

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто актуальні питання розвитку телекомунікаційних систем у контексті стрімкого зростання обсягів цифрового трафіку та розширення сфери застосування інформаційно-комунікаційних технологій. Проаналізовано передумови переходу від мобільних мереж п'ятого покоління до технологій бездротового зв'язку шостого покоління (6G), що розглядаються як основа формування майбутніх цифрових екосистем. Визначено основні принципи функціонування мереж 6G, зокрема забезпечення надвисоких швидкостей передавання даних, наднизьких затримок сигналу, підтримку масового підключення пристроїв та інтеграцію з інтелектуальними технологіями.

Особливу увагу приділено реалізації принципів сталого розвитку в телекомунікаційних системах, що передбачає підвищення енергоефективності мережевої інфраструктури, зниження рівня енергоспоживання та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Розглянуто концепцію Green Communication, яка орієнтована на створення енергоефективних та екологічно безпечних мереж зв'язку нового покоління. Проаналізовано роль технологій штучного інтелекту, блокчейн-рішень, постквантової криптографії, периферійних обчислень та використання терагерцового спектра у підвищенні ефективності, надійності та безпеки мереж 6G.

Встановлено, що застосування інтелектуальних алгоритмів управління мережевими ресурсами дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання телекомунікаційних систем та підвищити якість обслуговування користувачів. Показано перспективи використання мереж 6G у системах сталого розвитку, зокрема в інтелектуальних міських системах, цифровій медицині та системах екологічного моніторингу. Отримані результати свідчать про значний потенціал технологій 6G у формуванні енергоефективної, безпечної та масштабованої інформаційно-комунікаційної інфраструктури майбутнього.

Ключові слова: бездротова мережа, сталий розвиток, енергоефективність, штучний інтелект, Інтернет речей, блокчейн, постквантова криптографія, терагерцовий спектр.

Abstract

The paper addresses current issues in the development of telecommunication systems in the context of the rapid growth of digital traffic and the expansion of the application scope of information and communication technologies. The prerequisites for the transition from fifth-generation mobile networks to sixth-generation (6G) wireless communication technologies are analyzed, which are considered the foundation for the formation of future digital ecosystems. The main principles of 6G network operation are identified, including the provision of ultra-high data transmission rates, ultra-low latency, support for massive device connectivity, and integration with intelligent technologies.

Particular attention is paid to the implementation of sustainable development principles in telecommunication systems, which involves increasing the energy efficiency of network infrastructure, reducing energy consumption, and minimizing negative environmental impacts. The concept of Green Communication is considered, which is aimed at creating energy-efficient and environmentally friendly next-generation communication networks. The role of artificial intelligence technologies, blockchain solutions, post-quantum cryptography, edge computing, and the use of the terahertz spectrum in improving the efficiency, reliability, and security of 6G networks is analyzed.

It has been established that the use of intelligent algorithms for network resource management can significantly reduce the energy consumption of telecommunication systems and improve the quality of service for users. The prospects for the application of 6G networks in sustainable development systems are demonstrated, particularly in smart city systems, digital healthcare, and environmental monitoring systems. The obtained results indicate the significant potential of 6G technologies in forming an energy-efficient, secure, and scalable information and communication infrastructure of the future.

Keywords: wireless networks, sustainable development, energy efficiency, artificial intelligence, Internet of Things, blockchain, post-quantum cryptography, terahertz spectrum.

Вступ

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та зростання обсягів цифрового трафіку зумовлюють необхідність подальшого вдосконалення телекомунікаційної інфраструктури. Сучасні мобільні мережі п'ятого покоління забезпечили суттєве підвищення швидкості передавання даних, розширення спектра цифрових сервісів та підтримку великої кількості підключених пристроїв. Проте подальший розвиток інтелектуальних систем, Інтернету речей, автономних транспортних технологій та систем обробки великих даних потребує нових підходів до організації мережевої взаємодії. У зв'язку з цим значної актуальності набуває дослідження технологій бездротового зв'язку шостого покоління (6G), які розглядаються як основа формування майбутніх цифрових екосистем. Очікується, що мережі 6G забезпечать надвисокі швидкості передавання даних, наднизькі затримки сигналу, підтримку масового підключення пристроїв та інтеграцію з такими технологіями, як штучний інтелект, квантові обчислення та сенсорні мережі. Водночас розвиток телекомунікаційної інфраструктури повинен відповідати принципам сталого розвитку, що передбачають підвищення енергоефективності систем, зменшення рівня вуглецевих викидів та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. У цьому контексті особливого значення набуває концепція Green Communication, яка спрямована на створення енергоефективних і екологічно орієнтованих телекомунікаційних систем. Реалізація цієї концепції у мережах 6G передбачає застосування інтелектуальних алгоритмів управління ресурсами, використання альтернативних джерел енергії, оптимізацію мережевих архітектур та впровадження новітніх технологій безпеки [1].

Метою роботи є аналіз основних принципів функціонування технологій 6G у контексті сталого розвитку комунікацій, а також визначення ключових технологічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності, надійності та безпеки телекомунікаційних систем.

Результати дослідження

У результаті проведеного аналізу встановлено основні технологічні особливості та перспективи розвитку мереж зв'язку шостого покоління (6G) у контексті забезпечення сталого розвитку телекомунікаційних систем. Показано, що перехід від технології 5G до 6G обумовлений необхідністю підтримки нових типів цифрових сервісів, значним зростанням обсягів передавання даних та потребою у підвищенні енергоефективності мережевої інфраструктури [2].

Дослідження показало, що ключовими принципами функціонування систем зв'язку 6G є висока енергоефективність, масштабована масова підключуваність пристроїв, використання інтелектуальних алгоритмів управління мережею та забезпечення високого рівня інформаційної безпеки. Очікується, що мережі 6G забезпечать підвищення енергоефективності у 10–100 разів порівняно з мережами попереднього покоління завдяки використанню адаптивних алгоритмів управління ресурсами, технологій збору енергії з навколишнього середовища та оптимізації архітектури мережевої інфраструктури. Встановлено, що важливу роль у підвищенні ефективності функціонування мереж 6G відіграють технології штучного інтелекту, які забезпечують автоматизоване управління мережевими ресурсами, прогнозування мережевого трафіку та зниження енергоспоживання систем зв'язку. Результати експериментальних досліджень свідчать, що застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє зменшити енергоспоживання мережевих систем до 40 % без погіршення якості обслуговування користувачів [3]. Доведено, що важливими складовими безпеки мереж 6G є використання децентралізованих технологій на основі блокчейн, методів постквантової криптографії та інтелектуальних систем виявлення кіберзагроз. Інтеграція таких технологій забезпечує підвищення рівня захищеності мережевої інфраструктури та дозволяє протидіяти сучасним і перспективним кібернетичним атакам. Проаналізовано основні напрями застосування технологій 6G у системах сталого розвитку, серед яких важливе місце займають інтелектуальні міські системи, цифрова медицина та системи екологічного моніторингу. Використання мереж 6G у таких системах забезпечує ефективний обмін даними у режимі реального часу, підвищує ефективність управління ресурсами та сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище. Отримані результати свідчать, що технології 6G мають значний потенціал для формування нових енергоефективних і безпечних телекомунікаційних систем, які стануть основою розвитку інтелектуальних цифрових екосистем після 2030 року. Їх впровадження сприятиме підвищенню ефективності функціонування

інформаційно-комунікаційної інфраструктури та забезпеченню сталого розвитку сучасного суспільства [4].

Висновки

Проведений аналіз показав, що перехід до мереж шостого покоління (6G) є закономірним етапом еволюції телекомунікаційних систем і обумовлений необхідністю підтримки інтелектуальних цифрових сервісів, значного зростання обсягів передавання даних та підвищення вимог до енергоефективності мережевої інфраструктури. Встановлено, що ключовими принципами функціонування мереж 6G є надвисока швидкість передавання даних, наднизька затримка сигналу, масштабована масова підключуваність пристроїв, інтелектуальне управління мережею на основі технологій штучного інтелекту, а також підвищений рівень інформаційної безпеки.

Показано, що важливою складовою розвитку мереж 6G є реалізація концепції сталих комунікацій, яка передбачає підвищення енергоефективності систем зв'язку, зниження рівня енергоспоживання та мінімізацію негативного впливу телекомунікаційної інфраструктури на навколишнє середовище. Визначено, що застосування сучасних технологій, зокрема периферійних обчислень, терагерцового спектра, методів штучного інтелекту, блокчейн-технологій та постквантової криптографії, дозволяє підвищити ефективність функціонування, безпеку та масштабованість мереж наступного покоління. Перспективні напрями застосування мереж 6G охоплюють інтелектуальні міські системи, цифрову медицину та системи екологічного моніторингу, що створює передумови для формування інтегрованих цифрових екосистем та забезпечення сталого розвитку суспільства. Таким чином, технології 6G мають значний потенціал для створення енергоефективних, безпечних і масштабованих телекомунікаційних систем, які стануть основою розвитку інформаційно-комунікаційної інфраструктури майбутнього після 2030 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Onel Lopez, Ritesh Kumar Singh, Dinh Thuy Phan-Huy, Efstathios Katranaras, Nafiseh Mazloum, Kalle Ruttik, Riku Jantti, Hamza Khan, Osmel Rosabal, Pavlos Alexias, Praseon Raghuwanshi, David Ruiz-Guirola, Bikramjit Singh, Andreas Høglund, Dung Pham Van, Amirhossein Azarbahram, and Jeroen Famaey. Zero-energy devices for 6G: Technical enablers at a glance. IEEE Internet of Things Magazine, 8(3):14–22, 2025.

2. Shiang-Jiun Chen and Yi-Hsueh Tsai. Quantum-safe networks for 6G an integrated survey on QQC, QKD, and satellite QKD with future perspectives. Computing & AI Connect, 2(1):1–10, 2025.

3. Васильківський М. В. Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML [Текст] / М. В. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, М. Будащ // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – Вип. 1. – С. 89–100.

4. Васильківський М. В. Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту [Текст] / М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 51. – С. 139-147.

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

Грабчак Назарій Віталійович — аспірант групи 172-23а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nazariihrabchak@gmail.com

Ткач Роман Олександрович — студент групи ПЗТ-22б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: troma06@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

Hrabchak Nazarii V. — graduate student of group 172-23a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nazariihrabchak@gmail.com

Tkach Roman O. - student of group TSS-22b, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: troma06@gmail.com