

УДК 621.396

## ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНОЇ МЕРЕЖІ 5G НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ CLOUD-RAN ТА SDR

DOI 10.36994/2707-4110-2020-1-28-02

**Максимюк Т. А.**, к.т.н., Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. taras.maksymyuk@gmail.com

**Шубин Б. П.**, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. boshubin@gmail.com

**Андрущак В. С.**, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. volodya1andrushchak@gmail.com

**Бешлей Г. В.**, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. halink@ukr.net

**Думич С. С.**, к.т.н. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. sdumich@ukr.net

**Климаш М. М.**, д.т.н., проф., Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. mykhailo.m.klymash@lpnu.ua

**Анотація.** Стаття присвячена практичним аспектам реалізації програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку на основі архітектури Cloud-RAN та універсальних радіоінтерфейсів на основі National Instruments USRP 2900. Запропоновано багаторівневу архітектуру, яка складається з площини радіодоступу, площини ядра, площини управління, площини штучного інтелекту, а також системи моніторингу, яка збирає дані про функціонування мережі. Розроблена система дає можливість розгортати декілька логічних сегментів поверх однієї фізичної інфраструктури шляхом віртуалізації радіочастотних ресурсів. Для цього запропоновано новий метод інтелектуального управління радіочастотними ресурсами, який використовує глибокі рекурентні нейронні мережі для прогнозування інтенсивності трафіку, що дає змогу підвищити ефективність використання ресурсів. Експериментальні результати моделювання показують, що при логічному розділенні мережі на окремі слайси, запропонований метод підвищує фізичну пропускну здатність базових станцій у 2 рази, при забезпеченні належної якості обслуговування для усіх кінцевих користувачів.

**Ключові слова:** програмно-конфігуровані мережі 5G, Cloud-RAN, SDR, логічне розділення мережі, рекурентні нейронні мережі, управління радіочастотними ресурсами.

## PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE SOFTWARE DEFINED 5G MOBILE NETWORK BASED ON CLOUD-RAN AND SDR TECHNOLOGIES

**Maksymyuk Taras**, PhD, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.  
taras.maksymyuk@gmail.com

**Shubyn Bohdan**, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.  
boshubin@gmail.com

**Andrushchak Volodymyr**, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.  
volodya1andrushchak@gmail.com

**Beshley Halyna**, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.  
halink@ukr.net

**Dumych Stepan**, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.  
sdumich@ukr.net

**Klymash Mykhailo**, Dr. hab, Prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.  
mykhailo.m.klymash@lpnu.ua

**Abstract.** The paper is devoted to the practical implementation aspects of a software-defined mobile network based on the Cloud-RAN architecture and universal software radio peripheral National Instruments USRP 2900. We propose a multilayer network architecture, which consists of a radio access network (RAN) plane, a core plane, a control plane, an artificial intelligence (AI) plane, and a monitoring system that collects data about network performance. The RAN plane provides all functions related to channel scheduling, data encoding and signal processing and combines all macro and small cells, as well as Wi-Fi access points. The core plane provides functionality of the evolved packet core such as service and packet gateways, mobility management entities and edge routers. The control plane is responsible for load balancing over all cells, spectrum sharing, spectrum reallocation, infrastructure reconfiguration, and other management parameters. The AI plane is responsible for inference and decisions making about optimal network configuration taking into account instantaneous network conditions. Such decisions are supported by a set of machine learning models, which are trained over the available statistics, collected through a long-term period of network operation. External monitoring system provides the needed data for AI plane by using the MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protocol to collect information from all base stations, Wi-Fi access points and mobile devices. The proposed system enables the logical network slicing into multiple isolated segments over a single physical infrastructure by using virtualization of radio resources. A new method of intelligent radio resource management is proposed to improve the efficiency of spectrum utilization by predicting traffic demand of particular network sliced using deep recurrent neural network. Simulation results show that for the case of network slicing the proposed method allows to double the capacity of the physical network infrastructure, while ensuring the target quality of service for all users.

**Keywords:** software-defined 5G networks, Cloud-RAN, SDR, network slicing, recurrent neural networks, radio resource management.

## Вступ

Мережі мобільного зв'язку стрімко розвиваються протягом останнього десятиліття, що зумовлено великою популярністю смартфонів та планшетів на ринку обчислювальної техніки. Ця тенденція очікувано буде зберігатися у найближчому майбутньому, оскільки ринок безпроводних пристроїв невпинно розширюється, проникаючи у всі сфери людського життя. Відповідно, стрімке зростання обсягів трафіку у мережах мобільного зв'язку ставить нові вимоги

до їх пропускної спроможності. Провідні компанії на ринку технології мереж мобільного зв'язку узгодили вимоги щодо тисячкратного підвищення інформаційної ємності у мережах п'ятого покоління. Ключовими факторами, які впливають на інформаційну ємність мереж мобільного зв'язку є кількість базових станцій, доступні ресурси спектру та спектральна ефективність каналів безпроводного зв'язку.

Для вирішення поставлених проблем, була запропонована концепція гетерогенної мережі, яка інтегрує різні технології радіодоступу та різні розміри комірок під спільною керуючою системою [1]. Гетерогенні мережі дають змогу знизити коефіцієнт завантаженості шляхом збільшення густини комірок у заданій зоні обслуговування. Окрім зниження коефіцієнта завантаженості, збільшення густини комірок призводить до позитивного ефекту зменшення втрати потужності сигналу у каналі зв'язку, що в результаті призводить до збільшення рівнів потужності корисного сигналу та інтерференційної завади, дозволяючи знехтувати впливом адитивних температурних шумів. Відповідно, можна зробити висновок, що пом'якшення інтерференційних впливів є першочерговим завданням для підвищення ефективності каналів зв'язку у мережах п'ятого покоління. Дана проблема вимагає нових адаптивних механізмів координації ресурсів між базовими станціями у поєднанні з передовими технологіями цифрової обробки сигналів у приймальних абонентських пристроях.

Вищезгадані чинники підвищення інформаційної ємності безпроводних мереж можуть бути узагальнені в рамках концепції ущільнення мережі. Ущільнення безпроводної мережі є комбінацією просторового ущільнення та спектрального ущільнення. Просторове ущільнення здійснюється шляхом збільшення кількості приймально-передавальних антен та збільшення густини базових станцій у заданій зоні обслуговування при забезпеченні приблизно рівномірного розподілу абонентів між ними [2]. Проте, просторове ущільнення разом із агрегацією спектру не призведе до суттєвого виграшу, якщо воно не буде доповнено ущільненням транспортної мережі, яка з'єднує базові станції із опорною мережею оператора мобільного зв'язку. Просторово-ущільнені мережі часто потребують безпроводної транспортної мережі в умовах відсутності прямої видимості, у зв'язку із складністю прокладання провідної оптичної транспортної мережі. З іншого боку, доступність оптичної транспортної мережі з високою пропускною здатністю та невеликою затримкою в зонах зі щільною забудовою відкриває нові можливості для хмарних мереж радіо доступу C-RAN (Cloud Radio Access Networks) з координованою мультимедійною обробкою сигналів [3]. У таких системах обробка сигналів великої кількості базових станцій є централізованою на базі єдиної обчислювальної системи з використанням граничних обчислень (edge computing). Це потенційно дає змогу трансформувати мережі мобільного зв'язку з обмеженням по інтерференції у мережі, в яких інтерференцією можна знехтувати. За рахунок усунення інтерференції, C-RAN дозволяє забезпечити усім користувачам надзвичайно високий рівень якості

обслуговування. Дана технологія дає змогу істотно підвищити ефективність за рахунок одночасного врахування каналної інформації отриманої від великої кількості абонентських пристроїв. Проте, така архітектура вимагає надзвичайно складних методів цифрової обробки сигналів, і тому є доцільною лише при високій густині абонентського навантаження в умовно обмеженій зоні обслуговування (стадіони, місця проведення масових заходів, тощо), де побудова складної інтегрованої інфраструктури та значна надлишковість зворотного каналу є виправданими високими вимогами до пропускної здатності та показників якості обслуговування.

### **Мультиплощинна архітектура програмно-конфігурованої мережі 5G**

Загальна архітектура запропонованої системи складається з чотирьох площин: RAN (Radio Access Network, площина радіодоступу), площина ядра, площина управління та площина штучного інтелекту. Також представлено систему моніторингу IoT для збору даних з кожного мережевого рівня. Система IoT збирає дані з мережевих площин і передає ці дані в площину штучного інтелекту. Ці пристрої можуть бути як користувальним обладнанням (смартфоном, планшетом тощо), так і мережевим обладнанням (базовою станцією, маршрутизатором, контролером SDN тощо). Перелік параметрів для моніторингу не обмежується певними значеннями і може бути збільшений від оператором мобільної мережі. Для прикладу було обрано найбільш важливі параметри мережі радіодоступу: несучу частоту, використовувану смугу спектру, ідентифікатор комірки, швидкість користувача тощо. Крім того, для метаданих виділено кілька параметрів для упорядкування бази даних у правильному порядку. Ці параметри є міткою часу, широтою, довготою та ін. Архітектура програмного забезпечення мережі 5G з системою моніторингу IoT показана на рис. 1.

Площина радіодоступу охоплює макро та мікрокомірки, точки доступу Wi-Fi та D2D (Device-to-Device) з'єднання. У цій площині здійснюються усі функції обробки сигналів, кодування даних, модуляція та безпроводний зв'язок останньої милі. Площина радіодоступу отримує з площини управління відповідні параметри конфігурації, такі як використовуваний спектр, тип модуляції, розмір комірок та планування ресурсів.

Площина ядра відтворює схему LTE-EPC (Long Term Evolution-Evolved Packet Core), але у віртуалізованому представленні на основі технології NFV (Network Functions Virtualization). Дана площина охоплює пакети та сервісні шлюзи, маршрутизатори та модулі управління мобільністю та відповідає за агрегацію трафіку з усіх базових станцій, управління мобільністю користувачів, деякі функціональні можливості AAA (Authentication, Authorization and Accounting – автентифікація, авторизація та облік) та доступ до глобальної мережі Інтернет.

Площина управління відповідає за алгоритми балансування навантаження, спільного використання радіочастотного ресурсу, розподілу каналів тощо, використовуючи технологію програмно-конфігурованих мереж

SDN (Software Defined Network) для прийняття ефективних рішень щодо реконфігурації мережі радіодоступу та перерозподілу спектру для поліпшення продуктивності мережі та задоволення потреб користувачів.

Площина штучного інтелекту охоплює високопродуктивні сервери і бази даних, які розгортаються в рамках інфраструктури хмарних та граничних обчислень. В даній площині зосереджується увесь інтелект системи управління, який формується на основі аналітики даних з використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту.

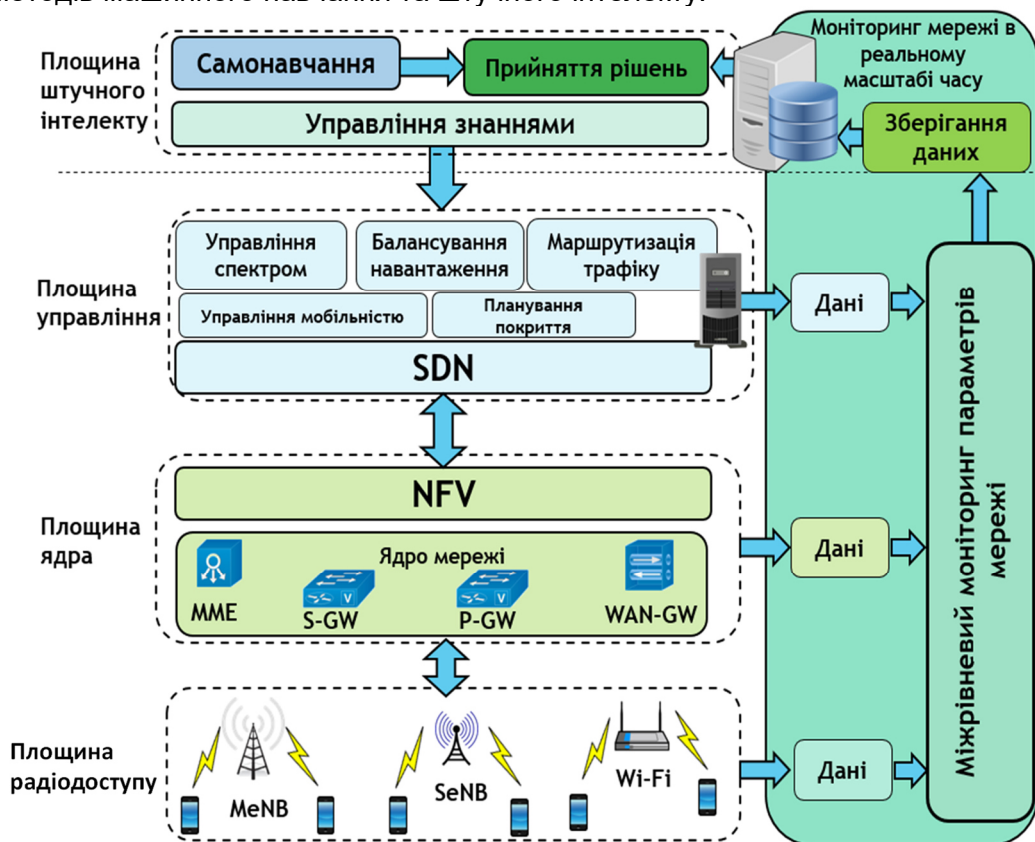


Рис. 1. Мультиплощинна архітектура програмно-конфігурованої мережі 5G

Для забезпечення належного обсягу необхідної інформації для навчання моделей на штучного інтелекту, розроблено вертикальну площину моніторингу стану мережі. Дана площина відповідає за збір даних в текстовому або числовому вигляді та пересилання їх у відповідні бази даних. Такий підхід дає змогу зменшити надлишок сигнальних даних у порівнянні з традиційними підходами сигналізації LTE (CQI, RSSI, RSRQ тощо) за рахунок використання протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT – це адаптований протокол TCP (Transmission Control Protocol – протокол управління передачею), що призначений для систем IoT. Переваги MQTT полягають у простоті реалізації, гарантованій доставці даних та інваріантності

до типу інформації. У запропонованій системі всі мережеві вузли можуть бути джерелами даних MQTT, та надсилати свої параметри до MQTT брокера по відповідних тематиках. MQTT брокер, в свою чергу пересилає дані лише до тих вузлів, які безпосередньо підписані на певні тематики. Така схема підтримує багатьох клієнтів і може використовуватися для мультиоператорних мереж 5G. Ще однією перевагою запропонованої системи моніторингу є невеликий розмір переданих блоків даних (менше 1 Кб). Існуючі мережі підтримують швидкість передачі даних від десятків до сотень Мбіт/с, тоді як 5G, як очікується, забезпечить десятки Гбіт/с. Таким чином, надлишок на передавання даних в запропонованій системі моніторингу буде непомітним для мережі радіодоступу та транспортної мережі. Тим не менш, загальний обсяг даних буде значним та різноманітним з точки зору навчання моделей штучного інтелекту. Запропонована система моніторингу дає змогу збирати будь-які типи даних у хмарних сховищах, як у текстовій, так і в числовій формі. Це відкриває великі можливості для операторів з точки зору налаштування системи моніторингу відповідно до їх вимог у цільовій області розгортання.

### **Практична реалізація програмно-конфігурованої мережі 5G на основі технології C-RAN**

Одним з найпопулярніших варіантів, прийнятих для реалізації програмно-керований мереж є протокол OpenFlow. Проте, його функціональність здебільшого розроблялась під мережі фіксованого зв'язку, і не зовсім ефективна для управління гетерогенними мережами мобільного зв'язку. Тому, для віддаленого керування інфраструктурними елементами доцільнішим технічним рішенням є протокол OpenEtrpower, який підтримує конфігурації Wi-Fi, LTE eNB та 5G gNB. На рис. 2 показаний загальний вигляд експериментальної мережі 5G на основі архітектури LTE.

Для запропонованої системи мобільного зв'язку використано операційну систему 5G-EmPOWER, яка чітко відокремлює операції з радіоінтерфейсом та операції в площині управління, які виконуються поверх рівня операційної системи [4]. Для взаємодії базових станцій з операційною системою через протокол OpenEtrpower, їм призначається спеціальний модуль-агент. Відповідно, базова станція eNodeB складається з модуля-агента та платформи програмно-конфігурованого радіомодуля National Instruments USRP 2900. Таким чином, розгорнута віртуалізована інфраструктура мережі включає ядро EPC, контроллер 5G-EmPOWER та eNB агент для базової станції. Система є гнучкою і дозволяє розгортати різноманітні сервіси, а також забезпечує логічне розділення (слайсинг) мережі радіодоступу з ізоляцією шарів та функцій, гарантуючи відсутність взаємних впливів між ними. Агенти 5G-Empower взаємодіючи між собою та з контролером забезпечують мобільність користувачів між eNB та балансування навантаження, а також балансування фізичних ресурсних блоків між кінцевими користувачами.



Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної системи 5G на основі віртуалізації мережних функцій

Оскільки існуючий інтерфейс 5G-EmPOWER не передбачає віддаленої зміни радіочастотних параметрів базової станції, яка працює в стеку LTE, виникає необхідність задавати ці параметри у конфігураційному файлі безпосередньо на eNB і передавати їх контролеру за допомогою повідомлення Capabilities Response. Тому, в даній статті ми пропонуємо метод гнучкого налаштування мережі радіодоступу з використанням принципів функціонування C-RAN на основі даних з площини штучного інтелекту.

Система управління мережею 5G розгортається у вигляді додатків UE, eNB, та EPC, які запускаються в ізольованих контейнерах Docker. При цьому ядро мережі, базові станції та пристрої користувачів працюють у окремих контейнерах.

Використовуючи обчислювальні ресурси хмарних сервісів здійснюється емуляція ядра мережі, яке включає базові віртуальні компоненти, необхідні для функціонування мережі та маршрутизації трафіку, такі як HSS (Home Subscriber Server), MME (Mobility Management Entity), SGW (Serving Gateway) та PGW (Packed Data Network Gateway). Базові станції eNB підключаються до ядра EPC, і стають доступними для підключення абонентів UE. Візуалізація інтерфейсу для моніторингу параметрів радіоканалу між eNB та UE представлена на рис. 3.

### **Інтелектуальне управління ресурсами у програмно-конфігурованій мережі 5G**

Віртуалізація мережі на основі запропонованої архітектури дає можливість реалізувати логічне розділення мережі (network slicing) із забезпеченням необхідних параметрів якості обслуговування. Логічні мережі (слайси), характеризуються оптимальними налаштуваннями для конкретного

типу сервісу, і є ізольовані між собою з точки зору доступу до фізичних ресурсів інфраструктури 5G [5].

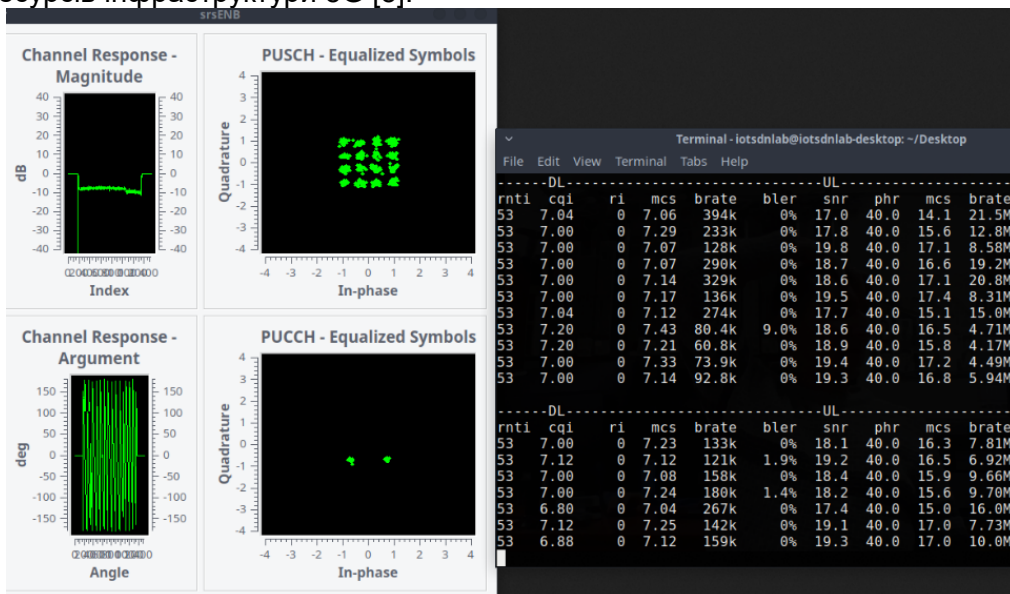


Рис. 3. Графічний інтерфейс системи моніторингу радіоканалу між eNB та UE

Операційна система 5G-EmPOWER дає можливість розгорнути декілька віртуалізованих слайсів поверх однієї фізичної інфраструктури. Такий підхід забезпечує ефективне використання ресурсів із забезпеченням необхідних вимог щодо якості обслуговування.

Логічні сегменти мережі створюються на основі дескрипторів, які власник логічної мережі передає власнику інфраструктури, в рамках угоди про рівень якості обслуговування (SLA – Service Level Agreement). Таким чином, кожному UE призначається один або декілька логічних слайсів з відповідними SLA. Операційна система 5G-EmPOWER підтримує гнучкий механізм управління радіоресурсами між окремими логічними слайсами SRM (Slice Resource Manager), який керує життєвим циклом логічних сегментів для кожної eNB. При отриманні запиту на створення нового сегменту SRM перевіряє чи можна створити даний сегмент в рамках поточної інфраструктури. Якщо кількість фізичних ресурсних блоків PRB (Physical Resource Block) є достатньою, то такий сегмент буде створений. В іншому випадку, SRM відмовить у створенні сегменту, або створить його з меншим обсягом ресурсів в залежності від умов запиту.

За розподіл фізичних ресурсів (PRB) відповідає гіпервізор, який перетворює їх у віртуальні ресурси (vRB – Virtual Resource Block) та передає їх планувальникам сегментів SSS (Slice Specific Scheduler). Протягом вікна планування, гіпервізор обчислює обсяг ресурсів, які повинні бути виділені кожному фрагменту. Тривалість вікна планування може бути кратна тривалості інтервалу передавання TTI (Transmission Time Interval) – 1 мс, 10



мс, 100 мс і т. д.

На рис 4. показано приклад багаторівневого планування ресурсів мережі 5G на прикладі комірки зі фізичною частотною смугою 5 МГц. Розглянемо ситуацію, коли сегмент А потребує 8 PRB протягом кожного TTІ, у той час як сегмент В потребує 3 PRB. Відповідно, інші PRB залишаються невикористаними.

Сітка радіочастотних ресурсів гіпервізора представляється у віртуалізованому вигляді. З віртуалізованих ресурсних блоків vRB формуються віртуальні групи vPRB. Кожній vPRB притаманні ті ж самі обмеження, які характерні для класичних мереж без віртуалізації.

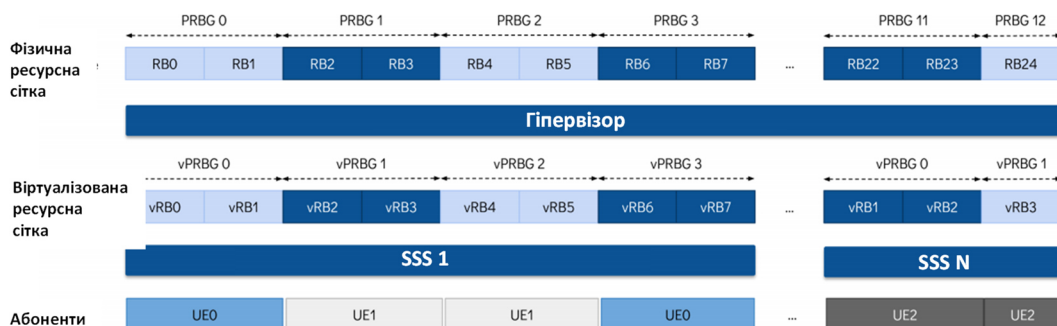


Рис. 4. Багаторівневе планування ресурсів з використанням логічного розділення мережі 5G.

Важливим аспектом для ефективного планування ресурсів між логічними сегментами є прогнозування трафіку та балансування навантаження між сегментами. В наступному розділі запропоновано новий метод прогнозування трафіку в мережі на основі глибоких нейронних мереж.

### Метод інтелектуального управління радіочастотними ресурсами на основі глибоких нейронних мереж

Розроблена система моніторингу процесу функціонування мережі мобільного зв'язку дає змогу генерувати великі обсяги даних, які можна систематизувати на основі використання методів машинного навчання та технології програмно-керованих мереж [6]. Наявність високоякісних наборів даних про стан мережі є надзвичайно важливим критерієм для досягнення цільової продуктивності від управління ресурсами. Зібрані дані використовуються для навчання інтелектуальних алгоритмів та вирішення проблем управління радіочастотними ресурсами. Для прогнозування трафіку завантаженості комірок, було розроблено модель рекурентної нейронної мережі з використанням комірок LSTM, яка навчається на основі зібраних статистичних даних та дає змогу прогнозувати абонентський трафік в короткотривалому та довготривалому масштабах [7].

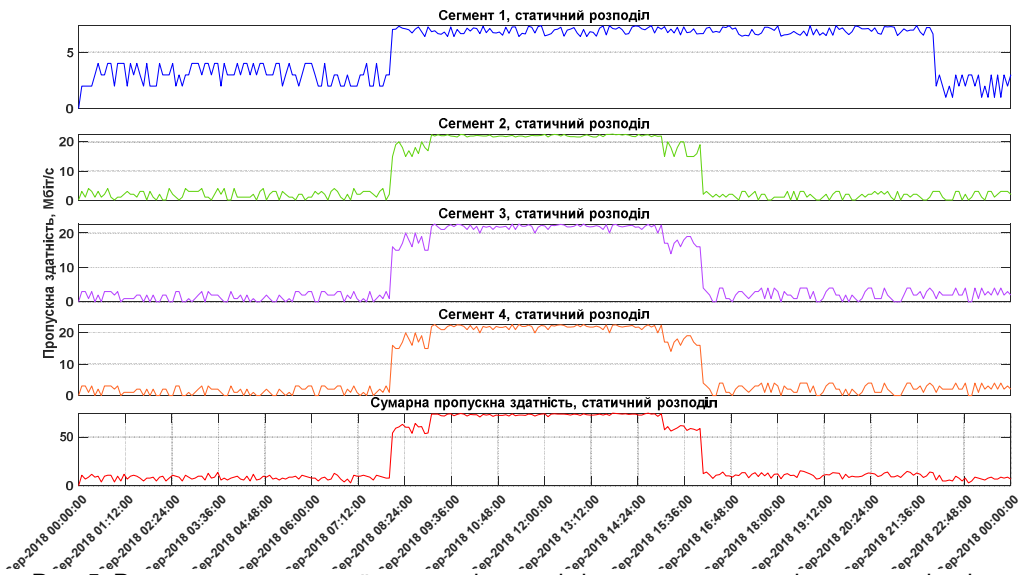


Рис. 5. Результати пропускної здатності мережі зі статичним розподілом ресурсів між сегментами.

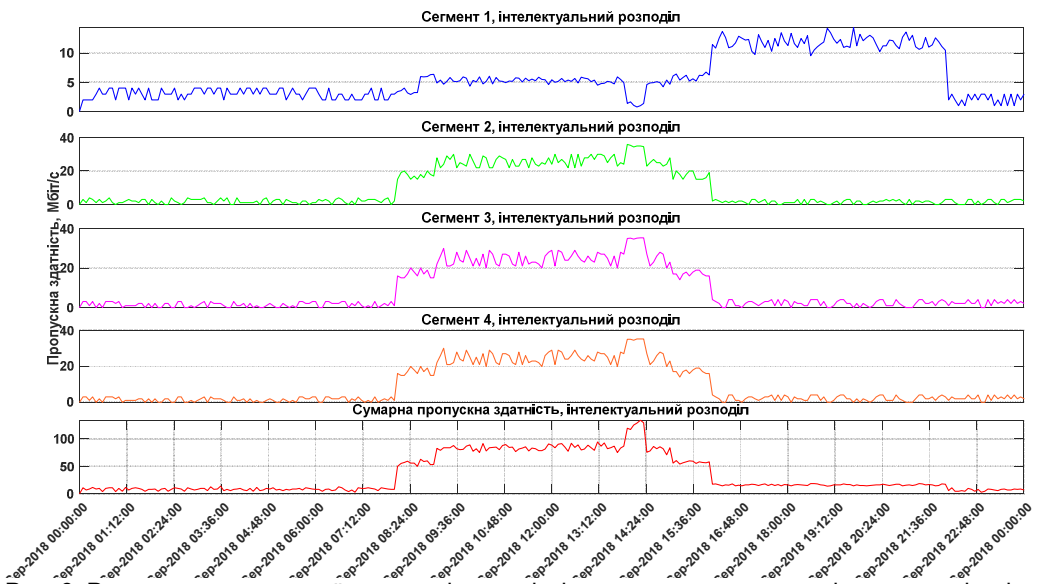


Рис. 6. Результати пропускної здатності мережі з інтелектуальним розподілом ресурсів між сегментами.

При низькій інтенсивності трафіку для одного із сегментів, частотні ресурси розподіляються між іншими сегментами. При зміні навантаження, частотні ресурси перерозподіляються між сегментами відповідно до прогнозу нейронної мережі, таким чином щоб ресурси мобільної мережі були ефективно розподілені між абонентами. Результати порівняння пропускної здатності при статичному (рис. 5) та інтелектуальному (рис. 6) розподілі ресурсів між окремими сегментами.

Результати моделювання показали, що при використанні запропонованого методу інтелектуального управління ресурсами між окремими логічними сегментами сумарна пропускна здатність мережі є у 2 рази вищою, ніж при статичному розподілі радіочастотних ресурсів.

### **Висновки**

В статті запропоновано мультиплощинну архітектуру програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку, яка складається з площини радіодоступу, площини ядра, площини управління, площини штучного інтелекту, а також системи моніторингу, яка збирає дані про функціонування мережі. Для запропонованої системи мобільного зв'язку використано операційну систему 5G-EmPOWER, яка відокремлює операції з радіоінтерфейсом та операції в площині управління, що виконуються поверх рівня операційної системи. Для реалізації радіоінтерфейсу використано програмно-конфігуровані радіомодулі National Instruments USRP 2900. Таким чином, запропонована система дає можливість розгортати декілька логічних сегментів поверх однієї фізичної інфраструктури за рахунок віртуалізації ресурсів. Розроблено метод інтелектуального управління радіочастотними ресурсами на основі глибоких рекурентних нейронних мереж, який дає змогу підвищити ефективність їх використання. Результати моделювання показують перевагу запропонованого методу управління у 2 рази, з точки зору сумарної пропускної здатності мережі.

### **Література**

1. Damjanovic A. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks / A. Damjanovic, J. Montojo, Y. Wei et al. // IEEE Wireless Communications – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011 – vol. 18 – no. 3 – P.10-21.
2. Bhushan N. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / N. Bhushan, Li Junyi, D. Malladi et al. // IEEE Communications Magazine.– USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 – vol. 52, no. 2 – P.82-89..
3. C-RAN: The Road Towards Green RAN – White Paper, ver. 3.0 — China: China Mobile Research Institute, Oct. 2011. — 91 p.
4. Coronado E. "5G-EmPOWER: A Software-Defined Networking Platform for 5G Radio Access Networks" / E. Coronado, S. N. Khan, R. Riggio// IEEE Transactions on Network and Service Management, June 2019 – vol. 16 – № 2 – P. 715-728.
5. Addad R. Optimization model for Cross-Domain Network Slices in 5G Networks / R. Addad, M. Bagaa, T. Taleb, D. L. Cadette Dutra, H. Flinck// IEEE Transactions on Mobile Computing, May 2020 – vol. 19 – № 5 – P. 1156-1169.
6. Maksymyuk T. Intelligent Framework for Radio Access Network Design / Maksymyuk T., Slapak E., Bugar G., Horvath D., Gazda J.// Wireless Networks, 2020. – vol. 26. - № 1. – P. 759-774.
7. Maksymyuk T. Intelligent Spectrum Management in 5G Mobile Networks based on Recurrent Neural Networks/ T. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyy, M. Klymash// IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), (Polyana, Ukraine, 2019), P. 1-4.

## References

1. Damnjanovic A. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks / A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei et al. // IEEE Wireless Communications – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011 – vol. 18 – no. 3 – P.10-21.
2. Bhushan N. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / N. Bhushan, Li Junyi, D. Malladi et al. // IEEE Communications Magazine.– USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 – vol. 52, no. 2 – P.82-89..
3. C-RAN: The Road Towards Green RAN – White Paper, ver. 3.0 — China: China Mobile Research Institute, Oct. 2011. — 91 p.
4. Coronado E. "5G-EmPOWER: A Software-Defined Networking Platform for 5G Radio Access Networks"/ E. Coronado, S. N. Khan, R. Riggio// IEEE Transactions on Network and Service Management, June 2019 – vol. 16 – № 2 – P. 715-728.
5. Addad R. Optimization model for Cross-Domain Network Slices in 5G Networks / R. Addad, M. Bagaa, T. Taleb, D. L. Cadette Dutra, H. Flinck// IEEE Transactions on Mobile Computing, May 2020 – vol. 19 – № 5 – P. 1156-1169.
6. Maksymyuk T. Intelligent Framework for Radio Access Network Design / Maksymyuk T., Slapak E., Bugar G., Horvath D., Gazda J.// Wireless Networks, 2020. – vol. 26. - № 1. – P. 759-774.
7. Maksymyuk T. Intelligent Spectrum Management in 5G Mobile Networks based on Recurrent Neural Networks/ T. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyy, M. Klymash// IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, (Polyana, Ukraine, 2019), P. 1-4.