

TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS AND NETWORKS
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

УДК 621.396.677.49

DOI:10.30837/rt.2026.1.224.06

*Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО, д-р техн. наук, В.О. БАДЕСВ***ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В МЕРЕЖАХ
МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ПРИ СУМІСНОМУ ВИКОРИСТАННІ
РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА****Вступ**

Сучасні пристрої здебільшого налаштовані на використання технологій для доступу в Інтернет. Ця взаємодія контролюється стандартами мобільного зв'язку, які визначають параметри радіосигналу, методи передачі та протоколи шифрування для перетворення інформації в звук, відео або текст. Процес розробки цих стандартів почався з 1G і поступово вдосконалювався з розробкою кожного нового покоління стандартів. Зараз у багатьох країнах, в тому числі і в Україні, найпоширенішим стандартом є 4G. Технологія 5G вже існує та активно впроваджується, а повний перехід запланований на 2030–2035 рр. Натепер вчені розробили технічну документацію для майбутнього стандарту 6G, але про його офіційну презентацію ще не оголошено.

Сучасні технології мобільного інтернету базуються на стандарті безпроводового зв'язку 4G LTE. 4G LTE відзначився значним покращенням швидкості передачі даних на мобільних пристроях, зокрема смартфонах, що дозволило споживачам насолоджуватися потоковою передачею HD-відео та грати в найновіші мобільні відеоігри.

Зараз цей стандарт використовується всіма українськими операторами. Він є основою для сучасної інфраструктури зв'язку. В Україні для 4G виділено частотний діапазон 1,8 ГГц. Цей стандарт підтримують всі мобільні гаджети, випущені після 2012 року.

Максимально можлива швидкість передачі даних в 4G – 1000 Мбіт/с. Проте на практиці, через втрати при передачі та завантаженість мережі, реальна швидкість зазвичай ближча до 100 Мбіт/с. Навіть якщо оператор заявляє про 150 Мбіт/с, цю швидкість не завжди можливо отримати.

Поточні швидкості 5G коливаються від 40 до 1100 Мбіт/с, в залежності від типу використовуваної мережі 5G. За оцінками експертів, завдяки технологіям, таким як спектр міліметрових хвиль і формування променя, найшвидша швидкість 5G може досягти 10 000 Мбіт/с.

З найважливіших переваг 5G варто виділити декілька основних:

1) Збільшення кількості пристроїв, що підключаються одноразово – до мільйона на квадратний кілометр (проти 100 тисяч пристроїв у 4G). Для користувача мобільного зв'язку це навряд чи може стати проблемою. Але одне з головних передбачуваних сфер застосування 5G – Інтернет речей (IoT). Це особливість, котра збільшує в 10 разів щільність пристроїв.

2) Оптимізація передачі сигналу, антени та підсилювальні станції 4G є набагато менш ефективними, ніж базові станції 5G. У той час, коли стандарти попереднього покоління спрямовували радіосигнал у певні зони і даремно витрачали енергію, випромінювачі 5G націлені на конкретні пристрої та оптимізують непотрібні втрати.

3) Висока енергоефективність є ще однією перевагою. Порівняно з LTE, 5G стандарт споживає майже на чверть менше енергії при передачі та прийомі сигналів. Ця перевага логічно впливає з вищезазначених пунктів і є критично важливою для наступного покоління мобільних пристроїв, зокрема в умовах автономної роботи, де час є ключовим фактором у відповіді в мілісекундах. Тому смартфони з модулями 5G споживають приблизно на 20 % менше енергії в режимі перегляду веб-сторінок, що робить їх більш енергоефективними порівняно із попередніми технологіями.

У табл. 1 наведено основні відмінності між трьома поколіннями мереж: 4G, яке поступово виводиться з експлуатації; 5G, яке набуває все більшого значення; і 6G, яке з'явиться в найближчому майбутньому. Далі проаналізуємо ці відмінності більш детально і з'ясуємо, чим зумовлене кількісне зростання ключових параметрів.

Таблиця 1

Характеристики сучасних стандартів зв'язку			
Параметр	4G	5G	6G (прогнозовано)
Швидкість передачі даних	До 100 Мбіт/с	До 10 Гбіт/с	Перевищує 100 Гбіт/с
Затримка	30 – 50 мс	до 10 мс	Подальше зменшення
Кількість підключених пристроїв	до 100 тис пристроїв на км ²	до 1 млн пристроїв на км ²	Значне збільшення
Пропускна здатність	До 1 Гбіт/с	До 20 Гбіт/с	Значне збільшення
Частотний діапазон	2 – 8 ГГц	24 – 100 ГГц	Розширення вище 100 ГГц
Енергоефективність	Добра	Покращена	Подальше покращення
Застосування	Мобільний зв'язок	Мобільний зв'язок, Інтернет речей, VR/AR	Розширене використання IoT, AI, розумних технологій тощо

Кількісне зростання основних параметрів у мережах зв'язку (наприклад, швидкість передачі даних, кількість підключених пристроїв, пропускна здатність) пов'язане з рядом технологічних та інфраструктурних розвитків. Також з розвитком технологій у сфері безпроводового зв'язку відбувається вдосконалення антен, модуляційних схем, компресії даних та інших технічних аспектів, що дозволяють ефективніше використовувати радіохвилі.

З використанням високочастотних діапазонів та їх розширенням у 5G та планування для 6G, сприяє збільшенню пропускної здатності і швидкості передачі даних. Масштабне використання Multiple Input Multiple Output (MIMO) у 5G та подальше в 6G дозволяє одночасно передавати та отримувати багато сигналів, що підвищує якість і швидкість зв'язку. А з впровадженням нових та вдосконаленням існуючих протоколів (наприклад, в 5G – NR) забезпечує більшу ефективність та швидкість мереж. Застосування розумних технологій, штучного інтелекту і алгоритмів машинного навчання допомагає оптимізувати роботу мережі, пристосовуючись до змін у завантаженості та обробці даних. Впровадженням все більшого обсягу підключених пристроїв в рамках Інтернет речей (IoT), виникає необхідність у більшій пропускній здатності та обробці даних.

Ці фактори спільно сприяють кількісному зростанню ключових параметрів в еволюції мобільних мереж від 4 до 6G. З розвитком сімейства технологій IMT (International Mobile Telecommunications) удосконалюються і методи оцінки умов їх електромагнітної сумісності між собою і з іншими радіоелектронними засобами (РЕЗ), які в своїй основі мають враховувати специфічні особливості кожної технології [1, 2]. Використання радіочастот за принципом технологічної нейтральності вимагає визначення деякого узагальненого критерію електромагнітної сумісності (ЕМС). В проєкті WARECS в якості такого критерію запропоновано використовувати крайову маску блоку ВЕМ, яка є "регуляторною" спектральною маскою в блоці спектра, що виділено оператору [3]. Рефармінг радіочастотного спектра вимагає розробки умов спільного функціонування мереж декількох стандартів в суміжних смугах частот в межах одного діапазону. Також необхідно враховувати і варіанти комбінованого використання несійних частот DC / DB (Dual Carrier / Dual Band) при агрегуванні в UMTS [4,5]. У [6] запропоновано критерій енергетичної еквівалентності для оцінки ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектра. Суть рефармінгу полягає в можливості додаткового використання раніше виділених смуг радіочастот, наприклад LTE іншою, більш новою технологією стільникового зв'язку. В результаті такої процедури в одному частотному діапазоні можуть поєднуватися декілька технологій.

Об'єктом дослідження є процес ЕМС в мережах мобільного зв'язку. Предмет дослідження становлять моделі електромагнітних взаємодій і метод аналізу ЕМС.

Мета роботи – аналіз ЕМС при сумісному використанні LTE та 5G за критерієм енергетичної еквівалентності.

Критерій енергетичної еквівалентності для оцінки ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектра

Критерій базується на еквівалентності енергетичних характеристик в мережі, що замінюється [7], і новій мережі різних стандартів [8–18], необхідно тільки врахувати відмінні риси РЕЗ [6]. Практична значимість такого підходу полягає в тому, що умови ЕМС для більш "динамічних" радіоінтерфейсів нової мережі можуть бути визначені на базі вже апробованих умов для діючих мереж зі значно меншими витратами. Використовуючи запропонований критерій, можна на етапі планування фрагмента мережі з новою технологією, визначити його склад за кількістю передавачів і допустимій потужності їх випромінювання. Це дозволяє виключити можливу надмірність частотно-територіального плану, що формується для фрагмента мережі, що в кінцевому підсумку може вплинути на вартість експертизи ЕМС. І, нарешті, запропонований критерій є універсальним і може бути використаний по відношенню до інших потенційно несумісних РЕЗ, для цього слід лише вибрати відповідну ширину смуги пропускання його приймача.

Енергетична еквівалентність полягає в балансі енергетики, що випромінюється каналами існуючої мережі (наприклад LTE) та мережі, яка планується (наприклад 5G) в смузі пропускання потенційно несумісного РЕЗ. Еквівалентність енергетики [6] завад від мережі LTE і 5G в загальному має вигляд

$$P_{T\Sigma 5G}(\Delta f_{PE3}) \leq P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PE3}), \quad (1)$$

де $P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PE3})$, $P_{T\Sigma 5G}(\Delta f_{PE3})$ – сумарні потужності передавачів базових станцій (БС) LTE і 5G відповідно в смузі пропускання Δf_{PE3} потенційно несумісного РЕЗ.

Ступінь можливого збільшення потужності потенційної завади від 5G щодо діючої завади від LTE в смузі частот $\Delta f_{PE3} = a \cdot m_f \Delta f_{LTE}$ описується співвідношенням [6]:

$$\eta = \frac{P_{T\Sigma 5G}(\Delta f_{PE3})}{P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PE3})} = \frac{S_{\Sigma(\Delta f_{PE3})5G} \cdot \Delta f_{5G}}{S_{cp(\Delta f_{PE3})LTE} \cdot \Delta f_{LTE}} = \frac{P_{T5G}}{P_{TLTE}} (1 - \beta_{5G}) \alpha \frac{n_{T5G} N_{5G}}{\sum_{i=1}^{L_f} (1 - \beta_{iLTE}) n_{LTE}(f_i)}, \quad (2)$$

де $S_{\Sigma(\Delta f_{PE3})5G}$ – сумарна спектральна густина потужності випромінювання передавачів БС 5G, близька до рівномірної в смузі Δf_{PE3} ; $S_{cp(\Delta f_{PE3})LTE}$ – середня сумарна спектральна густина потужності випромінювання передавачів БС LTE в смузі частот Δf_{PE3} (усереднена за смугою Δf_{PE3}); Δf_{LTE} , Δf_{5G} , – смуги частот LTE і 5G відповідно; m_f – параметр, що

характеризує кількість можливих частотних каналів LTE в смузі 5G, $1 \leq m_f \leq \left\lceil \frac{\Delta f_{5G}}{\Delta f_{LTE}} \right\rceil$,

$[x]$ – ціла частина числа; $n_{TLTE}(f_i)$ – число передавачів LTE, що випромінюють на одній завадовій ("активній") частоті f_i (з урахуванням MIMO); n_{T5G} – кількість передавачів на площадці 5G (з урахуванням MIMO); N_{5G} – кількість площадок, на яких планується установка передавачів 5G; β_{LTE} – показник, що враховує чинні обмеження потужності БС LTE, ($0 < \beta_{LTE} < 1$); β_{5G} – ступінь можливого обмеження потужності передавачів 5G за умовами ЕМС ($0 < \beta_{5G} < 1$); L_f – кількість "активних" частот, які не повторюються (частотних каналів) LTE в смузі приймача РЕЗ; α – параметр, який показує, наскільки смуга LTE більше (менше) смуги 5G:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\Delta f_{LTE}}{\Delta f_{5G}}, & \Delta f_{5G} > \Delta f_{LTE}, \\ 1, & \Delta f_{5G} \leq \Delta f_{LTE}. \end{cases} \quad (3)$$

Коли канал 5G Δf_{5G} ширше смуги пропускання LTE Δf_{LTE} , енергетика 5G потрапляє в неї частково в залежності від співвідношення цих смуг (параметра α). В іншому випадку, коли $\Delta f_{5G} \leq \Delta f_{LTE}$, енергетика 5G повністю зосереджена в смузі LTE, незалежно від зазначеного співвідношення (тому $\alpha = 1$).

Очевидно, що умовою збереження ЕМС за критерієм енергетичної еквівалентності є співвідношення, яке має вигляд

$$\eta = \frac{P_{T5G}}{P_{TLTE}} (1 - \beta_{5G}) \alpha \frac{n_{T5G} N_{5G}}{\sum_{i=1}^{L_f} (1 - \beta_{iLTE}) n_{LTE}(f_i)} \leq 1, \quad (4)$$

відповідно до якого сумарна потужність завади в смузі частот Δf_{PE3} від мережі 5G не перевищуватиме еквівалентну потужність завади, яка створювалась раніше в цій смузі мережею LTE.

За умовами повторного використання радіочастот в мережі LTE кожен з цих передавачів знаходиться на одній з площадок, що входять до складу окремого кластера. Отже, число передавачів LTE з частотою f_i , що повторюється буде залежати від загальної кількості площадок LTE (N_{LTE}) і коефіцієнта повторного використання частот в мережі (K), під яким будемо розуміти розмір кластера. З урахуванням цього припущення при сумісних площадках, коли $N_{LTE} = N_{5G}$, маємо

$$n_{TLTE}(f_i) = \frac{N_{LTE}}{K} = \frac{N_{5G}}{K}. \quad (5)$$

Крім того, кількість частот L_f також пов'язана з цим коефіцієнтом:

$$L_f = K(l_1 + l_2 + l_3), \quad (6)$$

де l_1, l_2, l_3 – кількість передавачів в межах одного трисекторного стільника.

З урахуванням цього:

$$\eta = \frac{P_{T5G}}{P_{TLTE}} (1 - \beta_{5G}) \alpha \frac{n_{T5G}}{\sum_{i=1}^{K(l_1+l_2+l_3)} \frac{(1 - \beta_{iLTE})}{K_i}} \leq 1. \quad (7)$$

Цей вираз дозволяє оцінити допустиму кількість передавачів 5G (n_{T5G}) на одній площадці, при якому не буде порушена енергетична еквівалентність:

$$n_{T5G} \leq \frac{P_{TLTE}}{P_{T5G}} \frac{\sum_{i=1}^{K(l_1+l_2+l_3)} \frac{(1 - \beta_{iLTE})}{K_i}}{(1 - \beta_{5G})} \frac{1}{\alpha}. \quad (8)$$

Наведені співвідношення будуються на припущенні, що антени БС LTE і 5G за типом і азимутотом випромінювання ідентичні. Вираз (8) дозволяє визначити умови збереження енергетичної еквівалентності мережі LTE в смузі частот відповідної ширини, що планується для створення мережі 5G при рефармінгу, а саме:

- обчислити допустиме число передавачів 5G на кожній з LTE площадці при плануванні секторів і конфігурацій МІМО на них;
- оцінити необхідне обмеження потужності випромінювання передавачів 5G.

Оцінка ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектра. Результати аналізу

Аналіз проведено в середовищі Matlab. Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ при різних значеннях ширини каналу LTE (рис. 1).

Для аналізу ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектра взято вихідні дані:

- потужності випромінювання

$$P_{TLTE} = 0.5 \text{ Вт}; P_{T5G} = 0.2 \text{ Вт};$$

- показники, що враховують чинні обмеження потужності БС

$$\beta_{5G} = 0,3; \beta_{LTE} = 0,3;$$

- ширина каналу

$$\Delta f_{LTE} = 125 \text{ кГц};$$

Δf_{5G} приймала значення 180, 720 та 2880 кГц;

- кількість передавачів

$$n_{TLTE} = 12; n_{T5G} = 12;$$

- кількість площадок на яких планується установка передавачів 5G

$$N = 1;$$

- кількість частот, які не повторюються

$$L_f \text{ приймала значення від 1 до 20.}$$

На рис.1 показано залежності показни-

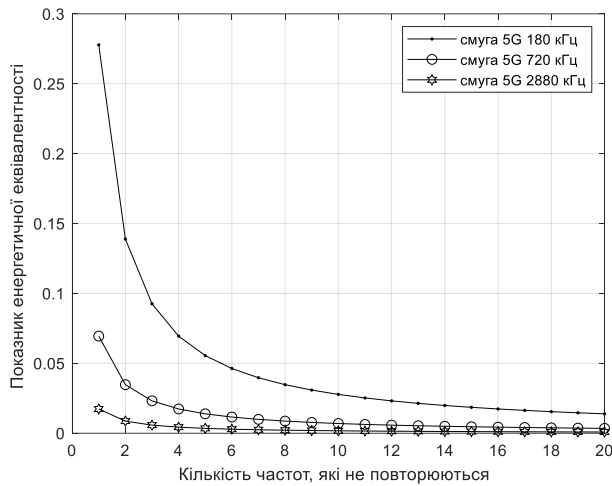


Рис. 1. Залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача LTE при різних значеннях ширини каналу 5G

ка енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача LTE при різних значеннях ширини каналу 5G. Отримані залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості частот, які не повторюються. Верхня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 180$ кГц, середня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 720$ кГц та нижня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 2880$ кГц. Аналіз показав, що зі збільшенням частот, які не повторюються показник енергетичної еквівалентності спочатку різко зменшується. Надалі цей показник практично не змінюється особливо для ширини каналу 5G $\Delta f_{5G} = 720$ кГц та $\Delta f_{5G} = 2880$ кГц. З даних графіків видно, що за будь-яких умов показник енергетичної еквівалентності менше одиниці, що задовольняє умовам ЕМС.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу 5G (рис. 2).

Для проведення цього експерименту було взято наступні вихідні дані:

- потужності випромінювання

$$P_{TLTE} = 0.5 \text{ Вт}; P_{T5G} = 0.2 \text{ Вт};$$

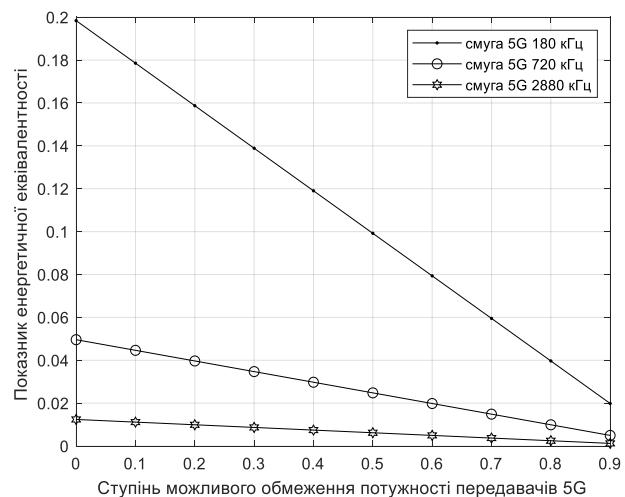


Рис. 2. Залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G

- показники, що враховують чинні обмеження потужності БС
- $\beta_{LTE} = 0,3$; β_{5G} змінювався від 0 до 0,9;
- ширина каналу
 $\Delta f_{LTE} = 125$ кГц;
- Δf_{5G} приймала значення 180, 720 та 2880 кГц;
- кількість передавачів
 $n_{TLTE} = 12$; $n_{T5G} = 12$;
- кількість площадок на яких планується установка передавачів 5G
 $N = 1$;
- кількість частот, які не повторюються
 $L_f = 2$.

На рис. 2 показано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G. Верхня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 180$ кГц, середня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 720$ кГц та нижня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 2880$ кГц. Проведений аналіз показав лінійне зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні ступеня можливого обмеження потужності передавачів 5G. Також даний показник зменшується при розширенні каналу 5G. З даних графіків видно, що умови забезпечення ЕМС виконуються.

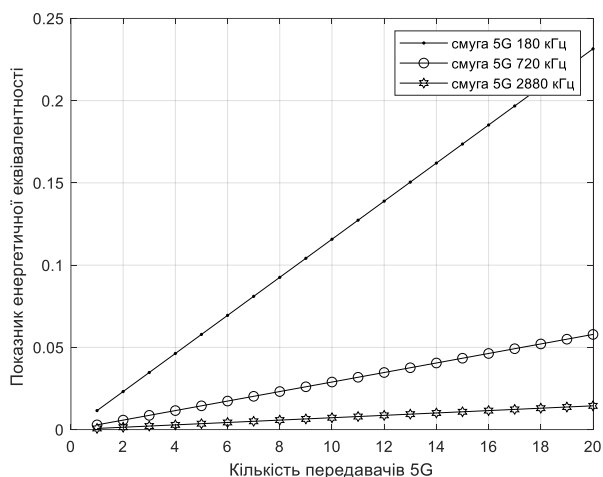


Рис. 3. Залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G

- кількість частот, які не повторюються, $L_f = 2$.

На рис. 3 показано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G. Верхня крива отримана при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 180$ кГц, середню криву отримано при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 720$ кГц та нижню криву отримано при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 2880$ кГц. Отримані залежності показують лінійне збільшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості передавачів 5G. Особливо це збільшення спостерігається при ширині каналу 5G $\Delta f_{5G} = 720$ кГц. З даних графіків видно, що умови забезпечення ЕМС виконуються.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G (рис. 3).

Для проведення цього експерименту було взято наступні вихідні дані:

- потужності випромінювання
 $P_{TLTE} = 0.5$ Вт; $P_{T5G} = 0.2$ Вт;
- показники, що враховують чинні обмеження потужності БС
 $\beta_{LTE} = 0,3$; $\beta_{5G} = 0,3$;
- ширина каналу
 $\Delta f_{LTE} = 125$ кГц;
- Δf_{5G} приймала значення 180, 720 та 2880 кГц;
- кількість передавачів $n_{TLTE} = 12$; n_{T5G} змінювалось від 1 до 20;
- кількість площадок, на яких планується установка передавачів 5G, $N = 1$;

Отримано залежності допустимої кількості передавачів 5G від смуги частот 5G при різних значеннях кількості частот, які не повторюються (рис. 4).

Для проведення цього експерименту було взято наступні вихідні дані:

- потужності випромінювання

$$P_{TLTE} = 0.5 \text{ Вт}; P_{T5G} = 0.2 \text{ Вт};$$

- показники, що враховують чинні

обмеження потужності БС

$$\beta_{LTE} = 0,3; \beta_{5G} = 0,3;$$

- ширина каналу

$$\Delta f_{LTE} = 125 \text{ кГц};$$

Δf_{5G} приймала значення від 180 до 2880 кГц;

- кількість передавачів

$$n_{TLTE} = 12;$$

- кількість площадок на яких планується установка передавачів 5G

$$N = 1;$$

- кількість частот, які не повторюються

L_f приймали значення 2, 5 та 10.

На рис. 4 показано залежності допустимої кількості передавачів 5G від ширина каналу 5G при різних значеннях кількості частот, які не повторюються.

Судячи з отриманих залежностей можна зробити висновок про те що, збільшити допустиму кількість передавачів 5G та дотриматись умов EMC можна за рахунок збільшення ширини каналу 5G та за рахунок збільшення кількості частот, які не повторюються.

Висновки

Проаналізовано критерій енергетичної еквівалентності, який запропоновано використовувати при рефармінгу радіочастотного спектра. Проведений аналіз дозволяє визначити умови збереження енергетичної еквівалентності мережі LTE в смузі частот відповідної ширини, що планується для створення мережі 5G при сумісному їх використанні, а саме:

- обчислити допустиме число передавачів 5G на кожній площадці з LTE при плануванні секторів;
- оцінити (в разі необхідності) необхідне обмеження потужності випромінювання передавачів 5G.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються при різних значеннях ширини каналу 5G. Отримані залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості частот, які не повторюються.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G. Ці залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів 5G при різних значеннях ширини каналу 5G, які показують збільшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості передавачів 5G.

Отримано залежності допустимої кількості передавачів 5G від ширина каналу 5G при різних значеннях кількості частот, які не повторюються. Аналіз показав, що збільшити допустиму кількість передавачів 5G та дотриматись умов EMC можна за рахунок збільшення

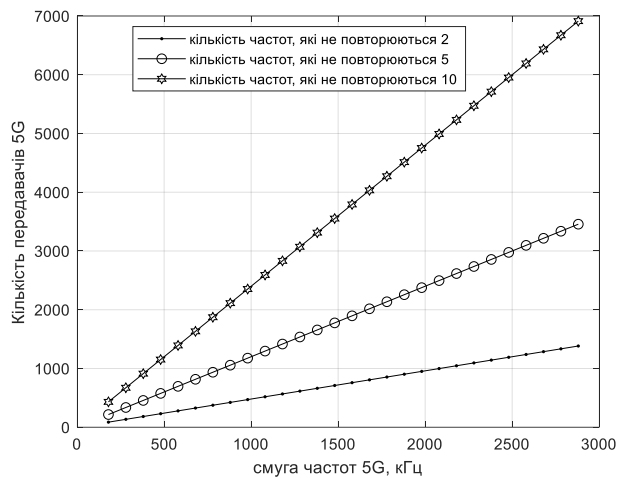


Рис. 4. Залежності допустимої кількості передавачів 5G від ширина каналу 5G

ширини каналу 5G та за рахунок збільшення кількості частот, які не повторюються. Чим ширші канали і чим більше частот, які не повторюються, тим більше передавачів можна розмістити в мережі, не погіршуючи якість зв'язку.

Проведений аналіз дає змогу зробити висновки про те, що чим ширший канал, тим більше даних можна передавати одночасно, що не суперечить теорії сигналів та передавання інформації та використовувати критерій енергетичної еквівалентності на практиці. Також збільшення смуги пропускання дозволяє обслуговувати більшу кількість пристроїв і забезпечувати більш високі швидкості передачі даних.

Збільшення кількості частот, які не повторюються, дає можливість зменшити ймовірність взаємних завад між різними передавачами. Це дозволяє щільніше розміщувати базові станції та збільшувати загальну пропускну здатність мережі.

Наведені результати дозволяють оцінити і спланувати можливу архітектуру створюваної радіомережі 5G в конкретних ситуаціях.

На основі отриманих даних можна зробити такі висновки:

1. Оптимізація архітектури мережі 5G:

- збільшення ширини каналу: Це дозволить підвищити пропускну здатність мережі та забезпечити більш високі швидкості передачі даних для користувачів;

- збільшення кількості частот, які не повторюються: Це дозволить зменшити рівень завад і підвищити надійність мережі, особливо в умовах високої щільності розміщення базових станцій;

- комбінування обох факторів: Оптимальне співвідношення ширини каналу та кількості частот, які не повторюються буде залежати від конкретних умов експлуатації мережі.

2. Планування розгортання мережі 5G:

- гнучкість планування: Отримані дані дозволяють розробити більш гнучкі плани розгортання мережі 5G, адаптуючи їх до конкретних потреб регіону або міста;

- оптимізація витрат: За рахунок раціонального використання спектрального ресурсу можна знизити загальні витрати на будівництво та експлуатацію мережі.

3. Покращення якості обслуговування користувачів:

- вищі швидкості передачі даних: Завдяки збільшенню ширини каналу користувачі зможуть користуватися більш швидкісним інтернетом;

- стабільніший зв'язок: Збільшення кількості частот, які не повторюються, дозволить знизити ймовірність втрати зв'язку і підвищити його якість.

Список літератури:

1. Dike M. C., Rose E. L. Internationalization of mobile telecommunications: a systematic literature review // Review of International Business and Strategy. 2017. Vol. 27. № 3. P. 308–321.
2. Yun S. H., Kim Y., Kim M. Quality-adjusted international price comparisons of mobile telecommunications services // Telecommunications Policy. 2019. Vol. 43. № 4. P. 339–352.
3. Forde T. K., Doyle L. E., Ozgul B. Dynamic block-edge masks (BEMs) for dynamic spectrum emission masks (SEMs) // 2010 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum (DySPAN). IEEE, 2010. P. 1–10.
4. 3GPP TS 38.104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.
5. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation.
6. Аналіз електромагнітної сумісності угруповань радіоелектронних засобів в мережах мобільного зв'язку при рефармінгу радіочастотного спектра / Ю.Ю. Коляденко, Н.А. Чурсанов // Проблеми телекомунікацій. 2019. № 2 (25). С. 56–66. URL: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/02/192_kolyadenko_chursanov.pdf.
7. Volle Adam. Long Term Evolution // Encyclopedia Britannica, 10 Nov. 2023. URL: <https://www.britannica.com/technology/long-term-evolution>. Accessed 18 January 2024.
8. Damnjanovic A. et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks // IEEE Wireless communications. 2011. Vol. 18. № 3. P. 10–21.
9. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-advanced Pro and the Road to 5G. Academic Press, 2016.
10. Alsheikh M. A. et al. Machine learning in wireless sensor networks: Algorithms, strategies, and applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16. № 4. P. 1996–2018.
11. Błaszczyszyn B. et al. Stochastic geometry analysis of cellular networks. Cambridge University Press, 2018.
12. Lin X. An overview of 5G advanced evolution in 3GPP release 18 // IEEE Communications Standards Magazine. 2022. Vol. 6. № 3. P. 77–83.

13. Vaezi M. et al. Cellular, wide-area, and non-terrestrial IoT: A survey on 5G advances and the road toward 6G // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24. № 2. P. 1117–1174.
14. Italiano L. et al. A Tutorial on 5G Positioning //arXiv preprint arXiv:2311.10551. 2023.
15. Bertenyi B. 5G evolution: What's next? // IEEE Wireless Communications. 2021. Vol. 28. № 1. P. 4–8.
16. Chen W. et al. The standardization of 5G-Advanced in 3GPP // IEEE Communications Magazine. 2022. Vol. 60. № 11. P. 98–104.
17. Ghosh A. et al. 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 // IEEE access. 2019. Vol. 7. P.127639–127651.
18. Muliar B., Koliadenko Y., Moskalets M., Loshakov V. and Ageyev D. Interaction Model and Phase States at Frequency Resource Allocation in a Grouping of Radio-Electronic Equipment of 5G Mobile Communication Network // 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). Kharkiv, Ukraine, 2022. P. 495–501. doi: 10.1109/PICST57299.2022.10238581.

Надійшла до редколегії 05.01.2026

Прийнята до друку після рецензування 23.04.2026

Публікація (оприлюднення) 30.04.2026

Відомості про авторів:

Коляденко Юлія Юрїївна – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського; Україна; e-mail: yuliia.koliadenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0247-2736>

Бадєєв Валерій Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського; Україна; e-mail: valerii.badieiev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4982-1840>