

## МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ГОЛОСОВОГО ЗВ'ЯЗКУ VoWi-Fi І VoLTE НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

М. Бешлей <sup>[ORCID: 0000-0002-7122-2319]</sup>, О. Кочан <sup>[ORCID: 0000-0002-3164-3821]</sup>, Г. Бешлей <sup>[ORCID: 0000-0001-5392-3499]</sup>,  
О. Шпур <sup>[ORCID: 0000-0001-8156-8017]</sup>

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: М. Бешлей (e-mail: mykola.i.beshlei@lpnu.ua).

(Подано 13 вересня 2023)

Критична інфраструктура, у яку входять об'єкти, необхідні для нормального функціонування суспільства (наприклад, електростанції, транспортні вузли, лікарні тощо), потребує надійного зв'язку для забезпечення безперебійної роботи та координації дій в екстрених ситуаціях. У роботі запропоновано методику вимірювання та покращення якості голосового зв'язку через технології VoWi-Fi і VoLTE на об'єктах критичної інфраструктури. Один із ключових аспектів методики – створення тестового середовища, яке відображає реальні умови роботи на об'єктах критичної інфраструктури. Це передбачає використання пристроїв з підтримкою технологій VoWi-Fi і VoLTE, налаштування Wi-Fi мереж і доступу до мобільного інтернету, а також вибір стандартних тестових сценаріїв для оцінювання якості голосового зв'язку. Важливою частиною методики є вимірювання різних параметрів якості зв'язку, таких як рівень сигналу, затримка і втрати пакетів. Для цього використовують спеціальні вимірювальні інструменти, зокрема програми Ping Monitor і G-NetWi-Fi на платформі Android. Отримані дані дають змогу об'єктивно оцінити ефективність технологій VoWi-Fi і VoLTE на об'єктах критичної інфраструктури, зокрема із використанням запропонованої метрики MOS (Mean Opinion Score). Встановлено, що одним із основних недоліків традиційного підходу використання VoWi-Fi і VoLTE є відсутність автоматичного переключення між цими технологіями в разі погіршення якості на одній з них, що може призводити до незадовільного сприйняття розмови користувачем. Запропонована методика передбачає використання системи моніторингу метрики MOS, яка постійно вимірює якість голосового зв'язку на обох технологіях та реалізує механізм адаптивного перемикавання між VoLTE та VoWi-Fi. Це дає змогу автоматично переходити на оптимальну технологію залежно від поточних умов і забезпечує найкращу якість обслуговування для користувача. Загалом стаття надає важливу інформацію для впровадження та оптимізації цих технологій на об'єктах критичної інфраструктури з метою підвищення надійності та ефективності голосового зв'язку.

**Ключові слова:** VoWi-Fi, VoLTE, MOS, QoS, IMS  
**УДК:** 621.396

### 1. Вступ

Вимірювання та покращення якості голосового зв'язку на об'єктах критичної інфраструктури є надзвичайно важливим завданням у сучасному світі, де надійність та доступність зв'язку можуть мати вирішальне значення у критичних ситуаціях. З початку 2023 р. в Україні розпочинається впровадження технологій VoLTE (Voice over Long-Term Evolution) та VoWi-Fi (Voice over Wi-Fi),

які дають змогу передавати голос через мережі даних стандарту LTE та Wi-Fi відповідно. Це відкриває нові можливості для покращення голосового зв'язку на об'єктах критичної інфраструктури..

Об'єкти критичної інфраструктури, такі як лікарні, поліцейські департаменти, аеропорти, водозабезпечення, електростанції тощо, відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки та нормального функціонування суспільства. Під час надзвичайних ситуацій, природних катастроф, а також у повсякденних умовах швидкий і надійний голосовий зв'язок може рятувати життя, координувати дії рятувальників та забезпечувати безперерйну роботу критичних служб.

У цій статті запропоновано методику вимірювання та покращення якості голосового зв'язку на об'єктах критичної інфраструктури із використанням технологій VoLTE та VoWi-Fi. Ми детально розглянемо процеси вимірювання якості зв'язку, а також стратегії та практичні рекомендації щодо поліпшення цієї якості. Наша методика спрямована на забезпечення безперерйної та надійної роботи голосового зв'язку, що є критично важливим для об'єктів критичної інфраструктури.

Переваги використання технологій VoLTE та VoWi-Fi на таких об'єктах вже відомі, але для досягнення максимальних результатів необхідно правильно вимірювати та оптимізувати їхню функціональність [1]. Зокрема, основною проблемою традиційного використання VoLTE та VoWi-Fi є те, що коли під час сеансу зв'язку погіршується якість голосового спілкування на одній з технологій, наприклад, VoLTE, то не відбувається автоматичне перемикання на технологію VoWi-Fi, яка в цей момент забезпечує кращу якість обслуговування, і навпаки. Зокрема запропонована методика дає змогу поліпшити якість надання голосової розмови в умовах погіршення зв'язку завдяки реалізації системи моніторингу MOS та впровадження механізму адаптивного перемикання між технологіями VoLTE та VoWi-Fi. Ми надаємо цю методику як інструмент для фахівців у сфері інфраструктури та телекомунікацій, які працюють над забезпеченням надійного зв'язку на критично важливих об'єктах, де це особливо важливо.

## **2. Метрики QoS і MOS для вимірювання якості голосового зв'язку на об'єктах критичної інфраструктури**

Упровадження технологій VoLTE та VoWi-Fi в Україні показало, що ці інновації здатні істотно покращити комунікаційні можливості на об'єктах критичної інфраструктури. Технологія VoLTE дає змогу використовувати широкосмугове інтернет-підключення для передавання голосу, що забезпечує чудову якість звуку та зниження кількості переривань. Це особливо важливо в ситуаціях, коли кожна секунда може вирішувати долю людей. Технологія VoWi-Fi, зі свого боку, дає змогу здійснювати голосові дзвінки через внутрішню Wi-Fi-мережу, що є вельми корисним у місцях з обмеженим сигналом мобільного зв'язку. Об'єкти критичної інфраструктури, часто розташовані в складних умовах, можуть відчувати істотне підвищення надійності зв'язку завдяки цій технології. Проте важливо пам'ятати, що впровадження цих технологій потребує співпраці з операторами зв'язку та виробниками смартфонів. Платформа IMS (IP Multimedia Subsystem) відіграє ключову роль у забезпеченні інтеграції цих технологій із сучасною мережею зв'язку (рис. 1). Тому важливо сприяти співпраці між усіма сторонами, щоб забезпечити доступність цих технологій на об'єктах критичної інфраструктури.

Для об'єктів критичної інфраструктури, де надійність голосового зв'язку має першочергове значення, вимірювання MOS (Mean Opinion Score) і метрик QoS (Quality of Service) є необхідними інструментами для постійного моніторингу та покращення якості зв'язку. Це допомагає вчасно виявляти та виправляти проблеми у мережі та інфраструктурі, а також забезпечити високий рівень задоволення користувачів безпекою та підвищити ефективність роботи об'єктів критичної інфраструктури навіть у надзвичайних ситуаціях. Взаємозв'язок між метриками QoS і MOS для вимірювання якості голосового зв'язку на об'єктах критичної інфраструктури полягає в тому, що метрики QoS (затримки та втрати пакетів) є одним із основних компонентів, які впливають на MOS і сприяють оцінюванню загальної якості голосового зв'язку [2]. MOS є числовою оцінкою, яка

відображає сприйняття якості голосового зв'язку користувачами. MOS оцінюють за шкалою від 1 до 5, де 1 вказує на дуже погану якість, а 5 – на відмінну. Важливою перевагою оцінки MOS є те, що вона враховує психологічний аспект сприйняття якості зв'язку користувачами.

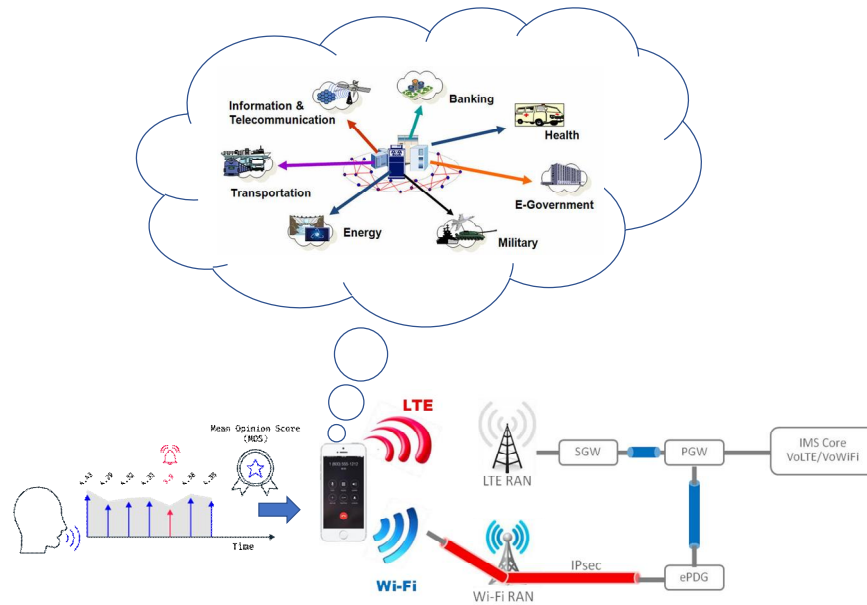


Рис. 1. Архітектура мережі VoWi-Fi та VoLTE для об'єктів критичної інфраструктури із моніторингом MOS

Щоб отримати загальну метрику затримки, яка впливає на всіх користувачів, спочатку розглядають середнє значення затримки для всіх користувачів, що використовують послугу  $s$ . У такому випадку враховується середня затримка для кожного окремого користувача, із загальним урахуванням усіх користувачів:

$$\tau_{av,s[ms]} = \frac{1}{N_{u,s}} \sum_{k=1}^{N_{u,s}} \tau_{av,k[ms]}, \quad (1)$$

де  $N_{u,s}$  – кількість користувачів, що використовують послугу  $S$ ,  $\tau_{av,k[ms]}$  – середня затримка пакетів, які отримав користувач  $k$ .

Згідно із [3], затримка голосового дзвінка визначається як

$$\tau_{k[ms]} = \tau_{enc[ms]} + \tau_{UL[ms]} + \tau_{trans[ms]} + \tau_{av,k[ms]} + \tau_{dec[ms]} + \tau_{proc[ms]}, \quad (2)$$

де  $\tau_{enc}$  – затримка, що відповідає часу, потрібному для кодування голосу, яка розрахована на основі розміру кадру 20 мс, додаткової загальної затримки на 5 мс і часу обробки 5 мс;  $\tau_{UL}$  – затримка, передбачена для передавання даних через радіоінтерфейс у напрямку від користувача, що становить 50 мс;  $\tau_{trans}$  – затримка, що відображає час, потрібний для транспортування голосових даних через мереж (приймають 10 мс);  $\tau_{dec}$  – затримка, що враховує час, необхідний для декодування голосу на приймальному кінці;  $\tau_{proc}$  – затримка оброблення мобільним пристроєм та базовою eNodeB.

Коефіцієнт відмов пакетів (Packet Loss Rate) є важливою метрикою для оцінки якості голосового зв'язку і загальної якості обслуговування (QoS) у безпроводних мережах. Цей коефіцієнт визначають на підставі двох основних аспектів: втрати пакетів через перевантаження та втрати пакетів через помилки передавання [4]. Отже, коефіцієнт відмов пакетів для заданого часового інтервалу обчислюють так:

$$P_{failure[\%]} = \frac{N_{sent} - N_{received}}{N_{sent}} \times 100, \quad (3)$$

де  $N_{sent}$  – кількість пакетів, відправлених протягом інтервалу часу,  $N_{received}$  – кількість пакетів, отриманих протягом інтервалу часу, що розглядається.

Для отримання оцінки MOS на стороні користувача використовують E-модель, визначену в

[5]. Ця модель передбачає перетворення коефіцієнта оцінки передачі  $R$  на MOS, який відображає

рівень задоволеності користувача із погляду сприйнятої якості голосового виклику.

$$R = 129 - I_{d,wb} - I_{e,eff,wb}, \quad (4)$$

де  $I_{d,wb}$  – показник впливу затримки на якість голосових сигналів;  $I_{e,eff,wb}$  – показник оцінки впливу низької швидкості передавання даних кодека та випадкових втрат пакетів на якість обладнання, що враховує спотворення сигналу.

У спрощеній моделі значення  $I_{d,wb}$  залежить від наскрізної затримки і може бути розраховане за допомогою такої формули, як казано в [6]:

$$I_{d,wb} = \begin{cases} 0.024\tau_{[ms]} & , \tau < 177.3 \text{ ms} \\ 0.024\tau_{[ms]} + 0.11 \times (\tau_{[ms]} - 177.3) & , \tau \geq 177.3 \text{ ms} \end{cases} \quad (5)$$

Значення  $I_{d,wb}$  залежить від втрат пакетів та вихідної швидкості кодека AMR-WB. Коефіцієнт втрат пакетів можна визначити згідно з [6]:

$$I_{e,eff,wb} = I_{e,wb} + (129 - I_{e,wb}) \frac{P_{failure[\%]}}{P_{failure[\%]} + B_{pl}}, \quad (6)$$

де  $I_{e,wb}$  – коефіцієнт пошкодження обладнання без втрати пакетів, його значення 11.0 взято з [6] для кодека AMR-WB 12.65;  $B_{pl}$  – специфічний для кодека коефіцієнт, який характеризує його стійкість до втрати пакетів. У цьому випадку значення 13.0 взято з [6] для кодека AMR-WB 12.65.

Після визначення всіх коефіцієнтів отримуємо  $R$ -коефіцієнт, який можна перевести в MOS. MOS пов'язаний із суб'єктивною класифікацією якості дзвінків, як вказано в табл. 1.

$$MOS = \begin{cases} 1 & , R_x < 0 \\ 1 + 0,035R_x + R_x(R_x - 60)(100 - R_x) \times 7 \times 10^{-6} & , 0 \leq R_x \leq 100 \\ 4.5 & , R_x > 100 \end{cases} \quad (7)$$

де  $R_x$  – позначає корекцію початкового коефіцієнта передавання:

$$R_x = \frac{R}{1.29}. \quad (8)$$

Таблиця 1

### Співвідношення між R-значенням та задоволеністю користувачів

R-значення (нижня межа)	MOS	Задоволеність користувачів
90	>4,35	Дуже задоволені
80	>4,00	Задоволені
70	>3,40	Деякі користувачі незадоволені
60	>3	Багато користувачів незадоволені
50	>2,6	Майже всі користувачі незадоволені
–	<2,6	Не рекомендується

### 3. Методика вимірювання та покращення якості голосового зв'язку VoWi-Fi і VoLTE на об'єктах критичної інфраструктури

Новизна запропонованого підходу полягає передусім у вирішенні проблеми низької якості голосового зв'язку під час використання технологій VoLTE та VoWi-Fi. Традиційний підхід не забезпечує автоматичного перемикаєння між цими технологіями у разі погіршення якості зв'язку на одній з них, що може призвести до незадовільного сприйняття розмови користувача. Запропонована методика поліпшення якості зв'язку містить такі ключові елементи новизни (рис. 2):

**Система моніторингу MOS:** Використання системи моніторингу MOS дає змогу постійно вимірювати якість голосового зв'язку на обох технологіях (VoLTE та VoWi-Fi). Це оцінювання може здійснюватися в реальному часі та враховувати різні параметри, такі як затримка, джитер, пакетні втрати тощо.

**Адаптивне перемикаєння:** Однією із ключових особливостей методики є упровадження механізму адаптивного переключення між технологіями VoLTE та VoWi-Fi. За допомогою системи моніторингу MOS, система може автоматично визначити, яка технологія надає кращу якість зв'язку у конкретний момент. Якщо якість голосового зв'язку на VoLTE погіршується, то система автоматично перемикає користувача на VoWi-Fi і навпаки. Це забезпечує стабільність і якість голосового зв'язку навіть у разі коливань сигналу.

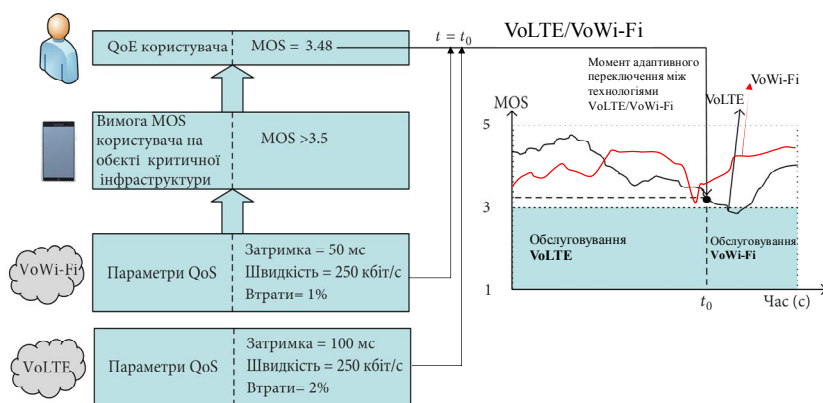


Рис. 2. Методика вимірювання та покращення якості голосового зв'язку VoWi-Fi і VoLTE на об'єктах критичної інфраструктури

Отже, методика усуває недолік традиційного використання технологій VoLTE та VoWi-Fi, покращуючи якість голосового зв'язку в умовах погіршення зв'язку і забезпечуючи постійну доступність для користувачів.

Методика вимірювання голосового зв'язку VoWi-Fi і VoLTE передбачає такі кроки:

- Створення тестового середовища. Починаємо з підготовки тестового середовища. Для цього забезпечуємо наявність пристроїв із підтримкою технологій VoWi-Fi і VoLTE. Крім того, налаштовуємо Wi-Fi мережу, мобільну мережу LTE та забезпечуємо доступ до інтернету на цих пристроях.

- Вибір тестових сценаріїв. Визначаємо типовий сценарій використання голосового зв'язку для нашого експерименту. Наприклад, можемо вибрати сценарій здійснення дзвінка на мобільний телефон користувача оператора Lifecell.

- Вимірювання якості зв'язку. Для оцінювання якості зв'язку використовуємо вимірювальні інструменти. Основним інструментом є програма Ping Monitor, яка запускається на пристроях з операційною системою Android. Ця програма дає змогу вимірювати такі показники, як затримка та втрата пакетів. Вона ініціює надсилання пакетів даних (ping) до певних IP-адрес або доменних імен і вимірює час, необхідний для відправлення цих пакетів та їх отримання. Ці вимірювання дають змогу визначити середню затримку (ping), що надає інформацію про швидкість та стабільність з'єднання.

• Оцінка якості зв'язку. Після збирання даних аналізуємо їх для кожного тестового сценарію. Порівнюємо значення показників якості зв'язку із прийнятними стандартами, що стосуються затримки та експертної оцінки якості сприйняття розмови за критерієм MOS. Цей аналіз допомагає визначити, чи відповідають отримані результати вимогам до якості зв'язку для технологій VoWi-Fi і VoLTE.

• На основі моніторингових значень MOS відбувається адаптивне прийняття рішень щодо вибору оптимальної мережі доступу Wi-Fi або LTE для організації надійного та якісного зв'язку.

Припустимо, що університет може бути визнаний об'єктом критичної інфраструктури, зважаючи на його важливу роль у забезпеченні освіти, дослідження, збереження інформації та обчислювальних ресурсів, а також у підготовці фахівців для різних галузей, зокрема кібербезпеки.

На рис. 3 наведено тестове середовище, у якому здійснювалося дослідження якості зв'язку за допомогою технологій VoWi-Fi і VoLTE.

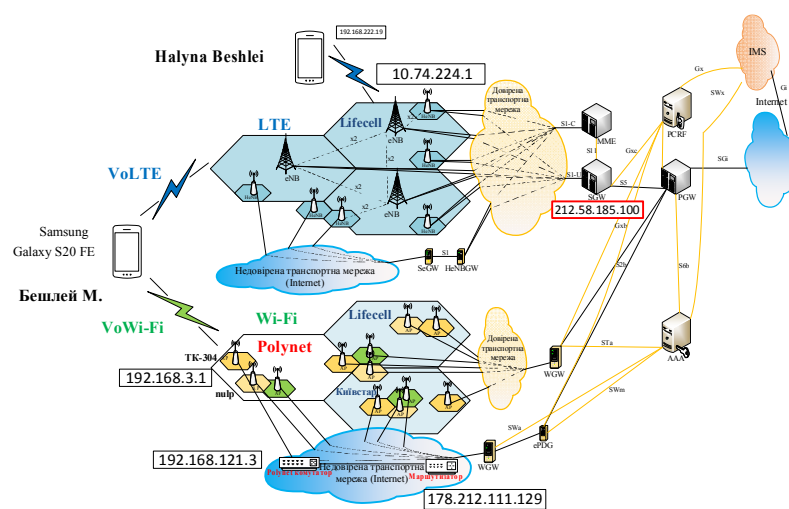


Рис. 3. Тестове середовище для дослідження технологій VoWi-Fi і VoLTE

Дослідження здійснювали у реальних умовах, використовуючи корпоративну Wi-Fi мережу, яку налагодив провайдер Polynet в Національному університеті “Львівська політехніка”. Для цих досліджень також використовували мобільний оператор Lifecell.

Це тестове середовище дало змогу оцінити якість зв'язку в разі використання технологій VoWi-Fi і VoLTE в реальних умовах. Провайдер Polynet забезпечив стабільний доступ до Wi-Fi мережі, що дало змогу здійснювати дзвінки через VoWi-Fi. Мобільний оператор Lifecell надав доступ до мережі LTE і підтримку технології VoLTE.

Для визначення IP-адрес, через які відбувалось передавання даних від кінцевого пристрою (М. Бешлей) до вузла призначення через Wi-Fi мережу доступу, була використана команда “tracert” (або “tracert” в деяких операційних системах), наведена на рис. 4. Команда “tracert” (або “tracert” в певних операційних системах) є інструментом командного рядка, що використовується для відстеження шляху, яким пакети даних надсилають від вашого пристрою до цільової IP-адреси або доменного імені. Цей інструмент допомагає ідентифікувати проміжні маршрутизатори, через які дані проходять, і вимірювати затримку на кожному з них. У разі використання команди “tracert” в командному рядку передається цільова IP-адреса або доменне ім'я як параметр команди. Програма починає відправляти пакети даних з вашого пристрою до вузла призначення, збираючи інформацію про кожен проміжний маршрутизатор на шляху. Кожен маршрутизатор надсилає повідомлення про пакет, який пройшов, назад до пристрою відправника, що дає змогу простежувати шлях пакетів. Крім відображення маршруту, команда “tracert” також показує затримку (ping) до кожного проміжного маршрутизатора, що дає змогу оцінювати стабільність з'єднання на цьому шляху.

Наприклад, виконання команди “tracert google.com” покаже послідовність IP-адрес маршрутизаторів, через які прокладається маршрут пакетів до Google, разом з інформацією про затримку на кожному проміжному маршрутизаторі.

```

Командний рядок - tracert 8.8.8.8

Trace complete.

C:\Users\User>tracert 8.8.8.8

Tracing route to dns.google [8.8.8.8]
over a maximum of 30 hops:

  0  0 ms    0 ms    0 ms  192.168.3.1
  1  2 ms    2 ms    2 ms  192.168.121.3
  2  4 ms    5 ms    5 ms  192.168.121.3
  3  *      *      *    Request timed out.
  4  2 ms    2 ms    2 ms  Columbus.lp [192.168.0.1]
  5  3 ms    3 ms    3 ms  178.212.111.129
  6  3 ms    7 ms    6 ms  194.44.202.177
  7  9 ms    9 ms    9 ms  194.44.212.36
  8  10 ms   11 ms   10 ms  209.85.168.96
  9  11 ms   23 ms   13 ms  108.170.248.138
  
```

Рис. 4. Визначення IP-адрес мережевих пристроїв, через які відбувається передавання даних від кінцевого пристрою (М. Бешлей)

Далі здійснено крок для визначення послідовності IP-адрес мережевих пристроїв, розташованих на шляху від призначеного вузла, а саме від пристрою під керуванням “Halyna Beshlei”, який обслуговує оператор мобільного зв’язку (рис. 5). Для досягнення цієї мети створено точку доступу на смартфоні користувача “Halyna Beshlei” з можливістю підключення до мережі через мобільний інтернет оператора Lifecell. Після цього на ноутбуці, підключеному до створеної точки доступу, був відкритий командний рядок, і виконана команда “tracert” разом з цільовою IP-адресою або доменним іменем, до якого необхідно відстежити маршрут. Наприклад, виконання команди “tracert google.com” або “tracert 8.8.8.8” дало змогу визначити маршрут від пристрою, яким керує “Halyna Beshlei”, до серверів Google через мобільний інтернет, який надає оператор Lifecell.

```

Select Командний рядок - tracert 8.8.8.8

Microsoft Windows [Version 10.0.19044.2965]
(c) Корпорація Майкрософт. Усі права захищені.

C:\Users\User>tracert 8.8.8.8

Tracing route to dns.google [8.8.8.8]
over a maximum of 30 hops:

  0  10 ms   3 ms   4 ms  192.168.222.19
  1  *      *      *    Request timed out.
  2  *      *      *    Request timed out.
  3  113 ms  53 ms  36 ms  10.74.224.5
  4  *      *      *    Request timed out.
  5  71 ms   36 ms  78 ms  212.58.185.100
  6  70 ms   88 ms  72 ms  212.58.190.1
  
```

Рис. 5. Визначення послідовності IP-адрес мережевих пристроїв, від вузла призначення, а саме від пристрою (Halyna Beshlei)

Отже, ми успішно визначили IP-адресу 212.58.190.1 мережевого вузла, до якого підключена базова станція, що обслуговує мобільний пристрій з іменем “Halyna Beshlei”. Тепер виконаємо паралельний експеримент, запускаючи дзвінок через технологію VoWi-Fi від пристрою керівника з іменем “Бешлей М.” через Wi-Fi мережу доступу до пристрою “Halyna Beshlei”. Водночас будемо тестуватимемо канал зв’язку за допомогою додатка Ping Monitor, який розгорнуто на пристрої “Бешлей М.” під час організації голосового зв’язку (див. рис. 6).

Ця методика дає змогу об’єктивно оцінити якість голосового зв’язку в різних сценаріях та забезпечити оптимальну якість обслуговування користувачів.

```

C:\Users\User>tracert 212.58.185.100

Tracing route to 212.58.185.100 over a maximum of 30 hops

  0  0 ms  0 ms  0 ms  192.168.3.1
  1  2 ms  2 ms  1 ms  192.168.121.3
  2  4 ms  4 ms  3 ms  192.168.121.3
  3  *      *      *      Request timed out.
  4  3 ms  2 ms  2 ms  Columbus.lp [192.168.0.1]
  5  3 ms  3 ms  3 ms  178.212.111.129
  6  6 ms  7 ms  4 ms  194.44.202.177
  7  12 ms 13 ms 11 ms 194.44.124.82
  8  11 ms 11 ms 11 ms 212.58.185.100

```

Рис. 6. Тестування каналу від пристрою Бешлей М. до пристрою Halyna Beshlei

Після виконання експерименту можна зазначити, що якість обслуговування в межах технології LTE відповідає вимогам, встановленим стандартами. Середня затримка становить 41 мілісекунду, а максимальна – 74 мілісекунди, джитер – 16 мілісекунд. Крім того, в системі не виявлено втрат (рис. 7). За додатковою оцінкою якості голосового спілкування за допомогою технології VoLTE отримано значення MOS (Mean Opinion Score) на рівні 5, що є високим показником. Ці результати вказують на задовільний рівень обслуговування у мережі LTE та високу якість голосової комунікації із використанням технології VoLTE.

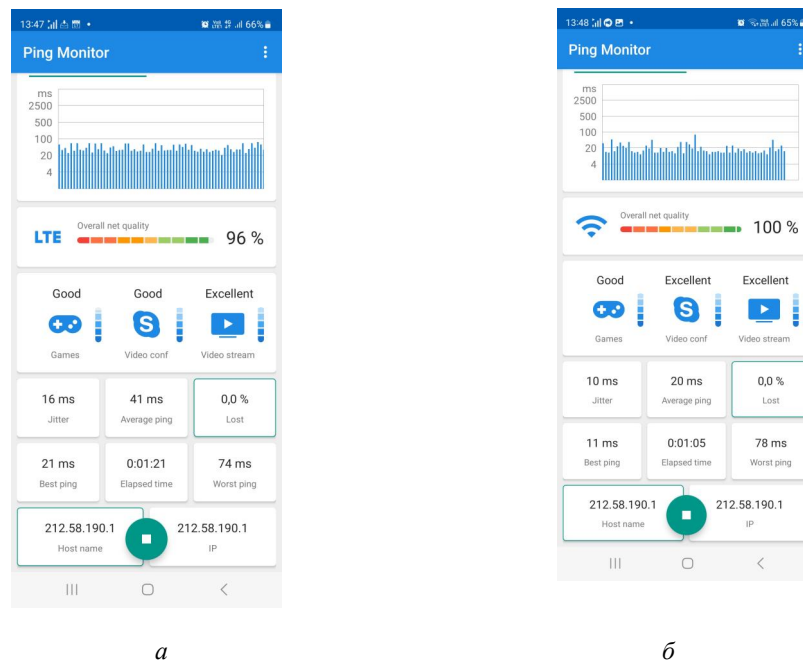


Рис. 7. Тестування параметрів QoS технологій VoLTE (а) та VoWi-Fi (б)

Під час другого експерименту встановлено, що в технології Wi-Fi середній час затримки становив 20 мілісекунд, максимальний – 78 мілісекунд, джитер – 11 мілісекунд, і не було втрат даних у системі (рис. 8). Всі ці показники якості обслуговування були в межах допустимих значень, що свідчило про задовільну якість зв'язку. Додатково також оцінювали якість голосової розмови через технологію VoWi-Fi; результат – значення MOS (Mean Opinion Score) на рівні 5.

У роботі також здійснено експеримент щодо вимірювання параметрів QoS в технологіях LTE і Wi-Fi в ситуаціях, коли спостерігається погіршення рівня сигналу, наприклад, у випадку Wi-Fi, або перевантаження в LTE (рис. 9).

Отримані результати показали, що в LTE середній час затримки становить 460 мілісекунд, максимальний – 1799 мілісекунд, джитер – 533 мілісекунд, а втрати пакетів – 5,2 %. Ці параметри QoS не відповідають допустимим вимогам для організації голосового трафіку, і якість розмови VoLTE було оцінено за шкалою MOS = 3, із помітними перериваннями та шумами (рис. 9, а).



Схожий експеримент здійснено для Wi-Fi каналу. Середній час затримки в Wi-Fi становив 238 мілісекунд, максимальний – 1782 мілісекунд, джитер – 216 мілісекунд, а втрати пакетів досягали 11,1 %. Ці параметри QoS також не відповідають допустимим вимогам для організації голосового трафіку з використанням технології VoWi-Fi (рис. 9, б).

Отже, вибір технології для організації якісного голосового зв'язку повинен ґрунтуватися на тих параметрах QoS, які забезпечують найкращу якість у цьому конкретному контексті.

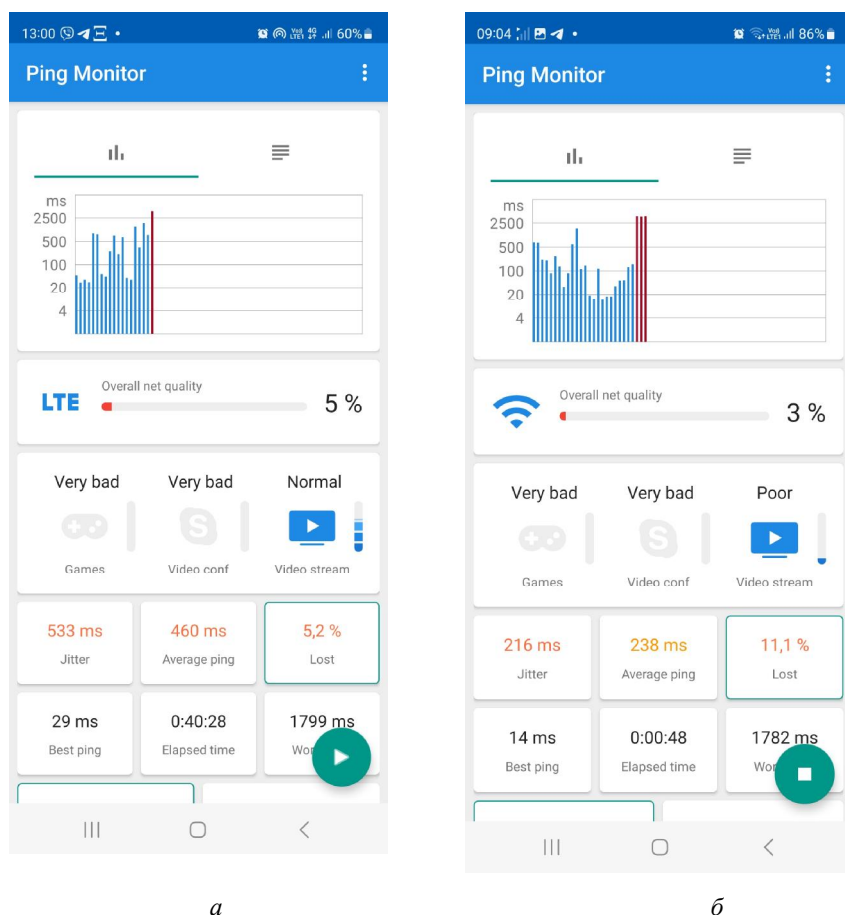


Рис. 9. Тестування параметрів QoS технологій VoLTE (а) та VoWi-Fi (б) в умовах впливу зовнішніх факторів (високе навантаження, низький рівень сигналу)

Виконано також експеримент для дослідження впливу рівня сигналу технології Wi-Fi на параметри якості обслуговування у каналі зв'язку. Для цього експерименту використано підключення до Wi-Fi точки доступу в корпоративній мережі Національного університету “Львівська політехніка” під іменем “nulp”. Дослідження здійснено на території кампусу університету, зокрема, на площі Святого Юра у місті Львові.

Для вимірювання рівня сигналу додатково використано мобільний додаток G-NetWi-Fi, який дає змогу визначати рівень сигналу до точки доступу, відобразити місцезнаходження користувача на карті, а також інформацію про частоту обслуговування та пропускну здатність, яку забезпечує технологія Wi-Fi. Паралельно з цим був запущений додаток ping monitor у фоновому режимі для оцінювання впливу погіршення рівня сигналу на параметри QoS у режимі реального часу. На конкретному прикладі (рис. 10) можна побачити, що за рівня сигналу  $-78$  дБм (рис. 10, б) параметри QoS були дуже хорошими: якість зв'язку – 100 %, середня затримка – 18 мілісекунд, максимальна затримка – 63 мілісекунд, джитер – 7 мілісекунд, втрати даних відсутні (рис. 10, а). На підставі цих параметрів можна зробити висновок, що якість голосової розмови за технологією

VoWi-Fi у такому каналі відповідає оцінці MOS=5. На рис. 10, в показано точково місцезнаходження пристрою у цьому експерименті.

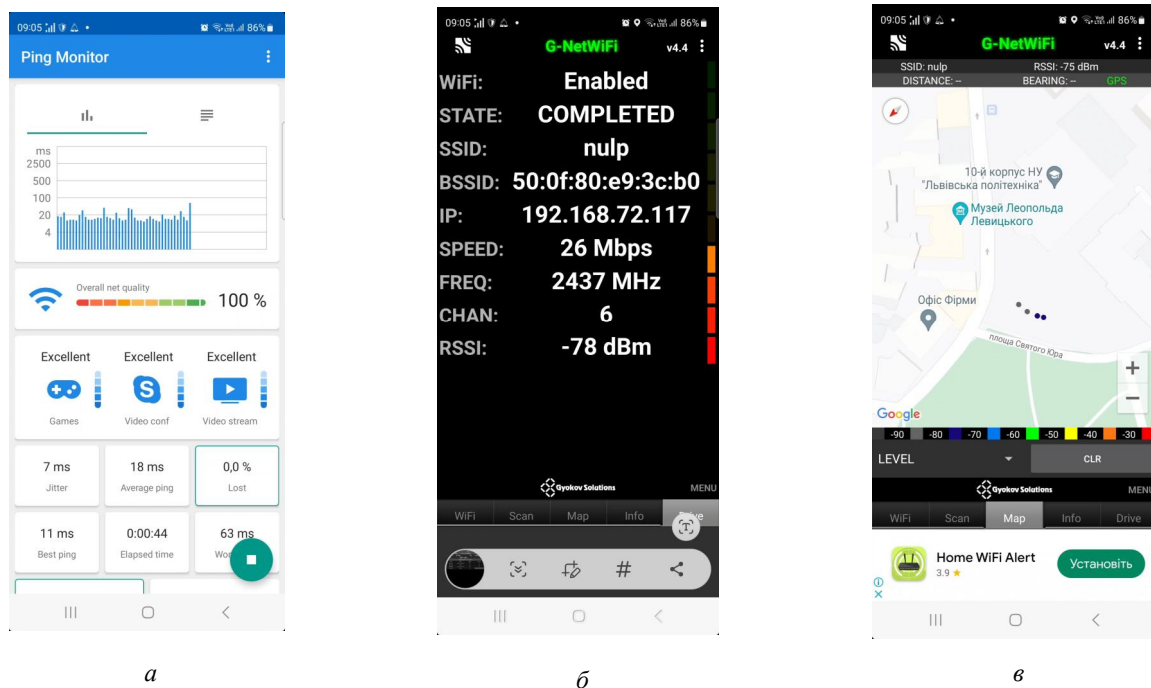


Рис. 10. Вплив рівня сигналу Wi-Fi на параметри QoS (рівень сигналу -78 дБм)

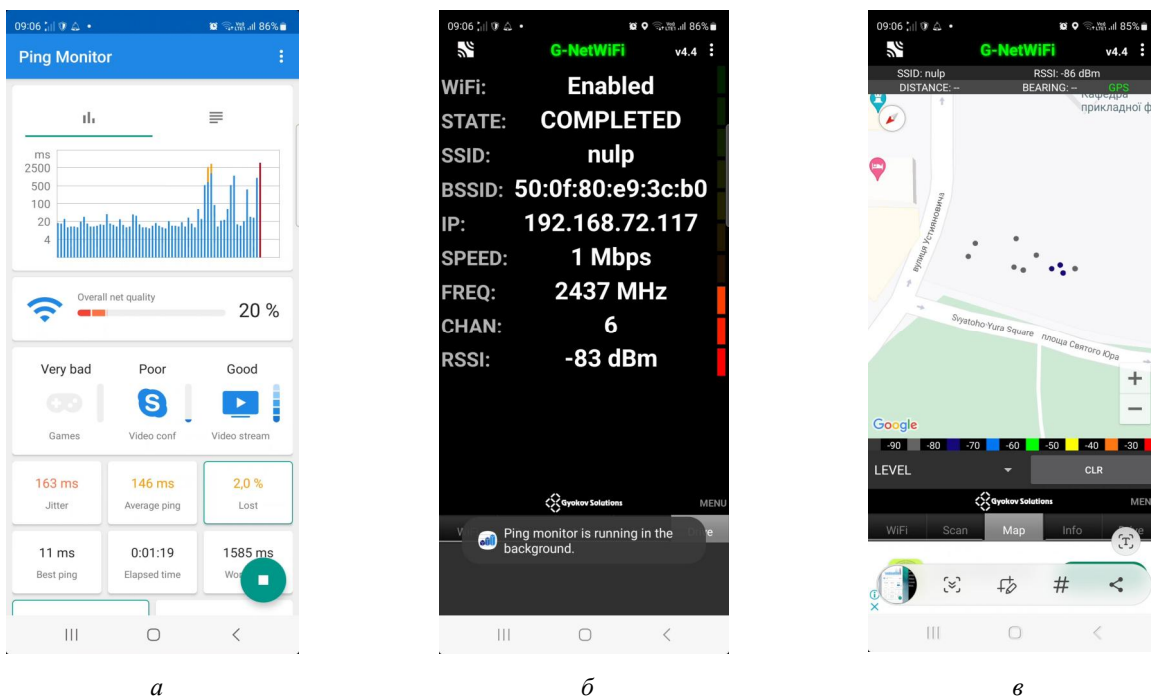


Рис. 11. Вплив рівня сигналу Wi-Fi на параметри QoS (рівень сигналу -83 дБм)

Із подальшим віддаленням фізично від точки доступу на рис. 11 можна спостерігати, що за рівня сигналу -83 дБм (рис. 11, б) параметри QoS істотно погіршуються. Якість зв'язку становить 20 %, середня затримка -146 мілісекунд, максимальна затримка - 1585 мілісекунд, джитер - 163 мілісекунди, а втрати даних 2 % (рис. 11, а). За такими параметрами можна зробити висновок, що

якість голосової розмови за технологією VoWi-Fi в такому каналі відповідає оцінці MOS=3. Також на рис. 11, в показано нові точки, які відображають зміну місцезнаходження пристрою користувача.

Під час подальшого віддалення фізично від точки доступу на рис. 12 можна зафіксувати, що за рівня сигналу  $-86$  дБм (рис. 12, б) параметри QoS суттєво погіршуються. Якість зв'язку становить 0 %, середня затримка – 462 мілісекунд, максимальна затримка – 2505 мілісекунд, джиттер – 487 мілісекунд, а втрати даних сягають 56,2 % (рис. 12, а). На підставі цих параметрів можна зробити висновок, що якість голосової розмови за технологією VoWi-Fi в такому каналі відповідає оцінці MOS=0, і сеанс зв'язку не буде успішним. Також на рис. 12, в показано нові точки, які відображають місцезнаходження пристрою користувача, де втрачається з'єднання з точкою доступу Wi-Fi.

За результатами можна зробити висновок, що для забезпечення високої якості голосового зв'язку через технологію VoWi-Fi необхідно, щоб рівень сигналу до точки доступу був не нижчим, ніж  $-78$  дБм. Крім того, важливо враховувати, що висока завантаженість каналу іншим трафіком також негативно впливає на якість розмови. Отже, для забезпечення задовільного зв'язку важливо мати стабільний і достатньо сильний сигнал Wi-Fi та уникати перевантаження мережі.

За результатами вимірювань найвища якість зв'язку досягається за рівня сигналу не менше ніж  $-78$  дБм. Це показує, що високий рівень сигналу є ключовим фактором для забезпечення якісного голосового спілкування через VoWi-Fi. За нижчих рівнів сигналу можливе істотне погіршення якості розмови, що може призводити до обмежень у використанні цієї технології на віддалених від точки доступу місцях. Важливо враховувати, що висока завантаженість каналу іншим трафіком може негативно впливати на якість голосового зв'язку. Це означає, що навіть за високого рівня сигналу конкуренція за мережевий ресурс може призводити до збоїв та втрати пакетів даних. Для забезпечення задовільного зв'язку важливо моніторити завантаженість мережі й, можливо, обмежувати інші види трафіку в періоди активного голосового спілкування. Враховуючи результати, можна рекомендувати оптимізацію мережі та розташування точок доступу з урахуванням покриття важливих місць і надання стабільного сигналу на великій площі.

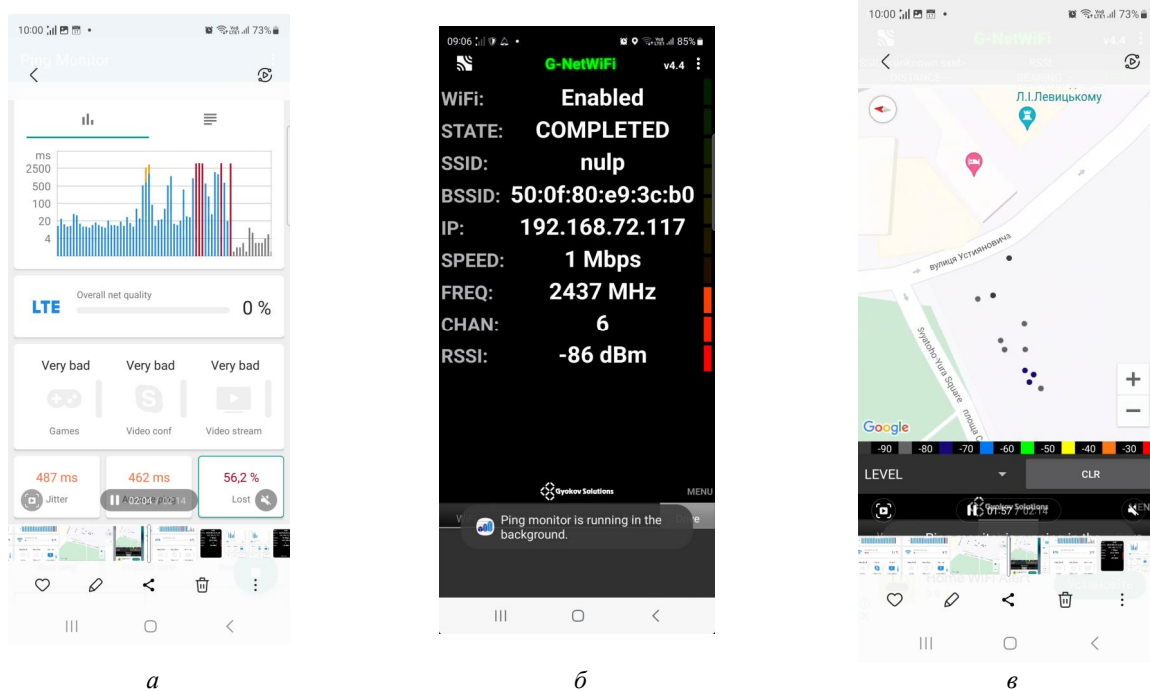


Рис. 12. Вплив рівня сигналу Wi-Fi на параметри QoS (рівень сигналу  $-86$  дБм)

Узагальнюючи, для досягнення високої якості голосового зв'язку через технологію VoWi-Fi, важливо мати не лише високий рівень сигналу, але й контролювати завантаженість мережі та

оптимізувати її параметри. Це особливо важливо у випадках, коли надійність голосового спілкування має критичне значення, наприклад, у сфері телекомунікацій або на важливих об'єктах.

Отже, в умовах стабільного сигналу в мережах операторів Polynet і Lifecell здійснено експеримент, мета якого полягала в оцінюванні якості голосового спілкування і вивченні впливу переходу між технологіями VoWi-Fi і VoLTE. У межах цього експерименту також виконували вимикання і увімкнення Wi-Fi під час активного спілкування. Під час сеансу було виявлено, що перехід між цими технологіями працює стабільно, що підтверджує безперервну розмову. Наприклад, на рис. 13, а показано розмову через технологію VoWi-Fi, після чого Wi-Fi було вимкнено, і розмова продовжилась через технологію VoLTE (рис. 13, б). Після повторного увімкнення Wi-Fi виклик автоматично повернувся до обслуговування через технологію VoWi-Fi (рис. 13, в). Це підтверджує успішну роботу переходу між цими технологіями та підтримує їхню безперервну роботу під час розмови. Дослідження свідчить, що якість передавання голосу через технологію VoWi-Fi залежить від рівня сигналу до точки доступу та завантаження каналу зв'язку. Використання хендоверу між VoWi-Fi і VoLTE дає змогу безперервно здійснювати голосові розмови. Крім того, активація та деактивація Wi-Fi впливають на вибір між цими технологіями залежно від їх доступності.

Проте під час дослідження також було виявлено проблему, яка полягає у відсутності автоматичного перемикавання між технологіями VoLTE та VoWi-Fi в разі погіршення якості голосового зв'язку під час активного сеансу зв'язку. Зокрема, якщо якість голосового спілкування стає поганою під час використання технології VoLTE, система не здійснює автоматичний перехід на технологію VoWi-Fi, яка може забезпечити кращу якість обслуговування, і навпаки.

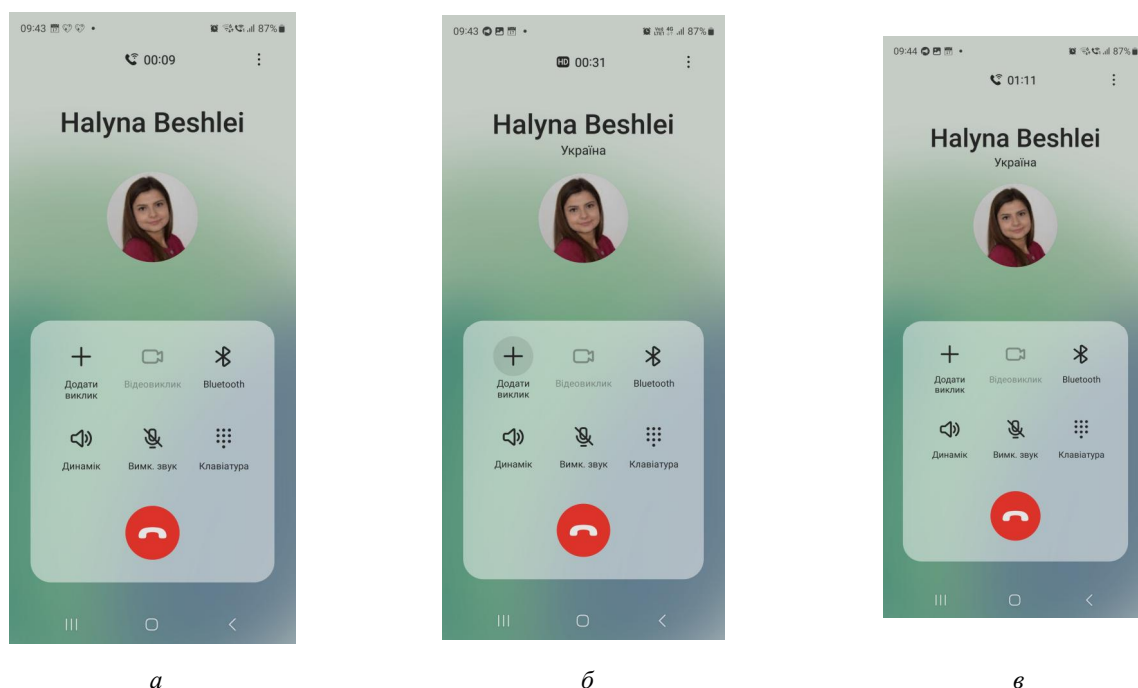


Рис. 13. Тестування параметрів QoS технологій LTE та Wi-Fi в умовах впливу зовнішніх факторів (високе навантаження, низький рівень сигналу)

Отже, запропонована методика вирішує зазначену проблему за допомогою упровадження двох ключових компонентів: системи моніторингу MOS (Mean Opinion Score) та механізму адаптивного перемикавання між технологіями VoLTE та VoWi-Fi. Ця методика призначена для поліпшення якості голосового спілкування у ситуаціях погіршеного зв'язку, із автоматичним

переходом на оптимальну технологію з урахуванням поточних умов, що забезпечує найкращу можливу якість обслуговування для користувачів. Такий підхід дає змогу забезпечити стабільний та надійний голосовий зв'язок, підтримуючи комфортні умови спілкування, навіть у випадках коливань сигналу або інших негативних впливів на якість зв'язку.

## Висновок

Стаття має важливе практичне значення для галузі інфраструктури та телекомунікацій, оскільки розглядає проблему забезпечення надійного голосового зв'язку на об'єктах критичної інфраструктури, таких як електростанції, транспортні вузли, лікарні тощо, де безперервна робота і координація дій життєво важливі. Методика, викладена в роботі, передбачає створення реалістичного тестового середовища, яке відображає реальні умови роботи на цих об'єктах. Для оцінювання якості голосового зв'язку використано різні параметри, такі як рівень сигналу, затримка та втрати пакетів. Основним висновком дослідження є те, що традиційний підхід до використання технологій VoWi-Fi і VoLTE не забезпечує автоматичного перемикання між ними у разі погіршення якості зв'язку, що може вплинути на сприйняття користувача. Запропонована методика вирішує цю проблему завдяки впровадженню системи моніторингу метрики MOS (Mean Opinion Score) та реалізації механізму адаптивного перемикання між технологіями VoLTE та VoWi-Fi, що дає змогу автоматично переходити на оптимальну технологію залежно від поточних умов і забезпечує найкращу якість обслуговування для користувачів.

## Подяка

Статтю підготовано завдяки грантовій підтримці Національного фонду досліджень України, реєстраційний номер проекту 2022.01/0009 “Оцінювання та прогнозування загроз відбудові та сталому функціонуванню об'єктів критичної інфраструктури” за конкурсом “Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди”.

## Список використаних джерел

- [1] Y. Jouihri, Z. Guennoun, Y. Chagh, and D. Zahi, “Towards successful VoLTE and VoWiFi deployment: network function virtualization solutions’ benefits and challenges”, *Telecommun. Syst.*, Vol. 64, No. 3, 2017, pp. 467–478. DOI: 10.1007/s11235-016-0186-y
- [2] V. Mayor, R. Estepa, A. Estepa, and G. Madinabeitia, “Deployment of UAV-mounted access points for VoWiFi service with guaranteed QoS”, *Comput. Commun.*, Vol. 193, 2022, pp. 94–108. DOI: 10.1016/j.comcom.2022.06.037.
- [3] J. Prajwala, R. Mathew and N. Taj, “Analysis of VoIP Traffic over LTE for different Codecs”, 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018, pp. 1858–1862. DOI: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012408.
- [4] S. Jun et al., “A cost-efficient software based router and traffic generator for simulation and testing of IP network”, *Electronics (Basel)*, Vol. 9, No. 1, 2019, p. 40. DOI: 10.3390/electronics9010040.
- [5] T. Daengsi and P. Wuttidittachotti, “QoE modeling: A simplified e-model enhancement using subjective MOS estimation model”, 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Sapporo, Japan, 2015, pp. 386–390. DOI: 10.1109/ICUFN.2015.7182571.
- [6] R. Satra, D. Lantara, Y. Salim, H. Azis and F. Fattah, “E-Model for Intranet VoIP Analysis”, 2018 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT), Makassar, Indonesia, 2018, pp. 14–17. DOI: 10.1109/EIConCIT.2018.8878614.

## METHODOLOGY FOR MEASURING AND ENHANCING THE QUALITY OF VOWI-FI AND VOLTE VOICE COMMUNICATION ON CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

M. Beshley, O. Kochan, H. Beshley, O. Shpur

*Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine*

Critical infrastructure, which includes facilities necessary for the normal functioning of society (e.g., power plants, transportation hubs, hospitals, etc.), requires reliable communication to ensure uninterrupted operation and coordination of actions in emergency situations. This paper presents a methodology for measuring and improving the quality of voice communication via VoWi-Fi and VoLTE technologies at critical infrastructure facilities. One of the key aspects of the methodology is the creation of a test environment that reflects the real working conditions at critical infrastructure facilities. This includes using devices that support VoWi-Fi and VoLTE technologies, setting up Wi-Fi networks and mobile Internet access, and selecting standard test

scenarios to assess voice quality. An important part of the methodology is measuring various communication quality parameters, such as signal strength, delay, and packet loss. For this purpose, special measurement tools are used, including the Ping Monitor and G-NetWi-Fi apps on the Android platform. The obtained data allow us to objectively assess the effectiveness of VoWi-Fi and VoLTE technologies at critical infrastructure facilities, in particular, using the proposed MOS (Mean Opinion Score) metric. It has been established that one of the main disadvantages of the traditional approach to using VoWi-Fi and VoLTE is the lack of automatic switching between these technologies in the event of a deterioration in the quality of one of them, which can lead to unsatisfactory perception of the conversation by the user. The proposed methodology involves the use of a MOS metric monitoring system that continuously measures the quality of voice communication on both technologies and implements a mechanism for adaptive switching between VoLTE and VoWi-Fi. This allows for automatic switching to the optimal technology depending on current conditions and provides the best quality of service for the user. In general, the article provides important information for implementing and optimizing these technologies at critical infrastructure facilities to improve the reliability and efficiency of voice communications.

**Key words:** *VoWi-Fi; VoLTE; MOS; QoS; IMS.*