



**ЦИФРОВА ЕКОНОМІКА ТА  
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**  
Digital Economy and Information Technologies

УДК 004.738.5:004.7

*Владислав Зінченко,  
Сергій Сабанов,  
Кафедра інформаційних технологій  
Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій  
Запоріжжя, Україна*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗДРОТОВИХ  
МЕРЕЖ СТАНДАРТІВ IEEE 802.11 AC-AX  
В УМОВАХ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ РОЗГОРТАННЯ**

**Анотація.** В роботі розглядаються особливості отримання та інтерпретації експлуатаційних характеристик сучасних бездротових мереж стандарту IEEE 802.11ax в умовах високої щільності розташування активних компонентів мережі. Проводиться порівняння експлуатаційних параметрів, що отримані в ході моделювання з застосуванням спеціального програмного середовища Ekahau AI Pro та експериментальних даних, отриманих на реальному обладнанні. Встановлена в ході дослідження розбіжність експериментальних та проектних даних дозволяє значно точніше представити відмінності поведінки мереж IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac в складних умовах, що може бути корисним на етапах проектування бездротових мережевих структур.

**Ключові слова** -*Ekahau AI Pro, IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ax, iPerf, бездротові мережі, мережі високої щільності.*

## 1. ВСТУП

Базовий стандарт стеку IEEE 802.11 було представлено понад два десятиліття тому [1] і він продовжує активно розвиватися. Однак, давно придумані принципи взаємодії пристроїв Wi-Fi у робочому середовищі тривалий час залишалися незмінними [2].

За даними звіту Cisco Annual Internet Report кількість користувачів Інтернет у світі в 2023 році складала приблизно 5,3 млрд (66% населення Землі). Враховуючи лінійне зростання цього показника, можна припустити, що кількість користувачів, на поточний рік становить вже приблизно 5,9 млрд (72 %). При цьому 51% всього IP-трафіку припадає на мережі Wi-Fi і майже 59% трафіку зі стільникових мереж також переправляється в бездротові сегменти. Спираючись знову таки на дані [3], можна також оцінити, що кількість точок доступу стандарту IEEE 802.11 у світі в цьому році становить близько 813 млн. Таке стрімке зростання кількості користувачів та пристроїв значно підвищує вимоги до характеристик з'єднання, зокрема до швидкості передачі даних, затримок передачі та площі покриття.

Роботи по вирішенню проблем традиційних Wi-Fi мереж в сучасних реаліях призвели до необхідності виділення окремої категорії – бездротових локальних мереж високої щільності. Відносно до мереж групи стандартів IEEE 802.11 це поняття включає в себе мережі, в яких концентрація активних користувачів на одиницю площі ( $1 \text{ м}^2$ ) перевищує значення в одиницю [4], наприклад: великі навчальні аудиторії, конференц-зали, стадіони, торгові

майданчики тощо. Окрім того, мережами високої щільності є й такі, що розгорнуто серед великої кількості навколишніх мереж, зони покриттів яких накладаються.

Такі умови функціонування бездротових мереж є досить складними. Це обумовлено спільним для усіх клієнтів середовищем передавання даних та основним методом доступу до середовища, що використовується в стандарті IEEE 802.11 – CSMA/CA, що забезпечує працездатність таких бездротових мереж навіть за найскладніших умов, але може суттєво негативно вплинути як на швидкість передавання даних та затримки, так і на якість самого покриття мережі.

Існує досить велика кількість досліджень експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ах, зокрема, роботи та публікації авторів Vikulov A., Paramonov A [5], M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef [6], B. Li, Q. Qu, Z. Yan, and M. Yang [7] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi [8] та ін., однак, в основу більшості із них покладено метод моделювання та розрахунків. Проте, не викликає заперечення той факт, що шляхом моделювання неможливо отримати абсолютно точні значення експлуатаційних характеристик через неможливість точного відтворення фізичних властивостей середовища розгортання та відсутності відкритої інформації щодо алгоритмів роботи тих чи інших механізмів у обладнанні, яке виробники поставляють на ринок. З іншого боку, дослідження із використанням експериментального методу, як і методу моделювання, націлені, як правило, на визначення характеристик в умовах низької щільності розгортання та визначення максимальних значень пропускної здатності мережі із застосуванням єдиного клієнтського пристрою. Досліджень, що використовують експериментальний метод для визначення експлуатаційних характеристик мереж стандарту IEEE 802.11ах в умовах високої щільності розгортання під час пошуку інформації знайдено не було.

Враховуючи на це, автори вважають за доцільне виконати комплексне порівняння нового стандарту з фізично аналогічним стандартом IEEE 802.11ас шляхом моделювання мережевих структур у спеціалізованому програмному забезпеченні та проведенням максимально наближених до моделі експериментальних досліджень, що дає можливість порівняння фактичних експлуатаційних характеристик мереж із розрахунковими.

## 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Під мережами Wi-Fi високої щільності розуміються бездротові середовища з високою концентрацією активних користувачів. Це можуть бути, наприклад, мережі великих навчальних аудиторій, конференц-залів, торгових майданчиків, стадіонів тощо [9]. Окрім того, мережами з високою щільністю також можуть бути й такі, що розгорнуто серед великої кількості навколишніх суміжних мереж чи зон обслуговування, які перетинають зону покриття один одного.

У такому випадку навіть добре спроектована мережа Wi-Fi на базі традиційних стандартів IEEE 802.11, що зазвичай забезпечує хороший рівень сигналу покриття і співвідношення сигнал/шум не може забезпечити достатню продуктивність через нестачу робочого середовища. Головним обмежуючим чинником є час заняття середовища передачі, оскільки воно не обмежене і є спільним для всіх клієнтів і точок доступу, які змушені ділити його між собою. Такий обмежуючий фактор також виходить із основного механізму розподілу доступу до середовища CSMA/CA. Цей алгоритм доступу не є найоптимальнішим з погляду досягнення максимально можливих швидкостей передачі, але саме завдяки йому мережі Wi-Fi працюють у міру своїх можливостей навіть там, де, здавалося б, середовище зайняте максимально, а мережа спланована зовсім неправильно.

Традиційні мережі IEEE 802.11 не мають реалізованих механізмів ефективного розподілу ресурсів радіочастотного спектру для сценаріїв із великою кількістю клієнтів,

наприклад, у традиційних стандартах стеку увесь обраний канал може використовуватися лише для обміну із одним клієнтом, тобто у режимі монопольного доступу. Також, традиційні мережі IEEE 802.11 суворо дотримуються правила активності лише одного пристрою у межах покриття. Тобто, такі мережі не мають механізмів, що дозволяють їм використовувати середовище одночасно із іншою зоною обслуговування, покриття яких накладаються, за виконання умов, що виключають ймовірність пошкодження трансляції іншої зони.

Для проведення досліджень експлуатаційних характеристик мережі IEEE 802.11ax та безпосереднього порівняння їх із IEEE 802.11ac було використано два методи – моделювання та експеримент. Використання двох методів також дозволило визначити точність розрахункових експлуатаційних характеристик.

Проведення моделювання та визначення розрахункових експлуатаційних характеристик мереж на базі стандартів IEEE 802.11ax та IEEE 802.11ac було виконано в середовищі спеціалізованого програмного забезпечення Ekahau AI Pro. Програмне забезпечення містить відповідні моделі та алгоритми для розрахунку експлуатаційних характеристик мереж, що працюють за стандартами IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax в діапазонах 2,4, 5 та 6 ГГц. Продукт має вбудований комплекс штучного інтелекту для автоматичного прорахунку каналів для точок доступу та їх розміщення.

Ekahau AI Pro дозволяє моделювати мережі у заданих фізичних умовах та будувати для них теплові карти покриття, швидкості передавання даних та пропускної здатності, завантаженості середовища тощо. Важливо, що продукт дозволяє виконати базове обстеження середовища навіть із використанням звичайного Wi-Fi адаптера [10].

Для визначення реальних експлуатаційних характеристик мереж у ході експериментального дослідження було використано програму iPerf3 – застосунок для виконання вимірювань швидкості передавання даних у мережах, розроблений The Energy Sciences Network /Lawrence Berkeley National Laboratory [11].

iPerf3 для платформи Windows виконаний у вигляді консольного застосунку. Зразок виконання вимірювання протягом 20 секунд у зворотному режимі із розміром вікна у 512 МБ та інтервалом в 1 секунду наведено на рисунку 1. Можна побачити, як для кожного інтервалу часу виводиться розмір переданих даних та еквівалентна пропускна здатність.

```

Connecting to host 192.168.50.41, port 5201perf>
Reverse mode, remote host 192.168.50.41 is sending
[ 4] local 192.168.50.138 port 49659 connected to 192.168.50.41 port 5201 (ct=5.41 ms)
[ 4] ID Interval Transfer Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00 sec 75.4 MBytes 632 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.00 sec 75.4 MBytes 632 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00 sec 79.7 MBytes 668 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00 sec 77.4 MBytes 649 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00 sec 74.0 MBytes 621 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.00 sec 76.7 MBytes 644 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.00 sec 75.1 MBytes 630 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.00 sec 77.2 MBytes 647 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.00 sec 71.3 MBytes 598 Mbits/sec
[ 4] 9.00-10.00 sec 72.2 MBytes 606 Mbits/sec
[ 4] 10.00-11.00 sec 72.3 MBytes 606 Mbits/sec
[ 4] 11.00-12.00 sec 79.9 MBytes 670 Mbits/sec
[ 4] 12.00-13.00 sec 73.0 MBytes 612 Mbits/sec
[ 4] 13.00-14.00 sec 76.2 MBytes 639 Mbits/sec
[ 4] 14.00-15.00 sec 72.4 MBytes 607 Mbits/sec
[ 4] 15.00-16.00 sec 70.6 MBytes 592 Mbits/sec
[ 4] 16.00-17.00 sec 72.0 MBytes 603 Mbits/sec
[ 4] 17.00-18.00 sec 74.5 MBytes 626 Mbits/sec
[ 4] 18.00-19.00 sec 74.7 MBytes 626 Mbits/sec
[ 4] 19.00-20.00 sec 76.9 MBytes 646 Mbits/sec
-----
[ 4] ID Interval Transfer Bandwidth
[ 4] 0.00-20.00 sec 1.47 GBytes 630 Mbits/sec sender
[ 4] 0.00-20.00 sec 1.47 GBytes 630 Mbits/sec receiver
iperf Done.

```

Рис. 1 – Представлення результатів роботи в iPerf3

Середня пропускна здатність протягом всього часу замірювання виводиться після інтервального звіту. Окрім того, утиліта iPerf3 дозволяє вимірювати затримку при передачі пакетів UDP.

В методі моделювання у середовищі Ekahau AI Pro була спроектована тестова мережа, там же змодельовано її розрахункові експлуатаційні характеристики.

Перед початком моделювання мережі було створено схематичний план аудиторії, де буде розгортатися тестова мережа. На плані окреслено розміри аудиторії та стіни, а також визначено розміщення клієнтських пристроїв.

Також, перед початком моделюванням було визначено деякі необхідні фізичні параметри приміщення, що моделюється, а саме загасання сигналу у проміжній стіні, що становить 9 дБ, а також рівень шуму у діапазоні 5 ГГц, що становить -92 дБм (рисунок 2).

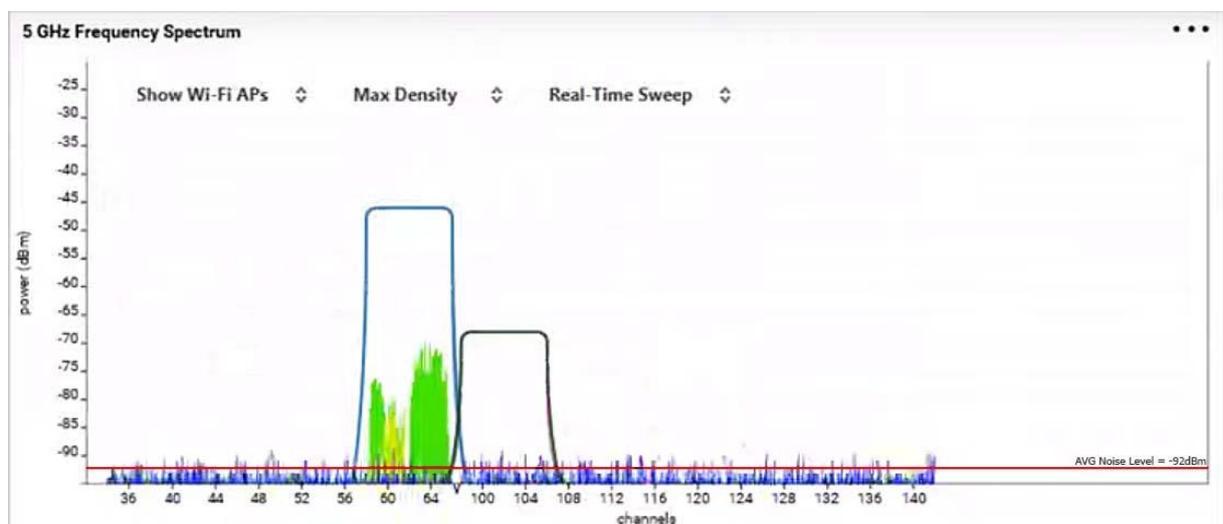


Рис. 2 – Вимірювання рівню шуму у діапазоні 5 ГГц

Для тестування було вирішено використати 42 клієнтських пристрої, що цілком відповідає визначенню мережі високої щільності, а саме на 28 кв. метрів активної зони (де безпосередньо розміщено клієнтські пристрої) маємо 42 клієнти, тобто співвідношення кількості клієнтів до площі дорівнює 1.5, що є суттєво більшим за одиницю значенням. Виходячи із класифікації, така мережа є високощільною.

Модель тестової мережі базується на точці доступу Cisco Catalyst 9115AXI –продукті із актуальної лінійки Cisco. Вона має підтримку стандартів IEEE 802.11ax, IEEE 802.11ac та IEEE 802.11n [12]. Конфігурація для випадку IEEE 802.11ac, 36 канал, 20МГц з 25 мВт потужністю випромінення наведено на рисунку 3.



Рис. 3 – Конфігурація точки доступу в середовищі EkaHau AI Pro

Після розміщення точки в зоні обслуговування визначається потужність сигналу покриття (рисунок 4).

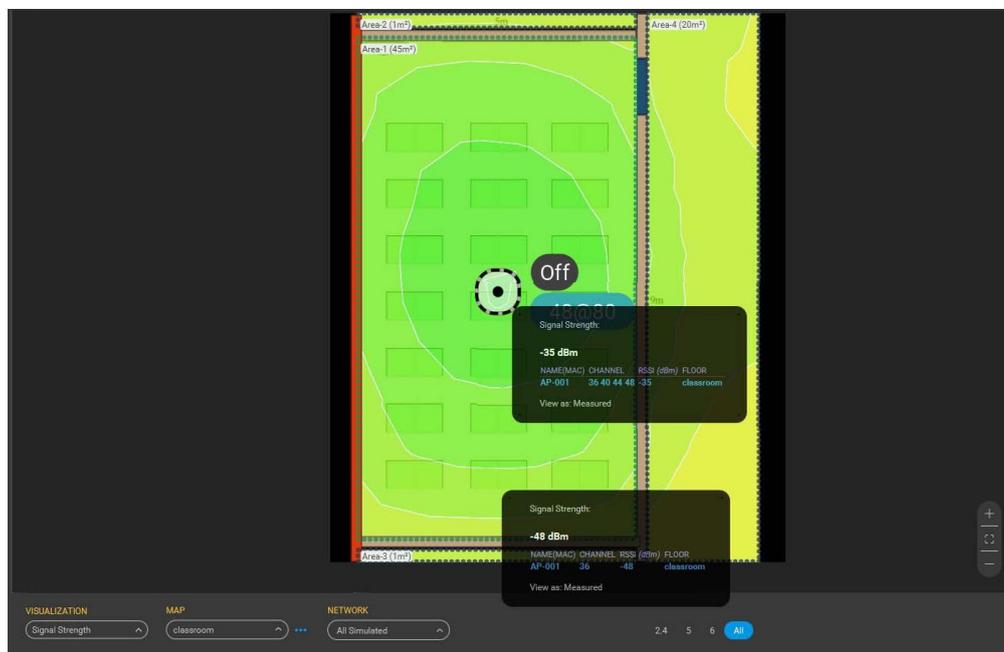


Рис. 4 – Моделювання зони покриття

Для даних налаштувань середовища моделювання маємо розрахункову мінімальну потужність у  $-48$  дБм та максимальну у  $-35$  дБм, а зниження потужності при збільшенні відстані характеризується як рівномірне. Варто зазначити, що мінімальним пороговим значенням для визначення сигналу як відмінного є позначка у  $-67$  дБм. Тобто, у розрахунковій зоні обслуговування маємо відмінний сигнал, що дозволяє компенсувати можливу різницю між фактичною та розрахунковою чутливостями приймача клієнта.

Далі визначається розрахункова максимальна швидкість передавання даних для зони обслуговування з використанням каналу 20 МГц. Максимальна швидкість передавання даних для одного клієнта знаходиться на рівні 140 – 145 Мбіт/с. Відповідно, на кожного із 42 клієнтів отримуємо 3,3 – 3,4 Мбіт/с при повному завантаженні каналу передачі. Аналогічно визначається максимальна швидкість передавання даних для каналу шириною у 40 та 80 МГц.

На наступному етапі точка доступу перемикається на роботу в стандарті IEEE 802.11ax, після чого вимірювання повторюються.

Для створення ще більш несприятливих умов роботи мережі, на план було додано ще одну аналогічну аудиторію де було розміщено другу точку доступу із повністю аналогічною конфігурацією. Тепер, ті самі 42 клієнти будуть розділені навпіл між двома аудиторіями, тобто, середовище передавання також розподіляється навпіл між двома зонами обслуговування (рисунк 5).

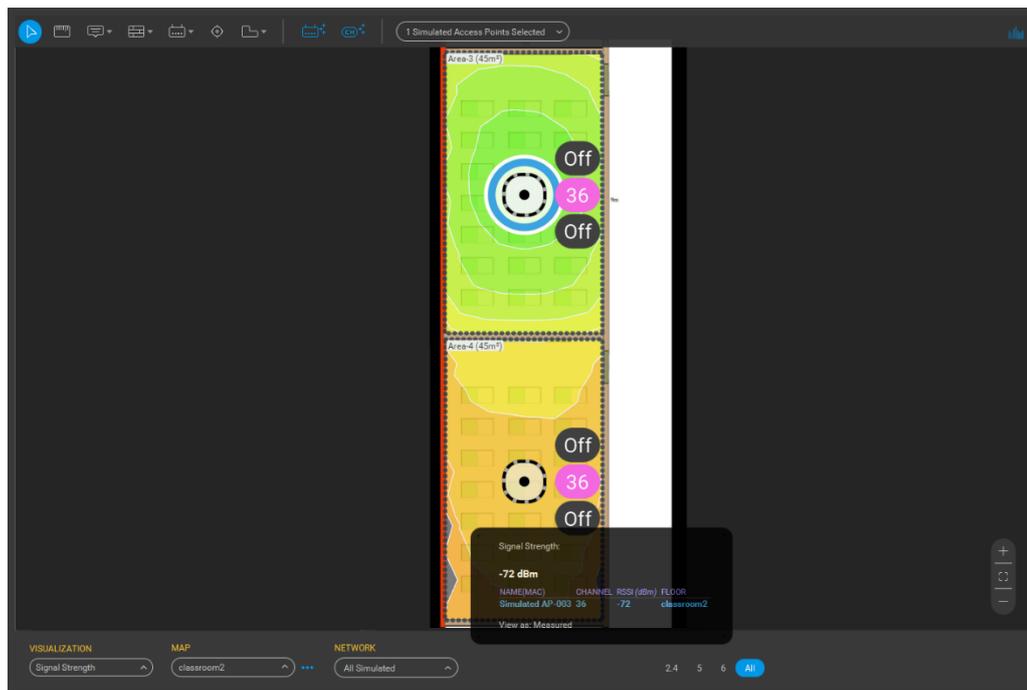


Рис. 5 – Моделювання розподілу зон обслуговування

Обидві точки доступу сконфігуровано так, щоб їх зона покриття охоплювала всю активну зону сусідньої аудиторії із нижнім порогом потужності сигналу у  $-72$  дБм. Такий пороговий рівень потужності сигналу обраний відповідно до алгоритму роботи механізму BSS Coloring: на кордонах зон обслуговування отримуємо потужність сигналу від сусідньої точки доступу нижче  $-62$  дБм, що дозволяє іншій точці доступу повноцінно застосувати механізм BSS Coloring для IEEE 802.11ax.

Для отримання реальних експлуатаційних характеристик було розгорнуто тестову мережу у чіткій відповідності до раніше змодельованої. Було використано таке обладнання:

- точки доступу Cisco Catalyst 9115AXI;
- комутатор Cisco Catalyst C9200-24PXG;
- 42 ноутбуки-клієнти Acer Aspire 5 A515;
- в якості серверу – стаціонарний комп'ютер на базі Intel Xeon E3-1230 v3 із PCI-E мережевим адаптером Realtek RTL8125, що дозволяє отримати швидкість на рівні 2,5 Гбіт/с через кабель типу «звита пара» Cat5e/6.

Топологія тестової мережі для випадка з двома зонами обслуговування наведено на рисунку 6.

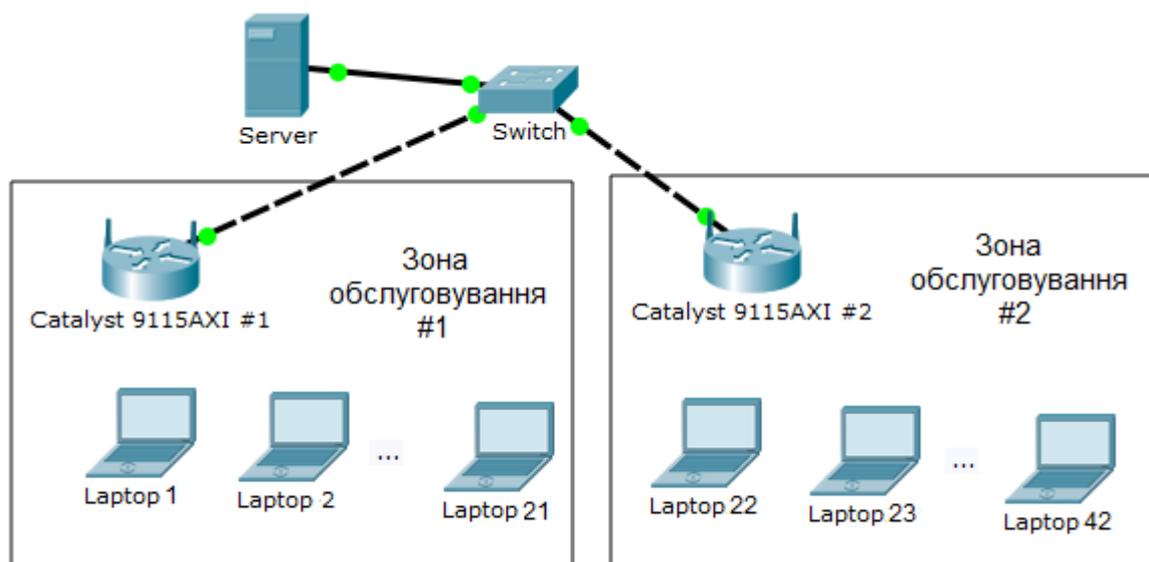


Рис. 6 – Топологія мережі для отримання експериментальних характеристик

Для тестування окремого пристрою було обрано розмір вікна у 512 МБ для забезпечення розвинення максимальної швидкості з'єднання. Для відтворення більш реалістичних умов роботи мережі із багатьма пристроями, розмір вікна було залишено за замовчуванням – 1 МБ. Перевищення цього розміру вікна може призвести до того, що окремий пристрій може зайняти усю ширину смуги пропускання.

В усіх тестах застосовано одне і те саме апаратне та програмне забезпечення. Точку доступу розташовано чітко у центрі аудиторії на стелі на висоті 2,4 метри. Усі клієнти-ноутбуки, для тестування великої групи, розташовано на дерев'яних столах, на висоті 80 см, у 6 колонок та 7 рядів для першої групи тестів (усі клієнти в одній аудиторії) та у 3 колонки та 7 рядів для другої групи тестів (клієнти поділено навпіл на дві аудиторії). Відстань між ноутбуками в ході тестів кожної групи не змінювалась. Для першої групи вона становила 20 см, а відстань між колонками – 70 см. Відстань між ноутбуками у другій групі тестів становила 110 см. Кут нахилу кришки екрану та, відповідно, антен становив 90 градусів і також не змінювався. Для групи тестів із двома аудиторіями конфігурації приміщень та розміщення обладнання чітко ідентичні за виключенням того, що для обидвох аудиторій використовувався один сервер, розміщений у першій аудиторії.

Перед початком тестування було перевірено потужність сигналу, що приймають клієнти від точки доступу, яка становила -37 дБм для центральних ноутбуків та -51 дБм для крайніх. Отримані показники потужності прийнятого сигналу цілком відповідають критеріям ідеального сигналу. Такі значення дозволяють застосувати найвищі із доступних рівнів модуляції та кодові схеми для усіх клієнтів у зоні обслуговування, що, у свою чергу, дозволяє розвинути максимальні значення пропускну здатності.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальне дослідження включає в себе дві групи тестів. Перша група містить низку тестів для єдиної мережі та єдиної аудиторії. Друга група містить тести для двох мереж та двох ідентичних аудиторій, області обслуговування яких частково накладаються.

Перша група тестів включає в себе вимірювання експлуатаційних характеристик для єдиного клієнта, пари клієнтів, трьох клієнтів, чотирьох клієнтів та усієї групи із 42 клієнтів при роботі мережі спочатку в режимі IEEE 802.11ac, а потім в режимі IEEE 802.11ax.

Друга група тестів включає в себе вимірювання експлуатаційних характеристик мереж для двох сусідніх ідентичних аудиторії, а саме для: єдиного клієнта; пари клієнтів, що знаходяться у різних зонах; трьох клієнтів, два із яких знаходяться в одній зоні, а третій у іншій; чотирьох клієнтів; та усієї групи із 42 клієнтів, розподілених на дві групи по 21 у двох зонах при роботі мережі спочатку в режимі IEEE 802.11ac, а потім в режимі IEEE 802.11ax.

Варто зазначити, що вимірювання для великої групи із 42 пристроїв виконувалися із застосуванням смуги пропускання тільки у 20 МГц так як саме така ширина каналу зазвичай використовується у мережах із високою щільністю через більшу стійкість до перешкод та можливість проектувати більш ємні мережі шляхом збільшення кількості точок доступу із рознесенням їх за каналами.

У зв'язку із великим обсягом табличного матеріалу в таблицях 1 та 2 наведено лише результати вимірювань тестів другої групи при максимальній кількості учасників.

Таблиця 1. - Вимірювання для 42 клієнтів у двох зонах (IEEE 802.11ac, 20 МГц)

№	DL		UL		№	DL		UL	
	ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс		ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс
1	0.7	9	1.3	40	22	0.7	16	0.9	40
2	1.9	29	1.2	19	23	2	29	0.6	19
3	1.5	31	1.1	16	24	1.9	31	1.4	16
4	0.9	11	0.6	45	25	1.2	9	1.1	17
5	1.5	29	1.3	41	26	1.9	23	1	44
6	1.2	16	0.9	55	27	1.9	39	0.8	15
7	1.8	23	1	17	28	0.9	19	1.2	41
8	1.9	39	0.9	44	29	2	39	0.9	51
9	1.9	19	0.8	15	30	1.9	19	0.9	17
10	0.9	15	1.3	19	31	0.9	18	1	44
11	1.8	8	0.8	25	32	1.9	10	1.1	15
12	1.4	39	1.2	16	33	2	9	1.1	19
13	1.9	17	1.3	42	34	1.9	16	0.7	16
14	1.6	21	0.6	20	35	1.6	16	1	18
15	0.9	13	1.3	18	36	2	23	0.7	43
16	1.3	39	1.1	43	37	1.8	39	1	16
17	1.6	18	1	16	38	2	18	1.4	19
18	0.7	17	1.2	19	39	1.9	9	1.1	34
19	1.8	38	0.7	34	40	1.9	29	1	53
20	1.9	22	1	56	41	2	31	0.6	30
21	0.9	12	1.1	30	42	1.8	14	1	54
	Мінімальна затримка, мс					Мінімальна затримка, мс			
	8		15			9		15	

Таблиця 1 - продовження

Максимальна затримка, мс		Максимальна затримка, мс	
39	56	39	54
Мінімальна ПЗ, Мбіт/с		Мінімальна ПЗ, Мбіт/с	
0.7	0.6	0.7	0.6
Максимальна ПЗ, Мбіт/с		Максимальна ПЗ, Мбіт/с	
1.9	1.3	2	1.4
Середня ПЗ, Мбіт/с		Середня ПЗ, Мбіт/с	
1.43	1.03	1.72	0.98
Загальна ПЗ групи, Мбіт/с		Загальна ПЗ групи, Мбіт/с	
30	21.7	36.1	20.5
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с			
DL		UL	
66.1		42.2	

Таблиця 2 - Вимірювання для 42 клієнтів у різних зонах (IEEE 802.11ax, 20МГц)

№	DL		UL		№	DL		UL	
	ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс		ПЗ, Мбіт/с	З, мс	ПЗ, Мбіт/с	З, мс
1	3.3	2	2.9	3	22	2.9	11	2.5	12
2	3.4	3	2.9	2	23	2.9	10	2.6	12
3	3.3	2	2.9	3	24	3	11	2.5	11
4	3.2	4	2.8	4	25	2.9	9	2.5	9
5	3.3	3	2.9	3	26	3	8	2.5	10
6	3.3	6	2.7	5	27	3	7	2.7	7
7	3.2	5	2.8	3	28	3.1	9	2.6	8
8	3.1	5	2.6	6	29	3	9	2.7	7
9	3.2	6	2.7	7	30	3.2	10	2.8	6
10	3.1	4	2.5	6	31	3.1	8	2.9	8
11	3.1	7	2.6	8	32	3.2	9	2.8	5
12	3	6	2.5	10	33	3.2	7	2.8	6
13	3	8	2.5	9	34	3.3	5	2.9	4
14	2.9	9	2.4	11	35	3.4	6	3	5
15	2.9	7	2.5	9	36	3.3	4	2.9	3
16	2.8	8	2.4	8	37	3.4	5	3	3
17	2.8	9	2.4	10	38	3.4	2	3	2
18	2.9	7	2.4	11	39	3.5	3	3	2
19	2.8	9	2.5	10	40	3.4	4	2.9	4
20	2.8	8	2.4	10	41	3.5	3	3	3
21	2.8	9	2.4	11	42	3.5	2	2.9	2
Мінімальна затримка, мс		Мінімальна затримка, мс		Мінімальна затримка, мс		Мінімальна затримка, мс		Мінімальна затримка, мс	
2		2		2		2		2	
Максимальна затримка, мс		Максимальна затримка, мс		Максимальна затримка, мс		Максимальна затримка, мс		Максимальна затримка, мс	
9		11		11		11		12	

Таблиця 2 - продовження

Мінімальна ПЗ, Мбіт/с		Мінімальна ПЗ, Мбіт/с	
2.8	2.4	2.9	2.5
Максимальна ПЗ, Мбіт/с		Максимальна ПЗ, Мбіт/с	
3.4	2.9	3.5	3
Середня ПЗ, Мбіт/с		Середня ПЗ, Мбіт/с	
3.06	2.61	3.2	2.8
Загальна ПЗ групи, Мбіт/с		Загальна ПЗ групи, Мбіт/с	
64.2	54.7	67.2	58.5
Загальна пропускна здатність мережі, Мбіт/с			
DL		UL	
131.4		113.2	

Результати визначення різниці між розрахунковим та фактичним значеннями RSSI представлені на рисунках 7 та 8. Як можна побачити, моделювання розповсюдження та потужності отриманого сигналу дозволяє отримати досить точні дані.

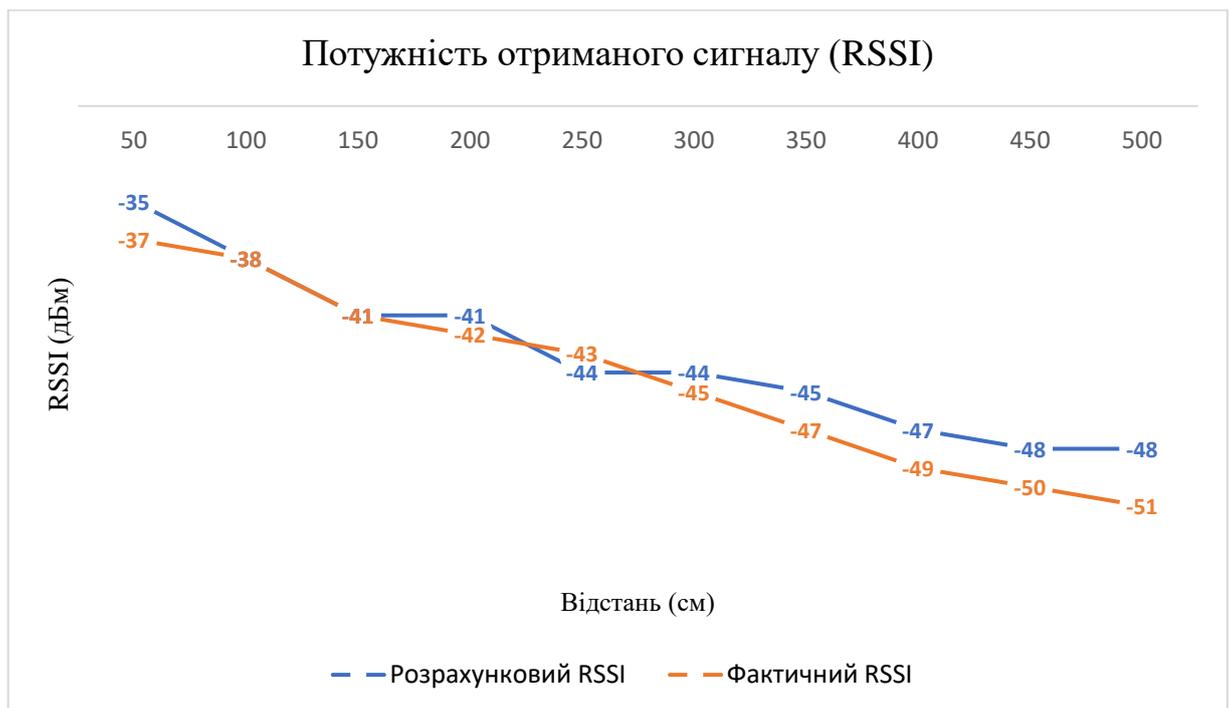


Рис. 7 – Розрахункова та фактична потужність сигналу

Різниця розрахункових та фактичних показників, ймовірно, викликана неповною відповідністю моделі приймача клієнтського пристрою EkaHau AI Pro до використаного в експериментальних дослідженнях, де кожен пристрій може мати суттєво різні характеристики чутливості та коефіцієнт підсилення антен.

Порівняння розрахункових та фактичних величин максимальної пропускної здатності із застосуванням одного клієнтського пристрою наведено на рисунках 4 та 5.

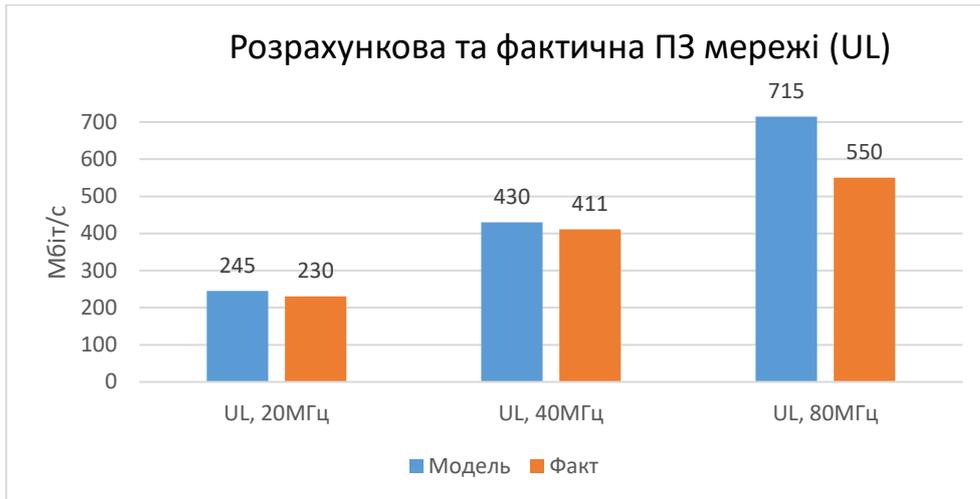


Рис. 8 – Розрахункова та фактична пропускна здатність у висхідному напрямку передачі

На рисунку 8 видно, що розрахункова максимальна пропускна здатність мережі у висхідному напрямку передачі має досить точні значення – для смуги пропускання у 20 МГц – величина похибки менше 7%. Для смуги 40 МГц похибка становить 5%, а для 80 МГц – вже 23%.

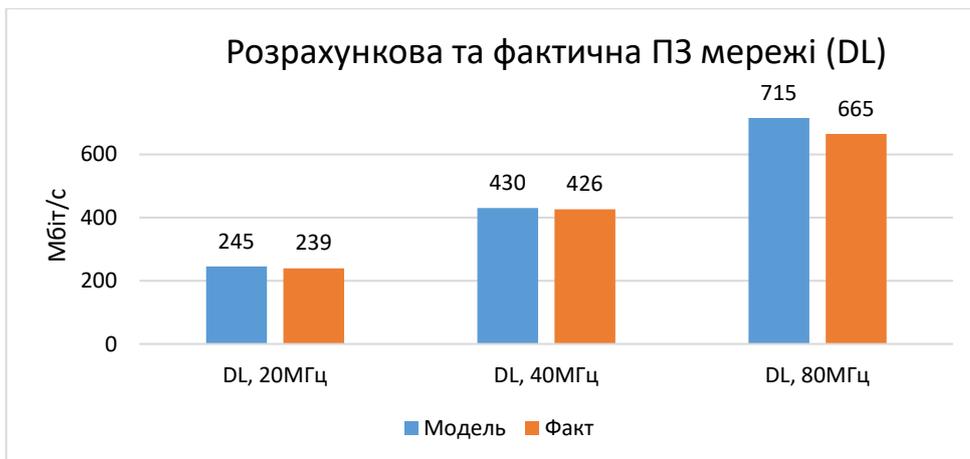


Рис. 9 – Розрахункова та фактична пропускна здатність у низхідному напрямку передачі

Із рисунку 9 можна побачити, що розрахункова максимальна пропускна здатність мережі у низхідному напрямку передачі також має досить точні значення для смуги пропускання у 20 МГц – величина похибки 2%. Для смуги 40 МГц похибка становить 1%, а для 80 МГц – 7%.

#### IV. ВИСНОВКИ

Загалом, використане програмне забезпечення EkaHau AI Pro зі стандартними моделями пристроїв дає досить чітке розуміння очікуваної пропускної здатності мережі, проте зі збільшенням ширини каналу, переважно, збільшується й величина похибки. Враховуючи те,

що обране програмне забезпечення орієнтоване переважно на проектування та моделювання великих мереж із багатьма точками доступу, у яких здебільшого використовуються вузькі канали у 20 МГц, можна вважати такою точністю даних цілком прийнятною.

З іншого боку, деякі експлуатаційні характеристики, отримані під час проведення експериментальних досліджень не можуть бути отримані шляхом моделювання. Зокрема, використовуючи модель, немає можливості визначити вплив механізму BSS Coloring на ступінь сумісного використання каналу передавання, тому при проектуванні треба підбирати ідеальні параметри для повноцінного застосування вищезазначеного механізму, що, відповідно до опису алгоритмів його роботи, дозволяє очікувати повного розділення пакетів від точок доступу із різних зон обслуговування та одночасної передачі без впливу зон одна на одну.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] The Evolution of Wi-Fi networks: from IEEE 802.11 to Wi-Fi 6E [Online]. Available: <https://bit.ly/3ylQJcB>
- [2] CSMA/CA analysis and enhancement for IEEE 802.11ax WLANs [Online]. Available: <https://bit.ly/3SW72ok>
- [3] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [4] J. Florwick, J. Whiteaker, A. C. Amrod, and J. Woodhams, Wireless LAN Design Guide for High Density Environments in Higher Education. Cisco Systems, [Online]. Available: <https://bit.ly/3fK35Vs>
- [5] A. Vikulov and A. Paramonov, “Analysis of radio interference influence on the design process of the high density Wi-Fi Networks,” *Telecom IT*, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3CAZpOV>
- [6] M. Kamel, W. Hamouda, and A. Youssef, “Ultra-dense networks: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7476821>
- [7] B. Li, Q. Qu, Z. Yan, and M. Yang, “Survey on OFDMA based MAC protocols for the next generation WLAN,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2015. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7122542>
- [8] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, “A Tutorial on IEEE 802.11ax High-Efficiency WLANs,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8468986>
- [9] Aruba High Density Wireless Networks for Auditoriums. VRD, Aruba. [Online]. Available: <https://bit.ly/3C6ehTU>
- [10] Ekahau AI Pro. [Online]. Available: <https://www.ekahau.com/products/ekahau-connect/ai-pro/>
- [11] iPerf. [Online]. Available: <https://iperf.fr/iperf-download.php>
- [12] Cisco Catalyst 9115AXI Series Access Point. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/wireless/catalyst-9115ax-series-access-points/series.html>

Отримано 12.02.2024 р.

## STUDY OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF IEEE 802.11 AC- AX WIRELESS NETWORKS IN HIGH-DENSITY DEPLOYMENT ENVIRONMENTS

*Vladyslav Zinchenko,  
Sergey Sabanov,  
Department of Information Technologies  
Zaporizhzhya Institute of Economics and Information Technologies  
Zaporizhzhia, Ukraine*

*Zaporizhzhia Institute of Economics and Information Technologies  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Abstract.** The paper examines the peculiarities of obtaining and interpreting operational characteristics of modern IEEE 802.11ax wireless networks in high-density placement of active network components. A comparison of operational parameters obtained through modeling using the special software environment Ekahau AI Pro and experimental data obtained on real equipment is conducted. The study revealed a discrepancy between experimental and project data, allowing for a more precise representation of the behavioral differences between IEEE 802.11ax and IEEE 802.11ac networks in complex conditions, which can be useful in the design stages of wireless network structures

**Keywords** – *Ekahau AI Pro, IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ax, iPerf, wireless networks, high-density networks.*

**Recieved 12.02.2024.**