

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

ГЛАДІЙ Олександр Іванович

Комп'ютерна мережа підприємства з безшовним
Wi-Fi покриттям /
Enterprise computer network with seamless Wi-Fi
coverage

спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма – Комп'ютерна інженерія

Кваліфікаційна робота

Виконав: студентка групи КІ-42
ГЛАДІЙ Олександр Іванович

Науковий керівник
к.т.н. Мельник Г.М.

ТЕРНОПІЛЬ - 2025

АНОТАЦІЯ

Гладій О.І. Комп'ютерна мережа підприємства з безшовним Wi-Fi покриттям. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньо-професійна програма. Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Робота написана обсягом 50 сторінок і містить 11 рисунків, 8 таблиць, 3 додатки та 32 джерел за переліком посилань. Обсяг графічного матеріалу 2 аркуші формату А3.

Метою кваліфікаційної роботи є реалізація комп'ютерної мережі підприємства з безшовною технологією Wi-Fi для забезпечення стабільного та безперервного доступу до мережевих ресурсів. Розроблено трирівневу логічну ієрархічну топологію комп'ютерної мережі підприємства з урахуванням підтримки безшовного Wi-Fi покриття. Реалізовано централізоване керування точками доступу, підтримку протоколів швидкого роумінгу. План розміщення точок доступу, сформований за допомогою імітаційного моделювання, забезпечує суцільне покриття без «мертвих зон» і відповідність технічним вимогам щодо щільності клієнтів та якості сигналу. Здійснено централізоване налаштування точок доступу за допомогою системи MikroTik CAPsMAN, що дозволило забезпечити уніфікованість параметрів і гнучке керування мережею.

Ключові слова: WI-FI, БЕЗШОВНЕ ПОКРИТТЯ, РОУМІНГ, БЕЗПРОВІДНА МЕРЕЖА.

ANNOTATION

Hladii O.I. Enterprise computer network with seamless Wi-Fi coverage. – Manuscript.

Qualification work for the Bachelor degree in specialty 123 “Computer Engineering”, educational and professional program. Western Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The work is written in 50 pages and contains 11 figures, 8 tables, 3 appendices and 32 references. The volume of graphic material is 2 sheets of A3 format.

The purpose of the qualification work is to implement a computer network of the enterprise with seamless Wi-Fi technology to ensure stable and uninterrupted access to network resources. A three-level logical hierarchical topology of the enterprise computer network has been developed taking into account the support of seamless Wi-Fi coverage. Centralized access point management, support for fast roaming protocols have been implemented. The access point placement plan, formed using simulation modeling, provides continuous coverage without "dead zones" and compliance with technical requirements for client density and signal quality. Centralized access point configuration has been implemented using the MikroTik CAPsMAN system, which allowed to ensure the uniformity of parameters and flexible network management.

Keywords: WI-FI, SEAMLESS COVERAGE, ROAMING, WIRELESS NETWORK.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1. Аналіз сучасних технологій побудови безшовних Wi-Fi мереж.....	12
1.1 Основні поняття та визначення безшовних мереж Wi-Fi.....	12
1.2 Огляд стандартів та їх вплив на якість роумінгу	16
1.3 Впровадження безшовних мереж та постановка задач роботи	22
2 Проектування мережі підприємства.....	25
2.1. Аналіз вимог підприємства до бездротової мережі.....	25
2.2 Проектування логічної та фізичної топології мережі	28
2.3 Вибір мережевого обладнання.....	31
2.4 Розробка плану розташування точок доступу та аналіз зон покриття	33
3 Реалізація безшовної Wi-Fi мережі на підприємстві.....	38
3.1 Налаштування обладнання.....	38
3.2 Реалізація програмного засобу розгортання мережі	41
3.3 Тестування та оцінювання якості мережі	44
Висновки	49
Список використаних джерел	50
Додаток А Техніко-економічне обґрунтування розробки	53
Додаток Б План будівлі підприємства	59
Додаток В Світлокопія виданої публікації.....	61

					КР.КІ. 10660597.00.00.000 ПЗ						
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Гладій О.І.			Програмний модуль розгортання сервера інтеграції даних в системі Інтернету речей			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Мельник Г.М.								7	
Консульт.		Савка Н.Я.						ЗУНУ,ФКІТ, КІ-42			
Н. Контр.		Дубчак Л.О.									
Затвердив		Дубчак Л.О.									

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТД	–	Точка доступу
КТД	–	Контрольована точка доступу
RSSI	–	Received Signal Strength Indicator
SNR	–	Signal-to-Noise Ratio
NMS	–	Network Management Systems
BSS	–	Base Station Subsystem
QoE	–	Quality of Experience
ТЗ	–	технічне завдання
СКС	–	Структурована кабельна система
MDA	–	Main Distribution Area
HDA	–	Horizontal Distribution Area
CAP	–	Controlled Access Point

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ВСТУП

Мобільність і постійний доступ до інформації є ключовими для ефективної роботи будь-якого підприємства сьогодні. Безперебійний та стабільний Wi-Fi доступ стає не просто зручністю, а критично важливим елементом інфраструктури підприємства.

Сучасні підприємства стикаються з постійно зростаючою потребою у високопродуктивних та надійних бездротових мережах. Співробітники використовують мобільні пристрої (ноутбуки, смартфони, планшети) для виконання робочих завдань, переміщуючись між різними зонами офісу, виробничими приміщеннями чи складами. Переривання зв'язку під час таких переміщень, пов'язані з перемиканням між точками доступу, призводять до зниження продуктивності та втрати часу. Саме безшовний роумінг є відповіддю на ці виклики. Ця технологія дозволяє мобільним пристроям плавно та непомітно перемикатися між різними точками доступу в межах однієї мережі, забезпечуючи безперервний зв'язок без втрати пакетів чи розривів з'єднання. Актуальність дослідження полягає в тому, що воно безпосередньо спрямоване на вирішення цих практичних проблем, підвищуючи ефективність та надійність корпоративної Wi-Fi інфраструктури. Актуальність заснована на наступному:

1) все більше компаній впроваджують гнучкі робочі місця, гібридні моделі роботи та "гарячі столи", де співробітники вільно переміщуються.

2) сучасні бізнес-процеси активно використовують сервіси критично залежать від стабільного та безперервного з'єднання: хмарні додатки, IP-телефонію, відеоконференції.

3) нові стандарти Wi-Fi (Wi-Fi 6/6E/7) пропонують значно вищу швидкість та ефективність, але їх повний потенціал може бути реалізований лише за умови правильного проектування та впровадження безшовного роумінгу.

Об'єктом дослідження є інфраструктура бездротової мережі Wi-Fi на підприємстві. Предметом дослідження є методи і технології реалізації безшовного роумінгу в Wi-Fi мережах. Метою кваліфікаційної роботи є

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

реалізація комп'ютерної мережі підприємства з безшовною технологією Wi-Fi для забезпечення стабільного та безперервного доступу до мережевих ресурсів. Для досягнення мети потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати сучасні технології побудови безшовних Wi-Fi мереж;
- визначити та обґрунтувати вибір мережевого обладнання і стандартів;
- спроектувати топологію комп'ютерної мережі підприємства з урахуванням безшовного покриття;
- реалізувати налаштування обладнання;
- провести тестування і оцінку якості роботи мережі.

Результати дослідження апробовано на II Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» [1] (додаток А). Практична цінність роботи полягає в тому, що дослідження можуть бути безпосередньо застосовані для модернізації мереж на інших підприємствах.

У першому розділі здійснено аналіз концепції безшовного Wi-Fi покриття, розглянуто основні поняття, механізми роумінгу та протоколи, що забезпечують безперервність з'єднання в умовах мобільності користувача. Надано порівняльну характеристику традиційних та безшовних мереж, із акцентом на протоколи IEEE 802.11r/k/v, які забезпечують швидкий перехід між точками доступу без втрати підключення.

У другому розділі розглянуто технічні та функціональні вимоги до бездротової мережі підприємства. Спроектовано логічну і фізичну топологію мережі з урахуванням ієрархічної структури, VLAN-сегментації, централізованого управління точками доступу. Обґрунтовано вибір мережевого обладнання та реалізовано план розміщення точок доступу на основі імітаційного моделювання.

У третьому розділі описано процес налаштування точок доступу з використанням платформи MikroTik CAPsMAN для централізованого управління мережею. Проведено тестування покриття та якості мережі.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ БЕЗШОВНИХ WI-FI МЕРЕЖ

1.1 Основні поняття та визначення безшовних мереж Wi-Fi

Безшовна Wi-Fi мережа (seamless Wi-Fi network) — це тип бездротової локальної мережі, в якій процес переходу клієнтського пристрою між зонами покриття різних точок доступу (Access Points, APs) відбувається автоматично, без помітного розриву з'єднання, затримок чи повторної автентифікації. Її основною метою є забезпечення перервної передачі даних та стабільного підключення навіть під час активного переміщення користувача в межах мережі (рисунок 1.1).

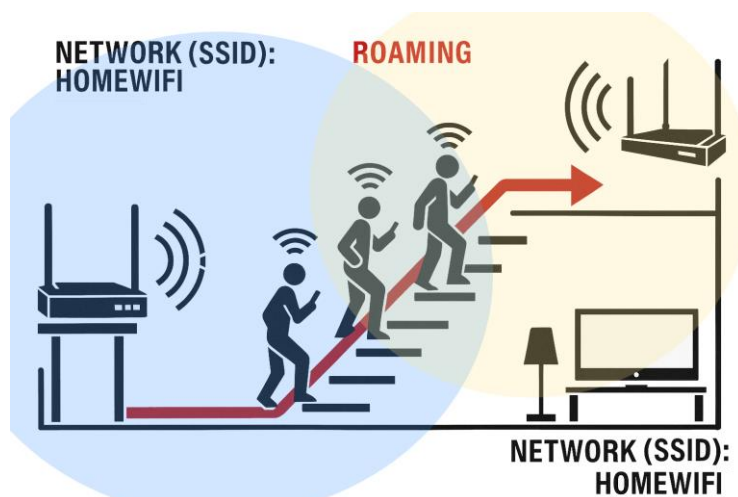


Рисунок 1.1 - Безшовна бездротова мережа

У порівнянні з традиційною Wi-Fi мережею, де кожна точка доступу функціонує як ізольована точка входу, безшовна мережа передбачає:

- єдиний домен автентифікації, що дає змогу уникнути повторного введення облікових даних при переході між AP;
- швидке перемикання клієнта (handover) завдяки підтримці протоколів 802.11r [2] (Fast BSS Transition), 802.11k [3] (Radio Resource Management) та 802.11v (Network-assisted Roaming);

- інтелектуальну взаємодію між точками доступу та контролером або централізованою мережею для передачі контексту клієнта, що дозволяє скоротити час повторної аутентифікації з кількох сотень мілісекунд до менш ніж 50 мс;
- підтримку мобільних застосунків, VoIP, відеоконференцій та інших чутливих до затримок сервісів без переривання з'єднання.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика мереж

Критерій	Традиційна Wi-Fi мережа	Безшовна Wi-Fi мережа
Перехід між точками доступу	Затримка, розрив з'єднання	Автоматичний handover без втрат
Автентифікація	Повторна при кожному підключенні до іншого AP	Одноразова, з передачею контексту клієнта
Підтримка мобільності	Обмежена, нестабільне з'єднання при русі	Повна, призначена для переміщення користувача в межах мережі
Технології роумінгу	Відсутні або базові (legacy)	IEEE 802.11r (fast transition), 802.11k, 802.11v
Контрольна архітектура	Децентралізована (автономні точки доступу)	Централізована або хмарна (контролер або mesh-мережа)
Підтримка реального часу	Обмежена (затримки, jitter)	Оптимізована (навіть для VoIP, відеозв'язку, IoT)
Якість обслуговування (QoE/QoS)	Варіюється, залежить від конфігурації	Висока, забезпечується технологіями адаптивного управління трафіком

Архітектура мережі зображена на рисунку 1.2.

Схема ілюструє основні компоненти: точки доступу, Wi-Fi контролер, сервер автентифікації, маршрутизатор, корпоративні служби та клієнтські пристрої.

Безшовне Wi-Fi покриття в корпоративних мережах передбачає інтегровану систему бездротових точок доступу (ТД), що забезпечують безперервне з'єднання користувачів у межах одного домену автентифікації, із мінімальною затримкою під час переміщення клієнтів між зонами покриття.

Основні технічні характеристики безшовного Wi-Fi покриття:

1) суцільне перекриття радіусів дії точок доступу, тобто сусідні ТД налаштовані з частковим перекриттям зон покриття (зазвичай 10–20% сигналу)

для запобігання втратам зв'язку;

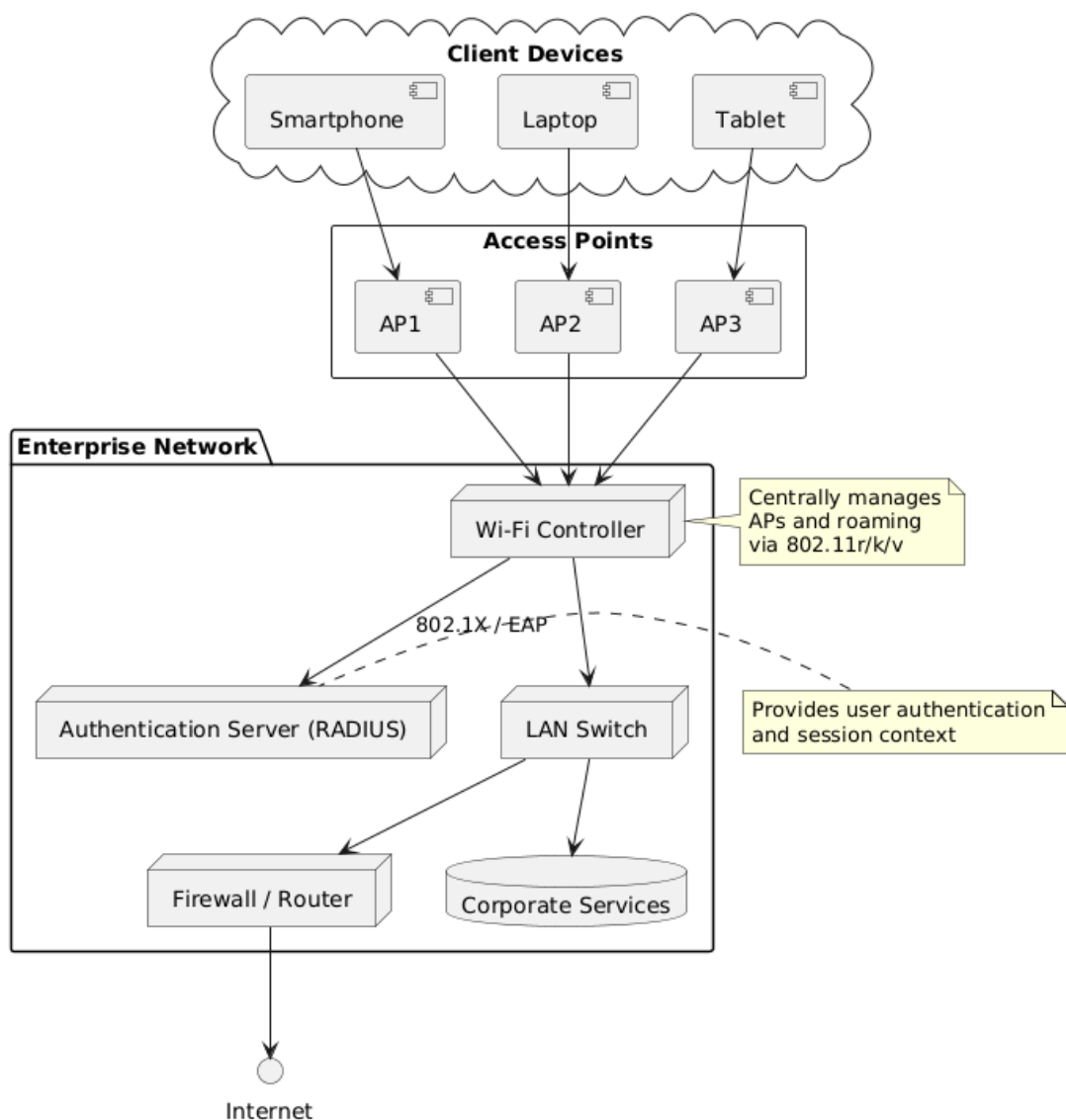


Рисунок 1.2 - Архітектура безшовної Wi-Fi мережі підприємства

2) Підтримка протоколів швидкого роумінгу:

- IEEE 802.11r прискорений перехід між BSS (Fast BSS Transition);
- 802.11k оптимізація вибору точки доступу;
- 802.11v управління перемиканням клієнтів мережею.

3) Централізоване управління точками доступу. Контролер (або хмарна платформа) координує роботу AP, забезпечуючи єдиний контекст підключення

4) Єдиний домен автентифікації - завдяки RADIUS або AAA-серверам клієнт автентифікується лише раз, після чого отримує дозвіл на переміщення мережею

5) Підтримка безперервного потоку даних (QoS) для застосувань реального часу: відеоконференцій, VoIP, мобільних терміналів

6) інтелектуальне балансування навантаження (load balancing), тобто Клієнти автоматично перенаправляються до менш завантажених ТД.

7) Низький час переключення (handover latency) менший 50 мс у найкращих реалізаціях.

Роумінг (roaming) — процес переходу клієнтського пристрою між зонами покриття різних точок доступу в межах однієї мережі без втрати підключення або потреби в повторній автентифікації.

Handover — технічний процес переключення клієнта з однієї точки доступу на іншу. Переключення може бути м'яким (soft) коли нове з'єднання встановлюється до розриву попереднього. Переключення може жорстким (hard) — з тимчасовим розривом з'єднання.

Асоціація клієнта (client association) — процес встановлення логічного з'єднання між клієнтом та точкою доступу, який передуює передаванню даних. Вона включає:

- 1) виявлення мереж (scanning);
- 2) аутентифікацію;
- 3) асоціацію;
- 4) початок передачі даних.

Зв'язок роумінгу із якістю обслуговування (QoS/QoE):

- швидке і стабільне переключення (handover) для мінімізації втрат пакетів і затримок;
- оптимальна асоціація завдяки вибору найкращої ТД за потужністю сигналу, навантаженням, затримками;
- безперервний роумінг критично важливий для голосового зв'язку, потокового відео, інтерактивних застосунків;
- низький jitter і packet loss для підвищення задоволення користувача .

1.2 Огляд стандартів та їх вплив на якість роумінгу

Наведемо параметри основних стандартів IEEE 802.11 котрі впливають на продуктивність роумінгу та взаємодію клієнта з точками доступу в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 - Стандарти IEEE 802.11

Стандарт	Рік	Частоти	Макс. швидкість	Особливості, що впливають на роумінг
802.11a	1999	5 ГГц	до 54 Мбіт/с	Менше завад, але короткий радіус дії, що потребує частішого handover
802.11b	1999	2.4 ГГц	до 11 Мбіт/с	Широке покриття, але сильний вплив перешкод — погано для швидкого роумінгу
802.11g	2003	2.4 ГГц	до 54 Мбіт/с	Зворотна сумісність із b; незначне покращення часу асоціації
802.11n	2009	2.4 та 5 ГГц	до 600 Мбіт/с	Підтримка MIMO і більш стабільне з'єднання — важливо для безперервного роумінгу
802.11ac	2013	5 ГГц	до 6.9 Гбіт/с	MU-MIMO, beamforming: краща якість сигналу, менше потреби в переключеннях
802.11ax	2019	2.4 та 5 ГГц	до 9.6 Гбіт/с	OFDMA, BSS Coloring — зменшення колізій, швидший вибір AP і короткий час handover

Підсумуємо параметри що впливають на роумінг:

- Діапазон частот 5 ГГц забезпечує вищу швидкість, але менший радіус покриття → частіше переключення;
- стандарт MIMO / Multi-User MIMO [4] збільшує стабільність з'єднання та дозволяє обслуговувати більше клієнтів без перевантаження;
- функція Beamforming [5] забезпечує спрямоване посилення сигналу зменшує потребу в переключеннях;
- функція OFDMA (в 802.11ax) ефективніше використання каналу дозволяє швидше обробляти запити клієнтів при асоціації;
- функція BSS Coloring (802.11ax) допомагає відрізнати сусідні точки доступу, зменшуючи перешкоди й покращуючи вибір AP для клієнта.

Перехід між точками доступу.

У контексті побудови корпоративних мереж із безшовним Wi-Fi покриттям важливу роль відіграє характеристика щодо здатності забезпечувати ефективний перехід між точками доступу, стабільне з'єднання та мінімальні затримки в передаванні даних під час переміщення користувача.

У ранніх версіях, таких як IEEE 802.11b та 802.11g, відсутні механізми швидкого роумінгу, що зумовлює значні затримки під час переключення клієнта між точками доступу — зазвичай у діапазоні від 200 до 500 мс. У цих стандартів кожен перехід супроводжується повною процедурою аутентифікації та асоціації, що часто призводить до короткотривалих розривів з'єднання. Внаслідок цього реєструється підвищений рівень втрат пакетів і зниження якості обслуговування, особливо в застосунках, чутливих до затримок, таких як IP-телефонія або потокове відео.

Удосконалення, представлені в стандарті IEEE 802.11n, передбачають використання технології MIMO та двочастотного діапазону (2.4 та 5 ГГц), що сприяє загальному підвищенню стабільності з'єднання. Проте, навіть за наявності кращого сигналу, механізм handover залишається повільним, із типовими затримками в межах 100–300 мс, оскільки не передбачено оптимізованої передачі контексту клієнта між точками доступу.

Із впровадженням IEEE 802.11ac з'являються такі технології, як MU-MIMO та спрямоване формування променя (beamforming), що позитивно впливають на якість сигналу, дозволяючи зменшити кількість необхідних перемикачів. Тим не менш, сам алгоритм переходу між точками доступу здебільшого ще не оптимізований, якщо не задіяно додаткові протоколи, такі як IEEE 802.11r.

Найсуттєвіші покращення відбулися із появою стандарту IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). Застосування таких технологій, як ортогональний множинний доступ з частотним поділом (OFDMA) та BSS Coloring, дозволяє зменшити інтерференцію між точками доступу й забезпечити більш швидкий та передбачуваний вибір оптимального вузла клієнтським пристроєм. Крім того,

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

підтримка протоколів 802.11r, 802.11k та 802.11v реалізована вже на рівні стандарту, що дозволяє досягати часу переключення на рівні менш ніж 50 мс.

Таблиця 1.3 – Параметри що впливають на безперервність з'єднання

Стандарт	Handover latency	Стабільність	Підтримка Fast Roaming
802.11b/g	200–500 мс	Низька, часто розриви	Відсутня
802.11n	100–300 мс	Помірна, залежить від MIMO	Часткова (за підтримки 802.11r)
802.11ac	50–150 мс	Висока, завдяки beamforming	Опціонально
802.11ax	<50 мс	Дуже висока, стабільний QoS	Вбудована підтримка

Таким чином, чим новіший стандарт, тим коротший час handover, краща підтримка переміщення, і тим менша ймовірність втрати даних під час переходу між точками доступу. Це критично для мобільних робочих середовищ, складських приміщень, конференц-залів, де користувачі активно переміщуються.

Стандарти та технології реалізації безшовного роумінгу.

Технології IEEE 802.11r [2], 802.11k та 802.11v [6] є ключовими стандартами, що реалізують розширений функціонал швидкого та стабільного роумінгу в бездротових мережах. Їхня інтеграція у Wi-Fi-інфраструктуру дозволяє істотно знизити затримки при перемиканні клієнта між точками доступу та забезпечити безперервність підключення, особливо в умовах високої мобільності користувача.

Стандарт IEEE 802.11r, також відомий як «Fast BSS Transition», вводить механізм попередньої автентифікації клієнта до того, як він фізично перемикається на іншу точку доступу. Замість повної повторної аутентифікації з сервером RADIUS при кожному переході, клієнт попередньо обмінюється ключами шифрування з майбутньою точкою доступу ще до розриву поточного з'єднання. Це дозволяє значно скоротити час перемикання (до 50 мс і менше), що критично важливо для реального часу — наприклад, у випадку голосових або

відеодзвінків, коли навіть короточасна втрата з'єднання може спричинити розрив сеансу.

Рисунок 1.3 зображає процес автентифікації та переміщення (роумінгу) бездротового клієнта в мережі IEEE 802.11r між точками доступу (AP) з використанням протоколу 802.1X і сервера RADIUS.

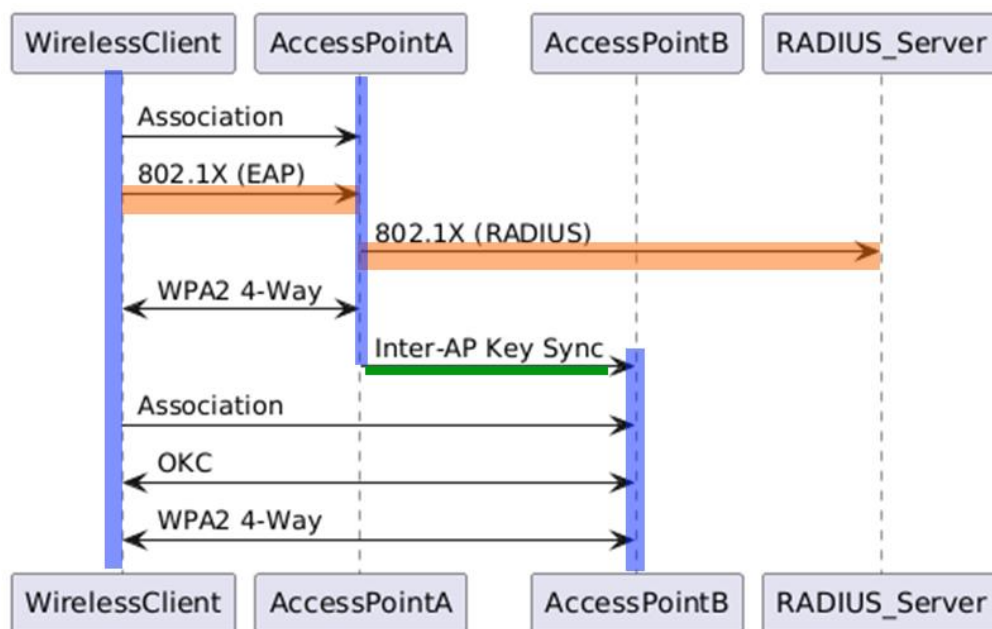


Рисунок 1.3 - Роумніг в мережі IEEE 802.11r

Опис діаграми на рисунку 1.3:

1) бездротовий клієнт починає процес підключення до точки доступу А через стандартні етапи:

- а) Association — встановлення з'єднання.
- б) 802.1X (EAP) — автентифікація клієнта через точку доступу А.
- в) 802.1X (RADIUS) — автентифікація через сервер RADIUS.
- г) WPA2 4-Way — обмін ключами між клієнтом та ТД А.

2) ТД А здійснює синхронізацію ключів (Inter-AP Key Sync) із точкою доступу В.

3) Клієнт переходить до точки доступу В, де повторно виконується:

- д) association;
- е) перевірка ключів за процедурою ОКС (Opportunistic Key Caching);

ж) WPA2 4-Way — спрощений процес підтвердження без необхідності повторної автентифікації на сервері RADIUS.

Стандарт IEEE 802.11k спрямований на оптимізацію процесу вибору нової точки доступу. Цей стандарт дозволяє клієнтському пристрою отримувати радіоінформацію про навколишні AP, включно з рівнями сигналу, навантаженням та якістю каналу. Завдяки цим даним клієнт може ефективніше прогнозувати найкращий момент для handover, зменшуючи кількість невдалих або несвоєчасних переключень. Це сприяє зменшенню споживання енергії, прискоренню асоціації та забезпечує вищу якість з'єднання.

Стандарт IEEE 802.11v розширює функціональність 802.11k, надаючи можливість мережі активно впливати на поведінку клієнта щодо вибору точки доступу. Зокрема, він реалізує так звану network-assisted roaming, за якої контролер мережі або точки доступу можуть рекомендувати клієнту, коли і до якої AP слід переключитися. Крім того, 802.11v дозволяє керувати параметрами енергозбереження, забезпечує синхронізацію часу в мережі та підтримує функції location-awareness. Таке інтелектуальне керування перемиканням особливо корисне в перевантажених середовищах або при швидкому русі клієнта (наприклад, у логістичних зонах, аеропортах, лікарнях).

Програмні засоби для моделювання Wi-Fi мереж.

Для моделювання та впровадження безшовного Wi-Fi покриття на підприємствах використовуються спеціалізовані програмні засоби, які забезпечують ефективне планування, аналіз та оптимізацію бездротових мереж. Ці інструменти дозволяють враховувати особливості приміщень, матеріали будівельних конструкцій, джерела перешкод та інші фактори, що впливають на якість Wi-Fi покриття.

NetSpot [7]— це кросплатформене програмне забезпечення для планування та аналізу Wi-Fi мереж. Воно дозволяє створювати теплові карти сигналу, виявляти "мертві зони", аналізувати рівень шуму та інтерференції, а також оптимізувати розташування точок доступу. NetSpot підтримує активні та пасивні опитування, що забезпечує точне вимірювання параметрів мережі в реальному часі.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

AirMagnet Survey PRO [8] — професійний інструмент для проведення Wi-Fi опитувань та створення теплових карт покриття. Він дозволяє моделювати розташування точок доступу, враховуючи будівельні матеріали та перешкоди, а також оцінювати продуктивність мережі за різними параметрами, такими як рівень сигналу, SNR, інтерференція та пропускна здатність.

TamoGraph Site Survey [9] — це програмне забезпечення для проведення Wi-Fi опитувань та RF-планування. Воно підтримує різні стандарти Wi-Fi, включаючи 802.11a/b/g/n/ac/ax/be, та дозволяє створювати віртуальні моделі мережі з урахуванням матеріалів стін та інших перешкод. TamoGraph також забезпечує детальний аналіз параметрів мережі та генерацію звітів у різних форматах.

AirMagnet Planner [10] — інструмент для точного планування та проектування Wi-Fi мереж без необхідності фізичного розгортання точок доступу. Він дозволяє моделювати розташування точок доступу з урахуванням будівельних матеріалів та перешкод, оптимізувати кількість та розміщення точок доступу для максимального покриття та продуктивності, а також оцінювати бюджети впровадження та створювати звіти для монтажу.

D-Link Nuclias Connect [11] — це безкоштовна програмна платформа (on-premises), яка дозволяє централізовано керувати бездротовими точками доступу D-Link, створювати безшовне Wi-Fi покриття та забезпечувати моніторинг, автентифікацію і контроль користувачів.

Ключові функції програмних засобів:

- планування мережі - створення віртуальних моделей Wi-Fi мереж з урахуванням фізичних характеристик приміщень;
- аналіз покриття - генерація теплових карт сигналу для виявлення зон слабого покриття або інтерференції;
- оптимізація розміщення точок доступу;
- підтримка сучасних стандартів Wi-Fi 6 (802;11ax) та Wi-Fi 7 (802;11be) для забезпечення високої продуктивності та стабільності мережі;
- генерація звітів про стан мережі, які можуть бути використані для подальшого аналізу та прийняття рішень.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Проблеми, пов'язані з використанням програмних засобів:

- сумісність з обладнанням - деякі програмні засоби можуть мати обмежену підтримку певних моделей точок доступу або контролерів, що ускладнює інтеграцію з існуючою інфраструктурою.
- професійні інструменти можуть мати високу вартість ліцензій, що може бути обмеженням для малих та середніх підприємств.
- деякі програми мають складний інтерфейс та вимагають спеціалізованих знань для ефективного використання.
- регулярне оновлення програмного забезпечення та технічна підтримка можуть бути обмеженими або вимагати додаткових витрат.

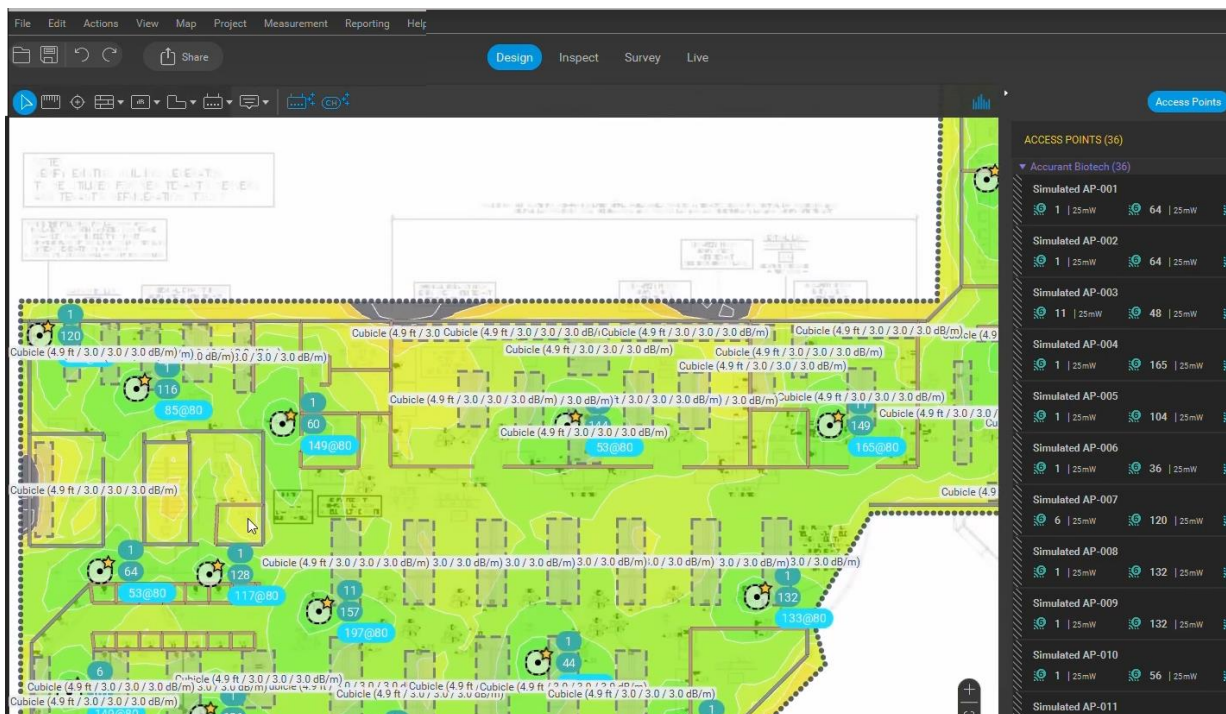


Рисунок 1.4 - Середовище EkaHau AI Pro

1.3 Впровадження безшовних мереж та постановка задач роботи

Впровадження безшовного Wi-Fi покриття на малих і середніх підприємствах (МСП) зазвичай має на меті забезпечити стабільний доступ до мережі для працівників, мобільних пристроїв та IoT-обладнання без розривів

з'єднання при переміщенні в межах будівлі або виробничого середовища. Така задача стає особливо актуальною в умовах гнучких офісів, open-space простору, складів, шоурумів або цехів, де користувачі часто змінюють своє розташування.

У типовому сценарії впровадження в МСП використовується інфраструктура з централізованим управлінням точками доступу. Найбільш поширеним вибором є рішення на базі Wi-Fi контролера або хмарних платформ (наприклад, Cisco Meraki, Ubiquiti UniFi, TP-Link Omada), що дозволяють автоматизувати налаштування, балансування навантаження і роумінг між точками доступу.

Політики роумінгу в таких системах передбачають автоматичне перемикання клієнта на іншу точку доступу за умов слабкого сигналу, перевантаження поточної ТД або на основі рекомендацій від контролера. Важливо, що при цьому зберігається сесія без розриву з'єднання, завдяки попередній автентифікації та передачі контексту через 802.11r. Більш розвинуті системи дозволяють адміністратору задавати порогові значення потужності сигналу.

Попри переваги, впровадження безшовного Wi-Fi у МСП може супроводжуватися низкою проблем. Найбільш поширеними є неправильне розміщення точок доступу, що призводить до «мертвих зон» або надмірного перекриття, яке викликає інтерференцію. Іншою проблемою є нестача підтримки на рівні клієнтських пристроїв — не всі смартфони чи ноутбуки повною мірою підтримують механізми Fast Roaming або коректно реагують на рекомендації мережі. Також виникають труднощі із забезпеченням безпеки під час роумінгу, особливо якщо автентифікація базується на зовнішніх серверах або вимагає інтеграції з Active Directory.

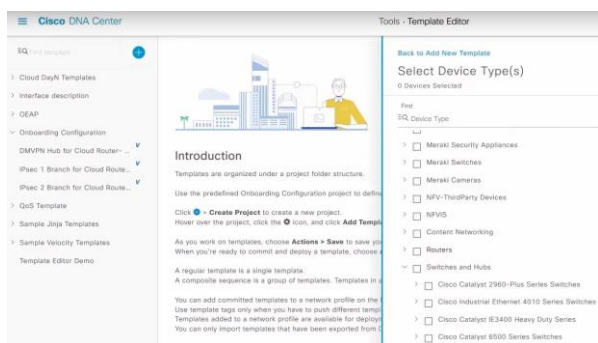
Нерідко підприємства недооцінюють необхідність попереднього радіопланування, у результаті чого мережа розгортається без урахування специфіки приміщень, матеріалів стін або зон із високим трафіком. Це впливає не лише на стабільність з'єднання, а й на загальну пропускну здатність мережі.

Після завершення моделювання та проектування Wi-Fi мережі (тобто після розміщення точок доступу, аналізу покриття, генерації звіту та експорту

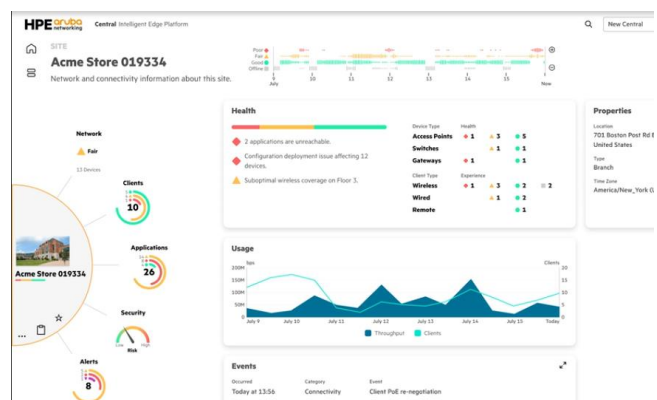
					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

координат), дані можна використати в платформах централізованого управління мережевою інфраструктурою. Вони відрізняються підходом до управління (хмарним або локальним), масштабованістю, функціональністю та архітектурою. Одні з самих поширених систем: Cisco DNA Center [12], Aruba Central [13], Ubiquiti UniFi Controller [14], MikroTik CAPsMAN [15]. Програми дозволяють:

- використати координати та плани для прив'язки точок на карті у контролері.
- налаштувати радіо-параметри (канали, потужність) відповідно до проекту.
- порівняти реальні значення сигналу з прогнозованими.



Cisco DNA Center



Aruba Central

Рисунок 1.5 - Платформи централізованого управління мережевою інфраструктурою

Для досягнення мети кваліфікаційної роботи потрібно виконати такі завдання:

- проаналізувати сучасні технології побудови безшовних Wi-Fi мереж;
- визначити та обґрунтувати вибір мережевого обладнання і стандартів;
- спроектувати топологію комп'ютерної мережі підприємства з урахуванням безшовного покриття;
- реалізувати налаштування обладнання;
- провести тестування і оцінку якості роботи мережі.

2 ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА

2.1. Аналіз вимог підприємства до бездротової мережі

Сформулюємо вимоги підприємства до бездротової безшовної мережі, які можна включити до технічного завдання (ТЗ) для проектування Wi-Fi-інфраструктури у приміщеннях [16–24]. Підприємство надає приміщення в оренду для навчальних цілей, проведення масових заходів, конференцій чи торгівлі.

Загальна мета проекту мережі - створити високонадійну, масштабовану, бездротову мережу з безшовним покриттям для орендованих приміщень різного призначення: навчання, подій, торгівлі, презентацій тощо. Мережа має забезпечити стабільний доступ до Інтернету, внутрішніх сервісів і підтримку великої кількості користувачів. Технічні вимоги підсумуємо в таблиці 2.1

Таблиця 2.1- Технічні вимоги до проекту мережі

Тип	Вимоги
1	2
Покриття та безшовність	Забезпечити суцільне покриття без "мертвих зон" у всіх приміщеннях орендного фонду: аудиторії, зали, коридори, технічні приміщення. Підтримка безшовного роумінгу між точками доступу без розриву з'єднання (підтримка 802.11r/k/v). Оптимальне розміщення точок доступу з урахуванням будівельних матеріалів (бетон, скло, метал).
Підтримка стандартів	Стандарт Wi-Fi: не нижче 802.11ac Wave 2, з бажаною підтримкою 802.11ax (Wi-Fi 6). Підтримка 2.4 та 5 ГГц, бажано — 6 ГГц (Wi-Fi 6E) Підтримка MU-MIMO, OFDMA, Beamforming.
Єдиний SSID	Уся територія покривається єдиною мережею з уніфікованим SSID, з можливістю виділення гостьової, адміністраторської та подієвої мереж через VLAN.

Продовження таблиці 2.1

1	2
Пропускна здатність і щільність	Забезпечити стабільну роботу до 300 одночасних клієнтів на кожному поверсі/зоні. Пропускна здатність на одного користувача — не менше 10 Мбіт/с (відеоконференції, стримінг, доступ до хмарних сервісів). Забезпечення QoS (пріоритетність для аудіо/відео трафіку під час презентацій та івентів).
Безпека	Аутентифікація: WPA2-Enterprise або WPA3-Enterprise (за підтримки клієнтів). Підтримка RADIUS-сервера або Captive Portal з ізоляцією користувачів у гостьовій мережі. VLAN ізоляція: адміністративний, користувацький і гостьовий трафік має бути розділений. Можливість фільтрації MAC-адрес, чорних списків.

Експлуатаційні вимоги до комп'ютерної мережі — це сукупність вимог, що визначають параметри, умови та характеристики функціонування мережі в реальному режимі з урахуванням надійності, доступності, безпеки, масштабованості та зручності обслуговування. Експлуатаційні вимоги описано в таблиці 2.2

Ролі та вимоги до користувачів.

У контексті проєктування бездротової мережі для багатофункціонального простору, що надається в оренду під освітні, конференційні та торговельні події, важливо чітко визначити ролі користувачів, їхні функціональні потреби, а також програмне забезпечення, що забезпечуватиме ефективну експлуатацію інфраструктури. У цьому аспекті академічний підхід передбачає аналітичне узагальнення ролей, їхніх вимог до мережі та прикладного інструментарію.

Першочерговими користувачами бездротової мережі виступають орендарі простору: представники навчальних закладів, організатори подій, учасники виставок або торговельних заходів. Для таких користувачів основними потребами є безперервний доступ до високошвидкісного Інтернету, підтримка потокового відео, електронного документообігу, презентаційних платформ, а також стабільність з'єднання під час переміщення територією. Відповідно,

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

мережа повинна підтримувати механізми безшовного роумінгу, адаптивного балансування навантаження та диференціації трафіку.

Таблиця 2.2 – Експлуатаційні та вимоги до керування

Тип	Вимоги
Централізоване управління	Наявність єдиного контролера для керування всіма точками доступу (локальний або хмарний). Підтримка автоматичної конфігурації, моніторингу та оновлення прошивок. Журнал подій, сповіщення про збої та перевантаження.
Моніторинг і аналітика	Збір статистики трафіку, підключень, рівня сигналу, використання каналів. Візуалізація карти покриття та завантаженості точок. Звіти по подіях, сесіях, автентифікації.
Масштабованість	Можливість розширення мережі до 100 точок доступу, з можливістю розміщення нових без повної реконфігурації. Гнучка система конфігурацій для різних орендарів і подій.
Інші вимоги	Сумісність із існуючою кабельною інфраструктурою (CAT 5e / CAT 6, PoE). Живлення точок доступу через PoE+ (802.3at) або пасивне PoE. Можливість інтеграції з зовнішніми DHCP/RADIUS серверами. Підтримка резервного доступу до Інтернету та автоматичного перемикання.

До другої категорії належать відвідувачі й учасники подій (студенти, слухачі, покупці, гості), які не мають повного доступу до адміністративних ресурсів, але потребують гостьового доступу до мережі з мінімальними затримками, простим способом аутентифікації (наприклад, через Captive Portal) та фільтрацією шкідливого або небажаного трафіку.

Третім рівнем користувачів є системні адміністратори або оператори ІТ-підрозділів, які забезпечують технічну підтримку, моніторинг, оновлення конфігурацій та реалізацію політик безпеки. Для них важливо мати доступ до централізованих засобів керування, аналітики продуктивності та журналів подій.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Вони також відповідають за інтеграцію мережі з зовнішніми інформаційними системами, зокрема DHCP, RADIUS, DNS, а також за планування розширення мережі відповідно до змін у топології простору.

Прикладне програмне забезпечення.

Експлуатація бездротової інфраструктури такого типу вимагає використання комплексу програмних засобів, які охоплюють як локальне, так і хмарне керування. Зокрема, до рекомендованого інструментарію належать платформи централізованого адміністрування Wi-Fi-систем: Cisco DNA Center, що забезпечує повну автоматизацію мережевої політики і телеметрії; Aruba Central як хмарне рішення з адаптивною аналітикою та оптимізацією сигналу; Ubiquiti UniFi Controller, що орієнтований на малий і середній бізнес і забезпечує уніфіковану панель керування з можливістю візуалізації топології; а також MikroTik CAPsMAN, вбудований у RouterOS, який дозволяє реалізувати централізоване керування точками доступу на підприємствах із обмеженим бюджетом.

Додатково передбачено застосування програм планування радіомереж, таких як Ekahau AI Pro або iWave Wi-Fi, для моделювання зони покриття, аналізу перешкод та оптимального розміщення точок доступу. Засоби моніторингу мережевої продуктивності, наприклад PRTG Network Monitor чи Zabbix, використовуються для виявлення перевантажень, збоїв і аномалій у роботі мережі. Платформи керування користувачами, Captive Portal-рішення, як-от IronWifi, а також засоби безпечної аутентифікації (наприклад, FreeRADIUS), є необхідними для контролю доступу та реалізації політик безпеки.

2.2 Проектування логічної та фізичної топології мережі

Загальні відомості про будівлю підприємства:

- об'єкт трьохповерхова будівля;
- розмір кожного поверху: 25 м × 15 м;
- загальна площа: 1125 м²;

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

– призначення мережі: навчальні аудиторії, лабораторії, адміністративні кабінети.

На рисунку 2.1 зображено UML-діаграму логічної трирівневої структури мережі будівлі підприємства. Детальна логічна схема зображена на кресленні КР.КІ. 10660597.00.00.001.С1.

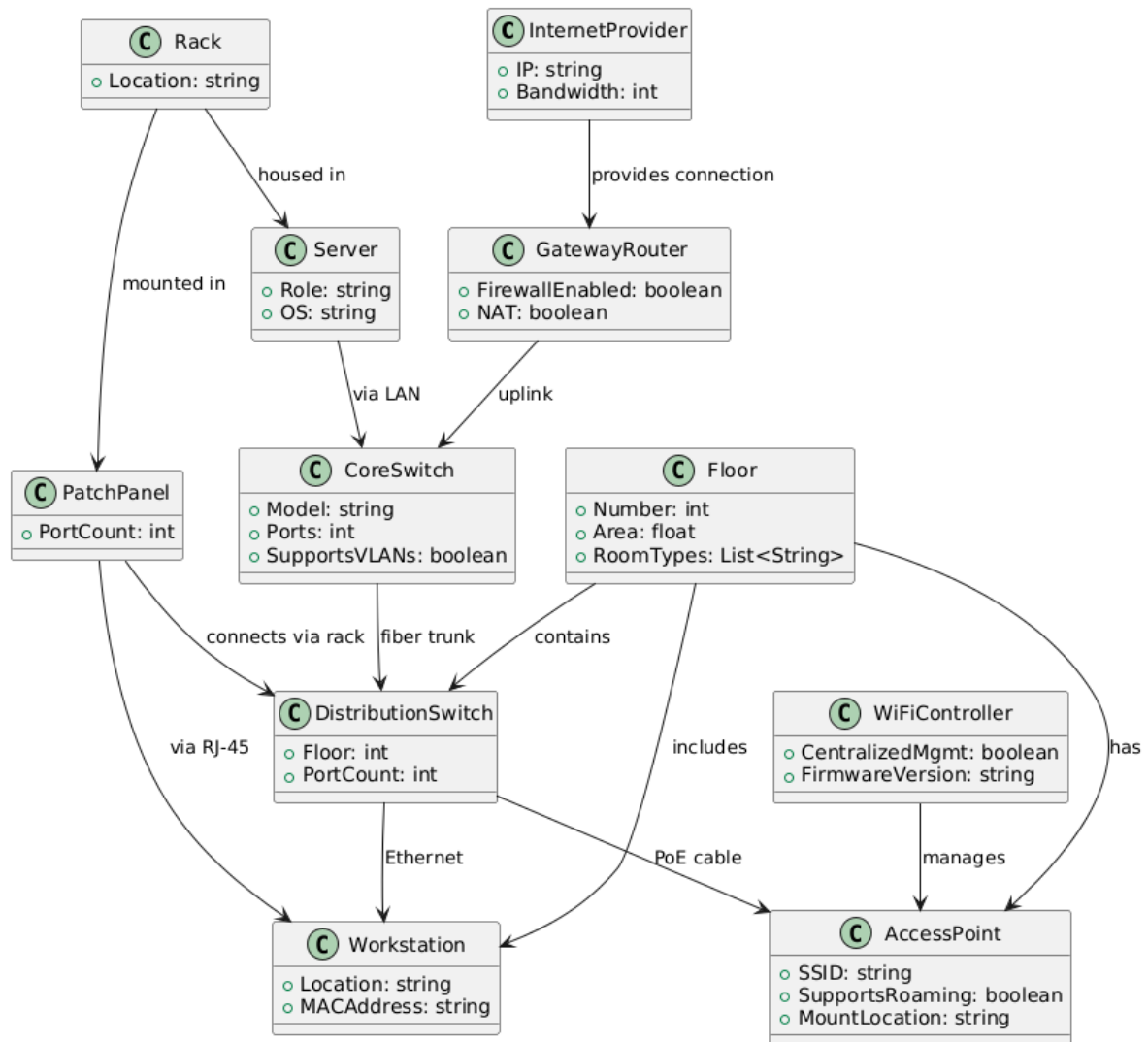


Рисунок 2.1 - Логічна структура мережі

На рисунку 2.1 зображено логічні рівні:

Рівень 1. Ядро мережі «Core»:

- gateway router приймає сигнал від провайдера;
- комутатор ядра Core Switch розташований в технічній кімнаті і виконує основну маршрутизацію й VLAN-агрегацію;

- WiFi контролер централізовано керує точками доступу.

Рівень 2. Рівень розподілу на поверсі «Distribution»:

- комутатор розподілу «Distribution Switch» на кожному поверсі, підключений до ядра через транк зв'язок .
- організовує підключення до точок доступу (PoE) і розеток в аудиторіях через патч-панелі.

Рівень 3. Кінцеві пристрої «Access»:

- точки доступу з покриттям у кожному секторі поверху;
- робочі станції підключені до розеток через Ethernet;
- сервери для внутрішніх сервісів (файловий, внутрішній DNS) — у серверній.

Сформулюємо вимоги до топології та архітектури структурованої кабельної системи (СКС). СКС має реалізовувати ієрархічну зіркоподібну топологію з головним комунікаційним вузлом у технічному приміщенні першого поверху та горизонтальними розподільчими вузлами (ГРВ) на кожному поверсі. Усі точки доступу повинні мати індивідуальні лінії категорії не нижче Cat6a, прокладені до найближчого поверхового кросу. СКС повинна забезпечувати живлення точок доступу через PoE+ або PoE++ (IEEE 802.3at або 802.3bt), що вимагає сумісного комутаційного обладнання та відповідної організації кабельної інфраструктури. Необхідна щільність портів RJ-45 в місцях монтажу точок доступу — не менше одного порту на кожен точку з можливістю резервування. СКС повинна забезпечувати сегментацію мережі на рівні VLAN: для гостьового доступу, адміністративного персоналу та тимчасових івентів. Патч-панелі, комутаційне обладнання та маркування кабелів мають бути підготовлені для логічного розподілу за VLAN та стандартизовані відповідно до вимог TIA/EIA-606.

Для горизонтального підсистеми СКС використовуються екрановані або неекрановані кабелі U/UTP або F/UTP категорії Cat6a або вищої, що підтримують частоти до 500 МГц та швидкість до 10 Гбіт/с. Використовуване обладнання повинно відповідати стандартам:

- ANSI/TIA-568.2-D – для мідного кабелю

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

- ANSI/TIA-568.3-D – для оптоволоконного
- ISO/IEC 11801 – загальна класифікація СКС

План поверху із структурованою кабельною системою наведено на рисунку 2.2. Плани всіх поверхів однакові.

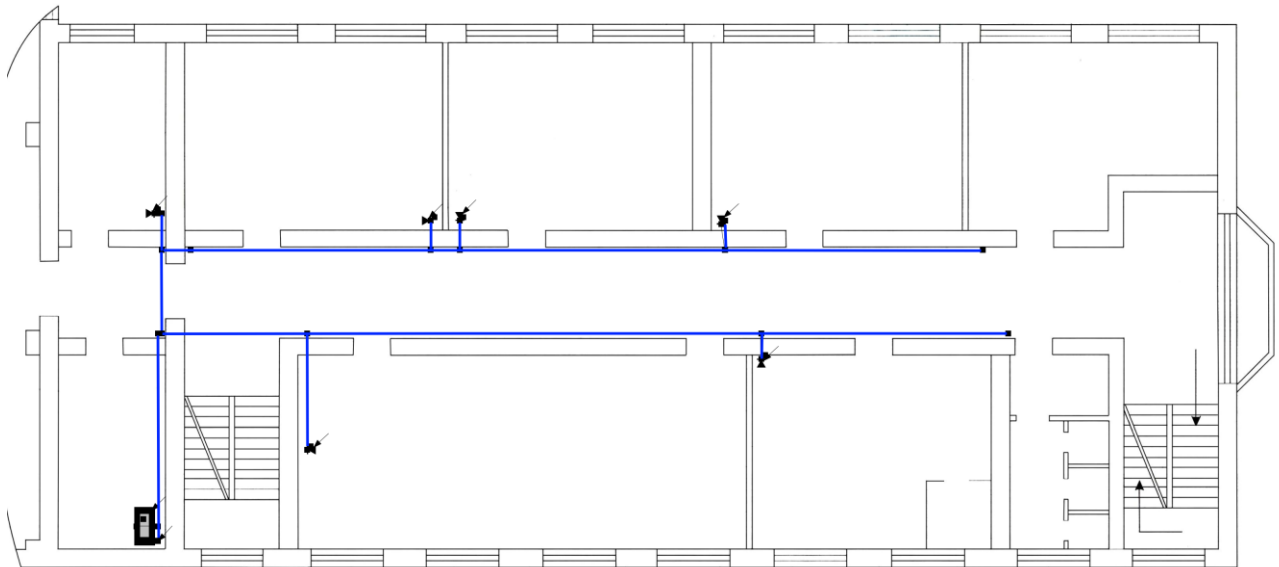


Рисунок 2.2 – Структурована кабельна система на плані поверху

2.3 Вибір мережевого обладнання

Виберемо комутаційне обладнання для побудови мережі. Основні критерії вибору це PoE-бюджет та наявність SFP-uplink для головного комунікаційним вузла та потрібні функції (PoE+, VLAN, QoS) для поверхів. Перелік вибраного обладнання D-Link [25] подано в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 - Комутатори

Модель	Функції
1	2
Основний комутатор D-Link DGS-1210-28 (Smart Managed, 24 Port PoE+)	24×Gigabit PoE+ портів із загальним PoE-бюджетом до 370 Вт 4 Combo SFP uplink для оптики VLAN, QoS, ACL та L2+ функції для сегментації гостьових, адміністративних івент-мереж.

Продовження таблиці 2.3

1	2
Поверхові комутатори D-Link DGS-1100-08PV2 (8-port Smart Managed PoE+)	8 Gigabit PoE+ портів, бюджет ≈ 100 Вт Компактний, економічний, має VLAN, QoS, SNMP, web-інтерфейс — підходить для встановлення в HDA на кожному поверсі.
Для резерву або розширення D-Link DGS-1008MP (8-port Gigabit PoE+)	8 портів Gigabit PoE+, бюджет ≈ 60 Вт Безвентиляторний металевий корпус, компактний — гарний варіант для невеликих зон або резервного резервного копіювання.

Порівняльний огляд типових точок доступу та контролерів Wi-Fi для безшовного покриття в малих і середніх підприємствах на базі платформ Cisco Meraki, Ubiquiti UniFi та TP-Link Omada наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Точки доступу та контролери

Виробник	Модель
Cisco Meraki	MR46 точка доступу стандарту Wi-Fi 6 (802.11ax) з конфігурацією 4x4 MU-MIMO, підтримкою OFDMA, beamforming та швидкістю до 3,5 Гбіт/с. MR57 преміум модель з підтримкою Wi-Fi 6E (три радіо: 2.4, 5 та 6 ГГц), конфігурація 4x4:4 MU-MIMO, швидкість до 7,78 Гбіт/с. Контролер: управління здійснюється через хмарну платформу Meraki Dashboard, що забезпечує централізоване керування, автоматичне оновлення прошивок та підтримку протоколів 802.11r/k/v для швидкого роумінгу.
Ubiquiti UniFi	U6 Pro точка доступу Wi-Fi 6 з конфігурацією 2x2 MU-MIMO, підтримкою каналів до 160 МГц та швидкістю до 4,8 Гбіт/с. Контролер UniFi Network Controller може бути розгорнутий локально або в хмарі, забезпечує централізоване управління, моніторинг та підтримку протоколів швидкого роумінгу.
TP-Link Omada	EAP660 HD Точка доступу Wi-Fi 6 з конфігурацією 4x4 MU-MIMO, підтримкою OFDMA, швидкістю до 3,6 Гбіт/с та підтримкою 802.11r/k/v для швидкого роумінгу. Контролери: OC200 Апаратний контролер для управління до 130 пристроїв, з хмарним доступом та без ліцензійних зборів. OC300 Професійний контролер для управління до 500 точок доступу, з можливістю централізованого керування та хмарним доступом.

Продовження таблиці 2.4

1	2
D-Link	DWL-X8630AP Стандарт: Wi-Fi 6 (802.11ax), dual-band Конфігурація: 4x4 MU-MIMO Швидкість: до 1,8 Гбіт/с Функції: Підтримка OFDMA та BSS Coloring для зменшення колізій у щільних мережах Автоматичне формування променя (beamforming) Підтримка протоколів 802.11r/k/v для покращеного роумінгу
MikroTik	cAP ax Стандарт: Wi-Fi 6 (802.11ax), dual-band Конфігурація: 2x2 MU-MIMO Швидкість: до 1.8 Гбіт/с загалом (до 574 Мбіт/с на 2.4 ГГц, до 1200 Мбіт/с на 5 ГГц) Функції: Beamforming, WPA3 Enterprise, VLAN tagging Керування через CAPsMAN v2 (вбудований в RouterOS)

2.4 Розробка плану розташування точок доступу та аналіз зон покриття

Відкриваємо EkaHau AI Pro та створюємо новий проєкт натискаючи "New Project". Обираємо одиниці виміру (метри або фути). Вказуємо, яку Wi-Fi технологію плануємо використовувати: Wi-Fi 5 (802.11ac), Wi-Fi 6.

Імпортуємо план приміщення у форматі JPEG. Прив'язуємо масштаб, обираємо дві відомі точки на плані та вводимо реальну відстань між ними.

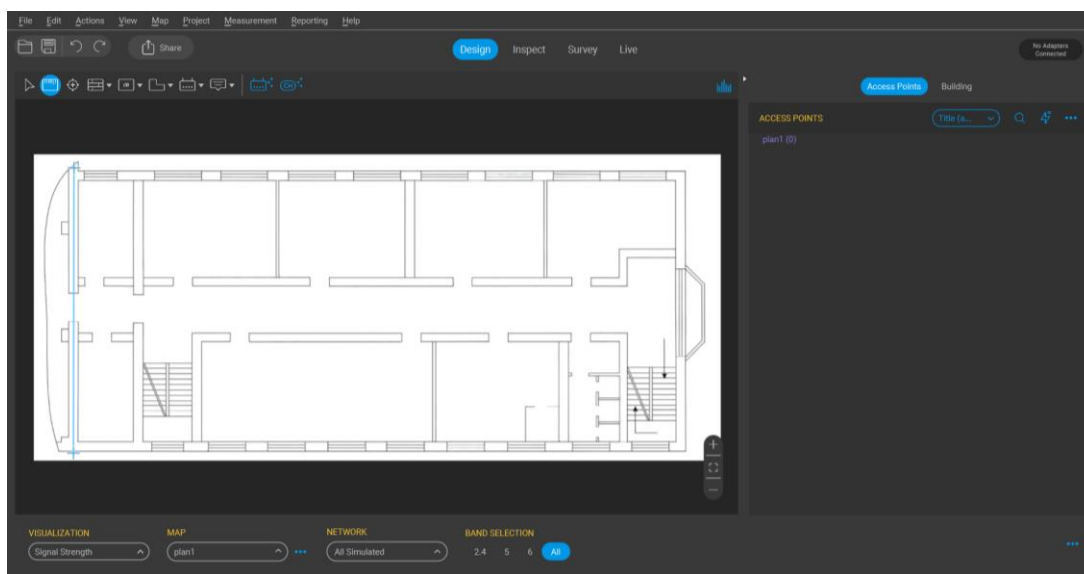


Рисунок 2.3 – План приміщення підприємства

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Наступник кроком є створення логічної моделі середовища. Визначаємо тип приміщення (наприклад, офіс, склад, навчальний заклад) і встановлюємо висоту поверху (наприклад, 3 м). Далі вказуємо типи матеріалів (бетон, гіпсокартон, скло) для кожної стіни (рисунок). Наносимо основні цегляні стіни, вікна та сходові клітки.

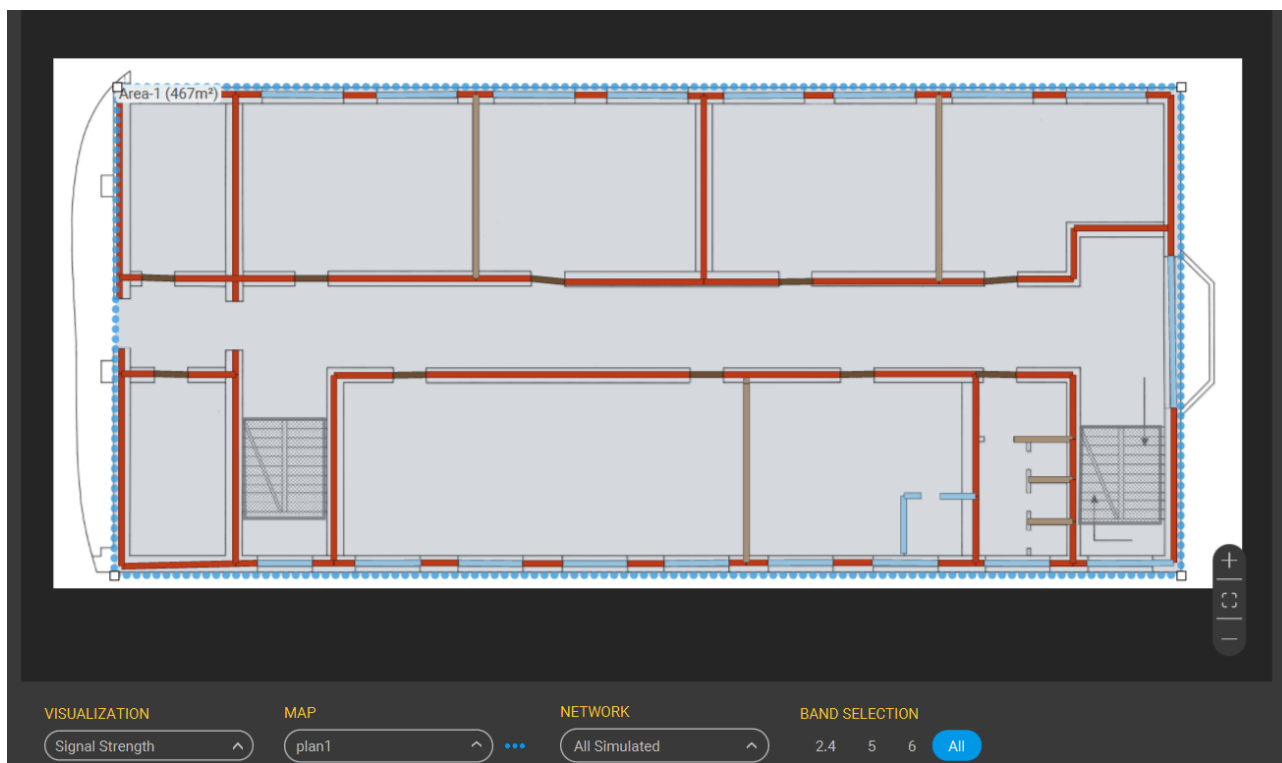


Рисунок 2.4 – Створення моделі приміщення враховуючи матеріали стін

Різні матеріали по різному перешкоджають сигналу [26] (таблиця 2.5)

Таблиця 2.5 – Перешкоди для сигналу

Перешкода	Товщина (мм)	Затухання сигналу 2,4 ГГц (дБ)	Затухання сигналу 5 ГГц (дБ)	Затухання сигналу 6 ГГц (дБ)
Звичайна цегляна стіна	120	10	15	20
Товста цегляна стіна	240	15	25	30
Бетон	240	25	30	35
Гіпсокартон	8	3	4	9
Пінопластові матеріали	8	3	4	9
Пустотіла деревина	20	2	3	8
Звичайні дерев'яні двері	40	3	4	9
Двері з масиву дерева	40	10	15	20

Розміщуємо точки доступу автоматично засобами Auto-Planner.
Натискаємо кнопку “Auto-Planner” і вказуємо:

- мінімальний рівень сигналу, наприклад: –67 dBm.
- щільність пристроїв: “High density” (для офісу на 100 осіб).
- плановані сервіси: VoIP, відео, перегляд веб-сторінок.

Обираємо сценарій планування для дводіапазонних точок доступу 2,4 ГГц і 5 ГГц (рисунок 2.5).

Access point type: Generic Wi-Fi 4/5 Dual Radio

Transmit power (mW): 2.4 GHz: 6.31 (EIRP: 10.2 dBm), 5 GHz: 25 (EIRP: 16.179 dBm), 6 GHz: 25 (EIRP: Disabled)

Antenna height: 2.7 m from the floor level

Area	AREA	FLOOR	REQUIREMENT	NO. DEVICES
Area-1	plan1	Ekahau Best Pract...	0	

Optimize with Capacity: Off

Optimize for Mobile Devices: Off

Channels:

2.4 GHz: ISM, 1, 6, 11, 14, 8, 11, 17, 13, 15, 9, 13

5 GHz: Select All, Select None

U-NII 1: 36, 40, 44, 48

U-NII 2: 52, 56, 60, 64

U-NII 2E: 100, 104, 108, 112, 116, 120, 124, 128, 132, 136, 140, 144

U-NII 3: 149, 153, 157, 161, 165

Channel width: 20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz

Рисунок 2.5 – Конфігурація точки доступу

Програма автоматично розставляє точки доступу (AP), враховуючи перекриття сигналу, кількість стін, тип приміщень та інші чинники (рисунок 2.6).

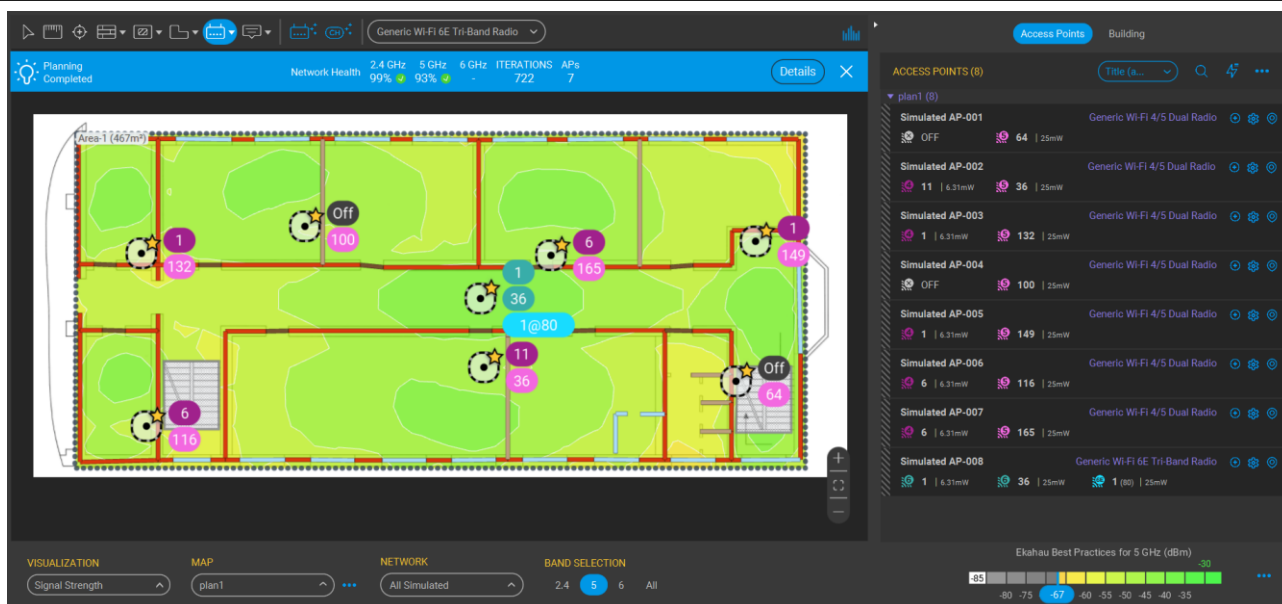


Рисунок 2.6 – Автоматичне розташування точок доступу

На рисунку 2.6 показано результуючу теплову карту покриття. Можна подивитись цю карту окремо для кожного діапазону. Як бачимо, програма враховує що між деякими кімнатами перестінки створенні з гіпсокартону і залишає одну ТД для двох приміщень.

На наступному етапі аналізуємо, чи кожна точка забезпечує належне покриття:

- вибираємо вкладку “Signal Strength” — бачимо теплову карту покриття.
- переходимо до “Signal-to-Noise Ratio” — перевіряємо, чи сигнал стабільний у всіх зонах.

Перший етап планування призвів до того що в коридорі спостерігається нижча якість сигналу тому додаємо нові ТД AP-008, AP-009, AP-010, вручну (рисунок 2.7). Таким чином ми на кожному поверсі плануємо встановити по 10 точок доступу. Створюємо PDF-звіт із результатами моделювання. У звіті відображаються:

- загальна кількість точок доступу;
- тип та модель кожної точки;
- їхні координати на плані (X, Y);
- кількість клієнтів на кожну точку (якщо планувалася щільність);
- графіки рівня сигналу, SNR, каналів, інтерференції.

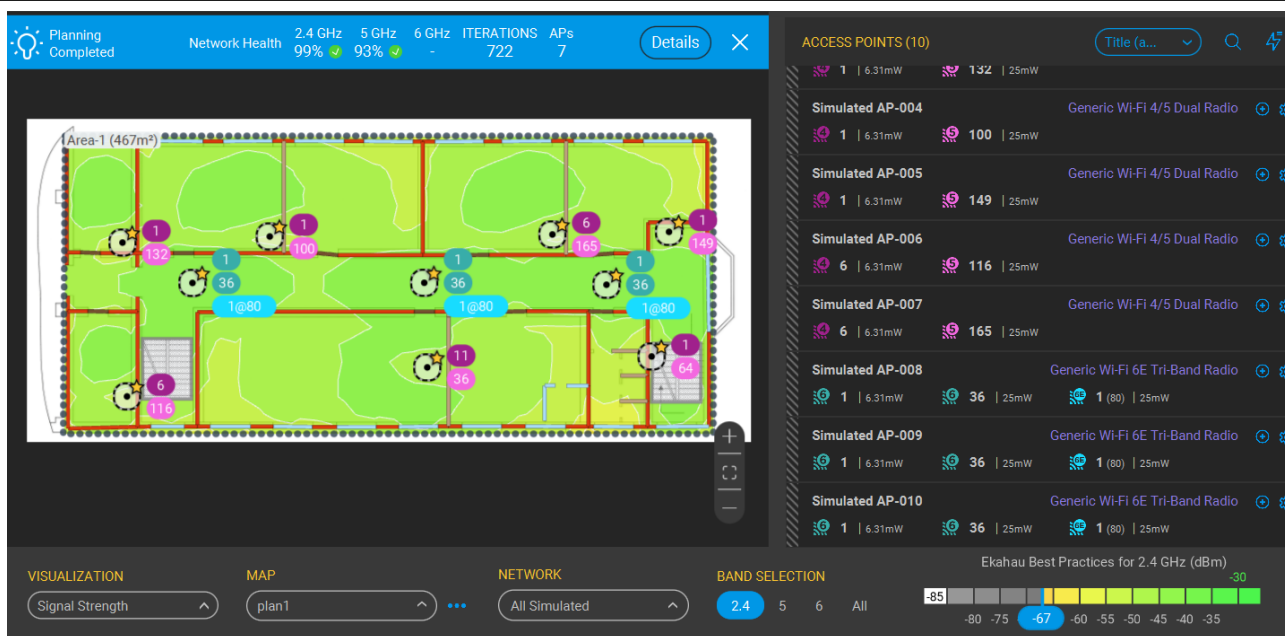


Рисунок 2.7 – Редагування плану розміщення точок доступу

Потужність сигналу, яку іноді називають зоною покриття, є найголовнішою вимогою для бездротової мережі (рисунок 2.8).

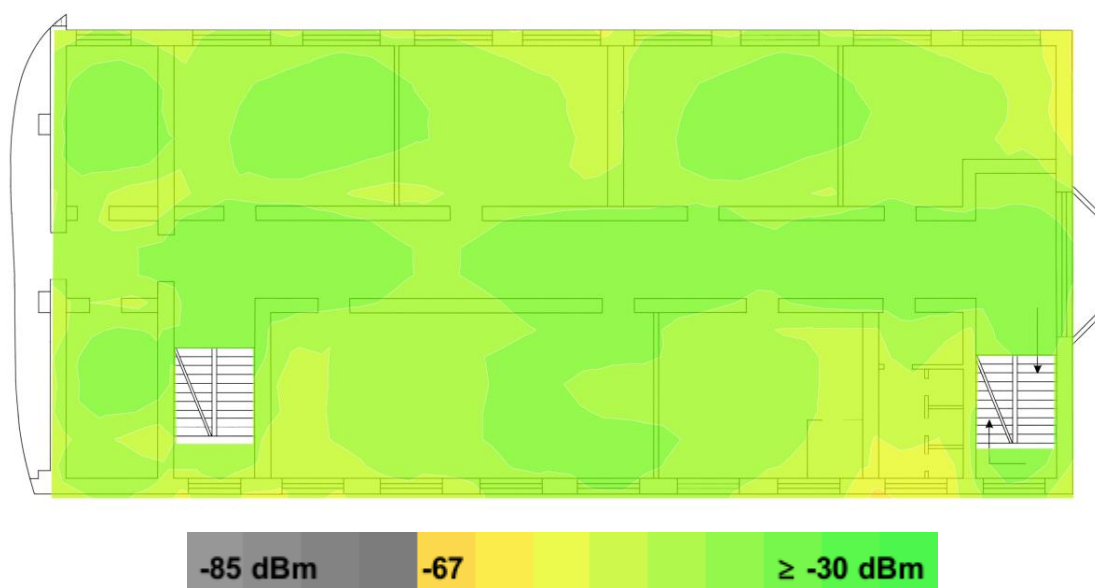


Рисунок 2.8 – Мапа сили сигналу для діапазону 2,4 ГГц

Фізичну топологію спроектованої мережі зображено на кресленні КР.КІ. 10660597.00.00.002.С1. В даному розділі здійснено проектування логічної та фізичної топологій кабельної мережі та планування розміщення точок доступу для безшовного покриття.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ БЕЗШОВНОЇ WI-FI МЕРЕЖІ НА ПІДПРИЄМСТВІ

3.1 Налаштування обладнання

Підсумуємо інформацію потрібну для налаштування обладнання при розгортанні Wi-Fi мережі для триповерхової будівлі підприємства розмірами 25×15 м:

- об'єкт: триповерхова будівля;
- розмір кожного поверху: 25 м × 15 м;
- загальна площа: 375 м²;
- призначення мережі: навчальні аудиторії, лабораторії, адміністративні кабінети, конференцзали;
- технологія Wi-Fi: 802.11ac (Wi-Fi 5)
- рівень сигналу (мінімальний): –67 dBm

Фрагмент звіту про кількість і розміщення точок доступу (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Звіт про розміщення точок доступу

Поверх	Назва AP	X (м)	Y (м)	Канал 2.4 ГГц	Канал 5 ГГц	Потужність (dBm)
1	AP-1F-001	5	5	1	36	17
1	AP-1F-002	20	5	6	44	17
1	AP-1F-003	12.5	12	11	149	17
2	AP-2F-001	5	5	1	36	17
2	AP-2F-002	20	5	6	44	17
2	AP-2F-003	12.5	12	11	149	17
3	AP-3F-001	5	5	1	36	17
3	AP-3F-002	20	5	6	44	17
3	AP-3F-003	12.5	12	11	149	17

Для налаштування обладнання експортуємо із програми Ekahau AI Pro координати точок доступу (див 2.4) у форматі CSV для подальшого налаштування контролерів:

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- назва точки;
- координати X та Y;
- канал, потужність, SSID.

Ми плануємо інтегрувати дані в систему управління мережею MikroTik CAPsMAN. Наведемо зразок експорту координат у CSV для CAPsMAN v2. Обираємо модель ТД MikroTik cAP ac / hAP ac³ (підтримують dual-band та CAPsMAN provisioning).

```
name,x,y,floor,band
AP-1F-01,5,5,1,dual
AP-1F-02,20,5,1,dual
AP-1F-03,12.5,12,1,dual
AP-2F-01,5,5,2,dual
AP-2F-02,20,5,2,dual
AP-2F-03,12.5,12,2,dual
AP-3F-01,5,5,3,dual
AP-3F-02,20,5,3,dual
AP-3F-03,12.5,12,3,dual
```

CAPsMAN (Controlled Access Point system MANager) — це централізована система управління бездротовими точками доступу, вбудована у маршрутизатори MikroTik з RouterOS. Вона дає змогу керувати великою кількістю точок доступу (CAP — Controlled Access Point) з єдиного центрального вузла, що виконує роль контролера.

Головна мета впровадження CAPsMAN полягає в централізації процесу розгортання, конфігурації та управління Wi-Fi мережею, що складається з кількох (десятків або навіть сотень) точок доступу. Замість налаштування кожної точки вручну, адміністратор може керувати всіма пристроями централізовано через CAPsMAN, що значно скорочує час налаштування, полегшує обслуговування й забезпечує уніфікованість параметрів у мережі.

Основні функції CAPsMAN:

1) централізоване управління параметрами бездротових інтерфейсів — усі ТД отримують конфігурації бездротових мереж (SSID, частоти, шифрування, потужність сигналу) від контролера;

2) Автоматичне виявлення контрольованих точок доступу (КТД) — точки доступу автоматично реєструються в CAPsMAN при вмиканні, якщо вказано

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

адресу керуючого вузла;

3) розмежування трафіку — CAPsMAN підтримує як централізовану маршрутизацію через контролер, так і локальне форвардування трафіку безпосередньо з CAP;

4) динамічне створення профілів точок доступу — система автоматично призначає конфігурацію залежно від правил;

5) моніторинг і статистика — адміністратор має змогу переглядати стан підключень, рівень сигналу, навантаження на точки доступу в режимі реального часу.

Конфігурацію потрібно створити один раз і потім використовувати багатьма точками доступу. Це забезпечує стандартизацію параметрів та значно спрощує адміністрування. Використаємо цей набір параметрів CAPsMAN Configuration, які описують поведінку Wi-Fi-інтерфейсу на CAP:

- ідентифікатор мережі SSID,
- типи аутентифікації (WPA2, PSK),
- частотний діапазон та канали (2.4 GHz, 5 GHz),
- рівень потужності передачі,
- режим маршрутизації трафіку (central/local forwarding).

Правила автоматичного застосування конфігурацій «Provisioning Rules» — це механізм, який визначає, яка конфігурація повинна бути застосована до конкретної точки доступу, коли вона з'являється в системі. Ключові параметри:

- action=create-dynamic-enabled — дозволяє створити динамічний об'єкт для нової точки.
- master-configuration=... — вказує, яку CAPsMAN Configuration застосовувати.
- name-prefix=... — встановлює формат імені створеної точки доступу.
- mac-address або identity-match — можна використовувати для адресного розподілу конфігурацій.

Це дозволяє впроваджувати автоматичне конфігурування нових пристроїв у великій мережі без необхідності ручного втручання.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Зразок налаштувань Provisioning Rules для MikroTik CAPsMAN v2.

```
CAPsMAN Provisioning Rules:
/interface wireless cap
set enabled=yes interfaces=wlan1,wlan2 caps-man-addresses=192.168.88.1

/caps-man provisioning
add action=create-dynamic-enabled master-configuration=config-wifi5 name-
format=prefix name-prefix=AP-1F
add action=create-dynamic-enabled master-configuration=config-wifi5 name-
format=prefix name-prefix=AP-2F
add action=create-dynamic-enabled master-configuration=config-wifi5 name-
format=prefix name-prefix=AP-3F
```

Рисунок 3.1 – Налаштування правил

Зразок налаштувань CAPsMAN Configurations

```
/caps-man configuration
add name=config-wifi5 country=ukraine security.authentication-types=wpa2-
psk \
    security.passphrase=YourSecurePassword ssid=EduCampus5GHz
datapath.local-forwarding=yes \
    channel.band=5ghz-a/n/ac channel.frequency=auto

add name=config-wifi24 country=ukraine security.authentication-types=wpa2-
psk \
    security.passphrase=YourSecurePassword ssid=EduCampus24GHz
datapath.local-forwarding=yes \
    channel.band=2ghz-b/g/n channel.frequency=auto
```

Рисунок 3.2 - Налаштування

У будівлях підприємства CAPsMAN використовується для розгортання десятків точок доступу на різних поверхах, із чітко визначеними SSID для студентів, викладачів, адміністрації. Конфігурації можуть бути різними — наприклад, обмеження швидкості чи VLAN для гостьового трафіку — а Provisioning Rules гарантують, що кожна точка автоматично отримає правильний профіль відповідно до її розташування чи ролі в мережі.

3.2 Реалізація програмного засобу розгортання мережі

Розробимо сценарій на мові Python, що автоматизує налаштування Mikrotik RouterOS для функціонування як контролера бездротових точок доступу. Скрипт повинен гнучко адаптуватися до вимог розгортання, запитуючи необхідні дані від користувача.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Вихідні дані для роботи скрипта:

1) Дані для підключення до Mikrotik: IP-адреса, ім'я користувача та пароль для доступу до RouterOS.

2) Інформація про групи користувачів. Для кожної групи користувачів скрипт повинен запитувати наступні параметри:

- назва групи (наприклад, "Гості", "Співробітники", "Адміністрація").
- назва SSID для цієї групи.
- пароль (PSK) для доступу до мережі Wi-Fi цієї групи.
- обмеження швидкості (upload/download) для користувачів цієї групи, якщо потрібно.
- VLAN ID, якщо передбачається сегментація мережі.

Скрипт повинен запитувати у адміністратора наступні дані для кожної точки доступу:

- MAC-адреса точки доступу.
- ім'я або умовне позначення точки доступу, що відображає її розташування (наприклад, "AP_Офіс_1", "AP_Офіс_2"). Це ім'я може бути надано після аналізу теплової карти (heatmap), що генерується сторонньою програмою.
- VLAN ID для керування точкою доступу, якщо передбачається сегментація.
- приналежність до групи(груп) користувачів.

Скрипт має встановлювати стабільне з'єднання з Mikrotik RouterOS, використовуючи надані облікові дані. За необхідності скрипт повинен створювати необхідні VLAN-інтерфейси на Mikrotik відповідно до отриманої інформації про групи користувачів та точки доступу. Скрипт повинен автоматично налаштовувати Mikrotik як контролер Hotspot або CAPsMAN, залежно від обраної архітектури розгортання. Пріоритет надається CAPsMAN для централізованого керування точками доступу. Функціональні вимоги до скрипта:

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

– Налаштування груп користувачів. Скрипт повинен створювати профілі користувачів та налаштовувати SSID з відповідними параметрами (пароль, обмеження швидкості, VLAN) для кожної визначеної групи.

– Додавання точок доступу. Скрипт повинен реєструвати точки доступу в контролері CAPsMAN, присвоюючи їм унікальні імена та асоціюючи з відповідними профілями Wi-Fi та VLAN.

Для розробки скрипта використаємо такі бібліотеки:

– `routeros_api` для взаємодії з Mikrotik RouterOS через його API; Вона дозволить виконувати команди та отримувати інформацію з маршрутизатора;

– `ipaddress` для перевірки та обробки IP-адрес, масок підмереж, якщо скрипт буде вимагати їх введення;

– `getpass` для безпечного введення паролів без відображення їх у консолі;

– `sys` для виходу зі скрипта у випадку критичних помилок.

Діаграма класів на рисунку 3.3 відображає основні компоненти та їх взаємодію, необхідні для реалізації функціоналу. Клас `MikrotikConfigurator` є центральним для виконання налаштувань на Mikrotik. Він інкапсулює логіку підключення до маршрутизатора, створення VLAN, налаштування CAPsMAN (включаючи профілі безпеки, конфігурації та прив'язку точок доступу). Містить дані (атрибути) для підключення (`ip_address`, `username`, `password`) та об'єкт для взаємодії з API (`api`). Включає методи для конкретних операцій налаштування, таких як `connect()`, `create_vlan()`, `configure_capsman_settings()`, `create_security_profile()`, `add_access_point()` та `save_config()`.

Клас `UserInputHandler` відповідає за взаємодію з користувачем. Він запитує необхідну інформацію, таку як облікові дані Mikrotik, деталі про групи користувачів та інформацію про точки доступу. Методи `get_mikrotik_credentials()`, `get_user_groups_info()`, `get_ap_info()` та `confirm_action()` забезпечують отримання всіх необхідних вхідних даних від користувача.

Клас `MikrotikAPI` слугує обгорткою для бібліотеки `routeros_api`, абстрагуючи пряму взаємодію з API Mikrotik. Він включає методи для виконання загальних команд API та перевірки стану пристрою (наприклад, чи існує VLAN, чи увімкнений CAPsMAN). Містить об'єкт `connection` для управління з'єднанням.

Містить методи `run_command()` для виконання довільних команд та допоміжні методи, такі як `check_vlan_exists()`, `check_capsman_enabled()`.

Клас `ReportGenerator` відповідає за генерацію звітів та логування. Він виводить зведену інформацію про виконані налаштування та записувати події під час роботи скрипта. Містить методи `generate_summary()` для створення підсумкового звіту та `log_message()` для виведення повідомлень різного рівня важливості.

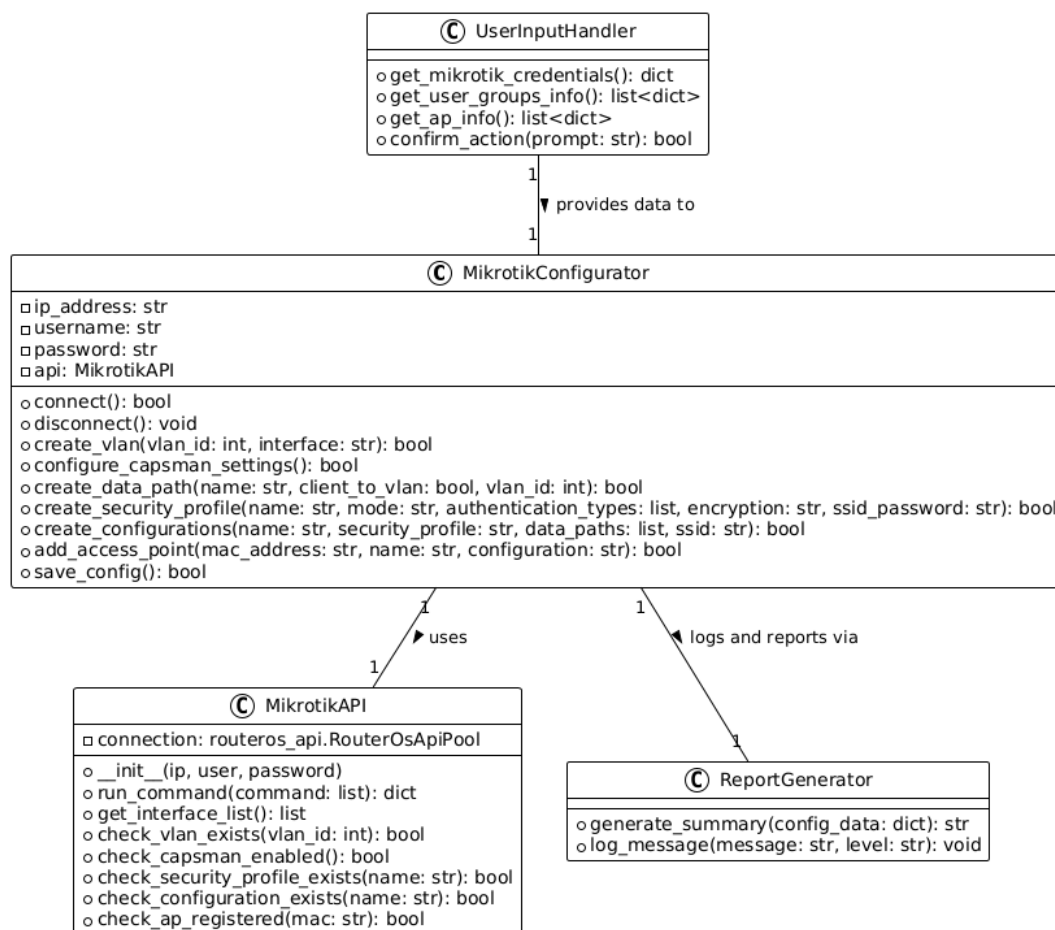


Рисунок 3.3 - Діаграма класів програмного засобу розгортання мережі

3.3 Тестування та оцінювання якості мережі

Тестування на місці бездротової мережі з безшовним доступом є критично важливим для підтвердження відповідності проєктного рішення [27] реальним умовам експлуатації. Такий процес включає вимірювання параметрів сигналу,

перевірку безперервності з'єднання при переміщенні, аналіз латентності, якості роумінгу та ефективності розміщення точок доступу. Метою тестування є валідація Wi-Fi-мережі на відповідність функціональним і технічним вимогам, а саме:

- перевірка покриття без "мертвих зон";
- підтвердження коректного роумінгу між точками доступу;
- оцінка якості обслуговування при високій щільності клієнтів;
- виявлення зон перевантаження або інтерференції;
- контроль відповідності нормативів рівня сигналу, SNR, затримок.

Перед початком тестування:

1) створюється маршрут обходу для кожного поверху (включно з підвалом);

2) визначається набір параметрів для вимірювання:

- рівень сигналу (RSSI),
- співвідношення сигнал/шум (SNR),
- затримка передачі (ping, jitter),
- швидкість з'єднання (uplink/downlink),
- час переключення при роумінгу (re-association time).

Можна використати такі інструменти, як Ekahau Sidekick [28], WiFi Analyzer [29], PingPlotter [30], або iPerf3 [31], Ubiquiti WiFiman Wizard [32].

Розглянемо методики проведення тестування. У режимі пасивного обстеження (passive site survey) виконується покроковий обхід приміщень на кожному поверсі:

- пересування по коридорах, аудиторіях, торгових і технічних зонах;
- запис показників RSSI (не гірше -67 dBm) та SNR (> 25 dB);
- фіксація точок з погіршеним сигналом або нестабільним покриттям.

Особлива увага при обстеженні приділяється:

- куточкам без прямої видимості до ТД;
- місцям із посиленими стінами (укриття, техприміщення);
- зонах, де очікується висока щільність клієнтів.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



Ekahau Sidekick 2 [28]



Ubiquiti UniFi WiFiMan Wizard [32]

Рисунок 3.4 - Аналізатори мережі Wi-Fi

Для перевірки роумінгу у реальному часі виконується переміщення з активним підключенням до мережі:

- із запуском тривалого ping до локального шлюзу та зовнішнього сервера;
- з фіксацією перехідного моменту між точками доступу;
- вимірювання часу повторної аутентифікації (підтвердження, що 802.11r/k працює правильно);
- запис часу затримки під час переходу (expected < 50 ms);
- перевірка наявності розривів (packet loss) під час переходу.

Особлива увага приділяється наявності сигналу та стабільності роботи у критично важливих зонах без вікон, зокрема укриттях. Проводяться вимірювання затухання через кілька бетонних перегородок. За можливості, в зоні укриття перевіряється підтримка VoIP-зв'язку та мінімальна швидкість передачі даних (не менше 5 Мбіт/с). Фіксується рівень сигналу по кутах укриття з різними матеріалами стін.

Звіту за результатами тестування повинен містити показники якості наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Опис результатів тестування

Розділ	Показники якості
Карта покриття кожного поверху	теплові карти RSSI, SNR точки переходу між АР (засічка роумінгу); зони недостатнього покриття (якщо є).
Аналітика роумінгу:	час переходу між АР; кількість переходів за маршрут; втрати пакетів і затримки під час переміщення.
Таблиці параметрів по кожній зоні	середній RSSI, SNR, jitter; швидкість завантаження/вивантаження; рівень втрат та повторних з'єднань.
Оцінка відповідності проєктним вимогам	відповідність мінімальному рівню сигналу; відповідність параметрам роумінгу; реальні vs. очікувані характеристики.
Рекомендації	додаткове розміщення АР (якщо потрібно); зміна потужності передавачів; налаштування каналів або VLAN/SSID розподілу; перегляд політики балансування навантаження.

Наведемо результати тестування різним інструментами. Приклад консолі ping під час проходу з 1-го на 2-й поверх наведено на рисунку 3.5

```
$ ping 192.168.1.1

64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=1 ttl=64 time=4.1 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=2 ttl=64 time=4.2 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=3 ttl=64 time=3.9 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=4 ttl=64 time=88.7 ms <-- перехід між АР
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=5 ttl=64 time=12.1 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=6 ttl=64 time=3.8 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=7 ttl=64 time=4.0 ms
```

Рисунок 3.5 – Тестування затримки

Вивід iwconfig в Linux

```
wlan0 IEEE 802.11 ESSID:"CampusWiFi"
Mode:Managed Frequency:5.22 GHz Access Point: 
Bit Rate=866 Mb/s Tx-Power=22 dBm
Link Quality=65/70 Signal level=-60 dBm
```

Рисунок 3.6 – Тестування збору інформації про точку доступу

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Графік зміни рівня сигналу RSSI (в dBm) протягом проходження маршрутом (рисунки 3.7). На графіку відображено зміну рівня сигналу (RSSI) під час проходження маршрутом. Помітне короткочасне погіршення сигналу (-78 dBm) у точці перемикавання між точками доступу, що характерно для моменту роумінгу. Решта показників залишаються вище прийнятного мінімуму -67 dBm .

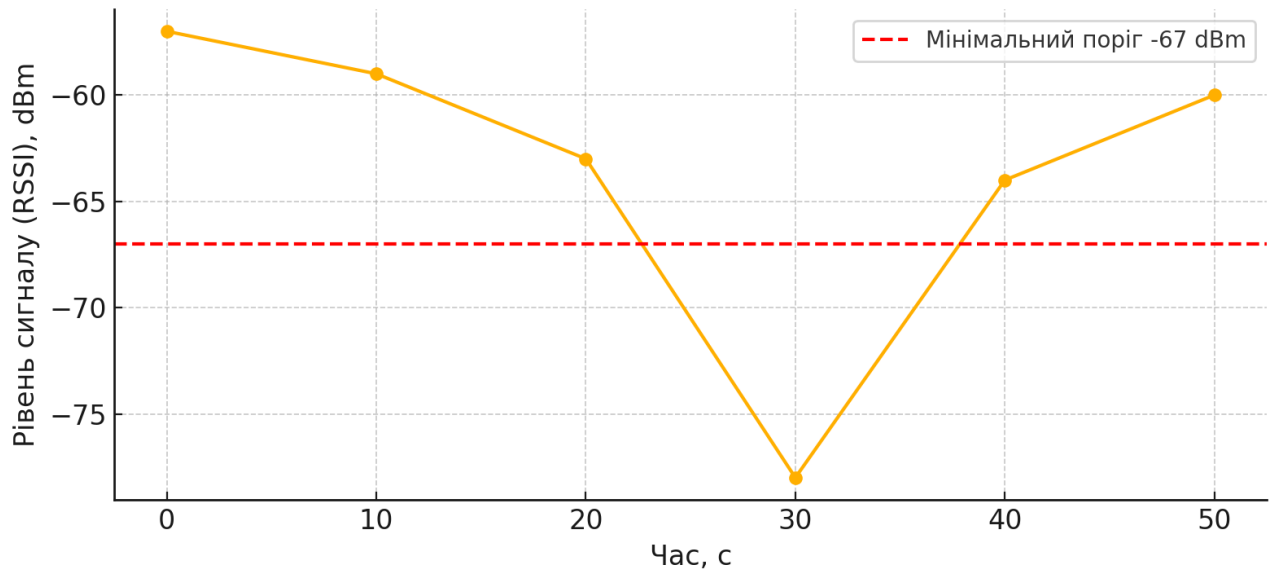


Рисунок 3.7 - Зміна рівня сигналу RSSI під час проходження маршрутом

Тестування рівня сигналу в будівлі підприємства показало відповідність заданим в технічному завданні параметрам і параметрам отриманим під час імітаційного моделювання.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи отримано такі висновки.

1. Функціональність технологій побудови безшовних Wi-Fi базується на інтеграції централізованого управління, підтримки швидкого роумінгу (IEEE 802.11r/k/v) та забезпеченні безперервного з'єднання користувачів при переміщенні. Основною умовою ефективності є правильне радіопланування та підтримка відповідних протоколів на рівні клієнтських пристроїв.

2. Обґрунтовано доцільність використання стандартів із низькою затримкою переключення бездротових клієнтів, функції адаптивного управління навантаженням. Рекомендовано застосування контролер-орієнтованих платформ, які забезпечують масштабованість, централізоване адміністрування і реалізацію політик роумінгу.

3. Розроблено трирівневу логічну ієрархічну топологію комп'ютерної мережі підприємства з урахуванням підтримки безшовного Wi-Fi покриття. Реалізовано централізоване керування точками доступу, підтримку протоколів швидкого роумінгу (802.11r/k/v), сегментацію трафіку за VLAN. План розміщення точок доступу, сформований за допомогою програмного моделювання, забезпечує суцільне покриття без «мертвих зон» і відповідність технічним вимогам щодо щільності клієнтів та якості сигналу.

4. Здійснено централізоване налаштування точок доступу за допомогою системи MikroTik CAPsMAN, що дозволило забезпечити уніфікованість параметрів і гнучке керування мережею. Реалізовано програмний засіб на Python, що автоматизує конфігурацію кожного пристрою відповідно до плану покриття.

5. У процесі тестування підтверджено відповідність розгорнутої мережі проєктним вимогам щодо покриття, якості сигналу, безшовного роумінгу та пропускної здатності. За результатами аналізу створено теплові карти, виявлено окремі зони зниженої якості покриття.

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стрельчук В. А., Гладій А. І. Модель програмного забезпечення для моніторингу пристроїв у wi-fi мережах. *II Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ весна 2025)*. (м. Тернопіль, . м. Тернопіль, С. 92–93.

2. 802.11r-2008 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS) Transition | IEEE Standard | IEEE Xplore. (15.07.2008). DOI:10.1109/IEEESTD.2008.4573292. 2008.

3. Seamless handover in industrial WLAN using IEEE 802.11k | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8001421> (accessed 05/06/2025).

4. Огляд стандарту 802.11ac. URL: <https://ntools.com.ua/uk/information/faq/standart-802-11-ac-cto-eto> (accessed 08/06/2025).

5. BeamForming. *Вікіпедія*. 24.11.2024. URL: <https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=BeamForming&oldid=43984916> (дата звернення: 08.06.2025).

6. IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer specifications Amendment 8: IEEE 802.11 Wireless Network Management. *IEEE Std 802.11v-2011*. 2011. P. 1–433. DOI:10.1109/IEEESTD.2011.5716530.

7. NetSpot WiFi Site Survey Software: WiFi Heat Maps, Network Planning Tool. Free Plan. URL: https://www.netspotapp.com/?utm_source=chatgpt.com (accessed 05/06/2025).

8. WiFi Heatmap & Site Survey Software - AirMagnet® Survey PRO. URL:

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

https://www.netally.com/products/airmagnet-survey-pro/?utm_source=chatgpt.com
(accessed 05/06/2025).

9. TamoGraph Site Survey. *Wikipedia*. 16.06.2024. URL:
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=TamoGraph_Site_Survey&oldid=1229337735 (дата звернення: 07.06.2025).

10. AirMagnet Planner - Network Mapping & Planning Software | Netally.
URL: https://www.netally.com/products/airmagnet-planner/?utm_source=chatgpt.com (accessed 07/06/2025).

11. Nuclias Connect | D-Link. URL: <https://www.dlink.com/en/for-business/nuclias/nuclias-connect> (accessed 08/06/2025).

12. Catalyst Center 2.3.7 Data Sheet - Cisco. URL:
<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/cloud-systems-management/dna-center/nb-06-dna-center-data-sheet-cte-en.html> (accessed 07/06/2025).

13. HPE Aruba Networking Central | HPE. URL:
<https://www.hpe.com/us/en/aruba-central.html> (accessed 07/06/2025).

14. Ubiquiti - Rethinking IT. URL: <https://ui.com/us/en> (accessed 07/06/2025).

15. CAPsMAN - RouterOS - MikroTik Documentation. URL:
<https://help.mikrotik.com/docs/spaces/ROS/pages/7962638/CAPsMAN> (accessed 07/06/2025).

16. Трубочанінова К. А., Жученко О. С., Лисечко В. П. Бездротові телекомунікаційні системи: навчальний посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2022. 86 с.

17. Гапак О. М., Балога С. І. Захист інформації в комп'ютерних системах: підручник. Ужгород : ПП «АУТДОР-ШАРК», 2021. 184 с.

18. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Комп'ютерні мережі Частина 1: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 336 с.

19. Тарнавський Ю. А., Кузьменко І. М. Організація комп'ютерних мереж: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 259 с.

20. Голь В. Д., Ірха М. С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.

21. Bonaventure O. Computer Networking: Principles, Protocols and

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Practice. Saylor, 2022. 278 p.

22. Camisso J. Making Servers Work: A Practical Guide to Linux System Administration. DigitalOcean, 2020. 281 p.

23. The Cisco Learning Network. 2024. URL: <https://learningnetwork.cisco.com>

24. Eksim A. Wireless Communications and Networks - Recent Advances. InTech, 2012. 596 p.

25. Business Smart Switches (L2/L3) – D-Link Systems, Inc. URL: <https://shop.us.dlink.com/collections/smart-manged-switches> (accessed 10/06/2025).

26. Signal Attenuation Caused by Common Obstacles - WLAN Network Planning Guide - Huawei. URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1000113315/a0252a0d/signal-attenuation-caused-by-common-obstacles> (accessed 10/06/2025).

27. Березький О. М., Мельник Г. М., Дубчак Л. О. та ін. Методичні вказівки до випускних кваліфікаційних робіт освітнього рівня “Бакалавр” спеціальності “Комп’ютерна інженерія”. ред. О. М. Березький. Тернопіль : ЗУНУ, 2024. 52 с.

28. Ekahau Sidekick 2 | Wi-Fi Validation & Measurement for 2.4/5/6Ghz Networks. URL: <https://www.ekahau.com/products/ekahau-connect/sidekick-2/> (accessed 08/06/2025).

29. WiFi Analyzer – Додатки в Google Play. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=abdelrahman.wifianalyzerpro&hl=uk&pli=1> (accessed 08/06/2025).

30. Graphical Network Monitoring and Troubleshooting | PingPlotter. URL: <https://www.pingplotter.com/> (accessed 08/06/2025).

31. iPerf - Download iPerf3 and original iPerf pre-compiled binaries. URL: <https://iperf.fr/iperf-download.php> (accessed 08/06/2025).

32. Wi-Fi Man Wizard - Ubiquiti Store Europe. URL: <https://eu.store.ui.com/eu/en/products/wm-w> (accessed 08/06/2025).

					КР.КІ. 10660597.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52