

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

**Максимюк Т.А.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Думич С.С.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Брич М.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Яремко О.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

### МЕТОД АДАПТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ НЕЛІЦЕНЗІЙНИХ РАДІОЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ ОПЕРАТОРАМИ МЕРЕЖ LTE

*У статті запропоновано новий метод адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону. Основною новизною запропонованого методу є те, що він дає змогу ефективно використовувати неліцензійний радіочастотний ресурс одночасно кількома операторами LTE. Це досягається шляхом використання комбінованої моделі на основі кооперативної теорії ігор та ланцюгів Маркова. Запропонована модель оцінює необхідний обсяг радіочастотних ресурсів для кожного оператора шляхом розрахунку їх внеску в загальний вигравш на основі значень вектора Шеплі. Ця властивість виключає егоїстичну поведінку операторів та стимулює їх справедливо використовувати неліцензійний частотний діапазон. Результати моделювання показують, що оператори досягають кращої продуктивності з використанням запропонованого методу, порівняно з традиційними методами розподілу спектру.*

**Ключові слова:** мережі мобільного зв'язку 5G, LTE-Unlicensed, адаптивне використання спектру, кооперативна теорія ігор, вектор Шеплі.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток технологій зумовлює зростання обчислювальних можливостей кінцевих пристроїв абонентського доступу, стимулюючи цим появу нових видів послуг у мережах мобільного зв'язку, які не були можливими раніше. Це призводить до значного зростання вимог до пропускну здатності мереж мобільного зв'язку. Тому розвиток мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління є важливим завданням в Україні та світі. Особливості розподілу радіочастотного ресурсу в Україні призвели до нестачі вільних частотних ресурсів для ефективного впровадження мереж стандарту LTE та їх подальшої модернізації до мереж п'ятого покоління (5G). Таким чином, постає завдання пошуку нових методів розгортання мереж LTE,

зокрема в неліцензійних частотних діапазонах, а також розроблення адаптивних методів управління, які б забезпечили належне функціонування мереж LTE в умовах нестачі радіочастотного ресурсу.

Аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених указує на те, що проблема розгортання гетерогенних мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління в Україні та за її межами, може бути вирішена застосуванням наукових засад розгортання мереж LTE в неліцензійному діапазоні [1], нових методів управління радіочастотними ресурсами в ліцензійному та неліцензійному діапазонах [2] та алгоритмів координації інтерференційних завад між LTE операторами та локальними мережами Wi-Fi [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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. Ці фактори узагальнюються класичним Шеннонівським рівнянням [4]:

$$C = \frac{W}{n} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{I + N} \right), \quad (1)$$

де  $W$  – смуга пропускання базової станції,  $n$  – коефіцієнт завантаженості базової станції (позначає кількість користувачів, що обслуговуються цією базовою станцією),  $S$  – потужність сигналу,  $I$  та  $N$  – потужності інтерференційних завад та адитивного білого гаусівського шуму відповідно.

Смуга пропускання каналу базової станції  $W$  може бути розширена за рахунок додаткового використання неліцензійного спектру, що призводить до лінійного підвищення пропускної здатності мережі за умови, що всі інші значення у формулі (1) є константами. Проте впровадження більшої кількості базових станцій, дає змогу знизити коефіцієнт завантаженості  $n$ , за умови рівномірного розподілу абонентського трафіку між усіма базовими станціями. На рис. 1. представлено класифікацію вимог та потенційних технічних рішень для комплексного підвищення ефективності функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

Вищезгадані чинники підвищення інформаційної ємності безпроводних мереж можуть бути узагальнені в межах концепції ущільнення мережі. Ущільнення безпроводної мережі є комбінацією просторового (зниження коефіцієнта заванта-

женості  $n$ ) та спектрального ущільнення (збільшення спектральної смуги  $W$ ). Просторове ущільнення здійснюється шляхом збільшення кількості базових станцій у заданій зоні обслуговування при забезпеченні приблизно рівномірного розподілу абонентів між ними [5]. Спектральне ущільнення передбачає агрегацію частотних смуг з усіх можливих діапазонів, починаючи від 500 МГц до 300 ГГц.

Згідно з аналізом радіочастотного розподілу, в Україні найперспективнішим для спектрального ущільнення є неліцензійний діапазон 5170-5850 МГц. Цей радіочастотний діапазон характеризується достатньою дальністю поширення сигналу для забезпечення мінімальних вимог до покриття малих комірок за потужності передавання до 100 мВт, яка встановлена регулятивними органами. Це підтверджуються ефективним функціонуванням локальних безпроводних мереж Wi-Fi у тому ж частотному діапазоні.

У низці робіт було проведено дослідження взаємних інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE у неліцензійному частотному діапазоні 5 ГГц. У роботі [6] авторами було доведено, що мережі Wi-Fi практично не впливають на мережі LTE, хоча мережі LTE створюють значний рівень інтерференційних завад для мереж Wi-Fi. Це пояснюється відмінністю у протоколах доступу до середовища між двома технологіями. У мережах LTE використовується часове розділення абонентів у межах одного часового фрейму, щоб уникнути інтерференції між ними. Процес передавання даних у самій мережі ніколи не зупиняється. Wi-Fi використовує множинний доступ

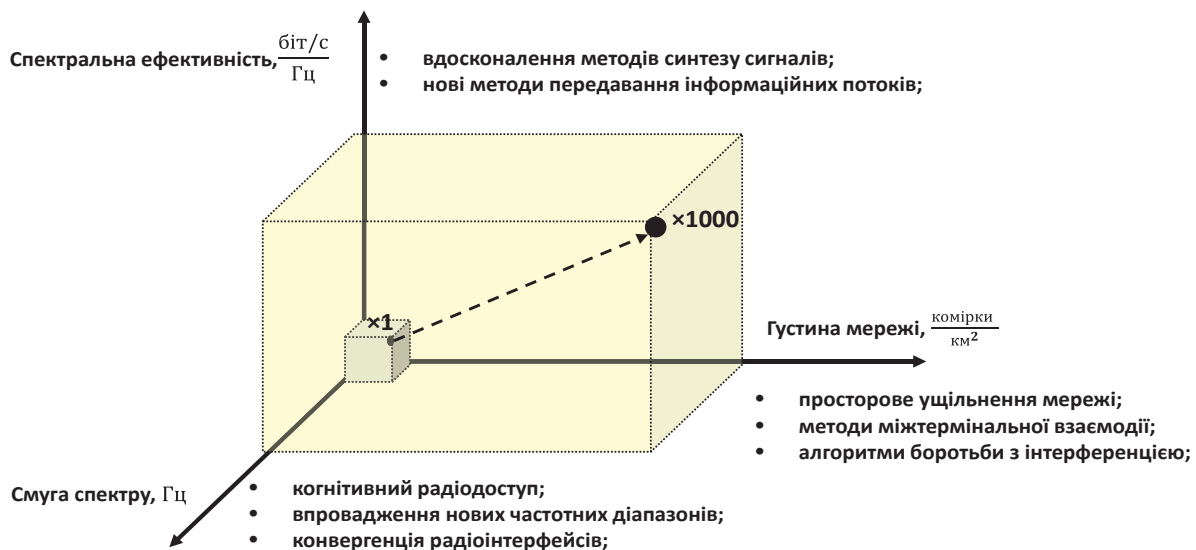


Рис. 1. Класифікація вимог та потенційних технічних рішень для мереж мобільного зв'язку 5G

з прослуховуванням середовища та уникненням колізій. Таким чином, Wi-Fi не буде передавати дані до тих пір, доки в каналі будуть присутні сигнали LTE, а останній буде передавати дані, незважаючи на наявність інших мереж неподалік. Відповідно до цього, при одночасному функціонуванні двох мереж, LTE буде постійно займати частотний канал, тоді як Wi-Fi буде більшість часу знаходитись у режимі очікування.

В іншій роботі було проведено моделювання характеристик співіснування мереж LTE та Wi-Fi при різних смугах каналу [7]. Результати показали, що при функціонуванні мережі LTE в смузі 3-5 МГц вплив на мережі Wi-Fi є значним. Проте, якщо LTE функціонує у смузі 1.4 МГц, із розташуванням центральної несучої у зоні захисного інтервалу Wi-Fi, вплив на мережі Wi-Fi є мінімальним.

Альтернативним варіантом забезпечення співіснування двох технологій у спільному частотному діапазоні є технологія LAA (Licensed Assisted Access) [8]. Ця технологія використовує режим призупинення процесу передавання в мережі LTE на певний проміжок часу, щоб дати змогу сусіднім мережам Wi-Fi здійснити прослуховування каналу і передати дані. Співвідношення періодів передавання і простою для LTE визначається на основі співвідношення кількості активних точок доступу обох технологій у поточній зоні покриття. На рис. 2 представлено порівняння методів доступу

до середовища на каналному рівні для технологій Wi-Fi та LTE/LAA.

Враховуючи динаміку зміни інтенсивності навантаження у гетерогенних мережах мобільного зв'язку, постійне зайняття неліцензійного спектру операторами LTE є необґрунтованим. Особливо актуальним це питання постає за умов наявності кількох конкуруючих операторів LTE, які прагнуть використовувати ресурси неліцензійного частотного діапазону для обслуговування своїх абонентів.

**Модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами LTE.** Для аналітичного опису вирішуваної проблеми пропонується модель спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону, яка враховує поточні потреби операторів у додаткових радіочастотних ресурсах. Ця модель поєднує елементи теорії ігор та ланцюгів Маркова для відображення як детермінованої, так і стохастичної природи досліджуваної гетерогенної мережі мобільного зв'язку [9]. Модель використовує двовимірний ланцюг Маркова зі станами  $(i, j)$ , у якому перший індекс відповідає за ігрову стратегію оператора зв'язку, яка є детермінованою, а другий – відображає поточне використання ресурсів оператора у неліцензійному частотному діапазоні (рис. 3). Ураховуючи непередбачувану поведінку абонента в мережі, це значення є випадковим.

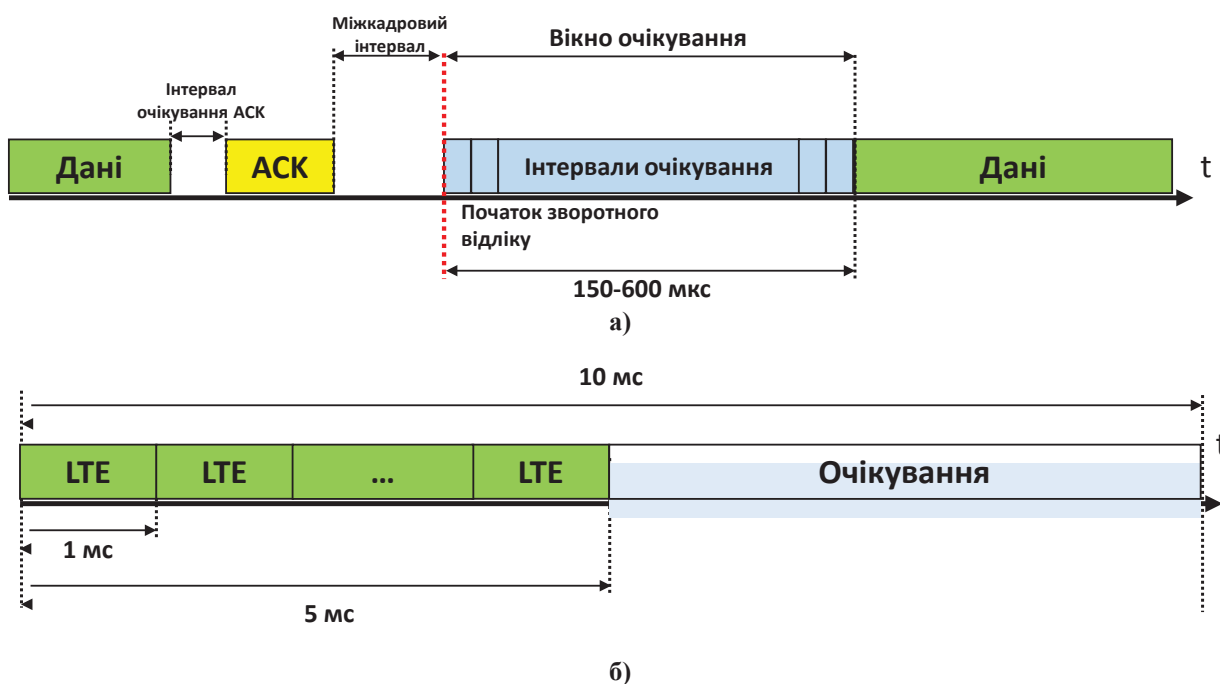
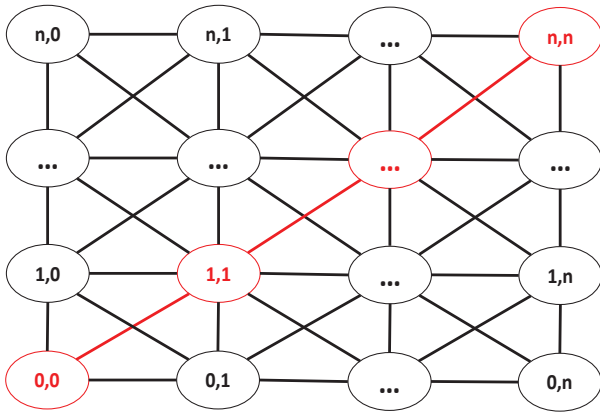


Рис. 2. Порівняння методу випадкового доступу у мережах Wi-Fi а) та методу доступу в мережах LTE/LAA – б)



**Рис. 3. Модель ігрового поля на основі ланцюга Маркова для спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону**

Кожен фіксований стан Марківського ланцюга відображає унікальне значення виграшу оператора, яке визначається на основі співвідношення двох індексів:

- вертикальний індекс визначає значення кількості радіочастотних каналів, які резервуються оператором у неліцензійному діапазоні;
- горизонтальний індекс визначає випадкове значення кількості радіочастотних каналів неліцензійного діапазону, які були використані абонентами мобільного зв'язку протягом останнього кадру.

Відповідно до цього, ігрове поле у запропонованій моделі формується у вигляді квадратної сітки з розмірністю  $[n \times n]$ , де  $n$  – кількість доступних радіочастотних каналів оператора в неліцензійному частотному діапазоні.

Матриця переходів горизонтальних станів у запропонованій моделі визначається як матриця випадкових величин, ймовірність появи яких залежить лише від поточного стану і не залежить від попередніх станів:

$$T_H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nn} \end{bmatrix}, \begin{cases} h_{11} \geq h_{12} \geq h_{13} \geq \dots \geq h_{1n} \\ h_{11} \geq h_{21} \geq h_{31} \geq \dots \geq h_{n1} \\ h_{zk} = h_{kz}, \forall z, k \end{cases} \quad (2)$$

де  $h_{zk}$  – ймовірність переходу  $S(i, z) \rightarrow S(i, k)$ . Додаткові умови у виразі (2) вказують на те, що ймовірність переходу до сусіднього стану завжди є вищою від ймовірності переходів до наступних станів ланцюга Маркова, незалежно від напрямку переходу. Матриця переходів вертикальних станів записується так:

$$T_V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix}, v_{zk} = P(S_t(i, k) | S_{t-1}(i, z)), \forall i, \quad (3)$$

де  $v_{zk}$  – ймовірність переходу стратегії оператора у неліцензійному частотному діапазоні  $S(z, j) \rightarrow S(k, j)$ .

**Метод адаптивного виділення радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону операторам LTE.** Для моделювання процесу спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів між кількома операторами LTE запропоновано кооперативну ігрову модель із повною інформацією та адаптацією виграшів. На основі цієї моделі пропонується метод адаптивного виділення радіочастотних ресурсів операторам LTE. Вхідними даними для методу є сумарний обсяг неліцензійних радіочастотних ресурсів для усіх операторів  $W$  та значення вектора Шеплі  $\psi_k$ . Значення вектора Шеплі показують частку кожного оператора у загальному виграші усіх операторів [10]. На основі цієї величини визначається частка неліцензійного радіочастотного ресурсу, яка була використана оператором для обслуговування абонентів:

$$\psi_k(M, U) = \frac{1}{M!} \sum_{S \subseteq M \sim \{k\}} S! [U(S \cup \{k\}) - U(S)], \quad (4)$$

де  $M$  – кількість мобільних операторів,  $U$  – сумарний усереднений виграш усіх операторів.

Значення Шеплі є однаковими для всіх операторів:

$$\psi_k = \frac{1}{M}, \forall k. \quad (5)$$

Відповідно до цього, ширина смуги радіочастот для кожного оператора розраховується відповідно до нижчезазначеного виразу:

$$\omega_k = W \psi_k, \forall k. \quad (6)$$

Індивідуальний виграш кожного оператора розраховується так:

$$U_k = \frac{1}{C_k} \sum_i R_i u_i, i \in \{1, n_k\}, k \in \{1, 2, 3\}, u_i \in \{0, 1\}, \quad (7)$$

де  $C_k$  – максимальна можлива пропускна здатність для заданої частотної смуги  $w_k$ ,  $P_i$  – реальна пропускна здатність  $i$ -го користувача,  $n_k$  – кількість користувачів оператора  $k$ .

Після цього індивідуальні виграші усіх операторів усереднюються для розрахунку нових значень Шеплі на основі виразу (4), тому цикл повторюється спочатку.

**Моделювання мережі мобільного зв'язку для порівняння ефективності різних методів розподілу радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону між операторами LTE.** Для визначення ефективності запропонованого методу проведено моделювання гетерогенної мережі в умовах спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону трьома опера-

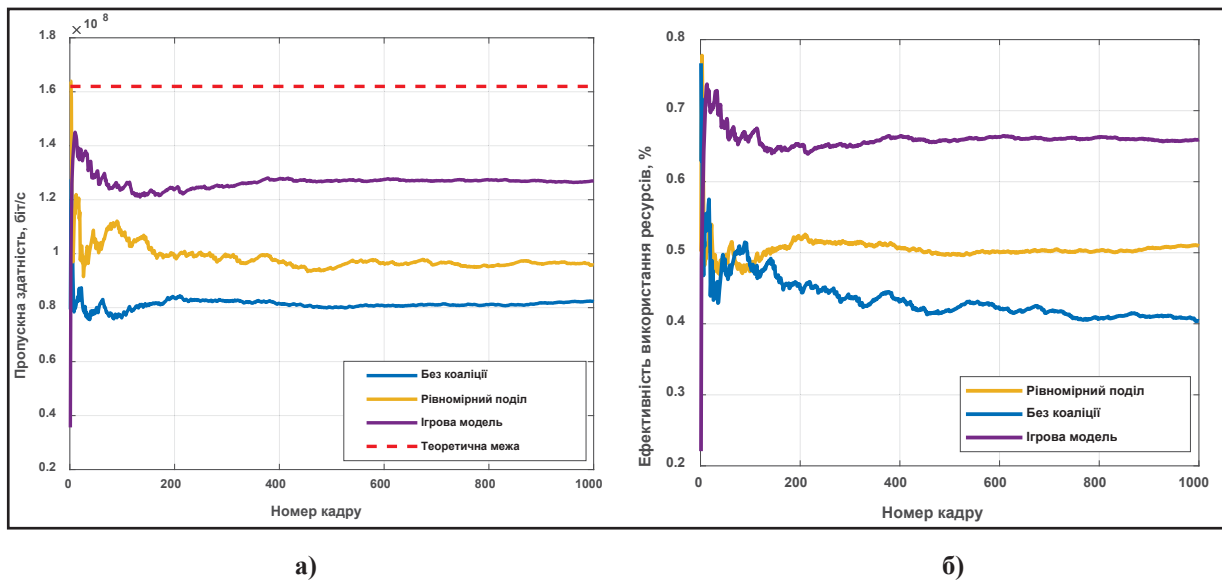


Рис. 4. Результати пропускної здатності а) та ефективності використання радіочастотних ресурсів; б) при різних моделях спільного використання ресурсів

торами LTE. Для порівняння використовуються характеристики середньої пропускної здатності усіх абонентів LTE та усередненого коефіцієнта використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону. Моделювання проводилось для трьох випадків спільного використання частотних ресурсів: без контролю розподілу, з рівномірним розподілом та з методом адаптивного розподілу на основі кооперативної ігрової моделі. Порівняльні характеристики результатів моделювання представлені на рис. 4.

Як показують отримані результати, за відсутності контролю за використанням радіочастотних ресурсів операторами LTE, ефективність їх використання не перевищує 40% (рис. 4.б), що призводить до вдвічі нижчої середньої пропускної здатності на абонента від теоретичного максимуму (рис. 4.а). Рівномірний розподіл спектра між операторами дає змогу уникнути інтерференційних завад, що позитивно впливає на коефіцієнт використання спектра та пропускну здатність. Навіть у такому випадку коефіцієнт використання радіочастотних ресурсів не перевищує 50% (рис. 4.б), а середня пропускна здатність абонентів становить лише 100 Мбіт/с, при теоретичному максимумі у 160 Мбіт/с (рис. 4.а). Це пояснюється тим, що активність абонентів різних операторів є різною, що призводить до значного розкиду значень. Менш завантажені оператори мають змогу забез-

печити значно вищі пропускні здатності для своїх абонентів. При використанні методу адаптивного розподілу радіочастотних ресурсів, ураховується фактор завантаженості кожного оператора, що дає змогу забезпечити коефіцієнт використання ресурсів на рівні 65% (рис. 4.б) та підвищити середню пропускну здатність на абонента до 130 Мбіт/с (рис. 4.а).

**Висновки.** У статті вирішено завдання спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами мобільного зв'язку в неліцензійному частотному діапазоні. Для цього запропоновано модель спільного використання радіочастотних ресурсів кількома операторами мобільного зв'язку на основі теорії ігор та ланцюгів Маркова. На основі цієї моделі розроблено метод адаптивного розподілу ресурсів між операторами LTE, який враховує поточний стан їх завантаженості, що дало можливість підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів на 25% при збільшенні середньої пропускної здатності абонентів на 65%. Подальші дослідження в цьому напрямі повинні бути спрямовані на удосконалення методів взаємодії операторів мереж LTE та операторів мереж Wi-Fi з метою розгортання конвергентної інфраструктури мереж 5G та максимізації коефіцієнта використання радіочастотних ресурсів як ліцензійного, так і неліцензійного діапазонів.

## Список літератури:

1. Maksymyuk T., Kyryk M., Jo M. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U. *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, № 6. P. 8-15.
2. Mueck M., Jiang W. Novel Spectrum Usage Paradigms for 5G. White Paper. USA: IEEE TCCN SIG CR in 5G. 2014. 77 p.
3. Maksymyuk T., Brych M., Klymash M., Jo M. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network. *IEEE Advanced Information and Communication Technologies (AICT'2017): proceedings of international conference*. (Lviv, Ukraine, 1-4 July 2017). Lviv, 2017. P. 197-200.
4. Bhushan N., Junyi Li, Malladi D. et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52. № 2. P. 82-89.
5. Maksymyuk T., Brych M., Strykhalyuk I., Jo M. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands. *Smart Computing Review*. 2015. Vol. 5. №4. P. 346-355.
6. Zhang H. Chu X., Guo W., Wang S. Coexistence of Wi-Fi and Heterogeneous Small Cell Networks Sharing Unlicensed Spectrum. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53. № 3. P. 158-164.
7. Cavalcante A., Almeida E., Vieira R., Chaves F., Paiva R., Abinader F., Choudhury S., Tuomaala E., Doppler K. Performance evaluation of LTE and Wi-Fi coexistence in unlicensed bands. *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring'2013): proceedings of international conference*. (Dresden, Germany, 2-5 June 2013). Dresden, 2013. P. 1-6.
8. Jian Y., Shih C. F., Krishnaswamy B., Sivakumar R. Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental evaluation, analysis and insights. *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW'2015): proceedings of international conference*. (London, UK, 8-12 June 2015). London, 2015. P. 2325-2331.
9. Maksymyuk T., Brych M., Klymash Y., Kyryk M., Klymash M. Game Theoretical Framework for Multi-Operator Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks. *IEEE Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2017): proceedings of international conference*. (Kharkiv, Ukraine, 10-13 October 2017). Kharkiv, 2017. P. 515-518
10. Shorrocks A. Decomposition procedures for distributional analysis: a unified framework based on the Shapley value. *Journal of Economic Inequality*. Springer. 2013. Vol. 11. № 1. P. 99-126.

## МЕТОД АДАПТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЛИЦЕНЗИОННОГО РАДИОЧАСТОТНОГО РЕСУРСА ОПЕРАТОРАМИ LTE

*В данной статье предложен новый метод адаптивного использования радиочастотных ресурсов нелицензионного диапазона. Основной новизной предложенного метода является то, что он позволяет эффективно использовать нелицензионный радиочастотный ресурс одновременно несколькими операторами LTE. Это достигается путем использования комбинированной модели на основе кооперативной теории игр и цепей Маркова. Предложенная модель оценивает необходимый объем радиочастотных ресурсов для каждого оператора путем расчета их вклада в общий выигрыш на основе значений вектора Шепли. Данное свойство исключает эгоистичное поведение операторов и стимулирует их справедливо использовать нелицензионный частотный диапазон. Результаты моделирования показывают, что операторы достигают лучшей производительности с использованием предложенного метода, по сравнению с традиционными методами распределения спектра.*

**Ключевые слова:** сети мобильной связи 5G, LTE-Unlicensed, адаптивное использование спектра, кооперативная теория игр, вектор Шепли.

## METHOD OF ADAPTIVE UTILIZATION OF UNLICENSED RADIO RESOURCES BY MULTIPLE LTE NETWORK OPERATORS

*In this paper, a new method of adaptive utilization of unlicensed spectrum is proposed. The key novelty of the proposed method is that it allows the effective utilization of unlicensed spectrum by multiple mobile network operators. This is achieved by using the combined model based on cooperative game theory and Markov chain. Proposed model estimates the amount of spectrum needed by each mobile network operator by calculation of their contribution to the aggregated payoff based on the Shapley value. This feature prevents operators from selfish behavior and forces them to fairly utilize the unlicensed band. Simulation results show that all competing operators achieve better performance with the proposed method, comparing to conventional spectrum sharing solutions.*

**Key words:** 5G mobile networks, LTE-Unlicensed, adaptive spectrum utilization, cooperative game theory, Shapley value.