Павляшик Ю.В., Астраханцев А.А. Вдосконалення якості сервісів мережі LTE шляхом урахування впливу показників радіосигналу. Стаття присвячена дослідженню впливу радіопараметрів RSRP та SINR на якість сервісів, що надаються у мережах LTE. Сучасні мобільні мережі суттєво залежать від стану радіоканалу, а зміна рівня сигналу та завад безпосередньо впливає на пропускну здатність, затримку, стабільність з'єднання та якість користувацьких послуг. У роботі проаналізовано залежності між параметрами RSRP, SINR та ключовими показниками QoS: Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate і Call Drop Rate. Модель охоплює весь стек протоколів LTE — від PHY до APP, що дозволяє комплексно оцінити механізми деградації якості при погіршенні радіоумов. Дослідження базується на реальних експериментальних вимірюваннях та охоплює різні типи сервісів, включаючи VoLTE, відеодзвінки, онлайн-ігри, буферизоване та live-відео, TCP-з'єднання. Отримані результати засвідчують, що зменшення RSRP і SINR призводить до зниження швидкості передачі даних, зростання затримок та погіршення якості голосових викликів, а також збільшує ймовірність невдалих спроб встановлення з'єднання та обривів викликів. Запропоновано рекомендації щодо підвищення якості обслуговування шляхом оптимізації параметрів базових станцій і радіоресурсів.

Ключові слова: LTE, RSRP, SINR, якість сервісів, пропускна здатність, затримка, обриви викликів, VoLTE.

Вступ

Сучасні мобільні мережі LTE забезпечують високошвидкісну передачу даних та підтримку широкого спектру сервісів, включаючи голосові дзвінки, відео та обмін даними в реальному часі. Проте ефективність роботи мережі значною мірою залежить від показників радіосигналу, таких як RSRP та SINR, які визначають стабільність з'єднання, швидкість передачі даних та якість користувацьких сервісів.

У реальних умовах експлуатації мережі мобільні користувачі можуть перебувати у різних середовищах, що супроводжується зміною рівня сигналу, появою завад та коливанням параметрів радіоканалу. Це може призводити до зниження продуктивності мережі, збільшення затримок, втрати пакетів та розривів дзвінків.

Вдосконалення якості сервісів мережі LTE шляхом врахування впливу показників радіосигналу, що дозволяє розробити рекомендації та методи оптимізації для підвищення стабільності та ефективності роботи мережі. У межах дослідження проведено аналіз впливу RSRP та SINR на швидкість передачі даних, затримки, показники невдалих спроб встановлення з'єднання та розривів дзвінків, а також оцінено ефективність роботи різних рівнів стеку протоколів LTE від PHY до APP.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [1–3] розглядаються різні підходи до оцінювання продуктивності та ключових показників якості сервісів у мережах LTE за умов змінних радіоумов. У [1] досліджено вплив параметрів RSRP та SINR на площу покриття, якість прийому та роботу мережі в режимах FDD і TDD, а також проаналізовано залежність стабільності каналу від рівня завад та щільності абонентів. У [2] проаналізовано методи оптимізації KPI LTE та виявлено закономірності зміни пропускної здатності та затримок залежно від якості радіосигналу та навантаження на соту. Автори також акцентують увагу на деградації Throughput при зниженні SINR та зростанні кількості повторних передач на рівні MAC/RLC. У [3] представлено порівняльний аналіз якості сервісів LTE у різних умовах міського середовища, де доведено, що недостатній рівень сигналу та високі інтерференції спричиняють збільшення втрат пакетів, падіння швидкості та зростання затримок.

У роботах [4–6] підкреслюється важливість взаємозв'язку між радіопоказниками та якістю голосових сервісів. Зокрема, у [4] наведено результати реальних вимірювань POLQA у мережах LTE та доведено чутливість голосових викликів до зниження RSRP нижче –110 дБм. У [5] показано вплив інтенсивності трафіку та якості каналу на обриви викликів (Call Drop Rate) і ймовірність невдалого встановлення з'єднання (Call Setup Fail Rate). Дослідження [6] присвячене аналізу хендоверу, де встановлено, що низький SINR призводить до зростання кількості помилок під час процедури передавання з'єднання, що напряму впливає на стабільність сервісів.

У серії праць [7–11] розглянуто загальні підходи до аналізу KPI у 4G/5G-мережах та

порівняльні дослідження продуктивності при різних значеннях радіопараметрів. Зокрема, у [7] показано, що деградація RSRP та SINR є основною причиною падіння ефективності LTE у густонаселених районах. У [8–10] розглядаються залежності показників QoS від розподілу частот, ширини каналу та типу сервісу (VoLTE, відеострімінг, онлайн-ігри), що дозволяє зробити висновок про важливість адаптивного управління радіоресурсами. У [11] проаналізовано еволюцію мобільних технологій та підкреслено, що показники якості LTE залишаються критично важливими для підтримки сервісів під час переходу до 5G.

Загалом проведені дослідження підтверджують суттєвий вплив параметрів радіосигналу — насамперед RSRP та SINR — на пропускну здатність, затримку, якість голосових викликів та стабільність з'єднання в мережах LTE. У більшості робіт акцентовано увагу на необхідності комплексного аналізу KPI та оптимізації параметрів радіодоступу для забезпечення високої якості обслуговування користувачів.

Постановка завдання. Ефективність функціонування мобільних мереж значною мірою залежить від стабільності радіоканалу, параметрів сигналу та механізмів управління радіоресурсами. В умовах зростання обсягів трафіку та різноманітності типів сервісів забезпечення належної якості обслуговування користувачів (Quality of Service, QoS) є одним із ключових завдань операторів зв'язку.

Основною метою даного дослідження є оцінка впливу основних радіопоказників на якість сервісів LTE та розроблення рекомендацій щодо підвищення рівня обслуговування користувачів шляхом оптимізації параметрів мережі.

Для досягнення цієї мети необхідно було провести комплексний аналіз взаємозв'язку між показниками радіосигналу – RSRP (Reference Signal Received Power) та SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) – і основними характеристиками якості обслуговування (Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate, Call Drop Rate). Ці параметри визначають не лише технічну ефективність роботи мережі, але й реальну якість сприйняття сервісів користувачем.

Для реалізації поставленої задачі було розроблено модель, що дозволяє оцінити зміну якості передачі даних у стеку протоколів LTE при різних умовах прийому сигналу. Модель охоплює всі рівні LTE-протоколів – від PHY до APP, що забезпечує комплексний аналіз від фізичних процесів до рівня користувацьких сервісів.

PHY (Physical Layer – фізичний рівень) відповідає за фактичну передачу сигналу по радіоканалу. На цьому рівні враховуються параметри модуляції, частотний ресурс, потужність сигналу та рівень завад. Погіршення RSRP або SINR безпосередньо призводить до зниження пропускної здатності, збільшення кількості помилок та повторних передач.

MAC (Medium Access Control – рівень керування доступом до середовища) на цьому рівні реалізується механізм розподілу ресурсів між користувачами та управління плануванням (scheduling). Зі зниженням SINR кількість доступних ресурсних блоків для користувача зменшується, що викликає падіння Throughput.

RLC (Radio Link Control – рівень керування радіоканалом) відповідає за збереження цілісності даних. При низькому RSRP або SINR зростає кількість повторних передач (ARQ), що призводить до підвищення затримки (Ping) та зменшення реальної швидкості передачі даних.

PDCP (Packet Data Convergence Protocol) здійснює шифрування, стиснення заголовків і повторну передачу при хендовері. Погіршення сигналу на нижчих рівнях викликає додаткову обробку на PDCP, що впливає на затримку та стабільність з'єднання.

APP (Application Layer – рівень додатків) на найвищому рівні відображається фактична якість користувацького досвіду. Незважаючи на зниження показників RSRP та SINR, саме APP-рівень демонструє відносну стабільність завдяки оптимізації та буферизації на нижчих рівнях.

Метою роботи є комплексне оцінювання впливу ключових показників радіосигналу на якість послуг у мережі LTE та розроблення науково обґрунтованих підходів до підвищення ефективності їх надання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Досліджувані сервіси

Для оцінки впливу радіопоказників обрано основні типи сервісів, що відрізняються за вимогами до затримки, стабільності та пропускної здатності:

Conversational Voice – голосові дзвінки в реальному часі (VoLTE), які потребують гарантованої швидкості (GBR) та мінімальної затримки;

Conversational Video – відеодзвінки у реальному часі (наприклад, Zoom, WhatsApp), критично чутливі до затримок.

Real-time Gaming – інтерактивні онлайн-ігри, для яких важлива швидка реакція та стабільний канал зв'язку;

Non-conversational Video Buffered Streaming – відеосервіси з буферизацією (YouTube, Netflix), для яких важливий стабільний Throughput;

Live Streaming – пряма трансляція з низькою затримкою;

IMS Signaling – сигналізаційний трафік для встановлення з'єднань у мережі;

TCP Based Applications – додатки, що працюють через TCP, із різним рівнем пріоритету (привілейовані/звичайні користувачі).

2. Показники оцінювання якості

Для комплексної оцінки якості обслуговування були використані такі ключові показники:

Throughput (DL/UL) – швидкість передачі даних у напрямках downlink та uplink;

Ping (Delay) – час затримки передачі пакетів;

Jitter — коливання часу надходження пакетів;

Packet Loss – відсоток втрачених пакетів;

POLQA – об'єктивна оцінка якості голосових викликів;

Call Setup Fail Rate – ймовірність невдалого встановлення з'єднання;

Call Drop Rate – ймовірність обриву активного виклику.

Формулювання задачі:

На основі зазначених параметрів задача дослідження формулюється таким чином: визначити закономірності впливу показників RSRP та SINR на ключові характеристики якості обслуговування користувачів LTE (Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate, Call Drop Rate) та розробити практичні рекомендації для підвищення стабільності роботи мережі.

Для цього було проведено моделювання залежностей між параметрами сигналу та якістю сервісів на всіх рівнях протоколів LTE. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації налаштувань базових станцій, планування покриття, а також покращення користувацького досвіду шляхом адаптації мережевих параметрів до реальних умов сигналу.

3. Математична модель

Оцінювання якості сервісів LTE здійснювалося на основі аналізу основних параметрів радіосигналу, які безпосередньо впливають на продуктивність мережі та користувацький досвід. Для формування достовірної моделі впливу радіопоказників було поєднано аналітичний та емпіричний підходи.

На аналітичному рівні дослідження передбачає врахування фізичних параметрів сигналу, що характеризують стан радіоканалу. Серед них ключову роль відіграють RSRP (Reference Signal Received Power) – потужність прийнятого опорного сигналу, та SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) – відношення корисного сигналу до суми завад і шуму. Вони визначають якість прийому, рівень завадостійкості та стабільність передачі даних.

Аналітичні співвідношення для цих параметрів задаються метриками (таб. 1.).

Таблиця 1.

Метрики для оцінки якості побудованих моделей.

Метрика	Формула
Співвідношення корисного сигналу до рівня шуму та перешкод	SINR = 1/(1/(12·RSRQ) – x)
Потужність прийнятого опорного сигналу	RSRP = (RSRQ·RSSI)/N

де x – частка потужності корисного сигналу в загальній прийнятій потужності каналу. В аналітичній формі може бути подана як відношення RSRP до RSSI.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – загальна потужність, прийнята в указаній смузі частот, яка включає потужність корисного сигналу, інтерференцію та шум.

RSRQ (Reference Signal Received Quality) – показник якості сигналу, який визначається співвідношенням між RSRP та RSSI. N – кількість ресурсних блоків (Resource Blocks), у межах яких виконується вимірювання RSSI.

Практична частина дослідження базується на емпіричному вимірюванні параметрів у реальних умовах функціонування мережі LTE.

Збір даних проводився за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке автоматично реєструє показники радіосигналу (RSRP, SINR, RSRQ, RSSI) та характеристики якості сервісів (Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate, Call Drop Rate).

Програма здійснює безперервне вимірювання параметрів з фіксацією геолокації, часу, ID стільника та типу з’єднання, що дозволяє здійснювати детальний просторово-часовий аналіз якості обслуговування. Кожен запис містить повний набір радіо- та сервісних показників, що забезпечує можливість статистичного порівняння та виявлення закономірностей.

4. Етапи дослідження

Після збору даних дослідження проводилось у кілька послідовних етапів.

На першому етапі здійснювалась серія тестувань у різних умовах прийому сигналу, що дозволило зафіксувати широкий діапазон значень радіопараметрів (RSRP, SINR) та відповідних показників якості сервісів (Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate, Call Drop Rate). Кожен тест включав безперервне вимірювання параметрів під час роботи мережі LTE з фіксацією часу, типу сервісу та характеристик радіосередовища.

На другому етапі всі отримані результати було зібрано та узагальнено для подальшого аналізу. Для кожного діапазону параметрів сигналу (наприклад, RSRP від –120 до –110 дБм, SINR від 0 до 5 дБ тощо) визначалися середні значення показників якості обслуговування (QoS), таких як Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate та Call Drop Rate.

На основі зібраних результатів були побудовані графіки залежностей, які відображають взаємозв’язок між рівнем сигналу (RSRP, SINR) та якістю сервісів на різних рівнях роботи мережі. Такі графіки дозволили наочно показати, як зміна параметрів радіоканалу впливає на пропускну здатність, затримку передачі, стабільність викликів та якість голосових сервісів.

Таким чином, методика оцінювання ґрунтується на реальних експериментальних вимірюваннях, проведених у процесі багатократних тестувань.

5. Результати дослідження

На рис. 1,2 наведено результати аналізу залежності швидкості передачі даних (Throughput) у напрямках uplink (UL) та downlink (DL) від рівня сигналу RSRP при різних значеннях SINR. Було розглянуто два випадки:

SINR ≈ 25 дБ – умови стабільного сигналу з мінімальними завадами;

SINR ≈ 0 дБ – умови сильних завад і низької якості прийому.

Отримані залежності (рис. 1-4) демонструють, що зі зниженням рівня сигналу RSRP спостерігається поступове зменшення швидкості передачі даних в обох напрямках.

При високому SINR (приблизно 25 дБ) пропускна здатність залишається стабільною навіть за відносно низьких рівнів сигналу, що свідчить про ефективну роботу механізмів адаптації модуляції та кодування.

В умовах низького SINR (0 дБ) Throughput різко зменшується, особливо в uplink, де вплив завад на передавальний канал є найбільш критичним.

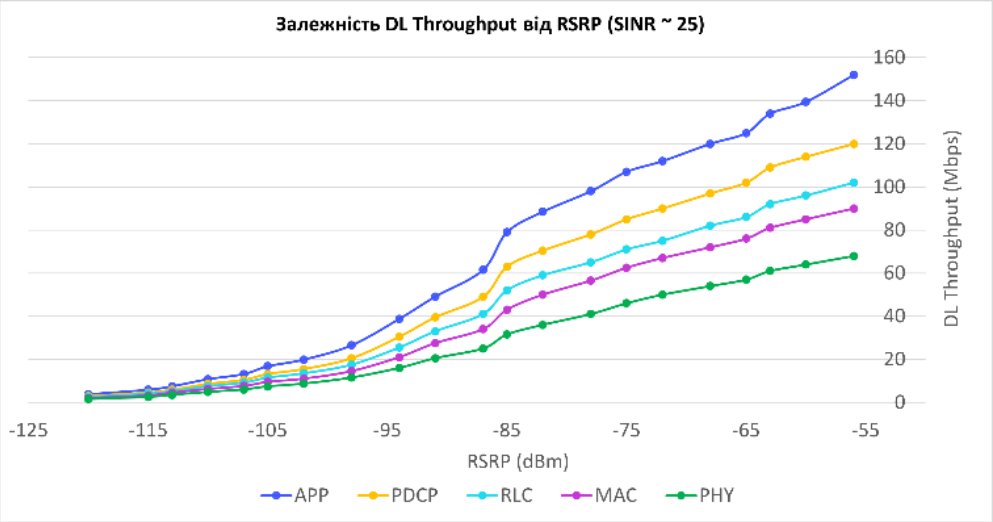


Рис. 1. Залежність DL Throughput від RSRP (SINR ~ 25)

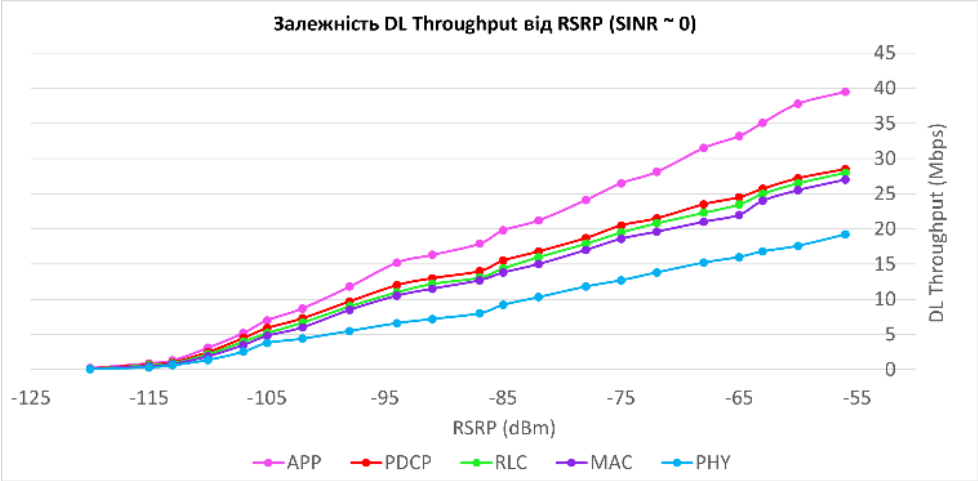


Рис. 2. Залежність DL Throughput від RSRP (SINR ~ 0)

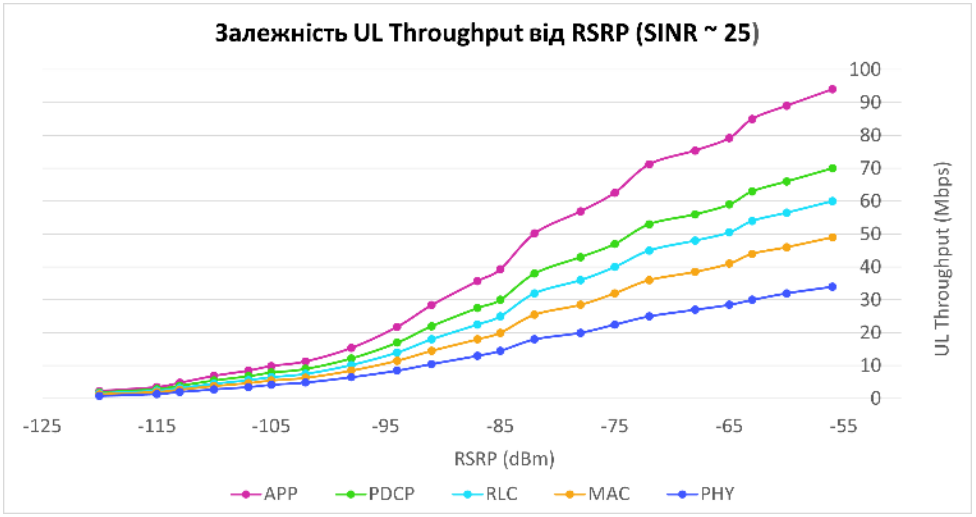


Рис. 3. Залежність UL Throughput від RSRP (SINR ~ 25)

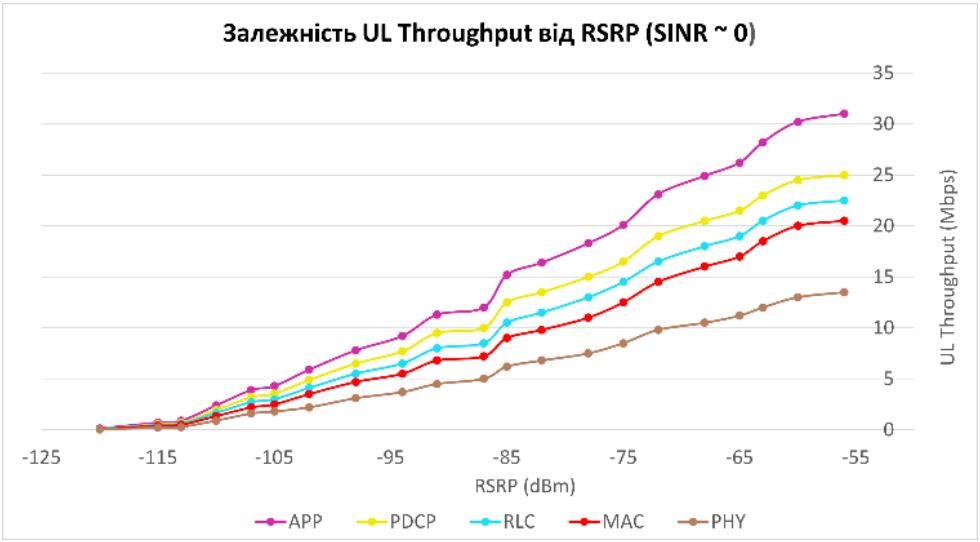


Рис. 4. Залежність UL Throughput від RSRP (SINR ~ 0)

На рис. 5 наведено залежність об’єктивної якості голосового виклику від рівня прийнятого сигналу. Отримані результати демонструють, що при зниженні RSRP показник POLQA різко погіршується, що вказує на зменшення чіткості мовлення, виникнення затримок та збільшення спотворень. У зоні слабкого сигналу (нижче –110 дБм) значення POLQA стає критично низьким, що свідчить про неможливість забезпечення високої якості VoLTE-викликів. Таким чином, рівень RSRP є одним із ключових факторів, що визначає суб’єктивну якість голосових сервісів у мережі LTE.

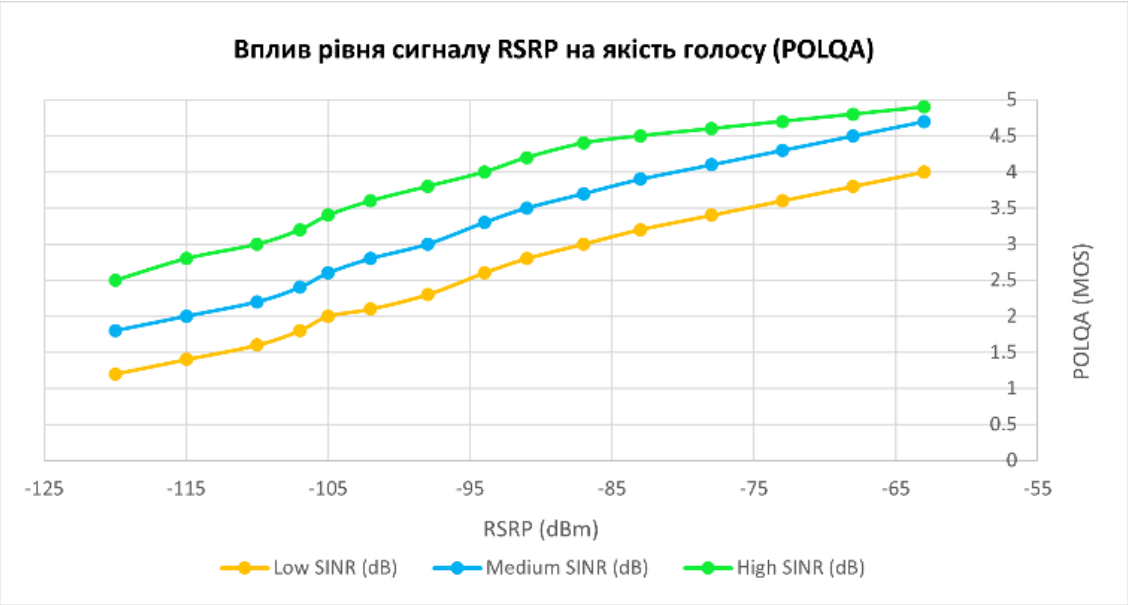


Рис. 5. Вплив рівня сигналу RSRP на якість голосу (POLQA)

На рис. 6 наведено зміну затримки передачі (Ping) залежно від рівня сигналу та кількості активних користувачів у стільнику. Результати показують, що в умовах слабкого сигналу затримка збільшується через неефективне використання радіоресурсів, повторні передачі пакетів та зниження модуляції на PHY-рівні.

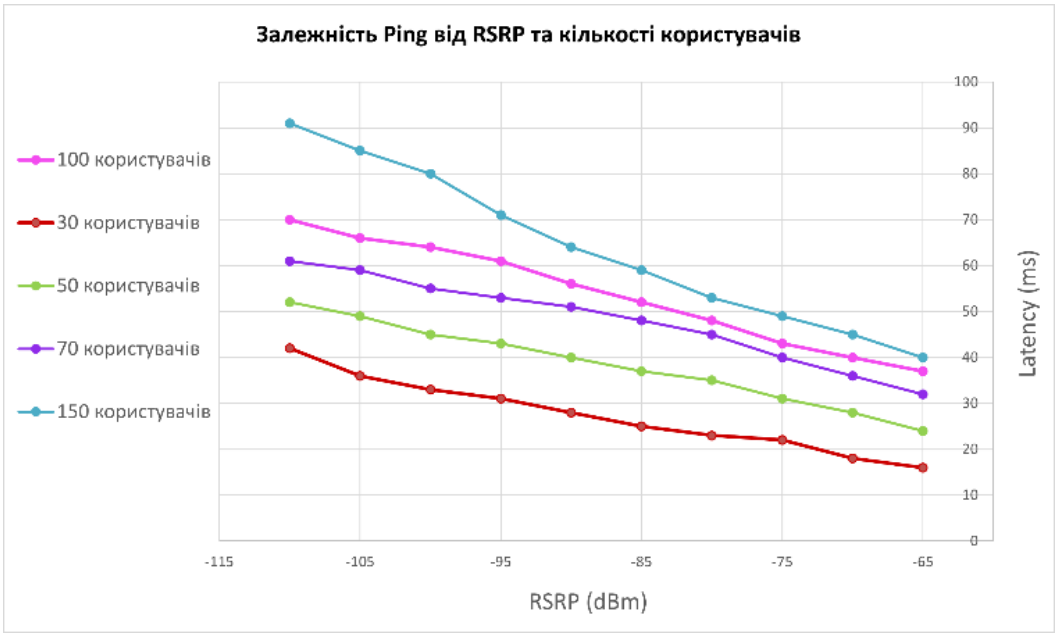


Рис. 6. Залежність Ping від RSRP та кількості користувачів

Крім того, при збільшенні кількості користувачів Ping зростає навіть за задовільних значень RSRP, що свідчить про зростання навантаження на планувальник ресурсів (scheduler) та обмеження пропускної здатності. Таким чином, Ping залежить як від якості сигналу, так і від рівня завантаженості стільника.

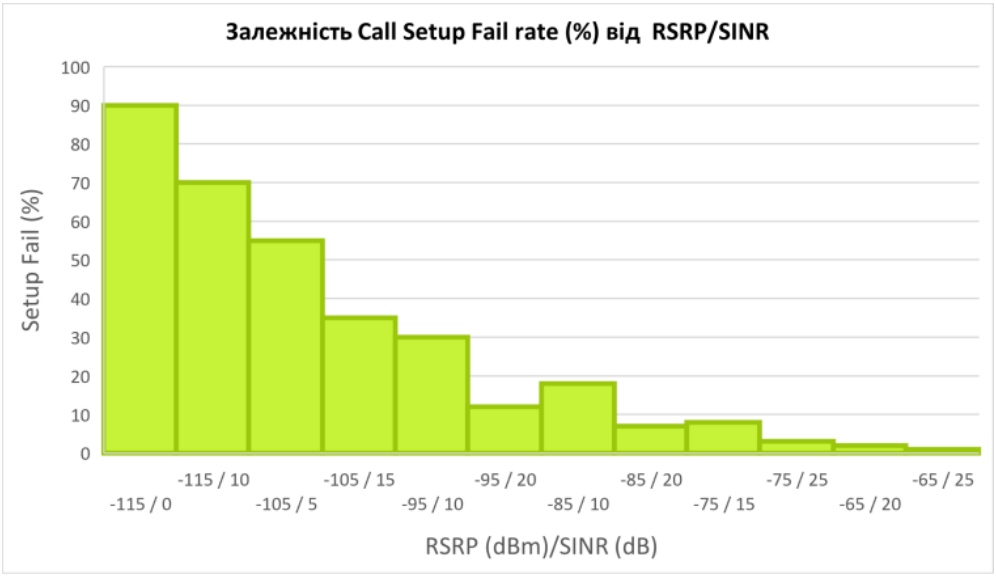


Рис. 7. Залежність Call Setup Fail rate (%) від RSRP/SINR

На рис. 7 показано вплив параметрів RSRP та SINR на ймовірність невдалого встановлення з'єднання (Call Setup Fail Rate). Зі зниженням потужності сигналу або погіршенням SINR рівень фейлів суттєво збільшується. Це пояснюється тим, що за умов низької якості сигналу базова станція не може коректно ініціювати процедуру встановлення виклику.

За результатами вимірювань встановлено, що підвищення RSRP на 10 дБ зменшує ймовірність Call Setup Fail майже удвічі, що є підтвердженням сильного впливу параметрів радіоканалу на успішність початку голосових та відеосесій.

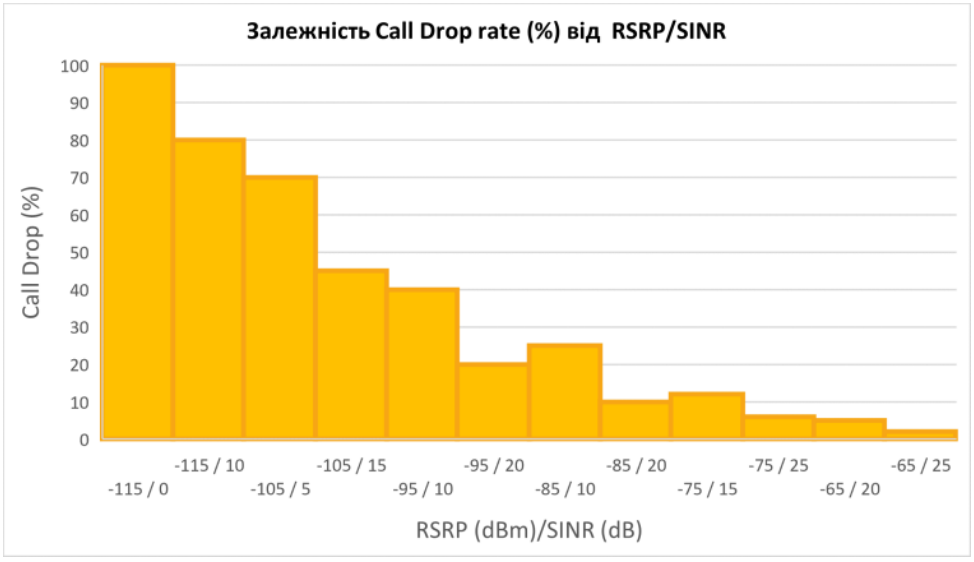


Рис. 8 - Залежність Call Drop rate (%) від RSRP/SINR

На рис. 8 показано залежність ймовірності обриву виклику (Call Drop Rate) від рівня RSRP та SINR. Спостерігається чітка тенденція: при погіршенні сигналу ймовірність розриву активного виклику різко збільшується. Це свідчить про втрату радіоканалу під час розмови або нестабільність з'єднання через низьке відношення сигнал/завади. Зокрема, підвищення RSRP приблизно на 10 дБ зменшує ймовірність Drop Rate на ~ 40%, що демонструє суттєву чутливість голосових сервісів до параметрів сигналу.

Висновки

У роботі розглянуто проблему забезпечення високої якості сервісів у мережах LTE, актуальність якої зростає в умовах збільшення навантаження на мобільні мережі та переходу до технологій нового покоління. Було проведено комплексне дослідження впливу параметрів радіосигналу – RSRP та SINR – на ключові показники якості обслуговування користувачів (Throughput, Ping, POLQA, Call Setup Fail Rate, Call Drop Rate).

На основі експериментальних вимірювань і побудованих залежностей встановлено, що погіршення рівня сигналу призводить до зниження пропускної здатності каналів (як у напрямку DL, так і UL), збільшення затримки передачі даних та погіршення якості голосових викликів. Зі зменшенням RSRP і SINR спостерігається зростання ймовірності невдалого встановлення з'єднання та частоти обривів активних викликів, що безпосередньо впливає на стабільність роботи мережі.

Результати дослідження підтвердили наявність чітких залежностей між параметрами сигналу та показниками QoS на різних рівнях LTE-стеку – від фізичного (PHY) до прикладного (APP). Завдяки цьому вдалося визначити критичні діапазони значень RSRP та SINR, при яких відбувається помітне погіршення якості обслуговування.

Отримані результати мають практичну цінність, оскільки можуть бути використані для оптимізації налаштувань базових станцій, удосконалення алгоритмів управління радіоресурсами та підвищення ефективності функціонування мереж LTE. Запропонований підхід може бути покладений в основу подальших досліджень у напрямі адаптивного керування якістю сервісів у системах LTE та 5G.