

# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.371; 537.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/03>**Семенов А.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Семенова О.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Пінаєв Б.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Білик О.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Шпильовий О.О.**

Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ ПОТОКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА У БЛИЖНІЙ ТА ПРОМІЖНИХ ЗОНАХ

Елементарний електричний випромінювач є фундаментальним елементом в теорії технічної електродинаміки та поширення радіохвиль. Він отримав широкого використання як окреме джерело електромагнітного випромінювання, а також як випромінювальний елемент складних антенних систем. Елементарний електричний випромінювач застосовують у всіх діапазонах радіотехнічних частот - на низьких частотах, середніх частотах, високих частотах і надзвичайно високих частотах. Це зумовлено його простотою та зручністю застосування. Тому елементарний електричний випромінювач привертає значну увагу дослідників. Відома велика кількість публікацій, що присвячені дослідженню хвильових явищ при ізотропному поширенні радіохвиль. У цих публікаціях всебічно досліджені фізичні ефекти і явища при поширенні радіохвиль у далекій зоні випромінювання. Менше уваги було приділено дослідженню спрямованих властивостей елементарного електричного випромінювача в близькій та проміжній зонах випромінювання. Ще менше уваги дослідників було приділено дослідженню густини потоку потужності випромінювання у близькій та проміжній зоні випромінювання. У роботі наведено результати модельного дослідження густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у близькій та проміжних зонах. Обґрунтовано математичну модель, яка описує густину потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у близькій та проміжних зонах. Отримано результати математичного моделювання. Наведено діаграми спрямованості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у близькій та проміжних зонах у меридіональній площині для стандартів GSM-900 і GSM-1800. Встановлено, що в проміжній зоні випромінювання елементарного електричного випромінювача діаграма спрямованості по формі відрізняється від теоретичної та має місце «розщеплення» двох головних напрямів випромінювання на чотири напрями з поділом густини потужності електромагнітного випромінювання.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, густина потоку, потужність випромінювання, близька зона, проміжна зона, діаграма спрямованості.

**Постановка проблеми.** Сьогоднішній розвиток інформаційних технологій зумовлений завдяки широкому застосуванню бездротових

з'єднань [1]. Збільшення кількості мобільних пристроїв і перехід на технології 5G зумовлюють зменшення розмірів площ покриття базовими

станціями [2]. Безпосередня близькість роботи мобільних пристроїв біля точок доступу вимагає аналітичного апарату для частотно-територіального планування мобільних мереж [3, 4]. У той же час, у класичній теорії поширення радіохвиль переважають підходи до розрахунку складових потоку електромагнітного поля випромінювання в далекій зоні [5, 6]. Математичному аналізу компонентів електромагнітного поля випромінювання у близькій та проміжній зонах приділено мало уваги внаслідок ускладнення формул для розрахунку.

Елементарний електричний випромінювач має спрямовані властивості, що мало відрізняються від спрямованих властивостей антен кінцевих мобільних пристроїв – усіх можливих варіацій телефонів, планшетів, ноутбуків та ін. Тому дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах має важливе значення з метою інтерпретації отриманих результатів для вирішення таких важливих практичних задач: електромагнітна сумісність бездротових телекомунікаційних пристроїв, бездротове заряджання радіоелектронних пристроїв, аналіз впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини тощо.

На сьогоднішній день актуальною задачею є вимірювання інтенсивності електромагнітного випромінювання, що спонукає розроблення нових і вдосконалення відомих методів і засобів вимірювання. При цьому потрібно врахувати, що фактичну інтенсивність електромагнітного випромінювання не можливо розрахувати або виміряти, не провівши аналітичні дослідження електромагнітного поля випромінювача в ближній та проміжній зонах випромінювання. Густина потоку потужності залежить від потужності випромінювання бездротових телекомунікаційних пристроїв, відстані до точки спостереження, структури електромагнітного поля в цій точці та спрямованих властивостей антенно-фідерних пристроїв. Тому розвинення теоретичних основ і створення елементів математичних моделей фізичних процесів електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [3] представлено короткий огляд існуючих розробок у сфері моделей поширення радіохвиль для мереж mmWave 5G у міському макросередовищі для діапазону частот електромагнітних хвиль 28 ГГц. У роботі [3] описано основні фак-

тори, що впливають на результуючий рівень сигналу. Запропоновано узагальнену формулу втрат для каналу mmWave 5G, яка дає змогу більш комплексно врахувати всі фактори: втрати в атмосферних газах, у дощ, а також втрати на проникнення ззовні в приміщення. Запропонована модель може бути застосована для макросценарію мереж 5G, переважно для eMBB. Використання запропонованої узагальненої моделі дозволить більш точно спрогнозувати основні параметри мережі радіодоступу для мобільного зв'язку 5G [3].

У роботах [7, 8] досліджено ефект підвищення енергоефективності в мережах зв'язку LTE [7] і супутникового зв'язку [8] залежно від механізмів поширення радіохвиль. Встановлено, що ефект зниження енергоефективності залежить від конкретної застосованої технології та параметрів передавачів [7]. Запропоновано моделі підвищення ефективності терагерцевих систем радіозв'язку: удосконалений алгоритм пошуку багатопроменевих сигналів у радіосистемах на базі літаків висотного діапазону ТГц та імітаційну модель для прогнозування максимальної довжини системи бездротового зв'язку терагерцевого діапазону [7].

Дослідженню структури електромагнітного випромінювання базових станцій мобільного зв'язку присвячені роботи [9-11]. У роботі [9] подано результати експериментального дослідження рівня сигналів трьох базових станцій телекомунікаційного зв'язку діапазону частот 945 МГц – 2340 МГц. Встановлено, що на потужність радіочастотного сигналу, що випромінюється від базових станцій, впливає багато факторів. Основними з цих факторів є: напрямок головного променя, який залежить від нахилу та напрямку антен на верхній частині базової станції, висота антени та щогли базової станції, відстань від джерел випромінювання, а також кількість антен [9]. Крім того, шлях прямої видимості також є одним із факторів, який істотно впливає на рівень опромінення. Потрібно враховувати наявність перешкод поширення радіохвиль, що складається з фізичних об'єктів, які можуть існувати не лише як будівлі, але й дерева, листя, пагорби та інші вздовж поширення сигналу [9]. У роботах [10, 11] представлено результати досліджень поширення радіохвиль в умовах сучасного міста на частотах 28 ГГц і 38 ГГц [10]. Запропоновано комунікаційно-теоретичну модель, яка дозволяє досліджувати фундаментальні компроміси, що пов'язані зі спільним використанням бездротових ресурсів між трьома типами трафіку 5G, а саме

eMBB, mMTC і URLLC [11]. Дослідження збоїв, проведені на частотах 28 ГГц і 38 ГГц, показали, що стабільне покриття 5G можна досягти за допомогою базових станцій з радіусом осередку 200 метрів [10]. Проте отримані у [9-11] результати стосуються виключно далекої зони випромінювання базових станцій телекомунікаційних систем і не враховують потоки електромагнітного випромінювання у ближній та проміжних зонах.

**Постановка завдання.** Метою роботи є подальший розвиток елементів математичної моделі елементарного електричного випромінювача та дослідження густини потоку його електромагнітного випромінювання у ближній та проміжних зонах. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) обґрунтувати рівняння густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах; 2) удосконалити математичну модель елементарного електричного випромінювача; 3) отримати результати математичного моделювання густини потоку електромагнітного випромінювання у ближній та проміжних зонах базових станцій для діапазонів частот 900 МГц і 1800 МГц.

**Виклад основного матеріалу.** Аналітичні дослідження структури поля випромінювання елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах були проведені в роботах [12, 13]. Аналітичні співвідношення для розрахунку комплексних амплітуд складових електромагнітного поля в точці приймання при електромагнітному випромінюванні від елементарного електричного випромінювача мають вигляд [13, (1)-(3)]

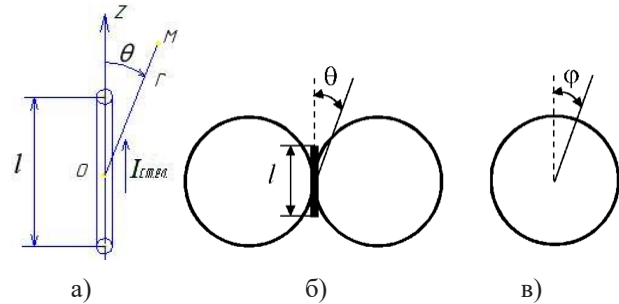
$$\dot{E}_{mr} = \frac{I_m k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

$$\dot{H}_{m\phi} = \frac{I_m k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr} - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

де  $\dot{E}_{mr}$  і  $\dot{E}_{m\theta}$  це комплексні амплітуди екваторіальної та меридіональної складових електричного поля відповідно;  $\dot{H}_{m\phi}$  це комплексна амплітуда екваторіальної складової магнітного поля;  $I_m$  це амплітуда гармонічного електричного струму збудження елементарного електричного випромінювача, що має довжину  $l$  (рис. 1,а);  $k = \omega \sqrt{\mu_a \epsilon_a} = 2\pi/\lambda$  це хвильове число;  $\mu_a$ ,  $\epsilon_a$  це абсолютна магнітна та абсолютна діелектрична проникності середовища, в якому розташований елементарний електричний випромінювач;  $r$  це

відстань від елементарного електричного випромінювача до точки приймання;  $\lambda$  це довжина хвилі;  $\theta$  це меридіональна кутова координата (рис. 1, а-б). За умов вільного простору в екваторіальній площині елементарний електричний випромінювач, що розташований вертикально, випромінює ізотропно. А тому, в екваторіальній площині елементарний електричний випромінювач не має спрямованих властивостей (рис. 1,в).



**Рис. 1.** Зображення елементарного електричного випромінювача із введеною системою координат (а) та його нормовані діаграми спрямованості по електричному полю в меридіональній (б) та екваторіальній (в) площинах

Густина потоку випромінювання фізично описується вектором Пойтінга [12, стор. 2; 14, стор. 1]. Радіальний вектор Пойтінга ( $\vec{\Pi}_r$ ) потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача має комплексний характер, тобто [13, стор. 3]

$$\vec{\Pi}_r = \bar{\Pi}_{ar} + j\bar{\Pi}_{pr}, \quad (4)$$

де  $\bar{\Pi}_{ar}$ ,  $\bar{\Pi}_{pr}$  – відповідно активна частина та реактивна частина радіального вектору Пойтінга, що описуються такими співвідношеннями [13, (7)-(8)]

$$\bar{\Pi}_{ar} = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cos\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta, \quad (5)$$

$$\bar{\Pi}_{pr} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta. \quad (6)$$

Меридіональний вектор Пойтінга потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача, має лише реактивну складову [13, (9)]

$$\bar{\Pi}_{\theta 0} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin 2\theta. \quad (7)$$

Густина потоку електромагнітного випромінювання є функцією кутових координат і має спрямо-

вані властивості [14, стор. 1]. Подальші аналітичні дослідження потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача було проведено згідно методики [13, стор. 4-5]. З цією метою в роботі [13, стор. 3] введено амплітудний множник, який є спільним для співвідношень (5)-(7) і не залежить ані від кутових координат  $(\theta, \varphi)$ , ані від відстані  $r$ , та має вигляд

$$A_m = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}}. \quad (8)$$

З урахуванням амплітудного множника (8) рівняння складових вектору Пойтінга густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача мають вигляд [13, (13)-(15)]

$$\begin{aligned} \Pi_{ar} = A \sqrt{\left[ \frac{1}{kr} - \left( \frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left( \frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left( \frac{1}{kr} \right)^2 + \left( \frac{1}{kr} \right)^4} \cos(\operatorname{arctg} \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}) \sin^2 \theta, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{pr} = A \sqrt{\left[ \frac{1}{kr} - \left( \frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left( \frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ \times \sqrt{\left( \frac{1}{kr} \right)^2 + \left( \frac{1}{kr} \right)^4} \sin(\operatorname{arctg} \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}) \sin^2 \theta, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\Pi_{p\theta} = A \sqrt{\left( \frac{1}{kr} \right)^4 + \left( \frac{1}{kr} \right)^6} \sqrt{\left( \frac{1}{kr} \right)^2 + \left( \frac{1}{kr} \right)^4} \sin 2\theta. \quad (11)$$

Амплітудне значення вектору Пойтінга густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача, як функція кутової координати  $\theta$ , має вигляд [13, (16)]

$$\Pi = f(\theta) = \sqrt{\Pi_{ar}^2 + \Pi_{pr}^2 + \Pi_{p\theta}^2}. \quad (12)$$

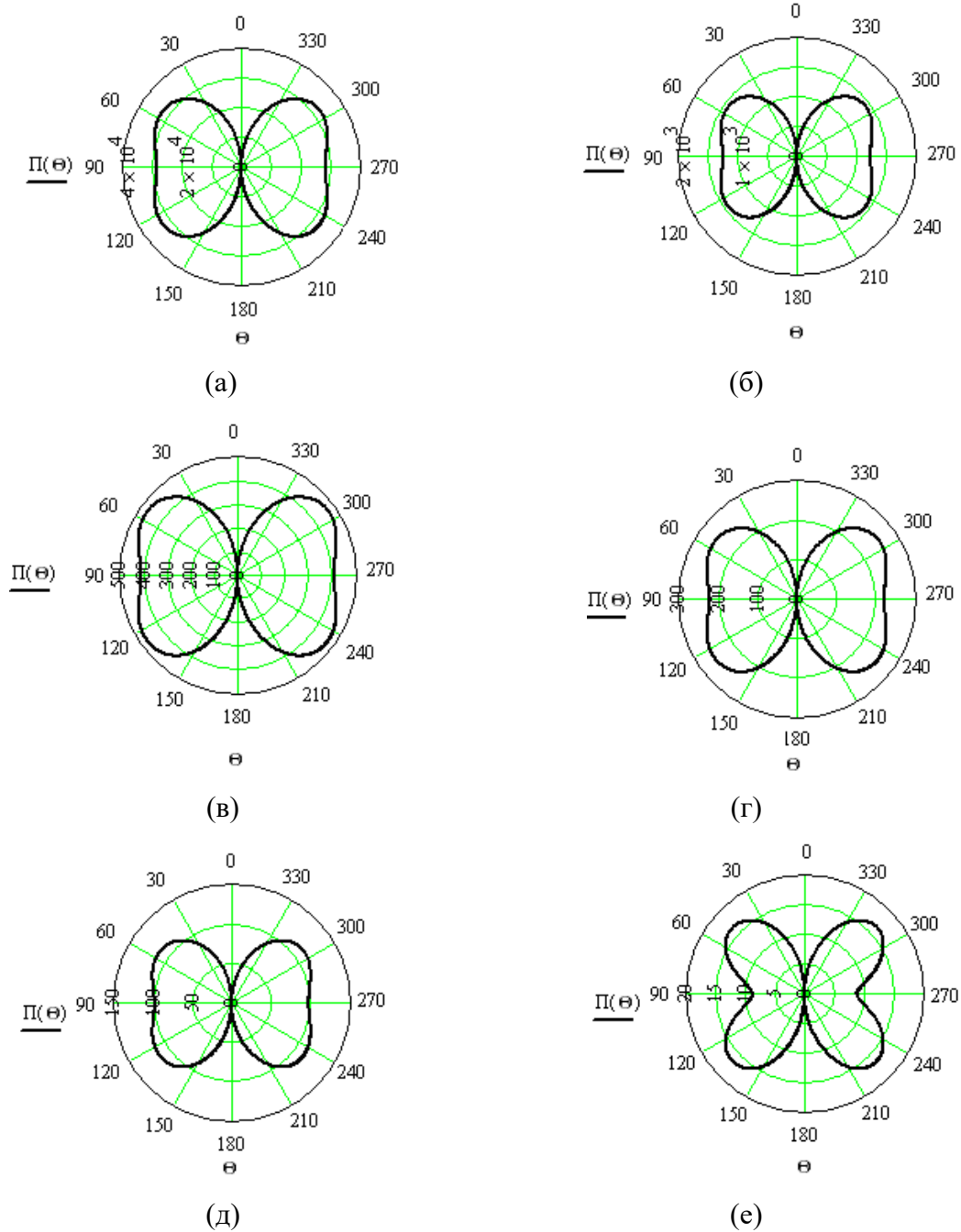
У роботі було здійснено математичне моделювання з використанням пакету програм MathCad 15.0. Математичну модель густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах складають співвідношення (8)-(12). Було побудовано діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах для стандартів GSM-900 і GSM-1800 для таких значень відстаней  $r$ : 2,5 см; 5 см; 7,5 см; 10 см; 12,5 см; 15 см; 30 см і 50 см. Діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах було побудовано,

підставляючи у формулу (12) значення густини потоків потужності за виразами (9)-(11) з урахуванням амплітудного значення (8), яке для випадку стандарту GSM-900 має чисельне значення  $A_m = 875,6$  [мкВт/см<sup>2</sup>] та для випадку стандарту GSM-1800 має чисельне значення  $A_m = 1592,1$  [мкВт/см<sup>2</sup>]. Результати математичного моделювання діаграм спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині наведені на рис. 2 – рис. 3. Для стандарту GSM-900 зазначені відстані у сантиметрах складають такі значення електричної довжини:  $kr = 0,5$  (а),  $kr = 1,0$  (б),  $kr = 1,5$  (в),  $kr = 2,0$  (г),  $kr = 3,0$  (д) і  $kr = 10,0$  (е). Для стандарту GSM-1800 чисельні значення електричної довжини удвічі менші.

Як видно з рис. 2 і рис. 3 діаграми спрямованості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині мають вигляд відмінний від теоретичної форми (рис. 1,б). Для стандарту GSM-900 у ближній та проміжних зонах меридіональної площини діаграми спрямованості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача має «приплюснуту форму», що зумовлено «розщепленням» двох напрямів випромінювання у близькій та проміжній зонах випромінювання (рис. 2,а-д) до чотирьох напрямів випромінювання у проміжній зоні (рис. 2,е). Для стандарту GSM-1800 на зазначених довжинах у сантиметрах за рахунок удвічі меншої довжини хвилі не спостерігається яркого вираження чотирьох напрямів випромінювання (рис. 3,а-е).

**Висновки.** У роботі отримано нові результати математичного моделювання хвильових процесів при електромагнітному випромінюванні від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах. У ближній та проміжних зонах досліджено спрямовані властивості густини потоку потужності електромагнітного випромінювання при збудженні елементарного електричного випромінювача гармонійним сигналом зі сталою амплітудою та фазою. Форма діаграм спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах відрізняється по формі від теоретичної. У ближній та проміжних зонах випромінювання від елементарного електричного випромінювача має місце «розщеплення» двох головних напрямів випромінювання у чотири





**Рис. 2.** Діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині для стандарту GSM-900 при:  $r = 2,5$  см (а),  $r = 5,0$  см (б),  $r = 7,5$  см (в),  $r = 10$  см (г),  $r = 15$  см (д) та  $r = 50$  см (е)

напрями з поділом густини потужності електромагнітного випромінювання. Форма діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у проміжній зоні суттєво залежить від відстані до точки приймання. Отримані

в роботі результати є корисними при моніторингу стану електромагнітного випромінювання, а також для дослідження розподілу густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача при його збудженні багаточастотним сигналом.

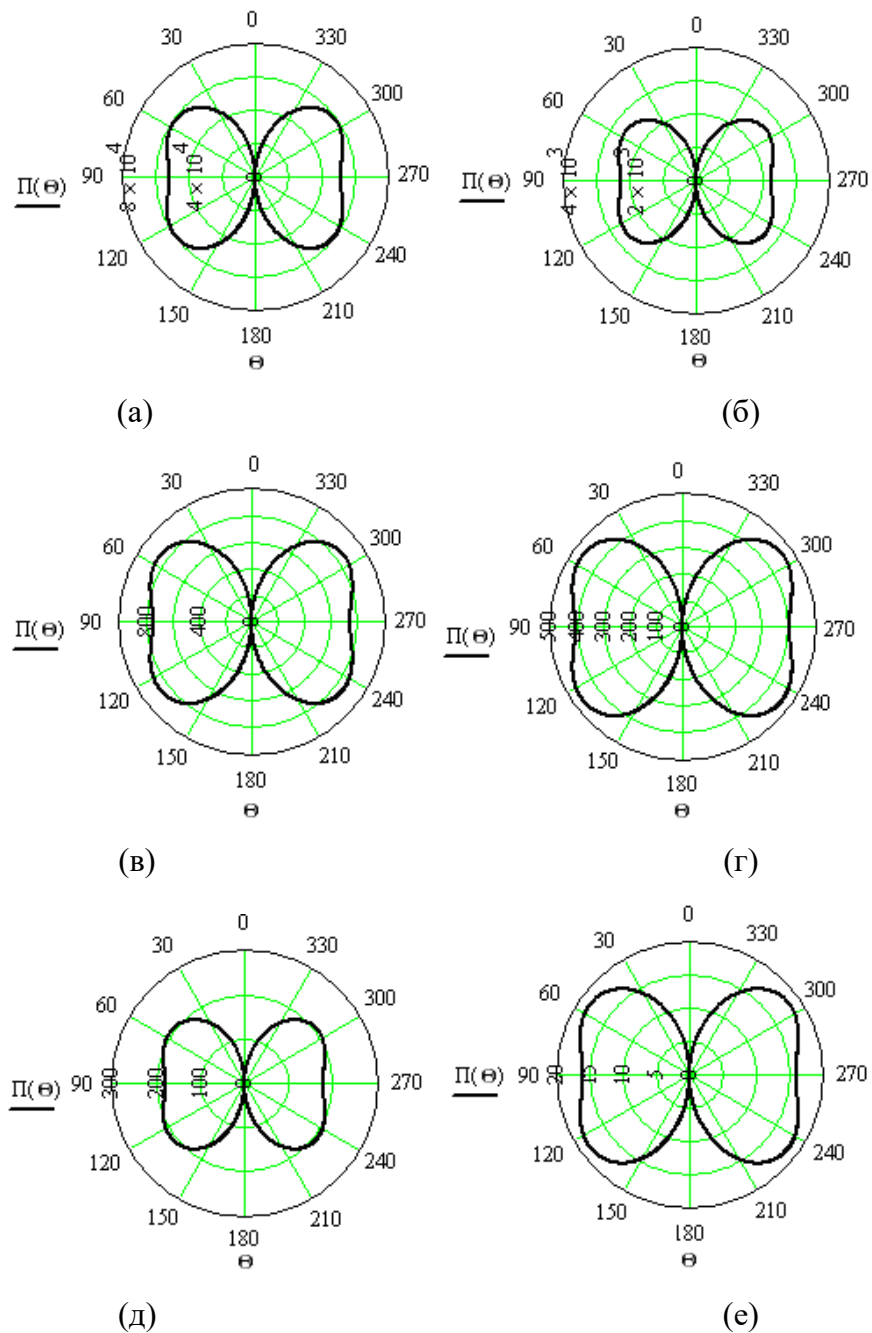


Рис. 3. Діаграми спрямованості густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах у меридіональній площині для стандарту GSM-1800 при:  $r = 2,5$  см (а),  $r = 5,0$  см (б),  $r = 7,5$  см (в),  $r = 10$  см (г),  $r = 15$  см (д) та  $r = 50$  см (е)

#### Список літератури:

1. A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishchuk, O. Bulashenko. New Traffic Model of M2M Technology in 5G Wireless Sensor Networks. *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 25-27 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125-131. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
2. S. Piltyay, A. Bulashenko, I. Demchenko. Wireless Sensor Network Connectivity in Heterogeneous 5G Mobile Systems. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 625-630. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468073.
3. D. Makoveyenko, S. Siden, V. Pyliavskiy. Generalized 5G mmWave Propagation Model in an Urban Macro Environment. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 472-476, doi: 10.1109/PICST51311.2020.9468030.

4. D. Makoveyenko, O. Osharovska, S. Siden, V. Pyliavskiy. The Effect of Interference Evaluation Between LTE Mobile Stations and McWill Technology. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 122-126, DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468080.
5. M. Shafi et al. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
6. T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios, J. Zhang. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017. DOI: 10.1109/TAP.2017.2734243
7. A. Bulashenko, S. Piltyay, I. Demchenko, "Energy Efficiency of the D2D Direct Connection System in 5G Networks," *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 537-542. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468035.
8. V. Saiko, S. Toliupa, V. Nakonechnyi, M. Brailovskyi. Models of Improving the Efficiency of Radio Communication Systems Using the Terahertz Range. *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 6-9 Oct. 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 192-196. DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468022.
9. A. R. S. N. Dianah, R. Umar, M. K. A. Kamarudin, A. N. Dagang, S. N. Hazmin. Exposure level from selected base station tower around Kuala Nerus: A preliminary analysis. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2018, Vol. 9, Issue 5S, p. 367-380. African Journals Online (AJOL). DOI: 10.4314/jfas.v9i5s.26
10. T. S. Rappaport et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *IEEE Access*, 2013, vol. 1, pp. 335-349. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
11. P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Durisi. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 55765-55779. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872781.
12. Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Чернига В. В. Дослідження структури поля і спрямованості електричного елементарного випромінювача в ближній і проміжній зонах. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, № 2. С. 1-9. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/62> (Доступ 27 квітня 2022 р.)
13. Крушевський Ю. В., Салямон О. М. Структура електромагнітних потоків елементарного електричного випромінювача в ближній і проміжній зонах. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, № 3. С. 1-7. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/81> (Доступ 27 квітня 2022 р.)
14. Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Бородай Я.О. Вплив електромагнітного випромінювання пристроїв стільникового зв'язку на людину. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, № 1. С. 1-6. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/48> (Доступ 27 квітня 2022 р.)

**Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Bilyk O.V., Shpylovyi O.O.**

#### **STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC RADIATION FLUX DENSITY FROM AN ELEMENTARY ELECTRICAL EMITTER IN THE NEAR AND INTERMEDIATE ZONES**

*An elementary electric radiator is a fundamental element in technical electrodynamics and radio wave propagation theory. It is widely used as a separate source of electromagnetic radiation and a radiating component of complex antenna systems. An elementary electric emitter is used in all radio frequency spectra – at low frequencies, medium frequencies, high frequencies, and very high frequencies. This is due to the simplicity and ease of use. Therefore, an elementary electric emitter attracts much attention from researchers. There are many publications devoted to the study of wave phenomena in the isotropic propagation of radio waves. In these publications, physical effects and phenomena during the propagation of radio waves in the far zone of radiation are comprehensively investigated. Less attention was paid to studying the directional properties of an elementary electric radiator in the close and intermediate radiation zones. Researchers paid less attention to the study of the radiation power flux density in the near and intermediate radiation zone. The paper presents the results of a model study of the electromagnetic radiation flux density from an elementary electric emitter in the near and intermediate zones. A mathematical model is substantiated that describes the flux density of electromagnetic power radiation from an elementary radiator in the near and intermediate zones. The results of mathematical modeling are obtained. The directivity diagrams of the power flux density of electromagnetic radiation from an elementary emitter in the near and intermediate zones in the meridional plane for the GSM-900 and GSM-1800 standards are given. It has been established that in the intermediate zone of radiation of an elementary electric radiator, the radiation pattern differs in shape from the theoretical one. There is a splitting of the two main radiation directions into four directions with a separation of the power density of electromagnetic radiation.*

**Key words:** electromagnetic radiation, flux density, radiation power, near zone, intermediate zone, radiation pattern.