

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-40>

УДК 621.391

Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

Коломієць Альона Анатоліївна, д.пед.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2120-7644>

Будаш Михайло Володимирович, аспірант

Прикмета Андрій Володимирович, аспірант

Олійник Андрій Олегович, аспірант

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОГРАМНО-КЕРОВАНИХ МЕРЕЖ 5G ТА 6G

Васильківський М.В., Коломієць А.А., Будаш М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О. Технологічні аспекти впровадження програмно-керованих мереж 5G та 6G. Результати дослідження технологічних аспектів впровадження програмно-керованих мереж (SDN) у контексті 5G та 6G спрямовані на оптимізацію підходів, методів і технологій для забезпечення максимального ефективного використання мережевих ресурсів, підвищення гнучкості, безпеки та якості обслуговування. Оптимальні топології забезпечують максимальне покриття, мінімізацію затримок та підвищення надійності з'єднання. Впровадження SDN та NFV дозволяє динамічно керувати ресурсами мережі, забезпечуючи її гнучкість та масштабованість. Автоматизовані системи управління, які використовують алгоритми машинного навчання, оптимізують використання ресурсів. Технології управління QoS та мережеві слайси дозволяють забезпечити високий рівень якості обслуговування для різних типів трафіку та додатків. Це особливо важливо для критично важливих додатків, які вимагають низької затримки та високої пропускнуої здатності. Мережі 5G та 6G підтримують широкий спектр нових додатків і сервісів завдяки використанню гнучкої та масштабованої інфраструктури, інтегрованої з технологіями штучного інтелекту та машинного навчання. Дослідження технологічних аспектів впровадження програмно-керованих мереж у 5G та 6G дозволило визначити оптимальні підходи та методи для забезпечення ефективності, гнучкості, безпеки та високої якості обслуговування сучасних та майбутніх телекомунікаційних мереж. Мережі 5G та 6G забезпечують підтримку широкого спектра нових додатків і сервісів завдяки використанню гнучкої та масштабованої інфраструктури, інтегрованої з технологіями штучного інтелекту та машинного навчання. Виконані задачі та досягнуті результати сприяють розвитку інноваційних технологій та забезпечують відповідність мережевої інфраструктури зростаючим вимогам ринку та користувачів. Дослідження показало, що ефективний розподіл мережевих ресурсів у межах оптимізованої топології мереж 5G та 6G є можливим завдяки впровадженню програмно-керованих мереж (SDN), віртуалізації мережевих функцій (NFV) та розробці динамічних алгоритмів управління ресурсами. Це забезпечує високу продуктивність, гнучкість та надійність мережі, задовольняючи зростаючі вимоги користувачів і підтримуючи інноваційні сервіси та додатки.

Ключові слова: оптичний лінійний термінал, оптичний сплітер, пасивна оптична мережа, оптичний мережевий термінал, інфокомунікаційна мережа з багатопротоковою комутацією за мітками на основі IP адрес, агрегаційний транспортний вузол, граничний транспортний вузол, динамічний розподіл спектру, програмно-керована мережа

Vasylykivskiy M., Kolomiets A., Budash M., Prykmeta A., Oliinyk A. **Technological aspects of implementing software-configurable 5G and 6G networks.** The results of the study of technological aspects of software-defined networking (SDN) implementation in the context of 5G and 6G are aimed at optimizing approaches, methods and technologies to ensure maximum efficient use of network resources, increase flexibility, security and quality of service. Optimal topologies maximize coverage, minimize latency, and improve connection reliability. The introduction of SDN and NFV allows for dynamic management of network resources, ensuring its flexibility and scalability. Automated management systems that use machine learning algorithms optimize resource utilization. QoS management technologies and network slices allow you to provide a high level of quality of service for different types of traffic and applications. This is especially important for mission-critical applications that require low latency and high bandwidth. 5G and 6G networks support a wide range of new applications and services through the use of flexible and scalable infrastructure integrated with artificial intelligence and machine learning technologies. The study of the technological aspects of implementing software-defined networks in 5G and 6G has allowed us to identify the best approaches and methods to ensure the efficiency, flexibility, security and high quality of service of current and future telecommunications networks. The 5G and 6G networks support a wide range of new applications and services through the use of flexible and scalable infrastructure integrated with artificial intelligence and machine learning technologies. The tasks performed and the results achieved contribute to the development of innovative technologies and ensure that the network infrastructure meets the growing requirements of the market and users. The study has shown that efficient allocation of network resources within the optimized topology of 5G and 6G networks is possible through the introduction of software-defined networks (SDN), network function virtualization (NFV), and the development of dynamic resource management algorithms. This ensures high performance, flexibility and reliability of the network, meeting the growing demands of users and supporting innovative services and applications.

Keywords: optical line terminal, optical splitter, passive optical network, optical network terminal, IP-based multiprotocol label switching information and communication network, aggregation transport node, edge transport node, dynamic spectrum allocation, software-controlled network

Постановка наукової проблеми. Впровадження програмно-керованих мереж на основі 5G і 6G є необхідним кроком для досягнення гнучкості, масштабованості та ефективності сучасних телекомунікаційних систем. SDN дозволяє ефективно управляти мережевими ресурсами, оптимізувати трафік, забезпечувати високу якість обслуговування, а також підвищувати безпеку та надійність мереж. Зі впровадженням 6G ці технології стануть ще більш важливими, відкриваючи нові можливості для інновацій та розвитку.

Метою дослідження технологічних аспектів впровадження програмно-керованих мереж (Software-Defined Networking, SDN) у контексті 5G та 6G є дослідження та оптимізація підходів, методів і технологій, які дозволять забезпечити максимальну ефективність, гнучкість, безпеку та якість обслуговування в сучасних і майбутніх телекомунікаційних мережах. Це дослідження охоплює кілька ключових аспектів, які мають на меті задовольнити зростаючі вимоги до мережевої інфраструктури.

Основні цілі дослідження:

- Дослідження методів і підходів для динамічного та гнучкого управління мережевими ресурсами, що дозволить швидко адаптуватися до змін в умовах трафіку та вимог користувачів за рахунок використання централізованого управління, яке дозволяє легко змінювати конфігурацію мережі відповідно до поточних потреб та впровадження автоматизованих систем управління, які використовують алгоритми машинного навчання для оптимізації використання ресурсів;

- дослідження особливостей забезпечення ефективного розподілу мережевих ресурсів для максимального використання доступної пропускної здатності та мінімізації затримок за рахунок віртуалізації мережевих функцій (NFV) для створення гнучких та економічно ефективних мережевих архітектур та впровадження технологій динамічного розподілу ресурсів, які дозволяють швидко переналаштовувати ресурси у відповідь на зміни трафіку;

- дослідження особливостей забезпечення високої якості обслуговування для різних типів додатків та сервісів, включаючи ті, що вимагають низької затримки, високої пропускної здатності та надійності за рахунок впровадження технологій управління QoS, що дозволяють пріоритизувати трафік та забезпечувати необхідний рівень сервісу для критичних додатків та використання мережевих слайсів (Network Slicing) для створення віртуальних мереж, оптимізованих для конкретних сервісів і потреб користувачів.

- Створення умов для впровадження нових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), автономні системи, розумні міста та інші інноваційні додатки за рахунок передбачення підтримки широкого спектра нових додатків і сервісів завдяки використанню гнучкої та масштабованої мережевої інфраструктури та інтеграції з технологіями штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації управління мережею і оптимізації її роботи.

Оскільки дослідження технологічних аспектів впровадження програмно-керованих мереж у 5G та 6G полягає в забезпеченні підвищення ефективності, гнучкості, безпеки та високої якості обслуговування в сучасних та майбутніх телекомунікаційних мережах, тому задачі дослідження спрямовані на визначення інноваційних рішень, які дозволять мережам адаптуватися до змін, оптимізувати використання ресурсів та підтримувати нові технології, забезпечуючи тим самим відповідність сучасним вимогам ринку та користувачів.

Дослідження особливостей топологій мереж 5G та мережевого розгалуження є важливим кроком для розуміння і оптимізації роботи сучасних телекомунікаційних мереж. Основні задачі такого дослідження спрямовані на забезпечення ефективності, надійності, гнучкості та високої якості обслуговування в мережах 5G. Наведемо ключові задачі, які необхідно вирішити в рамках такого дослідження:

- Визначити оптимальну топологію мережі для забезпечення максимального покриття, мінімізації затримок та підвищення надійності з'єднання.

- Використання алгоритмів динамічної маршрутизації та програмно-визначених мереж (SDN) для оптимального розподілення трафіку.

- Дослідити вплив впровадження обчислювальних потужностей на край мережі (Edge Computing) на зменшення затримки та підвищення ефективності роботи додатків реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження технологічних аспектів впровадження програмно-керованих мереж (SDN) у контексті 5G та 6G є надзвичайно актуальним. Це зумовлено потребою у гнучкості, масштабованості, ефективності використання ресурсів, підвищенні якості обслуговування, безпеці та підтримці інноваційних сервісів. Впровадження SDN дозволить забезпечити адаптивність мереж до змін у попиті, ефективне управління ресурсами,

високий рівень безпеки та підтримку сучасних додатків і сервісів.

Бездротові системи зв'язку продовжують стрімко розвиватися, досягнувши етапу 5G, що забезпечує швидкість передачі даних до 20 ГГц. Завдяки цьому виникли нові концепції, такі як наднадійний низькошвидкісний зв'язок (uRLLC), розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) та масовий зв'язок машинного типу (mMTC). З'явився перехід від Інтернету речей (IoT) до Інтернету всього (IoE), що зробило комунікаційні системи, додатки та послуги більш інтелектуальними. Важливу роль у цьому відіграють такі технології, як штучний інтелект, блокчейн та великі дані. Завдяки цим інноваціям, розумні будинки, міста, інноваційні системи охорони здоров'я та автономні транспортні засоби стали невід'ємною частиною нашого життя [1].

5G додатки вже стали частиною нашого життя, а з 2030-х років очікується впровадження систем зв'язку шостого покоління (6G). Разом з розвитком 6G комунікаційних інфраструктур розглядаються концепції 3D-мереж, інтелектуальних мереж, квантового зв'язку, блокчейн-технологій, глибокого навчання та програмованих поверхонь. Інтернет речей (IoT) залишається ключовим елементом бездротової інфраструктури разом із системами 4G, 5G та майбутніми 6G. Методи доступу, протоколи та питання безпеки для цих систем також отримують детальне пояснення. Окрім цих методів доступу, розглядаються методи, що використовуються у з'єднаннях M2M (машина до машини) та IoT на кінцевих точках. Безпека стає значним викликом у цій екосистемі, де все пов'язано з усім [2].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Рівень доступу бездротової системи передачі даних 5G показаний на рис. 1. Як видно, гібридні системи доступу в мережах 5G спочатку підключаються через фронтальну магістраль, потім збираються на середньому рівні та доставляються в основну мережу 5G через багатопроTOCOLYну комутацію міток (MPLS). Такий підхід дозволяє ефективно об'єднувати різні типи трафіку і забезпечує надійний та швидкий доступ до мережевих ресурсів, оптимізуючи використання існуючої інфраструктури і підвищуючи загальну продуктивність мережі [3].

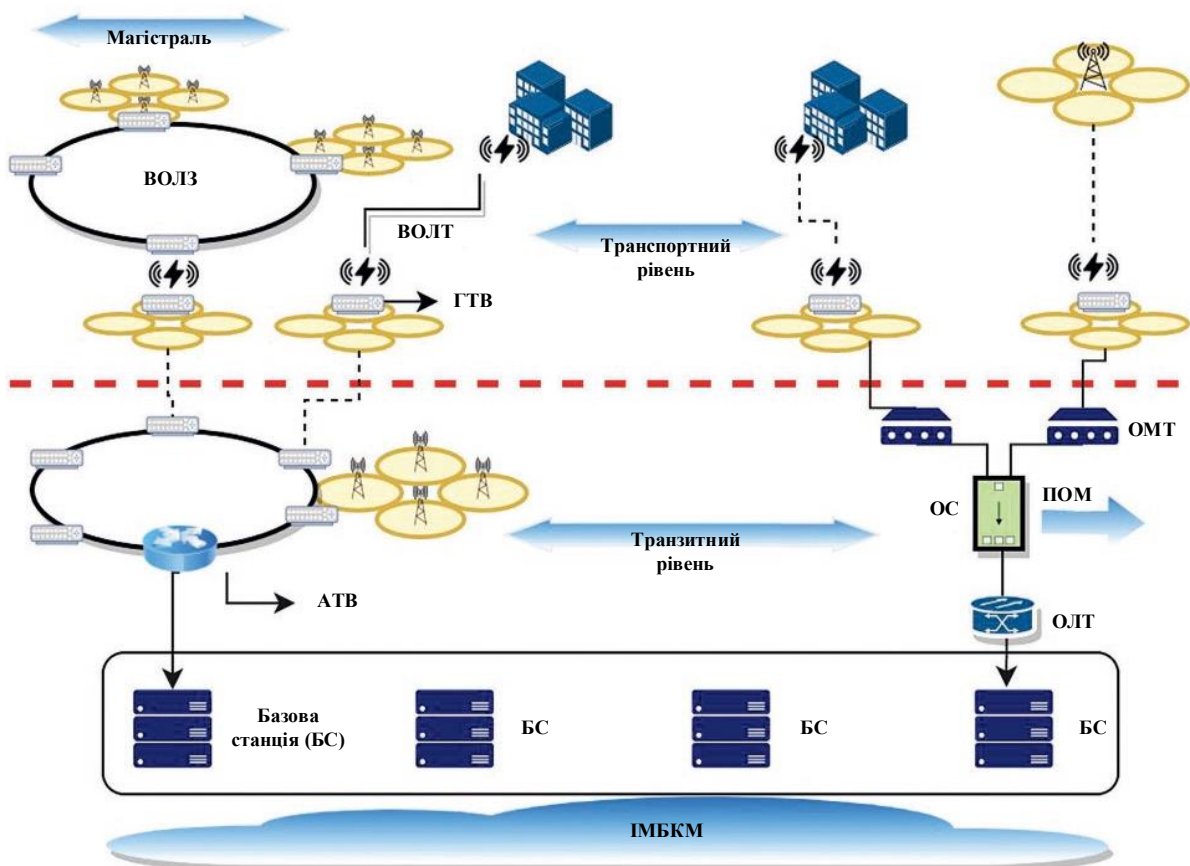


Рис. 1. Топологія сегменту мережі доступу 5G

Найважливішою зміною в мережах доступу 5G стало видалення рівня контролера радіомережі

(RNC) для мінімізації затримок і підключення базових станцій безпосередньо до опорної мережі через блоки базового діапазону. У порівнянні з 4G, в базовій мережі 5G відбулися революційні зміни в архітектурі, платформі, функціях, протоколах та інших сферах для задоволення вимог щодо кастомізації мережі, обслуговування, високої пропускну здатності, високої продуктивності та низької вартості (див. рис. 2) [4].

Вказані зміни можна розглянути з чотирьох основних аспектів. Еволюція в бік хмарних обчислень на основі нових розробок, функціонального програмного забезпечення, обчислень і функцій аналізу даних. Це означає перехід від традиційних мережевих пристроїв до хмарних мережевих функцій. Перехід від фіксованої жорсткої структури мережевих з'єднань між пристроями до динамічно конфігурованих гнучких мереж. Це включає в себе сервіс-орієнтовану структуру і нову архітектуру основного мережевого протоколу на основі інтернет-протоколу HTTP/2.0. Мінімальний дизайн для пересилання/маршрутизації даних і доступу користувачів. Мета полягає у спрощенні мережевої інфраструктури для підвищення ефективності та зменшення затримок. Архітектура мережі 5G орієнтована на вертикальні галузі промисловості. Концепція «мережа як послуга» (Network as a Service, NaaS) реалізується завдяки розгалуженню мережі, периферійним обчисленням і низькошвидкісному з'єднанню, що дозволяє переходити від універсальної послуги до персоналізованого та індивідуального сервісу. Такі підходи дозволяють мережам 5G відповідати високим вимогам користувачів та промисловості, забезпечуючи гнучкість, ефективність і масштабованість [5].

Мережа 5G еволюціонує від закритої системи до відкритої сервіс-орієнтованої архітектури, що забезпечує гнучку оркестрацію, аналіз і відкритість. Вона розбиває складні "окремні мережеві елементи" на модульні послуги, що підвищує гнучкість мережі. Кожна мережна функція складається з багатьох послуг, які формуються у невеликі сервісні модулі відповідно до потреб. Це робить архітектуру важливим інструментом для задоволення потреб вертикальних галузей в мережах 5G.

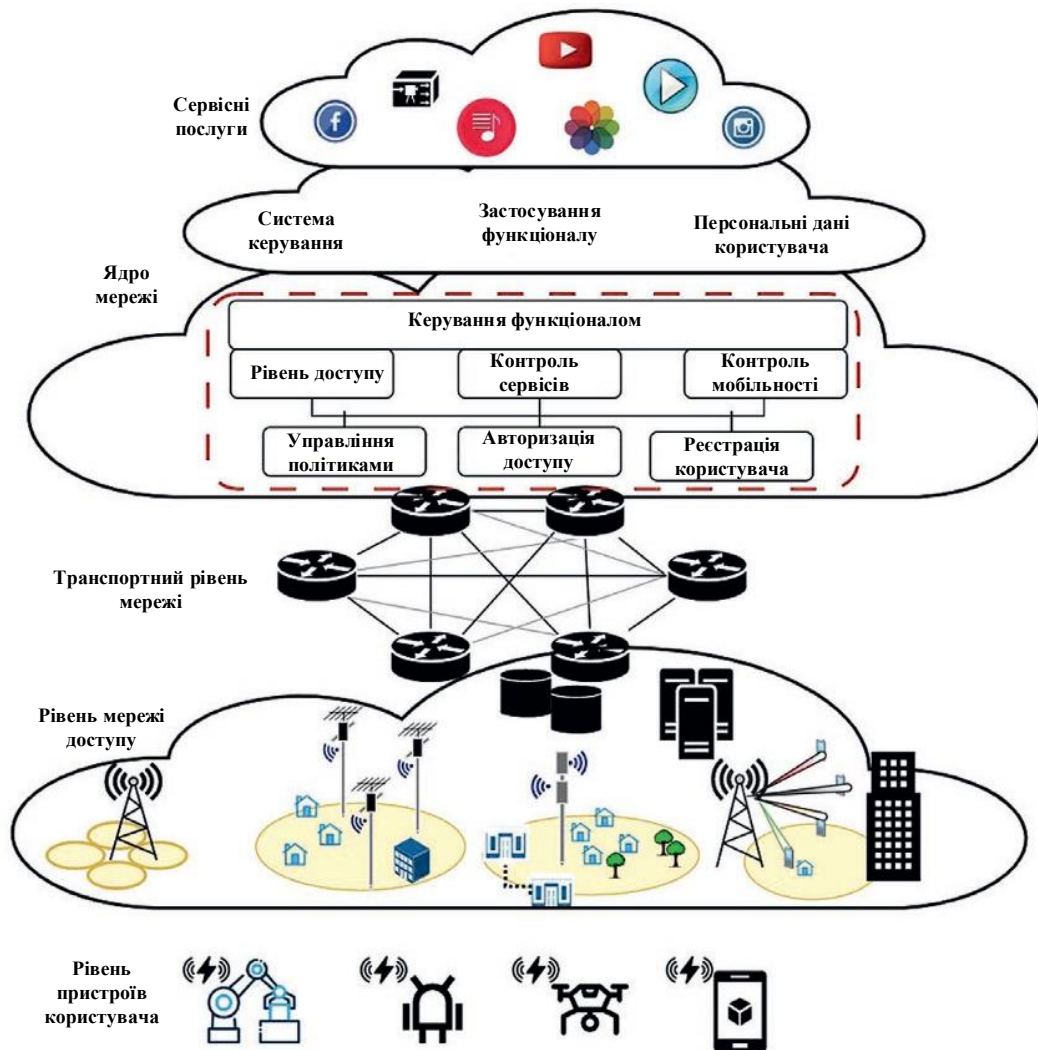


Рис. 2. Багаторівнева структура сегменту мережі 5G

Програмно-визначена мережа (SDN) передбачає розділення програмного забезпечення, що працює в мережі, і алгоритмів, що працюють у площині управління мережею. Це означає, що площина управління, де здійснюється управління мережею, і площина користувача, де передаються дані користувачів, розділені. За допомогою SDN мережеві пристрої керуються через програмні засоби управління або інтерфейси прикладного програмування (API), незалежно від виробника. SDN дозволяє створювати і контролювати віртуальні мережі або традиційне обладнання за допомогою програмного забезпечення. Віртуалізація мережі дозволяє організаціям сегментувати різні віртуальні мережі в межах однієї фізичної мережі або з'єднувати пристрої в різних фізичних мережах для створення єдиної віртуальної мережі. Таким чином, досягається високошвидкісне і гнучке управління мережевими пристроями, налаштовується мережева інфраструктура і забезпечується високий рівень безпеки.

Віртуалізація мережевих функцій (NFV) означає розділення програмного та апаратного рівнів комунікаційних мереж. Це дозволяє прозоро керувати такими функціями, як маршрутизація, брандмауер і балансування навантаження через віртуальні сервери. NFV забезпечує гнучке управління мережею і високий рівень безпеки, дозволяючи створювати віртуальні мережі на доступних серверах за допомогою технології віртуалізації.

Мережа 5G дозволяє інтегроване управління всією мережею і регіоном (рис. 3). Управління повним життєвим циклом мережі здійснюється гнучко, що дозволяє швидко налаштовувати мережеві з'єднання і маршрутизацію між центрами обробки даних. Завдяки цим інноваціям можна створити відкриту та розвинену архітектуру і послуги, орієнтовані на клієнта [6].

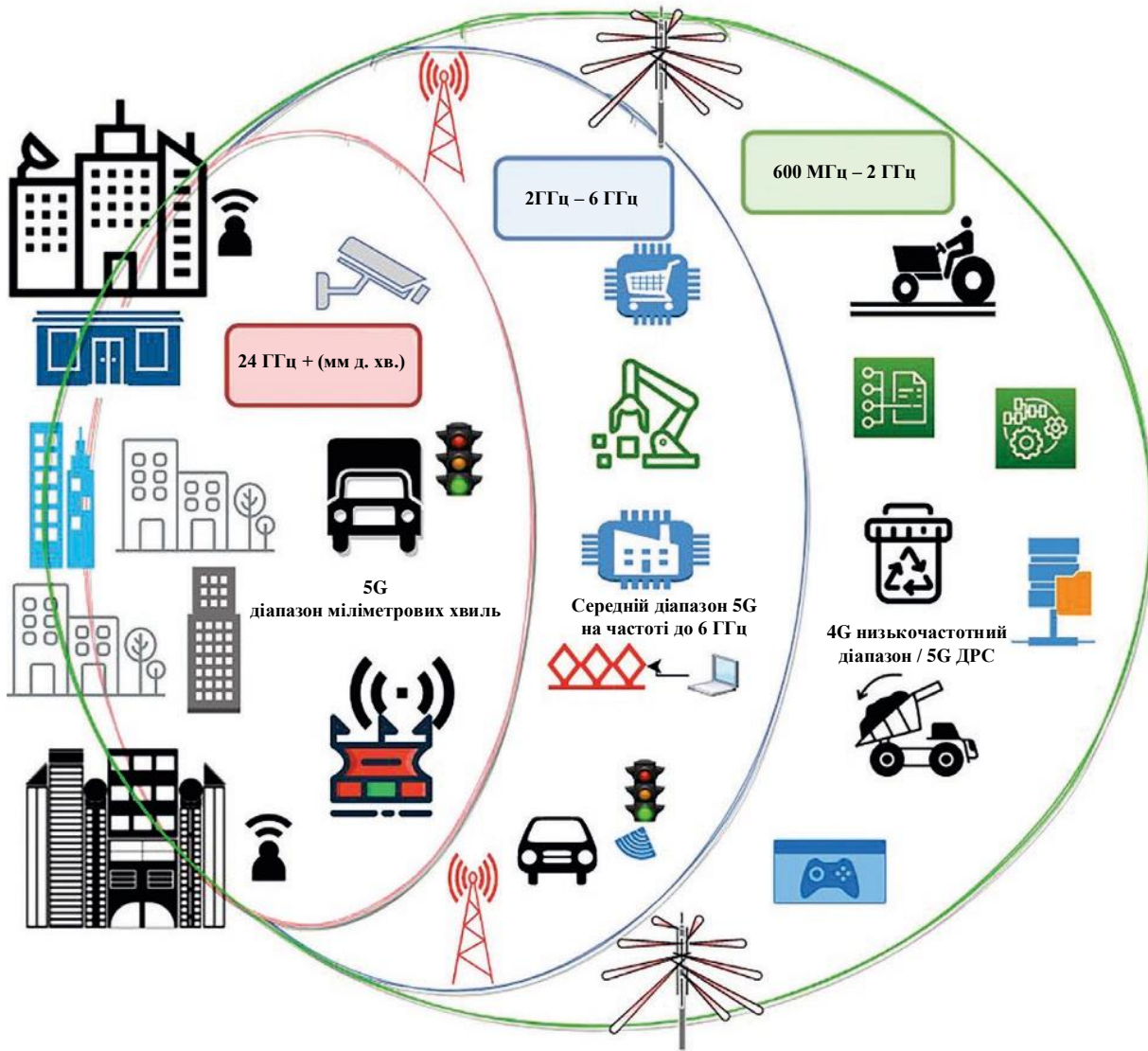


Рис. 3. Інтегрований функціонал сегменту мережі 5G

Завдяки трьом основним типам послуг 5G — eMBB, uRLLC і mMTC — користувачі отримали доступ до таких інноваційних сервісів, як електронна охорона здоров'я, доповнена і віртуальна реальність, інтелектуальні транспортні системи, розумні міста, розумні будівлі та мобільні ігри. Для ефективного надання цих послуг мережі 5G використовують підхід сегментації або мережевого розшарування (network slicing). Мережеве розшарування — це архітектурний підхід, який дозволяє створювати кілька підмереж (зрізів) у межах однієї фізичної інфраструктури. Кожен зріз призначений для підтримки конкретного типу сервісів і має свої характеристики і вимоги. Отже, SDN дозволяють централізовано керувати мережевою інфраструктурою за допомогою програмних засобів, що забезпечує гнучкість і динамічну конфігурацію мережі. Це полегшує створення і управління різними мережевими зрізами, дозволяє швидко адаптуватися до змін у вимогах сервісів. NFV дозволяє віртуалізувати мережеві функції, такі як маршрутизація, брандмауери і балансування навантаження, і виконувати їх на загальних серверних платформах. Це знижує витрати на обладнання, підвищує гнучкість і масштабованість мережі, дозволяє створювати віртуальні мережі для різних сервісів.

Мережі бездротового зв'язку 5G базуються на трьох основних видах сервісів, які роблять їх надзвичайно гнучкими і здатними задовольнити різноманітні потреби галузей і користувачів. Розглянемо кожен із цих сервісів більш детально.

Масивний машинний зв'язок (mMTC) передбачає підключення величезної кількості пристроїв, що використовуються для Інтернету речей (IoT) та підтримку високого рівня підключення для пристроїв з низьким енергоспоживанням і мінімальними вимогами до пропускної здатності. Пристрої mMTC споживають дуже мало енергії, що дозволяє їм працювати від батарей

протягом тривалого часу.

Приклади використання: мережі сенсорів для моніторингу навколишнього середовища; розумні лічильники для вимірювання енергоспоживання; системи відстеження логістики і постачання; персональна автоматизація і системи безпеки [7].

Наднадійний зв'язок з низькою затримкою (uRLLC) здійснює забезпечення високонадійного зв'язку з мінімальною затримкою, що важливий для застосувань, де швидкість і надійність передачі даних мають вирішальне значення.

Приклади використання: автономні транспортні засоби та системи V2X (Vehicle-to-Everything); дистанційне керування промисловим обладнанням; роботизована хірургія та інші медичні застосування; промислова автоматизація і контроль процесів.

Розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB) передбачає забезпечення високої пропускну здатності та швидкості передачі даних для підтримки додатків з інтенсивним використанням трафіку.

Приклади використання: потокове відео високої роздільної здатності (4K/8K); віртуальна і доповнена реальність (VR/AR); хмарні ігри та інші мультимедійні сервіси; відеоконференції з високою роздільною здатністю.

Отже, вказані типи сервісів роблять мережі 5G надзвичайно гнучкими та здатними задовольнити потреби різноманітних галузей і користувачів, від масових IoT пристроїв до високошвидкісних мультимедійних додатків і критично важливих застосувань, де кожна мілісекунда має значення. Завдяки mMTC, uRLLC і eMBB, 5G відкриває нові можливості для розвитку і впровадження інноваційних технологій у різних сферах життя та бізнесу (рис. 4).

Інфраструктура бездротового зв'язку розвивається в напрямку створення екосистеми, в якій люди і машини завжди пов'язані та взаємодіють з кількома пристроями одночасно. Щоб забезпечити таку щільно з'єднану інфраструктуру, бездротові мережі наступного покоління повинні бути гнучкими, масштабованими і здатними поєднувати різні архітектури та стандарти. Крім того, очікується, що ці мережеві інфраструктури забезпечать відповідні рішення для різних типів трафіку і гетерогенних типів мереж з такими основними вимогами, як ефективність, велика кількість підключених пристроїв, низька затримка та висока надійність. Для досягнення цих цілей мережі 5G використовують сучасні технології, такі як SDN, NFV, хмарні обчислення та периферійні обчислення. Це дозволяє забезпечити гнучку, ефективну та надійну інфраструктуру, здатну задовольнити потреби різноманітних користувачів та галузей [8].

Мережеве розширення дозволяє адаптувати мережу до конкретних потреб кожного типу сервісів. Це зменшує витрати на інфраструктуру, оптимізуючи використання фізичних ресурсів. Полегшує масштабування мережі для підтримки зростаючої кількості підключених пристроїв і сервісів. Забезпечує можливість надання індивідуальних рішень для різних вертикальних галузей, таких як охорона здоров'я, транспорт і розумні міста. Завдяки використанню технологій SDN та NFV, мережеве розширення формує основу для гнучкої та ефективної архітектури мереж 5G, здатної підтримувати різноманітні сучасні та майбутні сервіси. Мережеве розширення є ключовою технологією в архітектурі 5G, яка дозволяє створювати окремі віртуальні бездротові мережі для різних послуг з динамічною пропускну здатністю. Це забезпечує оптимізований розподіл ресурсів і топологію мережі для кожної ситуації, забезпечуючи бездротову інфраструктуру з певною угодою про рівень обслуговування (SLA).

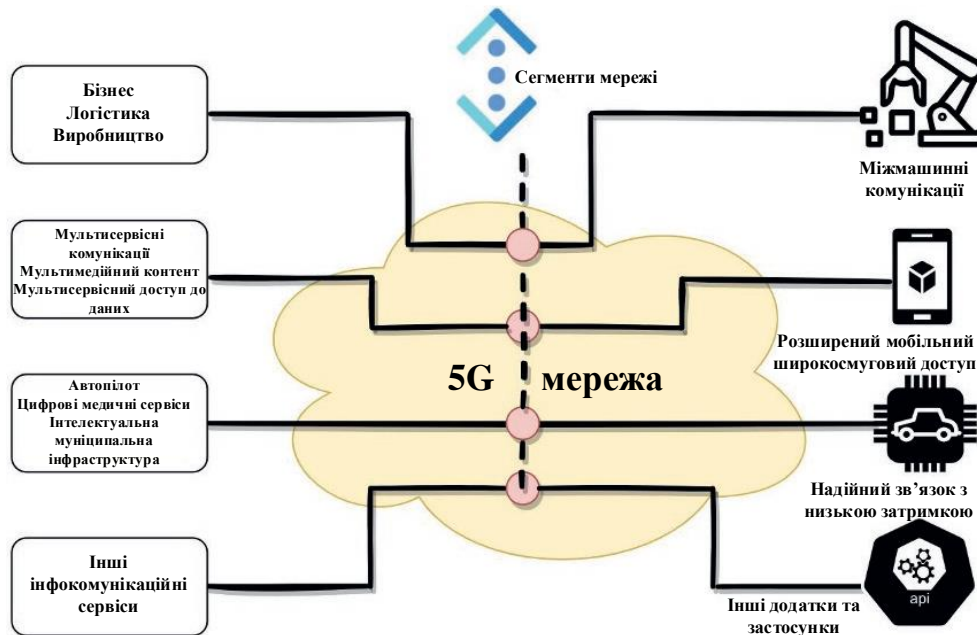


Рис. 4. Розподілення функціонального ресурсу інфокомунікаційної мережі

Для кожної послуги, такої як eMBB, uRLLC і mMTC, створюються окремі віртуальні мережі. Це дозволяє ефективно управляти ресурсами і задовольняти специфічні потреби кожної послуги. Мобільний широкосмуговий зв'язок працює в одному зрізі, забезпечуючи високу пропускну здатність і швидкість передачі даних. Наднадійний зв'язок з низькою затримкою працює в іншому зрізі, забезпечуючи мінімальну затримку та високу надійність. Масовий машинний зв'язок функціонує в окремому зрізі, підтримуючи велику кількість пристроїв з низьким енергоспоживанням. У кожному зрізі використовуються різні частоти як для доступу кінцевих пристроїв, так і для доступу до основної мережі. Це забезпечує оптимальне використання спектру і мінімізує інтерференцію між різними типами трафіку.

Мережеве розшарування дозволяє гнучко налаштовувати і масштабувати мережу в залежності від потреб користувачів і сценаріїв застосування. Це робить бездротову екосистему 5G гнучкою, надійною, масштабованою і керованою системою. Розподіл мережевих ресурсів оптимізується відповідно до потреб кожного зрізу, що забезпечує ефективне використання ресурсів і високу якість обслуговування. Мережеве розшарування підтримується технологіями віртуалізації мережевих функцій (NFV) і програмно-визначених мереж (SDN). Це дозволяє створювати віртуальні підмережі і резервувати ресурси відповідно до потреб клієнтів. Промислова віртуалізація з мережевим розшаруванням дозволяє налаштовувати мережеву інфраструктуру відповідно до специфічних вимог різних галузей. Кожен зріз налаштовується відповідно до вимог конкретного застосування або користувача, забезпечуючи високий рівень персоналізації та задоволення потреб. Оптимізований розподіл ресурсів і віртуалізація мережевих функцій знижують витрати на інфраструктуру і підвищують ефективність використання мережевих ресурсів. Забезпечення окремих зрізів для різних типів трафіку підвищує надійність і продуктивність мережі, дозволяючи обслуговувати різні сервіси з високою якістю. Таким чином, мережеве розшарування у 5G створює основу для гнучкої, ефективної і масштабованої бездротової інфраструктури, здатної задовольнити різноманітні потреби користувачів і промисловості [1].

Інфраструктура 6G, яка розвивається, базується на використанні великих даних (Big Data), що генеруються всіма підключеними пристроями в екосистемі Інтернету всього (Internet of Everything, IoE). Ці дані компілюються і збираються за допомогою методів штучного інтелекту (ШІ) і передаються на сервери в кібернетичному світі. В подальшому, методи оцінювання і виявлення знань будуть застосовуватися для перетворення зібраних даних у цінну інформацію, що стане практичними інструментами для дій у фізичному світі. Розглянемо тенденції та технології, які визначатимуть розвиток мереж 6G.

Використання ШІ для компіляції, аналізу та інтерпретації великих обсягів даних, що генеруються пристроями IoE. Впровадження методів оцінювання і виявлення знань для

перетворення зібраних даних у корисну інформацію.

Забезпечення підключеності для всіх типів пристроїв і систем, включаючи персональні гаджети, промислові машини та побутові прилади. Розширення використання сенсорних мереж для збору даних з фізичного світу.

Використання даних, зібраних у кібернетичному світі, для прийняття рішень і виконання дій у фізичному світі.

Використання нових частотних діапазонів для забезпечення вищих швидкостей передачі даних і більшої пропускну здатності. Розвиток антенних систем для поліпшення якості сигналу і покриття.

Впровадження квантових обчислень і квантового зв'язку для підвищення безпеки і продуктивності мереж.

Використання SDN і NFV для створення гнучких і адаптивних мереж, що можуть динамічно змінювати свою конфігурацію відповідно до потреб користувачів. Застосування концепції мережевого розшарування для підтримки різних типів сервісів і оптимізації використання ресурсів.

Розробка автономних систем управління мережами, що використовують ШІ для автоматичного налаштування і оптимізації мережевих параметрів.

Впровадження технологій, що знижують енергоспоживання мережевих компонентів і пристроїв. Використання відновлюваних джерел енергії для живлення мережевих інфраструктур.

Налаштування мережевих послуг відповідно до індивідуальних потреб користувачів і галузей, забезпечуючи високий рівень персоналізації.

Використання технологій 6G для створення розумних міст з інтегрованими системами управління транспортом, енергоспоживанням, безпекою та іншими аспектами міського життя.

Отже, розвиток 6G базуватиметься на поєднанні новітніх технологій і підходів для створення високоефективної, гнучкої та адаптивної мережевої інфраструктури. Використання штучного інтелекту, великих даних, квантових обчислень, інтернету всього та інших передових технологій забезпечить створення нових можливостей для бізнесу та покращення якості життя користувачів [2].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Зміни, які відбуваються в мережах бездротового зв'язку, вже мають значний вплив на різні аспекти нашого життя і бізнесу. З впровадженням 5G і майбутнім розвитком 6G, ці зміни стануть ще більш помітними і масштабними. Використання машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування попиту на трафік та адаптації мережі в режимі реального часу дозволяє забезпечити оптимальне розподілення ресурсів і мінімізувати затримки. Використання програмно-визначених мереж (SDN) і мережної функціональної віртуалізації (NFV) забезпечить динамічне управління мережевими ресурсами і швидке адаптування до змін в трафіку.

Обробка даних на крайових пристроях ближче до джерела даних зменшує затримку і знижує навантаження на магістральні мережі. Це особливо важливо для додатків, що вимагають реального часу, таких як автономні транспортні засоби та промислова автоматизація. Додаткова оптимізація обчислень ще ближче до пристроїв-користувачів дозволяє ще більш ефективно використовувати ресурси і забезпечувати високу продуктивність.

З 6G очікується, що жодна область не залишиться без покриття, включаючи віддалені та важкодоступні регіони. Це забезпечить глобальний доступ до високошвидкісного інтернету та підключення до мережі. Системи бездротового зв'язку 6G стануть інтегрованими з фізичним середовищем, створюючи своєрідний кіберорганізм. Це включає інтеграцію з інтелектуальними системами, такими як інтернет речей (IoT), розумні міста і навіть біологічні системи.

Впровадження нових технологій дозволить автоматизувати багато бізнес-процесів, підвищуючи їх ефективність і продуктивність. З'являться нові бізнес-моделі і можливості, такі як розширена реальність, дистанційне керування і передбачуване обслуговування. Розширене покриття і швидкий інтернет забезпечать доступ до якісних медичних послуг, освіти та розваг навіть у віддалених районах. Поліпшення якості зв'язку сприятиме більш інтерактивним та багатофункціональним способам спілкування та співпраці.

Розвиток 5G та майбутній перехід до 6G обіцяють значні зміни в технологічній інфраструктурі, що вплинуть на всі аспекти нашого життя. Інтелектуальне управління трафіком, обчислювальна інфраструктура, повне покриття і концепція кіберорганізму зроблять мережі бездротового зв'язку більш ефективними, надійними і всеохоплюючими. Це відкриє нові можливості для бізнесу, покращить якість життя і сприятиме розвитку інновацій.

Список бібліографічного опису

1. Васильківський, М. В. Програмні технології в інфокомунікаційних системах. Навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Васильківський М. В., Бортник Г. Г., Кичак В. М. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 141 с.
2. Васильківський, М., Коломієць, А., & Грабчак, Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>
3. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Нікітович, Д. (2023). Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж. Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41
4. М. Васильківський, О. Городецька, Б. Климчук, і В. Говорун, «Стратегії технологічного розвитку апаратного забезпечення інфокомунікаційних радіомереж», ІТКІ, вип. 56, вип. 1, с. 83–91, Бер 2023.
5. Chowdhury, M.Z., Shahjalal, M., Ahmed, S., and Jang, Y.M. (2020). 6G wireless communication systems: applications, requirements, technologies, challenges, and research directions. IEEE Open Journal of the Communications Society 1: 957–975.
6. Tripathi, S., Sabu, N.V., Gupta, A.K., and Dhillon, H.S. (2021). Millimeter- wave and terahertz spectrum for 6G wireless. In: 6G Mobile Wireless Networks, 83–121. Cham: Springer International Publishing.
7. ElMossallamy, M.A., Zhang, H., Song, L. et al. (2020). Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: principles, challenges, and opportunities. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking 6 (3): 990–1002.
8. Chaoub, A., Giordani, M., Lall, B. et al. (2022). 6G for bridging the digital divide: wireless connectivity to remote areas. IEEE Wireless Communications 29 (1): 160–168.

References

1. [Vasykivskiyi, M. V. Prohramni tekhnolohii v infokomunikatsiinykh systemakh. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 172 «Telekomunikatsii ta radiotekhnika» : elektronnyi navchalnyi posibnyk kombinovanoho (lokalnoho ta merezhnoho) vykorystannia [Elektronnyi resurs] / Vasykivskiyi M. V., Bortnyk G. G., Kychak V. M. – Vinnytsia : VNTU, 2023. – 141 s. [in Ukrainian].
2. Vasykivskiyi, M., Kolomiets, A., & Hrabchak, N. (2022). Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiinykh merezh 6G. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52> [in Ukrainian].
3. Vasykivskiyi, M., Prykmeta, A., Oliinyk, A., & Nikitovych, D. (2023). Optyimizatsiia intelektualnykh telekomunikatsiinykh merezh. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Tekhnichni nauky. – 2023. – № 1. (317). – S. 33–41. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41 [in Ukrainian].
4. M. Vasykivskiyi, O. Horodetska, B. Klymchuk, i V. Hovorun, «Stratehii tekhnolohichnoho rozvytku aпаратноho zabezpechennia infokomunikatsiinykh radiomerezh», ІТКІ, вып. 56, вып. 1, с. 83–91, Бер 2023. [in Ukrainian].
5. Chowdhury, M.Z., Shahjalal, M., Ahmed, S., and Jang, Y.M. (2020). 6G wireless communication systems: applications, requirements, technologies, challenges, and research directions. IEEE Open Journal of the Communications Society 1: 957–975.
6. Tripathi, S., Sabu, N.V., Gupta, A.K., and Dhillon, H.S. (2021). Millimeter- wave and terahertz spectrum for 6G wireless. In: 6G Mobile Wireless Networks, 83–121. Cham: Springer International Publishing.
7. ElMossallamy, M.A., Zhang, H., Song, L. et al. (2020). Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: principles, challenges, and opportunities. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking 6 (3): 990–1002.
8. Chaoub, A., Giordani, M., Lall, B. et al. (2022). 6G for bridging the digital divide: wireless connectivity to remote areas. IEEE Wireless Communications 29 (1): 160–168.