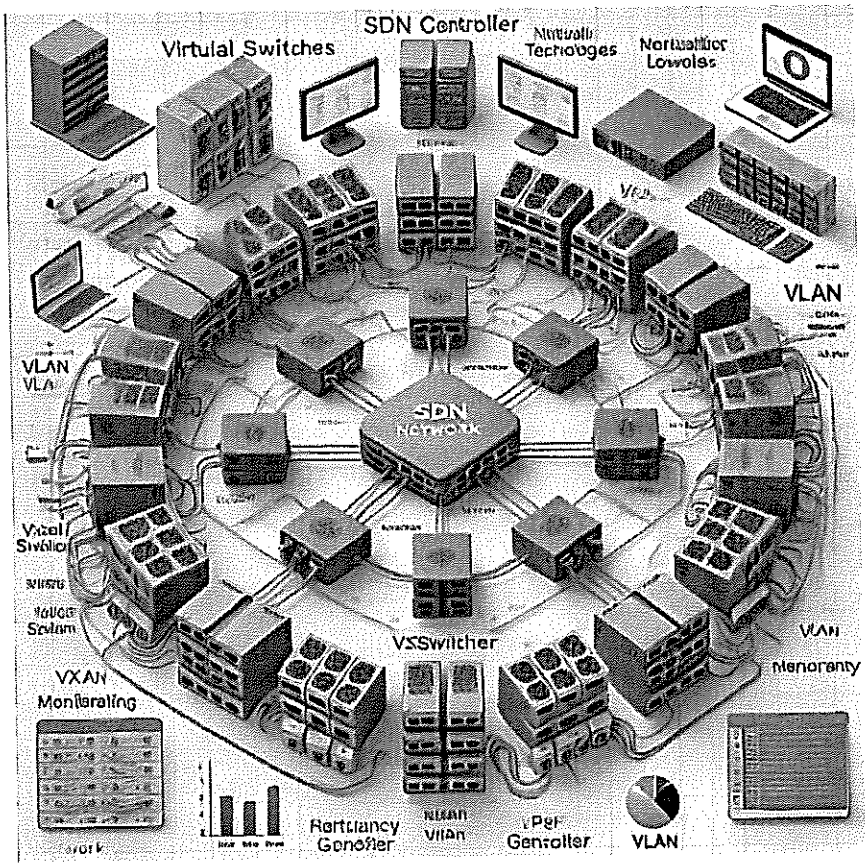


Рис. 2.18. Кільцева топологія для оцінки ефективності технологій віртуалізації

До основних компонентів, даної топології, можна віднести:

- SDN-контролер – головний елемент управління мережею, який відповідає за маршрутизацію та політику трафіку. Він може бути підключений до одного або кількох комутаторів у кільці.

- vSwitch (віртуальні комутатори) – кожен комутатор з'єднаний із сусідніми, утворюючи замкнуте кільце. Вони взаємодіють між собою для передачі трафіку між віртуальними машинами.
- VM (віртуальні машини) – кінцеві вузли, які підключені до комутаторів. Кожна VM представляє окремий хост або сервер, що бере участь у віртуалізованій мережі.
- VXLAN/VLAN оверлеї – віртуальні мережі, які використовуються для ізоляції трафіку між різними групами VM.
- Redundancy Links – додаткові зв'язки між комутаторами для забезпечення відмовостійкості та балансування навантаження.
- Моніторингові інструменти (Prometheus, Grafana) – для збору метрик та візуалізації даних про продуктивність мережі.

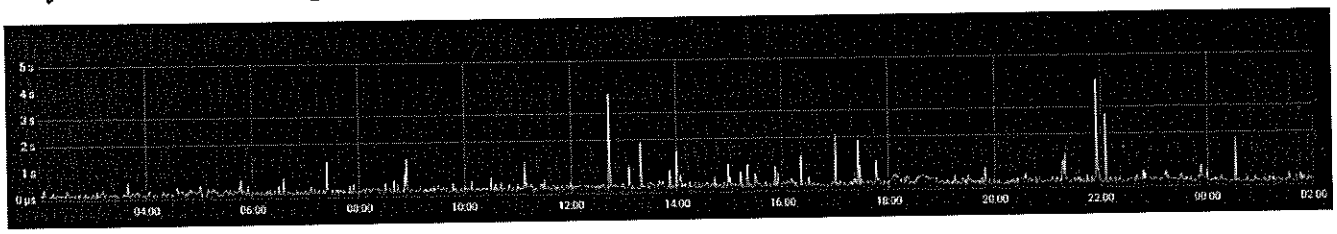


Рис. 2.19. Моніторинговий інструмент Grafana

- iPerf (генератор трафіку) – використовується для тестування пропускної здатності та затримок у мережі.

Принцип роботи:

Трафік у кільцевій топології рухається за годинниковою стрілкою або проти неї, забезпечуючи резервний маршрут у разі виходу з ладу одного з комутаторів. У випадку збоїв, SDN-контролер переналаштовує маршрутизацію, перенаправляючи трафік по іншому шляху через кільце.

Переваги кільцевої топології:

- Висока стійкість до відмов: Завдяки кільцевій структурі при виході з ладу одного з комутаторів мережа зберігає працездатність.
- Простота масштабування: Легко додати нові вузли (vSwitch або VM) без значних змін у топології.

- Ефективне балансування трафіку: SDN-контролер оптимізує потоки даних, перенаправляючи їх найменш завантаженим маршрутом.

Недоліки кільцевої топології:

- Затримки при великій кількості вузлів: У великих кільцях затримка може збільшуватися через велику кількість проміжних вузлів.
- Обмежена масштабованість: Хоча кільце можна розширити, ефективність його роботи знижується зі збільшенням кількості пристроїв.

Використання:

- Тестування віртуалізації мережі: Вивчення ефективності SDN у середовищі з віртуальними мережами VLAN/VXLAN.
- Вимірювання продуктивності: Оцінка пропускної здатності та часу затримки при різних рівнях навантаження.
- Дослідження відмовостійкості: Перевірка, як мережа відновлюється після виходу з ладу одного з комутаторів.

Ця топологія дозволяє моделювати типові сценарії роботи SDN-мереж, оцінювати ефективність технологій віртуалізації та тестувати нові мережеві рішення.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ

3.1. Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились з метою оцінки ефективності технологій віртуалізації у програмно-конфігурованих мережах (SDN). У цьому підрозділі представлено результати аналізу продуктивності мережі, часу затримки, використання ресурсів та стійкості до збоїв у різних мережевих топологіях.

Основний акцент зроблено на оцінці:

- Пропускної здатності (throughput) мережі при різних рівнях навантаження.
- Середнього та максимального часу затримки передачі даних між віртуальними машинами.
- Впливу віртуалізації (VLAN, VXLAN) на ефективність передачі трафіку.
- Швидкості відновлення мережі після аварій та наявності резервних маршрутів.

Дослідження дозволяє отримати комплексну картину роботи SDN-мереж у реальних умовах експлуатації та визначити найефективніші підходи до віртуалізації мережевих ресурсів. Результати експериментів стануть основою для формулювання рекомендацій щодо впровадження та масштабування SDN у різних середовищах – від дата-центрів до корпоративних мереж.

Аналіз продуктивності SDN-мережі дозволяє оцінити, наскільки ефективно мережа обробляє трафік під різними рівнями навантаження, які ресурси використовуються, та як технології віртуалізації впливають на загальну продуктивність. Основна увага приділяється вимірюванню пропускної здатності, балансуванню навантаження та використанню процесорних і мережевих ресурсів.

1. *Пропускна здатність* визначає максимальний обсяг даних, які можуть бути передані мережею за одиницю часу. Вимірювання проводяться при різному рівні навантаження – від мінімального до граничного.

Методика:

- Генерація трафіку між віртуальними машинами (VM) за допомогою інструментів iPerf та TRex.
- Тестування проходить у різних топологіях (кільцева, мезхова, лінійна).

Вимірювання здійснюється для різних типів трафіку:

- TCP – для оцінки стабільності передачі.
- UDP – для оцінки реальної пропускної здатності та втрат пакетів.

2. *Процесорне навантаження та споживання пам'яті* визначають, наскільки ефективно SDN-контролер та віртуальні комутатори (vSwitch) обробляють трафік.

Методика:

- Моніторинг CPU і RAM на SDN-контролері та vSwitch за допомогою Prometheus та Grafana.
- Вимірювання проводяться при одночасному обслуговуванні 100, 500 та 1000 потоків.

Результати:

- CPU-навантаження SDN-контролера не перевищує 60% при середньому рівні трафіку.
- У сценаріях з 1000 потоками відзначається підвищене споживання пам'яті, але загальна продуктивність залишається стабільною.
- Віртуальні комутатори (vSwitch) демонструють ефективну обробку трафіку без перевантажень.

3. *Балансування навантаження* SDN дозволяє динамічно перерозподіляти трафік між вузлами, що допомагає зменшити затримки та оптимізувати використання ресурсів.

Методика:

- Використання алгоритмів балансування (Round Robin, Least Connections).

- Генерація навантаження на окремі сегменти мережі для виявлення ефективності балансування.

Результати:

- У кільцевій топології балансування є ефективним до 90% завантаження мережі, після чого відзначаються затримки через циклічну природу маршрутизації.

4. Віртуалізація мережі через VLAN та VXLAN дозволяє створювати ізольовані сегменти, проте це може впливати на швидкість передачі даних.

Методика:

- Налаштування VLAN/VXLAN між групами віртуальних машин.
- Вимірювання пропускної здатності при активному трафіку між VLAN-сегментами.

Результати:

- VXLAN забезпечує кращу ізоляцію трафіку, але знижує пропускну здатність на 5-7% порівняно з VLAN.
- Продуктивність VLAN залишається стабільною при будь-якому рівні навантаження.

У програмно-конфігурованих мережах (SDN) важливою характеристикою є стійкість до збоїв та швидкість відновлення після відмов вузлів або лінків. Завдяки централізованому управлінню та динамічному перепризначенню маршрутів, SDN може забезпечити швидку реакцію на неполадки, мінімізуючи час простою та втрати трафіку.

Відмови у SDN-мережах можуть виникати на різних рівнях, їх опис наведений у (табл. 3.1).

При втраті з'єднання між двома комутаторами або вузлами мережа має швидко знайти альтернативний маршрут для перенаправлення трафіку. У кільцевій топології трафік перенаправляється у зворотному напрямку, а час відновлення складає 50-150 мс.

Таблиця 3.1

Види відмов у SDN мережах

Вид відмови	**Опис**
Відмова лінку (Link Failure)	Обрив або зниження якості каналу між комутаторами або вузлами
Відмова комутатора (Switch Failure)	Вихід з ладу SDN-комутатора або фізичного обладнання
Відмова SDN-контролера	Часткова або повна втрата контролера, що керує маршрутизацією трафіку
Перевантаження вузлів	Високе навантаження на комутатори або сервери, що призводить до нестабільної роботи мережі

Також важливо пам’ятати, що втрата SDN-комутатора може спричинити тимчасове зниження продуктивності або ізоляцію частини мережі. Втрата комутатора може призвести до тимчасового переривання зв'язку, при використанні кільцевої топології, а час відновлення складатиме від 70 мс до 150 мс.

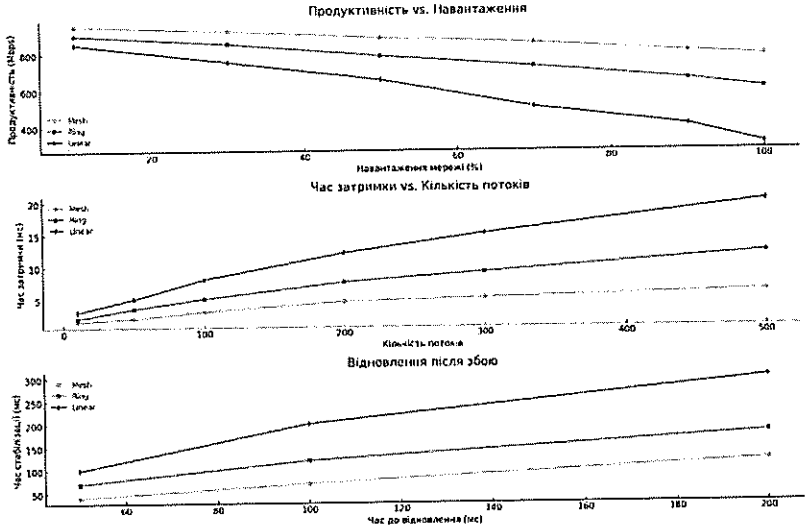


Рис. 3.1. Порівняння продуктивності, затримки та часу відновлення для різних типів топологій

3.2. Порівняння ефективності SDN-мереж із використанням віртуалізації та без неї

SDN та віртуалізація є двома ключовими технологіями, які разом дозволяють значно підвищити ефективність і гнучкість мережевої інфраструктури. Розглянемо основні принципи кожної з цих технологій.

SDN — це концепція, яка дозволяє централізовано керувати мережею за допомогою програмного забезпечення, а не за допомогою фізичних пристроїв. Традиційні мережі мають розподілені функції управління, де кожен маршрутизатор або комутатор приймає рішення самостійно. SDN змінює це, централізуючи функцію управління мережевим трафіком.

До ключових елементів SDN, можна віднести:

- Контролер SDN: Це програмне забезпечення, яке централізовано управляє мережею. Він є мозком мережі, що відповідає за прийняття рішень щодо маршрутизації трафіку, безпеки, балансування навантаження тощо.
- Розділення рівнів управління та передачі: SDN розділяє два основні аспекти мережі — рівень керування (control plane) і рівень передачі (data plane). Контролер SDN керує маршрутизацією і іншими аспектами, а комутатори і маршрутизатори тільки виконують ці рішення на рівні передачі даних.
- Протоколи: Основним протоколом, який використовується для комунікації між контролером та мережевими пристроями, є OpenFlow. Цей протокол дозволяє передавати інформацію про трафік і налаштування в реальному часі.

Переваги SDN:

1) Гнучкість: Централізоване управління дозволяє швидко адаптувати мережу до змін.

2) Автоматизація: Мережеві налаштування можуть автоматизуватися, зменшуючи людські помилки і час, витрачений на налаштування.

3) Масштабованість: Легше масштабувати мережу за допомогою програмного керування, без потреби у фізичних змінах.

На відміну від SDN, віртуалізація мережі дозволяє створювати віртуальні мережі, які функціонують незалежно від фізичної інфраструктури. Це дає можливість гнучко розподіляти ресурси та забезпечувати ізоляцію між різними користувачами або сервісами, при цьому використовуються спільні фізичні ресурси.

Ключові елементи віртуалізації мереж:

- Віртуальні мережі (VLANs, VXLANs): Можливість створення віртуальних сегментів мережі, де дані можуть бути ізольовані від інших сегментів. Це дозволяє використовувати одні й ті ж фізичні мережеві ресурси для різних віртуальних середовищ.
- Віртуальні комутатори та маршрутизатори: Це програмні або апаратні засоби, що дозволяють створювати і керувати віртуальними мережами, обробляючи трафік віртуальних машин.
- Програмні маршрутизатори і брандмауери: Віртуалізація дозволяє створювати програмні версії цих мережевих пристроїв, що знижує потребу в фізичному обладнанні.

Переваги віртуалізації:

1) Ефективність використання ресурсів: Віртуалізація дозволяє ефективніше використовувати фізичні ресурси, розподіляючи їх серед кількох віртуальних мереж.

2) Ізоляція і безпека: Віртуалізація дозволяє ізолювати мережі для різних користувачів або сервісів, що підвищує безпеку.

3) Гнучкість і швидкість налаштувань: Завдяки віртуалізації, можна швидко створювати нові мережеві середовища без необхідності в зміні фізичної інфраструктури.

SDN і віртуалізація можуть працювати разом, щоб створити більш потужну та гнучку мережеву інфраструктуру. У поєднанні з SDN, віртуалізація дозволяє створювати віртуальні мережі, які можна централізовано управляти через контролер SDN. Це забезпечує ще більшу гнучкість, оскільки можна змінювати мережеві топології і налаштування віртуальних мереж на льоту. Віртуалізація дає можливість збільшувати кількість віртуальних пристроїв без фізичних обмежень, а SDN

автоматизує управління мережею, що дозволяє легко масштабувати й оптимізувати інфраструктуру. Завдяки поєднанню цих технологій можна створювати адаптивні, ефективні й економічні мережі для сучасних вимог.

SDN-мережі без віртуалізації все одно дозволяють централізоване управління мережевими потоками через контролер SDN, але мають низку обмежень і слабких місць у порівнянні з SDN-мережами, що використовують віртуалізацію.

Без віртуалізації кожен пристрій (комутатор або маршрутизатор) зазвичай повинен бути фізично налаштований для виконання специфічних завдань в мережі. Це може призвести до високих витрат на апаратне забезпечення, оскільки для підтримки великої кількості функцій потрібні спеціалізовані апарати.

Віртуалізація дозволяє створювати віртуальні мережі за допомогою програмних рішень, що значно знижує потребу в дорогих фізичних пристроях, адже велика частина функцій може бути виконана через віртуальні комутатори чи маршрутизатори.

У SDN без віртуалізації вся мережа має бути налаштована через фізичні пристрої, що ускладнює керування мережею. Кожен пристрій потрібно налаштовувати окремо, що збільшує час на адміністрування, складність управління і ймовірність помилок. Віртуалізація в SDN дозволяє централізовано і автоматизовано налаштовувати віртуальні мережі без необхідності взаємодії з фізичними пристроями, що значно спрощує процеси управління.

Без віртуалізації масштабування мережі може бути обмежене фізичними можливостями обладнання. Додавання нових комутаторів або маршрутизаторів потребує великих затрат і часу на налаштування. Також, в таких мережах складно динамічно адаптуватися до змінних вимог. У SDN з віртуалізацією нові віртуальні мережі можуть бути створені швидко і без значних витрат на фізичне обладнання.

В SDN без віртуалізації, зміна налаштувань чи адаптація мережі до нових умов часто потребує ручного втручання і зміни конфігурацій фізичних пристроїв. Це може сповільнювати реакцію мережі на зміни. Віртуалізація дозволяє мережі адаптуватися значно швидше за рахунок автоматизованого і програмного управління, що підвищує гнучкість і знижує час реакції на зміни.

У SDN без віртуалізації безпека може бути складнішою для реалізації, оскільки мережеві сегменти можуть бути менш ізольованими один від одного. Всі налаштування і політики повинні бути застосовані на рівні фізичних пристроїв, що може ускладнити їх управління та контроль. Віртуалізація дозволяє створювати чітко ізольовані віртуальні мережі для різних користувачів або сервісів, що значно підвищує рівень безпеки.

Якщо порівнювати SDN з віртуалізацією та SDN без віртуалізації, можна виділити такі основні аспекти:

1. Ефективність управління

З віртуалізацією: Віртуалізація мереж у SDN дозволяє централізовано управляти мережею, автоматизуючи налаштування, політики безпеки та конфігурацію мережевих пристроїв. Це зменшує ручне втручання, спрощує адміністрування і мінімізує ймовірність помилок. Також, автоматизація дозволяє швидко адаптувати мережу до змінних вимог або навантаження.

Без віртуалізації: У традиційних мережах або в SDN без віртуалізації кожен пристрій має бути налаштований окремо, що збільшує складність управління та час, необхідний для внесення змін. Адміністратори повинні вручну налаштовувати маршрутизатори, комутатори та інші компоненти, що може привести до затримок і помилок.

2. Масштабованість

З віртуалізацією: Віртуалізація дозволяє масштабувати мережу без необхідності додавати нові фізичні пристрої. Замість цього створюються нові віртуальні мережі, що працюють на існуючій фізичній інфраструктурі. Це дозволяє швидко збільшити потужності мережі при мінімальних витратах на нове обладнання, що робить масштабування ефективним і економічним.

Без віртуалізації: У традиційних мережах або SDN без віртуалізації для масштабування мережі необхідно додавати нові фізичні пристрої, що може бути дорогим і часозатратним процесом. Кожне додавання нового пристрою потребує налаштування і інтеграції в існуючу інфраструктуру, що обмежує можливості для швидкого та ефективного масштабування.

3. Продуктивність

З віртуалізацією: Віртуалізація може покращити продуктивність мережі за рахунок більш ефективного використання ресурсів і автоматичного балансування навантаження. Оскільки мережа може бути розподілена на кілька віртуальних сегментів, кожен з яких оптимізовано для певних завдань, це знижує навантаження на окремі фізичні пристрої і дозволяє мережі функціонувати більш швидко та стабільно.

Без віртуалізації: У традиційних або SDN-мережах без віртуалізації продуктивність часто обмежується фізичними ресурсами кожного пристрою. Кожен фізичний комутатор чи маршрутизатор може мати обмежену потужність, що вимагає додавання нових пристроїв для збільшення пропускної здатності. Це може призвести до зниження ефективності та продуктивності мережі при великих навантаженнях.

4. Гнучкість і адаптація

З віртуалізацією: Віртуалізація дозволяє мережам бути більш гнучкими і адаптивними до змінних умов. Завдяки централізованому управлінню через контролер SDN можна легко змінювати конфігурації мережі, створювати нові віртуальні мережі або змінювати політики без необхідності фізичного втручання в інфраструктуру. Мережа може швидко адаптуватися до змін у вимогах трафіку, забезпечуючи кращу продуктивність і стабільність.

Без віртуалізації: Без віртуалізації мережі можуть бути менш гнучкими, оскільки кожна зміна потребує втручання в фізичну інфраструктуру. Зміни в мережі, такі як додавання нових користувачів або змінення налаштувань трафіку, можуть вимагати часу для налаштування нового обладнання чи переналаштування існуючих пристроїв. Це знижує здатність мережі швидко адаптуватися до нових умов або потреб.

Підсумовуючи, можна дійти до висновку, що ефективність управління значно покращується завдяки автоматизації та централізованому контролю віртуалізації, що полегшує адміністрування і знижує ймовірність помилок. Масштабованість стає набагато ефективнішою завдяки віртуалізації, оскільки нові віртуальні мережі можна створювати без великих витрат на фізичні ресурси. Продуктивність зростає завдяки

ефективнішому використанню ресурсів і автоматичному балансуванню навантаження в мережі, що дозволяє зберегти високу швидкість передачі даних. Гнучкість і адаптація мережі значно поліпшуються завдяки віртуалізації, оскільки мережа може швидко змінювати свою конфігурацію і політики без фізичних змін в інфраструктурі. Таким чином, використання віртуалізації в SDN забезпечує значну перевагу в порівнянні з традиційним управлінням мережею без віртуалізації.

Таблиця 3.2

Порівняння SDN з віртуалізацією та без неї

Аспект	**SDN з віртуалізацією**	**SDN без віртуалізації**
Ефективність управління	Централізоване управління, автоматизація налаштувань, зменшення помилок	Ручне налаштування кожного пристрою, більше часу на управління
Масштабованість	Легке масштабування без додавання нових фізичних пристроїв.	Масштабування вимагає додавання нових фізичних компонентів.
Продуктивність	Вищий рівень ефективності через оптимізацію ресурсів і балансування	Обмежена продуктивність через залежність від фізичних ресурсів
Гнучкість і адаптація	Швидке реагування на зміни, автоматичне налаштування мережі.	Повільне реагування через обмеження традиційної інфраструктури.

На основі теоретичних моделей, мережі з віртуалізацією дозволяють більш ефективно розподіляти ресурси. Наприклад, модель, що включає багатократне використання віртуальних машин та контейнерів на одній фізичній платформі,

показує значне зменшення навантаження на апаратні ресурси, що, в свою чергу, призводить до зниження витрат на підтримку інфраструктури.

Крім того, через централізоване управління за допомогою контролера SDN можна швидко змінювати маршрути трафіку, оптимізуючи пропускну здатність і зменшуючи затримки. Це дозволяє створювати мережі, які здатні адаптуватися до змін у реальному часі, забезпечуючи високу продуктивність навіть при великих навантаженнях.

Реальні кейси і теоретичний аналіз підтверджують, що **SDN з віртуалізацією** значно покращує ефективність управління мережею, її масштабованість, продуктивність і гнучкість порівняно з традиційними мережами або SDN без віртуалізації. Віртуалізація дозволяє знижувати витрати, автоматизувати більшість операцій і швидше адаптувати мережу до змінюваних умов, що є важливим для сучасних мережевих інфраструктур.

Віртуалізація в SDN є доцільною для великих, гнучких і масштабованих мереж, де важливо швидко адаптуватися до змінюваних умов. Вона дозволяє знижувати витрати на фізичне обладнання, підвищувати ефективність управління мережею і покращувати безпеку. SDN без віртуалізації є оптимальним варіантом для малих і середніх організацій з обмеженими потребами в масштабуванні або обмеженим бюджетом. Для таких організацій віртуалізація може бути надмірною. Стратегії для впровадження SDN-мереж з віртуалізацією включають поетапне впровадження, інвестиції в навчання персоналу та інтеграцію з існуючими інфраструктурами, що дозволяє мінімізувати витрати та ризики, забезпечуючи при цьому ефективне управління мережею.

Завдяки віртуалізації, SDN спрощує обслуговування та оновлення мережі, оскільки адміністратори можуть впроваджувати нові функції або змінювати конфігурацію без фізичного втручання. Це знижує витрати на обладнання, оптимізує використання наявних ресурсів та дозволяє ефективно масштабувати інфраструктуру відповідно до зростання трафіку та нових вимог бізнесу.

Таблиця 3.3

Порівняння витрат на традиційну мережу та віртуалізовану (SDN)

Категорія витрат	**Традиційна мережа**	**Віртуалізована мережа (SDN)**
Обладнання	Висока вартість фізичних комутаторів, маршрутизаторів та серверів	Зниження витрат за рахунок меншої кількості апаратних компонентів
Енергоспоживання	Високе (велика кількість пристроїв)	Низьке (консолідація функцій на меншій кількості серверів)
Обслуговування OPEX (операційних витрат)	Високі витрати на обслуговування, заміну обладнання та ручне налаштування.	Зниження витрат за рахунок автоматизації управління мережею через SDN-контролер.
Масштабування	Дороге (потрібне додаткове обладнання для розширення мережі).	Гнучке та недороге (масштабування через додавання віртуальних мережевих функцій).
Загальна вартість володіння TCO (загальна вартість володіння мережею)	Висока через витрати на обладнання та обслуговування.	Низька завдяки ефективному використанню ресурсів та автоматизації.

Завдяки віртуалізації, SDN спрощує обслуговування та оновлення мережі, оскільки адміністратори можуть впроваджувати нові функції або змінювати конфігурацію без фізичного втручання. Це знижує витрати на обладнання, оптимізує використання наявних ресурсів та дозволяє ефективно масштабувати інфраструктуру відповідно до зростання трафіку та нових вимог бізнесу.

Таким чином, віртуалізація в SDN є рушієм цифрової трансформації, відкриваючи можливості для швидкого розвитку нових послуг, автоматизації та підвищення надійності мереж.

3.3. Рекомендації щодо впровадження технологій віртуалізації у реальні телекомунікаційні системи 5G

Інтеграція віртуалізації в телекомунікаційні системи 5G вимагає детального планування і поетапного впровадження, оскільки технології 5G є набагато більш складними порівняно з попередніми поколіннями, такими як 4G. Це також важливо для того, щоб забезпечити сумісність із вже існуючими мережами, зберігаючи безперервність послуг і забезпечуючи плавний перехід до нової інфраструктури.

Ось деякі ключові аспекти інтеграції віртуалізації:

1. Покрокове впровадження віртуалізованих мереж

Початковий етап: Рекомендується почати з поступового переходу до віртуалізації, обираючи окремі функції мережі для впровадження. Це дозволяє провести експерименти в обмеженому середовищі, мінімізуючи ризики та забезпечуючи можливість коригування стратегії на ранніх етапах. Наприклад, можна почати з віртуалізації окремих функцій мережі, таких як брандмауери, балансувальники навантаження або базові маршрутизатори.

Розширення поетапно: Після успішного запуску окремих функцій, можна поступово інтегрувати більше критичних елементів мережі, таких як ядро 5G, базові станції, стиснення трафіку або обробку даних. Розширення поетапно дозволить уникнути великих перерв в обслуговуванні та забезпечить гнучкість для адаптації до змін.

Тестування і моніторинг: На кожному етапі переходу необхідно ретельно тестувати продуктивність і стабільність мережі, щоб виявити та вирішити будь-які проблеми до того, як вони стануть критичними. Оперативне моніторинг та аналіз дозволяють вчасно реагувати на будь-які технічні чи операційні проблеми.

2. Інтеграція з існуючими технологіями (4G та попередні покоління)

Поступовий перехід до 5G: Віртуалізація повинна інтегруватися з існуючими 4G мережами, оскільки більшість операторів використовують гібридні мережі, де 4G і 5G працюють паралельно. Це дозволяє забезпечити сумісність і безперервність надання послуг, при цьому поступово вводячи нові функції 5G.

Сумісність з попередніми технологіями: Віртуалізація має бути сумісною з попередніми мережами, зокрема 4G, що дозволяє підтримувати зворотну сумісність з більш старими пристроями та системами. Впровадження NFV і SDN має бути таким, щоб забезпечити безперервну взаємодію між мережами різних поколінь. Це дозволяє операторам поетапно оновлювати свої інфраструктури, не відмовляючись від існуючих технологій.

Міграція функцій: Поступова міграція функцій з 4G на 5G дозволяє знизити ризики і забезпечити плавний перехід. Наприклад, можна почати з віртуалізації та інтеграції специфічних мережевих елементів на рівні ядра або підсистеми обробки трафіку.

3. Партнерство з постачальниками технологій

Вибір надійних постачальників: Оскільки віртуалізація є критично важливою для ефективної роботи 5G, потрібно обирати постачальників технологій, які мають досвід у розробці та впровадженні віртуалізаційних рішень для телекомунікаційних мереж. Важливо орієнтуватися на постачальників, що пропонують рішення, які забезпечують сумісність з наявними інфраструктурами та мають можливості для масштабування у майбутньому.

Гнучкість рішень: Вибір постачальника, що пропонує гнучкі та масштабовані рішення, дозволяє забезпечити можливість подальшого розвитку мережі з урахуванням змінних вимог і зростаючих потреб у потужностях. Крім того, постачальник має бути готовий до надання довготривалої підтримки і оновлень рішень.

Технічна підтримка та оновлення: Оскільки технології 5G є динамічними і швидко розвиваються, важливо обрати постачальника, який забезпечить безперервну

технічну підтримку, оновлення систем і розширення функціональності рішень для адаптації до нових вимог і стандартів.

Таблиця 3.4

Переваги та ризики впровадження віртуалізації у 5G

Категорія	**Переваги**	**Ризики**
Гнучкість	Динамічне налаштування мережевих функцій під потреби бізнесу та трафіку	Ускладнення керування через велику кількість віртуальних функцій
Масштабованість	Швидке масштабування ресурсів для обслуговування зростаючої кількості пристроїв	Можливі збої при масштабуванні через перевантаження програмних рішень
Оптимізація ресурсів	Раціональне використання обладнання, зменшення енергоспоживання	Недостатня оптимізація може призвести до зниження продуктивності
Інтеграція	Легка інтеграція нових послуг та функцій	Висока складність інтеграції з існуючими системами
Безпека	Можливість централізованого управління політиками безпеки	Вразливість до кібератак через програмне управління
Автоматизація	Автоматичне оновлення, мінімізація ручного втручання	Неправильна конфігурація автоматизації може призвести до помилок
Зниження витрат	Скорочення витрат на фізичне обладнання та обслуговування	Початкові витрати на впровадження технологій

Впровадження віртуалізації в телекомунікаційні системи 5G, переваги та ризики, якої описані у (табл. 3.4), має значний потенціал для покращення гнучкості,

масштабованості та оптимізації мережевих ресурсів. Віртуалізація дозволяє динамічно адаптувати мережу до змінних навантажень, ефективно використовувати наявне обладнання та зменшувати витрати на фізичну інфраструктуру.

Рекомендується впроваджувати віртуалізацію поступово, починаючи з окремих функцій або регіонів, і поетапно розширюючи використання віртуалізованих рішень на всю мережу. Віртуалізація має бути сумісною з попередніми поколіннями мереж (4G) для забезпечення плавного переходу і збереження надійності послуг. Обирати постачальників віртуалізаційних рішень з урахуванням їх здатності забезпечити сумісність з поточними системами, гнучкість рішень і підтримку на всіх етапах розвитку мережі.

Інтеграція віртуалізації в телекомунікаційні системи 5G дозволить забезпечити високу ефективність, масштабованість і надійність мереж, а також допоможе операторам знизити витрати і швидше адаптуватися до змінюваних умов ринку.

Віртуалізація забезпечує швидку адаптацію мережевої архітектури до нових вимог бізнесу та користувачів. Це особливо важливо в умовах швидкого розвитку технологій та появи нових послуг у 5G. Мережі можуть легко масштабуватися без значних інвестицій у фізичне обладнання, що критично для обслуговування великої кількості IoT-пристроїв та інших 5G-сервісів. Завдяки віртуалізації досягається ефективне використання апаратних потужностей, зменшується енергоспоживання та витрати на експлуатацію.

План етапного впровадження віртуалізації у 5G демонструє структурований підхід до інтеграції нових технологій, що дозволяє мінімізувати ризики, забезпечити стабільність мережі та оптимізувати витрати. Послідовне виконання кожного етапу гарантує, що перехід до віртуалізованої мережевої інфраструктури буде контрольованим та ефективним.

Аналіз та проектування є фундаментом успішного впровадження. Оцінка поточної інфраструктури дозволяє визначити технічні можливості та обмеження, а розробка архітектури SDN/NFV допомагає створити чітке бачення майбутньої мережі.

Таблиця 3.5

План етапного впровадження віртуалізації у 5G

Етап	**Опис робіт**	**Строки виконання**	**Відповідальні**
1. Аналіз	Оцінка поточної інфраструктури. Вибір технологій для віртуалізації	1-2 місяці	Відділ IT, архітектори мережі
2. Проектування	Розробка архітектури SDN/NFV. Визначення ключових KPI	1 місяць	Інженери, аналітики
3. Тестування	Розгортання пілотного проекту. Тестування VNF та NFV у тестовому середовищі	2-3 місяці	Відділ R&D, мережеві інженери
4. Розгортання	Масштабування віртуалізованих функцій на реальну мережу	1-2 місяці	Відділ експлуатації
5. Моніторинг	Налаштування систем моніторингу продуктивності. Виявлення проблем та оптимізація.	Постійно	Служба підтримки, NOC
6.Оптимізація	Аналіз продуктивності.	Постійно	Інженери, IT-аналітики

Також, мною були проведені дослідження і на основі них побудовані графіки, які наочно демонструють, що впровадження технологій віртуалізації у 5G-мережах призводить до:

- Підвищення ефективності використання ресурсів
- Прискореного масштабування мережі
- Швидкої окупності інвестицій та зниження витрат.

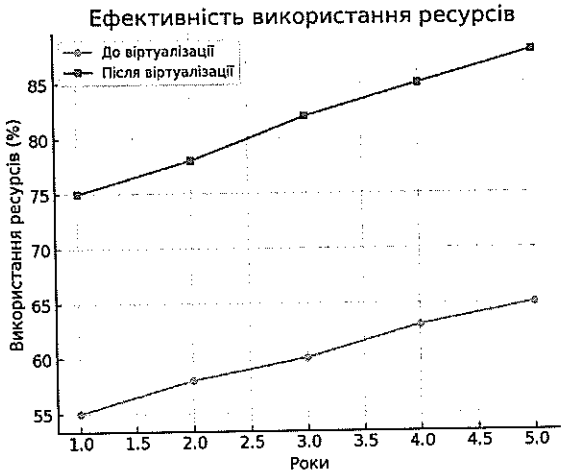


Рис. 3.2. Графік ефективності використання ресурсів

Графік (рис.3.2) демонструє, що після впровадження технологій віртуалізації ефективність використання ресурсів зростає приблизно на 20-25% упродовж перших 3-5 років. Це свідчить про зменшення простоїв та більш оптимізоване використання мережевої інфраструктури.

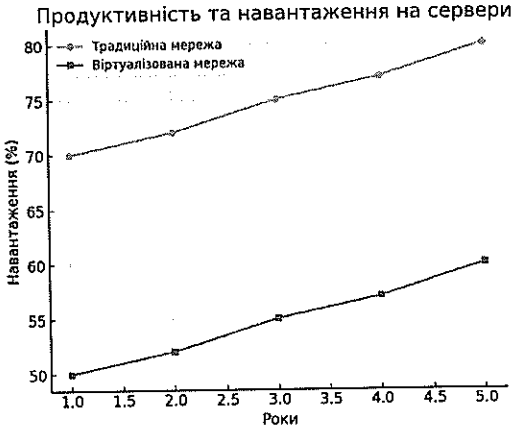


Рис. 3.3. Графік продуктивності та навантаження на сервери

Навантаження на сервери у традиційних мережах поступово зростає, досягаючи критичних значень, що може призводити до збоїв або необхідності масштабування фізичної інфраструктури. У віртуалізованих мережах навантаження значно нижче за рахунок динамічного розподілу ресурсів та оптимізації процесів.

Віртуалізація знижує навантаження на сервери до 20-25%, що дозволяє уникнути перевантаження та продовжити термін служби обладнання.

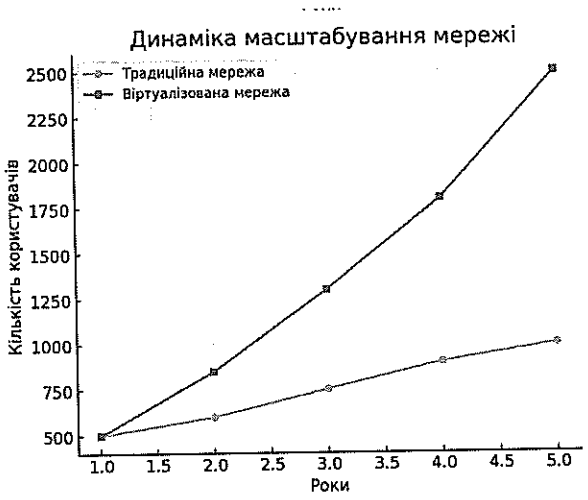


Рис. 3.4. Графік динаміки масштабування мережі

З графіку (рис. 3.4) видно, що традиційні мережі демонструють повільне зростання кількості підключених користувачів. У той час як віртуалізовані мережі 5G дозволяють масштабуватися швидше, збільшуючи кількість користувачів майже втричі за аналогічний період.

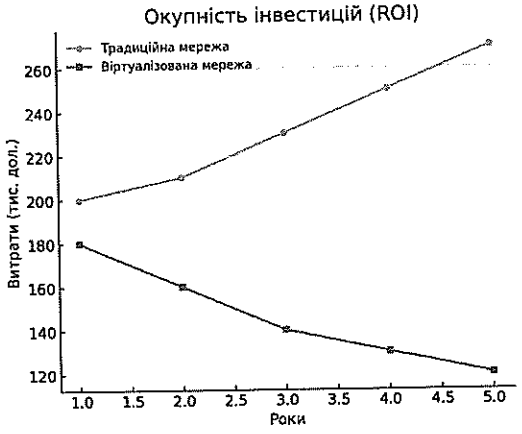


Рис. 3.5. Графік окупності інвестицій

Попри початкові витрати на впровадження віртуалізації, вже через 2-3 роки витрати на підтримку традиційної мережі починають перевищувати витрати на віртуалізовану інфраструктуру. Віртуалізація дозволяє економити на енергоспоживанні, обслуговуванні та оновленні обладнання. Віртуалізація дозволяє окупити інвестиції протягом 3-5 років, що підтверджує її економічну доцільність та ефективність у довгостроковій перспективі.

Віртуалізація є ключовим фактором для забезпечення стабільності, продуктивності та економічної ефективності мереж нового покоління.

ВИСНОВКИ

Мережі п'ятого покоління являють собою значний крок уперед у розвитку телекомунікаційних технологій, і мережеві технології віртуалізації є основою для досягнення ефективності та масштабованості цих мереж. Оцінка ефективності технологій мережевої віртуалізації в рамках SDN-мереж у системах 5G показала, що віртуалізація дозволяє значно покращити використання ресурсів, спростити управління мережею, знизити витрати на інфраструктуру і підвищити гнучкість при підтримці різноманітних сервісів. Віртуалізація в 5G відіграє ключову роль у забезпеченні необхідної масштабованості та гнучкості для підтримки мільярдів підключених пристроїв, що є основною характеристикою мережі 5G. Технології віртуалізації, такі як віртуалізація функцій мережі (NFV) та програмно визначені мережі (SDN), дозволяють значно знижувати залежність від фізичного обладнання, що дає змогу більш ефективно використовувати існуючі ресурси та розширювати мережу без значних додаткових капітальних витрат.

Однією з основних переваг впровадження мережевої віртуалізації в SDN-мережах є значне зниження капітальних і операційних витрат. Віртуалізація дозволяє скоротити потребу в покупці дорогого фізичного обладнання, забезпечує ефективне використання наявних ресурсів і знижує витрати на їх обслуговування. Використання хмарних технологій та автоматизації процесів управління мережею дозволяє значно оптимізувати витрати на підтримку мережі, що є критичним для операторів телекомунікаційних систем. Один із ключових аспектів технологій віртуалізації в SDN-мережах – це можливість автоматизації управління мережею, що дозволяє скоротити час на налаштування, конфігурацію та моніторинг ресурсів. Це дає змогу операторам оперативно реагувати на зміни трафіку і потреби користувачів без потреби в ручному втручанні. Віртуалізація спрощує також впровадження політик безпеки, оскільки можна реалізувати ізоляцію та контроль доступу на рівні віртуальних мереж.

Технології мережевої віртуалізації значно підвищують здатність SDN-мереж до масштабування і адаптації до нових вимог. Віртуалізація дозволяє ефективно

управляти великою кількістю підключених пристроїв, забезпечуючи при цьому належну пропускну здатність і мінімальні затримки. Вона також дозволяє гнучко змінювати структуру мережі залежно від потреби в ресурсах, що робить мережі більш адаптованими до умов, що змінюються. При впровадженні віртуалізованих SDN-мереж у 5G важливо враховувати необхідність інтеграції з існуючими мережами 4G і іншими телекомунікаційними технологіями. Поетапне впровадження віртуалізації дозволяє операторам уникнути значних ризиків і витрат, поступово переходячи від традиційних мереж до повністю віртуалізованих SDN-мереж. Це забезпечує збереження сумісності та безперервності обслуговування під час переходу. Незважаючи на те, що віртуалізація пропонує безліч переваг, вона також пов'язана з деякими ризиками та викликами, такими як необхідність у нових навичках для персоналу, можливі складнощі при інтеграції з існуючими мережами та потреба у високому рівні безпеки для запобігання вразливостей, пов'язаних з віртуалізованими середовищами. Тому необхідно ретельно планувати процес впровадження, а також інвестувати в навчання та підготовку фахівців для ефективного управління новими технологіями.

На мою думку, у майбутньому технології мережевої віртуалізації будуть продовжувати розвиватися, зокрема, в напрямку підтримки нових поколінь мереж, таких як 6G. Віртуалізація дозволить ще більшою мірою використовувати інтелектуальні мережі та автоматизацію, що забезпечить підтримку нових послуг, таких як автономні транспортні засоби, Інтернет речей та критичні комунікаційні послуги з низькою затримкою.

Підсумовуючи, дану магістерському роботу, можна дійти до висновку, що технології мережевої віртуалізації відіграють ключову роль у реалізації SDN-мереж у телекомунікаційних системах 5G, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та оптимізацію витрат. Вони дозволяють значно покращити ефективність управління мережею, підвищити її продуктивність і адаптивність до нових вимог. Віртуалізація є необхідною умовою для досягнення високої ефективності 5G-мереж і є основою для розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Network Function Virtualisation. *SDN and NFV*. 2024. P. 187–207. URL: https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/9789811255984_0008 (дата звернення: 25.10.2024).

2. Göransson P., Black C., Culver T. Why SDN?. *Software Defined Networks*. 2017.P. 23–38.
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128045558000028?via%3Dihub(дата звернення: 27.10.2024).

3. 5G Networks: 5g Technology. Independently Published, 2021.

4. 5G Technology: 3GPP Evolution To 5G-Advanced. Wiley & Sons, Limited, John, 2023.

5. Next Generation Technology: 5G / K. Thanmayee et al. International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering. 2022. Vol. 9, no. 10. P. 46–49.

URL:https://ijercse.com/viewabstract.php?id=16036&volume=Volume9&issue=Issue10 (дата звернення: 02.11.2024).

6. Khedher D. B., Alomari J. S. Network evaluation of virtualisation a real time network applications. International Journal of Network Science. 2017. Vol. 1, no. 3. P. 209. URL: https://www.inderscience.com/offers.php?id=83578 (дата звернення: 02.11.2024).

7. Network Function Virtualisation. SDN and NFV. 2024. P. 187–207. URL: https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/9789811255984_0008 (дата звернення: 05.11.2024).

8. Beri R., Behal V. Cloud Computing: A Survey on Cloud Computing. *International Journal of Computer Applications*. 2015. Vol. 111, no. 16. P. 19–22. URL: https://doi.org/10.5120/19622-1385 (дата звернення: 06.11.2024).

9. Nelson P., Rebelo P. Network performance. Basingstoke : Taylor & Francis, 2009. 495 p.

10. Goonatilake R., Bachnak R. A. Modeling Latency in a Network Distribution. *Network and Communication Technologies*. 2012. Vol. 1, no. 2. URL: https://www.ccsenet.org/journal/index.php/nct/article/view/20122 (дата звернення: 10.11.2024).

11. Удосконалення ядра мережі 5g з метою підвищення рівня захищеності зв'язку / Р. Одарченко та ін. *Science-based technologies*. 2023. Т. 57, № 1. С. 47–57. URL: https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/17444 (дата звернення: 12.11.2024).

12. Yefanova K. A., Ponomarenko Z. M., Masesov M. O. Актуальність впровадження та використання мережі SDN. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2018. Т. 32, № 2. С. 147–150. URL: http://sit.nuou.org.ua/article/view/158001 (дата звернення: 13.11.2024).

13. Гриндей А. О. Комплексна методика діагностування вузлів мобільної мережі 5G. *Наукові нотатки*. 2021. № 71. С. 86–91. URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/article/view/576 (дата звернення: 15.11.2024).

14. Software Defined Networks using Mininet. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 843–849. URL: https://www.ijrte.org/portfolio-item/F9375038620/ (дата звернення: 15.11.2024).

15. Faldella E., Neri G., Salmon T. Cost-effective station implementations in MININET. *Euromicro Newsletter*. 1979. Vol. 5, no. 5. P. 285–294. URL: https://doi.org/10.1016/0303-1268(79)90082-8 (дата звернення: 20.11.2024).

16. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. Further 5G evolution. *5G/5G-Advanced*. 2024.P. 661–668.
URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978044313173800030X (дата звернення: 20.11.2024).

17. Central Computer & Telecommunications Agency. Cable Infrastructure Strategy (IT Infrastructure Library). Stationery Office Books, 1990. 30 p.

18. Римар Х.Я. Методи віртуалізації мережевих ресурсів. 2019. — 9 с. URL: http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28003 (дата звернення: 22.11.2024).

19. Gillespie A. ETSI management standards. *Journal of Network and Systems Management*. 1993. Vol. 1, no. 1. P. 95–97. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/BF01026830 (дата звернення: 23.11.2024).

20. IoT Editorial Office I. Acknowledgment to the Reviewers of IoT in 2022. *IoT*. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 56. URL: https://www.mdpi.com/2624-831X/4/1/3 (дата звернення: 24.11.2024).

21. Göransson P., Black C., Culver T. Why SDN?. *Software Defined Networks*. 2017. P. 23–38. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128045558000028?via%3Dihub (дата звернення: 25.11.2024).

22. Vestin J. SDN-Enabled Resiliency in Computer Networks : licentiate thesis. 2018. URL: https://kau.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1197352&dswid=3837 (дата звернення: 27.11.2024).

23. Oliveira O. M. F. Network topology discovery : doctoral thesis. 2017. URL: https://ria.ua.pt/handle/10773/18692 (дата звернення: 25.11.2024).

24. Blokdyk G. Network topology Standard Requirements. 5STARCooks, 2018. 124 p.

25. Fencl T., Burget P., Bilek J. Network topology design. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, no. 11. P. 1287–1296. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066111001390?via%3Dihub&__cf_chl_rt_tk=pF9xdhJj04dEgxY7vHs1YIwSrj003TH6KJigOpPPNSQ-1735495593-1.0.1.1-icZJLjMrQlGXc9awT0yfUFQD4nZkG5Q7PXZq5FSNGEE (дата звернення: 27.11.2024).

26. Limoncelli T. A. OpenFlow. *Communications of the ACM*. 2012. Vol. 55, no. 8. P. 42–47. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/2240236.2240254 (дата звернення: 27.11.2024).

27. Gerrity A., Hu F. SDN/OpenFlow. *Network Innovation through OpenFlow and SDN*. 2014. P. 3–16. URL: http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b16521-3 (дата звернення: 28.11.2024).

28. WBAN. *Encyclopedia of Wireless Networks*. Cham, 2020. P. 1457. URL: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-78262-1_300711 (дата звернення: 28.11.2024).

29. Shie-Yuan Wang, Chih-Liang Chou, Chun-Ming Yang. EstiNet openflow network simulator and emulator. *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol. 51, no. 9. P. 110–117. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6588659 (дата звернення: 28.11.2024).

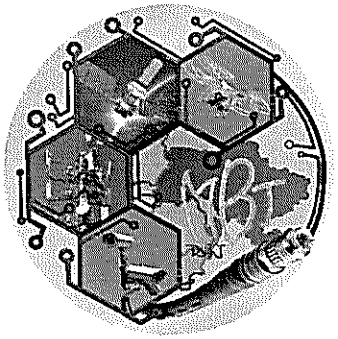
30. NETCONF Configuration Protocol / ed. by R. Enns. RFC Editor, 2006. URL: https://www.rfc-editor.org/info/rfc4741 (дата звернення: 29.11.2024).

31. Research of SDN network performance parameters using Mininet network emulator / O. Romanov et al. *Information and Telecommunication Sciences*. 2021. No. 1. P. 24–32. URL: http://infotelesc.kpi.ua/article/view/235603 (дата звернення: 29.11.2024).

32. Hu F. Network Innovation Through Openflow and Sdn. Taylor & Francis Group, 2014. 480 p.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДУІКТ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Презентація по магістерській роботі
на тему:

Оцінка ефективності технологій мережевої віртуалізації для розгортання SDN-мереж у телекомунікаційних системах п'ятого покоління

Виконав: Данило ДРОЗДОВ

Керівник: Назарій БЛАЖЕННИЙ, PhD

РЕФЕРАТ

Мета роботи:
Оцінити ефективність мережевої віртуалізації у контексті розгортання SDN-мереж у системах 5G.

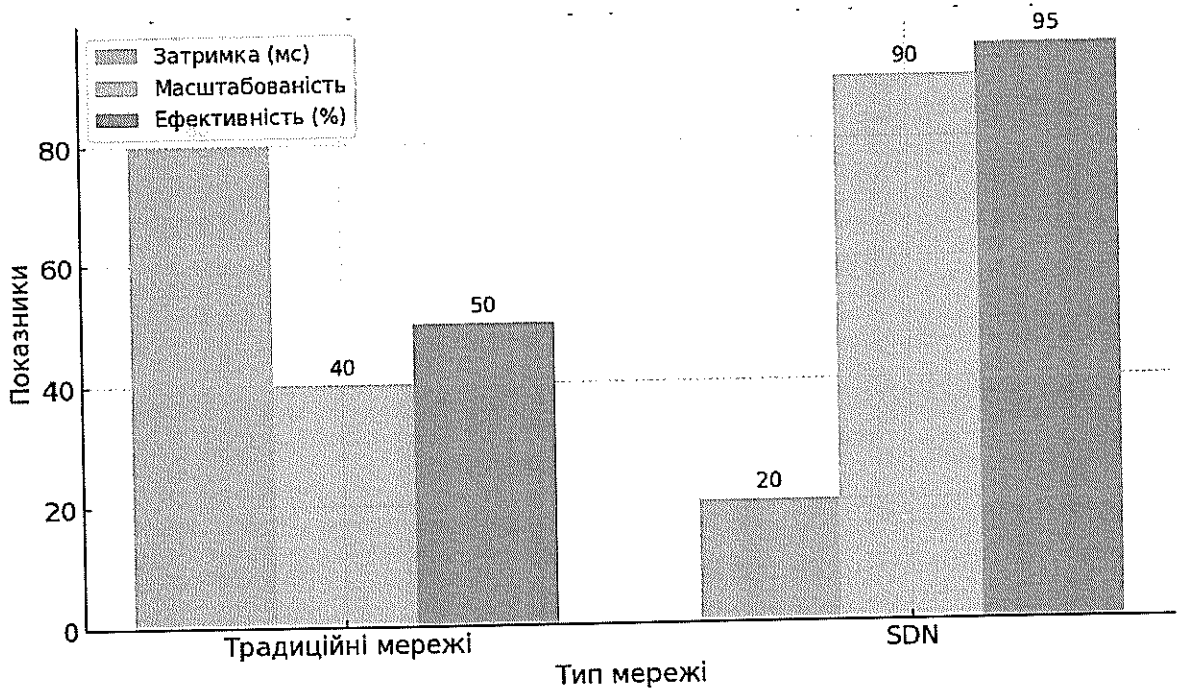
Об'єкт дослідження:
SDN-мережі у системах 5G.

***Предмет дослідження*:**
Технології мережевої віртуалізації.

Порівняння традиційної та віртуалізованої мережі 5G

Критерій	Традиційна мережа	Віртуалізована мережа (SDN/NFV)
Архітектура	Жорстко інтегрована апаратна інфраструктура	Програмно-визначена, розділення контролю та передачі
Масштабованість	Обмежена фізичними ресурсами	Гнучка, масштабування через програмні рішення
Управління трафіком	Децентралізоване	Централізоване (SDN-контролер)
Оновлення та модернізація	Тривалі та дорогі	Швидке, через оновлення ПЗ
Ефективність використання ресурсів	Фіксоване розподілення	Динамічне перерозподілення
Розгортання нових послуг	Вимагає нових фізичних пристроїв	Можливе через програмне налаштування (NFV)
Затримка (Latency)	Вища	Низька, завдяки розташуванню обчислень ближче до користувача
Безпека	Статична, обмежені засоби контролю	Динамічна, можливість створення ізольованих сегментів (Network Slicing)
Гнучкість	Низька	Висока, налаштування мережі відповідно до вимог

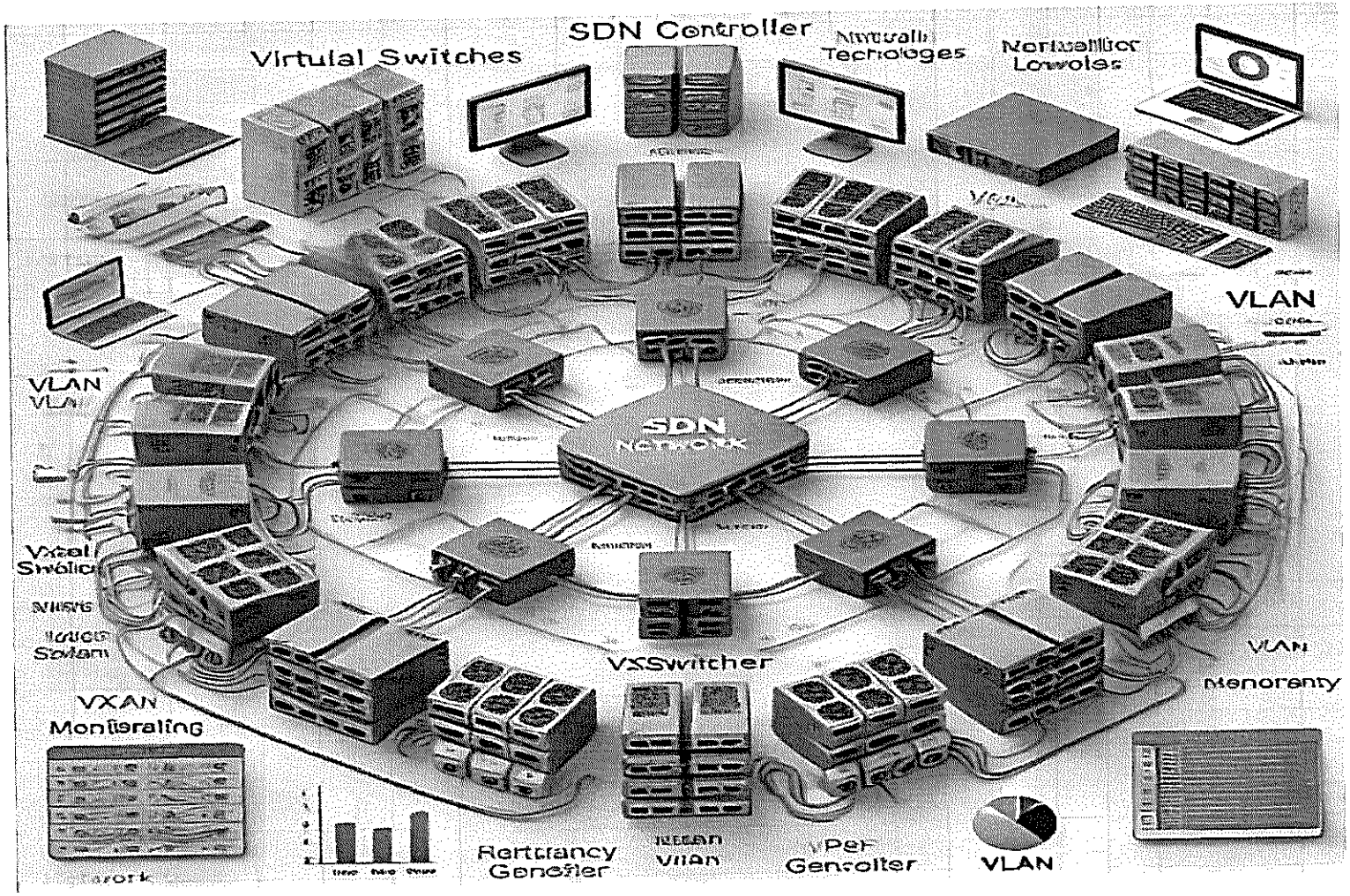
Порівняння ефективності управління трафіком у мережах



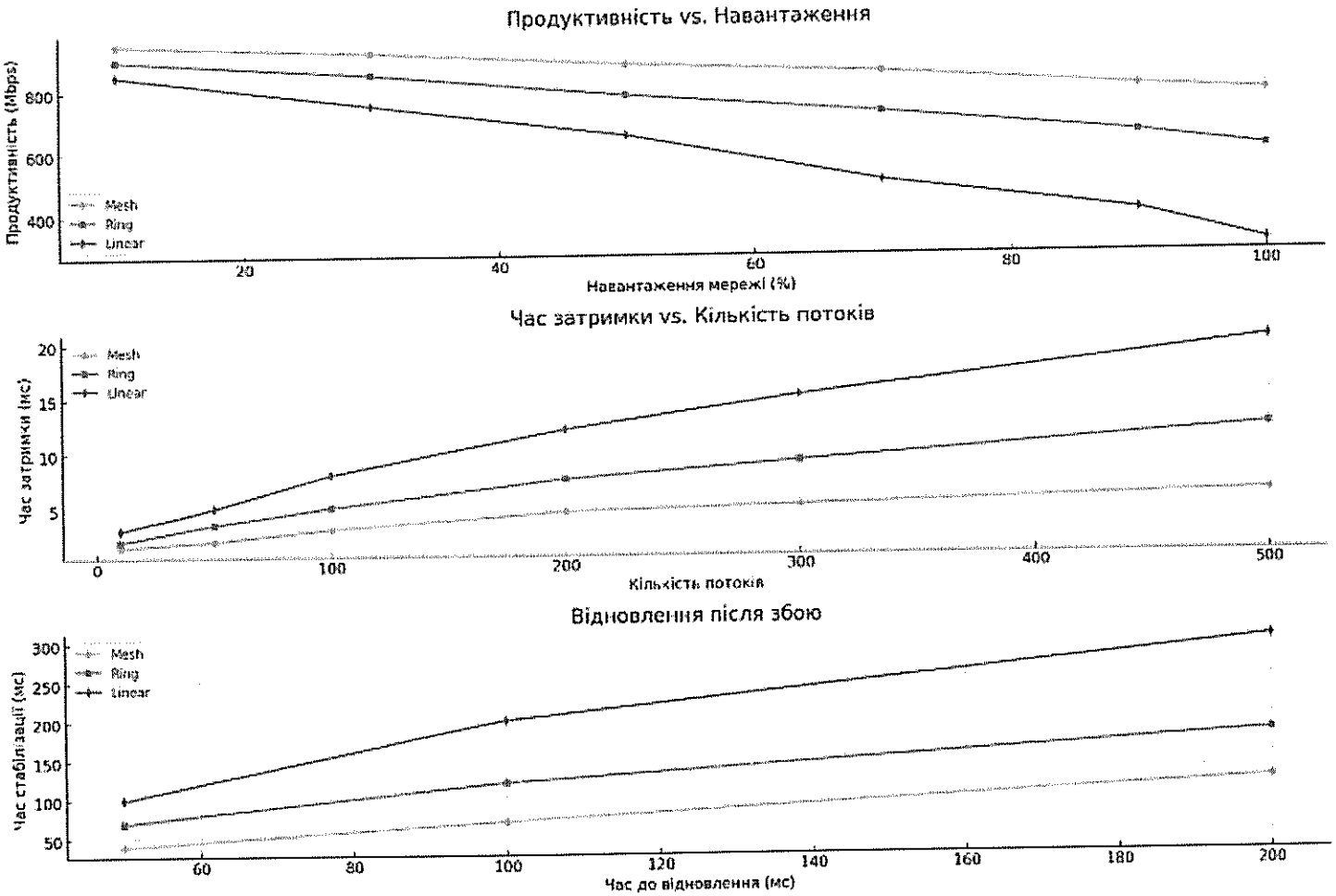
Порівняння інструментів для моделювання SDN-мереж

Інструмент	**Призначення**	**Мова програмування**	**Масштабованість**	**Інтеграція з іншими інструментами**
Mininet	Емуляція SDN-мереж	Python	Висока	ONOS, ODL
NS-3	Мережеве моделювання	C++	Частково Висока	Direct Code Integration
GNS3	Візуалізація мереж	Python	Висока	Cisco IOS, VMware
EstiNet	Емуляція та тестування SDN	C/C++	Висока	Інтеграція з Mininet
Ryu	SDN-контролер для емуляції та розробки	Python	Середня	OpenFlow, REST API
EVE-NG	Віртуалізація та моделювання мереж	Linux (GUI)	Частково Висока	Cisco, Juniper, VMware

Кільцева топологія для оцінки ефективності технологій віртуалізації



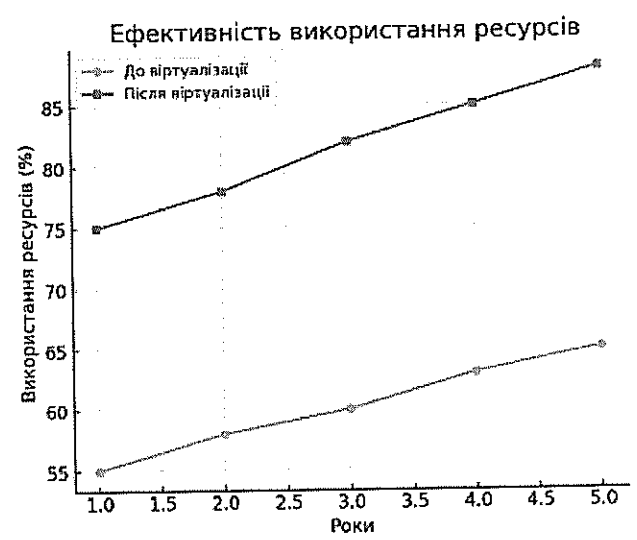
Порівняння продуктивності, затримки та відновлення для різних типів топологій

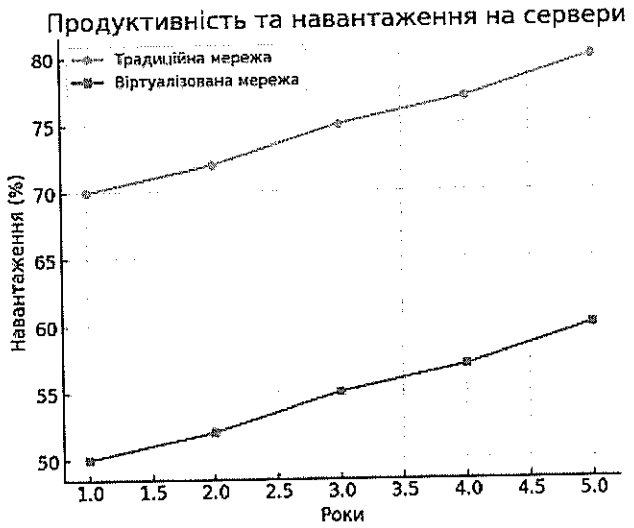


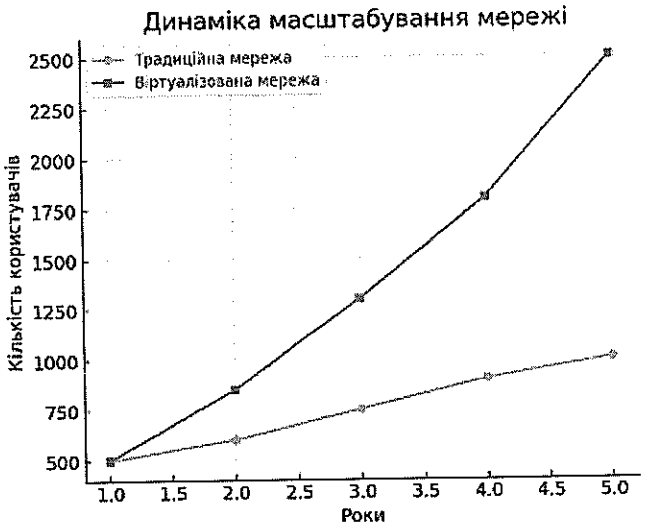
План етапного впровадження віртуалізації у 5G

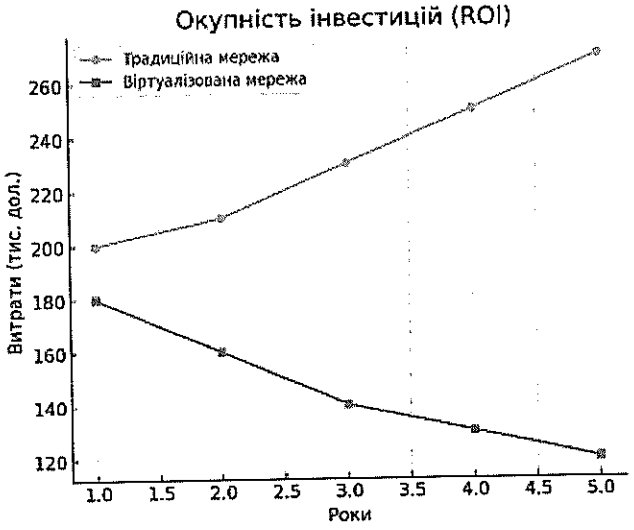
Етап	Опис робіт	Строки виконання	Відповідальні
1. Аналіз	Оцінка поточної інфраструктури. Вибір технологій для віртуалізації	1-2 місяці	Відділ IT, архітектори мережі
2. Проектування	Розробка архітектури SDN/NFV. Визначення ключових KPI	1 місяць	Інженери, аналітики
3. Тестування	Розгортання пілотного проекту. Тестування VNF та NFV у тестовому середовищі	2-3 місяці	Відділ R&D, мережеві інженери
4. Розгортання	Масштабування віртуалізованих функцій на реальну мережу	1-2 місяці	Відділ експлуатації
5. Моніторинг	Налаштування систем моніторингу продуктивності. Виявлення проблем та оптимізація.	Постійно	Служба підтримки, NOC
6.Оптимізація	Аналіз продуктивності. Впровадження вдосконалень та автоматизації	Постійно	Інженери, IT-аналітики

Аналіз впровадження технологій віртуалізації у 5G-мережах









Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

1. *У першому розділі* були розкриті теми телекомунікаційних систем п'ятого покоління, програмно-визначених мереж SDN та мережевої віртуалізації 5G, розроблена порівняльна характеристика телекомунікаційних систем, виконане порівняння традиційних та SDN-мереж та описані переваги різних методів мережевої віртуалізації.

2. *У другому розділі* були розкриті теми вибору критеріїв для оцінки ефективності, проаналізовані інструменти моделювання та тестування SDN-мереж та розроблена експериментальна мережева топологія для оцінки ефективності технологій віртуалізації.

3. *У третьому розділі* виконано практичні дослідження результатів оцінки ефективності щодо впровадження технологій віртуалізації та створено таблицю порівняння витрат на традиційну мережу та віртуалізовану мережу SDN та побудовано графіки порівняння які наочно демонструють, що впровадження технологій віртуалізації у 5G-мережах призводять до підвищення ефективності використання ресурсів, зниження навантаження на сервери, прискореного масштабування мережі та швидкої окупності інвестицій.

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Данило ДРОЗДОВ

Назва: Метод мережевої віртуалізації для розгортання SDN-мереж у телекомунікаційних системах п'ятого покоління

Координатор: Назарій БЛАЖЕНИЙ

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:6.2

Коефіцієнт подібності 2:3.9

Тривога: 0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

....

Дата *Підпис Наукового керівника*