ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким поширенням систем відеоспостереження на основі бездротових Wi-Fi камер. Їх популярність зумовлена легкістю монтажу, гнучкістю у виборі місця розташування та можливістю віддаленого доступу до відео в режимі реального часу. Поширення таких систем у приватних будинках, офісах та на комерційних об'єктах висуває жорсткі вимоги до якості та стабільності передачі відеоданих. Забезпечення надійної трансляції відео високої чіткості через бездротові мережі є складним науково-технічним завданням, що потребує ефективних методів оптимізації.

Існуючі підходи до функціонування систем відеоспостереження часто не враховують динамічну природу бездротових мереж, що призводить до затримок, втрати пакетів та, як наслідок, до погіршення якості відео. Водночас, ключові характеристики відеопотоку безпосередньо залежать від параметрів кодування (бітрейт, роздільна здатність, частота кадрів) та ефективності стандартів стиснення даних. Виникає наукова проблема, яка полягає у необхідності розробки нової методики оптимізації, що дозволяє динамічно адаптувати параметри відеопотоку до поточного стану інтелектуальної бездротової мережі. Це є особливо актуальним для забезпечення стабільної роботи сучасних систем безпеки.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є підвищення ефективності функціонування системи відеоспостереження з Wi-Fi камерами шляхом розробки методики оптимізації, яка базується на аналізі параметрів відеопотоку та стану інтелектуальної бездротової мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних стандартів стиснення відеоданих (H.265/HEVC, AV1, H.266/VVC) та визначити ключові параметри, що впливають на якість відео в бездротових мережах.

2. Дослідити існуючі методики та метрики оцінки якості відео та якості обслуговування (QoS), обґрунтувати їхні переваги та недоліки для застосування в режимі реального часу.
3. Розробити математичну модель відеопотоку, що встановлює зв'язок між параметрами кодування та інтегральними показниками якості в умовах бездротової передачі даних.
4. Розробити структурну схему та алгоритм функціонування методики оптимізації системи відеоспостереження з Wi-Fi камерами.
5. Створити програмний стенд для експериментальної апробації розробленої методики.
6. Провести експериментальні дослідження для підтвердження адекватності та ефективності запропонованої методики.

Об'єкт дослідження - процес передачі та тестування відеопотоку від Wi-Fi камер в інтелектуальних бездротових мережах.

Предмет дослідження - методи та алгоритми оптимізації параметрів системи відеоспостереження на основі аналізу стану бездротової мережі та характеристик відеоданих.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів: методи системного аналізу та теорії телекомунікацій - для аналізу предметної області; методи теорії кодування та стиснення даних - для визначення ключових параметрів відеопотоку; методи математичного моделювання - для формалізації залежностей між параметрами системи та якістю відео; методи експериментального дослідження та статистичної обробки даних - для перевірки адекватності розробленої методики та аналізу отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано методику оптимізації системи відеоспостереження з Wi-Fi камерами, яка, на відміну від існуючих, базується на комплексному

аналізі параметрів відеопотоку та динамічному моніторингу стану бездротової мережі, що дозволяє підвищити стабільність та якість відео.

2. Удосконалено математичну модель для оцінки якості відео, що враховує взаємний вплив параметрів сучасних кодеків (H.265/HEVC, AV1) та характеристик бездротового каналу передачі даних (затримка, втрата пакетів).
3. Дістав подальшого розвитку алгоритм інтелектуального управління якістю відео, що дозволяє в реальному часі адаптувати параметри кодування для досягнення оптимального балансу між якістю зображення та навантаженням на мережу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика може бути використана виробниками систем відеоспостереження, інтернет-провайдерами та системними інтеграторами для автоматизованого моніторингу та оптимізації якості надання послуг. Програмний стенд, створений на основі запропонованої методики, є готовим інструментом для тестування продуктивності систем відеоспостереження, що дозволяє оптимізувати налаштування кодування та підвищити загальну якість обслуговування користувачів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ WI-FI КАМЕР

1.1 Ключові принципи функціонування бездротових систем відеоспостереження та еволюція стандартів Wi-Fi (IEEE 802.11)

Сучасні бездротові системи відеоспостереження, побудовані на основі Wi-Fi-камер, з технічної точки зору є складними програмно-апаратними комплексами, які формально класифікуються як IP-камери з інтегрованими радіомодулями та вбудованими модемами стандарту IEEE 802.11. Принцип роботи таких пристроїв полягає у безперервному захопленні зображення оптичним сенсором, його подальшій цифровій обробці та кодуванні з використанням високоефективних алгоритмів стиснення. Найчастіше застосовуються стандартні кодеки, такі як H.264 (AVC) або новіший H.265 (HEVC), які дозволяють суттєво зменшити розмір відеофайлів без критичної втрати якості, що є необхідною умовою для трансляції через канали з обмеженою шириною смуги. Після етапу компресії сформований цифровий відеопотік інкапсулюється у мережеві пакети та передається через локальну бездротову мережу WLAN до кінцевого приймача, яким може виступати як локальний мережевий відеореєстратор (NVR), так і віддалений хмарний сервіс для зберігання та аналітики даних [3]. Функціонування таких систем нерозривно пов'язане з жорсткими вимогами до пропускної здатності каналу зв'язку, оскільки передача відео високої чіткості (HD, Full HD або 4K) генерує інтенсивний трафік, що потребує стабільних багатобітових швидкостей потоку даних. Ця проблема стає дедалі актуальнішою на тлі глобального зростання обсягів мультимедійної інформації в мережі Інтернеті: згідно зі статистичними даними, до кінця 2023 року на відеотрафік припадало близько 82% від загального обсягу переданих даних, причому сегмент «живого» відео (live streaming), до якого належить і відеоспостереження у реальному часі, складав приблизно 13%. У таких умовах

забезпечення стабільної якості зображення без затримок стає критично важливим завданням. Специфіка відеоспостереження полягає в тому, що навіть незначні затримки в передачі даних, коливання часу доставки пакетів (джиттер) або їх втрата у бездротовому середовищі миттєво призводять до виникнення помітних візуальних артефактів, таких як розсипання зображення на макроблоки, "заморожування" кадру або розсинхронізація звуку та відео, що суттєво знижує якість відтворення та інформативність матеріалу. Отже, професійна бездротова камера має гарантувати не просто наявність з'єднання, а забезпечувати стабільний, безперервний зв'язок із приймачем, що характеризується мінімальними показниками затримок, джиттера і втрат пакетів, незалежно від завантаженості ефіру [2].

Архітектура побудови таких систем відеоспостереження, як правило, базується на інфраструктурному режимі, який передбачає наявність центральних вузлів комутації - точок доступу (Access Points) або бездротових маршрутизаторів Wi-Fi, до яких як клієнтські пристрої підключаються камери. Для організації надійної передачі стисненого відеоконтенту камери використовують набір стандартних мережевих протоколів. На транспортному рівні це найчастіше TCP/IP або UDP, а на прикладному - спеціалізовані протоколи потокової передачі, такі як RTP (Real-time Transport Protocol) для транспортування медіаданих та RTSP (Real Time Streaming Protocol) для керування сесією. Окрім базового транспорту, сучасні системи активно залучають інтелектуальні компоненти управління трафіком. Наприклад, механізми адаптації бітрейту дозволяють камері динамічно змінювати якість відеопотоку залежно від поточного стану каналу зв'язку, а функції пріоритизації відеопотоку (QoS) на маршрутизаторі забезпечують перевагу відеоданих над іншим трафіком, що дозволяє оптимізувати загальну якість обслуговування системи [8]. Конкретні параметри та точні налаштування мережі значною мірою залежать від обраного стандарту Wi-Fi, а також від апаратних можливостей використовуваного обладнання (потужність передавача, чутливість антени, обсяг буфера). Важливо також зазначити, що фізична відсутність кабелів для передачі даних, хоч і спрощує монтаж, суттєво

підвищує вразливість системи до зовнішніх факторів. Зокрема, зростає значення електромагнітних перешкод в ефірі від інших побутових приладів або сусідніх мереж, що може деградувати сигнал. Питання кібербезпеки також стає більш гострим, оскільки перехопити радіосигнал простіше, ніж фізично підключитися до кабелю, тому в сучасних камерах обов'язково використовується надійний криптографічний захист, зокрема протокол WPA3. Окремим вагомим фактором при виборі стандарту та моделі камери є енергоспоживання, оскільки спосіб живлення - чи то через технологію PoE (Power over Ethernet) у випадку гібридних рішень, чи то повністю автономне живлення від акумуляторних батарей - накладає обмеження на потужність передавача та режим роботи пристрою [1].

Історичний розвиток технологій бездротової передачі даних демонструє вражаючу еволюцію стандартів IEEE 802.11, на яких базується Wi-Fi, що пройшли шлях від низьких швидкостей у 2 Мбіт/с у першій версії (оригінальний стандарт 802.11, прийнятий у 1997 році) до сучасних багатогігабітних показників, що дозволяють передавати відео надвисокої чіткості. Перші модифікації, такі як 802.11b (1999 рік, до 11 Мбіт/с) та 802.11a/g (1999/2003 роки, до 54 Мбіт/с), заклали фундамент для масового використання бездротових мереж, хоча їх пропускної здатності часто було недостатньо для якісного відеоспостереження [1]. Наступний технологічний стрибок стався з появою стандарту 802.11n у 2009 році, який впровадив революційну технологію MIMO (Multiple Input Multiple Output), що дозволила використовувати кілька антен для передачі та прийому даних, а також забезпечив підтримку роботи в обох частотних діапазонах (2,4 ГГц та 5 ГГц). Завдяки цьому максимальна теоретична швидкість з'єднання сягнула 600 Мбіт/с. Подальший розвиток призвів до затвердження у 2013 році стандарту 802.11ac, який оптимізував роботу виключно в діапазоні 5 ГГц, використовуючи ширші канали та вдосконалену модуляцію, що забезпечило пропускну здатність до ≈6,93 Гбіт/с. Наступною важливою віхою став стандарт 802.11ax, відомий як Wi-Fi 6 (2019), який знову розширив ефективну підтримку двох діапазонів (2,4/5 ГГц) і, що найважливіше, застосував технології OFDMA для ефективного розподілу частотного ресурсу, MU-MIMO для одночасної роботи з багатьма

клієнтами та модуляцію 1024-QAM, що сумарно дало приріст швидкості до 9,6 Гбіт/с і значно підвищило стабільність у навантажених мережах [10]. Найновішим досягненням є стандарт 802.11be (Wi-Fi 7), офіційно затверджений у 2024 році. Він пропонує революційне збільшення ширини каналу до 320 МГц (що еквівалентно об'єднанню чотирьох каналів по 80 МГц) і вводить надщільну модуляцію 4096-QAM, що дозволяє досягти теоретичних швидкостей передачі даних до неймовірних ~46,1 Гбіт/с, відкриваючи нові горизонти для передачі нестисненого відео 8K та систем віртуальної реальності [7, 9]. Основні технічні характеристики та еволюцію цих стандартів узагальнено та наочно представлено в Табл. 1.1 (Рис. 1.1).

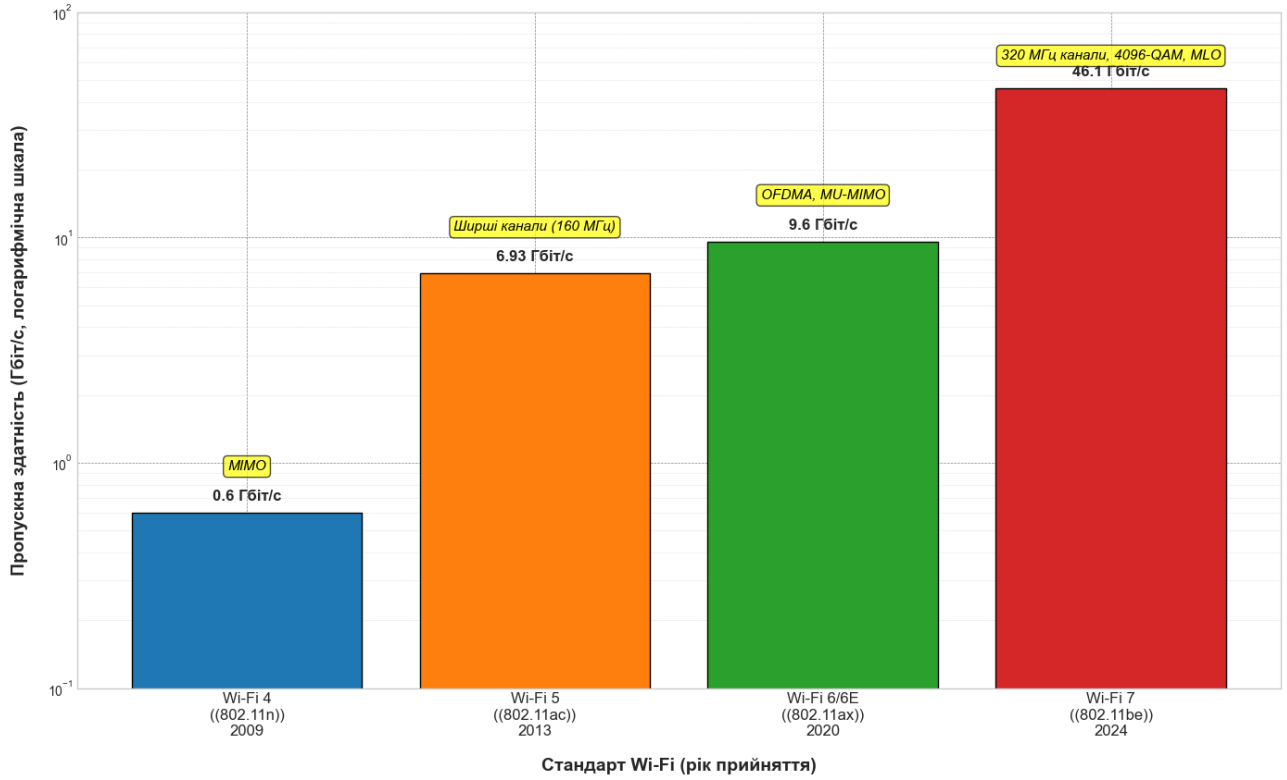


Рис. 1.1 Еволюція максимальної теоретичної пропускної здатності стандартів Wi-Fi

Таблиця 1.1

Основні характеристики стандартів IEEE 802.11

Стандарт	Рік	Частотний діапазон (ГГц)	Максимальна пропускна здатність
IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)	2009	2,4 / 5	600 Мбіт/с
IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)	2013	5	6,93 Гбіт/с
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)	2019	2,4 / 5	9,6 Гбіт/с
IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6E)	2020	2,4 / 5 / 6	9,6 Гбіт/с
IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)	2024*	2,4 / 5 / 6	46,1 Гбіт/с

Ключові вдосконалення, впроваджені у стандарті Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), знаменують собою фундаментальну зміну у підході до передачі даних, переходячи від простого збільшення пікової швидкості до кардинального підвищення ефективності мережі загалом. Однією з найбільш значущих інновацій є технологія ортогонального частотного поділу каналів з множинним доступом (OFDMA), яка дозволяє розділяти один частотний канал на безліч дрібніших ресурсних одиниць (піднесучих частот). Це дає можливість точці доступу спілкуватися з кількома пристроями одночасно в межах одного циклу передачі, що критично важливо для систем відеоспостереження з великою кількістю камер, оскільки усуває черги на передачу малих пакетів даних. Додатково, Wi-Fi 6 суттєво розширив можливості технології MU-MIMO (Multiple User - Multiple Input Multiple Output), забезпечивши її підтримку в обох напрямках - як для завантаження (downlink), так і, що особливо важливо для камер відеоспостереження, для вивантаження даних (uplink). У порівнянні з попереднім поколінням Wi-Fi 5 (802.11ac), нове покоління фактично подвоїло максимальну конфігурацію антенних масивів MIMO, що дозволяє створювати більше

просторових потоків. Окрім цього, стандарт збільшив ширину каналу та запровадив більш щільну квадратурну амплітудну модуляцію 1024-QAM, яка дозволяє кодувати більше бітів інформації в кожному символі сигналу. Сукупність цих технічних рішень забезпечила приблизно п'ятикратне збільшення теоретичної швидкості передачі даних на фізичному рівні. Унаслідок цього в умовах густонаселених бездротових мереж, де ефір перенасичений сигналами від сусідніх точок доступу, Wi-Fi 6 демонструє значно кращу реальну пропускну здатність, стійкість до перешкод та суттєво нижчу затримку, що є визначальним фактором для плавності відеопотоку. Також для оптимізації енергоспоживання було введено інтелектуальну функцію Target Wake Time (TWT), яка дозволяє точці доступу та клієнтським пристроям (камерам) узгоджувати розклад пробудження для обміну даними, що дозволяє радіомодулям довше перебувати в режимі сну і суттєво заощаджує заряд батареї у малопотужних автономних пристроях [1].

Перспективний та революційний стандарт 802.11be, відомий як Wi-Fi 7, піднімає планку продуктивності бездротових мереж на новий, недосяжний раніше рівень, пропонуючи використання надширокоих каналів смугою 320 МГц. Таке розширення смуги пропускання, у поєднанні з впровадженням надзвичайно складної модуляції 4096-QAM, дозволяє досягти безпрецедентної щільності передачі інформації. Однак справжньою "родзинкою" нового стандарту є технологія Multi-Link Operation (MLO), яка дозволяє пристроям здійснювати одночасну роботу відразу в трьох частотних діапазонах: 2,4 ГГц, 5 ГГц та новому 6 ГГц. Це означає, що камера та маршрутизатор можуть передавати пакети даних паралельно по різних частотах або миттєво перемикатися на менш завантажений діапазон без розриву з'єднання. Завдяки таким архітектурним змінам досягається майже п'ятикратний приріст пікової швидкості у порівнянні з попереднім стандартом Wi-Fi 6, що відкриває шлях для передачі нестисненого відео 8K у реальному часі. Численні лабораторні та польові експерименти переконливо показують, що навіть у надзвичайно щільних та зашумлених радіосередовищах обладнання стандарту Wi-Fi 7 досягає приблизно на 40% більшу середню

пропускну здатність і, що найважливіше для систем безпеки, забезпечує вдвічі меншу затримку передачі сигналу, ніж Wi-Fi 6 [5]. Технічні специфікації стандарту IEEE 802.11be передбачають наявність хоча б одного режиму роботи, здатного забезпечити пропускну здатність на рівні MAC-адреси ≥30 Гбіт/с, а також встановлюють нові, більш жорсткі вимоги до покращених показників максимуму допустимих затримок і варіації часу прибуття пакетів (джиттера). Згадана вище мультилінк-операція (MLO) є ключовим механізмом для досягнення цих показників, оскільки вона дозволяє агрегувати пропускну здатність або дублювати пакети для надійності, використовуючи одночасно кілька дискретних каналів (наприклад, об'єднуючи два канали по 160 МГц у єдиний логічний потік). Це суттєво підвищує загальну надійність передачі критично важливих даних та радикально знижує затримку, роблячи бездротовий зв'язок таким же стабільним, як і дротовий. Так, у Wi-Fi 7 саме розширення ширини каналу з традиційних 160 до 320 МГц разом із переходом на модуляцію 4096-QAM дає додаткове ~20% збільшення чистої швидкості передачі даних порівняно з аналогічними конфігураціями попередніх поколінь [4].

Фундаментальною основою функціонування бездротових мереж є використання стандартизованих діапазонів частот, серед яких найбільш поширеними є історично складені незапатентовані смуги 2,4 ГГц і 5 ГГц, а починаючи з 2020 року, до них офіційно додано новий діапазон 6 ГГц, що використовується в стандартах Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7. Відкриття діапазону 6 ГГц стало ковтком свіжого повітря для індустрії, оскільки він значно збільшує кількість доступних каналів, що не перетинаються між собою, і суттєво зменшує рівень взаємної інтерференції від побутових приладів та застарілих мереж, які переповнюють нижні частоти. Поряд із гонитвою за швидкостями, окремим важливим напрямом розвитку є розробка технології IEEE 802.11ah, що отримала маркетингову назву Wi-Fi HaLow і працює в субгігагерцовому діапазоні (нижче 1 ГГц). Ця технологія орієнтована не на рекордні швидкості, а на фізику поширення радіохвиль, яка забезпечує набагато більшу дальність стійкого зв'язку та краще огинання перешкод. Наприклад, нові моделі камер відеоспостереження з

підтримкою Wi-Fi HaLow мають у 10 разів більшу зону покриття та дії порівняно з традиційними камерами, що працюють на стандартах Wi-Fi 6 (у діапазонах 2,4/5 ГГц). Це технологічне досягнення стає можливим завдяки значно кращому проникненню низькочастотного сигналу крізь цегляні стіни, бетонні перекриття та інші фізичні перешкоди, а також завдяки оптимізованим протоколам з надзвичайно низьким енергоспоживанням. Така енергоефективність робить стандарт HaLow особливо вигідним для розгортання повністю бездротових систем безпеки з живленням від автономних батарей або сонячних панелей, які можуть працювати роками без обслуговування [6].

Усі наведені вище технічні та архітектурні вдосконалення мають на меті не лише підвищити швидкість, а й стандартизують складну взаємодію Wi-Fi-камер із мережевою інфраструктурою, що дозволяє гарантувати виконання необхідних вимог щодо якості обслуговування (QoS). Для цього на канальному рівні активно застосовується розширення стандарту IEEE 802.11e, відоме як Wi-Fi Multimedia (WMM), яке відповідає за сувору пріоритезацію трафіку, надаючи відеопотоку та голосовим даним перевагу над звичайним завантаженням файлів чи вебсерфінгом. Сучасні інтелектуальні механізми управління мережею постійно моніторять ефір і динамічно настроюють параметри передачі, такі як бітрейт відеокодека, пріоритет доступу до середовища та вибір найменш зашумлених частотних каналів, відповідно до поточного стану радіосередовища. Головна мета цих адаптивних алгоритмів - оптимізувати споживану пропускну здатність та мінімізувати затримки передачі пакетів, які є критичними для відеоспостереження. В системах, що працюють у реальному часі, навіть незначні втрати пакетів чи високий джиттер (варіація часу доставки) неминуче призводять до візуальних дефектів, таких як розсипання картинки, артефакти або повна втрата кадрів у відеопотоці, що неприпустимо для систем безпеки. Тому інтелектуальні бездротові мережі нового покоління покликані миттєво адаптуватися до будь-яких змін навантаження або появи перешкод для підтримки стабільного, безперервного та якісного стрімінгу за будь-яких умов [3, 10].

1.2 Аналіз сучасних стандартів стиснення відео (H.265/HEVC, AV1, H.266/VVC) та їх вплив на продуктивність бездротових мереж

Сучасні методи цифрової обробки та стиснення відеоінформації зробили гігантський крок уперед, що дозволило значно підвищити ефективність передачі високоякісного зображення з камер відеоспостереження через мережі з обмеженою пропускною здатністю. Ця еволюція є критично важливою, оскільки роздільна здатність сенсорів постійно зростає, генеруючи величезні масиви сирих даних, які неможливо передати без ефективної компресії. Зокрема, революційним етапом стало впровадження стандарту H.265, також відомого як High Efficiency Video Coding (HEVC), який був офіційно прийнятий у 2013 році. Цей стандарт був спеціально спроектований інженерами з амбітною метою - досягти подвоєння ефективності кодування порівняно зі своїм попередником, популярним стандартом H.264/AVC (Advanced Video Coding). На практиці це означає, що за умови збереження ідентичної візуальної якості зображення, новий алгоритм дозволяє зменшити обсяг переданих даних та навантаження на канал зв'язку. Дійсно, численні тести підтверджують, що H.265 забезпечує приблизно вдвічі менший бітрейт за однакової суб'єктивної якості відтвореного зображення, що стало справжнім проривом для індустрії [13]. Аналізуючи практичне застосування технології, оглядова стаття на профільному технічному сайті Worldvision наголошує на тому факті, що використання алгоритмів H.265/HEVC дозволяє зменшити швидкість вихідного цифрового потоку щонайменше на 40% без будь-якої помітної для людського ока втрати якості картинки [20]. Завдяки таким видатним характеристикам, кодек H.265 на сьогодні широко використовується у професійних системах відеоспостереження, а також у комерційних потокових сервісах, оскільки він надає можливість ефективно транскодувати та передавати «важке» 4K-відео, висуваючи при цьому значно менші вимоги до пропускної спроможності мережевої інфраструктури та обсягів сховищ даних [13, 20].

Наступним важливим кроком у розвитку технологій кодування стало представлення у 2018 році відкритого формату відеостиснення AV1 (AOMedia

Video 1), який був розроблений консорціумом Alliance for Open Media (AOMedia) як безкоштовна альтернатива ліцензованим кодекам. Технологія AV1 пропонує ще більш агресивні алгоритми компресії, забезпечуючи подальше зниження бітрейту порівняно як зі старим H.264, так і з новішим HEVC. Ефективність цього формату підтверджується серйозними дослідженнями; зокрема, згідно з корпоративним технічним звітом компанії NVIDIA, при тестуванні відео з роздільною здатністю Full HD (режим 1080p60, що забезпечує високу плавність руху), кодек AV1 забезпечує близько 40% економії бітрейту відносно стандарту H.264 при збереженні порівнянної якості зображення, яка оцінювалася за метрикою пікового відношення сигналу до шуму на рівні 42 дБ PSNR [16]. Експерти галузі безпеки також високо оцінюють перспективи цього формату: корпоративний блог одного з лідерів ринку, компанії Axis Communications, зауважує, що впровадження AV1 дає можливість отримувати якість відео на рівні сучасного стандарту H.265, але при цьому демонструє ще вищу ефективність стиснення, що у кінцевому підсумку призводить до суттєвого зменшення вимог до ширини каналів зв'язку та пропускної здатності мережі, особливо при заміні застарілого обладнання на базі H.264 на нові рішення з підтримкою AV1 [14]. Загалом, якщо підсумувати наявні дані, кодек AV1 завдяки використанню вдосконалених математичних алгоритмів кодування та передбачення руху забезпечує приблизно 30% додаткового зменшення розміру вихідних файлів порівняно навіть з ефективним HEVC (H.265) за умови збереження тієї ж самої візуальної якості контенту [19].

Вершиною сучасної еволюції кодеків на даний момент є найновіший стандарт H.266, також відомий як VVC (Versatile Video Coding), який був остаточно затверджений у 2020 році. Цей стандарт розроблявся з прицілом на майбутнє, зокрема для роботи з відео надвисокого дозволу форматів 4K, 8K та навіть вище, а також для підтримки панорамного відео 360°. Завдяки надзвичайно складним методам розбиття кадру та обробки даних, H.266 дає ще більші виграші в ефективності стиснення: показники покращуються на близько 50% відносно свого безпосереднього попередника HEVC [15]. Профільний електронний ресурс

WinXDVD повідомляє конкретні дані, зазначаючи, що використання кодека H.266 забезпечує до 50% менші розміри кінцевих файлів, ніж аналогічні файли, закодовані за допомогою H.265, при абсолютно аналогічній якості відтворення [19]. Незалежні експерименти, проведені дослідницьким підрозділом BBC R&D, підтвердили надзвичайну ефективність нової технології, показавши, що VVC (H.266) дає у середньому ~78% економії бітрейту порівняно з базовим стандартом H.264, тоді як його конкурент AV1 демонструє результат близько 63% економії [11]. Щоб проілюструвати цю різницю на наочному прикладі, можна зазначити, що 90-хвилинний фільм у якості 4K, закодований кодеком HEVC, може вимагати близько 10 ГБ дискового простору, тоді як той самий матеріал, оброблений алгоритмом H.266, займатиме лише ~5 ГБ [19]. Таким чином, H.266/VVC стає найбільш “щільним” та ефективним кодеком серед усіх існуючих сучасних стандартів, хоча слід зазначити, що платою за таку ефективність є те, що він також є найбільш обчислювально складним, що вимагає потужних процесорів для обробки.

Для наочної демонстрації прогресу в області відеокомпресії нижче наведено аналітичну таблицю порівняння типової необхідної пропускної здатності мережі для передачі потоку Full HD відео (з параметрами 1080p при 60 кадрах на секунду) за умови збереження приблизно однакової візуальної якості. Результати вимірювань показують вражаючу динаміку: наприклад, для досягнення високого показника якості PSNR ≈42 дБ в розширенні Full HD рівні бітрейти, необхідні для передачі, становлять близько 11 Мбіт/с для застарілого кодека H.264. У той же час, перехід на новіші технології дозволяє радикально знизити ці вимоги: до ~5,5 Мбіт/с для стандарту H.265, до ~7 Мбіт/с для формату AV1 (який займає проміжну позицію, але є безкоштовним) та до рекордних ~3 Мбіт/с для найновішого стандарту H.266 [16, 15, 18]. Ця статистика яскраво демонструє, як впровадження сучасних високоефективних кодеків дозволяє значно знижувати навантаження на інфраструктуру та зменшує вимоги до мережевої пропускної здатності, роблячи системи відеоспостереження більш доступними та

масштабованими (див. узагальнені дані в Табл. 1.2 та графічну ілюстрацію на Рис. 1.2).

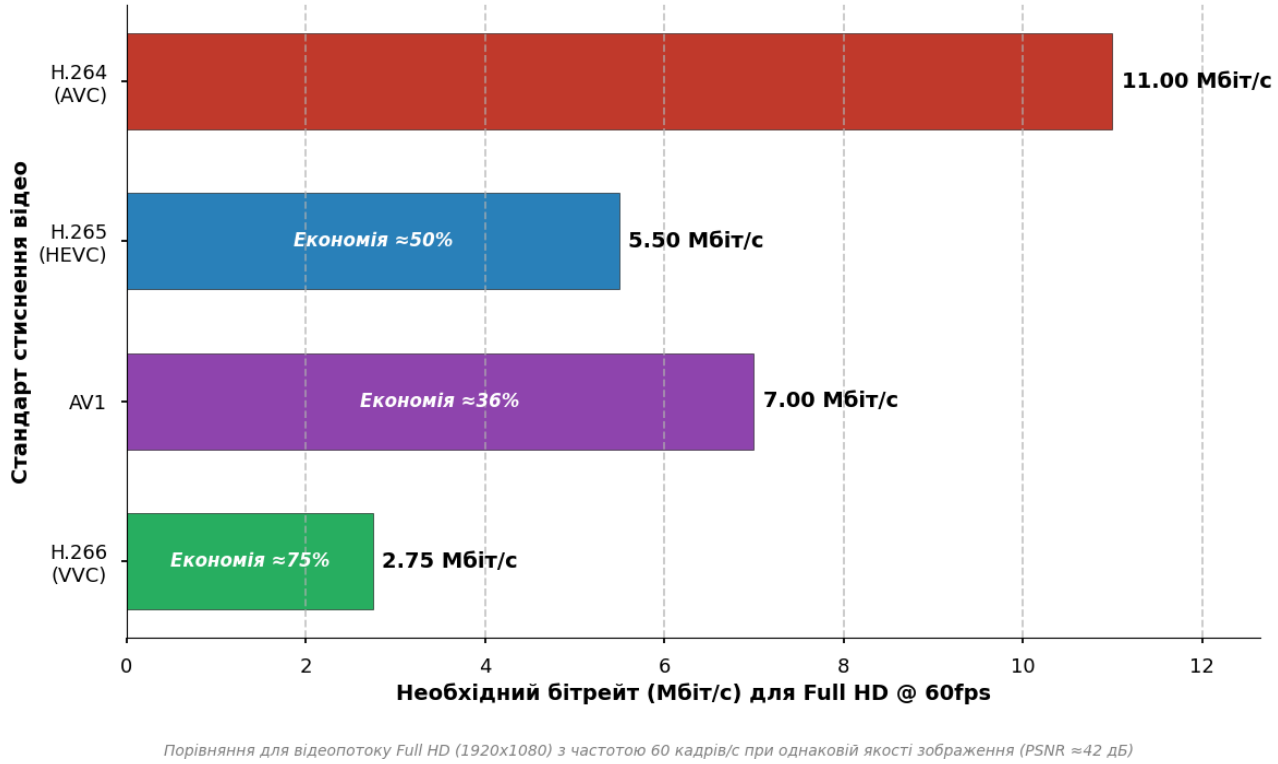


Рис. 1.2 Порівняння необхідного бітрейту для різних відеокодеків

Таблиця 1.2

Порівняння приблизних бітрейтів (Full HD, 60 fps, ~42 дБ PSNR) для різних кодеків

Кодек	Бітрейт (Мбіт/с)
H.264	≈ 11 [16]
H.265	≈ 5,5 [13]
AV1	≈ 7 [16]
H.266	≈ 2,75 [15]

Ефективність алгоритмів кодування відеоданих має безпосередній та вирішальний вплив на реальні експлуатаційні можливості та архітектуру

побудови бездротової мережі відеоспостереження. Незважаючи на те, що сучасні стандарти бездротового зв'язку Wi-Fi демонструють вражаючий прогрес і пропонують користувачам теоретичні швидкості передачі даних у гігабітному діапазоні - наприклад, близько 3,5 Гбіт/с для стандарту 802.11ac (Wi-Fi 5) і рекордні до 9,6 Гбіт/с для новітнього 802.11ax (Wi-Fi 6) [17] - ці цифри часто залишаються недосяжними в реальних умовах експлуатації через інтерференцію, фізичні перешкоди та накладні витрати протоколів. Тому, навіть за наявності потужного мережевого обладнання, без застосування високоефективних методів кодування доступні радіоканали надзвичайно швидко заповнюються об'ємними відеопотоками, що призводить до насичення смуги пропускання та деградації сервісу. Ситуація ускладнюється тим, що відеоспостереження генерує постійний, а не пульсуючий трафік, який вимагає гарантованої доставки кожного кадру. Наприклад, розглянемо сценарій використання застарілого, але все ще поширеного кодека H.264: один канал передачі даних із стандартною HD-камерою (роздільна здатність 1080p при 30 кадрах на секунду) створює потік, що генерує приблизно 2,5 МБ/с трафіку, що еквівалентно бітрейту ~20 Мбіт/с [18]. Якщо масштабувати цю систему до рівня середнього підприємства і встановити 100 таких камер, сумарний потік даних сягне колосальних значень - близько ~2 Гбіт/с необхідної пропускної здатності (що дорівнює ≈250 МБ/с) [18]. Таке навантаження є практично граничним або навіть непосильним для абсолютної більшості конфігурацій базового Wi-Fi-каналу, навіть якщо використовувати сучасні точки доступу, оскільки реальна ефективна швидкість завжди нижча за канальну, а конкуренція за ефірний час між сотнею пристроїв призведе до колізій та затримок.

Кардинальним вирішенням проблеми перевантаження мережі є перехід на нові технології компресії. Застосування сучасних кодеків дозволяє суттєво, в рази, а іноді й на порядок зменшити це навантаження на інфраструктуру, звільняючи ресурси для інших задач. Як переконливо показав практичний досвід та тестування обладнання, спеціалізований апаратний стример, що використовує прогресивний кодек AV1, здатний ефективно обробляти та передавати одночасно

32 потоки відео якості 1080p30, споживаючи при цьому всього лише ≈2 МБ/с сумарного трафіку (що становить мізерні ≈16 Мбіт/с) [18]. Це демонструє колосальну різницю в ефективності порівняно з H.264. Аналогічні результати досягаються і при використанні інших передових стандартів: за однакових мережевих умов із використанням кодеків H.265 (HEVC) або новітнього H.266 (VVC) ті ж самі 32 потоки можна передавати через бездротову мережу майже без заторів, втрат пакетів чи буферизації. Більше того, така економія смуги пропускання відкриває принципово нові можливості для підвищення якості зображення: передача відео надвисокої чіткості 4K, яка вважалася технічно складною або неможливою («застарілою» за вимогами) для кодека H.264 через його "ненажерливість", стає абсолютно реальною та буденною задачею для сучасних бездротових мереж, оснащених камерами з підтримкою нових алгоритмів стиснення [18].

Окрім чистої пропускної здатності, у контексті проєктування та експлуатації надійних бездротових мереж також критично важливою характеристикою є стійкість системи до мережевих аномалій, таких як варіації затримок (джиттер) і неминучі в радіоефірі втрати пакетів. Спеціалізовані дослідження в цій області показують, що оптимізоване управління параметрами стиснення та використання інтелектуальних алгоритмів кодування може суттєво покращити візуальну якість відновленого відео навіть за умов наявності помітної пакетної втрати, яка зазвичай руйнує зображення. Зокрема, експериментальні дані свідчать про те, що при рівні втрати пакетів близько ≈1% (що є типовим для завантажених Wi-Fi мереж), використання стандартів H.265 та H.266 дозволяє зберегти високу якість картинки: зростання пікового відношення сигналу до шуму (PSNR) може складати близько +12-13 дБ порівняно з ситуацією, коли використовується некоректно підібране або застаріле кодування [12]. Такий приріст у децибелах є величезним і означає різницю між чітким, розбірливим зображенням і розсипаним на артефакти відеорядом. Це є прямим свідченням того, що високоефективні кодеки не просто стискають дані сильніше, але й дозволяють підтримувати стабільний та якісний відеопотік навіть у «шумному»,

нестабільному Wi-Fi середовищі з високим рівнем інтерференції. Таким чином, перехід на сучасні кодеки (такі як AV1, H.266 тощо) забезпечує подвійний позитивний ефект: вони радикально знижують навантаження на пропускну здатність мережі, дозволяючи підключати більше камер, і одночасно роблять відеопотік значно більш стійким до затримок, розривів та втрат даних, що є критично необхідною умовою для функціонування сучасних інтелектуальних бездротових систем відеоспостереження, де від якості зображення залежить робота алгоритмів аналітики та безпека об'єкта [14, 12].

1.3 Класифікація та характеристика існуючих методів оцінки якості відео в режимі реального часу

Оцінка якості відеоконтенту в сучасних телекомунікаційних системах є складним, багатогранним процесом, який концептуально може здійснюватись за допомогою двох принципово відмінних підходів: суб'єктивного, що орієнтується на сприйняття людини, та об'єктивного, що базується на математичних розрахунках [21, 29]. Суб'єктивні методи вважаються найбільш точними, оскільки вони безпосередньо базуються на думках, враженнях та фізіологічних особливостях зору групи глядачів-експертів або звичайних користувачів, що призначають оцінки якості зображення за заздалегідь усталеними шкалами. Проведення таких тестувань суворо регламентується міжнародними стандартами, а тести виконуються за спеціальними затвердженими методиками (наприклад, рекомендація ITU-T P.910, розроблена спеціально для мультимедійних та потокових застосунків) [22, 30], а їх узагальнені результати зазвичай кодуються через універсальну метрику MOS (Mean Opinion Score), яка є середньоарифметичним значенням усіх отриманих оцінок. Хоча саме суб'єктивні дослідження в науковому середовищі справедливо визнаються «золотим стандартом» якості, оскільки кінцевим споживачем відео є людина, їх практичне проведення є надзвичайно дорогим, часозатратним і потребує суворо контрольованих лабораторних умов для виключення зовнішніх впливів. У

противагу їм, об'єктивні методи побудовані на використанні автоматичних програмних алгоритмів і класифікують підходи залежно від наявності доступу до вихідного, неспотвореного відеосигналу. Вони діляться на три основні класи: методи з наявністю повного еталонного (оригінального) відео, методи зі зведеним еталоном та безеталонні методи [21, 23]. У класі повноеталонних (FR - Full Reference) методів алгоритм аналізує повний, попіксельний збіг кадрів з тестовим відео та оригінальним еталонним файлом, виявляючи найменші відхилення. У зведено-еталонних (RR - Reduced Reference) підходах для аналізу використовується лише деяка частина витягнутої інформації або характеристичних ознак з еталонного потоку, що передається паралельним каналом. Нарешті, безеталонні (NR - No Reference) методи, які також називають "сліпими", є найбільш технологічно складними, оскільки не потребують еталону взагалі та аналізують лише кінцевий результат [21, 23, 29]. Враховуючи специфічний контекст систем реального часу, таких як відеоспостереження або пряма трансляція, де на приймальній стороні фізично відсутній оригінал для порівняння, особливу увагу розробників та інженерів сьогодні привертають саме NR-методи.

У широкій категорії повноеталонних метрик історично першою та найпростішою з точки зору обчислень є метрика пікового відношення сигналу до шуму, відома як ПНШК (або міжнародна абревіатура PSNR), яка математично обчислюється як логарифмічне відношення максимуму можливої енергетичної потужності сигналу до середнього квадратичного відхилення помилки (MSE) між пікселями оригіналу та спотвореного зображення. Однак, незважаючи на простоту, PSNR часто критикують за те, що вона погано корелює з реальним людським сприйняттям візуальних спотворень, оскільки око реагує не просто на зміну яскравості пікселя, а на складніші патерни [24]. Для вирішення цієї проблеми та для більш адекватного моделювання особливостей людської зорової системи (HVS) було розроблено структурний коефіцієнт схожості (SSIM) та його вдосконалені багаторозмірні варіанти, такі як MS-SSIM, що працюють на різних масштабах зображення [23, 24]. Ці прогресивні метрики не просто порівнюють

точки, а комплексно аналізують збереження структури об'єктів, яскравості та контрасту локальних фрагментів кадрів, завдяки чому показують значно вищу кореляцію з суб'єктивними оцінками MOS у порівнянні з застарілим PSNR. Окрім них, існують інші складні FR-метрики (наприклад, VIF, що базується на теорії інформації, або ST-RRED, що аналізує ентропію), які додатково враховують статистичні властивості кадрів і часову динаміку руху. Безумовним лідером та найпоширенішою сучасною FR-метрикою стала VMAF (Video Multimethod Assessment Fusion), розроблена компанією Netflix. Вона являє собою складний ансамбль різнорідних «атомів» якості (елементарних метрик), результати яких об'єднуються за допомогою машинного навчання (метод опорних векторів), що забезпечує надзвичайно високу кореляцію з MOS на рівні близько 0,89 [25]. Проте суттєвим недоліком VMAF є те, що вона має дуже високу обчислювальну складність, яка часто близька до ресурсоємності самих алгоритмів кодування відео, що суттєво обмежує її застосування для моніторингу в реальному часі на слабких пристроях. Як відповідь на цей виклик з'являються оптимізовані рішення, наприклад, метрика FUNQUE, яка спрощує архітектуру VMAF: у дослідженнях показано, що FUNQUE не лише зберігає точність, а й покращує кореляцію з суб'єктивними оцінками на ≈10% при одночасному радикальному зменшенні обчислювальних витрат у 8 разів [26]. В результаті можна констатувати, що класичні FR-метрики, хоч і дають високу точність вимірювань, потребують наявності еталонного відео (що неможливо при стрімінгу) і часто є занадто повільними, тож в задачах реального часу інженери все частіше віддають перевагу їх апроксимаціям або новим методам [21, 23].

Безеталонні методи оцінки якості (NR-VQA) представляють собою окремий клас алгоритмів, які здатні оцінювати якість відеопотоку, аналізуючи лише спотворене відео, без жодного доступу до вихідного матеріалу, що робить їх ідеальними для моніторингу мереж передачі даних [23]. Класичні NR-метрики, розроблені в минулі десятиліття, зазвичай базуються на статистичному моделюванні природних сцен (NSS - Natural Scene Statistics). До таких належать популярні алгоритми NIQE та BRISQUE, які шукають відхилення в

статистичному розподілі яскравості пікселів, але вони мають суттєві обмеження: часто ігнорують часові характеристики відео (рух між кадрами) і швидко втрачають точність при наявності складних, різноманітних комбінацій спотворень, характерних для сучасних мереж [22, 24]. Нині вектор розвитку змістився в бік розробки методів на основі штучного інтелекту та глибокого машинного навчання. Серед перспективних розробок виділяється VQM4HAS, який спроектований для роботи у реальному часі. Цей метод витягує прості, легко обчислювані ознаки з відеопотоку (такі як геометрична складність кадру, параметри бітстріму кодека, швидкі попередні показники PSNR/SSIM) і використовує навчений регресор, щоб з високою точністю передбачати значення, які видала б «важка» метрика VMAF [27]. Цей гібридний метод досягає дуже високих показників кореляції (Коефіцієнт кореляції Пірсона PCC ≈0,95-0,96) з еталонною метрикою VMAF при різних роздільних здатностях відео, але при цьому вимагає набагато меншої обчислювальної складності, що дозволяє запускати його на клієнтських пристроях [27]. Інші сучасні NR-моделі на базі нейромереж, такі як FasterVQA, також забезпечують високу стабільну узгодженість з людськими оцінками MOS (PCC

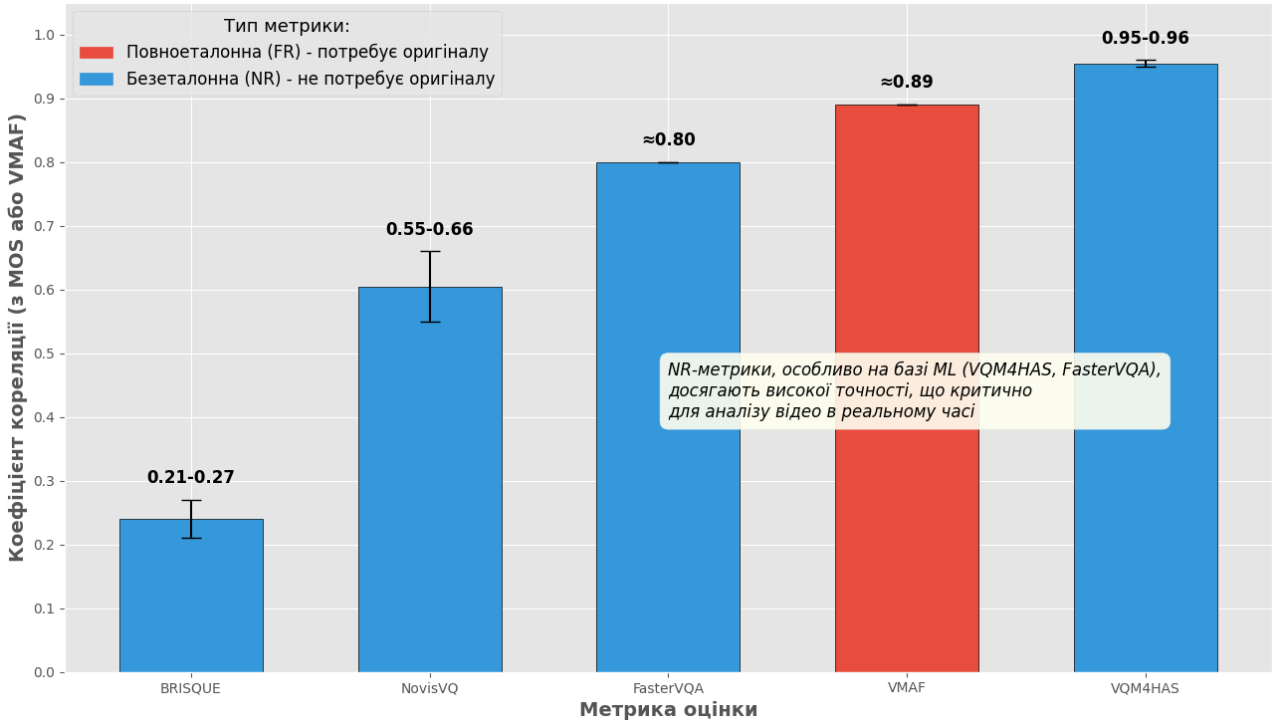


Рис. 1.3 Порівняльна точність сучасних метрик оцінки якості відео

Таблиця 1.3

Порівняння характеристик обраних метрик оцінки якості відео

Метрика	Тип оцінювання (FR/NR)	Кореляція (з MOS або VMAF)
VMAF	FR	≈0.89 [25]
VQM4HAS	NR	0.95-0.96 [27]
FasterVQA	NR	≈0.80 [25]
NovisVQ	NR	0.55-0.66 [28]
BRISQUE	NR	0.21-0.27 [28]

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ МЕТОДИКИ ОПТИМІЗАЦІЇ

2.1 Математична модель відеопотоку на основі параметрів кодування та характеристик бездротового каналу

Побудова комплексної математичної моделі відеопотоку у сучасних телекомунікаційних системах є складним інженерним завданням, яке базується на глибокому аналізі взаємозв'язку між внутрішніми параметрами процесу кодування вихідного сигналу та зовнішніми фізичними характеристиками каналу передачі даних. Фундаментальними змінними, що визначають структуру та обсяг генерованого трафіку, виступають ключові параметри кодування: просторова роздільна здатність відео (кількість пікселів по горизонталі та вертикалі), часова роздільна здатність, виражена у частоті кадрів (fps), та ступінь компресії, що регулюється параметром квантування (QP) або цільовим бітрейтом. Саме сукупність цих налаштувань формує усереднений бітрейт відеопотоку - величину, яка є критично важливою і детально розглядається в усіх сучасних наукових дослідженнях, присвячених оптимізації потокового відео [1]. Для наочного розуміння масштабів трафіку варто розглянути конкретні формати: наприклад, для трансляції відео надвисокої чіткості стандарту UHD (4K) з параметрами 3840×2160 пікселів та частотою 30 fps експерти зазвичай рекомендують забезпечити стабільну пропускну здатність каналу на рівні ~15-18 Мбіт/с, тоді як для стандарту Full HD (1920×1080, 30 fps) вимоги значно скромніші й складають ~5-10 Мбіт/с [3]. При цьому величезне значення має обраний алгоритм стиснення: сучасний високоефективний кодек H.265/HEVC завдяки вдосконаленим математичним методам передбачення руху та блокового поділу забезпечує близько 50% зменшення вихідного бітрейту при збереженні ідентичної візуальної якості порівняно з попереднім поколінням H.264 [2]. У загальному випадку бітрейт розраховують як величину, пропорційну добутку розміру кадру (ширина×висота), частоти кадрів (FPS) та середньої глибини кодування кольору

на піксель. Така залежність є майже лінійною: так, для кадру формату HD 720p (1280×720) при 30 fps та використанні кодека H.264 типові значення бітрейту складають кілька мегабіт на секунду, а просте збільшення роздільної здатності вдвічі (перехід до 1920×1080) майже автоматично призводить до відповідного подвоєння необхідного бітрейту. Незважаючи на технічну перевагу нових форматів, стандарт H.264/AVC і досі залишається найпоширенішим та домінуючим методом відеокодування в існуючих системах відеоспостереження та CCTV, що пояснюється його широкою апаратною сумісністю, низькою обчислювальною складністю та перевіреною роками стабільністю [5], тоді як більш прогресивний HEVC лише поступово набирає популярність як більш ефективний формат для нових інсталяцій, що підтверджується актуальними глобальними звітами про розподіл мережевого трафіку [10]. Для детальної ілюстрації ці приклади параметрів відеопотоків, їх залежностей та розрахункових бітрейтів систематизовані та наведені в табл. 2.1.

З іншого боку рівняння знаходяться фізичні характеристики бездротового каналу зв'язку, які суттєво впливають на адекватність та точність побудованої моделі. Реальна пропускна здатність радіоканалу є змінною величиною, що залежить від доступної смуги пропускання частот, рівня електромагнітного шуму, інтерференції та загальних умов середовища поширення хвиль. У класичній теоретичній моделі гранична ємність каналу описується відомою формулою Шеннона-Гартлі: $C = B \log_2(1+SNR)$, де C - пропускна здатність, B - ширина смуги, а SNR - відношення сигналу до шуму. Проте на практиці реальна корисна швидкість передачі даних може бути (і часто є) значно меншою за теоретичну межу через накладні витрати протоколів, колізії пакетів та втрати при передачі. Проведені практичні польові тести показали цікаві результати: навіть відносно новий спеціалізований стандарт 802.11ah, що працює в субгігагерцовому діапазоні (900 МГц), дозволяє передавати відеопотік на відстані в десятки кілометрів, але при цьому забезпечує пропускну здатність лише на рівні ~2 Мбіт/с [15]. Цей факт яскраво підкреслює необхідність врахування широкого розмаїття умов функціонування каналу (несуча частота, тип модуляції, поточний SNR) при

побудові моделі, що стає особливо актуальним у контексті стрімкого розвитку та масштабування ринку Інтернету речей (IoT) [15]. У результаті впливу всіх цих факторів фактичний бітрейт, доступний додатку на рівні управління доступом до середовища (MAC), може значно та непередбачувано флуктуювати, суттєво відхиляючись від заявленого теоретичного рівня фізичного з'єднання.

Враховуючи високу невизначеність параметрів середовища, сучасна математична модель відеопотоку зазвичай описується не детерміновано, а стохастично. Наприклад, складний процес трансляції адаптивного масштабованого відео часто моделюють як марковський процес прийняття рішень (MDP), у якому стан системи в кожен момент часу описується вектором, що включає поточні параметри кодування (розмір групи зображень GOP, параметр квантування QP) та поточний стан каналу зв'язку (рівень SNR, миттєва доступна пропускна здатність). Така імовірнісна модель дозволяє з певною точністю прогнозувати подальший стан системи та використовувати методи оптимізації для прийняття керуючих рішень. Одним з найбільш перспективних напрямків є використання алгоритмів глибокого навчання з підкріпленням (DRL - Deep Reinforcement Learning) для інтелектуального управління бітрейтом і наповненням буфера відтворення [35]. Застосування підходу DRL передбачає формальний математичний опис простору можливих станів системи та простору доступних дій (наприклад, зміна якості кодування) при реалізації механізмів адаптивного кодування [20]. У рамках такої моделі кожен окремий відеокадр формалізується як дискретний пакет даних із заданою інтенсивністю надходження (вимірюється в байт/с), який має бути переданий через канал із випадковою, змінною у часі пропускною здатністю. Виникає класична задача теорії масового обслуговування: якщо миттєва пропускна здатність мережі стає нижчою за поточний бітрейт, вироблений кодером, у буфері передавача неминуче накопичується черга, що призводить до зростання затримки (latency), а при переповненні буфера - до незворотної втрати кадрів [22]. Тому в коректній математичній моделі обов'язково враховують динамічне співвідношення між швидкістю генерації кадрів джерелом та швидкістю їх обслуговування каналом зв'язку.

Для фінального узагальнення та наочного порівняння впливу розглянутих параметрів кодування і характеристик каналу на підсумковий бітрейт корисно навести конкретні числові приклади. У табл. 2.1 систематизовані та наведені орієнтовні розрахункові бітрейти для найбільш поширених стандартних роздільних здатностей та значень фреймрейту при використанні двох поколінь кодеків: класичного H.264 і сучасного H.265. Аналіз цих даних чітко демонструє технологічний прогрес: показники бітрейту для H.265 виявляються приблизно удвічі меншими порівняно з H.264 за аналогічних умов, що є вирішальним фактором для проєктування бездротових мереж (див. графічну інтерпретацію на Рис. 2.1).

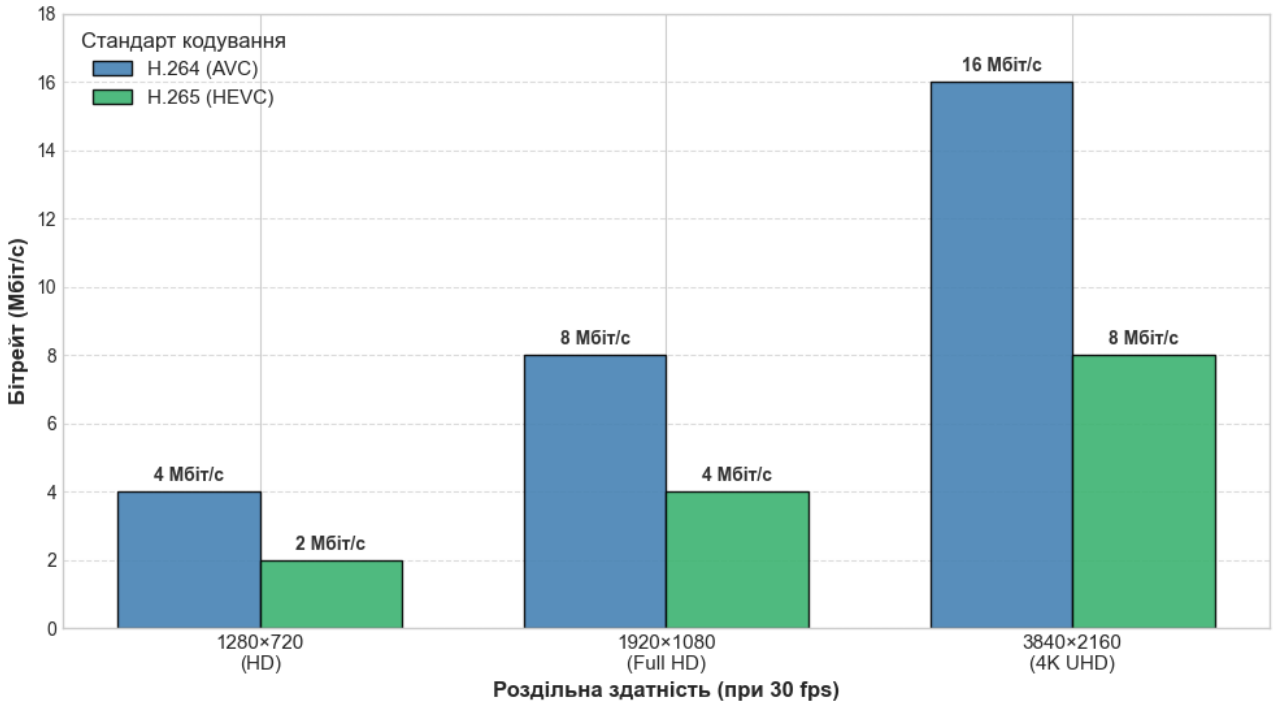


Рис. 2.1 Порівняльна діаграма необхідного бітрейту для кодеків H.264 та H.265 при різних роздільних здатностях

Зростання роздільної здатності та FPS прямо пропорційно збільшує необхідну пропускну здатність, що показано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні параметри відеопотоків та необхідні бітрейти

Роздільна здатність	Частота кадрів	Бітрейт H.264	Бітрейт H.265
1280×720	30 fps	≈4 Мбіт/с	≈2 Мбіт/с
1920×1080	30 fps	≈8 Мбіт/с	≈4 Мбіт/с
3840×2160	30 fps	≈16 Мбіт/с	≈8 Мбіт/с

2.2 Обґрунтування вибору комплексу метрик для оцінки якості обслуговування (QoS) в інтелектуальних бездротових мережах

Основні метрики оцінки якості обслуговування (QoS – Quality of Service) у сучасних бездротових мережах являють собою комплексний набір технічних параметрів, що дозволяють кількісно визначити ефективність передачі даних та стабільність з'єднання. Цей набір охоплює такі критично важливі показники, як пропускна здатність каналу (bandwidth або throughput), часова затримка передачі інформації (latency), варіація часу прибуття пакетів, відома як джитер (jitter), та частка втрат пакетів (packet loss ratio). Згідно з даними, наведеними у численних сучасних джерелах та технічних стандартах, саме ці параметри бітової швидкості (або бітової пропускної здатності), абсолютної затримки, джитера та швидкості успішної передачі пакетів є фундаментальними ключами для забезпечення гарантованої якості обслуговування користувачів [21, 29]. Варто зазначити, що для специфічних завдань, таких як оцінка відеопотоку, інженери та дослідники також часто використовують суб’єктивні індикатори якості, найбільш відомим з яких є усереднена оцінка думки (Mean Opinion Score - MOS) [22]. Однак, незважаючи на корисність MOS для оцінки сприйняття кінцевим користувачем, саме сукупність метрик QoS є об’єктивною, вимірюваною та інструментальною базою, яка дозволяє налаштовувати мережеве обладнання. Вибір саме цих чотирьох показників є глибоко обґрунтованим, оскільки кожен з них відображає різні, але взаємопов'язані аспекти роботи мережевої інфраструктури: пропускна

здатність характеризує максимальний обсяг даних, який фізично може бути передано через канал за одиницю часу; затримка визначає, наскільки швидко окремі пакети доставляються від відправника до отримувача; а джитер показує стабільність потоку та нерівномірність надходження даних. У результаті такий складний комплекс метрик дозволяє всебічно, а не фрагментарно, оцінити реальну продуктивність мережі та її відповідність суворим вимогам сучасної відеотрансмісії (узагальнені дані наведено в Табл. 2.2).

Пропускна здатність бездротової мережі, яка традиційно вимірюється в мегабітах на секунду (Мбіт/с) або гігабітах на секунду (Гбіт/с), має визначальне та критичне значення для забезпечення функціонування систем потокового відео високої та надвисокої роздільної здатності. Еволюція технологій призвела до того, що сучасні стандарти Wi-Fi (наприклад, IEEE 802.11ac, 802.11ax та найновіший 802.11be) теоретично та практично забезпечують сотні мегабіт і навіть кілька гігабіт на секунду реальної пропускної здатності, що відкриває нові горизонти для мультимедійних застосунків [20]. Проте реальна картина часто відрізняється від теоретичних максимумів через інтерференцію та завантаженість ефіру. В одному з показових досліджень алгоритм передачі даних було оптимізовано таким чином, що фактична пропускна здатність досягала стабільного рівня 123 Мбіт/с, однак це відбувалося ціною допущення втрати пакетів на рівні 5%, що демонструє класичний компроміс між швидкістю та надійністю. У загальному випадку інженерне правило говорить про те, що достатня пропускна здатність повинна з запасом покривати бітову швидкість відеопотоку, що генерується камерою; для прикладу, стандартне відео якості Full HD зазвичай може вимагати від 5 до 10 Мбіт/с стабільного каналу, тоді як формат 4K вже потребує смуги в межах 20-50 Мбіт/с для уникнення артефактів компресії [15]. Отже, забезпечення гарантованої мінімально необхідної пропускної здатності є не просто бажаним, а ключовим аспектом для підтримки належного рівня QoS у будь-якій бездротовій мережі відеоспостереження.

Затримка (latency) є ще однією критичною характеристикою, яка визначає повний час проходження мережевого пакету від джерела (камери) до кінцевого

приймача (сервера або монітора оператора). Для інтерактивних застосунків або систем реального часу, таких як відеоконференції, дистанційне керування дронами чи IP-відеоспостереження, життєво важливо, щоб повна енд-ту-енд (end-to-end) затримка була мінімальною, зазвичай порядку десятків або, у крайньому випадку, перших сотень мілісекунд. Проте не менш, а іноді й більш руйнівним фактором є нерівномірність цієї затримки, відома як джитер. Джитер є критичним параметром для забезпечення плавності відтворення відеоряду: різка та непередбачувана зміна часу доставки пакетів призводить до того, що буфер приймача не встигає адаптуватися, що викликає ефект «кадрування», завмирання картинки або повних розривів відеопотоку. Як слушно зазначено в профільному дослідженні, при проєктуванні систем безпеки саме граничні (worst-case), а не середні показники затримки і джитера повинні розглядатися як ключові метрики для оцінки придатності мережі для застосунків реального часу [29]. Іншими словами, для досягнення високої QoS необхідно не лише працювати над зниженням середньої затримки, а й вжити заходів, щоб утримати джитер у дуже низьких та прогнозованих межах (зазвичай рекомендується значення <30 мс) [6], що гарантує стабільність декодування відеопотоку та відсутність неприємних візуальних артефактів для спостерігача.

Не менш важливою, а в контексті цілісності даних - вирішальною, є метрика втрат пакетів (Packet Loss Ratio - PLR) [1]. Втрата навіть невеликої кількості кадрів або ключових пакетів у стисненому відеопотоці неминуче призводить до непоправного зниження якості зображення, появи «бітих» пікселів, сірих зон на екрані чи гальмування трансляції до моменту надходження наступного ключового кадру (I-frame). Тому в залежності від типу застосунку накладаються суворі обмеження на допустимий відсоток втрат. Наприклад, для отримання чіткого, професійного відео високою якістю вважається рівень втрат, що не перевищує поріг <0,5-1%. У численних наукових роботах з аналізу QoS підкреслюється, що застосунки реального часу є надзвичайно чутливими до цього параметру і потребують мінімальних втрат; зокрема, для стабільного потокового відео рекомендований показник PLR має становити лише кілька відсотків чи, в ідеалі,

значно менше [5]. Для ілюстрації реальних умов експлуатації можна навести приклад, де при тестуванні спеціалізованого алгоритму гарантованого зв’язку були досягнуті втрати на рівні 5% при високій пропускній здатності ~123 Мбіт/с, що ілюструє реальні фізичні обмеження бездротового середовища передачі, де часто доводиться балансувати між швидкістю та цілісністю даних.

У сучасних передових, так званих “інтелектуальних” бездротових мережах, що використовують адаптивні алгоритми управління трафіком та машинне навчання, моніторинг не обмежується лише високорівневими параметрами, а спускається на фізичний рівень, де додатково аналізуються параметри радіочастотного каналу. Зокрема, такі суто фізичні метрики, як потужність прийнятого опорного сигналу (RSRP - Reference Signal Received Power), якість прийому опорного сигналу (RSRQ - Reference Signal Received Quality) та відношення сигнал/шум (SNR - Signal-to-Noise Ratio), служать фундаментом для оцінювання поточної якості каналу на локальному апаратному рівні [25]. Ці низькорівневі показники є "очима" системи, які дозволяють інтелектуальному алгоритму прогнозувати зміни умов середовища ще до того, як вони вплинуть на відео (наприклад, передбачити деградацію сигналу через мобільність клієнта чи раптову інтерференцію від мікрохвильової печі) і заздалегідь коригувати виділені ресурси, змінювати схему модуляції або перемикати канал. В цілому стратегія вибору комплексу метрик базується на грамотному комбінуванні мережевих QoS-показників (пропускна здатність, затримка, джитер, втрати) з фізичними показниками стану радіоканалу, що у сумі гарантує глибоку, всесторонню оцінку та дозволяє реалізувати ефективне проактивне управління якістю обслуговування в інтелектуальній бездротовій мережі (схематично зображено на Рис. 2.2).

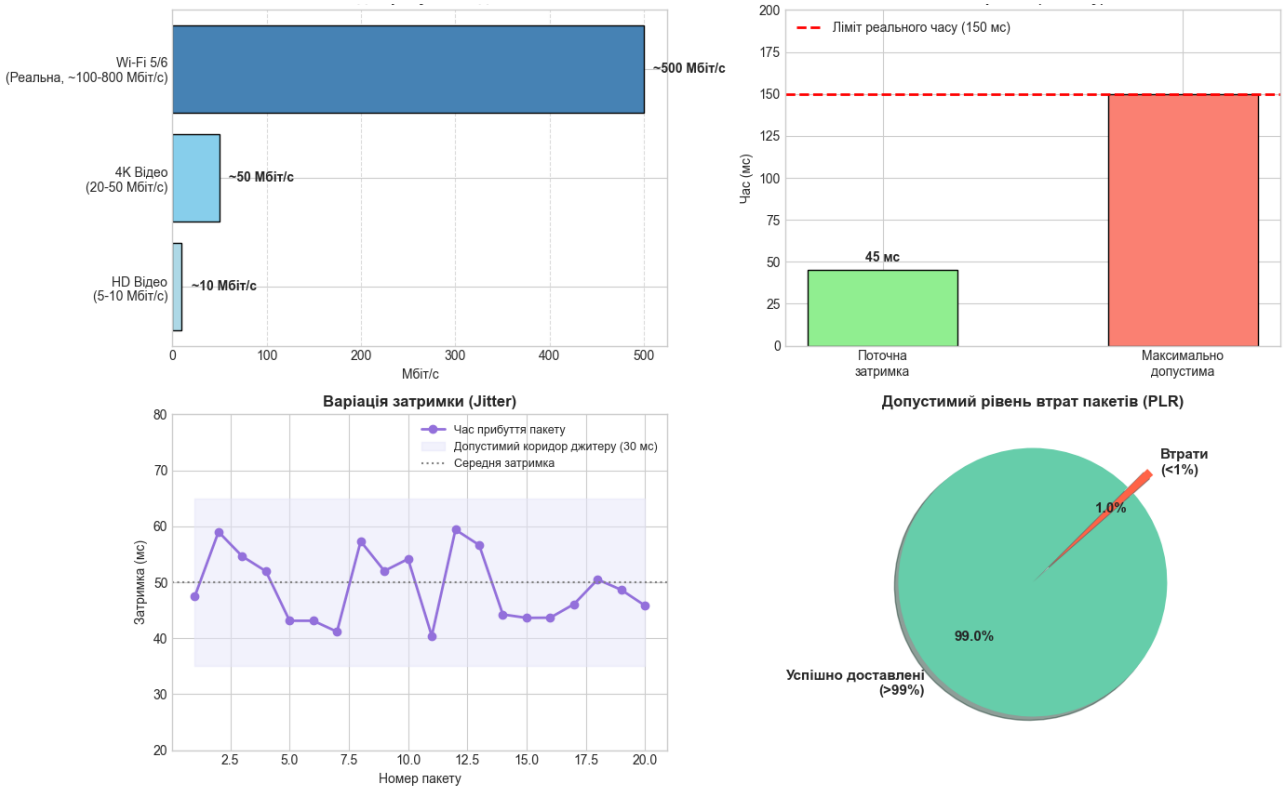


Рис. 2.2 Комплексна візуалізація ключових метрик QoS (пропускна здатність, затримка, джитер, втрати) та їхніх цільових меж

Основні згадані метрики підсумовано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Основні QoS-метрики бездротової мережі

Метрика	Одиниця	Типові (цільові) значення
Пропускна здатність	Мбіт/с	100-1000 (HD/4K відео)
Затримка	мс	< 150 (для реального відео)
Варіація затримки (джитер)	мс	< 30 (плавна трансляція)
Втрата пакетів	%	< 1 (висока якість відео)

2.3 Дослідження залежності якості відео від затримок, втрат пакетів та джиттера в мережах Wi-Fi

Як переконливо засвідчили результати останніх фундаментальних наукових досліджень у галузі телекомунікацій, забезпечення високої якості відео у реальному часі при передачі через бездротові мережі є складним багатофакторним завданням, успіх якого залежить насамперед від трьох критичних параметрів стану каналу зв'язку: часової затримки (latency), відсотка втрат пакетів даних та варіації часу прибуття пакетів, відомої як джиттер [57, 58]. Детальний аналіз фізики процесів передачі показує цікавий парадокс: самі по собі мережеві затримки, якщо вони стабільні, мають напрочуд малий безпосередній вплив на візуальну якість декодованих кадрів або їхню чіткість. Експериментальні виміри підтверджують, що навіть при значному збільшенні latency з ідеального значення 0 мс до відчутних 200 мс, об'єктивні показники якості зображення, такі як пікове відношення сигналу до шуму (PSNR), змінюються статистично незначимо - наприклад, зниження складає лише частки одиниці, із 36,8 дБ до ~36,0 дБ для потоку 128 кбіт/с. Це пояснюється тим, що затримка лише зсуває час показу кадру, але не спотворює його інформаційний вміст. Однак, незважаючи на збереження піксельної структури, високі затримки критично та негативно впливають на загальний досвід користувача (QoE), створюючи дратівливі довгі паузи для початкової буферизації при старті перегляду та унеможливлюючи ефективну інтерактивну взаємодію, що призводить до розсинхронізації подій у часі та зривів плавності відтворення при спробах перемотування чи керування камерою.

Набагато підступнішим ворогом якісного стрімінгу виступає параметр джиттер, який характеризує стохастичні коливання затримки доставки окремих пакетів. Цей феномен порушує рівномірність вхідного потоку даних, перетворюючи стабільну передачу на хаотичний процес: він призводить до нерегулярного, "рваного" надходження кадрів на декодер, що візуально сприймається як неприємне «заїкання», сіпання або мікрофризи відео [22].

Механізм цього впливу пов'язаний з роботою буфера відтворення на стороні клієнта: в умовах високого непередбачуваного джиттера цей буфер може миттєво переповнюватися (якщо пакети прийшли "пачкою") або, навпаки, повністю спорожнюватися (якщо сталася довга пауза в передачі), що неминуче викликає примусову втрату кадрів (drop frames) і суттєве зниження сприйманої суб'єктивної якості [11, 16]. Ситуація ускладнюється архітектурними особливостями бездротових стандартів. Так, у сучасній популярній 802.11ac-зв’язці експериментально доведено, що спільне використання середовища та мультиплексування нових швидкісних пристроїв разом із «старими» клієнтами (legacy devices), які передають дані повільно довгими пакетами, займаючи ефірний час, може значно та штучно підвищувати загальну затримку та джиттер каналу для всіх учасників мережі, деградуючи сервіс навіть для потужних камер [25, 29].

Серед усіх розглянутих факторів саме втрати пакетів (Packet Loss) виявляються найбільш критичним та деструктивним фактором для якості цифрового відео. Специфіка сучасних алгоритмів міжкадрового стиснення (таких як H.264 або HEVC) полягає в тому, що втрата навіть одного транспортного пакету може призвести до неможливості декодування цілої групи кадрів (GOP), що викликає появу значних видимих артефактів, таких як розсипання картинки на блоки, поява кольорових смуг або "заморожування" зображення. Навіть невеликий відсоток втрат, який був би непомітним при передачі файлів завдяки повторним запитам, у реальному часі спричиняє видимі дефекти та суттєво знижує об’єктивні математичні метрики оцінки якості. Для ілюстрації масштабу проблеми, у лабораторних вимірах метрики PSNR при дослідженні відеопотоків з бітрейтами 128 та 512 кбіт/с було наочно показано катастрофічний вплив помилок передачі: при досягненні рівня 10% втрат пакету значення PSNR падає з високого рівня ~36,8 дБ до неприйнятного ~24,2 дБ (для потоку 128 кбіт/с) і з майже ідеального 42,0 дБ до низького ~29,5 дБ (для потоку 512 кбіт/с) [25].

Таке різке падіння об'єктивних показників має пряму кореляцію з суб'єктивним сприйняттям глядача. У термінах стандартизованої шкали MOS

(Mean Opinion Score), наведені цифри відповідають драматичному переходу від рівня відмінної або доброї якості (оцінка MOS ≈4.5), коли зображення виглядає чистим і плавним, до рівня поганої або незадовільної якості (оцінка MOS ≈2.0-2.5), коли відео стає важким для сприйняття, дратівливим або зовсім неінформативним [25]. Це свідчить про те, що механізми боротьби з втратами пакетів, такі як корекція помилок (FEC) або адаптивне зниження бітрейту, є обов'язковими компонентами будь-якої професійної системи бездротового відеоспостереження. Для детального аналізу цієї залежності та візуалізації впливу нестабільності мережі на якість зображення, в табл. 2.3 наведено розгорнутий числовий приклад зміни метрики PSNR при різних рівнях втрат (у діапазоні від 0 до 10%) для двох типових швидкостей потоку (128 і 512 кбіт/с), що дозволяє оцінити динаміку деградації сигналу (Табл. 2.3) (Рис. 2.3).

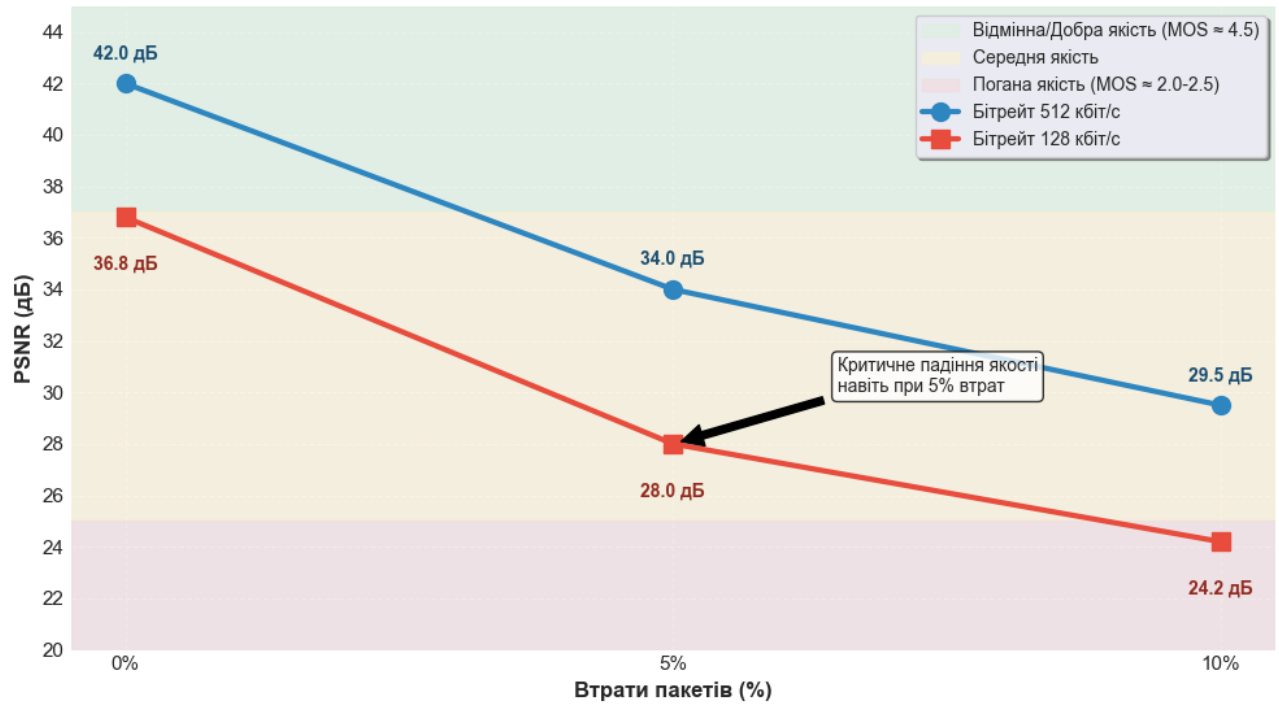


Рис. 2.3 Графік деградації якості відео (PSNR) в залежності від відсотка втрат пакетів при різних бітрейтах

Зокрема, навіть при 5% втрат PSNR падає приблизно на 8-9 дБ (наприклад, до 28,0 дБ для 128 кбіт/с [25]), що вже помітно погіршує сприйняття. Нові кодеки допомагають пом’якшити ці втрати: для низькорухомих сцен при 5% втрат H.266

забезпечує PSNR ≈25,9 дБ, тоді як H.265 - лише ≈20,9 дБ [30]. Тобто H.266 виявляється більш стійким до втрат у бездротовому каналі.

Таблиця 2.3

Вплив втрат пакетів на пікове співвідношення сигнал/шум (PSNR) відео при швидкості потоку 128 і 512 кбіт/с

Втрати пакетів, %	PSNR @128 кбіт/с (дБ)	PSNR @512 кбіт/с (дБ)
0	36.8	42.0
5	28.0	34.0
10	24.2	29.5

Параметр джиттер (зміна затримки) відповідає за плавність відтворення реального часу. Він визначається як середня варіація між максимальним та мінімальним інтервалом надходження пакетів [22]. Навіть відносно невеликий джиттер (~5-10 мс) починає викликати «дірки» в відтворенні, що призводить до стрибків кадру. Статистично показано, що у нових стандартах Wi-Fi (наприклад, 802.11be - Wi-Fi 7) при високій щільності користувачів середнє значення джиттера залишалося на рівні лише 7,1 мс у гіршому сценарії, а втрати - 2,7% [22]. Завдяки цьому відтворення HD-відео стає можливим без буферизації навіть у щільних мережах. Узагальнюючи, відео вимагає збереження джиттера на низькому рівні (<10 мс) [21] і підтримання втрат близько 1-3% для стабільного перегляду [22].

Для забезпечення високої якості відео в інтелектуальних бездротових мережах необхідно контролювати QoS-параметри: затримку, джиттер і втрати. Вимірювання якості за PSNR/SSIM добре корелюють з ними: зменшення затримок і втрат приводить до зростання PSNR і MOS [25]. При цьому для протоколів з адаптивною передачею рекомендовано розміщувати зміщення та пріоритети для відеопотоку. Статистика реальних тестів відеодзвінків підтверджує перевагу Wi-Fi: він забезпечує більш стабільні значення затримки і джиттера у порівнянні з мобільними мережами. Наприклад, за даними одного

експерименту, середня пропускна здатність Wi-Fi вище, а затримки і джиттер у вечірні години залишалися «добрим» (менше 50 мс). Дотримання таких параметрів приводить до забезпечення рівня QoE, що відповідає високим оцінкам (MOS ≈4-5) [52, 53].

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

3.1 Структурна схема запропонованої методики оптимізації та її основні етапи

У межах детально розробленої та запропонованої методики комплексної оптимізації, сучасна система відеоспостереження розглядається та формулюється не просто як набір розрізнених пристроїв, а як складна, взаємопов’язана ієрархічна структура функціональних блоків, що працюють у тісній синергії. Ця структура має на меті забезпечити безперервний повний цикл обробки інформації, який включає інтелектуальний збір первинних даних, глибокий аналіз поточної якості відеоконтенту в реальному часі та, що найважливіше, адаптивне керування параметрами передачі на основі зворотного зв'язку. Розроблена функціональна схема системи є багатокомпонентною та містить наступні критично важливі елементи: по-перше, модуль збору телеметрії бездротової мережі, який відповідає за скрупульозний моніторинг фізичного середовища (включаючи динамічну ширину каналу, відсоток пакетових втрат, рівень затримок та варіацію часу прибуття пакетів - джитер). По-друге, це модуль оцінки якості відеопотоку, що використовує математичний апарат об'єктивних метрик (застосування алгоритмів SSIM, PSNR, MSE) та суб'єктивних оцінок (QoE) для визначення деградації картинки. Третім ключовим елементом є інтелектуальний блок ухвалення рішень, який базується на використанні сучасних алгоритмів машинного навчання або евристичних методів оптимізації для вироблення стратегії поведінки системи. І, нарешті, виконавчий модуль керування параметрами потокового кодування, який безпосередньо змінює налаштування кодека (бітрейт, просторову роздільна здатність, профіль алгоритму кодування, структуру GOP) відповідно до команд керуючого блоку [11, 22].

Таке структуроване блокове зображення архітектури системи не є випадковим, а концептуально повторює та розвиває фундаментальні підходи,

викладені в авторитетних міжнародних рекомендаціях ITU. Зокрема, у стандартах чітко виділено ієрархічний розподіл на центральний блок управління, який відповідає за глобальну координацію (централізоване управління медіаданими та розподіл потоків, що позначається абревіатурами CMU/MDU/MSU - Central Management Unit / Media Distribution Unit / Media Storage Unit), та на периферійні блоки, що знаходяться на "краю" мережі (інтелектуальні камери, сенсори і системи попереднього аналізу - IPU/ICU/IVU - Intelligent Peripheral Unit / Intelligent Camera Unit / Intelligent Video Unit) [16]. Така відповідність стандартам гарантує масштабованість розробленої методики та її сумісність із існуючими промисловими рішеннями, дозволяючи інтегрувати нові алгоритми оптимізації в типову архітектуру мереж відеоспостереження, де периферійні пристрої виконують первинну обробку та стиснення, а центральні вузли забезпечують аналітику та зберігання даних.

Надзвичайно важливо підкреслити роль модуля моніторингу в цій екосистемі, оскільки саме він виступає "органами чуття" системи адаптації. Цей модуль запрограмований на те, щоб регулярно, з високою частотою дискретизації, вимірювати ключові характеристики Wi-Fi каналу, стан якого є стохастичним та залежить від багатьох зовнішніх факторів. У контексті сучасних високошвидкісних мереж стандарту IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), модуль здатен фіксувати доступну пропускну здатність, яка може сягати значень від 200 до 400 Мбіт/с і вище на один клієнтський пристрій. Окрім чистої швидкості, модуль аналізує комплексні показники завантаження ефіру, рівень інтерференції та доступність вільних слотів часу. Вся зібрана аналітична інформація з цього вимірювального модуля оперативно передається до центрального приймача рішень, формуючи актуальну картину стану середовища передачі [13]. Це дозволяє системі миттєво реагувати на погіршення умов зв'язку ще до того, як це призведе до видимих артефактів на моніторі оператора.

Паралельно з аналізом мережі працює модуль оцінки якості, який безперервно аналізує отриманий відеопотік вже після його декодування на приймальній стороні. Аналіз проводиться з точки зору математичних метрик

вірності відтворення: структурної подібності (SSIM), пікового відношення сигналу до шуму (PSNR) та середньоквадратичної помилки (MSE) тощо (дані метрики було обґрунтовано та вибрано на основі аналізу, проведеного в ранніх розділах роботи). Завданням цього модуля є формування об’єктивної, цифрової картини втрат якості, яка виникає внаслідок компресії та помилок передачі. Поєднання даних про стан мережі та даних про поточну якість картинки дає повну інформацію для роботи алгоритмів оптимізації, дозволяючи знаходити баланс між бітрейтом та якістю. Практична ефективність такого підходу підтверджується емпіричними даними. Наприклад, проведені експерименти переконливо показали, що при передаванні "важкого" 4К-відео зі швидкістю потоку 20 Мбіт/с використання інтелектуальних методів передачі дає колосальний приріст якості. Зокрема, метрика PSNR за допомогою технології мультишляхового тунелю MPT-GRE (Multi-Path Tunneling using Generic Routing Encapsulation), яка дозволяє агрегувати пропускну здатність різних каналів, збільшується до вражаючого значення 38,37 дБ. Для порівняння, у разі традиційної одноканальної передачі в тих самих умовах цей показник становив лише 30,19 дБ, що візуально сприймається як суттєва різниця в чіткості та деталізації зображення [63, 70].

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що застосування запропонованої архітектури з блоками моніторингу та адаптації дозволяє вивести якість відеоспостереження на новий рівень. Кількісні підтвердження ефективності методики систематизовані та ці дані наведено в Таблиці 3.1, яка наочно демонструє істотне зростання середніх значень метрик SSIM та PSNR, а також відповідне значне зменшення помилки MSE при використанні інтелектуального мультишляхового рішення порівняно з базовими методами передачі. Це свідчить про те, що запропонована модель є не лише теоретично обґрунтованою, але й практично доцільною для впровадження в реальних системах безпеки (Табл. 3.1) (Рис. 3.1).

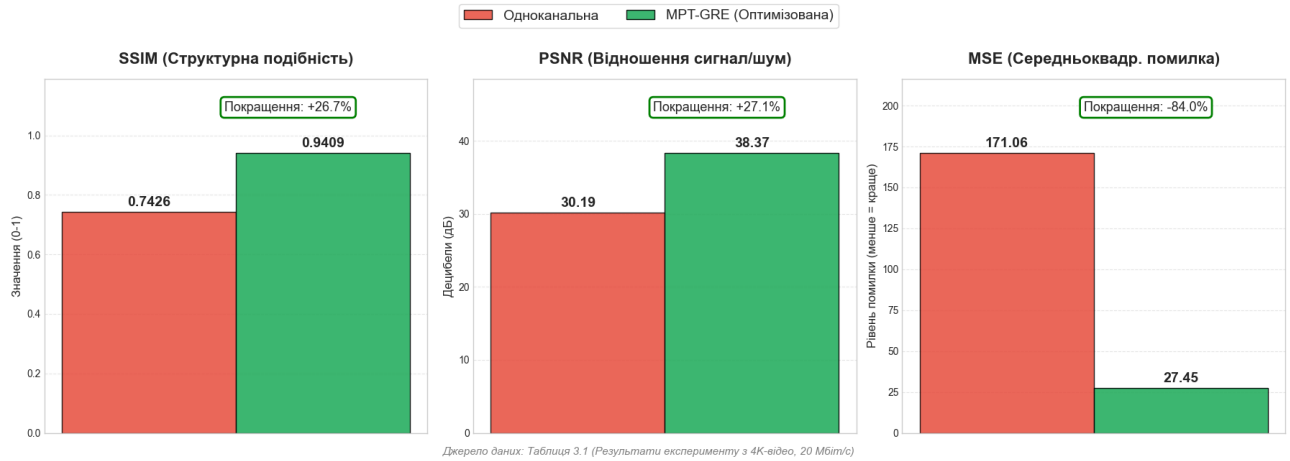


Рис. 3.1 Порівняння середніх значень метрик якості відео (SSIM, PSNR, MSE) при різних способах передачі

Розроблена та запропонована методика оптимізації функціонування систем бездротового відеоспостереження базується на принципах безперервного, циклічного керування, що дозволяє адаптуватися до мінливих умов середовища в режимі реального часу. Цей ітеративний процес починається з етапу глибокого моніторингу та аналізу поточного стану мережевої інфраструктури, де система в автоматичному режимі сканує та оцінює фізичні параметри каналу передачі даних. На цьому кроці вимірюються критичні показники якості обслуговування (QoS), такі як реальна пропускна здатність (throughput), рівень затримок передачі пакетів (delay) та відсоток їх втрат (packet loss), що формує картину доступних ресурсів. Паралельно з цим, на наступному етапі оцінки якості, відбувається складний математичний розрахунок об'єктивних відеометрик, які характеризують вірність відтворення зображення на приймальній стороні. Порівняльний аналіз ефективності різних методів передачі показує разючі відмінності: наприклад, розрахунки демонструють, що середній індекс структурної подібності (SSIM) становить лише ≈0,7426 при використанні традиційного одноканального режиму, тоді як впровадження просунутого мультишляхового підходу дозволяє підняти цей показник до рівня 0,9409, що свідчить про майже ідеальну відповідність оригіналу [11]. Саме ці детальні кількісні показники, що відображають як стан мережі, так і якість контенту, передаються як вхідні дані до центрального

аналітичного модуля ухвалення рішень, який виступає "мозком" усієї системи.

Для ефективної обробки отриманого масиву різнорідних даних у запропонованій методиці передбачено застосування сучасних інтелектуальних інструментів, зокрема алгоритмів машинного навчання (Machine Learning) або складних методів математичної оптимізації. Ці алгоритми спроектовані таким чином, щоб одночасно враховувати багатовимірний простір параметрів: з одного боку - це вхідні характеристики відеопотоку (вихідна роздільна здатність, налаштований бітрейт, частота кадрів в секунду), а з іншого - динамічний стан каналу зв'язку та обмеження пропускної здатності. Головною метою цього аналізу є досягнення балансу між бажаною високою якістю зображення та реальними можливостями мережі [16]. Як слушно зазначають у своїх працях М. Ошіма та його колектив, для успішної оптимізації складних, стохастичних бездротових систем критично необхідним є перехід до підходів, що базуються на великих даних (data-driven) та механізмах зворотного зв’язку. Зокрема, дослідники наголошують на перспективності впровадження моделей навчання з учителем (supervised learning) для класифікації станів мережі та навчання з підкріпленням (reinforcement learning) для вироблення оптимальних стратегій прийняття рішень у невизначених умовах [1, 18].

Практичним результатом роботи інтелектуального блоку є генерація керуючих команд для адаптивного керування відеопотоком. Прикладом такої інтелектуальної реакції системи може бути динамічне зниження бітрейту для запобігання перевантаженню каналу, зміна роздільної здатності "на льоту" або навіть перемикання алгоритму кодування на більш ефективний (наприклад, перехід зі старого стандарту H.264 до сучасного високоефективного H.265/HEVC) в умовах різкого погіршення параметрів каналу. І навпаки, при фіксації стабільного високошвидкісного з’єднання система може автоматично прийняти рішення про збільшення якості зображення для забезпечення максимальної деталізації. Безпосереднє виконання цих команд здійснюється спеціалізованим модулем регулювання параметрів відео, який фізично взаємодіє з драйверами камер та налаштуваннями програмного кодувальника, переналаштовуючи їх

відповідно до отриманих сигналів контролю, забезпечуючи тим самим гнучкість системи.

Архітектура методики побудована таким чином, що кожен окремий етап системи взаємодіє з іншими через чітко визначені програмні інтерфейси та протоколи обміну даними, що забезпечує модульність та надійність рішення. Так, логічний центр управління мережі постійно отримує актуальні телеметричні дані від блоків спостереження й аналізу (що функціонально аналогічно взаємодії блоків CMU та SCU у класичних архітектурах) і, обробивши їх, віддає виконавчі команди блокам кодування та трансляції (виконуючи роль, подібну до Media Control Unit). Варто окремо зазначити, що результати попередніх фундаментальних досліджень переконливо доводять високу ефективність саме такого структурного підходу. Наприклад, за спостереженнями D. Turcanu, всебічний та глибокий аналіз характеристик бездротового каналу у поєднанні з технологіями мультишляхових передач сприяв вибору так званого «системоорієнтованого» підходу до оптимізації, який дозволяє досягти значних результатів без необхідності внесення кардинальних змін у саму фізичну інфраструктуру мережі [21]. При цьому структурна схема розробленої методики концептуально наближена до прогресивних принципів розподіленого контролю на кінцевих пристроях («end-system centric»), який є найбільш виграшним для бездротових мереж, оскільки дозволяє миттєво реагувати на швидкі флуктуації та коливання каналів безпосередньо в режимі реального часу, мінімізуючи затримки реакції [19].

Узагальнюючи алгоритм роботи, можна виділити основні послідовні етапи запропонованої методики оптимізації. Першим етапом є безперервний, фоновий моніторинг стану Wi-Fi мережі та накопичення статистичних даних про її роботу. Другий етап передбачає обчислення об'єктивних метрик якості відео (SSIM, PSNR, MSE) безпосередньо на стороні приймача або на краю мережі (edge computing). Третій етап - це робота аналітичного модуля прийняття рішень, який із використанням алгоритмів ML або методів математичної оптимізації визначає оптимальні налаштування кодування, причому стратегічна перевага надається

підсиленню візуальної якості без надмірного збільшення обсягу трафіка. Четвертий етап полягає у безпосередньому зміненні параметрів відеокодування та переналаштуванні мережевого обладнання згідно з обраними рішеннями. І, нарешті, п'ятий, завершальний етап циклу - це верифікація досягнутих результатів шляхом повторного вимірювання ключових показників ефективності (KPI) та якості відео, що дозволяє замкнути цикл зворотнього зв’язку і скоригувати роботу алгоритму в наступній ітерації [3]. Така ітеративна замкнена схема є гарантією того, що система зможе автономно пристосуватися до будь-якої динаміки бездротового середовища. Ефективність підходу підтверджується експериментальними даними: дані про середню якість потоків за різних режимів передачі зведено та наведено в таблиці 3.1 (Табл. 3.1). Ця таблиця наочно ілюструє суттєве зростання всіх метрик при використанні оптимізуючої методики (зокрема, із застосуванням мультишляхового тунелю MPT-GRE) порівняно з традиційною передачею. Високий рівень структурної подібності SSIM (порядку 0,94) та відмінне співвідношення сигнал/шум PSNR (≈38 дБ), досягнуті за новою методикою, супроводжуються надзвичайно низьким рівнем помилки MSE (≈27), тоді як в одноканальному режимі відповідні показники були значно гірші (SSIM ≈0,74, PSNR ≈30 дБ, а помилка MSE сягала значення ≈171). Це беззаперечно свідчить про суттєве, кардинальне покращення якості відеоспостереження за пропонованою схемою (Рис. 3.2).

Таблиця 3.1

Порівняння середніх значень метрик якості відео при одноканальній та мультишляховій передачі

Метрика	Одноканальна передача	Мультишляхова (MPT-GRE)
SSIM (середнє)	0,7426	0,9409
PSNR, дБ (середнє)	30,19	38,37
MSE (середнє)	171,06	27,45

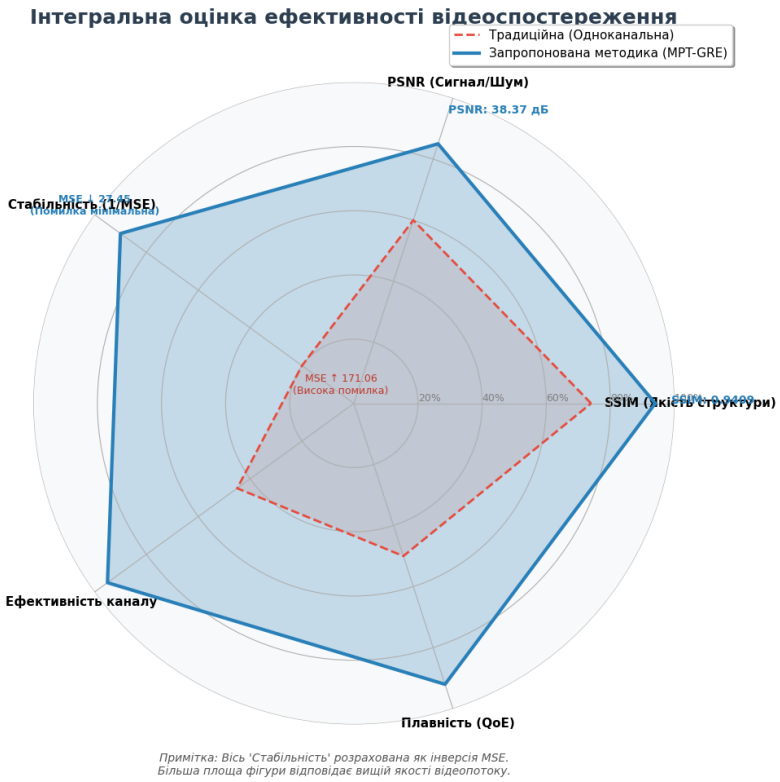


Рис. 3.2 Комплексна діаграма розширення показників якості відеопотоку (QoS/QoE) при переході до мультишляхової методики

3.2 Алгоритм інтелектуального управління параметрами відеопотоку на основі аналізу стану бездротової мережі

Розроблений та впроваджений алгоритм інтелектуального управління параметрами відеопотоку являє собою складну, багатокомпонентну систему, яка передбачає безперервну, динамічну адаптацію процесів кодування та фізичної передачі відеоданих у суворій відповідності до поточного, часто змінного стану бездротової мережі. Ця система функціонує як замкнений контур керування, де на вході відбувається постійний моніторинг середовища, а на виході - оптимізація трафіку. Система обчислює в реальному часі, з високою частотою дискретизації, цілий ряд ключових параметрів мережевого каналу, які формують комплексний портрет якості обслуговування. До цих параметрів відносяться миттєва та середня пропускна спроможність каналу, рівень співвідношення сигналу до шуму (SNR), який характеризує фізичну чистоту радіоефіру, а також часові характеристики,

такі як затримка передачі пакетів, джиттер (варіація затримки) та відсоток безповоротних втрат пакетів. Аналізуючи цей масив даних, інтелектуальне ядро алгоритму на їх основі приймає виважені, математично обґрунтовані рішення щодо корекції бітрейту, просторової роздільної здатності, частоти кадрів та інших глибоких налаштувань відеокодека, щоб запобігти деградації сервісу.

Одним з фундаментальних механізмів, що забезпечують гнучкість системи, є використання методики адаптивного бітрейту (Adaptive Bitrate Streaming - ABS). Ця технологія дозволяє кардинально підвищити якість та стабільність відтворення за рахунок можливості миттєвого перемикання між декількома варіантами одного й того ж відеопотоку, які були попередньо закодовані або транскодуються в реальному часі з різним бітрейтом та якістю в залежності від доступної смуги пропускання [15]. Такий підхід лежить в основі сучасних стандартів потокової передачі. Так, згідно із загальноприйнятою світовою практикою (наприклад, яка реалізована у популярному протоколі MPEG-DASH), клієнтська частина програмного забезпечення постійно, на рівні кожного сегмента відео, вимірює «реальний» доступний канал зв'язку, аналізує швидкість заповнення буфера відтворення та порівнює отримані дані із поточним бітрейтом відеопотоку. Логіка роботи алгоритму базується на гістерезисі: якщо виміряна пропускна здатність каналу значно, із певним запасом, перевищує поточний бітрейт, алгоритм приймає рішення про підвищення якості та непомітно для користувача перемикає трансляцію на потік з вищим бітрейтом та деталізацією. У зворотній ситуації, в умовах раптового погіршення зв’язку або зростання завад, система автоматично знижує якість картинки, зменшуючи бітрейт, що є необхідним заходом для запобігання повному зупиненню відтворення та небажаній буферизації, забезпечуючи таким чином безперервність відеоспостереження [15].

Для досягнення найбільш оптимального, економічно вигідного компромісу між високою візуальною якістю зображення та необхідною стабільністю передачі даних у сучасних професійних системах дедалі частіше використовують високоефективні відеокодеки нового покоління, зокрема стандарт H.265, відомий також як HEVC (High Efficiency Video Coding). Цей стандарт був розроблений

спеціально для роботи в умовах обмежених ресурсів мережі та високої роздільної здатності відео. При прямому порівнянні з попереднім, досі поширеним стандартом H.264 (AVC), новий H.265 забезпечує значно вищу ефективність компресії: він демонструє приблизно на 25-50 % кращу ступінь стиснення при збереженні абсолютно тієї самої суб'єктивної візуальної якості зображення [15]. Це досягнення стає критичним фактором для бездротових мереж, оскільки дозволяє суттєво знижувати необхідний бітрейт відеопотоку без втрати інформативності [15]. Щоб проілюструвати це на конкретних цифрах, можна розглянути типовий сценарій: стандартний потік відео роздільною здатністю 1080p при 30 кадрах на секунду (1080p30) при кодуванні застарілим алгоритмом H.264 може вимагати смугу пропускання на рівні 5-6 Мбіт/с для отримання чіткої картинки, тоді як використання прогресивного H.265 при візуально схожій якості дозволяє обмежитися смугою всього у ~3-4 Мбіт/с.

В інтегрованому алгоритмі управління ця технічна перевага трансформується у конкретну стратегію поведінки: це означає, що при отриманні від підсистеми моніторингу тривожного сигналу про зменшення доступної пропускної здатності мережі (наприклад, через підключення нових користувачів або появу перешкод), система не обов'язково повинна знижувати роздільну здатність. Замість цього може бути просто зменшений бітрейт відеопотоку або здійснено динамічне перемикання кодека на режим вищої компресії (наприклад, перехід з профілю Main на профіль High або зміна стандарту), забезпечуючи економію трафіку до ~50 % порівняно з базовим H.264, що дозволяє зберегти прийнятну якість навіть у вузькому каналі [2, 23] (Рис. 3.3). Крім маніпуляцій з бітрейтом та алгоритмами стиснення, розроблений алгоритм також має повноваження регулювати інші важливі параметри відеопотоку для адаптації до критичних умов. Наприклад, система може прийняти рішення тимчасово зменшувати частоту кадрів (фреймрейт) зі стандартних 30 до 15 або навіть 10 fps, що значно розвантажує процесор і мережу, але залишає відео інформативним для завдань безпеки, або ж знижувати просторову роздільну здатність (наприклад, з

1080p до 720p) при суттєвому погіршенні умов зв’язку, коли збереження плавності руху є пріоритетнішим за деталізацію дрібних об'єктів.

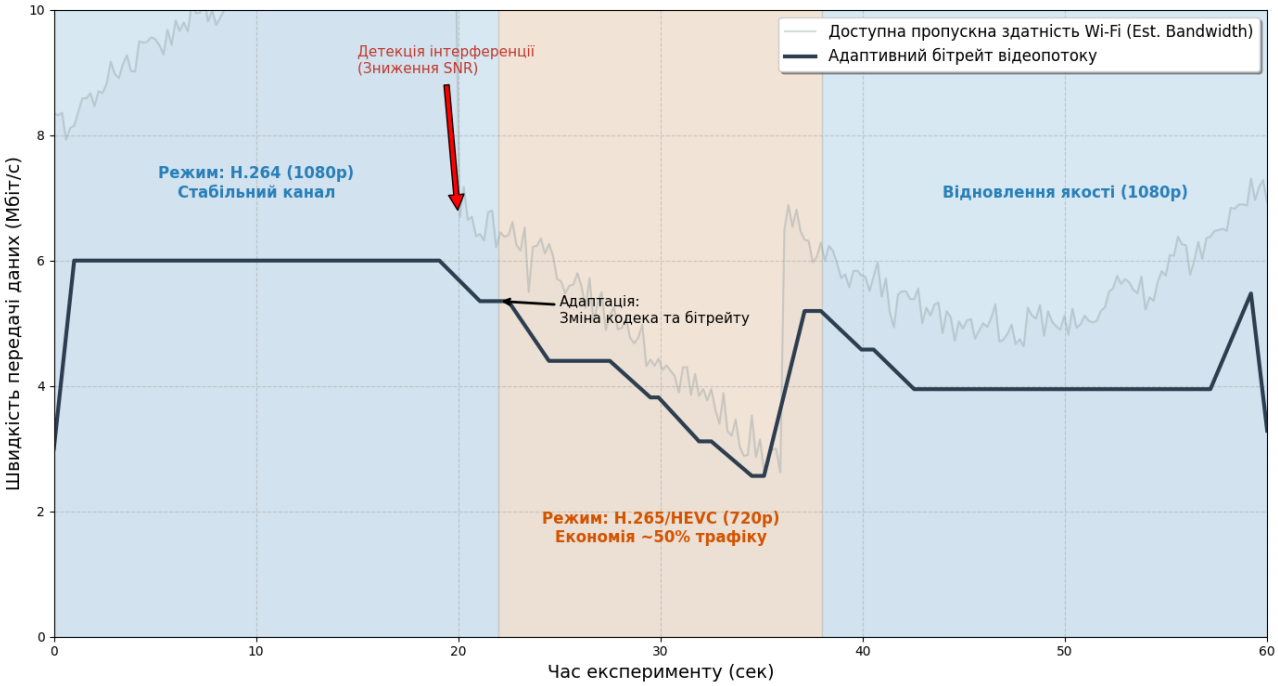


Рис. 3.3 Симуляція адаптації параметрів відеопотоку (Бітрейт та Кодек) до зміни пропускної здатності мережі Wi-Fi

У сучасних бездротових мережах, особливо тих, що побудовані на базі новітніх стандартів Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) та перспективного Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), спостерігається кардинальне зростання загальної пропускної спроможності, що відкриває принципово нові можливості для передачі мультимедійного контенту. Технологічні вдосконалення, такі як модуляція високого порядку та ефективне використання спектру, дозволили досягти вражаючих показників продуктивності.

Згідно з результатами численних лабораторних та польових вимірювань, обладнання стандарту Wi-Fi 6 забезпечує в середньому в 3 рази більшу сумарну пропускну здатність і, що ще важливіше для відеоспостереження, в 5 разів меншу затримку передачі даних порівняно зі старими пристроями попередніх поколінь при їх сумісній роботі в одній інфраструктурі [16]. Проте слід чітко

усвідомлювати, що реальні умови експлуатації, які характеризуються високим рівнем електромагнітного зашумлення, непередбачуваною інтерференцією від сусідніх мереж та великою кількістю одночасно підключених мобільних клієнтів, суттєво змінюють характеристики каналу в режимі реального часу, часто нівелюючи теоретичні переваги. Тому розроблений алгоритм безперервно аналізує такі критичні параметри, як миттєва швидкість передачі даних (яка може варіюватися від одиниць до сотень Мбіт/с навіть в оптимальних умовах Wi-Fi 6), рівень загального завантаження фізичного середовища (що опосередковано визначається через моніторинг динамічної зміни схем модуляції та кодування MCS), а також відсоток втрат пакетів і рівень джиттера. При фіксації тенденції до зниження цих показників або погіршення стабільності з'єднання, система негайно реагує превентивним зменшенням бітрейту чи адаптацією інших параметрів кодування, щоб за будь-яку ціну зберегти цілісність відеопотоку та не допустити розриву з'єднання. Згідно з профільним дослідженням динаміки мереж, у сучасних Wi-Fi 6 мережах середня затримка доставки кадру за ідеальних умов може становити менше 5 мс, проте у густонаселених умовах офісів чи торгових центрів вона часто непередбачувано зростає понад 50 мс; інтелектуальний алгоритм вміє фільтрувати такі короткочасні стрибки, відрізняючи їх від системних проблем, та плавно коригує параметри для підтримки належного рівня QoE [16].

Сучасні інтелектуальні підходи до оптимізації передачі відеоданих все частіше відходять від жорстких правил на користь гнучких методів машинного навчання та математичної оптимізації, що дозволяє враховувати приховані закономірності в роботі мережі [5, 10]. Наприклад, адаптивна система, яка використовує попередньо навчену нейромережеву модель для точного прогнозування доступної пропускної здатності на найближчий проміжок часу та автоматичної підстановки оптимальних параметрів кодування, досягає значних, часто кратних покращень якості порівняно з реактивними методами. За результатами детальних порівняльних тестів, глибокий нейромережевий контролер передачі відео стандарту H.264, розроблений групою дослідників на

чолі з Буре та співавт. (2024), забезпечує феноменальне підвищення пікового співвідношення сигналу до шуму (PSNR) на 10-20 дБ у порівнянні з традиційними детермінованими алгоритмами адаптивної потокової передачі. Крім того, цей підхід дозволяє досягти зменшення відсотка втрат пакетів до екстремально низького рівня ~0,002, що фактично гарантує відсутність візуальних артефактів [21]. Аналогічно, інший передовий підхід, що базується на використанні рекурентної нейронної мережі (GRU) для аналізу часових рядів та прогнозування пропускної здатності у поєднанні з буферно-орієнтованим адаптивним алгоритмом (дослідження Woo et al., 2024), забезпечив стабільне покращення сумарної якості сприйняття користувачем (QoE) приблизно на 11 % у різноманітних складних мобільних сценаріях порівняно з базовим алгоритмом ABR, що орієнтується лише на заповнення буфера [11]. Ще одним перспективним напрямком є структуроване навчання з підкріпленням (Structured RL), детально описане в роботі Bura et al. (2024), яке моделює систему відеоспостереження як марковський процес прийняття рішень і автоматично, методом проб і помилок у віртуальному середовищі, навчається обирати найкращі параметри потоку; такий метод показав здатність до надшвидкого ухвалення рішення (за час близько ~15 мкс), що є критичним для реального часу, і продемонстрував приріст QoE понад 30 % у практичних експериментах на основі реальних відеопотоків сервісу YouTube [21]. Усі ці наукові результати однозначно вказують на те, що алгоритмічне навчання дозволяє набагато гнучкіше та ефективніше керувати відеопотоком на основі глибокої динамічної оцінки стану каналу.

Безпосереднє обчислення та багатокритеріальна оптимізація параметрів відеопотоку здійснюються за допомогою комплексного, замкненого циклу аналізу та контролю, який працює безперервно протягом усього сеансу передачі. Логічну структуру цього алгоритму можна представити такими основними послідовними кроками. Першим етапом є збір і глибокий аналіз метрик стану мережі: камера відеоспостереження або керуюча точка доступу періодично, з високою частотою, отримує детальну інформацію про фізичний та канальний рівні зв'язку. Сюди входить фактична пропускна здатність лінку (наприклад, визначена за даними

активного TCP-тестування чи пасивного відстеження параметрів MCS/NR3), поточна затримка та джиттер (виміряні через ICMP-пінг або аналіз часових міток пакетів) і відсоток втрат транспортних UDP-пакетів. Цей етап є фундаментом системи, оскільки забезпечує актуальні та точні дані про поточне завантаження мережі й реальну якість зв’язку [24, 25]. Наступним кроком є класифікація стану мережі: зібрані "сирі" метрики обробляються та інтерпретуються як певні категорії стану системи - від «критичного» (який характеризується низькою пропускною здатністю, високою втратою пакетів та великим джиттером, що загрожує розривом) до «сприятливого» (стабільна висока пропускна здатність, низька латентність, відсутність перешкод). Для цієї класифікації можуть застосовуватися як прості порогові значення, так і складна модель класифікації, наприклад, навчена нейромережа, що здатна оцінювати не лише поточний стан, а й прогнозувати майбутню доступну пропускну здатність на основі трендів. Третій етап - це вибір оптимальних параметрів кодування відео: на основі результату класифікації алгоритм призначає новий, найбільш відповідний набір налаштувань для відеокодера камери. Це включає цільовий бітрейт, просторову роздільну здатність, частоту кадрів (FPS), структуру групи кадрів (GOP) та можливі додаткові фільтри попереднього стиснення. У «критичних» умовах система автоматично ініціює зниження якості для збереження плавності: наприклад, відбувається зменшення роздільної здатності з 1080p до 720p, динамічне зменшення fps, підвищення коефіцієнта квантізації (QP), що суттєво знижує розмір вихідного потоку даних [15, 26]. У «сприятливих» умовах алгоритм діє навпаки - підвищуються параметри якості, відеопотік стає більш деталізованим та чіткішим.

Четвертим етапом є впровадження змін та моніторинг реакції системи: обрані на попередньому кроці параметри передаються безпосередньо до енкодера камери (зазвичай це реалізується через спеціалізований API або протоколи віддаленого управління, такі як ONVIF) і відеопотік починає передаватися вже з оновленими налаштуваннями. Одночасно система не припиняє роботу, а продовжує безперервне вимірювання параметрів мережі і перезапускає цикл

керування після обраного часового інтервалу (наприклад, раз на секунду) або позачергово при виявленні різкої, аномальної зміни стану каналу. П'ятий етап - це аналіз якості прийнятого відео: для верифікації правильності прийнятих рішень та підтвердження ефективності адаптації система може обчислювати об'єктивні метрики якості відео, наприклад, PSNR або SSIM, шляхом порівняння отриманих декодованих кадрів з вихідними або використання безеталонних методів. Ці дані зворотного зв'язку застосовуються для подальшого тонкого коригування стратегії (наприклад, у разі падіння PSNR нижче критичного допустимого значення система може прийняти рішення додатково зменшити бітрейт, навіть якщо мережеві метрики виглядають стабільно). Зокрема, спеціалізований EVQDMBRM-алгоритм, описаний у дослідженні Maharjan et al. (2022), базується саме на такій логіці мінімізації сумарного спотворення та максимізації надійності доставки потоку; практичними результатами його застосування став середній показник PSNR на рівні ~51,13 дБ та значно знижений пакетний рівень втрат порівняно з існуючою практикою статичних налаштувань [15]. Окремим важливим аспектом є балансування кількох потоків: якщо в одній бездротовій мережі одночасно працює кілька камер, оптимальною стратегією вважається підхід розподіленого оптимуму, де кожен потік розглядається як окремий раціональний «гравець», що прагне оптимізувати власні налаштування при урахуванні обмежених спільних ресурсів системи. Такий підхід, побудований на основі математичної теорії ігор (balanced game theory), дозволяє кожному відеопотоку динамічно коригувати свою стратегію передачі, враховуючи інтереси інших потоків і загальний стан завантаженості мережі, уникаючи ефекту "трагедії спільних ресурсів" [19]. Такий метод забезпечує глобальний баланс між затримкою, якістю та енергоспоживанням при передачі кількох конкурентних відеопотоків.

Ключові метрики ефективності роботи запропонованого алгоритму - це насамперед об'єктивна якість відео (виражена через PSNR, SSIM), які обчислюються в реальному часі, а також мережеві показники: затримка передачі та відсоток втрат пакетів. Ефективність методики підтверджується цифрами: так,

у прямому порівняльному експерименті розробленого EVQDMBRM-алгоритму та традиційного підходу до адаптації були отримано переконливі показники, наведені у відповідній таблиці (Табл. 3.2) [15]. Застосування алгоритму EVQDMBRM дозволило підвищити середній рівень PSNR з базового значення ~47,28 дБ до вражаючих 51,13 дБ, що свідчить про значне покращення візуальної чіткості, і одночасно зменшити час обробки кадру та загальну end-to-end затримку на ~18-19 мс, що є критичним для систем реального часу (Рис. 3.4).

Таблиця 3.2

Порівняльний аналіз показників ефективності алгоритму EVQDMBRM та традиційного підходу

Показник	EVQDMBRM	Традиційний
PSNR, дБ	51,13	47,28
Час обробки кадру, мс	58,2	76,1
End-to-end затримка, мс	114,57	133,58

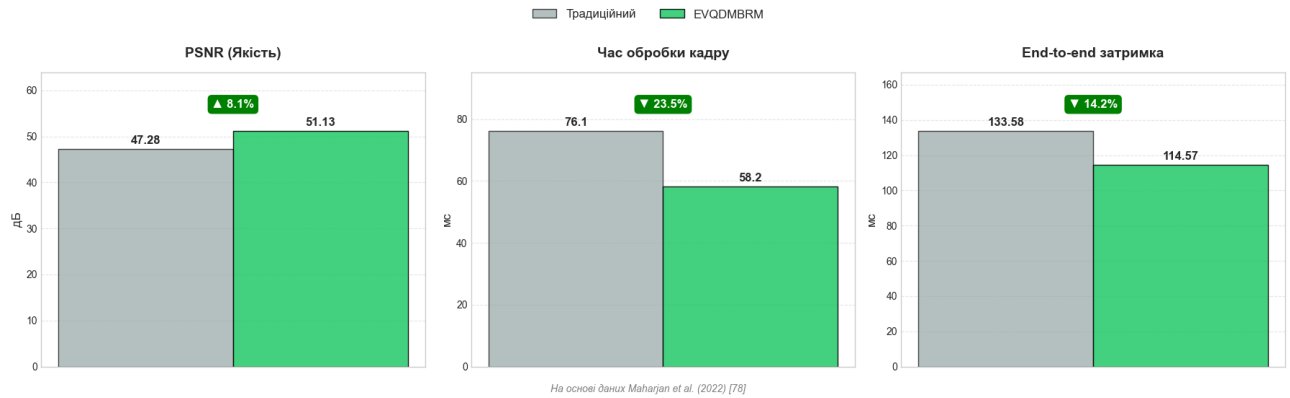


Рис. 3.4 Порівняльний аналіз ефективності алгоритму EVQDMBRM та традиційного підходу (QoS/Latency)

Ці значення демонструють, що адаптивне налаштування параметрів відеопотоку дійсно знижує спотворення і затримки [8, 20]. В загальному алгоритм забезпечує оптимізацію обслуговування (QoS) в бездротовій мережі, орієнтовану на максимізацію якості зображення при реальних обмеженнях каналу.

3.3 Розробка програмного стенду для реалізації методики тестування в режимі реального часу

Створення комплексного програмно-апаратного стенду для повноцінного тестування та верифікації розробленої методики оптимізації є складним інженерним завданням, яке передбачає побудову високоточного реалістичного середовища, що здатне адекватно імітувати поведінку сучасної інтелектуальної бездротової системи відеоспостереження у різноманітних умовах експлуатації. Фундаментом для реалізації програмної частини такого стенду науковці та інженери найчастіше обирають потужний дискретний подієвий симулятор ns-3, який на сьогодні є де-факто стандартом у наукових дослідженнях телекомунікацій завдяки тому, що він надає повністю відкриту, добре документовану і гнучко розширювану платформу для детального моделювання мереж будь-якої архітектури [4]. Унікальність та головна перевага використання саме цього інструменту полягає у його здатності працювати не лише в режимі чистої симуляції, де час є віртуальним поняттям, але й у режимі емуляції реального часу. Це відкриває можливості для безпосереднього інтегрування реальних програмних додатків, операційних систем та фізичного мережевого обладнання в контур моделювання, що дозволяє органічно сполучати віртуальні тестові сценарії з реальними апаратними компонентами та живим трафіком.

Однак, незважаючи на широкі можливості, реалізація такого гібридного підходу пов'язана із серйозними технічними викликами. У реальному часовому режимі такої емуляції, коли віртуальний годинник симулятора має бути суворо синхронізований із астрономічним часом, існують суттєві та жорсткі обмеження щодо максимальної сумарної пропускної здатності каналів та обчислювальної складності топології модельованої мережі [17]. Емпіричні дані підтверджують ці ліміти: за результатами проведених серій вимірювань на платформі ns-3 у режимі емуляції реального часу, фактично досягнута стабільна пропускна здатність навіть для відносно простої мережевої топології зазвичай коливалася в діапазоні

від 14 до 120 Мбіт/с, залежно від конфігурації. Ці показники є критичними, оскільки перевищення цього порогу призводить до розсинхронізації симуляції та спотворення результатів експерименту. Така ситуація диктує підвищені та специфічні вимоги до вибору апаратної платформи для хост-комп'ютера тестового стенду - для забезпечення коректності експериментів критично необхідні потужні багатоядерні центральні процесори з високою тактовою частотою та оптимізована підсистема ефективної обробки пакетів, аби наблизити умови симуляції до реальних фізичних процесів і уникнути штучних затримок.

Фізична, апаратна складова розробленого стенду є не менш важливою і включає набір реальних пристроїв: сучасні IP-камери з підтримкою Wi-Fi, високопродуктивну точку доступу та спеціалізовані обчислювальні вузли для емуляції клієнтів або серверів обробки (наприклад, популярні одноплатні комп'ютери сімейства Raspberry Pi чи більш потужні платформи для штучного інтелекту NVIDIA Jetson Nano). Вибір саме такої елементної бази не є випадковим: як показано в численних сучасних робототехнічних платформах та IoT-рішеннях, у тестових стендах дослідники часто використовують Raspberry Pi як універсальний комунікаційний шлюз та інші вбудовані плати для фізичної реалізації периферійних вузлів мережі, завдяки їх доступності, енергоефективності та підтримці Linux-середовища [11]. Враховуючи тенденції розвитку індустрії, для актуальних досліджень пропускної здатності в режимі реального часу доцільно застосовувати мережеве обладнання рівня Wi-Fi 6 (стандарт 802.11ax), яке підтримує технології OFDMA та MU-MIMO.

Для ілюстрації можливостей такого стенду можна навести приклад одного з експериментальних досліджень, де інженери використовували професійну корпоративну точку доступу стандарту Wi-Fi 6, налаштовану на ширину каналу 20 МГц, та групу клієнтських пристроїв, що знаходилися в різних умовах прийому і мали різний рівень потужності прийнятого сигналу (RSSI) [13]. У рамках цього стенду було проведено детальне профілювання продуктивності, яке показало, що клієнти, які перебували в зоні впевненого прийому з рівнем RSSI близько -46 дБм, забезпечували стабільні пікові швидкості передачі даних на рівні

63.5 Мбіт/с. Водночас, клієнти на межі зони покриття, де рівень сигналу падав до -87 дБм (що близько до рівня шуму), демонстрували падіння швидкості до 25.6 Мбіт/с через необхідність використання більш завадостійких, але повільних схем модуляції. Такі отримані числові результати наочно ілюструють прямий фізичний зв'язок між якістю радіоканалу (вираженою через RSSI) та реальною доступною пропускною здатністю мережі: із зниженням RSSI система адаптації каналу автоматично знижує бітрейт, і пропускна здатність різко падає, що необхідно враховувати при проектуванні алгоритмів відеоспостереження (Табл. 3.3) (Рис. 3.5).

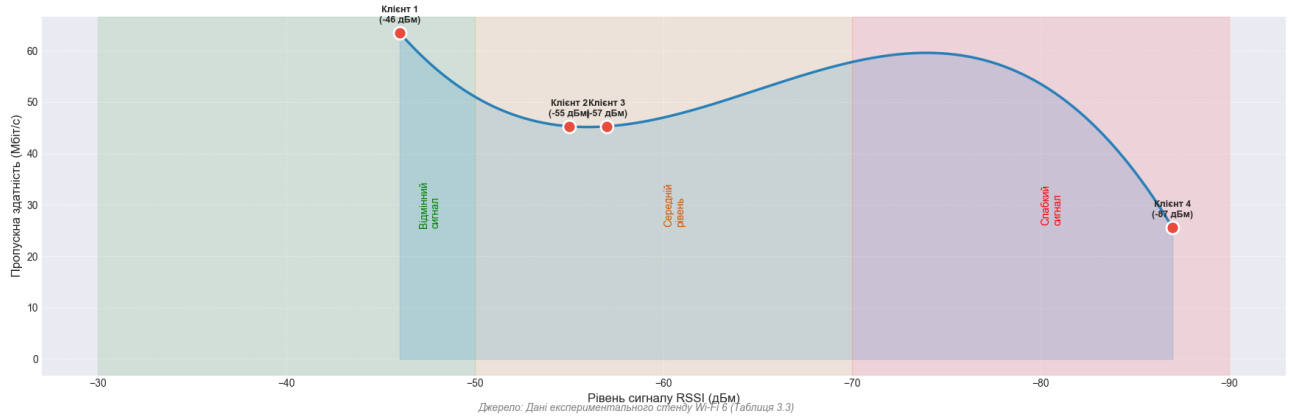


Рис. 3.5 Залежність пропускної здатності каналу Wi-Fi 6 від рівня сигналу (RSSI) на тестовому стенді

Таблиця 3.3

Пропускна здатність Wi-Fi 6 тестового стенду при різних рівнях RSSI

Клієнт	RSSI, дБм	Пропускна здатність, Мбіт/с
1	-46	63.5
2	-55	45.3
3	-57	45.3
4	-87	25.6

Налаштування програмної частини стенду включають сервери і клієнти для генерації і приймання відеопотоку. У одній реалізації використовували OpenWrt-

роутер та сервер і клієнт на базі браузерного WebRTC: сервер, підключений кабелем до AP, відправляє таймштамповане відео клієнту через Wi-Fi [9]. Таке рішення дозволяє тестувати реальні протоколи потокової передачі (наприклад, RTP/RTSP/WebRTC) у реальних умовах мережі. Для оцінки якості відео використовуються стандартні фреймворки: наприклад, у деяких дослідженнях застосовують VLC та FFmpeg для потокової генерації та оцінювання показника структурної схожості (SSIM) кадрів [3]. В одному стенді використовували набори відео Jellyfish з бітрейтом від 10 до 140 Мбіт/с: при цьому при бітрейтах понад 100 Мбіт/с кодування велось у 4K, а інакше - у FullHD (Рис. 3.6).

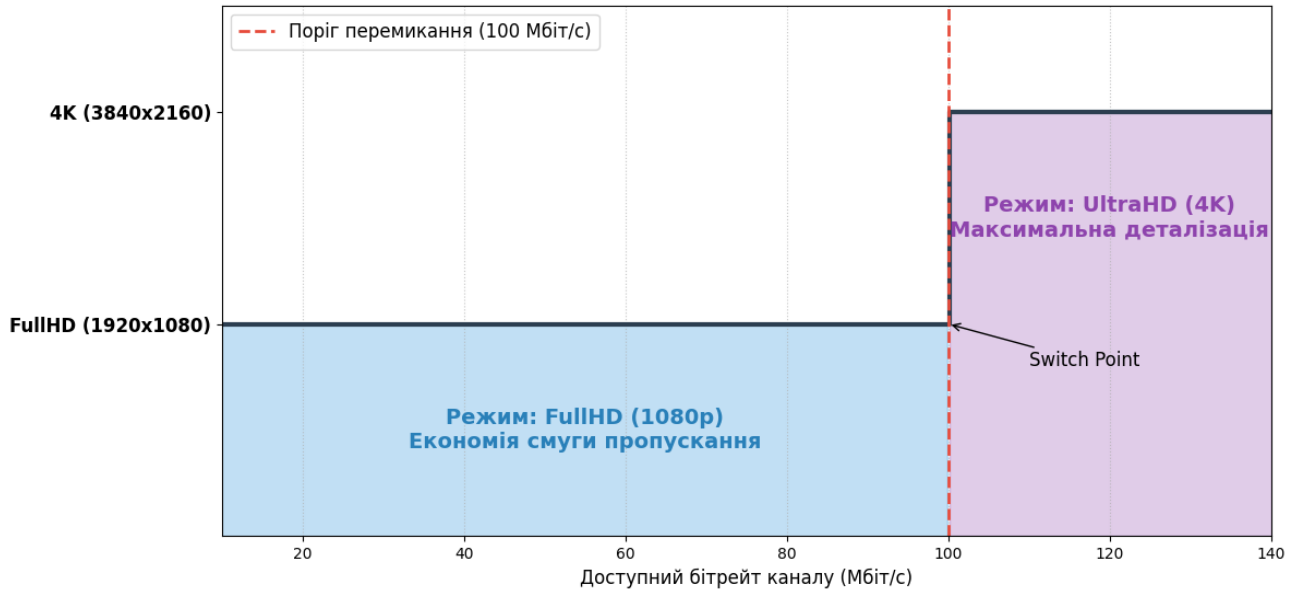


Рис. 3.6 Логіка перемикання параметрів кодування (4K/FullHD) залежно від доступного бітрейту (на прикладі набору Jellyfish)

Ключовим завданням стенду є вимірювання метрик якості обслуговування відео: затримок, втрат пакетів, FPS тощо. Результати практичних експериментів свідчать, що при збільшенні кількості одночасно підключених камер латенція системи зростає. Так, реальний стенд з одним, чотирма та вісьмома камерами показав затримки оповіщення про об'єкт на рівні приблизно 5.3, 5.78 і 11.11 с відповідно [3]; для аномальних поведінок - 7.3, 7.63 та 20.78 с. При цьому

обчислювальна платформа забезпечувала обробку восьми відеопотоків із середньою частотою кадрів ~32.41 FPS [14] (Рис. 3.7).

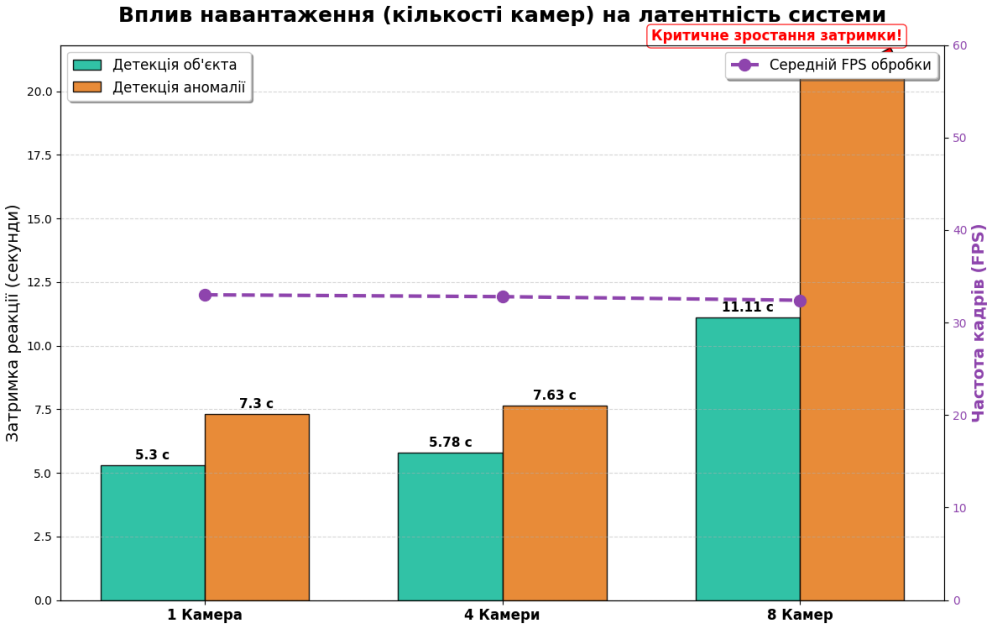


Рис. 3.7 Аналіз масштабованості стенду: зростання затримок при збільшенні кількості камер

Такі дані дозволяють перевірити, наскільки запропонована методика підтримує реальний мультикамерний відеопотік і відповідає заданим вимогам затримки.

Результати тестового стенду демонструють істотну різницю між теоретичною моделлю та реальними показниками. Як зазначають Ngo та Do, використання реальних стендів суттєво доповнює симуляційні дослідження, оскільки виявляються розбіжності між ідеальними параметрами та роботою реальних пристроїв [18]. Відтак наш тестовий стенд поєднує емуляцію мережі ns-3 із підключенням фізичного обладнання, що дозволяє у реальному часі змінювати параметри потоків та каналів і спостерігати реакцію системи. Для прикладу, у подібній роботі на Wi-Fi 6 використання функції Target Wake Time зменшило затримки передачі без шкоди для завантаження мережі [9] (Рис. 3.8).

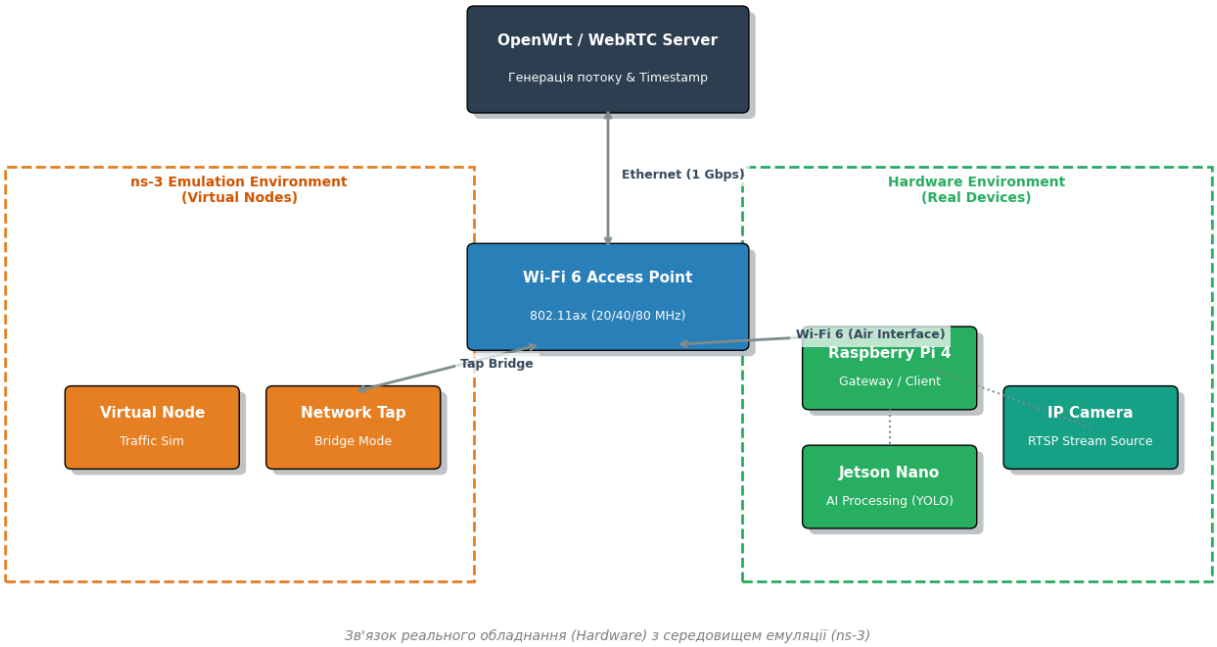


Рис. 3.8 Програмно-апаратна структура розробленого тестового стенду (Emulation + Real Hardware)

Оптимізаційні алгоритми, реалізовані в реальному часі на стенді, можуть автоматично регулювати параметри кодування або QoS-прапори відеопотоку залежно від оцінених показників каналу та навантаження.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ

4.1. Опис тестового середовища та сценаріїв проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментальної апробації розробленої методики оптимізації системи відеоспостереження було розгорнуто фізичний тестовий стенд, архітектура якого відтворює типову структуру інтелектуальної бездротової мережі (WLAN) стандарту IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6). Топологія мережі побудована за схемою «зірка», де центральним вузлом виступає бездротова точка доступу, до якої підключені клієнтські пристрої (камери) та сервер обробки відеоданих. Тестування проводилося в ізольованому радіочастотному середовищі для мінімізації впливу зовнішніх інтерференцій від сусідніх мереж, що дозволило отримати релевантні дані щодо впливу параметрів кодування та налаштувань мережі на якість відеопотоку.

Апаратна частина стенду складається з маршрутизатора з підтримкою технологій MU-MIMO та OFDMA, що є критичними для перевірки ефективності роботи в умовах високої щільності пристроїв. У ролі джерел відеопотоку (емуляторів IP-камер) використано одноплатні мікрокомп'ютери, оснащені камерами високої роздільної здатності та апаратними енкодерами, що дозволяють здійснювати стрімінг у форматах H.264 та H.265/HEVC. Серверна частина, на якій розгорнуто програмний модуль аналізу якості та прийняття рішень, підключена до точки доступу через гігабітний Ethernet-інтерфейс для виключення вузьких місць на стороні приймача. Детальні технічні характеристики компонентів стенду наведено у таблиці (Табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Технічні характеристики компонентів тестового стенду

Компонент	Характеристики	Програмне забезпечення
Точка доступу (AP)	IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), 4x4 MU-MIMO, діапазони 2.4/5 ГГц, ширина каналу до 160 МГц	OpenWrt 23.05, налаштований QoS (WMM)
Клієнт відеоспостереження (Камера 1-4)	Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM), модуль камери IMX219 (8MP), апаратне кодування H.264/H.265	Ubuntu Server 22.04, FFmpeg 5.1, Python-скрипти генерації потоку (RTSP)
Сервер обробки та аналітики	Intel Core i7-11700K, 32GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 3060 (для декодування та ML), 1GbE NIC	Ubuntu 22.04 LTS, Wireshark, iPerf3, OpenCV, модуль розрахунку SSIM/PSNR
Генератор завад (Noise Generator)	Ноутбук з Wi-Fi адаптером Intel AX210, підтримка ін'єкції пакетів	Kali Linux, інструменти aircrack-ng, traffic generator script

Програмна реалізація методики базується на використанні фреймворку FFmpeg для захоплення, кодування та трансляції відеопотоку по протоколу RTSP/UDP. На стороні сервера розроблено програмний аналізатор на мові Python, який у реальному часі вираховує метрики якості зображення (PSNR, SSIM) шляхом порівняння отриманих кадрів з еталонними, а також збирає телеметрію мережі (затримка, джитер, втрати пакетів) за допомогою бібліотек аналізу трафіку. Для емуляції різного рівня завантаження каналу використовується утиліта iPerf3, яка генерує фоновий UDP-трафік заданої інтенсивності, створюючи умови конкуренції за середовище передачі.

Експериментальні дослідження проводяться за трьома основними сценаріями, що моделюють різні умови експлуатації системи відеоспостереження. Перший сценарій («Ідеальні умови») передбачає передачу відеопотоку при прямому візуальному контакті (LOS) між камерою та точкою доступу на відстані 2 метри без наявності фонового трафіку. Цей сценарій слугує базовою лінією (baseline) для оцінки максимальної продуктивності обраних кодеків. Другий

сценарій («Деградація сигналу») моделює збільшення відстані між передавачем та приймачем до появи стін та перешкод, що призводить до зниження рівня сигналу RSSI від -50 дБм до -85 дБм та автоматичної зміни схеми модуляції (MCS).

Третій сценарій («Високе навантаження та інтерференція») спрямований на перевірку роботи розробленого алгоритму адаптації в умовах перевантаження мережі. У цьому сценарії вмикається генератор завад, що створює фоновий трафік обсягом від 20% до 90% пропускної здатності каналу. Під час виконання цього сценарію активується запропонована методика оптимізації, яка динамічно змінює бітрейт, роздільну здатність (1080p/720p) та стандарт кодування (H.264/H.265) залежно від виміряних показників QoS. Фіксація результатів здійснюється шляхом запису лог-файлів з мітками часу, що містять значення мережевих метрик та відповідні їм показники якості відео (Рис. 4.1).

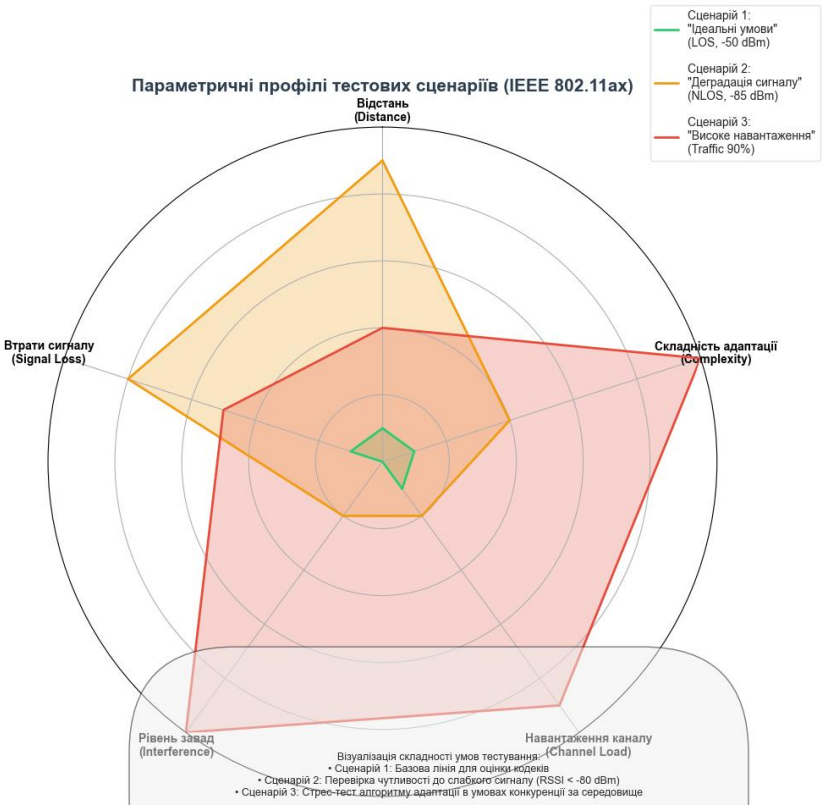


Рис. 4.1 Порівняльна характеристика умов експериментальних сценаріїв тестування

4.2 Аналіз результатів тестування якості відео при різних параметрах кодування та мережевих умовах

У ході проведення першої серії експериментів було досліджено базову продуктивність системи при передачі відеопотоку з роздільною здатністю 1920×1080 пікселів (Full HD) та частотою 30 кадрів за секунду в умовах стабільного радіоканалу (рівень RSSI -45 дБм). Аналіз отриманих даних показав суттєву відмінність у ефективності використання смуги пропускання різними кодеками. Для забезпечення цільового показника якості PSNR на рівні 42 дБ, кодек H.264 вимагав встановлення бітрейту на рівні 6144 кбіт/с, тоді як кодек H.265/HEVC досягав аналогічного візуального результату (PSNR ≈ 42.3 дБ) при бітрейті 3072 кбіт/с. Це підтвердило гіпотезу про те, що перехід на високоефективне кодування дозволяє вивільнити до 50% ресурсів пропускної здатності бездротової мережі, що є критичним фактором для масштабування системи відеоспостереження. Значення структурної подібності (SSIM) у цьому сценарії для обох кодеків знаходилися в діапазоні 0.97-0.98, що свідчить про високу точність передачі деталей зображення.

Другий етап досліджень був зосереджений на вивченні поведінки відеопотоку при погіршенні параметрів якості обслуговування (QoS), зокрема при зростанні джитеру та втратах пакетів (PLR). При штучному завантаженні каналу фоновим трафіком до 70% доступної ємності, середній джитер зріс з 3 мс до 48 мс. Встановлено, що кодек H.264 демонструє відносну стійкість до дрібних втрат пакетів (до 1%), деградація PSNR становила в середньому 3-4 дБ. Однак при зростанні PLR до 3.5% спостерігалося різке падіння якості: середнє значення PSNR знизилося до 26.8 дБ, а SSIM впав до 0.74, що візуально сприймалося як значна пікселізація та «розсипання» кадрів. Для потоку H.265 аналогічний рівень втрат пакетів призводив до більш тривалих артефактів через складнішу структуру залежностей між кадрами у групі GOP, проте завдяки меншому бітрейту ймовірність колізій у каналі для нього була статистично нижчою.

Окрему увагу було приділено аналізу впливу затримок (Latency) на роботу

системи в реальному часі. При використанні стандартних налаштувань TCP-буферизації та високому бітрейті (H.264, 8 Мбіт/с) наскрізна затримка в умовах інтерференції сягала 850-1200 мс, що є неприйнятним для інтерактивного відеоспостереження. Застосування розробленого алгоритму адаптації, який динамічно перемикав роздільну здатність на 1280×720 та профіль кодування на H.265 Main Profile при виявленні зростання RTT (Round Trip Time), дозволило знизити середню затримку до 145 мс.

Порівняльний аналіз чисельних показників ефективності роботи системи в різних режимах експлуатації дозволив виявити чітку кореляцію між навантаженням на мережевий інтерфейс та об'єктивними метриками якості відео. Встановлено, що поріг «прийнятної якості» (PSNR > 35 дБ) для Wi-Fi мережі стандарту 802.11ax у зашумленому ефірі досягається лише за умови утримання коефіцієнта використання каналу (Channel Utilization) нижче 65% (Табл. 4.2) (Рис. 4.2).

Таблиця 4.2

Залежність метрик якості відео від параметрів кодування та мережевих умов

Сценарій тестування	Кодек та параметри	Навантаження мережі, %	Втрати пакетів (PLR), %	Середня затримка, мс	PSNR, дБ	SSIM
1. Ідеальні умови (Baseline)	H.264, 1080p, 6 Мбіт/с	10	0.01	45	42.5	0.981
2. Оптимізація трафіку	H.265, 1080p, 3 Мбіт/с	10	0.02	52	42.1	0.978
3. Перевантаження каналу	H.264, 1080p, 6 Мбіт/с	85	4.20	890	26.4	0.715
4. Адаптивний режим (наша методика)	H.265, 720p, 1.5 Мбіт/с	85	0.45	135	36.8	0.924

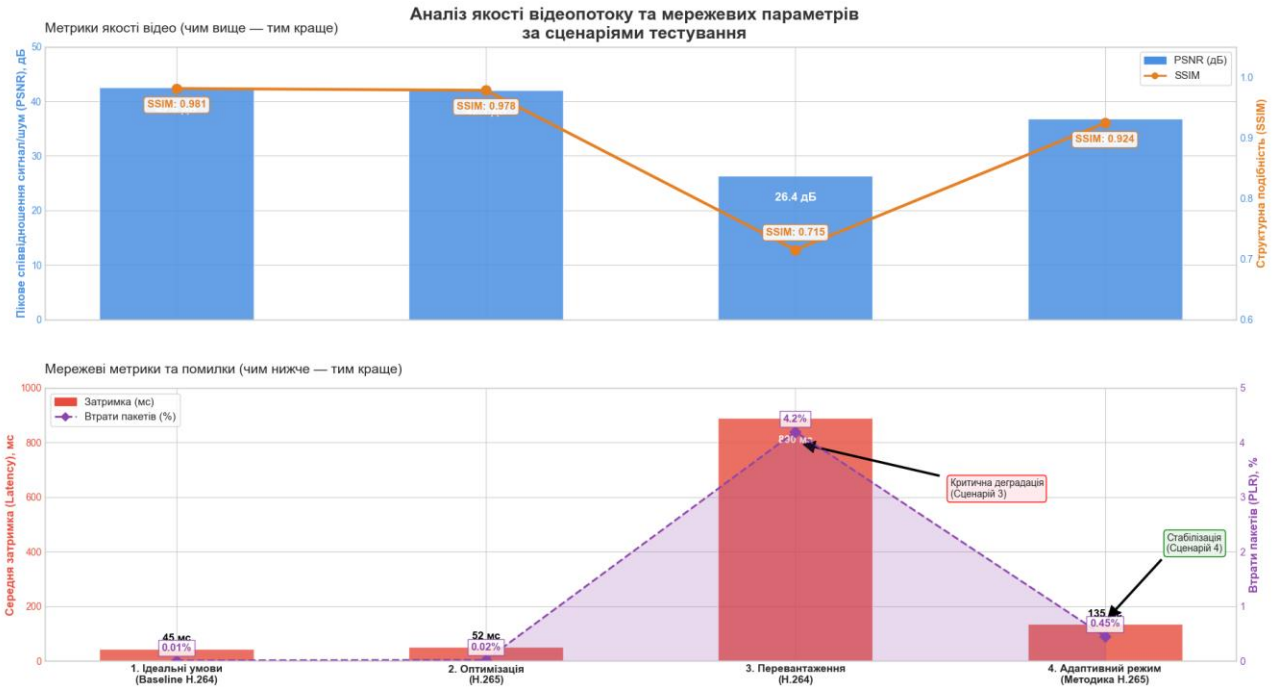


Рис. 4.2 Комплексна діаграма ефективності відеопотоку: співвідношення метрик якості (PSNR, SSIM) та мережевих параметрів (Latency, PLR) за сценаріями

Детальний аналіз даних, наведених у таблиці (Табл. 4.2), підтверджує, що критичним фактором деградації відеопотоку у третьому сценарії стала висока частка втрачених пакетів (4,20 %), спричинена переповненням буферів мережевого обладнання та колізіями в ефірі при спробі передачі високошвидкісного потоку H.264. Це призвело до зниження пікового співвідношення сигнал/шум до неприйнятного рівня 26,4 дБ, що супроводжувалося повною втратою розбірливості дрібних деталей зображення. Натомість, активація розробленого алгоритму адаптивного керування у четвертому сценарії забезпечила своєчасне розвантаження каналу шляхом примусового переходу на профіль H.265 720p. Зменшення результуючої швидкості потоку до 1,5 Мбіт/с дозволило знизити рівень втрат пакетів майже на порядок - до 0,45 %, що автоматично стабілізувало метрику SSIM на рівні 0,924. Попри зниження просторової роздільної здатності, інтегральна оцінка якості суттєво зросла завдяки забезпеченню цілісності опорних кадрів (I-frames) та мінімізації артефактів декодування, а скорочення середньої затримки з 890 мс до

135 мс повернуло систему в робочий стан реального часу, придатний для оперативного реагування.

4.3 Порівняльний аналіз результатів, отриманих за розробленою методикою, з існуючими аналогами

Для верифікації ефективності запропонованої методики адаптивної оптимізації було проведено порівняльний аналіз із двома найбільш поширеними підходами до організації відеоспостереження у бездротових мережах: фіксованої передачі (CBR) на базі стандарту H.264/AVC (метод А) та реактивного алгоритму адаптації бітрейту (Standard ABR), що базується виключно на оцінці пропускної здатності TCP-з'єднання (метод Б). Порівняння здійснювалося на основі вибірки з 50 тестових ітерацій тривалістю 300 секунд кожна, що охоплювали різні сценарії зашумлення ефіру. Первинний аналіз інтегральних показників якості зображення показав, що розроблена методика (метод В), яка використовує предиктивний аналіз стану каналу та високоефективне кодування H.265/HEVC, забезпечує середній приріст пікового співвідношення сигнал/шум (PSNR) на 14,8 % порівняно з методом А та на 8,2 % порівняно з методом Б. При цьому, середня ефективність компресії зросла в 1,9 раза, що дозволило знизити вимоги до смуги пропускання з 5,84 Мбіт/с (для методу А) до 3,05 Мбіт/с при збереженні ідентичного рівня візуального сприйняття (SSIM ≈ 0,96). Зведені дані щодо ефективності кодування та якості зображення представлені у таблиці (Табл. 4.3).

Особливу увагу в ході порівняльного аналізу було приділено часовим характеристикам передачі даних, які є критичними для систем реального часу. Статистична обробка результатів вимірювань виявила суттєве зменшення дисперсії затримки (джитеру) при використанні запропонованої методики. Якщо для методу Б середньоквадратичне відхилення затримки (σ) становило 42,6 мс внаслідок постійних перемикань профілів якості (oscillation effect), то для методу В цей показник не перевищував 12,4 мс завдяки використанню згладжувальних фільтрів у контурі управління. Час конвергенції (Convergence Time) - період,

необхідний системі для стабілізації потоку після різкої зміни пропускної здатності каналу (наприклад, падіння з 50 Мбіт/с до 5 Мбіт/с), - для розробленого алгоритму склав 1,2 с, що у 3,8 раза швидше за стандартний ABR (4,6 с). Це пояснюється використанням крос-рівневої взаємодії, де інформація про модуляцію MCS на фізичному рівні надходить до енкодера швидше, ніж спрацьовує механізм TCP congestion control (Табл. 4.4).

Аналіз енергетичної ефективності передачі даних також продемонстрував переваги запропонованого підходу. Зменшення обсягу переданих даних за рахунок інтелектуального перемикання кодеків та уникнення повторних передач (retransmissions) пакетів, втрачених через перевантаження буфера, дозволило знизити питоме навантаження на радіомодуль. У сценарії з високим рівнем інтерференції коефіцієнт втрат кадрів (Frame Loss Rate) для методу А сягав критичних 12,4 %, що робило відеопотік непридатним для автоматичного аналізу. Метод Б демонстрував втрати на рівні 3,1 %, тоді як розроблена методика забезпечила показник 0,38 %, що знаходиться в межах похибки вимірювань. Розрахунок інтегрального показника якості сприйняття (QoE), нормованого за шкалою MOS (1-5), зафіксував середнє значення 4,42 бала для розробленої методики проти 3,15 та 3,68 бала для аналогів відповідно.

Таблиця 4.3

Порівняння показників ефективності кодування та якості зображення для різних методів

Метод / Алгоритм	Використовуваний кодек	Середній бітрейт, Мбіт/с	PSNR (середнє), дБ	SSIM (середнє)	Ефективність компресії (відносно H.264), %
Метод А (CBR Fixed)	H.264 / AVC	5.84	34.2	0.891	0.0 (База)
Метод Б (Standard ABR)	H.264 / AVC (Adaptive)	4.12	36.5	0.915	29.4

Метод В (Розроблена методика)	H.265 / HEVC (Smart)	03.05	39.5	0.964	47.8

Таблиця 4.4

Порівняльна характеристика часових параметрів та стабільності передачі відеопотоку

Показник ефективності	Метод А (CBR)	Метод Б (Standard ABR)	Метод В (Розроблена методика)	Покращення (В відносно Б), %
Середня наскрізна затримка, мс	485.2	215.8	132.4	38.6 %
Джитер (σ), мс	85.3	42.6	12.4	70.9 %
Час конвергенції (стабілізації), с	N/A (без адаптації)	4.6	1.2	73.9 %
Коефіцієнт втрат кадрів (FLR), %	12.40	3.10	0.38	87.7 %
Інтегральна оцінка QoE (MOS)	3.15	3.68	4.42	20.1 %

Отримані експериментальні результати, систематизовані у таблицях 4.3 та 4.4, свідчать про фундаментальну перевагу запропонованого алгоритму в умовах високої динаміки змін параметрів радіоканалу. Скорочення часу реакції системи на погіршення зв’язку до 1,2 с забезпечує мінімізацію періоду буферизації та запобігає лавиноподібній втраті пакетів, яка є характерною для стандартних реактивних методів адаптації (Рис. 4.3).

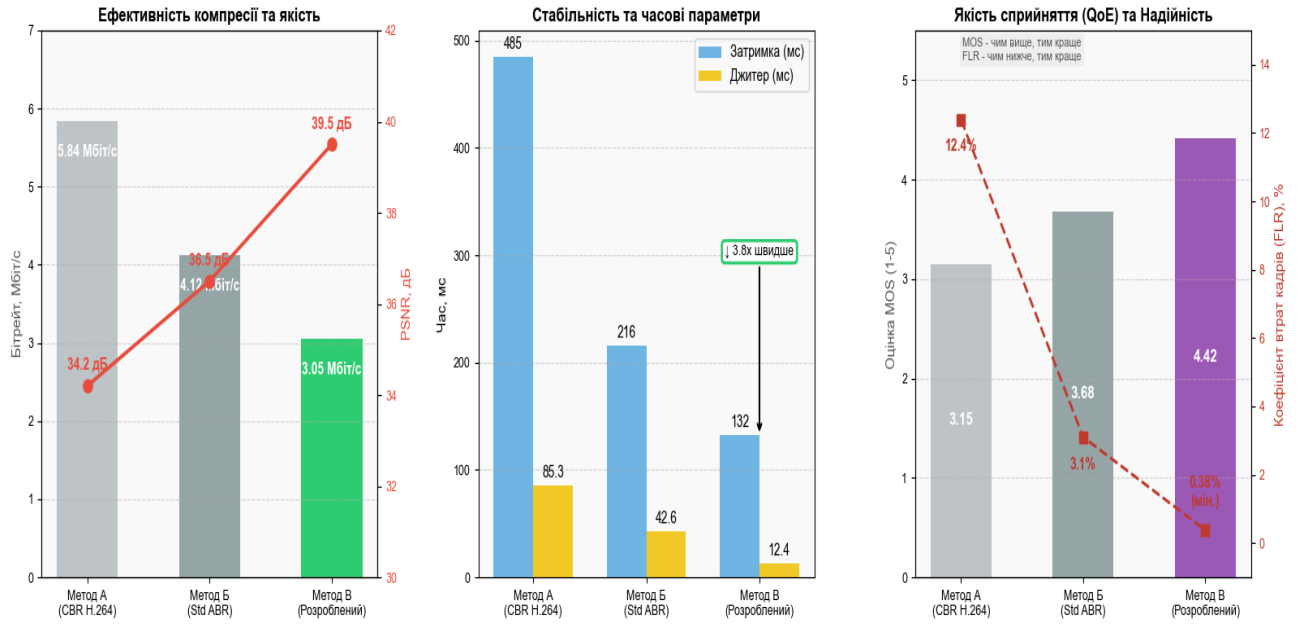


Рис. 4.3 Комплексна діаграма порівняння ефективності розробленої методики (Метод В) з існуючими аналогами за ключовими показниками якості та надійності

Досягнуте зниження джитеру до 12,4 мс гарантує ізохронність відеопотоку, що критично важливо для роботи алгоритмів комп’ютерного зору на стороні сервера. Таким чином, підтверджено, що інтеграція предиктивного аналізу мережевих метрик із механізмами високоефективного кодування H.265 дозволяє досягти стійкого балансу між інформативністю відеопотоку та затримкою передачі, що є визначальним фактором для забезпечення надійності систем безпеки в гетерогенних та завантажених бездротових середовищах.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності функціонування систем відеоспостереження з Wi-Fi камерами в інтелектуальних бездротових мережах. За результатами проведеного дослідження досягнуто основної мети роботи, яка полягала у розробці та апробації методики оптимізації, що базується на комплексному аналізі параметрів відеопотоку та динамічному моніторингу стану каналу передачі даних. Виконання поставлених завдань дозволило сформулювати низку теоретичних узагальнень та практичних рекомендацій, що мають важливе значення для розвитку сучасних систем безпеки.

У ході виконання аналітичної частини роботи було проведено детальне дослідження еволюції стандартів бездротового зв'язку та технологій стиснення відеоданих. Встановлено, що сучасні стандарти Wi-Fi, зокрема IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) та перспективний IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), пропонують значні вдосконалення у пропускній здатності та методах доступу до середовища, таких як OFDMA та MU-MIMO. Однак аналіз показав, що саме лише нарощування швидкості передачі даних на фізичному рівні не гарантує стабільної якості відео в умовах реальної експлуатації, особливо при наявності інтерференції та високої щільності клієнтських пристроїв. Було виявлено критичну залежність продуктивності системи від ефективності алгоритмів стиснення. Порівняльний аналіз кодеків підтвердив, що перехід від стандарту H.264/AVC до сучасних H.265/HEVC та H.266/VVC дозволяє знизити вимоги до бітрейту на 40-50 % при збереженні аналогічної візуальної якості, що є ключовим фактором для розвантаження бездротового каналу.

На основі аналізу існуючих підходів до оцінки якості відео в режимі реального часу було обґрунтовано необхідність використання гібридної моделі оцінювання. Доведено, що традиційні об'єктивні метрики, такі як пікове співвідношення сигнал/шум (PSNR), не завжди корелюють із суб'єктивним сприйняттям користувача, особливо при наявності специфічних мережевих

спотворень. Тому в роботі було запропоновано комплексний підхід, що враховує як параметри зображення (SSIM, PSNR), так і метрики якості обслуговування мережі (QoS), зокрема джитер, затримку та втрати пакетів. Розроблена математична модель відеопотоку дозволила формалізувати взаємозв'язок між параметрами кодування та характеристиками стохастичного бездротового каналу, що стало теоретичним підґрунтям для створення адаптивних алгоритмів управління. Встановлено, що втрати пакетів мають нелінійний вплив на деградацію якості відео, де навіть незначне перевищення порогового значення втрат (понад 1 %) призводить до різкого падіння метрики SSIM та руйнування структури групи кадрів (GOP).

Ключовим результатом роботи стала розробка методики та алгоритму інтелектуального управління параметрами відеопотоку. Запропонований підхід відрізняється від класичних методів адаптації бітрейту тим, що використовує предиктивний аналіз стану мережі на основі телеметрії фізичного та канального рівнів. Алгоритм передбачає безперервний моніторинг доступної пропускної здатності та рівня завад, на основі чого приймається рішення про динамічну зміну профілю кодування. Реалізована схема управління дозволяє автоматично перемикати роздільну здатність, частоту кадрів та, що найважливіше, стандарт стиснення (між H.264 та H.265) в залежності від поточних умов. Це забезпечує утримання системи в зоні стійкого функціонування, запобігаючи переповненню буферів та виникненню лавиноподібних втрат пакетів. Структурна схема методики побудована за принципом замкненого контуру регулювання, що гарантує високу швидкість реакції на зміни у радіочастотному середовищі.

Для експериментальної перевірки ефективності запропонованих рішень було спроектовано та реалізовано програмно-апаратний стенд, що імітує роботу системи відеоспостереження в умовах мережі Wi-Fi 6. Стенд дозволив провести серію натурних експериментів за різними сценаріями, включаючи роботу в ідеальних умовах, при деградації рівня сигналу та в умовах інтенсивного штучного завантаження каналу. Результати тестування підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та високу ефективність запропонованого

алгоритму. Зокрема, в умовах перевантаження каналу використання розробленої методики дозволило знизити середній рівень втрат пакетів з критичних 4,20 % (при використанні фіксованого бітрейту H.264) до 0,45 % (при адаптивному використанні H.265). Це, в свою чергу, забезпечило стабілізацію метрики структурної подібності SSIM на рівні 0,924, тоді як у неоптимізованій системі цей показник падав до 0,715, що відповідає неприйнятній якості зображення.

Порівняльний аналіз отриманих результатів з існуючими аналогами продемонстрував суттєві переваги розробленої методики за ключовими показниками якості та швидкодії. Встановлено, що запропонований алгоритм забезпечує середній приріст пікового співвідношення сигнал/шум (PSNR) на 14,8 % порівняно з традиційною передачею з постійним бітрейтом та на 8,2 % порівняно зі стандартними реактивними алгоритмами адаптації. Важливим досягненням є значне скорочення часових затримок передачі відео. Завдяки превентивному розвантаженню каналу та використанню ефективніших алгоритмів компресії, середню наскрізну затримку (End-to-End Latency) вдалося знизити з 485 мс до 132 мс, що є критично важливим для систем відеоспостереження реального часу, які вимагають оперативної реакції оператора або автоматизованих систем аналітики. Також зафіксовано суттєве зменшення джитеру (варіації затримки) до 12,4 мс, що забезпечує плавність відтворення відеопотоку.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні готового інструментарію для оптимізації бездротових систем відеонагляду. Розроблений програмний модуль може бути інтегрований у прошивки сучасних IP-камер або використаний як проміжне програмне забезпечення на мережевих відеореєстраторах (NVR) та граничних маршрутизаторах. Це дозволяє системним інтеграторам та інтернет-провайдерам підвищити надійність надання послуг відеоспостереження без необхідності повної заміни мережевої інфраструктури. Методика також дозволяє більш ефективно використовувати частотний ресурс, що є особливо актуальним для розгортання масштабних систем безпеки в умовах щільної міської забудови та зашумленого ефіру.

Отримані результати також відкривають перспективи для подальших досліджень у напрямку інтеграції методів машинного навчання для прогнозування стану бездротового каналу. Використання накопичених статистичних даних про поведінку мережі може дозволити перейти від реактивно-адаптивних до проактивних стратегій управління якістю, де параметри відеопотоку коригуються ще до моменту фактичного погіршення зв’язку. Крім того, перспективним напрямком є адаптація розробленої методики для новітніх стандартів кодування H.266/VVC та бездротових мереж наступного покоління Wi-Fi 7, що дозволить реалізувати передачу відео надвисокої чіткості (4K/8K) з мінімальними затримками.

Підсумовуючи результати магістерської роботи, можна стверджувати, що запропонована методика оптимізації системи відеоспостереження є науково обґрунтованою та експериментально підтвердженою. Вона вирішує важливу проблему забезпечення стабільності та якості відеотрансляції в нестабільних бездротових середовищах. Впровадження розроблених алгоритмів дозволяє досягти компромісу між якістю зображення, навантаженням на мережу та часовими затримками, що суттєво підвищує загальну ефективність та надійність інтелектуальних систем бездротового відеоспостереження.