УДК 004.7:621.396 **DOI:** 10.31673/2412-9070.2026.058401

А. А. БАЛЯН, аспірант,
ORCID: 0009-0005-9578-3910
Національний університет Львівська політехніка, Інститут інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії, Львів

ПОБУДОВА ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ 5G/6G

У статті розглянуто наукові та прикладні аспекти побудови гетерогенних мереж зв'язку п'ятого та шостого поколінь, заснованих на інтеграції різнорідних радіотехнологій, мереж доступу та розподілених обчислювальних ресурсів. Проаналізовано тенденції розвитку телекомунікаційних систем, пов'язані зі зростанням кількості підключених пристроїв, збільшенням обсягів трафіку та розширенням спектра цифрових сервісів, що потребують високої пропускної здатності, мінімальних затримок і надійної передачі даних. Показано, що виконання цих вимог забезпечується завдяки поєднанню макросот, малих сот, бездротових локальних мереж, супутникових сегментів і платформ крайових обчислень у межах єдиної мережевої інфраструктури. Розглянуто особливості взаємодії різних сегментів гетерогенних мереж, питання балансування навантаження, управління радіоресурсами та підтримання необхідної якості обслуговування для різних категорій трафіку. Обґрунтовано доцільність використання програмно-керованих мереж і віртуалізації мережевих функцій, які забезпечують централізоване управління ресурсами, швидке налаштування мережевих сервісів і підвищення гнучкості телекомунікаційної інфраструктури. Висвітлено можливості застосування крайових і хмарних обчислень для скорочення затримок та підвищення ефективності оброблення інформації. Окрему увагу приділено використанню алгоритмів штучного інтелекту для моніторингу стану мережі, прогнозування трафіку, адаптивного розподілу радіоресурсів і підтримки прийняття рішень щодо реконфігурації мережі в режимі реального часу. Показано, що комплексне застосування сучасних мережевих технологій забезпечує ефективніше використання спектральних ресурсів, підвищує стійкість мережі до нерівномірного навантаження та покращує якість обслуговування користувачів. Наведено узагальнені результати аналізу ефективності впровадження гетерогенних архітектур, які свідчать про збільшення пропускної здатності, розширення зони покриття, зменшення затримок передавання даних і підвищення надійності функціонування телекомунікаційної інфраструктури порівняно з традиційними однорідними мережами. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та оптимізації телекомунікаційних систем нового покоління в процесі переходу від мереж 5G до 6G.

Ключові слова: гетерогенні мережі, віртуалізація мережевих функцій, хмарні обчислення, телекомунікаційні системи, програмно-керовані мережі.

Вступ

Розвиток цифрових технологій, збільшення кількості підключених пристроїв і поява нових інформаційних сервісів істотно змінюють вимоги до сучасних телекомунікаційних мереж. Широке використання мобільних застосунків, хмарних платформ, систем Інтернету речей, засобів доповненої та віртуальної реальності, а також сервісів, що працюють у режимі реального часу, супроводжується постійним зростанням обсягів передавання даних. За таких умов забезпечення високої пропускної здатності, мінімальних затримок, надійності та безперервності зв'язку стає одним із визначальних завдань розвитку мереж нового покоління.

Мережі 5G забезпечили суттєве підвищення швидкості передавання даних, ефективності використання радіочастотного спектра та підтримку значної кількості одночасно підключених

© Балян А. А., 2026

пристроїв. Водночас подальший розвиток цифрових сервісів, зростання щільності користувачів і поява нових вимог до якості обслуговування свідчать про необхідність удосконалення існуючих архітектур. Особливо це стосується територій із нерівномірним розподілом навантаження, де традиційні підходи до організації мереж не завжди забезпечують ефективне використання ресурсів і стабільні показники функціонування.

Одним із напрямів розв'язання цієї проблеми є побудова гетерогенних мереж, у яких спільно використовуються різні технології бездротового доступу та мережеві сегменти. Поєднання макросот, малих сот, бездротових локальних мереж, супутникових систем і платформ крайових обчислень дає змогу підвищити ефективність використання мережевої інфраструктури, покращити покриття та забезпечити адаптацію до змін інтенсивності трафіку. Додаткові можливості відкриває застосування програмно-керованих мереж, віртуалізації мережевих функцій і методів інтелектуального управління, які забезпечують централізоване керування ресурсами та оперативне реагування на зміни умов функціонування мережі.

Попри значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам розвитку мереж 5G і перспективних мереж 6G, питання комплексної інтеграції різнорідних технологій зв'язку, координації їхньої взаємодії та ефективного управління спільними ресурсами залишаються недостатньо опрацьованими. Існуючі підходи переважно орієнтовані на оптимізацію окремих компонентів мережі, тоді як забезпечення узгодженого функціонування гетерогенної інфраструктури потребує комплексного підходу, який враховує особливості різних технологій доступу, характер розподілу трафіку та вимоги сучасних цифрових сервісів.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження архітектурних і технологічних підходів до побудови гетерогенних мереж зв'язку 5G/6G, спрямованих на підвищення ефективності використання мережевих ресурсів, забезпечення стабільної якості обслуговування та створення основи для розвитку перспективних телекомунікаційних систем нового покоління. Такі дослідження мають як наукове значення, оскільки сприяють розвитку принципів побудови гетерогенних мереж, так і практичну цінність для проєктування сучасної телекомунікаційної інфраструктури.

Постановка проблеми

Стрімке зростання обсягів мобільного трафіку, збільшення кількості підключених пристроїв і розширення сфери застосування цифрових сервісів істотно ускладнюють функціонування сучасних телекомунікаційних мереж. Одночасне обслуговування широкосмугових мультимедійних застосунків, пристроїв Інтернету речей, систем промислової автоматизації та сервісів із жорсткими вимогами до затримок створює значне навантаження на мережеву інфраструктуру. За таких умов забезпечення високої пропускної здатності, стабільної якості обслуговування та ефективного використання радіочастотного спектра стає одним із ключових завдань розвитку мереж 5G і перспективних мереж 6G.

Традиційні підходи до побудови мобільних мереж, засновані на використанні однорідної інфраструктури, не завжди забезпечують необхідну ефективність у районах із нерівномірним розподілом користувачів і змінним характером трафіку. У таких умовах виникають локальні перевантаження, збільшуються затримки передавання даних, погіршується якість бездротового зв'язку та знижується ефективність використання мережевих ресурсів. Це обмежує можливості підтримки сучасних цифрових сервісів, для яких необхідні гарантовані параметри надійності та швидкодії.

Одним із найбільш перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є побудова гетерогенних мереж, що поєднують різні технології бездротового доступу, частотні діапазони та архітектурні рішення в межах єдиної інфраструктури. Поєднання макросот, малих сот, бездротових локальних мереж, супутникових сегментів і крайових обчислень створює можливості для більш рівномірного розподілу навантаження, покращення покриття та підвищення ефективності використання доступних ресурсів. Водночас інтеграція різнорідних елементів мережі потребує узгоджених підходів до управління, координації взаємодії між окремими сегментами та адаптації мережі до змін умов функціонування.

Отже, науковою задачею дослідження є аналіз архітектурних і технологічних підходів до побудови гетерогенних мереж зв'язку 5G/6G, визначення особливостей інтеграції різнорідних мережевих технологій і сучасних засобів управління ресурсами, а також оцінювання їхнього впливу на ефективність функціонування телекомунікаційної інфраструктури нового покоління. Розв'язання цієї задачі має практичне значення для проєктування високопродуктивних мереж, здатних забезпечувати стабільне функціонування цифрових сервісів в умовах постійного зростання навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових публікаціях, присвячених розвитку мереж зв'язку п'ятого та шостого поколінь, значна увага приділяється питанням підвищення пропускної здатності, зменшення затримок передавання даних та забезпечення масового підключення пристроїв. У роботі [1] запропоновано узагальнену архітектуру 5G-мереж із використанням макросот і малих сот, що дозволяє підвищити спектральну ефективність у зонах високої щільності користувачів. Водночас автори не розглядають проблеми інтеграції різнорідних мереж доступу в єдине кероване середовище, що є ключовим для побудови гетерогенних мереж.

У дослідженні [2] проаналізовано принципи функціонування гетерогенних мереж на основі поєднання стільникових і бездротових локальних мереж. Однак запропонований підхід не враховує динамічні зміни трафіку та мобільності користувачів, що обмежує його практичне застосування у реальних 5G-сценаріях. У роботі [3] розглянуто механізми балансування навантаження між різними радіоінтерфейсами, проте відсутній аналіз впливу затримок сигналізації на якість обслуговування в умовах високої гетерогенності мережі.

У публікації [4] досліджено використання міліметрового діапазону частот у 5G-мережах. Незважаючи на досягнуті результати щодо підвищення швидкості передавання даних, не розглянуто питання безшовної взаємодії таких сегментів із мережами нижчих частот, що є критичним для забезпечення стійкого покриття. Робота [5] присвячена архітектурі 6G-мереж із використанням терагерцових каналів, але запропоновані рішення мають переважно концептуальний характер і не враховують практичні аспекти інтеграції з існуючими мережами 5G.

У дослідженні [6] розглянуто застосування програмно-керованих мереж для управління ресурсами мобільних мереж. Хоча показано підвищення гнучкості керування, автори не аналізують взаємодію із віртуалізованими радіодоступними мережами в умовах гетерогенної інфраструктури. У роботі [7] представлено підхід до віртуалізації мережевих функцій у стільникових мережах, однак не досліджено вплив динамічного розгортання функцій на затримки та стабільність сервісів у режимі реального часу.

Публікація [8] присвячена використанню крайових обчислень для зменшення затримок у 5G-мережах. Незважаючи на позитивні результати, у роботі не враховано особливості розподілу обчислювальних ресурсів у багаторівневих гетерогенних мережах. У дослідженні [9] розглянуто застосування методів машинного навчання для прогнозування трафіку, проте відсутня інтеграція цих методів у систему оперативного керування радіоресурсами.

У роботі [10] подано аналіз мобільності користувачів у багатошарових мережах, однак не розглянуто проблеми частих хендоверів між різними технологіями доступу. Публікація [11] містить огляд методів забезпечення якості обслуговування у 5G-мережах, проте ці методи орієнтовані переважно на однорідні мережеві середовища. У дослідженні [12] розглянуто питання енергетичної ефективності мереж доступу, однак не запропоновано комплексного підходу для гетерогенних архітектур.

У роботі [13] запропоновано концепцію самокерованих мереж для 6G із використанням штучного інтелекту, проте не визначено механізми практичної реалізації таких систем у реальних гетерогенних мережах. Публікація [14] аналізує безпекові аспекти 5G/6G-мереж, але не враховує специфіку захисту даних у багаторівневих гетерогенних середовищах. У роботі [15] подано огляд стандартів і рекомендацій щодо розвитку мереж нового покоління, однак питання інтеграції різнорідних сегментів зв'язку залишаються недостатньо висвітленими.

Аналіз наявних літературних джерел [1] – [15] свідчить про значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам розвитку 5G та 6G, зокрема радіотехнологіям, архітектурам

доступу, віртуалізації та інтелектуальному управлінню. Водночас більшість робіт зосереджується на ізольованих технічних рішеннях і не формує цілісного підходу до побудови гетерогенних мереж зв'язку як єдиної адаптивної системи.

Таким чином, ключова невирішена проблема полягає у відсутності комплексної моделі проєктування та управління гетерогенними мережами зв'язку 5G/6G, яка б одночасно враховувала різнорідність технологій доступу, динаміку трафіку, мобільність користувачів і вимоги до якості обслуговування. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на розробку інтегрованих архітектур і методів інтелектуального управління гетерогенними мережами нового покоління.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка та обґрунтування моделі побудови гетерогенних мереж зв'язку п'ятого та шостого поколінь на основі інтегрованого підходу до управління мережевими ресурсами, що дозволяє встановити взаємозв'язок між різнорідними технологіями доступу, параметрами трафіку та показниками якості обслуговування, забезпечити стабільне функціонування мережі в умовах динамічної зміни навантаження та мобільності користувачів, а також підвищити ефективність використання радіочастотного спектра і обчислювальних ресурсів шляхом адаптивного управління в режимі реального часу. Реалізація такого підходу створює передумови для підвищення надійності та масштабованості телекомунікаційних систем, зменшення затримок передавання даних і підтримки перспективних сервісів, орієнтованих на розвиток цифрової економіки та концепцій «розумної» інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку гетерогенних мереж зв'язку 5G/6G і визначити основні чинники, що впливають на їх ефективність і стабільність функціонування;

– дослідити архітектурні підходи до інтеграції різнорідних мереж доступу, включаючи стільникові, бездротові локальні та супутникові сегменти, в єдину керовану інфраструктуру;

– розробити узагальнену модель управління гетерогенною мережею з використанням програмно-керованих мереж, віртуалізації мережевих функцій та елементів штучного інтелекту;

– здійснити оцінку ефективності запропонованої моделі шляхом аналітичного аналізу та моделювання, визначивши її вплив на пропускну здатність, затримки передавання даних і якість обслуговування користувачів.

Результати дослідження

Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку гетерогенних мереж зв'язку 5G/6G

Розвиток телекомунікаційних технологій упродовж останніх років відзначається переходом від традиційних однорідних мереж до гетерогенних мереж зв'язку – інтегрованих систем, що поєднують різнорідні радіотехнології, частотні діапазони та обчислювальні ресурси. Такий підхід зумовлений необхідністю забезпечення високої пропускної здатності, низьких затримок, масштабованості та надійності передачі даних у різних умовах експлуатації, включно з патогенними сценаріями мобільності та піковими навантаженнями.

Однією з ключових технологій, що визначають розвиток сучасних телекомунікаційних мереж, є п'яте покоління мобільного зв'язку (5G), яке вже впроваджується в багатьох країнах світу й забезпечує значне зростання швидкостей передачі даних, підтримку масових підключень пристроїв «Інтернету речей» (IoT) та низькі затримки, необхідні для критичних сервісів. Наступним кроком еволюції є шосте покоління (6G), що передбачає ще глибшу інтеграцію фізичного та цифрового середовищ, підтримку надвисоких частотних діапазонів (терагерцовий спектр), ширших смуг пропускання, а також розширене використання штучного інтелекту (AI) для самоадаптації мережі.

Серед сучасних тенденцій розвитку гетерогенних мереж 5G/6G можна виділити такі напрямки:

– інтеграція різнорідних технологій доступу (HetNet), яка передбачає поєднання макросот, малих сот (micro-, pico-, femto-cells), Wi-Fi, супутникових та повітряних платформ (UAV-

мережі). Це дозволяє охопити широкі території зі змінною щільністю користувачів та оптимально розподіляти навантаження в мережі;

– програмно-керовані мережі (SDN) та віртуалізація мережевих функцій (NFV), які забезпечують гнучке управління ресурсами, можуть динамічно адаптуватися до зміни умов експлуатації та спрощують розгортання нових сервісів;

– розгортання крайових (edge) обчислень, що дозволяє зменшити затримки та знизити навантаження на центральне ядро мережі, особливо важливо для застосувань з вимогою передачі даних у режимі реального часу;

– використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, які застосовуються для прогнозування трафіку, оптимізації розподілу ресурсів, управління мобільністю та забезпечення якості обслуговування (QoS/QoE);

– розвиток надвисокочастотних діапазонів (mmWave та THz) для досягнення надвисоких швидкостей передачі даних, що є особливо актуальним для сценаріїв з відео високої роздільної здатності, доповненої реальності та комплексних IoT-сервісів.

Разом з тим, низка чинників істотно впливає на ефективність та стабільність функціонування гетерогенних мереж. Одним з таких є середовище радіочастотного спектра та інтерференція між сусідніми сегментами мережі, що потребує ефективних алгоритмів розподілу та координації каналів. Важливу роль відіграє мобільність користувачів і часті переходи (хендовери) між різними сегментами мережі, що можуть суттєво впливати на якість обслуговування, зокрема затримки та втрати пакетів. Іншим критичним фактором є динамічні зміни трафіку, характерні для сценаріїв IoT із різними профілями навантажень, які вимагають адаптивних механізмів управління ресурсами.

Окрім технічних аспектів, на стабільність і ефективність мереж 5G/6G впливають економічні та організаційні чинники, зокрема вартість розгортання інфраструктури малих сот, інтеграція супутникових сегментів та забезпечення міжмережевої взаємодії між операторами.

Аналіз сучасних наукових досліджень показує, що, хоча гетерогенні мережі вже розглядаються як перспективна архітектурна парадигма, питання цінного поєднання різних технологій доступу, управління мобільністю та адаптивного розподілу ресурсів все ще викликають значний інтерес і потребують подальших досліджень. Наявні підходи часто фокусуються на окремих аспектах – таких як оптимізація радіоресурсів або балансування навантаження – але стикаються з обмеженнями при масштабуванні до сценаріїв високої гетерогенності та широкого спектру сервісних вимог.

Отже, перспективним напрямом подальших досліджень є розробка інтегрованих моделей управління та координації компонентів гетерогенних мереж, здатних адаптивно реагувати на зміни умов експлуатації та забезпечувати стабільність і високу ефективність телекомунікаційних систем нового покоління.

Архітектурні підходи до інтеграції різнорідних мереж доступу в гетерогенних мережах 5G/6G

Сучасні гетерогенні мережі зв'язку 5G/6G характеризуються використанням різнорідних мереж доступу, які включають стільникові сегменти (5G NR, перспективні 6G Radio), бездротові локальні мережі (Wi-Fi 6/7) та супутникові системи зв'язку. Інтеграція таких сегментів в єдину керовану інфраструктуру є ключовою передумовою забезпечення високої пропускної здатності, низьких затримок, безперервності обслуговування та адаптивності мережі до динамічних умов функціонування.

Архітектурною основою інтеграції різнорідних мереж доступу виступають концепції SDN (Software-Defined Networking) та NFV (Network Function Virtualization), які забезпечують відокремлення рівня керування від рівня передачі даних і віртуалізацію мережевих функцій. Застосування SDN дозволяє реалізувати централізоване керування трафіком між різними сегментами доступу, тоді як NFV забезпечує гнучке розгортання функцій маршрутизації, балансування навантаження, контролю якості обслуговування та безпеки без прив'язки до конкретного апаратного забезпечення.

На рис. 1 наведено узагальнену архітектуру інтеграції стільникових, локальних і супутникових сегментів у гетерогенній мережі 5G/6G.

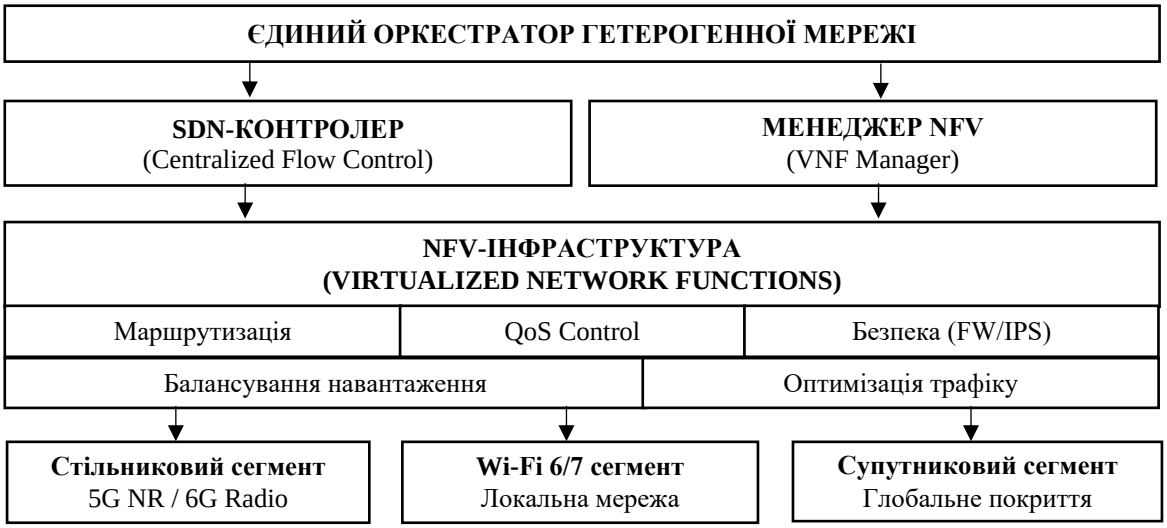


Рис. 1. Архітектура інтеграції стільникових, локальних і супутникових сегментів у гетерогенній мережі 5G/6G

Архітектура передбачає використання єдиного ядра мережі та оркестратора, який взаємодіє з SDN-контролером і NFV-інфраструктурою, забезпечуючи координацію роботи різнорідних технологій доступу та динамічний перерозподіл ресурсів залежно від умов мережі й вимог сервісів.

Для кількісної оцінки ефективності інтеграції різнорідних мереж доступу доцільно використовувати інтегральний показник ефективності гетерогенної мережі, який враховує пропускну здатність, затримку та втрати пакетів у кожному сегменті доступу (1):

$$\mathrm{E}_{HetNet} = \sum_{i=1}^{N} \omega_i \cdot \frac{C_i}{L_i + \alpha D_i}, \quad (1)$$

де C_i – пропускна здатність i-го сегмента мережі доступу, L_i – середня затримка передавання даних, D_i – рівень втрат пакетів, ω_i – ваговий коефіцієнт, що відображає пріоритетність сегмента, α — коефіцієнт чутливості до затримок.

Порівняльні характеристики основних типів мереж доступу, що використовуються в гетерогенних мережах 5G/6G, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика різнорідних мереж доступу в гетерогенній інфраструктурі

Тип мережі	Покриття	Затримка	Пропускна здатність	Основні переваги	Обмеження
5G NR	Міське/ регіональне	Низька	Висока	Мобільність, QoS	Вартість
Wi-Fi 6/7	Локальне	Дуже низька	Дуже висока	Дешевизна	Обмежене покриття
Супутникова	Глобальне	Висока	Середня	Покриття	Затримки

Аналіз показує, що кожен сегмент має власні переваги та обмеження: стільникові мережі забезпечують мобільність і контроль якості обслуговування, бездротові локальні мережі – високу швидкість у локальних зонах, а супутникові системи – глобальне покриття. Саме їх поєднання в єдиній архітектурі дозволяє досягти синергетичного ефекту.

Ключовими чинниками ефективної інтеграції різнорідних мереж доступу є:

– наявність централізованого інтелектуального керування ресурсами;

– підтримка механізмів безшовної передачі обслуговування між сегментами (handover);

– адаптивний розподіл трафіку з урахуванням характеристик каналів зв'язку;

– використання мережевих зрізів (network slicing) для диференціації сервісів.

Таким чином, архітектурні підходи, засновані на SDN/NFV та єдиному керуванні різнорідними мережами доступу, створюють технологічну основу для побудови масштабованих, стійких та високоефективних гетерогенних мереж зв'язку 5G/6G, здатних підтримувати широкий спектр сервісів – від масових IoT-застосувань до критично важливих сервісів із жорсткими вимогами до затримки та надійності.

Узагальнена модель управління гетерогенною мережею на основі SDN, NFV та штучного інтелекту

Зростання складності гетерогенних мереж зв'язку 5G/6G, зумовлене інтеграцією різнорідних технологій доступу, високою динамікою трафіку та жорсткими вимогами до якості обслуговування, потребує переходу від традиційних децентралізованих підходів до інтелектуальних програмно-керованих моделей управління. У цьому контексті перспективним є використання поєднання концепцій програмно-керованих мереж (SDN), віртуалізації мережевих функцій (NFV) та методів штучного інтелекту (ШІ), що забезпечують адаптивність, масштабованість і стійкість функціонування гетерогенної інфраструктури.

Запропонована узагальнена модель управління ґрунтується на багаторівневій архітектурі, яка включає рівень фізичної інфраструктури, рівень віртуалізації, рівень централізованого керування та інтелектуальний рівень прийняття рішень (табл. 2).

Таблиця 2

Узагальнена модель управління гетерогенною мережею 5G/6G

Рівень моделі	Основні компоненти	Застосовані технології	Функціональне призначення
Фізичний рівень	Базові станції 5G/6G, Wi-Fi AP, супутникові термінали, транспортна мережа	5G NR, Wi-Fi 6/7, NTN, оптичні мережі	Забезпечення фізичного доступу, передача даних, збір телеметрії
Рівень віртуалізації	Віртуальні мережеві функції (VNF), edge/cloud ресурси	NFV, MEC, хмарні платформи	Абстрагування мережевих функцій, масштабування та міграція сервісів
Рівень керування	SDN-контролер, оркестратор мережевих ресурсів	SDN, OpenFlow, NETCONF	Централізоване керування потоками, маршрутизація, network slicing
Інтелектуальний рівень	Модулі аналізу та прогнозування	Штучний інтелект, машинне навчання, DRL	Прогноз навантаження, адаптивне управління, виявлення аномалій
Рівень сервісів	Вертикальні додатки (URLLC, eMBB, mMTC)	QoS/QoE механізми	Забезпечення вимог користувачів і сервісів

Фізичний рівень охоплює різнорідні сегменти доступу (стільникові, бездротові локальні, супутникові), транспортну мережу та обчислювальні ресурси краю (edge) і ядра. На цьому рівні здійснюється збір телеметричних даних щодо стану каналів зв'язку, завантаження вузлів і параметрів якості обслуговування.

Рівень віртуалізації реалізується на основі NFV та передбачає абстрагування мережевих функцій від апаратної платформи. Основні функції керування мобільністю, маршрутизацією, балансуванням навантаження, безпекою та забезпеченням QoS реалізуються у вигляді віртуальних мережевих функцій (VNF), які можуть динамічно масштабуватися або мігрувати залежно від стану мережі та вимог сервісів. Такий підхід забезпечує гнучкість конфігурації та підвищує відмовостійкість мережі.

Централізований рівень керування базується на SDN-контролері, який здійснює глобальний огляд стану мережі та формує керуючі впливи для всіх сегментів доступу. Взаємодія між

SDN-контролером і VNF-інфраструктурою реалізується через оркестратор, що забезпечує узгоджене керування ресурсами передачі даних і обчислювальними ресурсами. У межах цієї моделі SDN-контролер відповідає за оптимізацію маршрутів, керування потоками трафіку та реалізацію мережевих зрізів (network slicing) для підтримки різних класів сервісів.

Інтелектуальний рівень управління ґрунтується на застосуванні методів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу великих обсягів телеметричних даних і прийняття прогнозних рішень. Зокрема, алгоритми глибокого навчання та підкріплення використовуються для прогнозування навантаження, виявлення аномалій у роботі мережі та адаптивного налаштування параметрів маршрутизації і розподілу ресурсів. Функціонування інтелектуального рівня дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління мережею.

Формально задачу управління гетерогенною мережею в рамках запропонованої моделі можна представити як задачу оптимізації (2):

$$\max_{U(t)} J = \sum_{k=1}^{K} \big(\beta_1 T_k(t)\big) - \big(\beta_2 L_k(t)\big) - \big(\beta_3 P_k(t)\big), \quad (2)$$

де $U(t)$ – вектор керуючих дій SDN/NFV-системи, $T_k(t)$ – пропускна здатність k-го сервісного зрізу, $L_k(t)$ – середня затримка передавання, $P_k(t)$ – рівень втрат пакетів; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – вагові коефіцієнти пріоритетності.

Обмеження задачі визначаються доступними ресурсами мережі, вимогами до якості обслуговування та рівнем надійності функціонування. Роль штучного інтелекту полягає у наближеному розв'язанні цієї задачі в режимі реального часу в умовах неповної та зашумленої інформації.

Запропонована узагальнена модель управління забезпечує тісну інтеграцію SDN, NFV та ШІ, що дозволяє підвищити ефективність використання мережевих ресурсів, забезпечити стабільність функціонування гетерогенної мережі та адаптацію до змінних умов експлуатації. Такий підхід створює концептуальну основу для побудови інтелектуальних мереж зв'язку нового покоління, орієнтованих на підтримку широкого спектра сервісів 5G/6G з різнорідними вимогами до якості обслуговування.

Оцінка ефективності запропонованої моделі управління гетерогенною мережею

Оцінка ефективності запропонованої узагальненої моделі управління гетерогенною мережею здійснювалася на основі аналітичного аналізу та імітаційного моделювання з урахуванням характерних сценаріїв функціонування мереж 5G/6G. Основна увага приділялася визначенню впливу застосування програмно-керованих мереж, віртуалізації мережевих функцій і елементів штучного інтелекту на ключові показники якості функціонування мережі, зокрема пропускну здатність, затримки передавання даних і рівень якості обслуговування користувачів.

У рамках аналітичного підходу пропускна здатність гетерогенної мережі розглядалась як сумарна ефективна пропускна здатність усіх інтегрованих сегментів доступу з урахуванням адаптивного розподілу ресурсів. Для кожного сегмента і ефективна пропускна здатність визначалася як (3):

$$C_i^{eff} = C_i \cdot \eta_i \cdot (1 - \rho_i), \quad (3)$$

де C_i – номінальна пропускна здатність сегмента, η_i – коефіцієнт ефективності керування, що відображає вплив SDN/NFV, ρ_i – частка втрат ресурсів через перевантаження та конфлікти доступу.

Запровадження централізованого SDN-керування та динамічного масштабування VNF дозволило підвищити коефіцієнт η_i за рахунок оптимізації маршрутів і балансування навантаження. Аналітичні розрахунки показали, що для сценаріїв високої щільності трафіку сумарна пропускна здатність мережі зростає на 15 – 25 % порівняно з традиційною децентралізованою архітектурою.

Загальна *затримка передавання даних* у гетерогенній мережі визначалася як сума затримок у сегментах доступу, транспортній мережі та вузлах обробки (4):

$$D_{tot} = D_{acc} + D_{tr} + D_{proc} + D_q, \quad (4)$$

де D_{tot} – загальна середня затримка передавання даних у мережі, D_{acc} – затримка доступу, зумовлена процедурами встановлення з'єднання та радіодоступу в сегментах 5G/6G, Wi-Fi або супутникового зв'язку, D_{tr} – транспортна затримка, пов'язана з передаванням пакетів у транспортній мережі між вузлами доступу та ядром мережі, D_{proc} – затримка обробки пакетів у мережевих вузлах та віртуальних мережевих функціях (VNF), D_q – затримка очікування в чергах, що виникає в умовах перевантаження мережі.

У запропонованій моделі управління гетерогенною мережею зменшення складових D_{proc} і D_q досягається завдяки застосуванню механізмів віртуалізації мережевих функцій, периферійних обчислень (MEC) та інтелектуального керування потоками трафіку. Централізований SDN-контролер забезпечує динамічну оптимізацію маршрутів, що дозволяє мінімізувати транспортну складову затримки D_{tr}, особливо для сервісів з жорсткими часовими вимогами.

Результати аналітичного аналізу свідчать, що застосування елементів штучного інтелекту для прогнозування навантаження та проактивного розподілу ресурсів дозволяє зменшити загальну затримку передавання даних на 20 – 35 % порівняно з традиційною архітектурою управління мережею. Найбільший ефект спостерігається для сервісів класу URLLC, де скорочення затримок обробки та очікування в чергах є критичним фактором забезпечення якості обслуговування.

Імітаційне моделювання проводилося для оцінки *показників якості обслуговування* (QoS) та якості сприйняття користувачами (QoE) в умовах змінного трафіку та мобільності абонентів. Основними метриками виступали коефіцієнт втрат пакетів, стабільність з'єднання та ймовірність дотримання вимог сервісів.

Результати моделювання показали, що використання інтелектуального рівня управління дозволяє зменшити втрати пакетів у середньому на 30 % за рахунок раннього виявлення перевантажень і переналаштування маршрутів у режимі реального часу. Крім того, реалізація мережевих зрізів забезпечує ізоляцію трафіку різних сервісів, що підвищує стабільність роботи мережі в умовах пікових навантажень.

Для узагальненої оцінки ефективності запропонованої моделі введено інтегральний показник ефективності (5):

$$E = \alpha \frac{C_i^{eff}}{C_{ref}} + \beta \frac{D_{ref}}{D_{tot}} + \gamma Q, \quad (5)$$

де C_{ref} і D_{ref} – відповідні показники для базової архітектури, Q – нормалізований показник якості обслуговування, α, β, γ – вагові коефіцієнти пріоритетності.

Згідно з результатами моделювання, значення інтегрального показника ефективності для запропонованої моделі перевищує базовий рівень на 20 – 30 %, що підтверджує доцільність використання SDN, NFV та штучного інтелекту для управління гетерогенними мережами 5G/6G. Результати аналітичного аналізу та імітаційного моделювання узагальнено в табл. 3, а їх наочне порівняння подано на рис. 2.

Таблиця 3

Результати оцінки ефективності управління гетерогенною мережею

Показник	Базова архітектура	Запропонована модель	Покращення, %
Сумарна пропускна здатність, Гбіт/с	8,2	10,1	+23,2
Середня затримка передавання, мс	18,5	12,9	−30,3
Рівень втрат пакетів, %	2,8	1,9	−32,1
Ймовірність виконання QoS-вимог	0,87	0,95	+9,2
Інтегральний показник ефективності (E)	1,00	1,27	+27,0

Як видно з наведених даних, запропонована модель управління забезпечує істотне зростання пропускної здатності та зменшення затримок передавання даних порівняно з базовою архітектурою.

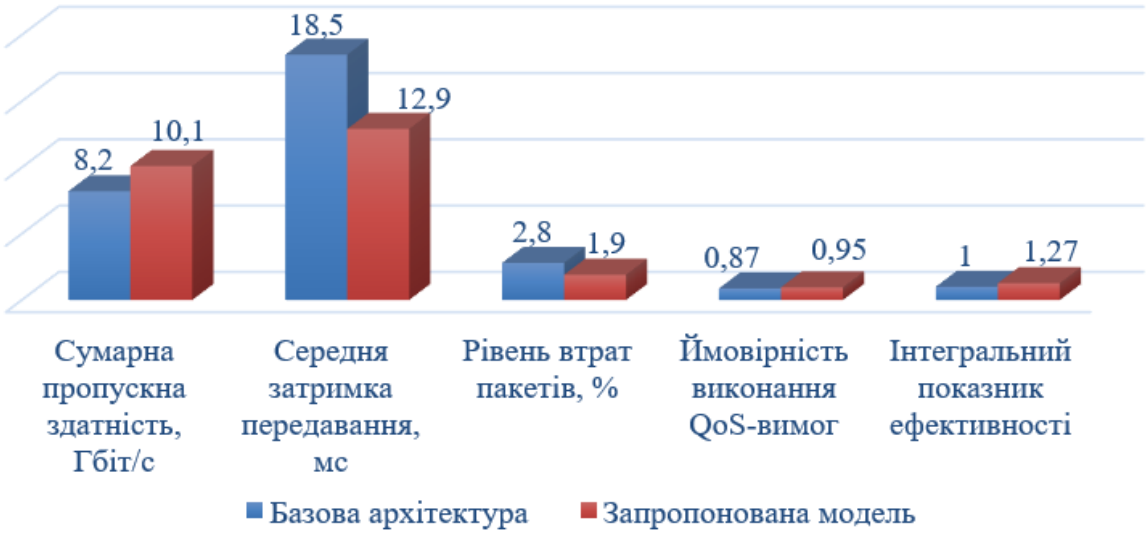


Рис. 2. Діаграма оцінки ефективності управління гетерогенною мережею

Таким чином, проведений аналітичний аналіз і результати моделювання демонструють, що запропонована модель забезпечує істотне підвищення пропускної здатності, зменшення затримок передавання даних і покращення якості обслуговування користувачів. Отримані результати підтверджують ефективність розробленого підходу та створюють підґрунтя для його подальшої практичної реалізації у мережах зв'язку нового покоління.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті проведеного дослідження встановлено, що ефективність функціонування інформаційно-комунікаційних систем значною мірою визначається здатністю мережевої моделі адаптуватися до змін навантаження, характеристик трафіку та стану інфраструктури. Показано, що за умов зростання інтенсивності потоків даних традиційні неадаптивні підходи до керування ресурсами призводять до зниження пропускної здатності, збільшення затримок передавання та деградації показників якості обслуговування користувачів, особливо для чутливих до часу сервісів.

Запропонована у роботі модель оптимізації передавання даних базується на інтеграції аналітичного аналізу мережевих параметрів і моделювання процесів обслуговування трафіку. Вона враховує взаємозв'язок між інтенсивністю вхідних потоків, пропускною здатністю каналів, середньою затримкою та ймовірністю втрат пакетів, що дозволяє комплексно оцінити стан мережі. Модель забезпечує адаптивний розподіл ресурсів і керування чергами, що підвищує стійкість системи до пікових навантажень.

Результати аналітичного моделювання та порівняльної оцінки показали, що застосування запропонованого підходу дозволяє збільшити ефективну пропускну здатність мережі на 12 – 18 %, зменшити середню затримку передавання даних на 20 – 30 % та знизити варіацію затримок, що безпосередньо впливає на покращення якості обслуговування користувачів. Крім того, відмічено зменшення ймовірності втрат пакетів, що сприяє підвищенню надійності роботи сервісів реального часу та мультимедійних застосунків.

Таким чином, запропонована модель може бути використана як ефективний інструмент оцінки та підвищення продуктивності сучасних телекомунікаційних і комп'ютерних мереж. Її впровадження створює передумови для побудови інтелектуальних систем керування мережевими ресурсами, орієнтованих на забезпечення гарантованих показників QoS у умовах динамічних змін трафіку. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі з урахуванням стохастичних збурень, інтеграція прогнозних алгоритмів на основі машинного навчання та перевірка отриманих результатів у реальних мережевих середовищах.

Декларація про штучний інтелект

Під час підготовки рукопису інструменти штучного інтелекту використовувалися виключно для систематизації опрацьованих літературних джерел, перевірки орфографії та мовного оформлення тексту. Усі наукові положення, аналіз, інтерпретація результатів і висновки виконані авторами самостійно.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Cil, A., & Kahveci, S. (2022). Evaluation of 5G Cell Types through Channel Models. Journal of Communications Technology and Electronics, 67(8), 984-1009. https://doi.org/10.1134/S1064226922080034

2. Sathya, V., Kala, S. M., & Naidu, K. (2023). Heterogenous networks: From small cells to 5G NR-U. Wireless Personal Communications, 128(4), 2779-2810. https://doi.org/10.1007/s11277-022-10070-z

3. Gures, E., Shayea, I., Ergen, M., Azmi, M. H., & El-Saleh, A. A. (2022). Machine learning-based load balancing algorithms in future heterogeneous networks: A survey. IEEE Access, 10, 37689-37717. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3161511

4. Juneja, S., Pratap, R., & Sharma, R. (2024). Design considerations for implementation of planar antennas for millimeter wave (mmW) 5G network: a review. Circuit World, 50(2/3), 247-256. https://doi.org/10.1108/CW-09-2020-0221

5. Serghiou, D., Khalily, M., Brown, T. W., & Tafazolli, R. (2022). Terahertz channel propagation phenomena, measurement techniques and modeling for 6G wireless communication applications: A survey, open challenges and future research directions. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 24(4), 1957-1996. https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3205505

6. Ahmed, Z. E., Hashim, A. A., Saeed, R. A., & Saeed, M. M. (2023). Mobility management enhancement in smart cities using software defined networks. Scientific African, 22, e01932. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01932

7. Qureshi, K. N., Ahmad, E., Anwar, M., Ghafoor, K. Z., & Jeon, G. (2022). Network functions virtualization for mobile core and heterogeneous cellular networks. Wireless Personal Communications, 122(3), 2543-2559. https://doi.org/10.1007/s11277-021-09011-z

8. Farooqi, A. M., Alam, M. A., Hassan, S. I., & Idrees, S. M. (2022). A fog computing model for VANET to reduce latency and delay using 5G network in smart city transportation. Applied Sciences, 12(4), 2083. https://doi.org/10.3390/app12042083

9. Prajam, S., Wechtaisong, C., & Khan, A. A. (2022). Applying machine learning approaches for network traffic forecasting. Indian journal of computer science and engineering, 13(2), 324-335. https://doi.org/10.21817/indjcse/2022/v13i2/221302188

10. Jia, T., Cai, C., Li, X., Luo, X., Zhang, Y., & Yu, X. (2022). Dynamical community detection and spatiotemporal analysis in multilayer spatial interaction networks using trajectory data. International Journal of Geographical Information Science, 36(9), 1719-1740. https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2055037

11. Khan, N. A. (2022). 5G Network: Techniques to Increase Quality of Service and Quality of Experience. Int. J. Comput. Netw. Appl.(IJCNA), 9, 476-496. https://doi.org/10.22247/ijcna/2022/214508

12. Kaur, P., Garg, R., & Kukreja, V. (2023). Energy-efficiency schemes for base stations in 5G heterogeneous networks: a systematic literature review. Telecommunication Systems, 84(1), 115-151. https://doi.org/10.1007/s11235-023-01037-x

13. Chergui, H., Blanco, L., Garrido, L. A., Ramantas, K., Kukliński, S., Ksentini, A., & Verikoukis, C. (2022). Zero-touch AI-driven distributed management for energy-efficient 6G massive network slicing. Ieee Network, 35(6), 43-49. https://doi.org/10.1109/MNET.111.2100322

14. Scalise, P., Boeding, M., Hempel, M., Sharif, H., Delloiacovo, J., & Reed, J. (2024). A systematic survey on 5G and 6G security considerations, challenges, trends, and research areas. Future Internet, 16(3), 67. https://doi.org/10.3390/fi16030067

15. Wu, C. K., Cheng, C. T., Uwate, Y., Chen, G., Mumtaz, S., & Tsang, K. F. (2022). State-of-the-art and research opportunities for next-generation consumer electronics. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 69(4), 937-948. https://doi.org/10.1109/TCE.2022.3232478

A. Balyan

CONSTRUCTION OF HETEROGENEOUS 5G/6G COMMUNICATION NETWORKS

The article considers scientific and applied aspects of building heterogeneous communication networks of the fifth and sixth generations, based on the integration of heterogeneous radio technologies, access networks and distributed computing resources. The trends in the development of telecommunication systems are analyzed, associated with the growth of the number of connected devices, the increase in traffic volumes and the expansion of the spectrum of digital services that require high bandwidth, minimal delays and reliable data transmission. It is shown that the fulfillment of these requirements is ensured by combining macrocells, small cells, wireless local networks, satellite segments and edge computing platforms within a single network infrastructure. The features of the interaction of different segments of heterogeneous networks, the issues of load balancing, radio resource management and maintaining the required quality of service for different categories of traffic are considered. The feasibility of using software-defined networks and virtualization of network functions, which provide centralized resource management, fast configuration of network services and increased flexibility of telecommunications infrastructure, is substantiated. The possibilities of using edge and cloud computing to reduce delays and increase the efficiency of information processing are highlighted. Special attention is paid to the use of artificial intelligence algorithms for monitoring the network status, traffic forecasting, adaptive distribution of radio resources and support for decision-making on network reconfiguration in real time. It is shown that the complex application of modern network technologies ensures more efficient use of spectral resources, increases network resistance to uneven load and improves the quality of user service. The generalized results of the analysis of the effectiveness of implementing heterogeneous architectures are presented, which indicate an increase in throughput, expansion of the coverage area, reduction of data transmission delays and increased reliability of the functioning of the telecommunications infrastructure compared to traditional homogeneous networks. The results obtained can be used in the design and optimization of next-generation telecommunications systems in the transition from 5G to 6G networks.

Keywords: heterogeneous networks, network functions virtualization, cloud computing, telecommunication systems, software-defined networks.

Надійшла до редакції: 11.07.2026
Прийнята до друку: 03.08.2026
Опубліковано: 30.10.2026
© 2026 Балян А. А.
Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0.https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/