

Л. І. Степанова

ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ АНТЕНИ МОБІЛЬНОГО ТЕРМІНАЛУ З ГОЛОВОЮ КОРИСТУВАЧА

У статті проведено оцінку взаємодії електромагнітного поля (ЕМП) антени мобільного терміналу (МТ) на біологічну модель голови людини під час телефонної розмови шляхом моделювання цього процесу в програмному комплексі FEKO. Це дозволило визначити величину питомої потужності поглинання SAR, яка є однією з характеристик мобільного терміналу, у біологічних тканинах голови користувача МТ за різних відстаней між ними. Завдяки цьому можна перевірити відповідність величини SAR вимогам міжнародних стандартів на допустимий електромагнітний вплив мобільних терміналів, а також на етапі проектування визначити фактичну потужність випромінювання антени засобів мобільного зв'язку (ЗМЗ).

Ключові слова: електромагнітне поле, антена мобільного терміналу, потужність випромінювання антени, потужність поглинання в тілі людини, напруженість електричного поля.

Вступ

На сьогодні сучасні мобільні термінали належать до найскладніших мікрохвильових пристроїв, оскільки в їх невеликому об'ємі розміщується велика кількість мікросхем, що виконують найрізноманітніші функції в умовах обмеженого енергоживлення. Як відомо, мобільний термінал має певну величину потужності, яку випромінює його антена, задля забезпечення заданої якості та дальності мобільного зв'язку. Проте разом із цим в умовах широкого застосування мобільних терміналів однією з важливих актуальних задач проектування ЗМЗ та електромагнітної екології є оцінка впливу ЕМП антени МТ на голову користувача під час телефонної розмови задля встановлення відповідності величини електромагнітного опромінення вимогам міжнародних стандартів, а також визначення фактичної потужності випромінювання антени.

Постановка завдання

Перехід до мереж третього й четвертого покоління значно ускладнює процес проектування МТ, збільшуються трудові та матеріальні витрати на проведення експериментальних досліджень. Жорсткі вимоги до рівня потужності випромінювання, що поглинається в тілі користувача МТ, тобто SAR (Specific Absorption Rate) [1], який характеризує ступінь впливу «телефон – людина», вимагають проведення складних і дорогих вимірювань. Засоби такого контролю повинні бути неінвазивними (неможливо безпосередньо вимірювати поле всередині людського тіла або окремих органах) і неспотворюваними (внесення вимірювальних зондів у ближнє поле мобільних телефонів змінює їх параметри). У цих умовах значно зростає роль математичного (імітаційного) моделювання високочастотних електромагнітних полів, що створюються мобільними терміналами, і насамперед, розрахунку рівня потужності випромінювання, яке поглинає тіло людини.

Існує низка робіт, наприклад, [2, 3, 4], у яких показано послідовність розробки конструкції антени мобільного терміналу, розрахунок величини SAR залежно від положення антени всередині мобільного терміналу, а також розрахунок та оцінка ступеня впливу електромагнітного випромінювання на людину з погляду біоефекту, тобто реакції організму на рівень електромагнітного випромінювання (наприклад, величина температури нагріву голови), та часу його дії. Аналіз цих робіт показав, що задачі визначення величини SAR та потужності втрат ЕМП антени МТ залежно від відстані між мобільним терміналом та головою користувача під час телефонної розмови, а також урахування змін характеристик МТ у

близькій присутності голови користувача, залишилися поза їх увагою, тому метою цієї роботи є моделювання процесу взаємодії ЕМП антени мобільного терміналу та голови людини під час розмови для визначення величини SAR, потужності втрат ЕМП за різних відстаней між МТ та головою користувача.

Енергетичні співвідношення електромагнітного поля поблизу антени мобільного терміналу

Згідно з нормативним документом [5], термін питомої потужності поглинання SAR визначається як похідна за часом від прирощеної енергії ЕМП, поглинена (розсіяна) прирощеною масою, яка міститься в нескінченно малому елементі об'єму заданої щільності, і виражається за допомогою виразу

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right), \quad (1)$$

де SAR – питома потужність поглинання випромінювання, Вт/кг; dW – приріст енергії; $dm = \rho dV$ – приріст маси в об'ємі V ; dV – нескінченно малий елемент об'єму; ρ – густина біологічної тканини тіла людини.

Тобто, іншими словами, SAR – це перетворення енергії ЕМП в іншу форму матерії (тепло) під час наближення тіла із заданою масою до джерела випромінювання. У результаті цього з'являється потужність втрат ЕМП, яке випромінюється МТ, тому фактичну потужність випромінювання антени МТ пропонуємо визначати за виразом

$$P_{\Sigma_{\text{реал}}} = P_{\Sigma} - P_{\text{вт.людини}}, \quad (2)$$

де $P_{\Sigma_{\text{реал}}}$ – фактична потужність випромінювання антени МТ; P_{Σ} – потужність випромінювання антени МТ; $P_{\Sigma} = \oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$; \vec{P} – вектор Пойнтінга, що вказує напрям руху енергії та дорівнює за величиною щільності її потоку; S – одинична площа простору, перпендикулярна напрямку розповсюдження вектора Пойнтінга; $P_{\text{вт.людини}}$ – потужність втрат у тілі користувача МТ.

Отже, для знаходження фактичної потужності випромінювання антени МТ на етапі його проектування необхідно враховувати потужність поглинання в голові людини під час телефонної розмови.

Моделювання взаємодії ЕМП антени МТ та голови користувача

У цій роботі дослідження взаємодії електромагнітного випромінювання телефону з головою користувача було проведено за допомогою програми FEKO v 5.5 [6]. Ця програма ґрунтується на методі FDTD (метод кінцевих різниць у часовому діапазоні (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD) – один із найпопулярніших методів чисельної електродинаміки, заснований на дискретизації рівнянь Максвелла, записаних у диференціальній формі) і дозволяє знайти всі необхідні характеристики поля в ближній і дальній зонах.

У роботі спочатку було змодельована антена МТ та розраховані деякі її характеристики, насамперед, модуль комплексного коефіцієнта відбиття МТ, діаграма спрямованості (ДС) за відсутності поряд голови користувача, а потім на декількох відстанях між головою та МТ.

Очевидно, що велике діелектричне тіло, а саме – модель голови людини, яке знаходиться в ближньому полі антени МТ, повинне вплинути на характеристики антени, а саме – на модуль коефіцієнта відбиття (рис. 1), а також на її діаграму спрямованості (рис. 2).

Числові розрахунки характеристик МТ у присутності голови людини, проведені за

допомогою ФЕКО, підтверджують це.

На рис. 1 показані частотні залежності модуля комплексного коефіцієнта відбиття S_{11} (залежність узгодження його антени у вільному просторі) за відстаней 0 мм і 5 мм між антеною МТ і головою користувача, а також за її відсутності. Ця характеристика показує, що за різної відстані між антеною МТ і головою користувача робоча (резонансна) частота змінюється.

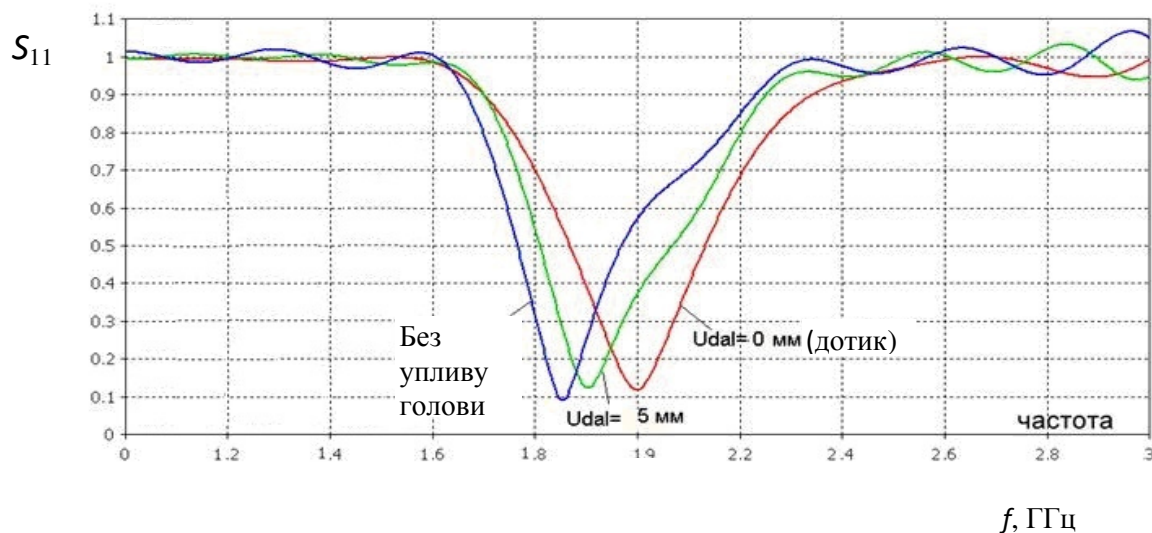


Рис. 1. Розраховані частотні характеристики антени за відсутності і в присутності фантома голови користувача

Якщо $S_{11} = 1$, то вся потужність відбивається від антени – і нічого не випромінюється, якщо $S_{11} = 0$, то це означає, що потужність, що підводиться до антени, повністю випромінюється без втрат. Допустимі межі значення цієї величини, як правило, становлять від 0 до 0,3. Із графіка видно, що без впливу голови робоча частота на 1,82 ГГц, а $S_{11} = 0,1$, а коли поряд із антеною на відстані 5 мм розташована голова користувача, то частотна характеристика зсувається вправо, але головне, що тепер на робочій частоті 1,82 ГГц модуль комплексного коефіцієнта відбиття збільшився до 0,3, тобто збільшився утричі. Тобто тепер напруга відбиття збільшилася або ж голова поглинула більше випромінюваної потужності.

На рис. 2 показані діаграми спрямованості антени МТ за відстаней від 0 до 10 мм між цією антеною й головою користувача.

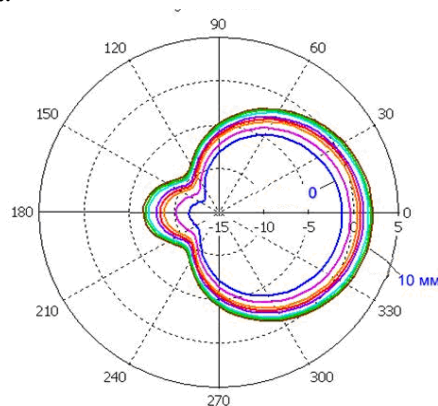


Рис. 2. Діаграма спрямованості антени МТ за відстаней від неї до голови людини від 0 до 10 мм

На рис. 2 голова людини екранує поле антени в напрямку $\varphi = 180$ град, тому поле випромінювання має значно меншу величину в цьому напрямку.

Отже, вищенаведене вказує на факт впливу присутності голови людини біля МТ під час телефонної розмови на характеристики мобільного терміналу, що вимагає врахування цих явищ на етапі проектування ЗМЗ.

У роботі проведені розрахунки SAR для різних відстаней між антеною МТ і головою людини. Розрахунок поля, створюваного антеною, проводили на частоті 1,8 ГГц для PIFA-антени потужністю 2 Вт залежно від відстані між головою та антеною від 0 мм до 10 мм. Модель голови людини представляла собою трисферичну кулю з єдиним центром, кожна зі сфер мала біологічні параметри тканин голови користувача, а саме – мозок, кістка, шкіра.

Під час впливу користувача мобільного терміналу величина ККД антени, яка визначена програмним комплексом FEKO, зменшується в межах 10 %, з'являється потужність втрат у межах 20% від всієї потужності випромінювання, унаслідок чого зменшується інтенсивність випромінювання (наприклад, ДС), що пояснюється неузгодженістю антени зі збуджувальним пристроєм. На рис. 3 показана розрахункова енергетична характеристика антени (конкретно для SAR) для відстані між головою й антеною 0 мм.

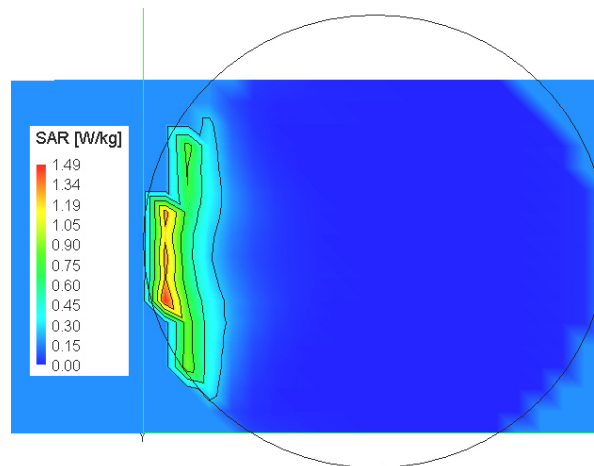


Рис. 3. Візуалізація рівнів SAR в моделі голови людини на відстані 0 мм від антени мобільного терміналу

Для встановлення зв'язку між величиною SAR і відстанню між МТ та головою користувача пропонуємо відомий з [1] вираз визначення SAR представляти у вигляді

$$SAR(r) = \frac{\sigma \cdot E(r)^2}{\rho}, \quad (3)$$

де σ – питома електрична провідність тканини тіла, См/м; $E(r)$ – середньоквадратичне значення напруженості електричного поля в тканині, В/м; r – відстань між МТ та головою користувача; ρ – густина тканини тіла, кг/м³.

Використовуючи вираз (3) та значення вектора напруженості електричного поля, одержаних за допомогою програмного комплексу FEKO, у цій роботі ми розрахували значення SAR за відстаней від 0 мм до 5 мм між МТ та головою користувача під час телефонної розмови. Результати розрахунку максимального значення величини питомої потужності поглинання в голові людини та відповідні значення потужності втрат ЕМП антени МТ подані в табл. 1.

Із табл. 1 видно, що найвищий показник SAR на частоті 1,8 ГГц, що спостерігаємо за відстані між МТ та головою користувача 0 мм, становить 1,49 Вт/кг, що відповідає

встановленій нормі [5], яка складає за європейськими стандартами 2 Вт/кг.

Залежність SAR від відстані між антеною й головою людини має досить очікуваний характер, а саме: у міру віддалення антени від голови користувача величина SAR зменшується.

Слід зазначити, що поглинання й розподіл електромагнітної енергії в організмі – дуже складний феномен, який залежить від маси, форми й розміру тіла; орієнтації тіла щодо векторів поля та електричних властивостей тіла й навколишнього середовища. Іншими змінними, які можуть відігравати суттєву роль у можливих біологічних ефектах, є ті, які характеризують навколишнє середовище (наприклад, температура навколишнього повітря, швидкість руху повітря, відносна вологість і ізоляція тіла), і ті, які характеризують індивіда (наприклад, вік, стать, рівень активності, виснаження або хвороби). Оскільки численні фактори можуть взаємодіяти, для визначення конкретних біологічних результатів впливу електромагнітних полів будь-яка документація з організації заходів захисту повинна розглянути максимальне посилення біологічних ефектів у результаті взаємодії поля тіла, стану навколишнього середовища й фізіологічних параметрів.

Таблиця 1

Залежність максимального значення величини SAR і потужності втрат $P_{вт}$ від відстані між антеною й головою людини на частоті, наближеною до 1,8 ГГц

Відстань від антени МТ до голови користувача r , мм	SAR_{max} , Вт/кг	$P_{вт}$, Вт
0	1,49	0,399
1	1,45	0,397
2	1,33	0,391
3	1,30	0,384
4	1,29	0,377
5	1,28	0,369

Отримана модель взаємодії антени МТ та голови його користувача має такі переваги порівняно з реальними макетами із застосуванням фізіологічних розчинів:

1. Параметри обчислювальної моделі можуть бути майже вільно обрані в широкому діапазоні, наприклад, місце розташування електродів, розміщення тіла в системі відображення, модифікація розрахунку пристроїв тощо.

2. Параметри впливу можуть варіювати в широких межах, у тому числі й радіочастоти, що складно виконати за допомогою комерційного томографа магнітного резонансу.

3. Геометричні й фізіологічні параметри обчислювальної моделі часто точніші порівняно з макетом.

4. Необхідні обсяги обчислень можуть бути великими, але це не перешкода для сучасних обчислювальних машин.

У ході досліджень визначено, значення SAR загалом залежать від таких чинників:

– параметрів поля, яке падає, наприклад, частоти, інтенсивності, поляризації, геометричної конфігурації «джерело-об'єкт» (ближня або дальня зони);

– характеристики тіла, що опромінюється, наприклад, його розміру, внутрішньої і зовнішньої геометрії, діелектричних властивостей різних складників його тканин і ефектів екранування або відбиття від інших об'єктів, розташованих у полі поблизу опромінюваного тіла.

У роботі також було проведено порівняння теоретично отриманих результатів із експериментальними дослідженнями, проведеними в США лабораторією RF Exposure Lab, Наукові праці ВНТУ, 2016, № 4

LLC [7]. У межах цих досліджень були проведені вимірювання величини SAR для різних моделей МТ: Motorola Droid, iPhone, Blackberry Curve, Samsung SGH-T255G в діапазоні частот стандарту GSM 1800 МГц за відстані 4 мм від МТ щодо фантому голови людини на максимальній потужності. У ході цих експериментальних досліджень, наприклад, моделі МТ iPhone одержано значення SAR, що дорівнює 1,163 Вт/кг. Порівняння експериментального з теоретично одержаним результатом значення SAR, що становить за тієї ж відстані 1,29 Вт/кг, дозволило встановити відмінність у 9 %. Тобто отримані в роботі значення потужності втрат на поглинання електромагнітної енергії поля в голові користувача можна вважати адекватними та придатними для врахування на етапі проектування антен МТ з метою уточнення величини потужності передачі мобільного терміналу та забезпечення допустимого ступеню впливу на біологічні об'єкти.

Висновки

З огляду на вищесказане можна зробити такі висновки:

1. У роботі було виконано оцінку взаємодії електромагнітного поля антени мобільного терміналу на голову людини під час розмови за рахунок визначення SAR, що характеризує ступінь такого впливу, потужності втрат ЕМП антени МТ залежно від відстані між телефоном та головою користувача від 0 мм до 5 мм.

2. У ході імітаційного моделювання в програмному комплексі FEKO та дослідженні характеристик ЕМП антени МТ було встановлено, що за присутності голови користувача біля мобільного терміналу під час телефонної розмови з'являються втрати потужності ЕМП за рахунок появи потужності поглинання в біологічних тканинах голови користувача телефону, унаслідок чого зменшується інтенсивність випромінювання та розмір діаграми спрямованості, унаслідок чого величина ККД антени зменшується в межах 10 %. Тому автором вперше запропоновано вираз розрахунку фактичної потужності випромінювання антени МТ, який враховує втрати потужності ЕМП антени за рахунок появи питомої потужності поглинання в біологічних тканинах голови користувача телефону. Порівняння одержаних в роботі в ході імітаційного моделювання та розрахунків значення SAR МТ з експериментальними даними, виконаними лабораторією RF Exposure Lab, показало відмінність у 9 %.

3. Отримані результати роботи та розроблену імітаційну модель впливу ЕМП антени МТ на голову його користувача можна рекомендувати для використання на етапі проектування антен мобільних терміналів із заданими частотними характеристиками, що забезпечить водночас уточнення розрахунку фактичної потужності передавальної антени МТ та визначення відповідності міри впливу електромагнітного випромінювання на біологічні об'єкти встановленим нормам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Basic standard to demonstrate the compliance of fixed equipment for radio transmission (110 MHz - 40 GHz) intended for use in wireless telecommunication networks with the basic restrictions or the reference levels related to general public exposure to radio frequency electromagnetic fields, when put into service [Електронний ресурс] / EN 50400 European Standard. – June 2006. – Режим доступу: <https://shop.austrian-standards.at/Preview.action;jsessionid=9A023FDB48EF88C57A951410CDFB1AEE?preview=&dockey=481694&selectedLocale=en>.

2. Слюсар В. И. Антенны PIFA для мобильных средств связи / В. И. Слюсар // Научно-технический журнал «Электроника: наука, технология, бизнес». – 2007. – Вып. № 1. – С. 64 – 74.

3. Гайнутдинов Т. А. Расчет SAR микрополосковых антенн сотовых телефонов / Т. А. Гайнутдинов, С. А. Савичева // Научно-аналитический журнал «Технологии информационного общества». – Спецвыпуск T-Comm. – 2009. – С. 23 – 29.

4. Думанський В. Ю. Гігієнічна оцінка електромагнітної ситуації та наукове обґрунтування вимог до її безпеки в сучасних населених місцях України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. мед. наук: 14.02.01

«Гігієна та професійна патологія» / В. Ю. Думанський. – Київ, 2009. – 41 с.

5. Обладнання систем радіозв'язку абонентське. Підтвердження відповідності базовим граничним рівням, пов'язаним з дією електромагнітних полів від 300 МГц до 3 ГГц на людину (EN 50360:2001, IDT) ДСТУ EN 50360:2007. [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – IV, 4 с. – (Національний стандарт України).

6. Altair HyperWorks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.feko.info/applications/biomedical>.

7. SAR evaluation: report [Електронний ресурс] / RF Exposure Lab LLC, USA. – 2011. – 74 р. – Режим доступу: <https://www.feko.info/download>.

Степанова Людмила Ігорівна – аспірантка кафедри волоконно-оптичних ліній зв'язку.
Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова.