

**Киричек Г.Г.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Тягунова М.Ю.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Латишев А.В.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗШОВНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ MIKROTIK CAPSMAN

*На даний час TamoGraph Site Survey є потужним та зручним інструментом для збору, візуалізації та аналізу даних у мережах Wi-Fi стандарту IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax. Для впровадження та експлуатації бездротових мереж потрібні професійні програмні продукти, які дозволяють значно спростити виконання таких складних та трудомістких завдань як побудова карт покриття, аналіз інтерференції та рівня сигналу, розподіл Wi-Fi-каналів тощо. Метою роботи є реалізація безпроводової безшовної мережі для створення публічної зони бездротового доступу або мережі Wi-Fi (зони безшовного покриття), що охоплює всю територію навчального закладу, а також проведення дослідження стандарту IEEE 802.11ax, методом моделювання робочих характеристик безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPSMAN, із метою підвищення рівня інформатизації при наданні сучасних послуг. Об'єктом дослідження є процес моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі стандарту IEEE 802.11ax. Предметом дослідження є моделі, методи, програмні та інструментальні засоби моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPSMAN. У рамках дослідження запропоновано модель сегмента мережі для стандарту IEEE 802.11ax, яка враховує витрати часу на доступ до фізичного рівня та рівня каналу передачі даних. Модель також враховує сценарії передачі як для одного, так і для декількох користувачів як низхідної, так і висхідної лінії зв'язку під час розрахунку пропускну здатності каналу в мережах IEEE 802.11ax. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує втрати фізичного рівня та вплив різномірного трафіку. Крім того, багато припущень, таких як однакова відстань усіх станцій, відсутність прихованих вузлів і умови насичення мережі, також можуть змінити загальну пропускну здатність мережі. В роботі для кожного діапазону частот аналізуються три випадки для трьох показників, такі як: рівень сигналу; відношення сигнал/шум та прогнозована фізична швидкість.*

**Ключові слова:** IEEE 802.11ax, CAPSMAN, Mikrotik, Wi-Fi, WinBox, MIMO.

**Постановка проблеми.** Сьогодні бездротові мережі стали невід'ємною частиною повсякденного життя бо дозволяють пристроям спілкуватися один з одним без проводів [1]. Це позитивно впливає на багато факторів. Ноутбуки, смартфони, планшети, телевізори, системи пожежної безпеки та багато інших пристроїв підтримують бездротове підключення [2]. Популярність бездротових мереж за останні роки спонукала розробників реалізовувати нові стандарти зв'язку, які пропонують вищу швидкість з'єднання. Отже, якщо швидкість з'єднання, яка підтримується бездротовими пристроями, спочатку становила лише 1 і 2 Мбіт/с (чого було явно недостатньо), то тепер максимальна швидкість з'єднання досягла 11 Гбіт/с і вже може конкурувати із традицій-

ними дротовими мережами [3]. Існує декілька типів бездротових мереж, які відрізняються за площею покриття, підтримуваною швидкістю з'єднання та методами кодування даних. Стандарт IEEE 802.11ax є новим для користувачів та спрямований на підвищення ефективності мережі в цілому [4]. Маючи достатньо точок доступу та велику кількість пристроїв, які підключаються до них, маємо важливе і складне завдання забезпечити ефективну роботу мережі для кожного з цих пристроїв. Для вирішення цього завдання розгорнемо безшовну мережу Wi-Fi та проведемо дослідження специфікації IEEE 802.11ax на прикладі встановлення обладнання та використання для цього приміщень навчального закладу. Також дослідим характеристики цього стандарту,

які можна досягти поточною мережею, шляхом проведення моделювання робочих характеристик безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPsMAN [5].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Фізичний рівень, який використовується в розширеннях 802.11ax, зазвичай успадковується від розширень 802.11n і 802.11ac. Мережі 802.11ax також використовують мультиплексування з ортогональним частотним розподілом (OFDM) і підтримують канали 20, 40, 80, 80+80 і 160 МГц, а додаткова функція дозволяє використовувати множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) [4; 6]. Щоб збільшити кількість піднесучих і забезпечити кращу вибірковість при використанні методів OFDMA, розмір символу OFDM, який використовується для передачі блоків даних користувача, збільшено в 4 рази, тобто 12,8 мкс замість 3,2 мкс. 802.11ax також збільшує захисний інтервал між символами OFDM, щоб зменшити міжсимвольні перешкоди. Тому, через збільшення накладних витрат у разі використання довшого захисного інтервалу, додана довжина захисного інтервалу пропонує три варіанти: стандартні 0,8 мкс і додаткові 1,6 мкс і 3,2 мкс [7]. Передача службових кадрів споживає досить багато ресурсів каналу. Щоб якось зменшити накладні витрати через наявність службового трафіку, 802.11ax забороняє передачу службових кадрів на швидкості нижче 5,5 Мбіт/с у діапазоні 2,4 ГГц [8].

CAPsMAN - це Controlled Access Point System Manager (CAP (Controlled Access Point) з багатьма маршрутизаторами Mikrotik та MAN (manager)) або керований диспетчер системи точок доступу, який дозволяє централізувати управління бездротовою мережею та обробку даних. Вбудований в маршрутизатор контролер є бонусом, і в поєднанні з безліччю функцій RouterOS стає потужним рішенням при апаратному розгортанні Mikrotik. Функції, які виконувала точка доступу (контроль доступу, автентифікація клієнта), тепер виконуються CAPsMAN [5]. Пристрій CAP тепер повинен забезпечувати лише шифрування/дешифрування рівня бездротового зв'язку.

TamoGraph Site Survey є потужним та зручним інструментом для збору, візуалізації та аналізу даних у мережах Wi-Fi стандарту IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax. Його основні функції: пасивні та активні дослідження; радіочастотне планування, створення віртуальних моделей та планування WLAN; проведення комплексного аналізу WLAN із візуалізацією рівнів сигналу, перешкод, зон покриття точки доступу, швидко-

сті передачі даних та проблем із мережею; автоматичне визначення розміщення точки доступу; детальна інформація по кожній точці доступу (канал, максимальна швидкість передачі даних та тип шифрування); можливість використання GPS для роботи на відкритому просторі; повна підтримка мереж 802.11ax, а також стандартів IEEE 802.11a/b/g/n/ac; детальні звіти у форматах PDF, HTML та Microsoft Word. Ця система допомагає суттєво скоротити час та витрати на планування та обслуговування мережі, збільшити її продуктивність та розширити покриття, навіть без придбання додаткового обладнання, а також дозволяє проводити реактивні, проактивні та прогнозовані дослідження [9].

**Постановка завдання.** Метою роботи є реалізація бездротової безшовної мережі та дослідження стандарту IEEE 802.11ax методом моделювання робочих характеристик безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPsMAN з метою підвищення рівня інформатизації при наданні сучасних послуг. Об'єкт дослідження - процес моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі стандарту IEEE 802.11ax. Предметом дослідження є моделі, методи, програмні та інструментальні засоби моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPsMAN.

В якості вихідних даних беремо мережу IEEE 802.11ax, що складається із точки доступу і N абонентських станцій. Усі станції знаходяться в межах прямої видимості точки доступу та усіх інших станцій (немає прихованих станцій). Вони можуть надсилати та отримувати дані, використовуючи однакову схему модуляції та кодування та мають однакові параметри. Окрім того ми маємо, що ідеальні умови каналу передачі на фізичному рівні, головним чином забезпечуються на MAC рівні [10].

У рамках дослідження запропоновано модель сегмента мережі для стандарту IEEE 802.11ax, яка враховує витрати часу на доступ до фізичного рівня та рівня каналу передачі даних. Модель також враховує сценарії передачі як для одного, так і для декількох користувачів як низхідної, так і висхідної лінії зв'язку під час розрахунку пропускну здатності каналу в мережі стандарту IEEE 802.11ax. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує втрати фізичного рівня та вплив різно-рідного трафіку. Крім того, багато припущень, таких як однакова відстань до усіх станцій, відсутність прихованих вузлів і умови насичення мережі, також можуть змінити загальну пропускну здатність мережі [11; 12].

**Виклад основного матеріалу.** В роботі для кожного діапазону частот аналізуються приклади для трьох показників, таких як: рівень сигналу; відношення сигнал/шум та прогнозована фізична швидкість. Спочатку розглянемо налаштування у діапазоні 5 ГГц та, використовуючи візуалізацію, порівняємо результат із використанням діапазону 2.4 ГГц при візуальній оцінці різниці у рівні сигналу.

На прикладі програмного продукту TamoGraph Site Survey розглянемо рівень сигналу в проєктованому приміщенні. Для цього завантажуюмо план приміщення, вказуємо радіус зони покриття однієї точки доступу та розташовуємо інші точки доступу відповідно до плану їх розміщення.

На рисунках показано порівняння площі покриття та рівня сигналу однієї точки доступу, яка розташована у приміщенні «Rm1» із використанням частотних діапазонів 2.4 ГГц (рис. 1) та 5 ГГц (рис. 2).

Рівень сигналу або карта покриття є однією із найважливіших характеристик, які впливають на продуктивність мережі Wi-Fi. За даними зображення можна візуально визначити, що сигнал на частоті 5 ГГц згасає швидше ніж на частоті 2,4 ГГц, але перевага 2,4 ГГц у цій області компенсується блокуванням у цьому діапазоні. З іншого боку, покриття мережі із частотою 5 ГГц легко розширити шляхом встановлення додаткових точок доступу [13]. Далі наведено рівень сигналу усіх встановлених точок доступу у частотному

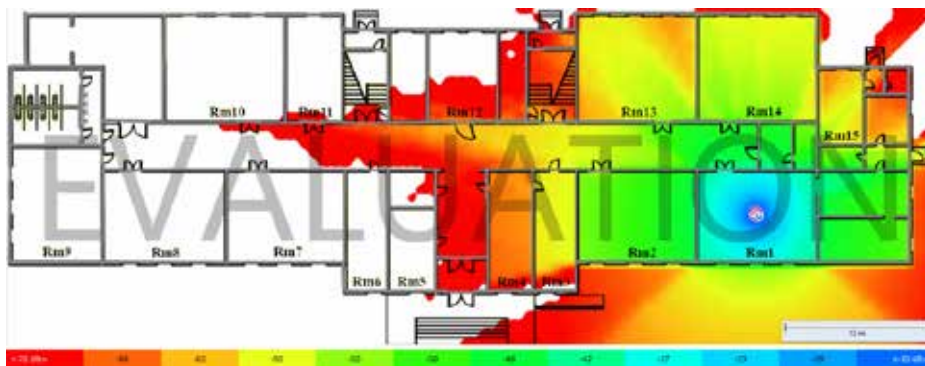


Рис. 1. Рівень сигналу в діапазоні 2.4 ГГц

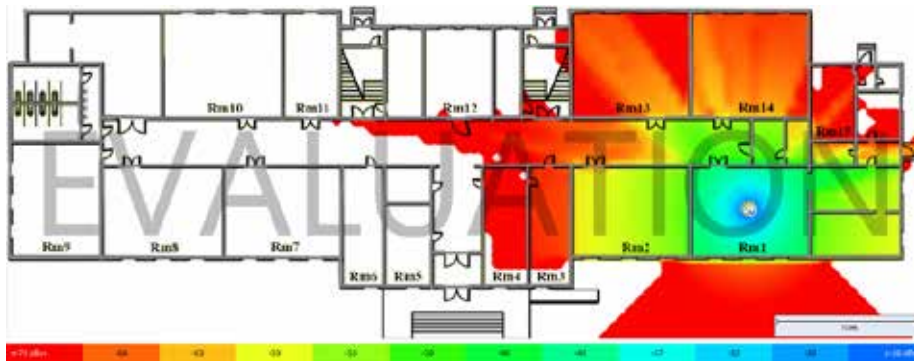


Рис. 2. Рівень сигналу в діапазоні 5 ГГц

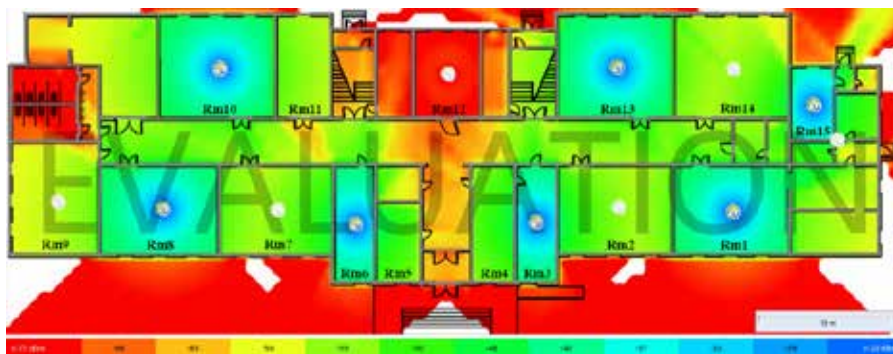


Рис. 3. Рівень сигналу на першому поверсі в діапазоні 5 ГГц

діапазоні 5 ГГц на першому (рис. 3) та другому (рис. 4) поверхах, згідно плану розміщення мережевого обладнання.

Бачимо, що зоною із найнижчою потужністю сигналу на першому поверсі є приміщення «Rm12». На другому поверсі рівень потужності сигналу у всіх робочих приміщеннях є задовільним.

Після налаштування рівня сигналу перевіряємо рівень сигнал/шум. Ця характеристика вимірюється в децибелах (dB) і вказує на те, наскільки рівень сигналу вище рівня шуму. У зонах із низьким співвідношенням сигнал/шум клієнтські пристрої не можуть зв'язатися з точкою доступу [10; 13]. На рисунках показано відношення сигнал/шум для даних точок доступу на першому (рис. 5) та другому (рис. 6) поверхах.

Фізична швидкість безпосередньо пов'язана із пропускною здатністю, яка є середньою швид-

кістю, з якою клієнт обмінюється з точкою доступу даними прикладного рівня (файлами). Пропускна здатність є нижчою за фізичну швидкість із таких причин як: повторна передача (дублювання) даних та надсилання технічних або службових даних, які не несуть корисного навантаження. Низька фізична швидкість завжди означає низьку пропускну здатність, яка призводить до низької продуктивності мережі.

Далі зображено прогнозовану фізичну швидкість для даних точок доступу на першому (рис. 7) та другому (рис. 8) поверхах будівлі.

Також розглянемо та порівняємо із попередніми (рис. 3–8) результати застосування точок доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц. На рисунках проілюстровано співвідношення сигнал/інтерференція точок доступу на першому (рис. 9) та другому (рис. 10) поверхах.

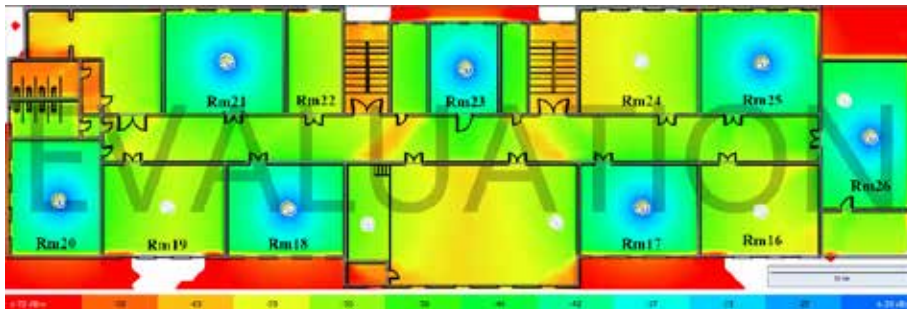


Рис. 4. Рівень сигналу на другому поверсі в діапазоні 5 ГГц

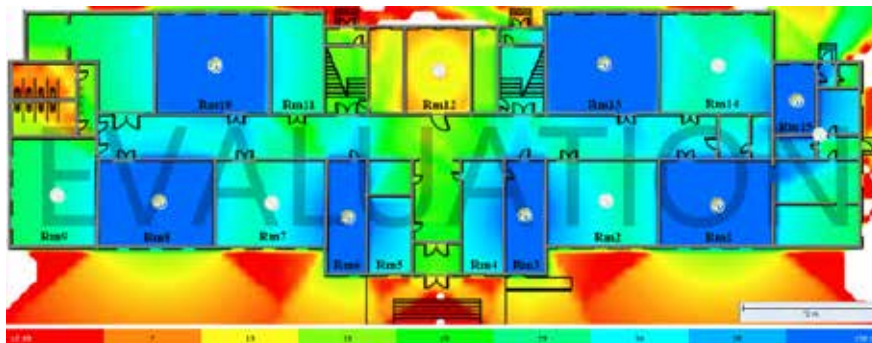


Рис. 5. Відношення сигнал/шум на першому поверсі (5 ГГц)

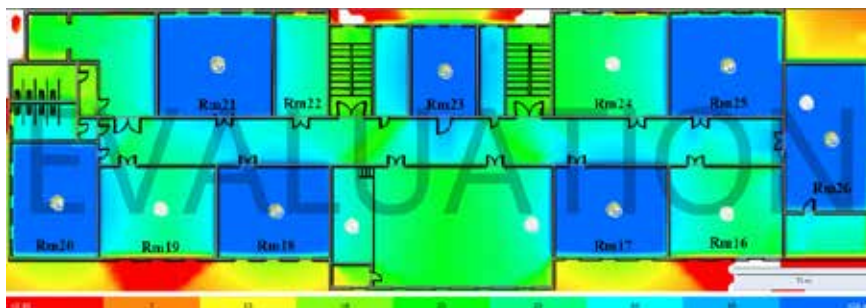


Рис. 6. Відношення сигнал/шум на другому поверсі (5 ГГц)

На рисунках чітко видно вплив сусідніх точок на один канал. Перешкоди найвищі, коли сусідні пристрої працюють на тому ж самому каналі. Для частотного діапазону 2,4 ГГц перешкоди сусідніх каналів досить значні та зникають, якщо канали, які використовують точки доступу розділені 5 або більшою кількістю каналами. При цьому у діапа-

зоні 5 ГГц практично немає інтерференції суміжних каналів.

Далі наведемо рівень сигналу точок доступу в діапазоні 2,4 ГГц на першому (рис. 11) та другому (рис. 12) поверхах.

В разі використання частотного діапазону 2,4 ГГц в порівнянні із 5 ГГц, зона «Rm12», яка

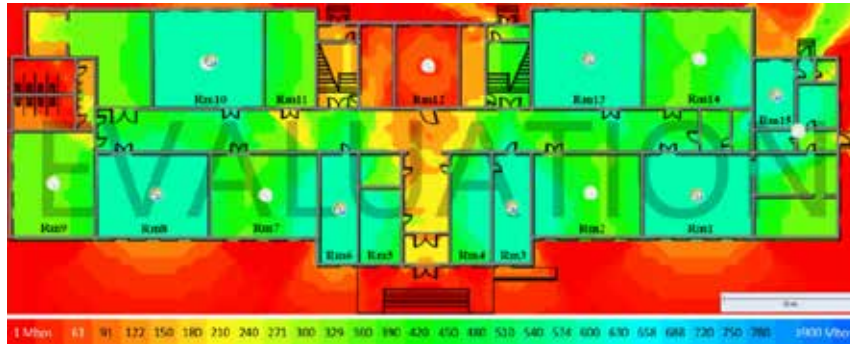


Рис. 7. Прогнозована швидкість на першому поверсі (5 ГГц)

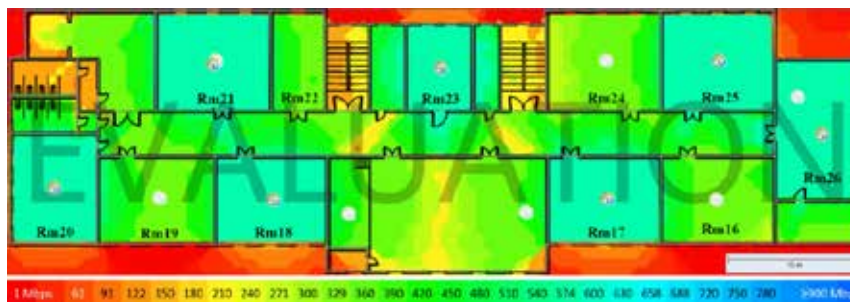


Рис. 8. Прогнозована швидкість на другому поверсі (5 ГГц)

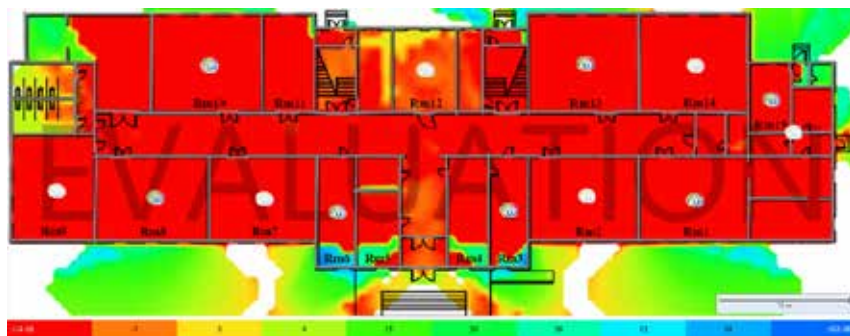


Рис. 9. Відношення сигнал/інтерференція (перший поверх)

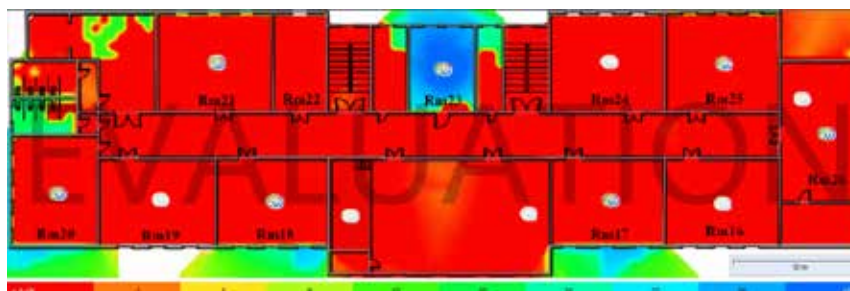


Рис. 10. Відношення сигнал/інтерференція (другий поверх)

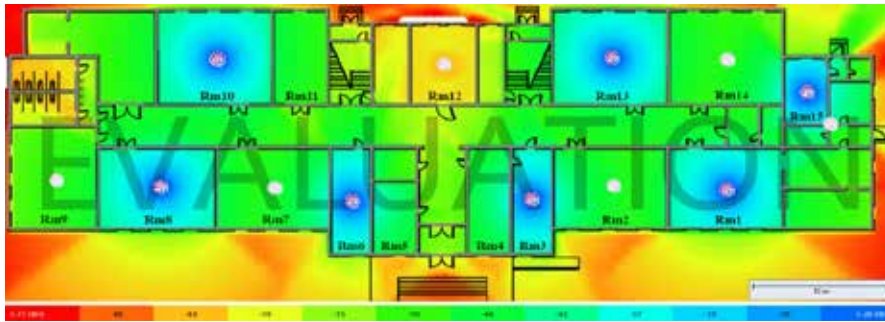


Рис. 11. Рівень сигналу на першому поверсі (2.4 ГГц)

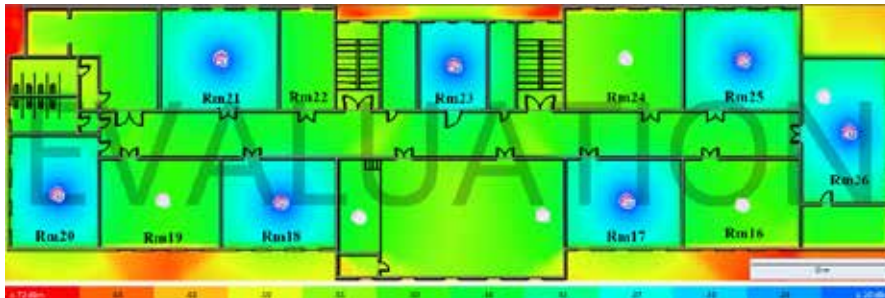


Рис. 12. Рівень сигналу на другому поверсі (2.4 ГГц)

мала найнижчу потужністю сигналу (рис. 3) вже має рівень сигналу близький до середнього (рис. 11). При використанні офіційних характеристик стандарту IEEE 802.11ax бачимо, що змодельовані характеристики точок доступу значно відрізняються від офіційних. Візьмемо максимальну фізичну швидкість передачі 9608 Мбіт/с та фізичну швидкість передачі змодельованої мережі в 600 Мбіт/с, маємо різницю яка дорівнює 16 разів. При цьому, точка доступу досягає максимальної фізичної швидкості у частотному діапазоні 5 ГГц, використовуючи 8 просторових потоків, ширину каналу 160 МГц та модуляцію 1024QAM.

Якщо за середнє беремо пристрої, які підтримують MIMO 2x2, тобто шляхом підрахунку можна визначити початкову, після першого скринінгу, фізичну швидкість:  $9608/8 = 1201$  Мбіт/с (базова швидкість) і множимо на 2 просторових потоки, отримуємо  $1201 \times 2 = 2402$  Мбіт/с. З шириною каналу теж не все так просто. Стандарт 802.11ax дійсно допускає використання ширини каналу 160 МГц, але навіть ширина у 80 МГц використовується не часто, тому що перешкоди можуть завадити роботі сусідніх мереж та користувачів. Тому найпоширенішим поки залишається використання каналів 20 МГц. Ширина каналу, яка використовується при моделюванні, становить 40 МГц, тому фізична швидкість розраховується наступним чином: коефіцієнти для ширини

каналу 40, 80 і 160 МГц дорівнюють 2,1, 4,5 і 9 відповідно.

**Висновки.** У роботі проведено дослідження актуальних на сьогодні методів та алгоритмів оптимізації технології передачі даних у бездротових локальних мережах та визначено властивості, які дозволяють забезпечити необхідні вимоги для систем доступу на базі стандарту IEEE 802.11ax. Стандарт IEEE 802.11ax є новою технологією, яка забезпечує вищу швидкість передачі даних серед усіх попередніх стандартів IEEE 802.11. Програмне забезпечення TamoGragh Site Survey ідеально підходить для попереднього моделювання майбутніх мереж Wi-Fi. Для цього в програмі є все, що потрібно, від роботи із планами приміщень до отримання приблизної фізичної швидкості проектованої мережі. Діапазони 2,4 та 5 ГГц можуть використовуватись для різних робочих завдань. Точки доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц мають більшу зону покриття але відносно нижчу швидкість передачі даних (порівняно із діапазоном 5 ГГц). Окрім того, перешкоди у вигляді тонких стін мало впливають на швидкість передачі та рівень сигналу. З іншого боку, точки доступу, які працюють в діапазоні 5 ГГц мають невелику зону покриття але мають високу швидкість передачі. Цей діапазон є дуже чутливим навіть до невеликих перешкод, що може призвести до погіршення рівня сигналу та різкого падіння швидкості.

Список літератури:

1. Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г. Програмний комплекс з підтримки розподіленої взаємодії мережевих пристроїв та додатків. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2021. Вип.32(71). №2. С.229–234.
2. Tiahunova M., Tronkina O., Kirichek G., Skrupsky S. The Neural Network for Emotions Recognition under Special Conditions. *In CEUR Workshop Proceedings 2864*. 2021. P. 121-134.
3. Lazebnyi V.S., Yin C. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. 2017. 22(5). P. 47-53.
4. Qu Q., Li B., Yang M., Yan Z., Yang A., Deng D., Chen K. Survey and performance evaluation of the upcoming next generation WLANs standard-IEEE 802.11 ax. *Mobile Networks and Applications*. 2019. 24(5). P. 1461-1474.
5. Febrianti F., Haryani P., Iswahyudi C. Perancangan jaringan wireless multiple SSID menggunakan fitur Mikrotik CAPsMAN. *Jurnal Jarkom*. 2020. 8(2). P. 65-72.
6. Kyrychek H., Tiahunova M., Latyshev A. Data transmission networks modeling process. *Publishing House «Baltija Publishing»*. 2022. P. 10-13.
7. Arena F., Pau G., Severino A. A review on IEEE 802.11 p for intelligent transportation systems. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2020. 9(2). P. 22.
8. Токарев В.В., Сапарбаєв Т. Методи підвищення продуктивності у мережах Wi-Fi на базі стандарту 802.11ax. 2019. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/0ec254a3-6c44-41a9-94f4-9337fa063801/content>.
9. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. 21(1). P. 197-216.
10. Yang M., Li B., Yan Z. MAC Technology of IEEE 802.11 ax: Progress and Tutorial. *Mobile Networks and Applications*. 2021. 26(3). P. 1122-1136.
11. Wilhelmi F., Barrachina-Muñoz S., Cano C., Selinis I., Bellalta B. Spatial reuse in IEEE 802.11 ax WLANs. *Computer Communications*. 2021. 170. P. 65-83.
12. Rudkovskiy O.R., Kirichek G.G. Interaction support system of network applications. *In CEUR Workshop Proceedings 2832*. 2020. P. 11-23.
13. Пілінський В.В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. 2014. К.: Кафедра. 336 с.

**Kyrychek H.H., Tiahunova M.Yu., Latyshev A.V. SIMULATION OF WORKING CHARACTERISTICS A SEAMLESS NETWORK BASED ON MIKROTIK CAPSMAN TECHNOLOGY**

Currently, TamoGraph Site Survey is a powerful and convenient tool for collecting, visualizing and analyzing data in Wi-Fi networks of the standard IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax. The implementation and operation of wireless networks requires professional software products that allow you to significantly simplify the implementation of such complex and time-consuming tasks as the construction of coverage maps, analysis of interference and signal level, distribution of Wi-Fi channels, etc. The aim of the work is the implementation of a wireless seamless network to create a public wireless access zone or a Wi-Fi network (seamless coverage zone) covering the entire territory of the educational institution, as well as conducting research the IEEE 802.11ax standard, using the method of modeling the operating characteristics of a seamless network based on Mikrotik technology CAPsMAN, with the aim of increasing the level of informatization in the modern services provision. The object of research is the process of modeling the operating characteristics of a seamless network based on the IEEE 802.11ax standard. The subject of the research is models, methods, software and tools for simulating operational characteristics of a seamless network based on Mikrotik CAPsMAN technology. As part of the research, a network segment model for the IEEE 802.11ax standard is proposed, which takes into account the time spent on accessing the physical layer and the data link layer. The model also considers both single-user and multi-user transmission scenarios for both downlink and uplink when calculating link capacity in IEEE 802.11ax networks. The disadvantage of this model is that it does not take into account physical layer losses and the impact of heterogeneous traffic. In addition, many assumptions, such as the same distance of all stations, no hidden nodes, and network saturation conditions, can also change the overall network throughput. In the paper, for each frequency range, three examples are analyzed for three indicators, such as: signal level; signal-to-noise ratio and predicted physical speed.

**Key words:** IEEE 802.11ax, CAPsMAN, Mikrotik, Wi-Fi, WinBox, MIMO.