

Максимюк Т.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

Шубин Б.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

Мисаковець Д.О.

Національний університет «Львівська політехніка»

Андрущак В.С.

Національний університет «Львівська політехніка»

Думич С.С.

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД АДАПТИВНОГО ЛОГІЧНОГО РОЗДІЛЕННЯ МЕРЕЖІ 5G НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

Сучасні мережі мобільного зв'язку 5G поставлені перед викликом забезпечення сервісів із різними вимогами до якості обслуговування, що пов'язано зі значною гетерогенністю їх застосувань. Таким чином, вимоги до сервісів у мережах 5G розділені на три основні категорії: широкосмуговий доступ із високою пропускною здатністю (eMBB), сервіси зв'язку машинного типу (mMTC) та сервіси, які потребують ультранизької затримки та високої надійності доставки даних (URLLC).

Відповідно, наявна концепція побудови мережі мобільного зв'язку повинна бути трансформована для забезпечення автоматизованого наскрізного логічного розділення мережних ресурсів під конкретний тип сервісу в мережі 5G. Логічне розділення мережних ресурсів дає змогу створювати окремі ізольовані сегменти мережі 5G в рамках спільної фізичної інфраструктури. Таке розділення забезпечує точне управління ресурсами залежно від різних типів сервісу, а також забезпечує гнучкий їх розподіл для різних складних сценаріїв функціонування мережі.

У статті запропоновано новий метод адаптивного логічного розділення радіочастотних ресурсів у мережах 5G, який використовує комбіновану архітектуру глибоких нейронних мереж. Розв'язано завдання класифікації мережного трафіку на основі повнозв'язних нейронних мереж, що враховує сукупність взаємопов'язаних вимог до пропускної здатності, затримки та надійності доставки пакетів, а це дає змогу розподіляти трафік між сегментами eMBB, mMTC та URLLC. Запропоновано метод прогнозування трафіку окремо для кожного логічного сегменту мережі 5G на основі рекурентних нейронних мереж LSTM. Результати експериментальних досліджень показують, що запропонована система дає змогу прогнозувати інтенсивність трафіку та частку абонентів окремих сегментів мережі. Таким чином, запропонований метод підвищує ефективність використання радіочастотних ресурсів у мережах 5G.

Ключові слова: мережі мобільного зв'язку 5G, eMBB, mMTC, URLLC, глибокі нейронні мережі, LSTM.

Постановка проблеми. Мережі мобільного зв'язку 5G поставлені перед викликом забезпечення різноманітних вимог до параметрів мережі, що пов'язано зі значною гетерогенністю їх застосувань. Загалом вимоги до послуг у мережі 5G поділяються на три категорії. До першої належить широкосмуговий доступ із високою пропускною здатністю (eMBB – Enhanced Mobile Broadband) для підтримки мультимедійних послуг, віртуальної та доповненої реальності та ряду інших сервісів із високими вимогами до швидкості передавання інформації. Такі сервіси характеризуються порів-

няно невеликою кількістю пристроїв, які повинні одночасно взаємодіяти у мережі. До другої категорії – сервіси масового зв'язку машинного типу (mMTC – Massive Machine Type Communications), що використовуються для підключення різноманітних пристроїв у рамках концепції Інтернету речей (IoT – Internet of Things). Такі сервіси характеризуються низькою пропускною здатністю та невисокими вимогами до затримки передавання даних. Проте mMTC потребують підтримки одночасного функціонування кількох тисяч кінцевих пристроїв у межах одного квадратного кілометра.

Третя категорія стосується сервісів, які потребують ультранизької затримки та високої надійності доставки даних (URLLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications), що пов'язано із важливими застосуваннями на об'єктах критичної інфраструктури (атомних електростанціях, системах газопостачання та інших типових об'єктах) або в системах контролю дорожнього руху.

Відповідно, наявна концепція побудови мережі мобільного зв'язку повинна бути трансформована для забезпечення автоматизованого наскрізного логічного розділення мережних ресурсів під конкретний тип сервісу в мережі 5G (network slicing).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] автори досліджують мульти-сегментне віртуальне розділення ресурсів мережі 5G з погляду впливу кількості користувачів на пропускну здатність оператора мобільного зв'язку. Схожі підходи використовуються у [2], де запропоновано архітектуру мережі 5G на основі інтеграції технологій програмно-конфігурованих мереж (SDN – Software Defined Network) і віртуалізації мережних функцій (NFV – Network Functions Virtualization). Для підвищення ефективності процесу планування радіочастотних ресурсів у [3] запропоновано використання інтелектуальних алгоритмів на основі глибоких нейронних мереж. У праці [4] представлено платформу для віртуалізації та логічного розділення ресурсів у мережах 5G з одночасним спільним використанням ресурсів кількома операторами мобільного зв'язку. У такій системі віртуалізовані фрагменти мережі призначаються для конкретних прикладних застосувань на основі ідентифікатора класу сервісу та рівня безпеки, необхідного для конкретної послуги [5]. У [6] пропонується новий підхід до логічного розділення мережної інфра-

структури для сегменту управління транспортними засобами (V2x – Vehicle-to-Infrastructure) на основі принципів проектування мережі згідно із рекомендаціями консорціуму 3GPP (3rd Generation Partnership Project), які закладені у стандарт LTE (Long Term Evolution). У роботі [7] запропоновано модель оптимізації процесу розгортання логічних мережних фрагментів, що дозволяє операторам мобільного зв'язку більш ефективно розподіляти ресурси фізичного рівня відповідно до потреб кінцевих користувачів.

Проте у жодній із вищенаведених праць повною мірою не розглядається проблематика прогнозування трафіку для окремих логічних сегментів мережі з метою балансування навантаження між ними та забезпечення оптимального розподілу мережних ресурсів. У нашій роботі пропонується розв'язання цієї проблеми на основі комплексної моделі, яка складається з двох різних архітектур глибоких нейронних мереж.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Логічне розділення мережної інфраструктури. Технологія логічного розділення мережі все ще знаходиться на початковій стадії свого розвитку, тому потребує подальшого вдосконалення та дослідження, що сприятиме розвитку мереж 5G загалом. Незважаючи на переваги логічного розділення інфраструктури мережі 5G, воно також спричиняє ряд нових викликів, які повинні вирішуватися операторами та виробниками обладнання.

Численні дослідження показали, що ключовою проблемою у мережах 5G є спільне використання радіочастотних ресурсів між окремими мережними сегментами, а також їх динамічний перерозподіл при зміні трафіку в мережі (рис. 1).

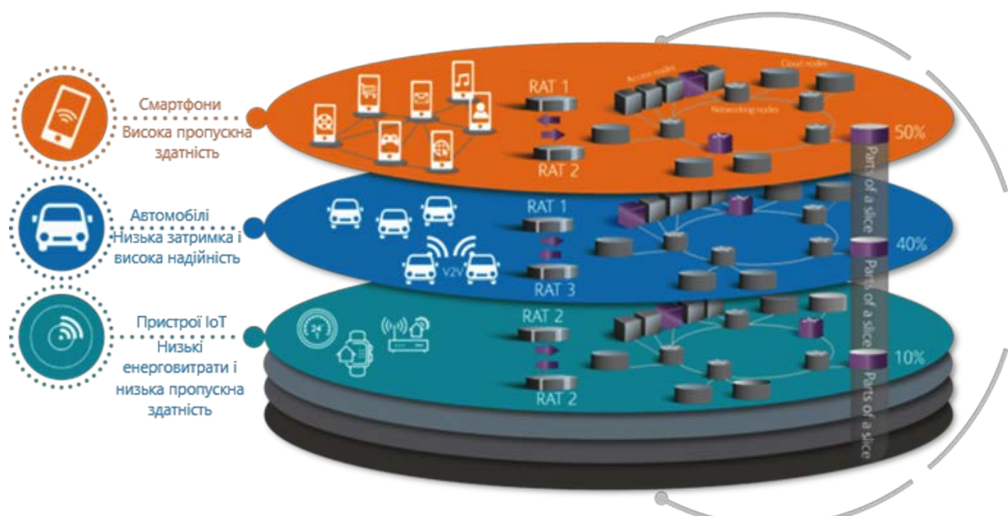


Рис. 1. Принцип логічного розділення мережних ресурсів у мережах мобільного зв'язку 5G

Враховуючи флуктуації навантаження в мережі, динамічний розподіл ресурсів є більш ефективним технічним рішенням. Проте в такому разі необхідно враховувати усі аспекти планування радіочастотних ресурсів між окремими комітками мережі, що дасть змогу уникнути небажаної інтерференції та забезпечити належну якість функціонування мережі 5G.

Для підтримки максимальної кількості різноманітних запитів на обслуговування операторам мережі потрібно розгортати віртуалізовані компоненти мережних функцій, які можна швидко активувати для створення нових сегментів мережі та швидкого розподілу мережеских ресурсів для нових сегментів. Крім того, оператори повинні мати можливість динамічно масштабувати сегменти залежно від зміни навантаження певних типів сервісу. Управління мережеским сегментом потрібно здійснювати автоматизовано, щоб мінімізувати втручання людей і зменшити кількість помилок.

Іншим аспектом, який вже згадувався вище, є велике різноманіття послуг у мережах 5G з унікальними вимогами, які часто суперечать одна одній. Як наслідок, потрібні спеціальні ресурси віртуальної мережі, котрі б дали змогу контролювати та гарантувати якість обслуговування в кожному ізольованому сегменті мережі. Ізоляція між мережескими сегментами може бути досягнута за допомогою ізоляції площини передавання даних і площини управління. Здебільшого функцію управління можна реалізувати спільно для всіх сегментів. Проте для деяких особливо важливих сервісів доцільно використовувати індивідуальні функції управління для забезпечення кращої надійності та відмовостійкості. Крім того, ефективна ізоляція мережеских сегментів може гарантувати, що вихід із ладу або атака на один сегмент не впливає на роботу інших сегментів. Отже, механізм ізоляції таких сегментів є ключовою проблемою при впровадженні логічного розділення мережі.

Іншим важливим аспектом є мобільність користувачів. Безрозривне обслуговування та плавний хендовер абонентів має вирішальне значення для надання послуг у режимі реального часу, що безпосередньо впливає на якість обслуговування [8]. Проте для деяких сегментів мережі цими аспектами можна знехтувати. Наприклад, мережескі сегменти, що обслуговують системи індустріального типу із фіксованим положенням кінцевих пристроїв, не потребують функцій управління мобільністю, а це дає змогу спростити процес управління в межах цих сегментів. Однак мережескі сегменти, які потребують управління мобільністю, відрізняються своїми

вимогами до мобільності. Наприклад, частота хендоверу для абонентів сегменту eMBB є меншою порівняно із сегментом URLLC, який обслуговує транспортні засоби. Таким чином, розробка протоколу управління мобільністю, орієнтованого на логічні сегменти мережі, є обов'язковим аспектом для вирішення проблем мобільності в мережі 5G.

Окремо варто відзначити аспекти безпеки при логічному розділенні мережі, які потрібно вирішити для ефективного обміну ресурсами між сегментами. Мережескі сегменти, що обслуговують різні типи послуг, можуть мати різний рівень вимог політики безпеки. Тому, розробляючи протоколи безпеки мережі, необхідно враховувати їхній вплив на інші сегменти та мережескі системи. Крім того, питання безпеки постають більш вагомими, коли логічне розділення мережі здійснюється на багатодоменній інфраструктурі, що потребує розроблення нових механізмів координації політики безпеки між різними доменними інфраструктурами.

Останнім ключовим елементом концепції логічного розділення мережескої інфраструктури є технологія віртуалізації. Технологія віртуалізації розвивалася протягом останніх 20 років і застосовується головним чином у мережах фіксованого зв'язку. Зокрема, є численні дослідження стосовно віртуалізації ядра мережі мобільного зв'язку, однак ці методи не можна безпосередньо використовувати для безпроводних мереж, оскільки вони є більш вразливими до зовнішніх перешкод і потребують нових підходів до віртуалізації мережі. Тому розробка нових механізмів віртуалізації для спільного використання радіочастотних ресурсів і віртуалізації функцій базових станцій відіграє важливу роль у розвитку технологій логічного розділення інфраструктури безпроводного зв'язку.

Метод логічного розділення ресурсів мережі 5G на основі комбінованої архітектури глибоких нейронних мереж. Запропонована комбінована архітектура складається із класифікатора типу сервісу, який відповідає за логічне розділення мережі та відповідне перенаправлення трафіку, а також із множини незалежних рекурентних нейронних мереж, що відповідають за прогнозування інтенсивності трафіку конкретних мережеских фрагментів. Класифікатор побудований на основі класичної повнозв'язної архітектури нейронної мережі, яка відповідає задачі класифікації. Рекурентні нейронні мережі побудовані на основі комірок LSTM (Long Short-Term Memory), призначених для задач регресії [9]. Детальна структурна схема запропонованої системи представлена на рис. 2.

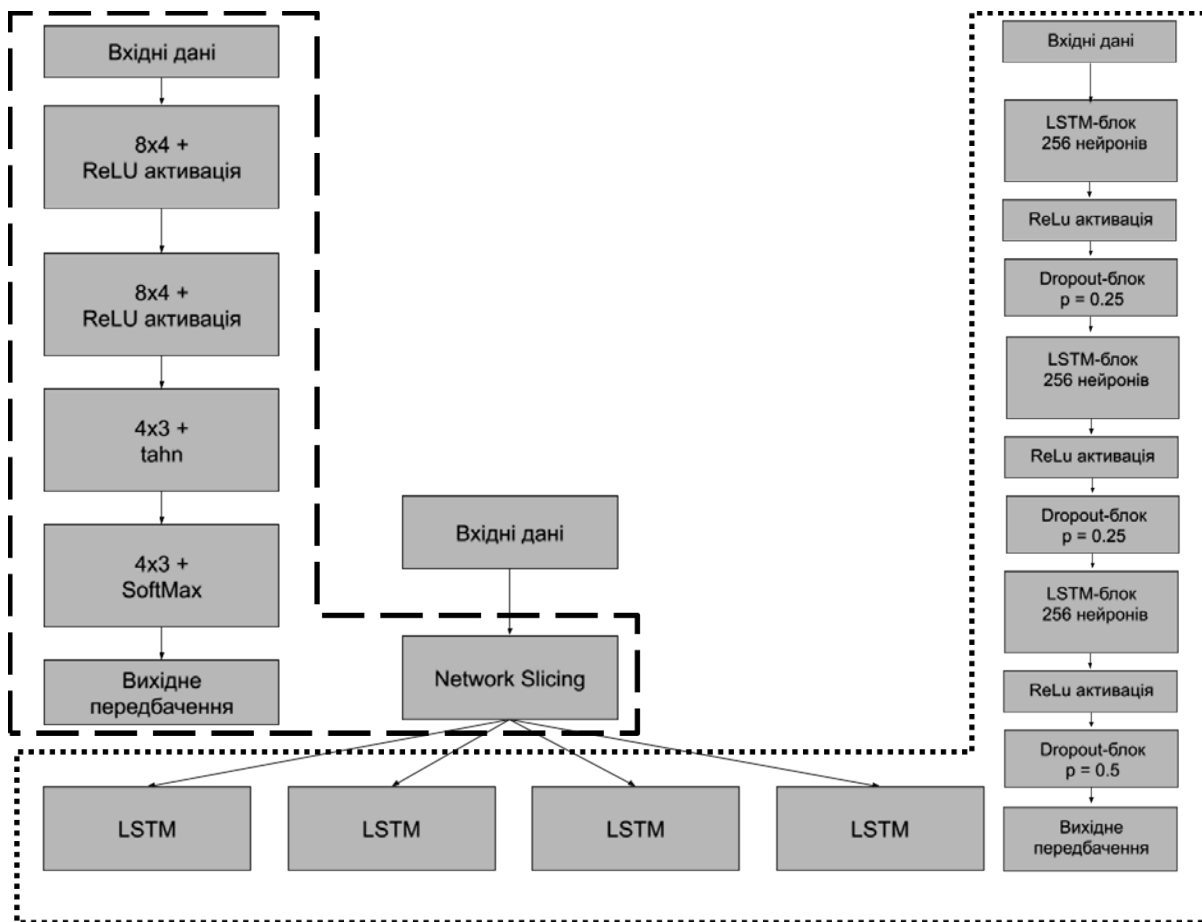


Рис. 2. Комбінована архітектура системи логічного розділення ресурсів мережі 5G на основі глибоких нейронних мереж

Для дослідження обрано 4 категорії мережних сегментів, а саме: сегмент eMBB, сегмент URLLC, сегмент mMTC і гібридний сегмент eMBB/mMTC, який підтримує два типи сервісу та виступає як резервний сегмент для пом'якшення ефекту флуктуацій трафіку в мережі 5G.

Для навчання моделі було використано датасет, що відображає різноманітне навантаження на кожен комірці мережі в конкретний момент часу. Структура датасету наведена у табл. 1. Після класифікації трафіку за сегментами здійснюється тренування рекурентних нейронних мереж окремо для кожного типу сегменту мережі. В основі рекурентних блоків лежить технологія LSTM, яка використовує комірки внутрішнього контекстного стану, що забезпечують властивості як довгострокової, так і короткострокової пам'яті. Така властивість дає змогу забезпечити прогнозування трафіку не лише на основі попереднього значення, але й із урахуванням релевантного історичного контексту для кожного логічного сегменту мережі.

Моделювання та дослідження процесу логічного розділення мережної інфраструктури 5G

на основі глибоких нейронних мереж. Моделювання проводилося на основі фрагменту мережі мобільного зв'язку, який складається зі 100 однотипних мікрокомірок. Для моделювання інтенсивності трафіку було використано імітаційну модель переміщення абонентів між комірками, з реалістичними траєкторіями на основі реальної статистичної інформації.

Інтенсивність трафіку кожної комірки визначалась відповідно до кількості абонентів, котрі потрапляють у зону її покриття у конкретний момент часу. Типи сервісу були обрані випадковим чином для абонентів з урахуванням типових статичних сценаріїв користування мобільними пристроями (смартфонами, планшетами, автомобільними навігаторами тощо). Результати прогнозування трафіку для двох довільно обраних комірок представлені на рис. 3.

На рис. 4 представлено результати прогнозування частки користувачів кожного сегменту мережі, на основі якої приймається рішення про розподіл мережевих ресурсів між цими сегментами.

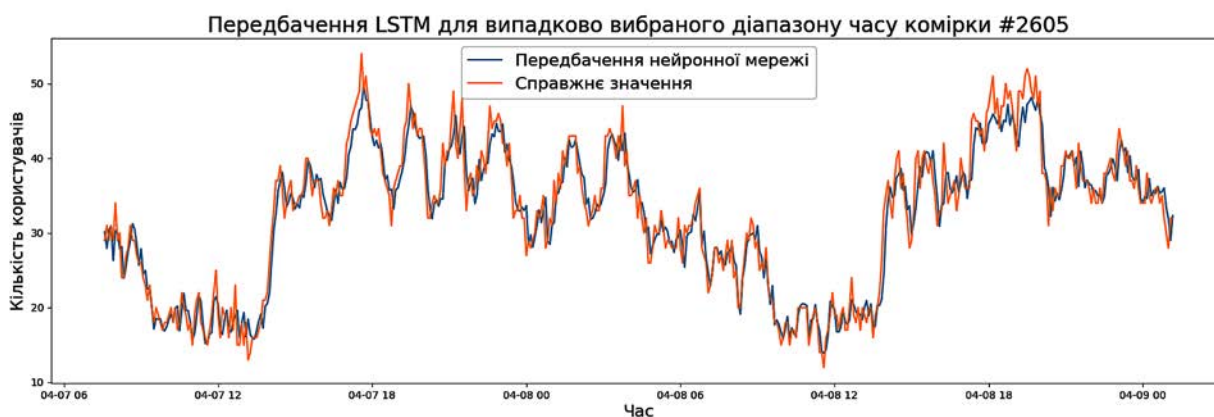
Структура датасету для тестування системи логічного розділення ресурсів

Тип сервісу	Підтримувані технології	Час запису	Швидкість	Втрати пакетів	Затримка, мс	Тип сегменту
AR/VR/Ігри	LTE/5G	2019-01-13 06:05:00	GBR	0.001	50	eMBB
AR/VR/Ігри	LTE/5G	2019-01-13 06:10:00	NGBR	0.001	100	eMBB/ mMTC
Телемедицина	ІoT (LTE-M, NB-IoT)	2019-01-13 06:15:00	GBR	1e-06	10	URLLC
...						
Індустрія 4.0	ІoT (LTE-M, NB-IoT)	2019-01-13 06:20:00	NGBR	0.001	50	mMTC
Індустрія 4.0	ІoT (LTE-M, NB-IoT)	2019-01-13 06:25:00	GBR	1e-06	10	URLLC

*AR (Augmented Reality) – доповнена реальність
 VR (Virtual Reality) – віртуальна реальність
 NB-IoT (Narrowband IoT) – вузькосмуговий IoT
 GBR (Guaranteed Bitrate) – гарантована швидкість
 NGBR (Non-Guaranteed Bitrate) – негарантована швидкість



а)



б)

Рис. 3. Результати прогнозування сумарного трафіку комірки 1 – а) та комірки 2 – б) протягом випадково обраного інтервалу часу

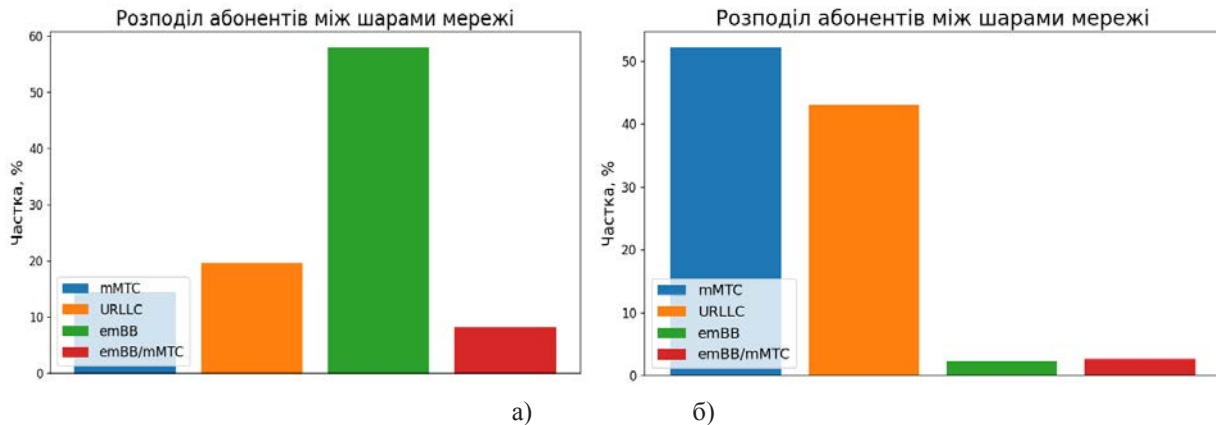


Рис. 4. Результати прогнозування частки користувачів кожного логічного сегменту мережі для комірки 1 – а) та комірки 2 – б) протягом випадково обраного інтервалу часу

Як можна побачити з результатів, залежно від розташування комірок і типового переміщення користувачів частка окремих логічних сегментів мережі може суттєво відрізнятися. Тому запропонована модель дає змогу прогнозувати оптимальний розподіл мережних ресурсів між логічними сегментами мережі, забезпечуючи таким чином їхнє ефективне функціонування.

Висновки. У статті вирішено завдання логічного розділення інфраструктури та радіочастотних ресурсів у мережах 5G на основі глибокого навчання. Запропоновано комбіновану архітектуру

на основі двох типів глибоких нейронних мереж, яка розв'язує завдання класифікації трафіку між логічними сегментами мережі залежно від вимог до пропускної здатності, затримки та надійності доставки даних. Експериментальні результати показали, що використання рекурентних нейронних мереж на основі архітектури LSTM дає змогу прогнозувати інтенсивність трафіку для кожного логічного сегменту мережі з високою точністю, а це дозволяє оптимізувати розподіл радіочастотних ресурсів у мережі мобільного зв'язку між окремими ізольованими логічними сегментами мережі.

Список літератури:

1. 5G network slicing: A multi-tenancy scenario / S.O. Oladejo, O.E. Falowo. 2017 Global Wireless Summit (GWS), Cape Town, South Africa, 2017. P. 88–92.
2. An SDN/NFV based framework for management and deployment of service based 5G core network / L. Ma, X. Wen, L. Wang, Z. Lu, R. Knopp. *China Communications*. Oct. 2018. Vol. 15. № 10. P. 86–98.
3. Deep Learning-based Application Specific RAN Slicing for Mobile Networks / P. Du, A. Nakao. 2018. *IEEE 7th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*, Tokyo, Japan 2018. P. 1–3.
4. Abhishek R. Network Virtualization and Survivability of 5G Networks: Framework, Optimization Model, and Performance. 2018. *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018. P. 1–6.
5. Network slice selection, assignment and routing within 5G Networks / V.K. Choyi, A. Abdel-Hamid, Y. Shah, S. Ferdi, A. Brusilovsky. *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. Berlin, Germany, 2016. P. 1–7.
6. Towards 5G Network Slicing for the V2X Ecosystem / C. Campolo, A. Molinaro, A. Iera, R.R. Fontes, C.E. Rothenberg. *4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*. Montreal, Canada, 2018. P. 400–405.
7. Optimization model for Cross-Domain Network Slices in 5G Networks / R. Addad, M. Bagaia, T. Taleb, D.L. Cadette Dutra, H. Flinck. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, May 2020. Vol. 19. № 5. P. 1156–1169.
8. Intelligent Handover Management in 5G Mobile Networks based on Recurrent Neural Networks / B. Shubyn, T. Maksymyuk. *3rd IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019. P. 348–351.
9. 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.

Maksymiuk T.A., Shubyn B.P., Mysakovets D.O., Andrushchak V.S., Dumych S.S.

DEEP LEARNING BASED METHOD FOR ADAPTIVE NETWORK SLICING IN 5G

Currently, 5G mobile networks are facing a challenge of providing a variety of services with different quality requirements due to the significant heterogeneity of their applications. The requirements for services in the 5G network are divided into three major categories, namely enhanced mobile broadband (eMBB) with high throughput requirements, massive machine type communications (mMTC) with low throughput requirements, and ultra-reliable low latency communications (URLLC).

Therefore, the existing concept of a mobile network deployment should be transformed accordingly to provide automated end-to-end slicing of network resources for a specific type of service in the 5G. Network slicing is a logical division of the network resources into isolated virtual slices within a common physical infrastructure. These logical slices provide fine grained management of networks resources with respect to the different service requirements and enables flexible resource allocation for a variety of complex scenarios.

This paper proposes a new method of adaptive network and spectrum slicing in 5G networks, which uses a composed architecture of deep neural networks. The problem of classifying network traffic using fully connected neural networks is solved, taking into account a set of mutually related requirements for bandwidth, delay and reliability of packet delivery, which allows to distribute traffic between eMBB, mMTC and URLLC slices. A method for traffic prediction separately for each logical slice of the 5G network based on recurrent LSTM neural networks is proposed. The results of experimental studies show that the proposed system allows to predict the traffic intensity and the share of subscribers of individual network slices. Thus, the proposed method allows to increase the spectrum utilization efficiency in 5G networks.

Key words: 5G mobile networks, eMBB, mMTC, URLLC, deep neural networks, LSTM.