

Ю. В. Крушевський, к. т. н., доц.; О. М. Салямон

СТРУКТУРА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОТОКІВ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА В БЛИЖНІЙ І ПРОМІЖНІЙ ЗОНАХ

У роботі проведено теоретичні дослідження густини потоків потужності електромагнітного поля елементарного електричного випромінювача в ближній та проміжній зонах. Побудовано діаграми спрямованості цього випромінювача за потужністю для відстаней 2,5...50 см на середніх довжинах хвиль стандартів GSM - 900 та GSM - 1800 системи стільникового зв'язку.

Ключові слова: елементарний електричний випромінювач, ближня, проміжна зони, потік електромагнітного поля.

Вступ

Електромагнітне поле елементарного електричного випромінювача добре досліджене в дальній зоні (зоні випромінювання). Зокрема відомо, що в цій частині простору густина потоку потужності поля практично має лише одну радіальну складову і є величиною обернено-пропорційною квадрату відстані від випромінювача до точки спостереження.

У ближній і проміжній зонах електромагнітне поле випромінювача має три складові, які створюють два потоки: радіальний, зумовлений меридіональною складовою електричного поля й екваторіальною складовою магнітного поля, та меридіональний, зумовлений радіальною складовою електричного поля й екваторіальною складовою магнітного поля.

Зазначені обставини не дозволяють застосовувати звичайні в антенних задачах методи й засоби вимірювання параметрів поля випромінювачів у ближній і проміжній зонах. Крім того, до спотворення таких результатів вимірювання призведе взаємний вплив випромінювача і вимірювальної антени через малу відстань між ними.

Дослідження поля в ближній і проміжній зонах випромінювачів є актуальною проблемою через широке використання мобільних радіотелефонів системи стільникового зв'язку, бо стоїть, наприклад, задача дати однозначну відповідь про ступінь шкідливості впливу мобільників на здоров'я їх користувачів, коли голова людини знаходиться у ближньо-проміжній зоні випромінювання радіотелефону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі [1] загальні вирази для комплексних амплітуд складових поля елементарного електричного випромінювача:

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

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

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

де $\dot{E}_{m\theta}$ і $\dot{E}_{m\varphi}$ – комплексні амплітуди відповідно радіальної і меридіональної складових електричного поля; $\dot{H}_{m\varphi}$ – комплексна амплітуда екваторіальної складової магнітного поля; I_m – амплітуда гармонічного електричного струму в елементарному електричному випромінювачі довжиною 1; $k = \omega\sqrt{\mu_a\epsilon_a} = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; μ_a , ϵ_a – абсолютні магнітна та діелектрична проникності середовища, що оточує випромінювач; r – відстань від випромінювача до точки спостереження поля; λ – довжина хвилі гармонічного струму у випромінювачі; θ – меридіональна кутова координата точки спостереження, що починає свій відлік від осі випромінювача, середина якого розміщена в точці початку сферичної системи координат (r, θ, φ) .

У дальній зоні $kr \ll 1$ радіальною складовою електричного поля в порівнянні з меридіональною нехтують і вважають, що в просторі існує єдиний потік вектора густини потоку потужності, що визначається за формулою:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \left[\dot{E}_{m\theta} \bar{H}_{m\varphi}^* \right] = \bar{r}_0 \frac{I_m^2 k^2}{32\pi^2 r^2} \cdot \sin^2 \theta. \quad (4)$$

Як видно з виразу (4), у радіальному напрямку від випромінювача існує потік електромагнітного поля, інтенсивність якого зменшується пропорційно зростанню квадрату відстані r . Максимальне випромінювання спрямоване в екваторіальній площині ($\theta = \pi/2$), а вздовж осі випромінювача воно відсутнє ($\theta = 0, \pi$).

За характером цей потік є потоком густини активної потужності, що бере участь в радіозв'язку.

Ґрунтуючись на виразі (4), у [2] для розрахунку густини потоку потужності \bar{P} використано формулу для середнього значення вектора Пойнтінга, на основі якої було отримано вираз для наближеного розрахунку безпечного часу користування мобільним радіотелефоном. За проведеними розрахунками для МРТ стандарту GSM - 900 цей час склав приблизно одну годину протягом доби.

Постановка завдання

Отримати вирази для густин потоків потужності електромагнітного поля елементарного електричного випромінювача в радіальному та меридіональному напрямках.

Дослідити розподіл цих потоків за усіма напрямками ближньої та проміжної зон поля випромінювача.

Скориставшись отриманими формулами, розрахувати уточнені значення безпечного часу користування мобільним радіотелефоном, що працює, наприклад, за стандартом GSM - 900 та GSM - 1800.

Основні матеріали статті

Скориставшись виразами (2) і (3), знайдемо густину потоку потужності \bar{P}_r в радіальному напрямку:

$$\dot{\bar{P}}_r = \frac{1}{2} \left[\dot{E}_{m\theta} \bar{H}_{m\varphi}^* \right] = \bar{r}_0 \frac{I_m^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} e^{-j\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right)} \sin^2 \theta, \quad (5)$$

а виразами (1) і (3) – у меридіональному напрямку:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\Pi}}_{\theta} &= \frac{1}{2} \left[\dot{\bar{E}}_{mr} \dot{\bar{H}}_{m\phi}^* \right] = -\bar{\theta}_0 \frac{I_m^2 l^2 k^4}{16\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} e^{-j\pi h} \sin \theta \cos \theta. \end{aligned} \quad (6)$$

Як бачимо, радіальний вектор Пойнтінга $\bar{\Pi}_r$ має комплексний характер, тобто $\dot{\bar{\Pi}}_r = \dot{\bar{\Pi}}_{ar} + j\dot{\bar{\Pi}}_{pr}$, де $\bar{\Pi}_{ar}$ – його активна частина

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_{ar} &= \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cos\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (7)$$

є середнє значення вектора Пойнтінга; $\bar{\Pi}_{pr}$ – його реактивна частина

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_{pr} &= -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr}\right) \sin^2 \theta. \end{aligned} \quad (8)$$

Меридіональний вектор Пойнтінга, як видно з (6), має лише реактивну складову

$$\bar{\Pi}_{p\theta} = -\frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin 2\theta. \quad (9)$$

У виразах (7), (8) і (9) є однаковий співмножник $A = \frac{I_m^2 l^2 k^4}{32\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$, що не залежить ні від

відстані r , ні від кутової координати θ . Приведемо зазначені вирази до вигляду, зручного для подальшого аналізу. З [3] відомо, що квадрат амплітуди гармонічного струму в елементарному електричному випромінювачі

$$I_m^2 = \frac{2P_{\Sigma}}{R_{\Sigma}},$$

де P_{Σ} – потужність випромінювання; $R_{\Sigma} = 80\pi^2(l/\lambda)^2$ – опір випромінювання зазначеного випромінювача у вільному просторі.

Тоді

$$I_m^2 = \frac{P_\Sigma}{40\pi^2(l/\lambda)^2}. \quad (10)$$

Підставивши (10) у вираз для A , отримаємо:

$$\begin{aligned} A &= \frac{P_\Sigma l^2 k^2 k^2}{32\pi^2 40\pi^2 (l/\lambda)^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \frac{P_\Sigma l^2 \omega^2 \mu_a \varepsilon_a 4\pi^2}{32\pi^2 40\pi^2 (l/\lambda)^2 \lambda^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \\ &= \frac{P_\Sigma 4\pi^2 f^2 \mu_a \varepsilon_a}{320\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \frac{P_\Sigma f^2 \mu_a \varepsilon_a}{80} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}. \end{aligned}$$

Оскільки середовищем, що оточує випромінювач, є сухе повітря, для якого $\mu_a \approx \mu_0$; $\varepsilon_a \approx \varepsilon_0$, останній вираз переписеться так:

$$A = \frac{P_\Sigma}{80\lambda^2} \cdot 120\pi = \frac{3\pi P_\Sigma}{2\lambda^2}.$$

Якщо P_Σ рахувати в мікроватах, а довжину хвилі λ вимірювати в сантиметрах, то

$$A = \frac{3\pi P_\Sigma \cdot 10^6}{2\lambda^2} \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right).$$

Середнє значення потужності випромінювання мобільного радіотелефону стандарту GSM-900 дорівнює 0,2 Вт, а середня довжина хвилі $\lambda_{1\text{сер}} = 32,8$ см.

Тоді

$$A = A_1 = \frac{3\pi \cdot 20 \cdot 10^4}{2 \cdot 1075,84} = 875,6 \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right). \quad (11)$$

У стандарті GSM-1800: $\lambda_{2\text{сер}} = 17,2$ см, візьмемо середнє значення потужності випромінювання, що дорівнює 0,1 Вт. Тоді

$$A = A_2 = \frac{3\pi \cdot 10 \cdot 10^4}{2 \cdot 295,84} = 1592,1 \left(\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2} \right). \quad (12)$$

Враховуючи (7), (8), (9), (11) і (12), функціями спрямованості випромінювача за потужністю будуть вирази

$$\begin{aligned} \Pi_{ar} &= A \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \cos\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right) \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{pr} &= A \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{1}{kr} \right)^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \sin\left(\arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \arctg \frac{1}{kr} \right) \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Pi_{p\theta} = A \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \sin 2\theta. \quad (15)$$

Використавши вирази (13), (14), (15), отримаємо вираз для залежності густини потоку повної потужності від відстані r та кутової координати θ :

$$\Pi = \sqrt{\Pi_{ar}^2 + \Pi_{pr}^2 + \Pi_{p\theta}^2}. \quad (16)$$

Побудуємо діаграми спрямованості при використанні стандартів GSM – 900 і GSM-1800 для таких значень r : 2,5 см; 5 см; 7,5 см; 10 см; 15 см; 30 см і 50 см; підставляючи у формули (16) значення густин потоків потужності за виразами (13), (14), (15) з урахуванням того, що $A_1 = 875,6 \text{ мкВт/см}^2$, а $A_2 = 1592,1 \text{ мкВт/см}^2$.

1) При $kr = 1$ ($r = 5,0$ см) і $A = A_1 = 875,6$ маємо

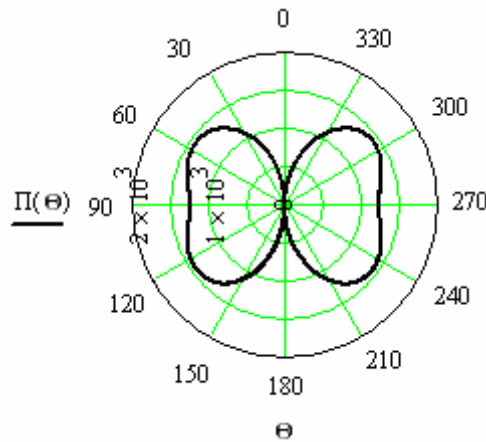


Рис. 1. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 5,0$ см

2) При $kr = 1$ ($r = 5,0$ см) і $A = A_2 = 1592,1$ маємо

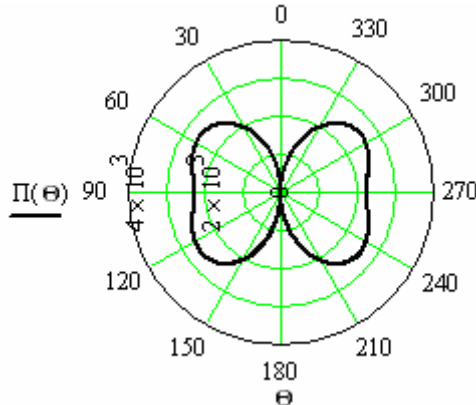


Рис. 2. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 5,0$ см

Найважливіші дані діаграм спрямованості для інших випадків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

r , см	θ	Π , мкВт/см ²	
		GSM - 900	GSM - 1800
2,5	30	$2,5 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$
	45	$3,2 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$
	90	$1,8 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$
7,5	30	360	650
	45	460	825
	90	420	750
10	30	200	360
	45	250	450
	90	230	410
15	30	75	160
	45	115	200
	90	100	180
30	30	22	40
	45	28	50
	90	25	45
50	30	–	14
	45	–	18
	90	–	16

Аналіз отриманих результатів

Вважаючи, що найближча точка головного мозку знаходиться приблизно на відстані 5 см під кутом 30° , на діаграмі спрямованості (рис. 1) бачимо, що густина потоку потужності дорівнює $1,1 \cdot 10^3 \text{ мкВт/см}^2$, яка перевищує санітарний допустимий рівень (25 мкВт/см^2) у 44 рази. Отже, у діапазоні стандарту GSM-900 час безпечного користування МРТ протягом однієї доби (1440 хвилин) дорівнюватиме:

$$1440 : 44 = 32,72 \text{ хвилини.}$$

У діапазоні ж стандарту GSM – 1800 (див. рис. 2) на цій самій відстані перевищення допустимої норми складає

$$2 \cdot 10^3 \text{ мкВт/см}^2 : 25 \text{ мкВт/см}^2 = 80 \text{ раз,}$$

а час безпечного користування МРТ дорівнюватиме лише $1440 : 80 = 18$ хвилин протягом доби.

У цьому стандарті (див. табл. 1) найближче до МРТ око користувача, що знаходиться приблизно на відстані $r = 7,5$ см, під кутом $\Theta = 45^\circ$ і опромінюється потоком потужності з густиною 825 мкВт/см^2 , що перевищує допуск у 33 рази. Тобто, час безпечного користування МРТ дорівнюватиме $1440 : 33 = 43,64$ хвилини на добу.

Висновки

1. Потоки електромагнітної енергії елементарного електричного випромінювача в ближній і проміжній зонах сконцентровані переважно в напрямку перпендикулярному до осі вібратора (від $\Theta = 15^\circ$ до $\Theta = 165^\circ$) з добре вираженими максимумами в напрямках $\Theta = 45^\circ$ і $\Theta = 135^\circ$.

2. Перший з цих максимумів опромінює саме головний мозок і найближче до МРТ око

користувача.

3. З наведених прикладів витікає, що уточнення розрахунку безпечного часу користування МРТ є суттєвим, бо знижує його значення практично до 33 (GSM - 900) та 18 (GSM - 1800) хвилин на добу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дослідження структури поля і спрямованості електричного елементарного випромінювача в ближній і проміжній зонах [Електронний ресурс] / Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Чернига В. В. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – №2. – Режим доступу до журналу http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08kyvaia_uk.pdf

2. Вплив електромагнітного випромінювання пристроїв стільникового зв'язку на людину [Електронний ресурс] / Крушевський Ю. В., Кравцов Ю. І., Бородай Я. О. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – №1. – Режим доступу до журналу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-1/uk.files/08kyvahb_uk.pdf

3. Баскаков С.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.

Крушевський Юрій Володимирович – к. т. н., доцент кафедри радіотехніки.

Салямон Олена Михайлівна – студентка 4-го курсу.

Вінницький національний технічний університет.