

УДК 621.396

канд. техн. наук Панченко І. В. ORCID: 0000-0001-5690-3813 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Бондаренко Д. М. ORCID: 0009-0001-7815-6027 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)  
канд. техн. наук, доцент Липський О. А. ORCID: 0009-0007-7355-4433  
(ДержНДІ технологій кібербезпеки)  
Стефанишин Я. І. ORCID: 0000-0002-8317-4131 (ДержНДІ технологій кібербезпеки)

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ МЕРЕЖІ 4G/LTE ДО ВПЛИВУ НАВМИСНИХ ЗАВАД

*Мобільні радіомережі 4G/LTE забезпечують передачу значних обсягів даних, низьку затримку, виняткову надійність та роботу у реальному масштабі часу. У деяких випадках мобільні мережі можуть розглядатися як значно дешевша альтернатива супутниковому низькоорбітальному зв'язку. При цьому оцінка впливів навмисних завад на мобільні мережі 4G/LTE дає змогу визначити надійність їх функціонування та окреслити межі їх альтернативного використання.*

*Метою статті є викладення основних результатів експериментального дослідження стійкості мережі 4G/LTE до впливу навмисних вузькосмугових завад від засобів РЕБ.*

*Наведено короткий опис принципів побудови мережі 4G/LTE. Зроблено наголос на тому, що використання у мережі технології MIMO дає можливість:*

*збільшити пропускну здатність завдяки паралельному передаванню та прийманню декількох інформаційних потоків;*

*мінімізувати вплив багатопроменевості на якість прийнятих сигналів.*

*До наведеної функціональної схеми створеного макетного зразка мережі 4G/LTE включено: блок RRU Ericsson Radio 4486 B8B20B28 (робочі частоти у діапазоні 700 МГц, 4×4 MIMO), антени Ericsson Antenna 9011 ILM, блок BBU Ericsson Baseband 6318 та користувачькі пристрої у вигляді смартфонів Samsung S21, до програмного забезпечення яких інстальовано програму GSM NetMonitor.*

*Результати випробувань мережі на стійкість до впливу навмисних завад від засобів РЕБ включають, зокрема, опис та аналіз експериментального підтвердження щодо:*

*відсутності стійкості мережі 4G/LTE при встановленому на базових станціях хендоверу за показником RSRP;*

*наявності стійкості мережі 4G/LTE при встановленому на базових станціях хендоверу за показником RSRQ.*

**Ключові слова:** системи мобільного зв'язку 4G/LTE, базова станція LTE, хендовер, показники якості зв'язку RSRP та RSRQ, навмисні завади, програма GSM NetMonitor, MIMO.

### ***I. Panchenko, D. Bondarenko, O. Lypskiy, Ya. Stefanyshyn. Research on the resilience of 4G/LTE networks to the influence of intentional interference***

*4G/LTE mobile radio networks provide the transmission of significant amounts of data, low latency, exceptional reliability and real-time operation. In some cases, mobile networks can be considered as a much cheaper alternative to low-orbit satellite communications. At the same time, the assessment of the effects of intentional interference on 4G/LTE mobile networks makes it possible to determine the reliability of their operation and outline the limits of their alternative use.*

*The purpose of the article is to present the main results of an experimental study of the resistance of the 4G/LTE network to the influence of intentional narrowband interference from electronic warfare equipment.*

*A brief description of the principles of building 4G/LTE networks is given. It is emphasized that the use of MIMO technology in the network makes it possible to:*

*increase the bandwidth due to the parallel transmission and reception of several information streams,*

*minimize the impact of multipath on the quality of received signals.*

*The functional diagram of the created prototype of the 4G/LTE network includes: the RRU unit Ericsson Radio 4486 B8B20B28 (operating frequencies in the 700 MHz range, 4×4 MIMO), the Ericsson Antenna 9011 ILM antennas, the BBU Ericsson Baseband 6318 unit and user devices in the form of Samsung S21 smartphones, the software of which has the GSM NetMonitor program installed.*

*The results of network tests for resistance to intentional interference from electronic warfare agents include, in particular, a description and analysis of experimental confirmation of:*

*the lack of stability of the 4G/LTE network with handover installed on the base stations according to the RSRP indicator;*

*the presence of stability of the 4G/LTE network with handover installed at base stations according to the RSRQ indicator.*

**Keywords:** 4G/LTE mobile communication systems, LTE base station, handover, RSRP and RSRQ communication quality indicators, intentional interference, GSM NetMonitor program, MIMO.

### **Постановка проблеми**

Мобільні радіомережі 4G/LTE відіграють важливу роль у розвитку суспільства, забезпечуючи передачу величезних обсягів даних, низьку затримку, виняткову надійність та роботу у реальному масштабі часу.

Оцінка впливів навмисних завад на мережі радіодоступу Radio Access Network (RAN), які є ключовим компонентом мобільних мереж 4G/LTE, дає змогу визначити надійність їх функціонування та окреслити межі їх використання.

Стійкість мереж зв'язку до впливу засобів РЕБ залежить від багатьох факторів, включаючи тип засобів зв'язку, робочі частоти, потужність перешкод, а також використовувані методи та засоби захисту.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Архітектура стільникових мереж за час свого розвитку набула усталених форм і, загалом, має невеликі відмінності. Конкретний принцип побудови як самої мережі 4G/LTE, так і її базової станції, наведено в [1].

Задовільне функціонування мережі 4G/LTE, як і будь-якої технічної системи, підтримується при забезпеченні властивих їй певних технічних характеристик. Визначення величин переважної більшості цих характеристик, згідно з типовою архітектурою стільникових мереж, покладено на користувачські пристрої. Візуалізація показників функціонування мережі, які визначаються у процесі її функціонування користувачськими пристроями, може бути забезпечена за допомогою інсталюваної до їхнього програмного забезпечення програми GSM NetMonitor [2].

Однією із важливих властивостей стільникових мереж є притаманна їм функція хендоверу (Handover) – автоматичного перемикання робочої частоти, відомості про яку наведено в роботі [3].

У роботах [4; 5] наведені параметри якості сигналу 4G/LTE та формула для визначення показника, який характеризує якість передавання сигналу (RSRQ).

У роботі [6] розглянуто аналіз загроз і вразливостей під час впровадження технології 4G/LTE та проблеми вразливості стільникових мереж 4G/LTE в критичних інфраструктурах.

У роботі [7] визначено інструмент для оцінки продуктивності бездротового зв'язку з безпілотниками у стільникових мережах 4G.

У роботі [8] наведена оцінка якості передачі голосу в мережах LTE.

Також у роботі [9] представлена довгострокова еволюція LTE-4G/5G та основні перспективи розвитку мобільних інфокомукаційних систем.

Таким чином, виникає можливість вирішення наукового завдання щодо дослідження стійкості мереж 4G/LTE до впливу навмисних вузькосмугових завад від засобів РЕБ.

**Метою** статті є викладення основних результатів експериментального дослідження стійкості мережі 4G/LTE до впливу навмисних вузькосмугових завад від засобів РЕБ.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

У загальному випадку до основних методів підвищення стійкості стільникових мереж зв'язку до негативного впливу завад (у тому числі і несанкціонованих) можна віднести:

1) використання якомога більшої кількості робочих каналів зв'язку з охопленням якомога ширшого відрізка електромагнітного спектра (з метою ускладнення роботи засобів РЕБ, які, зазвичай, створюють вузькосмугову заваду – у межах одного чи двох каналів зв'язку);

2) зміну частоти під час передавання складових елементів цифрового повідомлення – псевдовипадкове перестроювання радіочастоти (ППРЧ), ефективність якого зростає при перестроюванні частоти у достатньо широкій смузі частот;

3) використання вузькоспрямованих антен (зменшення негативного впливу навмисних завад завдяки просторовій селекції);

4) використання у мережах більш потужних сигналів (зменшення ймовірності придушення потужних сигналів передавальних пристроїв мережі);

5) планування зв'язку та взаємодію із підрозділами радіоелектронної розвідки (зменшення впливу перешкод, створюваних засобами РЕБ, вдалим вибором маршрутів).

Видається, що притаманний стільниковій мережі 4G/LTE хендовер у широкому діапазоні частот електромагнітного спектра повинен бути найбільш дієвим засобом забезпечення її стійкості до впливу навмисних перешкод.

Для експериментального підтвердження цього припущення проаналізуємо принципи побудови самої мережі 4G/LTE. У загальному випадку робочий діапазон мережі 4G/LTE охоплює відрізок електромагнітного спектра від 400 МГц до 2600 МГц. Видається, що це створює реальні можливості оперативного реагування на зміну електромагнітної ситуації у навколишньому середовищі і забезпечення сталого зв'язку в умовах впливу несанкціонованих активних вузькосмугових завад.

Зазвичай, архітектура мереж радіодоступу Radio Access Network (RAN) являє собою частину телекомунікаційної системи, яка з'єднує окремі користувачські пристрої з основним ядром системи за допомогою радіоінтерфейсу. Мережа радіодоступу RAN розташовується між обладнанням користувача (мобільний телефон, комп'ютер або будь-який інший дистанційно керований пристрій) та забезпечує доступ і координацію управління ресурсами на всіх базових станціях.

Загальна архітектура мобільної радіомереж 4G/LTE [1] зображена на рисунку 1.

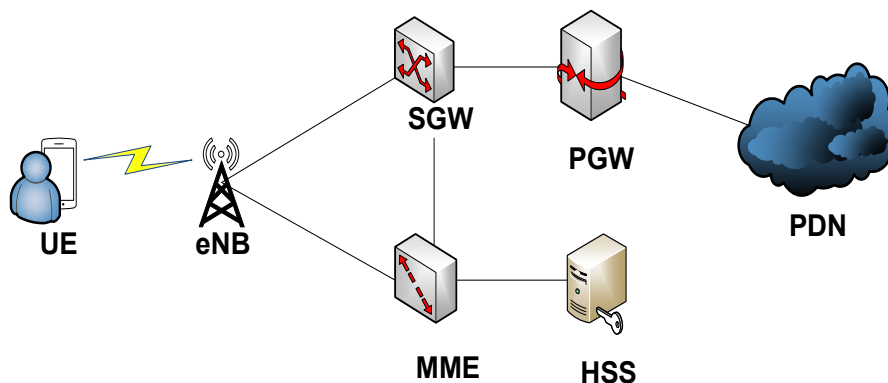


Рис. 1. Загальна архітектура мобільної радіомереж 4G/LTE:

UE – користувачський пристрій; eNB – базова станція; MME – вузол управління мобільністю (автентифікація UE); SGW – вузол передачі даних; PGW – шлюз зовнішніх мереж; PDN – мережа передачі даних (Інтернет); HSS – абонентський сервер для зберігання інформації про всіх абонентів

Телефон або інший користувачський пристрій User Equipment (UE) з метою забезпечення можливості обміну трафіком, підключений до RAN радіоінтерфейсом, через базову станцію eNB. RAN, окрім базової станції eNB, включає також до свого складу антени, які опромінують певну зону (залежно від пропускної здатності), а також ядро мережі Evolved Packet Core (EPC), яке у мережах 4G/LTE відповідає за керування мобільністю, автентифікацію та передачу даних користувачів UE.

До складу ядра мережі EPC включені ключові вузли, зокрема вузол управління мобільністю MME, вузол передачі даних SGW та шлюз зовнішніх мереж PGW.

Частиною ядра мережі EPC є абонентський сервер Home Subscriber Server (HSS), який забезпечує зберігання централізованої бази даних з інформацією про всіх абонентів (місця розташування, підписки, профілі автентифікації), а також керування автентифікацією, авторизацією та інформацією про підписки.

Зовнішні мережі можуть підключатися до шлюзу зовнішніх мереж PGW через мережу передачі даних Packet Data Network (PDN), зокрема Інтернет.

Наявна архітектура мережі радіодоступу RAN розділяє площину користувача та площину керування на окремі елементи. Повідомлення з даними користувача можуть передаватися контролером RAN через один комутатор програмно-визначальної мережі (SDN), а другий – через інтерфейс управління.

У мережах 4G/LTE базова станція Evolved NodeB (eNodeB) приймає цифрові пакети від ядра мережі EPC та синтезує радіосигнали передачі даних. Базові станції eNodeB, зазвичай, створені з використанням технології Software-Defined Radio (SDR).

Базова станція eNodeB може складатися з одного сектора (мала стільникова станція) або до 3 і більше секторів (макростанція) для забезпечення більшої дальності дії та пропускної спроможності. Сучасна багатодіапазонна базова станція 4G/LTE може передавати сигнал на кількох частотах-носіях, маючи можливість для забезпечення в інтересах користувачів більш високої пропускної здатності, агрегації частот-носіїв у кількох діапазонах.

Типова конструкція базової станції 4G/LTE розділена на базовий блок оброблення сигналів Baseband Unit (BBU) і один або кілька виносних радіочастотних блоків Remote Radio Unit (RRU). Інколи обидва блоки базової станції можуть бути об'єднані в один блок, що має тільки 1 або 2 сектори.

Радіочастотний блок RRU, який є ключовим компонентом базових станцій 4G/LTE, забезпечує випромінювання та приймання модульованих радіочастотних сигналів і розташовується неподалік антени (для зменшення втрат енергії на фідерних лініях).

Блок оброблення сигналів BBU, який перетворює цифрові сигнали у радіочастотні, а також виконує зворотне перетворення, згідно з архітектурою мобільних базових станцій 4G/LTE, знаходиться “на землі”, наприклад, у захищеному об'ємі шелтера.

У загальному випадку, радіочастотний блок RRU забезпечує випромінювання та приймання радіосигналів за технологією Multiple Input Multiple Output (MIMO), яка передбачає використання декількох дуплексних каналів (з окремими антенами).

Використання технології MIMO дає можливість:

збільшити пропускну здатність завдяки паралельному передаванню та прийманню декількох інформаційних потоків,

мінімізувати вплив багатопроменевості на якість прийнятих сигналів.

Ефективність технології MIMO високого порядку реально підтверджується на коротких відстанях і у міських умовах. Крім того, конфігурація 8×8 MIMO, забезпечуючи високу пропускну здатність, також може включати управління променем для збільшення дальності зв'язку, що потенційно для цієї технології створює перспективи щодо широкосмугового зв'язку на великих відстанях (важливо для сільської місцевості).

Для оцінки впливу навмисних завад на радіомережу 4G/LTE було створено її макет відповідно до функціональної схеми, наведеної на рисунку 2.

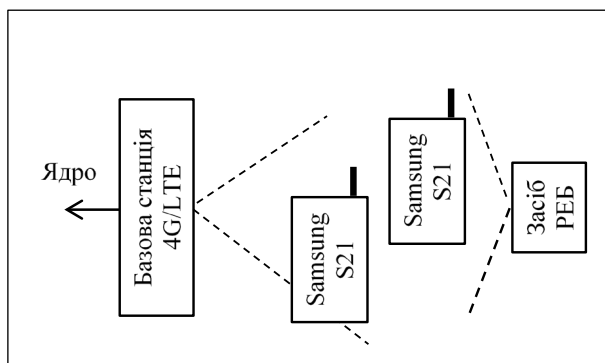


Рис. 2. Функціональна схема макету мережі радіодоступу RAN

Для створення макету мережі RAN використана базова станція 4G/LTE Ericsson діапазону 700–960 МГц, функціональна схема якої наведена на рисунку 3.

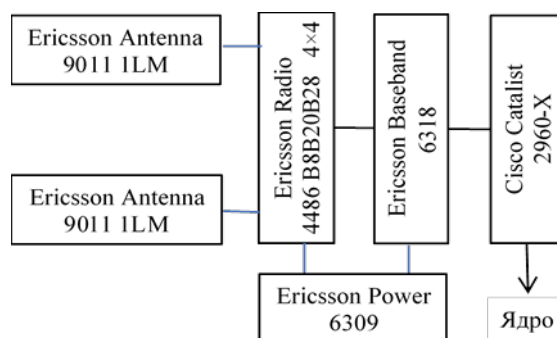


Рис. 3. Схема функціональна базової станції 4G/LTE діапазону 700–960 МГц

Як виносний радіочастотний блок RRU використано блок Ericsson Radio 4486 B8B20B28 з робочими частотами згідно з таблицею 1.

Таблиця 1

Робочі частоти блока RRU Ericsson Radio 4486 B8B20B28

Band	Up Link, MHz	Down Link, MHz
B8	880–915	925–960
B20	832–862	791–821
B28	703–740	758–803

Як блок оброблення сигналів BBU використано блок Ericsson Baseband 6318.

Роль антенної системи базової станції виконують два блоки антен Ericsson Antenna 9011 1LM, до складу кожного із яких включені дві антени з частотним діапазоном 617–4200 МГц та коефіцієнтом підсилення близько 10 dBi, що дозволяє реалізувати технологію 4×4 MIMO у складі цієї базової станції.

Зв'язок базової станції з ядром забезпечувався мережею Інтернет через комутатор Cisco Catalyst 2960-X.

Як технічні засоби користувачів використовувалися два смартфони Samsung S21 зі встановленим програмним забезпеченням GSM NetMonitor [2], яке дає можливість забезпечити оцінку рівня сигналу (dBm) та якості зв'язку, а також визначити частотний діапазон.

Для створення сигналу активної завади використовувалися 2 різні засоби РЕБ: макетний зразок купольного (окопного) засобу РЕБ, що забезпечував створення активної суцільної

спектральної завади у діапазоні 700–850 МГц потужністю до 2 W (розташовувався на відстані 10 м від смартфона), та мобільний штатний засіб РЕБ потужністю близько 100 W (розташовувався на відстані 10 км від смартфона). Спектр макетного зразка купольного засобу РЕБ (що охоплює робочі діапазони В20 та В28 базової станції) представлено на рисунку 4.

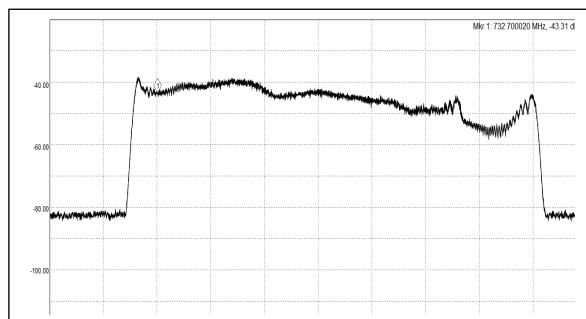


Рис. 4. Спектр сигналу завади купольного засобу РЕБ

Мета експерименту полягала у перевірці можливості реалізації базовою станцією функції хендоверу при виявленні факту придушення робочого каналу мережі 4G/LTE засобом РЕБ із вузькосмуговою завадою.

Обставини проведення експериментів не дали можливості забезпечити точне вимірювання рівня сигналів у необхідних точках технічних засобів мережі, тому фіксувалися тільки експертні якісні показники роботоспроможності мережі (“функціонує”/ “не функціонує”).

У загальному випадку, при функціонуванні стільникової мережі 4G/LTE базовою станцією забезпечується динамічний контроль якості радіочастотних каналів і при виявленні каналу із поганою якістю зв'язку базова станція перемикає з'єднання на інший канал з кращою на поточний час якістю зв'язку, який реалізований або тією ж базовою станцією (внутрішньостільниковий хендовер), або іншою базовою станцією (хендовер між стільниками) [3].

Як вже наголошувалося, функція безпосереднього оцінювання якості зв'язку в стільникових мережах покладена на кожен конкретний користувацький пристрій (смартфон). При фіксації незадовільної якості зв'язку у використовуваному каналі користувацький пристрій інформує про це базову станцію, яка у результаті хендоверу перемикає його на інший канал зв'язку, з кращою якістю зв'язку.

При реалізації функції хендоверу користувацькими пристроями аналізуються наступні основні показники якості зв'язку [4].

Reference Signal Received Power (RSRP) – середнє значення потужності прийнятих опорних сигналів базової станції (рівень сигналу базової станції). Функція хендоверу за показником RSRP встановлюється на базових станціях мережі 4G/LTE як базова. Аналіз показника RSRP дає можливість у мережі 4G/LTE забезпечити хендовер при виході користувацького пристрою із зони обслуговування однієї базової станції та забезпечити йому перехід у зону обслуговування іншої. У загальному випадку, діапазон величин RSRP змінюється від  $-40$  dBm до  $-140$  dBm;  $-70$  dBm – відмінно;  $-110$  dBm – дуже слабкий;  $-120$  dBm – критично;

Reference Signal Received Quality (RSRQ) – характеризує якість прийнятого опорного сигналу базової станції (тобто не тільки потужність прийнятого опорного сигналу, а і його співвідношення з рівнем шуму у каналі). Хендовер за показником RSRQ на базових станціях 4G/LTE потребує додаткової інсталяції. Аналіз показника RSRQ дає можливість у мережі

4G/LTE забезпечити хендовер при появі завад на використовуваному каналі (наприклад, у штатних ситуаціях внаслідок впливу сусідніх базових станцій).

Розглянемо більш детально, як визначається показник RSRQ.

У загальному випадку показник RSRQ визначається за формулою (1) [5]:

$$RSRQ = N \cdot (RSRP / RSSI), \text{ dB}, \quad (1)$$

де  $RSRP$  – середнє значення потужності прийнятих пілотних сигналів, dBm;

$RSSI$  – Received Signal Strength Indicator – загальний рівень прийнятого сигналу, включаючи корисний сигнал, шум та інтерференцію, dBm;

$N$  – кількість ресурсних блоків у смузі пропускання (залежить від ширини каналу, діапазон від 6 до 100).

Для практичних застосувань ця формула використовується у логарифмічній формі (2):

$$RSRQ \text{ (dB)} = 10 \log(N) + RSRP \text{ (dBm)} - RSSI \text{ (dBm)}. \quad (2)$$

При функціонуванні мережі у штатних умовах показник  $RSRQ$  набуває значень від  $-5$  дБ до  $-19,5$  дБ (чим ближче рівень показника  $RSRQ$  до 0, тим якість сигналу краща).

На першому етапі випробування проводилися з використанням базової станції 4G/LTE зі штатно встановленим хендовером за показником RSRP.

При вимкнених засобах РЕБ було перевірено якість зв'язку між смартфонами. Скриншот індикаторної панелі одного зі смартфонів наведено на рисунку 5.

Представлений вигляд індикаторної панелі смартфона наочно демонструє, що програмою GSM NetMonitor фіксується низка важливих для функціонування мережі показників:

Received Signal Strength Indicator (RSSI) (загальний рівень прийнятого сигналу) – “мінус” 83 dBm, (стабільний зв'язок, незадовільний зв'язок – гірше “мінус” 100 dBm).



Рис. 5. Скриншот індикаторної панелі смартфона Samsung S21 при відсутності впливу сигналу РЕБ

Bandwidth (смуга робочих частот) – 10 MHz.

TAG, Timing Advance Group (час затримки сигналу від смартфона до базової станції) – близько 5 км (1 TAG  $\approx$  550 м).

CI, Carrier-to-Interference (співвідношення потужності частоти-носія до рівня опорний сигналу)  $\approx 10$  dB.

PC1, Power Control Level 1 (рівень потужності сигналу смартфона)  $\approx 10$  dB.

Band (робочий діапазон) – B28 (700 MHz).

Після впливу на мережу 4G/LTE завади, згенерованої вузькосмуговими засобами РЕБ (у межах робочого діапазону частот базової станції) її робота втрачала стабільність – зв'язок на робочому каналі порушувався, внаслідок того, що функція хендоверу не була реалізована.

При цьому, за невеликих потужностей випромінювання купольного засобу РЕБ (менше 0,5 W) зв'язок ще підтримувався, але погіршеної якості. При великих потужностях випромінювання засобів РЕБ (більше 1 W) зв'язок між смартфонами втрачався, базова станція свою властивість хендоверу не реалізувала.

Поясненням отриманого результату може слугувати той факт, що середній рівень потужності опорного сигналу RSRP при включенні засобу РЕБ або залишався незмінним, або, найбільш ймовірно, дещо підвищувався (за рахунок суперпозиції із сигналом завади), що сприймалося базовою станцією як свідчення високої якості зв'язку (хоча, насправді, зв'язок був відсутній).

Після ініціації на базовій станції хендоверу за показником RSRQ і увімкненні штатного мобільного засобу РЕБ потужністю 100 W роботоспроможність користувацьких пристроїв не порушувалася (завдяки реалізації хендоверу, вони перемикалася на вільний від завади частотний діапазон, зокрема, з діапазону B28 на діапазон B8).

Скриншот індикаторної панелі смартфона після впливу засобу РЕБ представлено на рисунку 6.

Поясненням отриманого результату може бути той факт, що рівень показника RSRQ на робочому каналі, при увімкненні засобу РЕБ, зменшився до критичного позначки (за рахунок суттєвого зростання рівня показника RSSI та незначного зростання рівня показника RSRP, що призвело до збільшення різниці між ними і досягнення показником RSRQ величини гіршої, ніж  $-19,5$  dB). Очевидно, що саме цей ефект став сигналом для базової станції щодо реалізації функції хендоверу, внаслідок чого було забезпечено практично безперервний зв'язок між смартфонами.



Рис. 6. Скриншот індикаторної панелі смартфона Samsung S21 при наявності впливу засобу РЕБ

Таким чином, мережа 4G/LTE, при інсталяції на базових станціях функції хендоверу за показником RSRQ може бути стійкою до впливу вузькосмугових завад від потужних сучасних засобів РЕБ.

Наукова новизна статті полягає у виявленні стійкості (якості) зв'язку мережі 4G/LTE до впливу РЕБ завдяки використанню технології хендовер за показником RSRQ.

#### **Висновки і перспективи подальших досліджень**

Проведені випробування підтвердили можливість забезпечення роботи мережі 4G/LTE в умовах впливу вузькосмугових завад від штатних засобів РЕБ великої потужності при встановленій на базових станціях функції хендоверу за показником RSRQ.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення конкретних характеристик засобів РЕБ для підвищення ефективності придушення (максимальні потужності та смуги випромінювання, характеристики спрямованості антен, віддаленість від базових станцій тощо).

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Продукція компанії Ericsson. URL: <https://dovidnyk.info/index.php/Brand/562> (дата звернення: 12.05.2026).
2. Вимірювання сигналу за допомогою програми Netmonitor lite. URL: <https://droth.biolio.cx.ua/articles/jak-koristuvatisja-programoju-netmonitor.html> (дата звернення: 12.05.2026).
3. Функція хендоверу (Handover) – автоматичне перемикання робочої частоти. URL: <https://studfile.net/preview/2425953/page:2/> (дата звернення: 12.05.2026).
4. Параметри якості сигналу 4G/LTE. URL: <https://www.gsmsota.ua/blog/stati/parametry-kachestva-signala-lte-4g> (дата звернення: 12.05.2026).
5. 4G/LTE – PHY Measurement. RSRQ (Reference Signal Recieved Quality)/ URL: [https://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_RSRQ.html](https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_RSRQ.html). (дата звернення: 12.05.2026).
6. Катков Ю. І., Березовська Ю. В., Пшеничний Ю. С., Рижаков М. М., Прокопов С. В. Аналіз загроз та вразливостей під час впровадження технології 4G/LTE // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2019. № 4. С. 25–38. DOI: 10.31673/2412-4338.2019.042538.
7. Ленков І. В., Фесенко П. О., Гусак Б. Т. Інструмент оцінки продуктивності бездротового зв'язку з безпілотниками у стільникових мережах 4G // Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. 2020. № 1. С. 28–34. DOI: 10.31673/2518-7678.2020.012834.
8. Ветошко І. П., Носков В. І. Evaluation of Voice Transmission Quality in the LTE Networks // Information and Telecommunication Sciences. 2021. Vol. 12, No. 2. P. 22–26. DOI: 10.20535/2411-2976.22021.22-26.
9. Кравчук С. О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій системна архітектур: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 199–206.

*Надійшла до редколегії 08.05.2026.*

*Схвалена до друку 22.05.2026.*

*Дата публікації 29.05.2026.*