УДК 621.391
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/23

Сколець С. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравчук С. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВІРТУАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖНИХ ФУНКЦІЙ У 5G: ПІДХОДИ, АРХІТЕКТУРА ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У статті розглянуто підходи до віртуалізації мережних функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN) у мобільних мережах п'ятого покоління (5G). Аналізуються сучасні методи реалізації цих технологій, їхня роль у побудові гнучкої, масштабованої та ефективної мережневої інфраструктури, а також ключові виклики та перспективи їхнього впровадження.

Основна мета статті *– дослідити архітектурні рішення, що дозволяють ефективно відокремлювати мережні функції від апаратного забезпечення, забезпечуючи динамічну оркестрацію та автоматизоване управління ресурсами. Для цього здійснено огляд основних моделей розподілу мережних функцій у 5G, таких як повна хмарна міграція, міграція С-площини у хмару та сценарний підхід до розподілу навантаження між хмарною та мобільною інфраструктурою.*

Окрему увагу приділено концепціям управління мережею за допомогою SDN, розподілу контрольної та користувацької площин (C-plane/U-plane), а також їхнього впливу на продуктивність, затримки та масштабованість мережі.

Представлено огляд актуальних досліджень у сфері стандартизації 5G, визначено потенційні напрями розвитку технологій NFV та SDN, а також окреслено ключові виклики, які потребують подальшого вивчення для досягнення високої ефективності та надійності мобільних мереж нового покоління.

Результати. *У ході дослідження було визначено ключові підходи до реалізації віртуалізації мережних функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN) у мобільних мережах 5G. Аналіз існуючих архітектурних рішень показав, що застосування NFV дозволяє зменшити залежність від спеціалізованого обладнання та забезпечує гнучкість у розподілі ресурсів, тоді як SDN сприяє оптимізації управління мережею за рахунок централізованого контролю та розподілу навантаження. Розглянуто три основні стратегії міграції мережних функцій у 5G: повна хмарна міграція, міграція С-площини у хмару та сценарний підхід. Визначено основні переваги та недоліки кожного методу, а також їхній вплив на продуктивність мережі, затримки та масштабованість.*

Висновки. *Дослідження підтвердило, що впровадження NFV та SDN у 5G-мережі сприяє підвищенню ефективності управління ресурсами, зниженню капітальних та операційних витрат операторів, а також пришвидшенню розгортання нових послуг. Аналіз існуючих рішень показав, що застосування розподілених архітектур, динамічного керування мережею та оркестрації ресурсів є ключовими факторами для успішного розвитку 5G. У статті також визначено основні виклики, пов'язані з масштабованістю, безпекою та продуктивністю SDN/NFV у мобільних мережах, що потребують подальших досліджень.*

Ключові слова: *5G, віртуалізація мережних функцій (NFV), програмно-визначені мережі (SDN), управління мережею, C-plane/U-plane,, мобільна інфраструктура.*

Постановка проблеми. На даний час мобільні мережі електронних комунікацій стикаються зі стрімким зростанням обсягу переданого трафіку, що обумовлено активним впровадженням мобільних застосунків та сервісів із різноманітними вимогами до якості обслуговування (наприклад, Netflix, YouTube, хмарні ігрові платформи). П'яте покоління (5G) мереж мобільного зв'язку покликане забезпечити ефективну підтримку таких застосунків, а також відкрити нові можливості для реалізації найбільш вимогливих до своїх характеристик сервісів, зокрема:

– масштабних комунікацій між пристроями (mMTC – Massive Machine Type Communications), які передбачають обмін даними між величезною кількістю IoT-пристроїв;

– надійних з низькою затримкою комунікацій (UR-LLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications), які необхідні для критично важливих сценаріїв, таких як автономний транспорт, віддалена хірургія та промислові автоматизовані системи.

Щоб досягти поставлених цілей, у 5G-мережах використовуються нові інноваційні технології, такі як:

– спеціалізовані радіоінтерфейси, зокрема mmWave (міліметрові хвилі) для надвисокошвидкісного з'єднання;

– гетерогенні радіомережі RAN (Heterogeneous Radio Access Networks), що поєднують різні технології доступу;

– змішане покриття за допомогою макро- та мікростільників, що підвищує ємність мережі;

– віртуалізація мережних функцій (NFV) для гнучкого розгортання сервісів та масштабованості інфраструктури.

Такі інновації призводять до значного ускладнення архітектури мережі, оскільки вона повинна підтримувати різноманітні технології з різними стековими протоколами та інтерфейсами, що часто залежать від конкретних постачальників обладнання.

Управління такою складною мережею неможливе без впровадження SDN, які відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності 5G-інфраструктури. Застосування SDN дозволяє відокремлювати площину управління (C-plane) від площини користувацьких даних (U-plane) за допомогою стандартизованих інтерфейсів, таких як OpenFlow [1], централізовано контролювати маршрутизацію трафіку та спрощує адміністрування мережі.

Подібні підходи пропонується впроваджувати в центрах обробки даних та проводових мережах, де SDN забезпечує централізоване управління та адаптивну конфігурацію. У сфері мобільних мереж дослідження з інтеграції SDN вже активно проводяться для:

– радіомереж (RAN) – адаптивне управління спектром і динамічний розподіл ресурсів [2];

– ядра мобільної мережі (Core Network) – оптимізація маршрутизації та гнучке управління трафіком [3];

– безпроводових мереж, не пов'язаних із стільниковими технологіями, таких як Wi-Fi або LoRaWAN [4].

Реалізація концепцій SDN у мобільних мережах стає критично важливим фактором для ефективного впровадження 5G, забезпечення високої продуктивності та підтримки майбутніх мережних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Віртуалізація та програмна реалізація SDN у 5G-системах є темою багатьох дослідницьких робіт. Отримані результати таких робіт підкреслюють переваги підходів віртуалізації для виконання вимог до 5G-мереж.

Запропоновані підходи до створення архітектури 5G-мереж можна класифікувати на три основні категорії, кожна з яких визначається розташуванням мережних функцій.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз підходів до віртуалізації мережних функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN) у 5G-мережах з акцентом на їхню роль у покращенні керованості, масштабованості та ефективності інфраструктури. Основна увага приділяється розгляду архітектурних рішень для розподілу мережних функцій, серед яких: повна хмарна міграція, перенесення площини управління в хмару та гібридний підхід із динамічним балансуванням навантаження. Також розглядаються механізми управління мережею на основі SDN, зокрема відокремлення контрольної та користувацької площин (C-plane/U-plane) та їхній вплив на продуктивність і затримки в мережі. Проведений аналіз дозволяє визначити ключові виклики, пов'язані з впровадженням SDN та NFV, а також сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо їхнього подальшого вдосконалення та інтеграції в мобільні мережі наступного покоління.

Підхід 1. Архітектура повної міграції в хмару (Full-Cloud Migration Architecture). Це рішення передбачає розміщення всіх мережних функцій у хмарі, що належить оператору, яка централізовано керує всіма мережневими функціями та процесами сигналізації рис. 1.

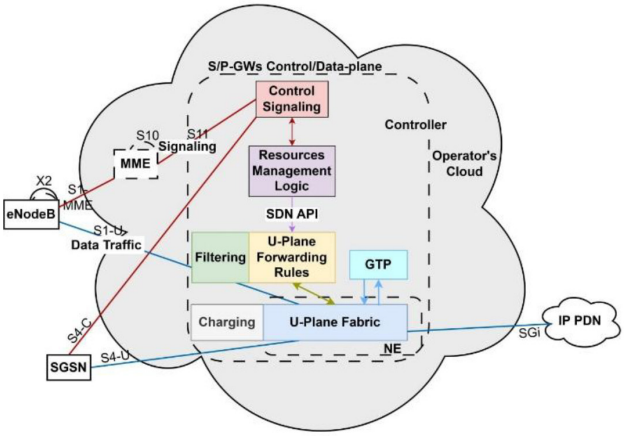

Рис. 1. Архітектура повної міграції в хмару

Переваги архітектури повної міграції в хмару:

– висока доступність мережі завдяки централізованому управлінню;

– легка інтеграція та взаємодія з іншими технологіями та протоколами, які можуть бути інтегровані на рівні хмари;

– зниження витрат, оскільки відпадає необхідність у використанні географічно розподілених обчислювальних і сховищних ресурсів;

– простота обслуговування та оновлення, при цьому гарантується висока продуктивність обчислень та зберігання.

Такий підхід був представлений в дослідженнях [5], [6], [7].

Основна ідея повної міграції в хмару полягає в тому, що всі рішення щодо управління C- та U-площин приймаються централізовано в хмарному середовищі. Додаткові деталі архітектури були запропоновані в [8], де визначаються три рівні контролерів:

– контролер пристроїв (Device Controller) – відповідає за вибір мережі доступу;

– контролер рівня краю (Edge Controller) – займається автентифікацією, безпекою, управлінням доступом, маршрутизацією та хендоверами;

– контролер оркестрації (Orchestration Controller) – виконує керування мережевими ресурсами, зокрема інстанціювання C-площини та балансування U-площини.

Недоліки архітектури повної міграції в хмару:

– обмеження продуктивності хмарної інфраструктури. Через часті операції C-площини та великий обсяг U-трафіку, який повинен оброблятися на PGW [9], підключення eNodeB до хмари може стати вузьким місцем. Це призводить до проблем із надійністю, пропускною здатністю та затримками, що нівелює переваги цієї архітектури;

– обмежена гнучкість. Оскільки всі функції мобільного ядра централізовані в хмарі, ця архітектура забезпечує гнучкість лише у створенні різних функціональних ланцюжків у межах хмари. Вона не підтримує розподілене розміщення мережних функцій у мережі, що обмежує адаптивність системи.

Підхід 2. Архітектура міграції C-площини в хмару (C-plane Cloud Migration Architecture). Ця архітектура передбачає розподіл функцій C- та U-площин, як це розглянуто у [10]. Відповідно до рис. 2, eNodeBs (або virtual-eNodeBs) керуються центральною хмарою з точки зору C-площини, тоді як U-трафік маршрутизується через розподілені вузли U-площини по всій мережі, рис. 2.

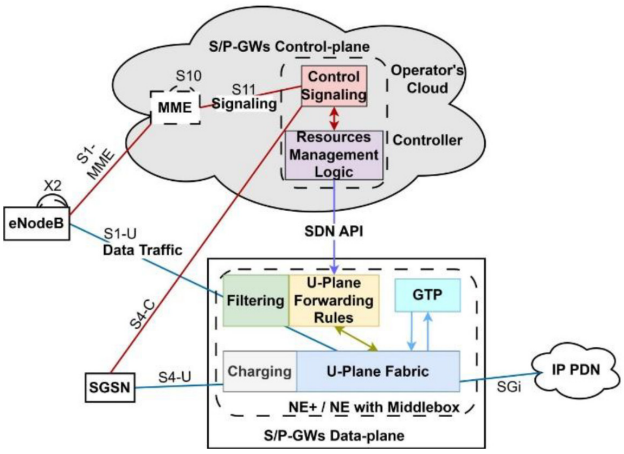

Рис. 2. Архітектура міграції C-площини в хмару

Переваги архітектури міграції C-площини в хмару:

– вища гнучкість завдяки можливості динамічного мігрування віртуалізованих компонентів U-площини залежно від навантаження трафіку або вимог сервісів [11];

– зменшення ефекту «вузького місця», яке може виникати через повну централізацію мобільного ядра в хмарі.

Однак цей підхід має і негативні аспекти:

– необхідність переміщення критичних функцій (наприклад, GTP-тунелювання) на U-площину для запобігання передачі всіх пакетів даних через хмару;

– може вимагати використання спеціалізованого апаратного забезпечення (middleboxes) або постачання комутуючих елементів із програмованими платформами, які зможуть обробляти такі функції.

Підхід 3. Архітектура сценарної міграції (Scenario-based Migration Architecture). Основна ідея цього підходу полягає в тому, щоб розгортати мережні функції як у хмарі, так і в мобільній інфраструктурі. При цьому міграція функцій відбувається залежно від умов перевантаження мережі та вимог сервісів [12].

Як видно з рис. 3, деякі мережні функції можуть працювати у хмарах на краю мережі (edge clouds) [13], що дозволяє досягти вищої гнучкості та масштабованості.

Ця архітектура дозволяє розгортати функції безпосередньо на краю мережі для сервісів, чутливих до затримок, або для сценаріїв, які потребують додаткових функціональних можливостей (наприклад, підтримка не-3GPP точок доступу).

Приклади досліджень. Так, в [12] проаналізовано переваги переміщення мережних функцій в межах мобільної інфраструктури та показали,

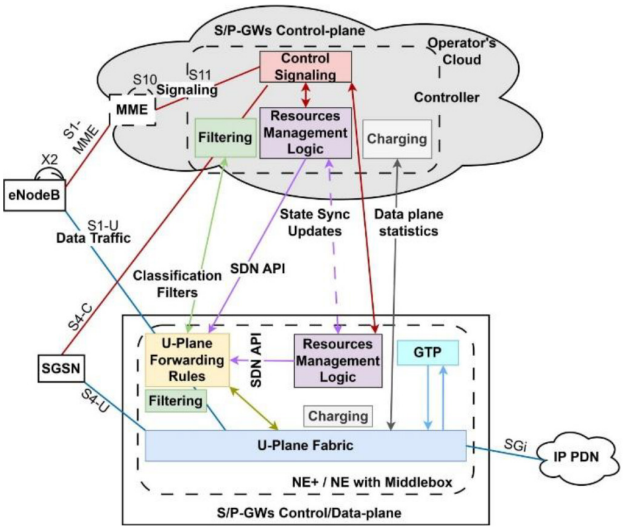

Рис. 3. Архітектура сценарної міграції

що переміщення функцій ближче до радіодоступу дозволяє економити до 48 % мережних ресурсів. В [10] запропоновано переміщати функції тарифікації у хмару, обмінюючись статистичними даними з іншими компонентами мобільної інфраструктури. Дослідники в [13] розробили оптимальну модель розташування мережних функцій, яка мінімізує вартість передавання пакетів.

Переваги архітектури сценарної міграції:

– швидке переналаштування та підвищена стійкість у випадку змін у мережі або відмов завдяки підтримці динамічної топології мережі;

– можливість забезпечення ультра низької затримки та оптимізації end-to-end з'єднання;

– підтримка масштабного підключення великої кількості пристроїв, що є ключовим фактором для 5G-мереж.

Недоліки цього підходу:

– необхідність синхронізації станів між хмарними мережами та розподіленими елементами мобільної інфраструктури, що може створювати додаткові витрати на сигналізацію [10];

– коли функції переміщуються за межі центральної хмари, виникають обмеження в продуктивності обробки та зберігання, оскільки хмарна архітектура не використовується повною мірою.

Виклад основного матеріалу. Розвиток мобільних мереж 5G супроводжується зростаючими вимогами до гнучкості, масштабованості та економічної ефективності інфраструктури. Впровадження віртуалізації мережних функцій (NFV, Network Function Virtualization) є одним із ключових напрямків оптимізації мобільних операторських мереж, що дозволяє відокремити мережні сервіси від фізичного обладнання та реалізувати їх у вигляді програмних модулів, які можуть динамічно змінювати місце свого розгортання відповідно до поточного навантаження та вимог до продуктивності.

1. Проблеми традиційної архітектури мобільних мереж

Класична архітектура операторських мереж базується на використанні спеціалізованого апаратного забезпечення (маршрутизатори, комутатори, вузли EPC, RAN-контролери тощо). Це призводить до низки проблем:

– високі капіталовкладення (CAPEX) та операційні витрати (OPEX). Для впровадження нових сервісів необхідне придбання та встановлення додаткового обладнання, що збільшує витрати операторів;

– тривалий життєвий цикл обладнання. Устаткування має обмежений термін служби (5–10 років), а його оновлення потребує значних ресурсів;

– обмежена гнучкість. Традиційна мережнева інфраструктура має жорстку структуру, що ускладнює швидке впровадження нових послуг або масштабування ресурсів відповідно до трафіку;

– обмежені можливості автоматизації. Відсутність програмно-керованого управління ускладнює динамічну зміну конфігурації мережі та оптимізацію її роботи.

2. Основи NFV та її роль у 5G

Концепція NFV спрямована на усунення вищезазначених проблем шляхом перенесення мережних функцій (наприклад, EPC, SGW, PGW, HSS, MME) у програмне середовище, що працює на стандартному серверному обладнанні у віртуальних середовищах (VM, контейнерах або мікросервісах).

NFV дозволяє реалізувати:

– програмну реалізацію мережних функцій. Наприклад, віртуальний маршрутизатор (vRouter), віртуальна базова станція (vBTS), віртуальний брандмауер (vFirewall) тощо;

– гнучке керування розгортанням сервісів. Динамічне масштабування ресурсів відповідно до навантаження дозволяє ефективно використовувати серверні потужності та оптимізувати витрати;

– розподілену інфраструктуру. NFV дає змогу розгортати функції як у централізованих дата-центрах, так і на периферійних вузлах (Mobile Edge Computing, MEC) [14].

3. Архітектура NFV за стандартом ETSI

Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) визначив референсну архітектуру NFV, яка складається з чотирьох основних рівнів (рис. 4):

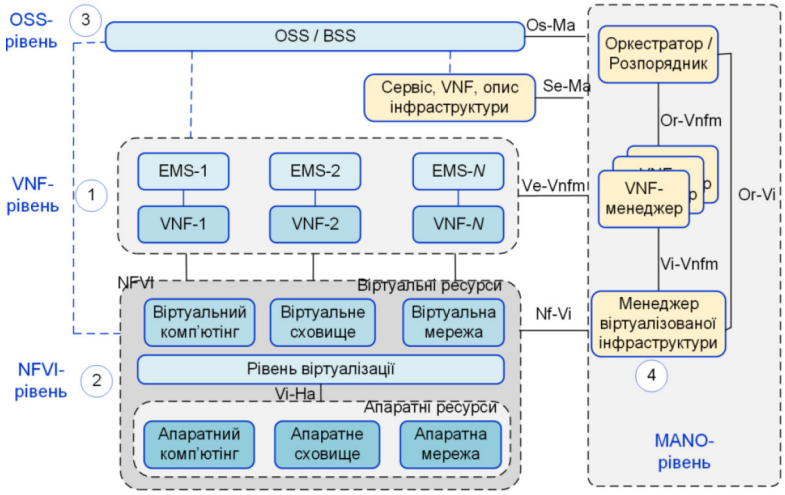

Рис. 4. Структура NFV [14]

1. Рівень віртуалізованих мережних функцій (VNF). Включає програмно реалізовані мережні функції, які виконуються у віртуальному середовищі (наприклад, віртуальний EPC, віртуальний маршрутизатор, віртуальний NAT).

2. Інфраструктурний рівень (NFVI). Складається з апаратних та програмних компонентів, що забезпечують виконання віртуальних мережних функцій. Включає:

- Фізичні ресурси: сервери, сховища даних, комутатори.
- Рівень віртуалізації: забезпечує ізоляцію та динамічне керування віртуальними машинами та контейнерами.

3. Рівень операційної підтримки (OSS/BSS). Відповідає за керування послугами, абонентською базою та білінгом.

4. Рівень управління та оркестрації (MANO). Включає три основні компоненти:

- оркестратор NFV. Відповідає за створення, розгортання та видалення віртуальних функцій у мережі;
- менеджер віртуалізованої інфраструктури (VIM). Керує ресурсами дата-центрів і MEC-вузлів;
- менеджер VNF. Відповідає за життєвий цикл кожної віртуальної функції (оновлення, моніторинг, масштабування).

4. Переваги NFV у 5G

Використання NFV у мобільних мережах нового покоління забезпечує низку ключових переваг:

– гнучкість та масштабованість. Легке розгортання нових послуг без необхідності оновлення фізичної інфраструктури;

– зниження CAPEX та OPEX. Відмова від спеціалізованого обладнання та перехід до використання стандартних серверів дозволяє значно скоротити витрати операторів;

– прискорення розгортання послуг. Динамічне управління ресурсами дозволяє операторам швидко адаптуватися до змін ринку;

– інтеграція з хмарними та периферійними обчисленнями. Використання MEC та централізованих хмарних платформ дає змогу підвищити продуктивність мережі та зменшити затримки;

– програмно-керована автоматизація. NFV тісно інтегрується з SDN, що забезпечує централізоване управління трафіком, оптимізацію маршрутів та балансування навантаження.

5. Виклики та перспективи розвитку

Незважаючи на численні переваги, впровадження NFV у 5G-мережах має низку викликів:

– високі вимоги до продуктивності. Віртуалізація функцій може призводити до затримок, тому необхідні оптимізовані рішення для обробки трафіку (наприклад, апаратне прискорення DPDK);

– забезпечення безпеки. Оскільки NFV передбачає широку інтеграцію з хмарними сервісами, необхідні нові механізми кібербезпеки;

– складність управління життєвим циклом VNF. Різні оператори використовують відмінні підходи до розгортання NFV, що вимагає розробки уніфікованих стандартів та API.

Перспективи подальших досліджень. У попередніх розділах було розглянуто роль SDN та віртуалізації в системах 5G з різних точок зору. У цьому розділі визначено напрями досліджень, які ще потребують вивчення для ефективного використання цих технологій у мережах 5G.

Одним із ключових напрямків для подальшого дослідження є розміщення мережних функцій. Розширюючи роботи [15], [16], добре розроблена

модель витрат має враховувати як вхідні дані цільові вимоги QoS:

– пропускна здатність,
– затримка,
– джитер,
– пропускну здатність,
– затримка, тощо.

Проблеми розміщення віртуальних мережних функцій (VNF) загострюються при розгляді міграції мережних функцій. Окрім часу, необхідного для встановлення однієї або декількох віртуальних машин (VM) для міграції однієї або декількох VNF з одного місця в інше, необхідно враховувати такі аспекти, як питання безпеки та цілісності середовищ SDN/NFV [17], щоб визначити загальні витрати, пов'язані з міграцією функцій.

Крім того, слід враховувати, що деякі користувацькі пристрої (UE) можуть використовувати розподіл U/C-площини або механізми DUDe [18], щоб підвищити свою надійність та/або QoS. Цей аспект ускладнює міграцію VNF через вимоги до затримки деяких мережних функцій (наприклад, HARQ).

Таке дослідження має ґрунтуватися на розгляді таких аспектів, як затримка, джитер та накладні витрати при комунікації між мережневими функціями, щоб уникнути ситуації, коли надмірна деталізація мережних функцій призведе до збільшення затримок та накладних витрат. Крім того, необхідно визначити API для комунікації між мережневими функціями, щоб забезпечити сумісність та взаємодію між ними.

Ще одним важливим аспектом, який наразі недостатньо досліджений у літературі, є продуктивність SDN та NFV в середовищах 5G. Хоча важливість цих парадигм для гарантування гнучкості, кастомізації та реконфігурованості вже добре усвідомлена, все ще бракує розуміння того, як програмні рішення зможуть забезпечити очікувані показники продуктивності в частині затримки та надійності для 5G.

Погіршення продуктивності при роботі функцій у вигляді програмного забезпечення замість апаратних рішень є добре відомою проблемою, і цей аспект має бути адекватно врахований у проєктуванні архітектури 5G-мереж. Роботи [19], [20], зробили перші кроки у цьому напрямку. Проте необхідні подальші дослідження, які враховуватимуть реалістичні сценарії розгортання мережі та навантаження трафіку, щоб визначити ключові характеристики віртуалізації (такі як оркестратор, реальний гіпервізор, ядро в реальному часі, пам'ять контейнерів та CPU-ресурси) для хмарних платформ у 5G-системах.

Ще одна дослідницька тема стосується ефективного використання SDN у архітектурі мобільних систем та терміналів. Робота [21], розглядають SDN як ключовий елемент архітектури 5G та пропонують розширення можливостей SDN-контролерів, додаючи функціональність управління мобільністю та інші вдосконалення. Це потребує додаткових досліджень для визначення того, як саме реалізовувати такі функціональні можливості.

Висновки. Необхідність у гнучкості, реконфігурованості та кастомізації в мобільних мережах 5G змушує вендорів та операторів впроваджувати нові підходи до розгортання таких мереж. У цьому контексті, SDN та віртуалізація NFV є ключовими технологіями, оскільки вони дозволяють відокремити функціональність мережі від базового обладнання, що, у свою чергу, спрощує управління мережею та її оновлення.

Представлено огляд методів віртуалізації мобільних мереж 5G, приділено увагу до рішень кожного з покоління та нововведення, які вони принесли у порівнянні з попередніми технологіями. Це дозволило визначити функціональність та мережні компоненти, які на даний момент реалізовані та розгорнуті в мобільних стільникових системах.

Розглянуто екосистему 5G, надавши детальний аналіз її застосувань.

Визначено та ідентифіковано основні вимоги до архітектури мережі 5G, які висовують сценарії її розгортання, а також проведено аналіз обмежень 4G-систем, які не дозволяють повною мірою задовольнити ці вимоги. На основі цього аналізу сформульовано набір характеристик, які необхідно враховувати під час розробки архітектури 5G, а також визначено роль віртуалізації у впровадженні цих характеристик.

Представлено результати комплексного огляду сучасного стану досліджень шляхом аналізу наявних публікацій щодо використання софтваризації та віртуалізації для реалізації мережних компонентів і функціональності 5G-систем.

Визначено ключові напрямки для подальших досліджень, які повинна розглянути наукова спільнота, щоб реалізувати повноцінну софтваризовану та віртуалізовану архітектуру мереж 5G.

Таким чином, віртуалізація мережних функцій NFV та програмно-визначені мережі SDN є одними із ключових напрямків сучасних досліджень у сфері електронних комунікацій. Вони дозволяють створювати гнучкі, масштабовані та ефективні мережі, що особливо важливо в умовах зростання вимог до швидкості, надійності та обробки даних.

Список літератури:

1. N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow: enabling innovation in campus networks," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, 2008.

2. M. HadZialic, B. Dosenovic, M. Dzaferagic, and J. Musovic, "CloudRAN: innovative radio access network architecture," in Proc. of IEEE ELMAR, Zadar, Croatia, 2013.

3. X. Jin, L. Li, L. Vanbever, and J. Rexford, "SoftCell: scalable and flexible cellular core network architecture," in Proc. of ACM CoNEXT, Santa Barbara, California, USA, 2013.

4. J. Schulz-Zander, C. Mayer, B. Ciobotaru, S. Schmid, and A. Feldmann, "OpenSDWN: Programmatic Control over Home and Enterprise WiFi," in Proc. of ACM SOSR, Santa Clara, California, USA, 2015

5. 11. P. Demestichas, A. Georgakopoulos, K. Tsagkaris, and S. Kotrotsos, Intelligent 5G Networks: Managing 5G Wire- less/Mobile Broadband, Vehicular Technology Magazine, IEEE, vol. 10, pp. 4150, Sept 2015.

6. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, and S. Lee, Network function NFV: Challenges and opportunities forinnovations, Communications Magazine, IEEE, vol. 53, pp. 9097, Feb 2015.

7. R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi, and D. Soldani, Towards zero latency Software Dened 5G Networks, in Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on, pp. 25662571, June 2015.

8. R. Guerzoni, R. Trivisonno, and D. Soldani, SDN-based architecture and procedures for 5G networks, in 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), 2014 1st International Conference on, pp. 209214, Nov 2014.

9. Bradai, K. Singh, T. Ahmed, and T. Rasheed, Cellular software dened networking: a framework, Communications Magazine, IEEE, vol. 53, pp. 3643, June 2015.

10. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, K. Hoffmann, and E.-D. Schmidt, A Virtual SDN-Enabled LTE EPC Architecture: A Case Study for S-/P-Gateways Functions, in Future Networks and Services (SDN4FNS), 2013 IEEE SDN for, pp. 17, Nov 2013.

11. M. Skulysh and O. Klimovych, Approach to NFV of Evolved Packet Core Network Functions, in Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2015 13th International Conference The, pp. 193195, Feb 2015.

12. F. Yousaf, J. Lessmann, P. Loureiro, and S. Schmid, SoftEPC – Dynamic instantiation of mobile core network entities for efcient resource utilization, in Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, pp. 36023606, June 2013.

13. H. Ko, G. Lee, I. Jang, and S. Pack, Optimal middlebox function placement in virtualized evolved packet core systems, in Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2015 17th Asia-Pacic, pp. 511514, Aug 2015.

14. Kravchuk S. O. Theory of mobile infocommunication systems. System architecture: textbook. – Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. – 683c., https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53198

15. T. Taleb, M. Bagaa, and A. Ksentini, User mobility-aware Virtual Network Function placement for Virtual 5G Network Infrastructure, in Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on, pp. 38793884, June 2015.

16. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, H. J. Morper, and K. Hoffmann, Applying NFV and SDN to LTE Mobile Core Gateways, the Functions Placement Problem, in Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, 38; Challenges, AllThingsCellular 14, (New York, NY, USA), pp. 3338, ACM, 2014.

17. W. Ding, W. Qi, J. Wang, and B. Chen, OpenSCaaS: an open service chain as a service platform toward the integration of SDN and NFV, IEEE Network, vol. 29, pp. 3035, May 2015.

18. Mohamed, O. Onireti, M. A. Imran, A. Imran, and R. Tafazolli, Control-Data Separation Architecture for Cellular Radio Access Networks: A Survey and Outlook, IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 18, pp. 446465, Firstquarter 2016.

19. ETSI, Network Functions Virtualisation (NFV); Acceleration Technologies; Report on Acceleration Technologies & Use Cases. ETSI GS NFV-IFA 001, Dec 2015.

20. ETSI, Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases. ETSI GS NFV 001, Dec 2015.

21. F. Granelli, A. Gebremariam, M. Usman, F. Cugini, V. Stamati, M. Alitska, and P. Chatzimisios, Software dened and virtualized wireless access in future wireless networks: scenarios and standards, Communications Magazine, IEEE, vol. 53, pp. 2634, June 2015.

Skolets S. S., Kravchuk S. O. 5G NETWORK FUNCTIONS VIRTUALIZATION: APPROACHES, ARCHITECTURE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

This paper explores the implementation of network function virtualization (NFV) and software-defined networking (SDN) in fifth-generation (5G) mobile networks. It reviews contemporary strategies for deploying these technologies, their role in enhancing network flexibility, scalability, and efficiency, as well as the primary challenges and future prospects associated with their adoption.

Objective. *The study aims to investigate architectural frameworks that facilitate the decoupling of network functions from physical hardware, enabling dynamic orchestration and automated resource management. A comprehensive analysis of various network function distribution models in 5G is presented, covering full cloud migration, C-plane offloading to the cloud, and hybrid load distribution strategies that balance processing between cloud and mobile infrastructure.*

A particular focus is placed on SDN-based network management approaches, including the segregation of control and user planes (C-plane/U-plane) and their implications for network efficiency, latency reduction, and scalability.

The article provides an overview of ongoing research in 5G standardization, highlights emerging directions for NFV and SDN advancements, and identifies critical challenges that must be addressed to ensure optimal performance and reliability in next-generation mobile networks.

Results. *The research identifies core methodologies for integrating NFV and SDN within 5G networks. Through an evaluation of existing architectural solutions, it is demonstrated that NFV minimizes reliance on proprietary hardware while increasing resource allocation flexibility. Meanwhile, SDN enhances network optimization through centralized traffic control and adaptive load balancing. The study examines three principal network function migration strategies in 5G: full cloud migration, C-plane delegation to the cloud, and a scenario-based hybrid approach. The strengths and limitations of each method are assessed in relation to network performance, latency impact, and scalability.*

Conclusions. *The findings confirm that incorporating NFV and SDN into 5G networks improves resource utilization, reduces capital and operational expenditures for service providers, and accelerates the rollout of new services. The analysis suggests that distributed architectures, dynamic network control, and resource orchestration are essential to the advancement of 5G technologies. Additionally, the study highlights key concerns related to scalability, security, and the efficiency of SDN/NFV implementations in mobile networks, emphasizing the need for continued research in these areas.*

Key words: *5G, Network Function Virtualization (NFV), Software-Defined Networking (SDN), Network Management, C-plane/U-plane, Mobile Infrastructure.*