

# РАДИОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

## RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК621.396.677.49

#### АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ 5 G

**Коляденко Ю. Ю.** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Чурсанов М. О.** – аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Технологія нового покоління 5G / IMT-2020, як і будь-яка нова технологія, привносить свої специфічні особливості в усі аспекти, що стосуються практики її впровадження. Одним з таких особливо важливих аспектів є електромагнітна сумісність. На етапі підготовки до впровадження радіомереж технології 5G, необхідно завчасно потурбуватися про вжиття заходів щодо ефективної оцінки умов ЕМС для цих мереж на основі ретельного аналізу особливостей технології 5G, а також правильно і точно оцінивши ці умови – успішно забезпечити електромагнітну сумісність радіозасобів нових мереж.

**Мета.** Метою даної роботи є проведення аналізу електромагнітної сумісності мереж зв'язку 5G.

**Метод.** Аналіз головних особливостей радіоінтерфейсу 5G дозволяє вказати на очікувані особливості процедур оцінки умов ЕМС для цих мереж. Ці особливості головним чином стосуються урахування сумарної завади від мережі при її особливій архітектурі і динаміці змін, вибору нових моделей втрат (моделей каналу) при просторово-розподіленому випромінюванні багатовимірних антен МІМО і різномірному середовищі поширення сигналу, а також урахування спектральних властивостей нових форм сигналу і характеру випромінювання при нових неортогональних методах радіодоступу. Для аналізу ЕМС використана модель ослаблення сигналів в радіоканалах міліметрового діапазону, що враховує ослаблення радіохвиль у вільному просторі; втрати енергії радіохвиль при поширенні через дощі; ослаблення сигналу міліметрового діапазону при поширенні через листя дерев; ослаблення сигналів при проходженні через щільні перешкоди (будівлі, споруди, тощо).

**Результати.** Проведено аналіз ослаблення сигналу міліметрового діапазону у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості. Проведено аналіз ослаблення сигналу міліметрового діапазону при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. Проведено аналіз ослаблення сигналу міліметрового діапазону від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. Проведено аналіз значення потужності сигналу міліметрового діапазону на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості. Проведено аналіз значення потужності сигналу міліметрового діапазону на вході приймача при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. Проведено аналіз значення потужності сигналу міліметрового діапазону на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної.

**Висновки.** Проведені дослідження показників ЕМС дозволяють дати рекомендації щодо застосування технології 5G в конкретних практичних ситуаціях.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** мережі зв'язку 5G, електромагнітна сумісність.

#### АБРЕВІАТУРИ

FD – Full Duplex;

MIMO – Multiple Input Multiple Output;

NR – New Radio;

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex-

ing;

ЕМС – електромагнітна сумісність;

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології;

ММД – міліметровий діапазон;

МСЕ – Міжнародний союз електрозв'язку;

ЧТП – частотно-територіальне планування;

ШСД – ширококутовий доступ.

## НОМЕНКЛАТУРА

$L_g$  – ослаблення радіохвиль у вільному просторі;  
 $R$  – відстань між передавачем і приймачем;  
 $f$  – частота;  
 $L$  – ослаблення сигналів в радіоканалах ММД;  
 $k$  – коефіцієнт, що визначає наявність чи відсутність опадів;  
 $Y$  – інтенсивність опадів;  
 $K_d$  – параметр, що залежить від частоти, температури, поляризації дБч/м<sup>2</sup>;  
 $a$  – безрозмірний параметр, що залежить від частоти, температури, поляризації;  
 $l_T$  – питомий погонний коефіцієнт ослаблення сигналу ММД в тумані;  
 $V_T$  – коефіцієнт вмісту води в атмосфері, який визначається по оптичній видимості;  
 $r$  – глибина шару листя, що перекриває;  
 $L_M$  – ослаблення сигналу в матеріалах, дБ;  
 $f_0$  – несійна частота;  
 $U_{np}$  – швидкість руху приймача;  
 $U_{nep}$  – швидкість руху передавача;  
 $C$  – швидкість поширення радіохвиль;  
 $L_d$  – ослаблення сигналу в дощах;  
 $P_{np}$  – потужність сигналу, що приймається;  
 $P_{nep}$  – потужність передавача;  
 $G_{nep}$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени;  
 $G_{np}$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени;  
 $\eta_{nep}$  – коефіцієнт корисної дії передавального фідера;  
 $\eta_{np}$  – коефіцієнт корисної дії приймального фідера.

## ВСТУП

В останні десятиліття у всьому світі стрімко розвиваються ІКТ, що безпосередньо впливають на розвиток економіки, освіти, науки, охорони здоров'я, культури і способу життя людини. За даними МСЕ вже в 2012 році Інтернетом користувався кожен третій житель Землі, і число користувачів неухильно зростає. ІКТ і послуги на базі ШСД рік від року стають все більш доступними для населення, в тому числі і за вартістю.

Метою мереж зв'язку п'ятого покоління є задоволення все зростаючих потреб у мобільному зв'язку [1–9]. Мережі 5G грають ключову роль у перетворенні міст в розумні міста, що дозволить громадянам і суспільству в цілому, отримати соціально-економічні вигоди, які дає передова цифрова економіка з інтенсивним використанням даних [10].

У листопаді 2020 року в Україні почали звільняти частоти для мереж 5G. Відповідний план затвердило

Міністерство цифрової трансформації України. Оголошення тендеру на частоти для розвитку 5G планується на жовтень 2021 року. Початок розгортання мережі 5G очікується з 2022 року в найбільших населених пунктах.

Технологія нового покоління 5G / IMT-2020, як і будь-яка нова технологія, привносить свої специфічні особливості в усі аспекти, що стосуються практики її впровадження. Одним з таких особливо важливих аспектів є електромагнітна сумісність. На етапі підготовки до впровадження радіомереж технології 5G, названої NewRadio (NR), необхідно завчасно потурбуватися про вжиття заходів щодо ефективної оцінки умов ЕМС для цих мереж на основі ретельного аналізу особливостей технології 5G, а також правильно і точно оцінивши ці умови – успішно забезпечити електромагнітну сумісність радіозасобів нових мереж.

**Об'єктом дослідження** є процес поширення сигналів міліметрового діапазону, які використовуються в технології нового покоління 5G.

**Предмет дослідження** становлять моделі поширення сигналів міліметрового діапазону, які використовуються в технології нового покоління 5G.

**Метою роботи** є проведення аналізу електромагнітної сумісності мереж зв'язку 5G.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для впровадження 5G Кабінет міністрів затвердив план використання радіочастотного ресурсу України до 2025 року. Ці зміни дозволять користувачам отримувати більш стабільні і високі швидкості передачі інформації.

МСЕ з 1995 року став міжнародним координатором робіт з електрозв'язку, спрямованих на створення глобального інформаційного суспільства. Створивши Регламент радіозв'язку [11] і розділивши поверхню Землі на три регіони, МСЕ організував певний порядок в частотному користуванні. Однак частотний ресурс, що належить всьому людству, виключно активно використовує і до теперішнього часу частотні діапазони нижче 5 ГГц, які практично перевантажені. Присвоєння радіочастот і радіочастотних каналів для радіоелектронних засобів в цих діапазонах здійснюється за технологіями ЧТП [12–14] з обов'язковим розрахунком ЕМС радіозасобів. Тому одне з основних напрямків по створенню нового покоління мобільного зв'язку 5G це освоєння частотних діапазонів вище 5 ГГц поки ще недостатньо використовуваних. Відносно вільні ділянки спектра є поки на надвисоких частотах, наприклад, на межі діапазонів Х і С не зайнята смуга частот близько 1,5 ГГц. Але найменше освоєний ММД хвиль, тому саме в цьому діапазоні можливий розвиток стандарту 5G зі швидкостями передачі даних від 1 до 10 Гбіт / с. Діапазон міліметрових хвиль використовується поки не дуже активно і вивчений ще не повністю. Тому становить інтерес дослідження можливостей мобільного зв'язку в цьому діапазоні хвиль.

## 2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Ключовими рішеннями і технологічними компонентами [1–4] мережі радіодоступу 5G NR є:

1) використання нових форм сигналу, що одержали назву Non-Orthogonal Waveform і дають вигравш в спектральній ефективності по відношенню до OFDM;

2) застосування повного дуплексу FD – одночасної передачі і прийому в загальній смузі частот, переважно в коротких з'єднаннях «точка-точка» (D2D, V2V);

3) застосування багатовимірних антен MIMO, в яких ефективно реалізується режим динамічного формування спрямованих променів для передачі (3D/Beamforming), що дозволяє збільшити енергетичний вигравш в очікуваних високих діапазонах частот і поліпшити покриття і спектральну ефективність в ультра-щільних малих стільниках;

2) застосування малих стільників Small Cellco з надщільним розподілом (один приймально-передавач на кожного користувача), що розвантажують макростільниками мережі з поділом середовищ передачі команд управління і призначеного для користувача трафіку між макро- і Small-стільниками в різних смугах частот (концепція “PhantomCell”).

Радіочастоти для мереж 5G – це одна з головних компонент, що робить істотний вплив на ЕМС [6, 9, 12].

На Всесвітній конференції радіозв'язку WCR-15 були визначені нові діапазони радіочастот для 5G, в тому числі діапазони сантиметрових і міліметрових хвиль [12]. Загалом цей радіочастотний спектр розміщений в трьох областях: нижче 1 ГГц, від 1 ГГц до 6 ГГц і вище 6 ГГц (аж до 100 ГГц).

В якості головних особливостей цього спектра з точки зору ЕМС можна виділити наступне: можливість використання широкої безперервної смуги каналу (сумарно до 1–2 ГГц); малі зони обслуговування (дальність випромінювання) в малих (Small) і ультра-малих (UltraSmall) стільниках; можливість використання малогабаритних багатоелементних антен MIMO з вузькими променями як в базових станціях, так і в абонентських пристроях; різний характер втрат при поширенні сигналу, зокрема, значний вплив на рівень втрат додаткових раніше невідомих в стільниковому зв'язку факторів (гази – кисень, водяну пару і ін.) [15, 17].

Опис радіоінтерфейсів [1, 6, 9, 12, 15, 17] мереж 5G представлено в табл. 1.

Аналіз головних особливостей радіоінтерфейсу 5G [1, 6, 9, 12, 15, 17, 18] дозволяє вказати на очікувані особливості процедур оцінки умов ЕМС для цих мереж. Ці особливості головним чином стосуються урахування сумарної завади від мережі при її особливій архітектурі і динаміці змін, вибору нових моделей втрат (моделей каналу) при просторово-розподіленому випромінюванні багатовимірних антен MIMO і різномірному середовищі поширення сигналу, а також урахування спектральних властивостей нових форм сигналу і характеру випромінювання при нових неортогональних методах радіодоступу.

Таблиця 1 – Опис радіоінтерфейсів мереж 5G

Параметр	NR нижче 6 ГГц	NR вище 6 ГГц
Ширина каналу	5 МГц, 10 МГц, 15 МГц, 20 МГц, 25 МГц, 30 МГц, 40 МГц, 50 МГц, 60 МГц, 80 МГц, 100 МГц.	50 МГц, 100 МГц, 200 МГц и 400 МГц.
Діапазони	Окремі смуги 450–3800 МГц, а також 3800–4200 МГц і 4400–5000 МГц	26,5–29,5 ГГц, 24,25–27,5 ГГц 37–40 ГГц
Затримка (на рівні радіоінтерфейсу)	4 мс (Фаза 1) 1 мс (Фаза 2)	4 мс (Фаза 1) 1 мс (Фаза 2)
Пікові швидкості	2 Гбіт/с і більше	До 20 Гбіт/с

Головними недоліками сигналів ММД є:

1) сильне ослаблення сигналу ММД при поширенні;  
 2) рівень сигналу істотно залежить від впливу гідрометеорів (краплі дощу, сніг, град, туман) і від присутності в атмосфері твердих неоднорідностей (листя дерев, зграї птахів, пил);

3) високий ступінь впливу на рівень сигналу перешкод, які закривають трасу;

4) наявність зон сильного ослаблення сигналу на деяких частотах через ослаблення сигналів ММД молекулами кисню і парами води.

Слід зазначити, що у відомих роботах хоча і є в наявності результати аналізу ослаблення сигналів ММД, але не в повному обсязі. Також у відомих роботах відсутній аналіз потужностей сигналу ММД на вході приймача.

## 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Основне ослаблення радіохвиль у вільному просторі визначаються виразом:

$$L_e = 92,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(R) \quad [\text{дБ}]. \quad (1)$$

В [15] запропонована модель ослаблення сигналів в радіоканалах ММД, що враховує:

- ослаблення радіохвиль у вільному просторі;
- втрати енергії радіохвиль при поширенні через дощі;
- ослаблення сигналу ММД при поширенні через листя дерев;
- ослаблення сигналів при проходженні через щільні перешкоди (будівлі, споруди, тощо).

Модель представлена виразом:

$$L = L_e + kR(K_d Y^a + l_T V_T) + 0,2 f^{0,3} r^{0,6} + L_M \quad [\text{дБ}] \quad (2)$$

У радіоканалах 5G можуть спостерігатися і часові завмирання [13]. Їх основною причиною є доплерівська зміна частоти при русі абонентів відносно один одного. Якщо мобільна станція переміщається, то через доплерівський зсув частоти сигнал зазнає спотворення. При наближенні абонентів зв'язку, зміна частоти визначиться виразом:

$$f = f_0 \left( \frac{C + U_{np}}{C - U_{nep}} \right).$$

При віддаленні абонентів один від одного доплерівська зміна частоти визначається виразом:

$$f = f_0 \left( \frac{C - U_{np}}{C + U_{nep}} \right).$$

Ослаблення сигналу в дощах визначається виразом:

$$L_d = K_d Y^a.$$

У табл. 2 наведені значення погонного ослаблення сигналу в дощах в залежності від інтенсивності опадів і частоти.

Таблиця 2 – Погонне ослаблення в дощах

Частота, ГГц	Процент часу року	Інтенсивність опадів	Погонне ослаблення сигналу в дощах, дБ/км
30	1	0,6	0,1
	0,3	2,4	0,43
	0,1	6	1,08
	0,03	12	2,18
	0,01	22	4,02
60	1	0,6	0,63
	0,3	2,4	1,84
	0,1	6	3,73
	0,03	12	6,35
	0,01	22	10,12
90	1	0,6	0,7
	0,3	2,4	1,99
	0,1	6	3,98
	0,03	12	6,7
	0,01	22	10,6

Питомий погонний коефіцієнт ослаблення сигналу ММД в тумані наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Питомий погонний коефіцієнт ослаблення сигналу ММД в тумані

$f_0$ , ГГц	30	43	60	150
$l_T$ , дБ М <sup>3</sup> /гкм	0,438	0,876	1,65	7,14

Коефіцієнт вмісту води в атмосфері наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнт вмісту води в атмосфері

Оптична видимість, м	30	50	80	200
$V_T$ , г/М <sup>3</sup>	2	1	0,5	0,2

Сигнали ММД погано проникають через тверді матеріали. У табл. 5 наведені експериментальні дані [15, 16, 19] по ослабленню сигналу ММД в будівельних матеріалах. Особливо сильне ослаблення сигналів ММД в цеглі і бетоні, що ускладнить використання ММХ для стільникового зв'язку.

Таблиця 5 – Коефіцієнт ослаблення сигналу ММД в матеріалах

Коефіцієнт ослаблення сигналу ММД в матеріалах $L_M$ , дБ				
Матеріал	Товщина, см	Частота, ГГц		
		3	30	60
Скло	0,4	6,4	2,5	3,6
Гіпсокартон	2,5	5,4	–	6
Дерево	0,7	5,4	3,5	–
ДСП	1,6	–	0,6	–
Штукатурка	1,5	–	2,9	–
Цегла	10	18,5	178	–
Бетон	10	17,7	175	–

Рівняння передачі визначається з виразу [13]:

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} + \eta_{nep} + \eta_{np} - L. \quad (3)$$

Для аналізу EMC мережі 5G використані характеристики базових і абонентських станцій [17,18] RAN IMT-2020 (табл. 6 – табл. 8).

Таблиця 6 – Типові та EMC-характеристики базових станцій мережі 5G RAN IMT-2020 в діапазонах 24,25–86 ГГц

Параметри	Частота, ГГц		
	24,25	37,52	66,86
Максимальна вихідна потужність, дБм	$\geq 34,5$	$\geq 32,5$	$\geq 30,5$
Коефіцієнт шуму, дБ	10	12	14
Чутливість приймача, дБм	-119	-119	-119
$\eta_{np}$ , дБ	5,57	5,57	5,57
$\eta_{nep}$ , дБ	-2	-2	-2

Таблиця 7 – Типові і EMC-характеристики абонентських станцій мережі 5G RAN IMT-2020 на діапазонах 24,25–86 ГГц

Параметри	Частота, ГГц		
	24,25	37,52	66,86
Максимальна вихідна потужність, дБм	22	22	22
Коефіцієнт шуму, дБ	10	12	14
Чутливість приймача, дБм	-119	-119	-119
$\eta_{np}$ , дБ	5,57	5,57	5,57
$\eta_{nep}$ , дБ	-2	-2	-2

Таблиця 8 – Посилення антени для основної пелюстки

Решітка	Посилення	Посилення, дБ
64x1	57,51	17,59
32x1	28,76	14,58
16x1	14,38	11,57
8x1	7,20	8,57
4x1	3,61	5,57

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

У середовищі Matlab за допомогою математичного моделювання проведено аналіз електромагнітної сумісності мережі 5G. В якості показників ефективності мережі обрано ослаблення сигналу при поширенні радіохвиль та потужність сигналу на вході приймача. Ці показники значною мірою впливають на критерій ефективності ЕМС – відношення потужності сигналу до потужності завади та шуму.

Проведено аналіз ослаблення сигналу у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц і на частоті 60 ГГц. Для проведення експерименту використано математичну модель (1).

Проведено аналіз ослаблення сигналу при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані у вільному просторі при різних значеннях товщини стіни. Додаткове ослаблення сигналу при поширенні через перешкоди становило 178 дБ для 10-ти см стіни і 676,4 дБ для 30-ти см стіни. В якості матеріалу стіни було використано цеглу. При цьому, стіна в 10 см відповідає випадку міжкімнатних перегородок, а стіна в 38 см відповідає випадку несучої стіни.

Проведено аналіз ослаблення сигналу від глибини шару листя, що перебиває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. При цьому відстань від передавача до приймача складала 100 м без урахування глибини шару листя.

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача абонентської станції. Вихідні дані для проведення експерименту: потужність передавача базової станції 32,5 дБм на частоті 30 ГГц та 30,5 дБм на частоті 60 ГГц, підсилення передавальної антени 17,59 дБ, підсилення приймальної антени 8,57 дБ, коефіцієнт корисної дії передавального фідера –2 дБ, коефіцієнт корисної дії приймального фідера 5,57 дБ.

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц і на частоті 60 ГГц. Відстань від передавача до приймача складала 500 м.

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц.

Проведено аналіз значення потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перебиває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. Відстань від передавача до приймача складала 100 м без урахування глибини шару листя.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

В результаті експерименту отримані залежності ослаблення сигналу у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис. 1) і на частоті 60 ГГц (рис. 2).

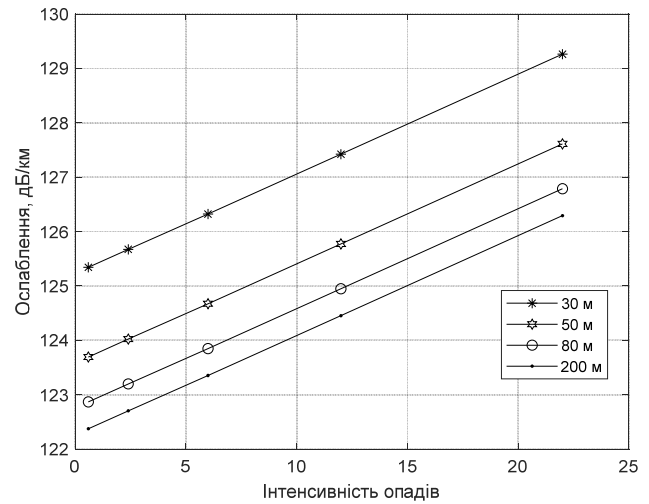


Рисунок 1 – Залежність ослаблення сигналу від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості при частоті 30 ГГц

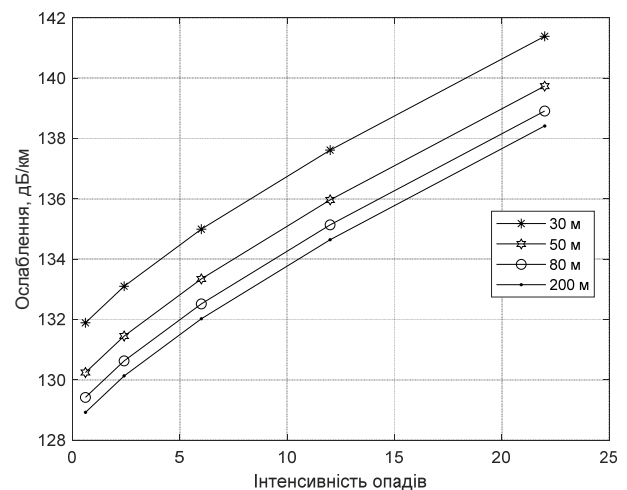


Рисунок 2 – Залежність ослаблення сигналу від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості при частоті 60 ГГц

Отримано залежності ослаблення сигналу від відстані поширення сигналу при різних значеннях товщини стіни (рис. 3). В якості матеріалу стіни було використано цеглу. При цьому, стіна в 10 см відповідає випадку міжкімнатних перегородок, а стіна в 38 см відповідає випадку несучої стіни.

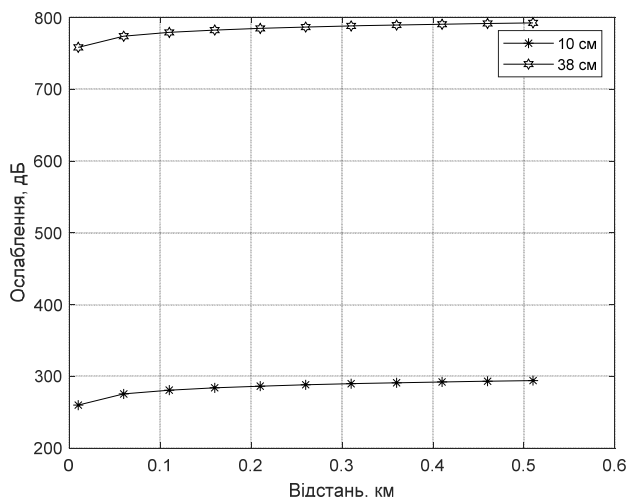


Рисунок 3 – Залежність ослаблення сигналу від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц

Отримано залежності ослаблення сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис. 4). При цьому відстань від передавача до приймача складала 100 м без урахування глибини шару листя.

Отримано залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис. 5) і на частоті 60 ГГц (рис. 6). Відстань від передавача до приймача складала 500 м.

Отримано залежності потужності сигналу на вході приймача від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц (рис. 7).

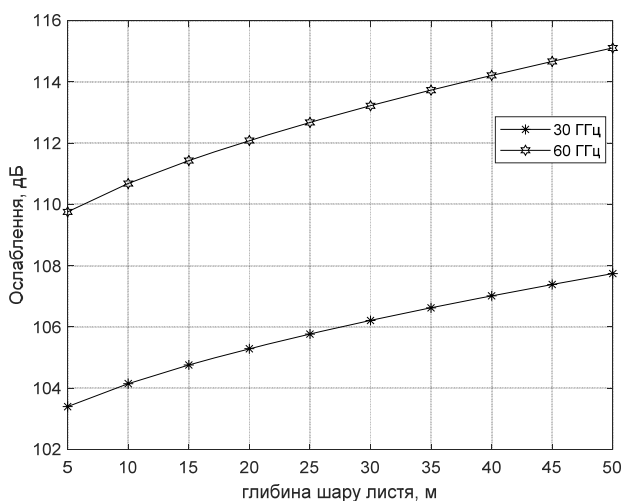


Рисунок 4 – Залежності ослаблення сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної

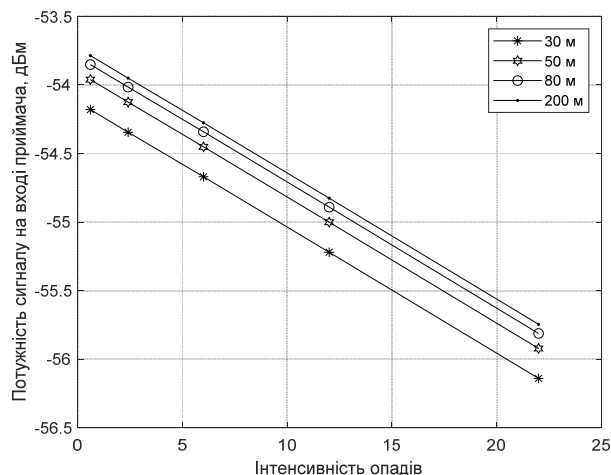


Рисунок 5 – Залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц

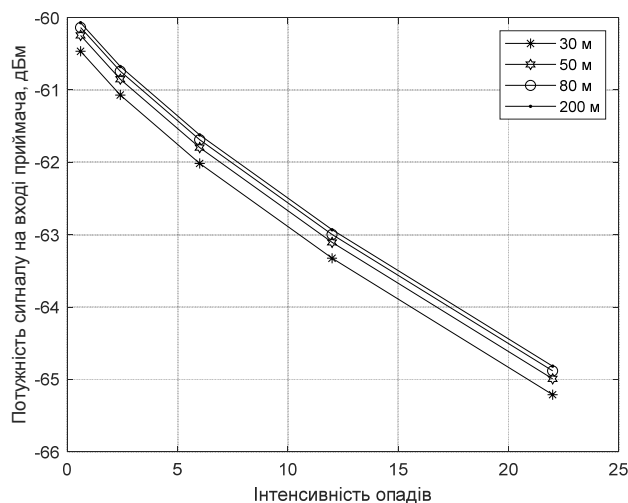


Рисунок 6 – Залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 60 ГГц

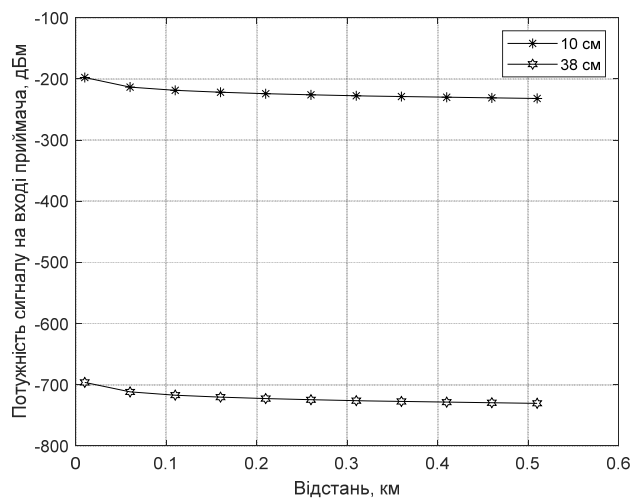


Рисунок 7 – Залежність потужності сигналу на вході приймача від відстані при різних значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц

Отримано залежності потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис. 8). Відстань від передавача до приймача складала 100 м без урахування глибини шару листя.

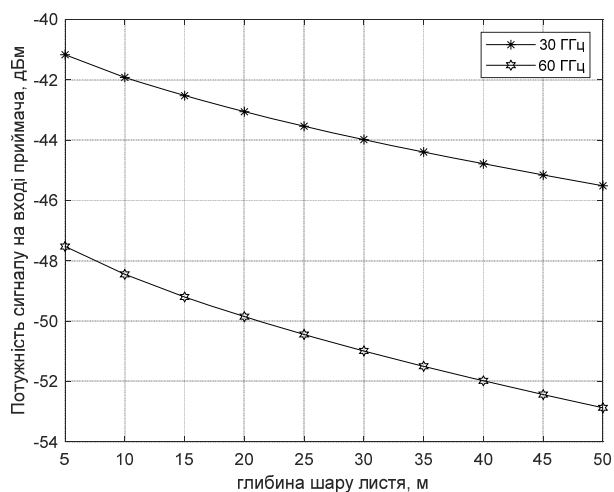


Рисунок 8 – Залежності потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Проведений аналіз залежності ослаблення сигналу у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис. 1) і на частоті 60 ГГц показав, що інтенсивність опадів і оптична видимість не суттєво впливає на ослаблення сигналу, і становить не більше 4 дБ втрат при частоті 30 ГГц і не більше 12 дБ втрат при частоті 60 ГГц.

Проведений аналіз залежності ослаблення сигналу від відстані поширення сигналу при різних значеннях товщини стіни (рис. 3) показав, що, ослаблення сигналу суттєво залежить від товщини стіни.

Проведений аналіз залежності ослаблення сигналу від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис. 4) показав, що насадження не дуже впливають на поширення радіохвиль. Так на кожні 5 метрів приходить ослаблення сигналу не більше 1 дБ.

Проведений аналіз залежності потужності сигналу на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості на частоті 30 ГГц (рис. 5) і на частоті 60 ГГц (рис. 6) показав, що потужність сигналу на вході приймача зменшується при збільшенні інтенсивності опадів, зменшується при зменшенні оптичної видимості, а також зменшується при збільшенні частоти випромінювання. Але треба зазначити, що потужність сигналу на вході приймача лежить в допустимих межах і не виходять за межі чутливості приймача.

Судячи з проведеного аналізу залежності потужності сигналу на вході приймача від відстані при різ-

них значеннях товщини стіни на частоті 30 ГГц (рис. 7), можна зробити висновок, що через міжкімнатні перегородки, а особливо через несучу стіну сигнал міліметрових хвиль проникає дуже ослабленим. І для забезпечення зв'язку в приміщеннях необхідно буде встановлювати додаткове обладнання.

Судячи з проведеного аналізу залежності потужності сигналу на вході приймача від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної (рис. 8), можна зробити висновок, що потужність сигналу зменшується при збільшенні глибини шару листя. Кожні 5 метрів шару листя дають додаткове ослаблення сигналу менше 1 дБм. Потужність сигналу зменшується і при збільшенні частоти випромінювання, але знаходиться в допустимих межах не зменшуючись до чутливості приймача. Так при частоті 60 ГГц в порівнянні з 30 ГГц виникає додаткове ослаблення сигналу менше 6 дБм.

Проведений аналіз дає змогу зробити висновок про обмеження до радіусу стільника в залежності від потужності та частоти. Так на частоті 30 ГГц при потужності сигналу 32,5 мВт можливе застосування пікостільників з радіусом дії, які досягають десятки метрів. На частоті 60 ГГц при потужності сигналу 30,5 мВт можливе застосування фемтостільників з радіусом дії, які досягають декілька метрів.

## ВИСНОВКИ

Технологія нового покоління 5G / IMT-2020, як і будь-яка нова технологія, привносить свої специфічні особливості в усі аспекти, що стосуються практики її впровадження. Одним з таких особливо важливих аспектів є електромагнітна сумісність. На етапі підготовки до впровадження радіомереж технології 5G, необхідно завчасно потурбуватися про вжиття заходів щодо ефективної оцінки умов EMC для цих мереж на основі ретельного аналізу особливостей технології 5G, а також правильно і точно оцінивши ці умови – успішно забезпечити електромагнітну сумісність радіозасобів нових мереж.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що вперше проведено аналіз ослаблення сигналу ММД у вільному просторі від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості. Вперше проведено аналіз ослаблення сигналу ММД при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. Вперше проведено аналіз ослаблення сигналу ММД від глибини шару листя, що перекриває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної. Вперше проведено аналіз значення потужності сигналу ММД на вході приймача від інтенсивності опадів при різних значеннях оптичної видимості. Вперше проведено аналіз значення потужності сигналу ММД на вході приймача при поширенні сигналу через перешкоди у вигляді стін від відстані при різних значеннях товщини стіни. Вперше проведено аналіз значення потужності сигналу ММД на вході приймача від глибини

шару листя, що перебиває поширення сигналу при різних значеннях частоти несійної.

**Практична значимість** отриманих результатів полягає в тому, що проведені дослідження показників ЕМС дозволяють дати рекомендації щодо застосування технології 5G в конкретних практичних ситуаціях.

Так на частоті 30 ГГц при потужності сигналу 32,5 мВт можливе застосування пікостільників з радіусом дії, які досягають десятків метрів. На частоті 60 ГГц при потужності сигналу від 10 до 100 мВт в приміщенні або зовні при потужності сигналу від 32,5 мВт можливе застосування фемтостільників з радіусом дії, які досягають декілька метрів.

**Перспективами подальших** досліджень є удосконалення методики аналізу ЕМС технології 5G, та подальші дослідження.

### ПОДЯКИ

Робота виконана за сприяння кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки.

### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

- 3GPP TR 22.891, "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers", Ver. 14.2.0, Sep. 2016.
- 3GPP TR 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies", Ver. 14.3.0, June. 2017.
- 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, Sep 2018.
- 5G PPP Architecture Working Group white paper, "View on 5G Architecture", July 2016.
- Abuarqoub A. Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology / A. Abuarqoub, M. H. Hammoudeh // Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology. – 2016. – P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
- Agiwal M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey / M. Agiwal, A. Roy, N. Saxena // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – №18(3). – 2016. – P. 1617–1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
- Aijaz A. Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks / A. Aijaz, M. Dohler, A. H. Aghvami, V. Friderikos, M. Frodigh // IEEE Wireless Comm. – 24(2). – 2017. – P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>
- Shaping 5G for the Tactile Internet / [A. Aijaz, M. Simsek, M. Dohler and G. Fettweis] // 5G Mobile Communications, Springer International Publishing. – 2017. – P. 677–691. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25)

- Aijaz A. Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications / A. Aijaz // In Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Doha, Qatar, 3–6 April 2016. – P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
- Raza U. Low Power Wide Area Networks: An Overview / U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19. – P. 855–873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
- Radio Regulations. – Ed. ITU, in 4 volumes. – 2016
- Resolution COM 6/20 (WRC–15) Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.
- Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities / E. Mokrov, A. Ponomarenko-Timofeev, I. Gudkova et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2018. – <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799141>
- Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework / E. Markova, I. Gudkova, A. Ometov et al. // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 22252–22261. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758840>
- Enabling technologies and architectures for 5G wireless / S. Talwar, D. Choudhury, K. Dimou et al. // Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) / IEEE. – Tampa, FL, USA, 2014. – P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
- Kurakova T. How ITU can help develop future networks/ T. Kurakova, M. Valdburger // ITU News. – 2013, № 1. – P. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.1525/aft.2013.41.3.38>
- Leveraging heterogeneous device connectivity in a converged 5G-IoT ecosystem / O. Galinina, S. Andreev, M. Komarov et al. // Computer Networks. – 2017. – Vol. 128. – P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.051>
- Аналіз обмежуючих та компенсуючих факторів при розрахунку енергетичної ефективності радіосистем в міліметровому діапазоні / [Я. А. Кременецька, С. Ю. Марков, Н. В. Градобоева, С. М. Харченко] // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2019. – № 1. – С. 12–21. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt\\_2019\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2019_1_4). DOI: 10.31673/2412-4338.2019.011221
- Anderson C.R. In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz / C. R. Anderson, T. S. Rappaport // IEEE Transactions on Wireless Communications, May 2004. – Vol. 3, No. 3. – P. 922–928. DOI: 10.1109/TWC.2004.826328.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2021.  
Після доробки 26.08.2021.

УДК621.396.677.49

### АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СЕТЕЙ СВЯЗИ 5 G

**Коляденко Ю. Ю.** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии им. В. В. Поповского, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

**Чурсанов Н. А.** – аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии им. В. В. Поповского, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.



## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Технология нового поколения 5G / IMT-2020, как и любая новая технология, привносит свои специфические особенности во все аспекты, касающиеся практики ее применения. Одним из таких особо важных аспектов является электромагнитная совместимость. На этапе подготовки к внедрению радиосетей технологии 5G, необходимо заблаговременно позаботиться о принятии мер по эффективной оценке условий ЭМС для этих сетей на основе тщательного анализа особенностей технологии 5G, а правильно и точно оценив эти условия – успешно обеспечить электромагнитную совместимость радиосредств новых сетей.

**Цель.** Целью данной работы является проведение анализа электромагнитной совместимости сети связи 5G.

**Метод.** Анализ главных особенностей радиоинтерфейса 5G позволяет указать на ожидаемые особенности процедур оценки условий ЭМС для этих сетей. Эти особенности главным образом касаются учета суммарной помехи от сети при ее особой архитектуре и динамике изменений, выбора новых моделей потерь (моделей канала) при пространственно-распределенном излучении многомерных антенн MIMO и разнородной среде распространения сигнала, а также учета спектральных свойств новых форм сигнала и характера излучения при новых неортогональных методах радиодоступа.

Для анализа ЭМС использована модель ослабления сигналов в радиоканалах миллиметрового диапазона, учитывающая: ослабление радиоволн в свободном пространстве; потери энергии радиоволн при распространении через дожди; затухание сигнала миллиметрового диапазона при распространении сквозь листья деревьев; ослабление сигналов при прохождении через плотные препятствия (здания, сооружения и т. д.).

**Результаты.** Проведен анализ затухания сигнала миллиметрового диапазона в свободном пространстве от интенсивности осадков при различных значениях оптической видимости. Проведен анализ затухания сигнала миллиметрового диапазона от расстояния при распространении сигнала через препятствия в виде стен при различных значениях толщины стены. Проведен анализ затухания сигнала миллиметрового диапазона от глубины слоя листьев, что перекрывает распространения сигнала при различных значениях частоты несущей. Проведен анализ значения мощности сигнала миллиметрового диапазона на входе приемника от интенсивности осадков при различных значениях оптической видимости. Проведен анализ значения мощности сигнала миллиметрового диапазона на входе приемника от расстояния при распространении сигнала через препятствия в виде стен при различных значениях толщины стены. Проведен анализ значения мощности сигнала миллиметрового диапазона на входе приемника от глубины слоя листьев, что перекрывает распространения сигнала при различных значениях частоты несущей.

**Выводы.** Проведенные исследования показателей ЭМС позволяют дать рекомендации по применению технологии 5G в конкретных практических ситуациях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сети связи 5G, электромагнитная совместимость.

UDC621.396.677.49

## ANALYSIS OF INDICATORS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF COMMUNICATION NETWORKS 5 G

**Kolyadenko Yu. Yu.** – Doctor of science, Professor, Professor of the Department of Infocommunication Engineering named after V. V. Popovsky, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

**Chursanov N. A.** – Postgraduate student of the Department of Infocommunication Engineering named after V.V. Popovsky, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

## ABSTRACT

**Context.** The next generation 5G / IMT-2020 technology, like any new technology, brings its own specific features to all aspects of the practice of its application. One of these particularly important aspects is electromagnetic compatibility. At the stage of preparation for the introduction of 5G radio networks, it is necessary to take early measures to effectively assess the EMC conditions for these networks based on a thorough analysis of the features of 5G technology, and by correctly and accurately assessing these conditions, successfully ensure the electromagnetic compatibility of radio equipment of new networks.

**Objective.** The purpose of this work is to analyze the electromagnetic compatibility of the 5G communication network.

**Method.** An analysis of the main features of the 5G radio interface provides an indication of the expected features of the EMC assessment procedures for these networks. These features mainly relate to taking into account the total interference from the network with its special architecture and dynamics of changes, the choice of new loss models (channel models) for spatially distributed radiation of multidimensional MIMO antennas and a heterogeneous signal propagation medium, as well as taking into account the spectral properties of new signal shapes and character radiation with new non-orthogonal radio access methods.

For EMC analysis, a model of signal attenuation in millimeter-wave radio channels was used, taking into account attenuation of radio waves in free space; loss of energy of radio waves when propagating through rains; attenuation of a millimeter wave signal when propagating through the leaves of trees; attenuation of signals when passing through dense obstacles (buildings, structures, etc.).

**Results.** The analysis of attenuation of the millimeter-wave signal in free space from the intensity of precipitation is carried out at various values of optical visibility. The analysis of the attenuation of the millimeter-wave signal from the distance when the signal propagates through obstacles in the form of walls at various values of the wall thickness is carried out. The analysis of the attenuation of the millimeter-wave signal from the depth of the leaf layer is carried out; it covers the signal propagation at different values of the carrier frequency. The analysis of the value of the power of the millimeter-wave signal at the input of the receiver on the intensity of precipitation is carried out at various values of optical visibility. The analysis of the value of the power of the millimeter-wave signal at the input of the receiver versus the distance when the signal propagates through obstacles in the form of walls at various values of the wall thickness is carried out. The analysis of the power value of the millimeter-wave signal at the receiver input from the depth of the leaf layer is carried out, overlaps the signal propagation at various values of the carrier frequency.

**Conclusions.** The conducted studies of EMC indicators allow us to give recommendations on the application of 5G technology in specific practical situations.

**KEYWORDS:** 5G communication networks, electromagnetic compatibility.

#### REFERENCES

1. 3GPP TR 22.891, "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers", Ver. 14.2.0, Sep. 2016.
2. 3GPP TR 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies", Ver. 14.3.0, June. 2017.
3. 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, Sep 2018.
4. 5G PPP Architecture Working Group white paper, "View on 5G Architecture", July 2016.
5. Abuarqoub A., Hammoudeh M. H. Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology, *Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology*, 2016, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
6. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, № 18(3), 2016, pp. 1617–1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
7. Aijaz A., Dohler M., Aghvami A. H., Friderikos V., Frodigh M. Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks, *IEEE Wireless Comm*, 2017, 24(2), pp. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>
8. Aijaz A., Simsek M., Dohler M. and Fettweis G. Shaping 5G for the Tactile Internet, *5G Mobile Communications, Springer International Publishing*, 2017, pp. 677–691. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25)
9. Aijaz A. Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications, *In Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Doha, Qatar, 3–6 April 2016, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
10. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, Vol. 19, pp. 855–873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
11. Radio Regulations. – Ed. ITU, in 4 volumes, 2016
12. Resolution COM 6/20 (WRC-15) Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.
13. Mokrov E., Ponomarenko-Timofeev A., Gudkova I. et al. Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799141>
14. Markova E., Gudkova I., Ometov A. et al. Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework, *IEEE Access*, 2017, Vol. 5, pp. 22252–22261. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758840>
15. Talwar S., Choudhury D., Dimou K. et al. Enabling technologies and architectures for 5G wireless, *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) IEEE*. Tampa, FL, USA, 2014, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
16. Kurakova T., Valdburger M. How ITU can help develop future networks, *ITU News*, 2013, No. 1, pp. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.1525/aft.2013.41.3.38>
17. Galinina O., Andreev S., Komarov M., et al. Leveraging heterogeneous device connectivity in a converged 5G-IoT ecosystem, *Computer Networks*, 2017, Vol. 128, pp. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.051>
18. Kremenets'ka YA. A., Markov S. YU., Gradoboëva N. V., È.M. Kharchenko Analiz obmezhuuyuchikh ta kompensuyuchikh faktoriv pri rozrakhunku yenergetichnoi yefektivnosti radiosistem v milimetrovomu diapazoni, *Telekomunikatsiyni ta informatsiyni tekhnologii*, 2019, No. 1, pp. 12–21. Rezhim dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt\\_2019\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2019_1_4). DOI: 10.31673/2412-4338.2019.011221
19. Anderson C. R., Rappaport T. S. In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, May 2004, Vol. 3, No. 3, pp. 922–928. DOI: 10.1109/TWC.2004.826328.