

БІОМЕДИЧНА РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.396.67

Віктор Гоблик, Євгенія Яковенко
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра радіоелектронних пристроїв та систем

ДОСТАНДАРТИЗАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОЛЯ РАДІОТЕЛЕФОНУ В ФАНТОМІ ЛЮДИНИ

© Гоблик Віктор, Яковенко Євгенія, 2001

Розроблена двовимірною математичною моделлю для дослідження розподілу поля радіотелефону в тілі людини з метою створення науково обґрунтованих стандартів на допустимі норми опромінення і засобів захисту.

The two-dimensional model for the investigation of the mobile phone electromagnetic field to create the justified standards for the radiation rate and the protective tools was elaborated.

Розвиток мобільних систем зв'язку випереджує всі прогнози. Так, за даними спеціалістів провідних компаній кількість абонентів стандарту GSM в Європі до початку 2000 р. повинно було становити 22,5 млн. Однак насамперед в кінці 1999 р. їх кількість перевищила 150 млн. Загальна кількість абонентів всіх систем сотового зв'язку в світі становила 470 млн, що відповідало середньому проникненню (тобто відношенню кількості абонентів радіотелефонів до кількості жителів Землі) 8 %. Необхідно відзначити, що за цим показником країни СНД поки що значно відстають. У Росії цей показник становить 0,92 %, в Україні – 0,6 %. Однак динаміка зростання абонентської бази сотового зв'язку показує, що кожних 2 роки кількість абонентів збільшується в 2 – 2,5 рази (за даними "Global Mobile", "Mobile Communication"). Масове використання радіотелефонів призвело до суттєвого зростання рівня електромагнітного випромінювання і його дії на організм людей. Погіршення екологічної ситуації в галузі електромагнітних випромінювань зумовило необхідність в розробці нормативних актів-стандартів на допустимі норми опромінення. Розроблені стандарти (національний стандарт США ANSI C95.1-82, національний стандарт Німеччини VDE 0848) та рекомендації міжнародних організацій ВОЗ/IRPA/NIRC мають розбіжності в гранично допустимих рівнях опромінення електромагнітним полем, що свідчить про недостатність їх наукового обґрунтування. Спільною негативною рисою цих документів є те, що встановлені граничні рівні опромінення ґрунтуються на тепловій концепції дії електромагнітного поля (ЕМП). Однак числові результати проведених наукових досліджень свідчать про інформаційно-резонансний, а не енергетичний характер взаємодії електромагнітних хвиль з біологічним середовищем. За даними роботи [2] біологічні ефекти, спричинені дією ЕМП залежать не тільки від енергії поля, але і від внесеної інформації. Через високу чутливість приймальних біологічних систем передача інформації здійснюється при малій енергії сигналу. При цьому інформація може накопичуватись у системі (кумулятивний біологічний ефект) при багатократному повторенні слабких сигналів. Дія ЕМП НВЧ на центральну нервову систему людини проявилася у зміні електроенцефалограми, що полягала у підвищенні когерентності та зміні частотного спектра δ - та α -ритмів.

Аналіз роботи [3] висвітлює багатогранність дії ЕМП НВЧ на організм людини.

У цій роботі показано, що опромінення імпульсним ЕМП з параметрами: частота 2,45 ГГц, тривалість імпульсів 2 мкс, частота повторення імпульсів 500/с при рівні, що відповідає допустимим нормам, викликало аномальне зростання концентрації вільних радикалів, що стало причиною руйнування ланцюга ДНК. Прямі експерименти з радіотелефоном системи GSM, що мав такі параметри: частота 900 МГц, тривалість імпульсів 0,6 мс, частота повторення імпульсів 217/с, проведені на мишах показали, що опромінення упродовж 18 місяців по 30 хв кожного дня при рівні, що становить 0,4 від гранично допустимого, спричинило захворювання лімфатичних вузлів.

На жаль, результати подібних досліджень залишаються невідомими для громадськості, яка бачить тільки позитивну роль мобільних систем зв'язку.

У світлі наведених фактів очевидною стає необхідність перегляду і більш всебічного наукового обґрунтування існуючих нормативних документів. При встановленні гранично допустимих норм опромінення необхідно звернути увагу на ще один важливий аспект. Зважаючи на тепловою дію ЕМП, обмеження встановлені на середні значення питомої потужності поглинання. Однак в умовах, коли довжина хвилі в біологічному середовищі стає меншою від розмірів тіла, виникає значна нерівномірність розподілу поля, що на певних ділянках може суттєво перевищувати гранично допустимі норми. Зі зростанням робочої частоти радіотелефону актуальність проблеми збільшується.

Враховуючи це, була поставлена задача побудови математичної моделі (ММ) для симуляції розподілу ЕМП в голові людини від радіотелефону. Ця задача знаходиться в руслі проблем, над якими працювали у лабораторії НДЛ-16 і які були пов'язані з лікуванням онкологічних захворювань методами НВЧ-гіпертермії [4].

Модель, використану в [4], було адаптовано для потреб поставленої задачі з врахуванням специфіки джерела випромінювання. В основу моделі було закладено, що тіло людини описується комплексною діелектричною проникністю, яка міняється від точки до точки. Далі розглядається задача збудження такого діелектрично неоднорідного тіла полем стороннього джерела. Для цього використовується числовий розв'язок інтегрального рівняння для струмів поляризації в тілі людини.

Як вихідне було прийняте інтегральне рівняння для струму поляризації в неоднорідному тілі з об'ємом V і діелектричною проникністю $\epsilon_a'(x, y, z) = \epsilon_a(x, y, z) - j \cdot \sigma(x, y, z) / \omega$, де σ – провідність тканин людини.

$$\frac{-1}{i\omega\epsilon} \cdot \left(\text{grad div} + k^2 \right) \int_V \bar{J}(\bar{r}') \cdot G(\bar{r} - \bar{r}') dV + \frac{\bar{J}(\bar{r})}{i \cdot \omega \left[\epsilon_a'(\bar{r}) - \epsilon \right]} = \bar{E}^{\text{ПАД}}(\bar{r}), \quad (1)$$

$$\bar{r} \in V$$

де $J = j\omega(\epsilon_a' - \epsilon)$; \bar{E} – струм поляризації; G – функція Гріна; k – хвильове число; $\bar{E}^{\text{ПАД}}$ – напруженість поля падаючої хвилі.

Використання методу сіток і представлення струмів поляризації у вигляді суперпозиції струмів пробних функцій дає можливість звести інтегральне рівняння (1) до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Одержана система рівнянь для тіл розміром порядку довжини хвилі має розмірність порядку 10^3 , що вимагає значних ресурсів пам'яті і часу обчислень на ЕОМ. Тому на першому етапі розробки електродинамічної моделі був розглянутий частковий випадок, в якому форма і електродинамічні параметри тіла і струм джерела опромінення є незмінними вздовж координати Z . Було прийнято, що в межах комірки струми поляризації описуються кусково-лінійними функціями.

Для двовимірної задачі розподіл струмів поляризації в тілі людини, збудженому стороннім джерелом, описується рівнянням

$$\frac{i}{\overline{\omega} \cdot \varepsilon_0 \cdot [\hat{\varepsilon}_a(x, y) - 1]} \cdot I^{ПОЛ}(x, y) + \frac{\overline{\omega} \cdot \mu_0}{4} \int_S I^{ПОЛ}(x', y') \cdot H_0^{(2)}(k \cdot r) \cdot dS' = E^{СТОР}(x, y). \quad (2)$$

Для застосування методу сіток розбиваємо поперечний переріз тіла на комірки з постійним кроком Δx і Δy (рис. 1)

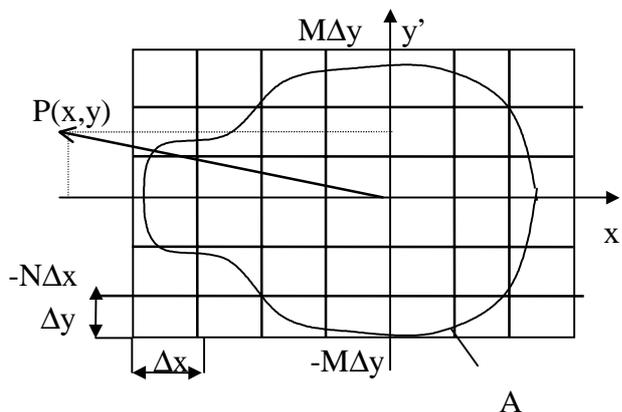


Рис. 1. Побудова координатної сітки

Застосувавши числовий метод Крилова-Боголюбова і використовуючи позначення $G(x, y) = i / (\varepsilon_a'(x, y) - 1)$, отримуємо рівняння

$$\hat{G}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) \cdot I^{ПОЛ}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) - \frac{k^2}{4} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I^{ПОЛ}(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y) \times$$

$$\times \int_{i \cdot \Delta x - \frac{\Delta x}{2}}^{i \cdot \Delta x + \frac{\Delta x}{2}} \int_{j \cdot \Delta y - \frac{\Delta y}{2}}^{j \cdot \Delta y + \frac{\Delta y}{2}} H_0^{(2)} \left(k_0 \sqrt{(n \Delta x - x)^2 + (m \Delta y - y)^2} \right) \cdot dx' \cdot dy' = \overline{\omega} \cdot \varepsilon_0 \cdot E^{СТОР}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) \quad (3)$$

Ядро рівняння (3) має логарифмічну особливість при $n=i, m=j$, оскільки функцію Ханкеля другого роду нульового порядку можна замінити відомим асимптотичним виразом

$$\hat{I}_0^{(2)}(z) \approx 1 + i \cdot (2/\pi) \ln(2/\gamma z), \quad (4)$$

де $\gamma = 1,781$.

Беручи до уваги (4), отримуємо

$$\hat{G}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) \cdot I^{ПОЛ}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) - \frac{k_0^2}{4} \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} \int_{-\Delta y/2}^{\Delta y/2} \left\{ 1 + i \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{2}{\gamma \cdot k_0 \sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \right\} \cdot dx' dy' \times$$

$$\times I^{ПОЛ}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) - \frac{k_0^2}{4} \cdot \Delta x \Delta y \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \left[H_0^{(2)} \cdot k_0 \sqrt{(n-i)^2 \cdot \Delta x^2 + (m-j)^2 \cdot \Delta y^2} \right] \times$$

$$\times J^{ПОЛ}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y) = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot E^{СТОР}(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y). \quad (5)$$

Як модель антени трубки радіотелефону приймаємо поле нитки синфазного електричного струму, яка розташована вздовж осі тіла в точці з координатами (x_0, y_0) :

$$E^{СТОР}(n\Delta x, m\Delta y) = -\frac{k_0^2}{4 \cdot \omega \cdot \epsilon_0} I_Z^E \cdot \left[H_0^{(2)} \left(k_0 \sqrt{(n\Delta x - x_0)^2 + (m\Delta y - y_0)^2} \right) \right], \quad (6)$$

де I_Z^E – амплітуда стороннього джерела струму.

Для числового розв'язання поставленої задачі алгоритмічною мовою Pascal була складена програма, для якої вихідними даними були частота, кількість підобластей, на які розбивається переріз тіла людини, координати розташування джерела і електродинамічні параметри підобластей.

Переріз, для якого був проведений розрахунок, зображений на рис. 2.

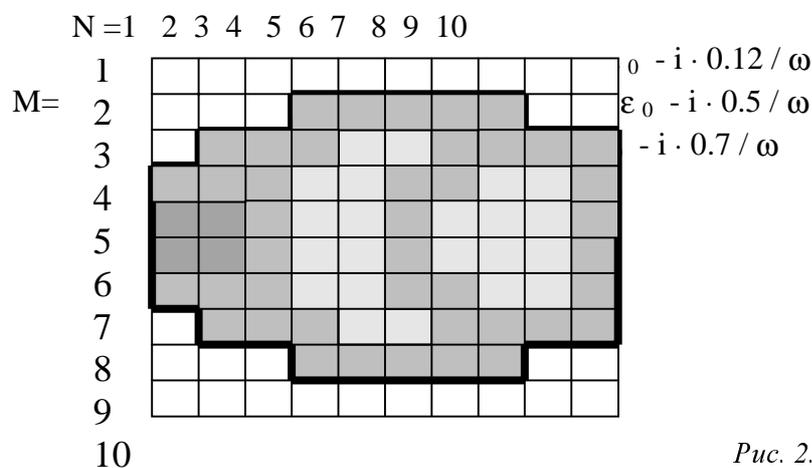
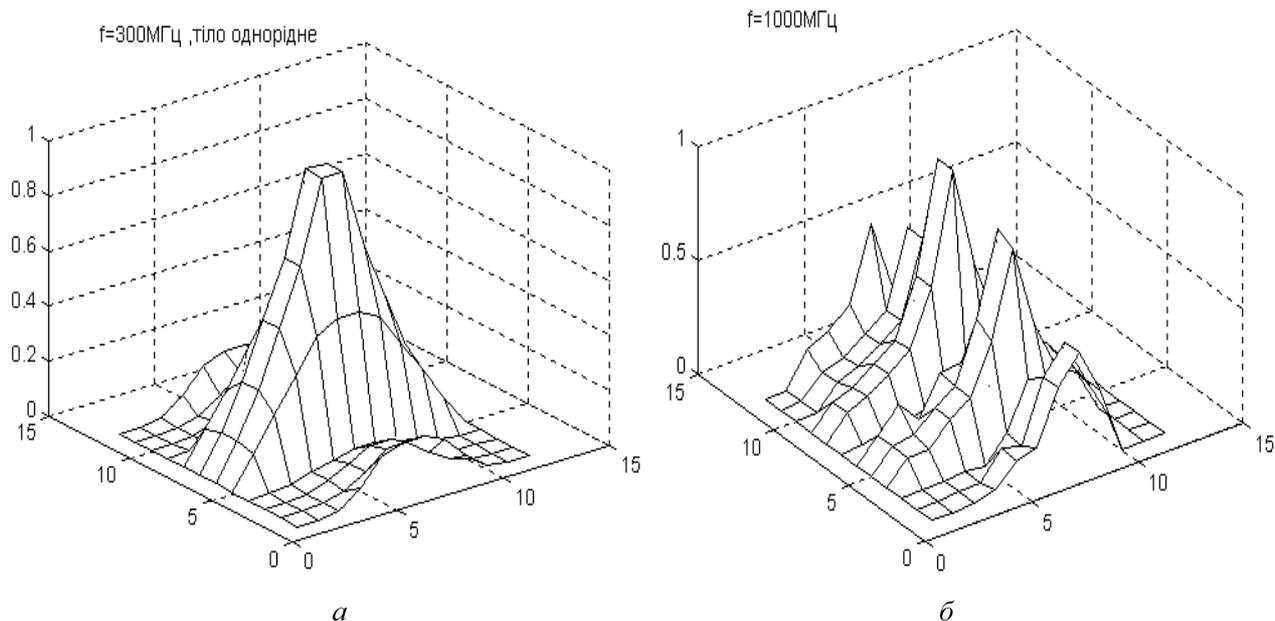


Рис. 2. Переріз фантома голови людини

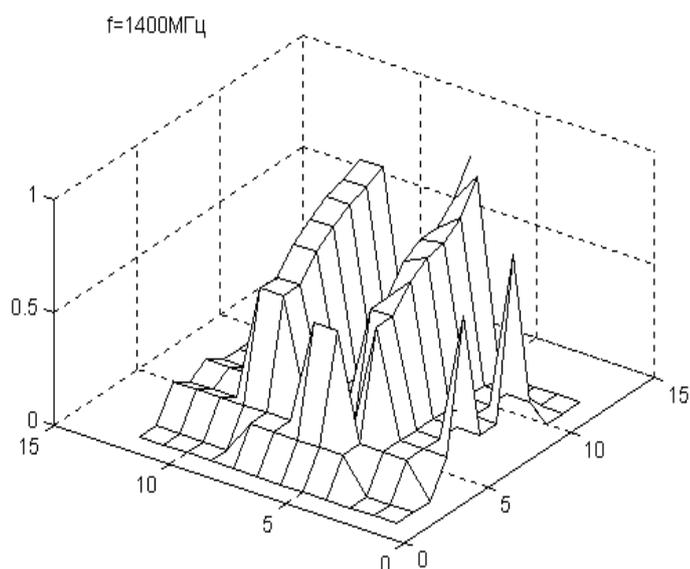
Результати розрахунку подані у вигляді рис. 3.

$f=300\text{МГц}$, тіло однорідне

$f=1000\text{ МГц}$, тіло неоднорідне



$f=1400$ МГц, тіло неоднорідне



б

Рис. 3. Розподіл поля у перерізі фантома голови людини від радіотелефону

На рис. 3, а показаний розподіл поля у перерізі фантома голови людини за умови однорідності середовища. При розрахунку за параметри середовища прийняті усереднені електродинамічні параметри тканин голови. Цей розрахунок виконаний як тестовий для перевірки розробленої моделі. На рис 3, б, в пказані розподіли поля з врахуванням електродинамічних характеристик трьох типів тканин та їх конфігурації.

Дослідження розподілу ЕМП у перерізі фантома голови людини від радіотелефону виявило значну нерівномірність розподілу амплітуди поля, що свідчить про необхідність перегляду нормативів, встановлених з середніх значень питомої потужності поглинання за тепловим ефектом. Характер розподілу поля свідчить про необхідність прийняття технічних заходів з захисту мозку людини від опромінення при користуванні радіотелефоном.

1. Ратырский М., Телегин А. Телефон в кармане. – М. Радио и связь, 2000, 248 с.
2. Лебедева Н.Н. Реакции центральной нервной системы человека на электромагнитные поля с различными биотропными параметрами // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 1.
3. W.Ross Adey. Cell and Molecular Biology Associated with Radiation Fields of Mobile Telephones-Review of Radio Science 1996-1999.
4. Хзмалян А, Чаплин А. Электродинамическая модель СВЧ-гипертермии. – М., Наука, 1989.