

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНТЕГРОВАНІ МЕРЕЖІ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*Розглянуто сучасні тенденції розвитку бездротових комунікаційних систем нового покоління з акцентом на інтеграцію технологій когнітивного радіо (CR), неортогонального множинного доступу (NOMA), штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) у багатовимірних багатошарових 6G мережах. Проаналізовано основні виклики сучасних телекомунікаційних систем, зокрема дефіцит радіочастотного спектра, зростання навантаження мереж та необхідність підвищення спектральної й енергоефективності. Досліджено принципи функціонування когнітивних радіомереж та обґрунтовано ефективність їх інтеграції з технологією NOMA, що дозволяє формувати архітектуру CR-NOMA з підвищеною пропускну здатністю, покращеною якістю обслуговування та підтримкою масового підключення пристроїв Інтернету речей (IoT). Розглянуто можливості застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для інтелектуального управління ресурсами, прогнозування навантаження та оптимізації мережевих процесів.*

*Проведено аналіз багатовимірних MLMD 6G мереж, визначено ключові проблеми їх розвитку та запропоновано підхід до адаптивного управління ресурсами, орієнтований на підвищення ефективності функціонування мереж і якості обслуговування користувачів.*

**Ключові слова:** когнітивне радіо, неортогональний множинний доступ, штучний інтелект, машинне навчання, 6G мережа, спектральна ефективність, енергетична ефективність, управління ресурсами.

### *Abstract*

*The modern trends in the development of next-generation wireless communication systems are considered, with an emphasis on the integration of cognitive radio (CR) technology, non-orthogonal multiple access (NOMA), artificial intelligence (AI), and machine learning (ML) in multidimensional multi-layer 6G networks. The main challenges of modern telecommunication systems are analyzed, in particular the shortage of radio frequency spectrum, the increasing network load, and the need to improve spectral and energy efficiency. The principles of cognitive radio networks are studied, and the effectiveness of their integration with NOMA technology is substantiated, enabling the formation of a CR-NOMA architecture with higher throughput, improved quality of service, and support for massive connectivity of Internet of Things (IoT) devices. The possibilities of applying artificial intelligence and machine learning methods for intelligent resource management, traffic load prediction, and optimization of network processes are considered.*

*An analysis of multidimensional MLMD 6G networks is conducted, key development challenges are identified, and an adaptive resource management approach is proposed, aimed at improving network performance efficiency and user quality of service.*

**Keywords:** cognitive radio, non-orthogonal multiple access, artificial intelligence, machine learning, 6G network, spectral efficiency, energy efficiency, resource management.

### **Вступ**

Сучасний розвиток бездротових комунікаційних систем супроводжується стрімким зростанням обсягів передавання даних, масовим впровадженням пристроїв Інтернету речей (IoT), розвитком мобільного ширококутного доступу та підвищенням вимог до якості обслуговування, затримки й надійності мереж. За таких умов традиційні технології ортогонального множинного доступу вже не забезпечують необхідного рівня спектральної ефективності та масштабованості, що зумовлює потребу у впровадженні нових підходів до управління радіочастотним ресурсом [1].

Одним із перспективних напрямів розвитку бездротових мереж є технологія когнітивного радіо (Cognitive Radio, CR), яка забезпечує інтелектуальний моніторинг радіосередовища та динамічний доступ до спектра. Водночас значний інтерес викликає технологія неортогонального множинного доступу (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), що дозволяє одночасне обслуговування декількох користувачів у межах одного частотного ресурсу та підвищує спектральну ефективність системи [2].

Інтеграція технологій CR і NOMA формує перспективну концепцію CR-NOMA, яка поєднує адаптивність когнітивного радіо з високою ефективністю використання спектра, характерною для NOMA. Такі мережі забезпечують більш гнучке управління ресурсами, зниження рівня інтерференції, підвищення пропускної здатності та підтримку масових підключень у гетерогенних середовищах. Особливої актуальності даний напрям набуває в контексті розвитку мереж 5G/6G, edge computing та інтелектуальних телекомунікаційних систем [3].

Аналіз сучасних досліджень свідчить про активний розвиток методів адаптивного групування користувачів, кооперативної передачі, оптимізації енергоспоживання та застосування алгоритмів машинного навчання для управління ресурсами в CR-NOMA-системах. Водночас залишаються актуальними питання забезпечення енергоефективності, мінімізації інтерференції та підвищення надійності передавання даних у багатошарових мережах нового покоління [4].

Таким чином, дослідження CR-NOMA-комунікаційних мереж є важливим науково-технічним напрямом, спрямованим на підвищення ефективності використання радіочастотного спектра, забезпечення QoS та розвиток інтелектуальних бездротових систем для застосувань IoT, «розумних міст» і мереж 5G/6G.

Метою роботи є підвищення спектральної та енергоефективності, а також забезпечення високої якості обслуговування у бездротових комунікаційних мережах шляхом інтеграції технологій когнітивного радіо (CR), неортогонального множинного доступу (NOMA) та сучасних методів штучного інтелекту і машинного навчання для оптимізації розподілу ресурсів, управління інтерференцією та адаптивного керування мережевими процесами в системах 5G/6G та IoT.

### Результати дослідження

Проведено комплексне дослідження сучасних тенденцій розвитку бездротових комунікаційних систем нового покоління з акцентом на інтеграцію технологій когнітивного радіо (CR), неортогонального множинного доступу (NOMA), штучного інтелекту (AI), машинного навчання (ML) та багатовимірних багатошарових 6G мереж. Встановлено, що стрімке зростання обсягів передавання даних, розвиток Інтернету речей, edge computing та сервісів Beyond 5G формують нові вимоги до архітектури сучасних телекомунікаційних систем, зокрема щодо спектральної та енергоефективності, масштабованості й якості обслуговування [5].

У результаті аналізу принципів функціонування мереж когнітивного радіо доведено, що використання технології CR забезпечує ефективне використання недостатньо задіяних частотних ресурсів завдяки механізмам динамічного доступу до спектра. Показано, що інтеграція CR із технологією NOMA формує перспективну архітектуру CR-NOMA мереж, здатну підвищити спектральну ефективність, збільшити ємність мережі, знизити рівень інтерференції та забезпечити підтримку масового підключення IoT-пристроїв.

Встановлено, що CR-NOMA мережі мають значний потенціал для застосування у системах 5G/6G, «розумних містах», промисловому Інтернеті речей, автономних транспортних системах та інших високонавантажених цифрових середовищах. Доведено, що поєднання CR та NOMA забезпечує більш адаптивне управління ресурсами й підвищує ефективність функціонування мереж у динамічних умовах [6].

У роботі також досліджено можливості використання алгоритмів AI та ML для оптимізації функціонування мереж нового покоління. Показано, що застосування інтелектуальних методів дозволяє реалізувати прогнозування навантаження, адаптивний розподіл ресурсів, оптимізацію маршрутизації та автоматизоване управління енергоспоживанням. Використання AI/ML сприяє підвищенню продуктивності мереж і зменшенню енергетичних витрат цифрової інфраструктури [7].

Проведений аналіз багатошарових MLMD 6G мереж дозволив визначити ключові проблеми

їхнього розвитку, серед яких управління ресурсами, забезпечення енергоефективності, підтримка високої щільності підключень, гарантування безпеки та конфіденційності даних. Запропоновано користувачко-орієнтований підхід до інтелектуального розподілу ресурсів, що забезпечує покращення якості обслуговування та підвищення ефективності роботи мереж у різних сценаріях використання.

Отримані результати підтверджують, що інтеграція технологій CR, NOMA, AI/ML та інтелектуальних механізмів управління ресурсами є одним із ключових напрямів розвитку телекомунікаційних систем наступного покоління та створює передумови для формування високопродуктивних, енергоефективних, адаптивних і масштабованих мереж Beyond 5G та 6G [5].

### Висновки

У роботі проведено комплексне дослідження сучасних тенденцій розвитку бездротових комунікаційних систем нового покоління з акцентом на інтеграцію технологій когнітивного радіо (CR), неортогонального множинного доступу (NOMA), штучного інтелекту (AI), машинного навчання (ML) та багатовимірних багатопланових 6G мереж. Проаналізовано ключові проблеми сучасних телекомунікаційних систем, зокрема дефіцит радіочастотного спектра, зростання навантаження мереж та необхідність підвищення спектральної й енергетичної ефективності.

У результаті дослідження встановлено, що інтеграція технологій CR та NOMA забезпечує формування перспективної архітектури CR-NOMA, яка дозволяє підвищити пропускну здатність мереж, покращити якість обслуговування користувачів, знизити рівень інтерференції та забезпечити підтримку масового підключення IoT-пристроїв. Доведено ефективність застосування AI/ML алгоритмів для інтелектуального управління ресурсами, прогнозування навантаження, оптимізації маршрутизації та підвищення енергоефективності мереж нового покоління.

Проведений аналіз MLMD 6G мереж підтвердив необхідність використання адаптивних та інтелектуальних механізмів управління ресурсами для забезпечення стабільного функціонування високонавантажених телекомунікаційних систем. Запропонований підхід до адаптивного управління ресурсами дозволяє підвищити ефективність функціонування мереж і забезпечити покращення QoS у різних сценаріях використання.

Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції CR, NOMA та AI/ML як базових технологій перспективних систем Beyond 5G та 6G, здатних забезпечити високу продуктивність, енергоефективність, масштабованість та адаптивність майбутніх цифрових інфраструктур.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bepari, D., Misra, A., Mondal, S., Bala, I., Partial cooperative NOMA for improving outage performance of edge users. *Int. J. Electron. Lett.*, 12, 1, 69-86, 2024.
2. Abd Elaziz, M., Al-qaness, M.A., Dahou, A., Alsamhi, S.H., Abualigah, L., Ibrahim, R.A., Ewees, A.A., Evolution toward intelligent communications: Impact of deep learning applications on the future of 6G technology. *Wiley Interdiscip. Rev.: Data Min. Knowl. Discovery*, 14, 1, e1521, 2024.
3. Ahokangas, P. and Aagaard, A., *The Changing World of Mobile Communications: 5G, 6G and the Future of Digital Services*, Springer Nature, 2024.
4. Chen, Y., Ren, Z., Xu, J., Zeng, Y., Ng, D.W.K., Cui, S., 2024. Integrated Sensing, Communication, and Powering (ISCAP): Towards Multi-functional 6G Wireless Networks, arXiv preprint arXiv:2401.03516.
5. Gao, H. and Li, F., The application of virtual reality technology in the teaching of clarinet music art under the mobile wireless network learning environment. *Entertain. Comput.*, 49, 100619, 2024.
6. Hafi, H., Brik, B., Frangoudis, P.A., Ksentini, A., Bagaa, M., Split Federated Learning for 6G Enabled-Networks: Requirements, Challenges and Future Directions. *IEEE Access*, 2024.
7. Vercic, A.T., Vercic, D., Coz, S., Spoljaric, A., A systematic review of digital internal communication. *Public Relations Rev.*, 50, 1, 102400, 2024.

**Васильківський Микола Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфо-комунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)

**Топольський Олександр Сергійович** — аспірант групи G5-25а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [oleksandrtopolskyi@gmail.com](mailto:oleksandrtopolskyi@gmail.com)

**Лебідь Максим Ігорович** — студент групи ПЗТ-22б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [makz.lebid@gmail.com](mailto:makz.lebid@gmail.com)

**Vasykivskyi Mykola V.** — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)

**Topolskyi Oleksandr S.** — graduate student of group G5-25a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [oleksandrtopolskyi@gmail.com](mailto:oleksandrtopolskyi@gmail.com)

**Lebid Maksym I.** - student of group TSS-22b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [makz.lebid@gmail.com](mailto:makz.lebid@gmail.com)