

УДК 621.37:615.849.11

## НВЧ АПЛІКАТОР ДЛЯ ГІПЕРТЕРМІЇ НА ОСНОВІ СПІРАЛЬНОЇ ПЕРІОДИЧНОЇ СТРУКТУРИ

*Сергієнко О. В., Найденко В. І.*

*Запропоновано використання періодичних структур для створення аплікаторів з однорідним або близьким до нього розподілом електромагнітного поля. Наведені результати моделювання запропонованої структури та числові розрахунки показують перспективність аплікаторів такого типу.*

### **Вступ**

Сучасний етап розвитку медичної термотерапії характеризується підвищеним інтересом до використання гіпертермії для лікування онкологічних захворювань, яка полягає у дії підвищеної температури на ракові клітини, які більш чутливі до дії тепла, ніж нормальні клітини. Збільшення температури тканини призводить до знищення ракових пухлин і збільшує їх чутливість до хіміотерапії та рентгенівського випромінювання. Гіпертермія, що досягається за допомогою електромагнітної (ЕМ) енергії, є перспективним методом створення необхідного теплового розподілу в тканині. Це пояснюється високою проникаючою здатністю ЕМ випромінювання в тканини організму. Гіпертермія має ряд переваг. Процедура ЕМ нагрівання є не обігрівальною, як, наприклад, душ, солярій, водяна ванна, інші методи, що передають тепло за рахунок кровотоку і теплопровідності тканин від поверхні шкіри у внутрішні області організму. Вона прогріває відразу весь призначений для гіпертермії об'єм тканини або локалізує нагрівання в обмеженому об'ємі тіла людини. Це дозволяє істотно знизити час виходу на потрібний температурний режим області нагрівання, оперативно керувати величиною потужності, часом впливу і значно зменшити теплове навантаження на тканини пацієнта, а отже, і на його серцево-судинну систему. Електромагнітні поля (ЕМП) дозволяють успішно вирішувати задачі гіпертермії з врахуванням розмірів, форми і положення ракових пухлин [1].

### **Постановка задачі**

Необхідність удосконалення технічної сторони гіпертермії в даний час є актуальною задачею. Поширення даного методу в клініках, безперечний позитивний досвід його застосування, зростаючий інтерес до нього медичних працівників вказують на велику потребу в сучасних високоефективних гіпертермічних аплікаторах, складність створення яких на сьогодні є перешкодою на шляху поширення відповідної гіпертермічної апаратури. Основною вимогою до НВЧ аплікатора є виключення можливості перегрівання тканин при лікуванні. Цього можна досягти шляхом використання однорідного ЕМП в області нагрівання. Однорідне ЕМП можна реалізувати, використовуючи періодичні структури.

До конструкцій аплікаторів висувається ряд додаткових вимог, серед

яких: діапазон робочих частот, максимальне узгодження з середовищем, що опромінюється, мінімальні власні втрати потужності, постійність характеристик тощо. Важливою є і задача знаходження розподілу полів як функції розміру випромінюючого елемента аплікатора, площі поверхні, що опромінюється, критичності до зміни частоти ЕМП т.ін.

### Аплікатор на основі спіральної періодичної структури

Для досягнення необхідних температурних режимів без перегрівання тканин необхідно розробити аплікатор, що забезпечує однорідне або близьке до однорідного ЕМП в області нагрівання. Як відомо з електродинаміки, однорідне поле досягається за умови, коли фазова швидкість  $V_f$  дорівнює швидкості світла  $c$  у вакуумі. Досягти рівності, або близькості фазової швидкості і швидкості світла у вакуумі можна за допомогою періодичних структур [2]. Однією з ефективних типів періодичних структур для гіпертермії може бути спіральна структура з великим кутом підйому витка (кутом навивання), зміною якого можна просто і ефективно змінювати швидкість поширення хвиль у вказаній спіральній структурі. Одночасно можна досягти високого рівня однорідності ЕМП в центральній області спіралі, яка, за звичай, утворюється металічним провідником, намотаним на циліндричний стрижень найчастіше круглого перерізу за гвинтовою лінією (рис. 1).

У спіральній структурі ЕМ хвилі поширюються уздовж провідника – провідник є своєрідною спрямовуючою структурою. Швидкість поширення ЕМ хвилі уздовж прямого провідника, що знаходиться у вакуумі, близька до швидкості світла. При викривленні провідника ця властивість в основному зберігається [3], що і пояснює здатність спіралі "гальмувати" фазову швидкість хвиль, які вздовж цієї спіралі розповсюджуються.

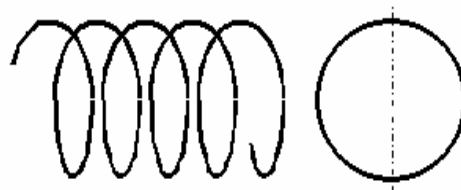


Рис. 1. Спіральна структура

### Модель спіральньо-провідного циліндра

Теорія спіральної лінії, заснована на строгому рішенні рівнянь Максвелла, на сьогоднішній день невідома. Найпростішою моделлю є модель спіральньо-провідного циліндра. Модель спіральньо-провідного циліндра є достатньо простою, дає можливість фізичного трактування властивостей спіралі, забезпечує, як правило, достатню точність розрахунків. Спіральню лінію замінюють на спіральньо-провідний циліндр (СПЦ) – циліндр з анізотропією провідності. Товщина СПЦ дорівнює нулю. СПЦ має ідеальну провідність уздовж витків спіралі і не проводить струм у перпендикулярному до витків спіралі напрямі. При побудові теорії спіральньо-провідного циліндра необхідно враховувати всі шість компонент ЕМП. Це доводиться наступними міркуваннями. З граничних умов впливає, що електричне по-

ле перпендикулярне до витків спіралі (які вважаються ідеально провідними). Електричне поле, перпендикулярне до витків спіралі, є нахиленим відносно осі  $z$  циліндричної системи координат, тобто має поздовжню компоненту. Магнітне поле, яке охоплює виток спіралі, також нахилене відносно осі  $z$  і, отже, має поздовжню компоненту. Тому поля СПЩ є гібридними – мають не рівними нулю всі шість компонент. Розправлений виток спіралі (жирна лінія), кут нахилу  $\psi$  спіралі і осі  $z$  і  $\phi$  циліндричної системи координат наведені на рис.2. Розглядаємо азимутально однорідні хвилі. Такі хвилі, як буде показано далі, дозволяють отримати рівномірне поле на поверхні опромінення. Поля всередині спіралі можна знайти з поздовжніх компонент електричного і магнітного полів:

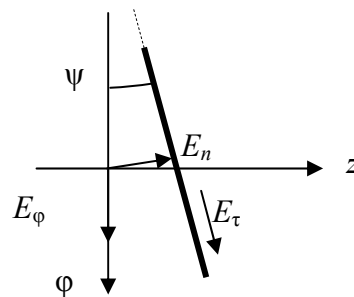


Рис. 2

$$\left. \begin{aligned} E_z^{6H}(r) &= AI_0(\gamma r) \\ H_z^{6H}(r) &= BI_0(\gamma r) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Поля поза спіраллю знаходимо, знаючи поздовжні компоненти електричного і магнітного полів:

$$\left. \begin{aligned} E_z^{306H}(r) &= CK_0(\gamma r) \\ H_z^{306H}(r) &= DK_0(\gamma r) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $r$  – радіус спіралі;  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - k^2}$  - поперечне хвильове число;  $\beta$  – фазова постійна;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число;  $I_0(\gamma r)$ ,  $I_1(\gamma r)$ ,  $K_0(\gamma r)$ ,  $K_1(\gamma r)$  – модифіковані функції Бесселя [4],  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – невідомі амплітуди.

Маємо такі граничні умови: на поверхні  $r=a$  (зсередини і ззовні) тангенціальні до поверхні витка компоненти електричного поля мають дорівнювати нулю, нормальні компоненти електричного поля (зсередини і ззовні) мають бути неперервними як і мають бути неперервними тангенціальні компоненти магнітного поля (зсередини і ззовні спіралі):

$$\vec{E}_\tau^{(6H)} = 0, \quad \vec{E}_\tau^{(306H)} = 0, \quad \vec{E}_n^{(6H)} = \vec{E}_n^{(306H)}, \quad \vec{H}_\tau^{(6H)} = \vec{H}_\tau^{(306H)}$$

Запишемо ці умови через проекції в циліндричній системі координат:

$$\left. \begin{aligned} E_z^{(6H)} \sin \psi + E_\phi^{(6H)} \cos \psi &= 0 \\ E_z^{(306H)} \sin \psi + E_\phi^{(306H)} \cos \psi &= 0 \\ E_z^{(6H)} \cos \psi + E_\phi^{(6H)} \sin \psi &= E_z^{(306H)} \cos \psi + E_\phi^{(306H)} \sin \psi \\ H_z^{(6H)} \sin \psi + H_\phi^{(6H)} \cos \psi &= H_z^{(306H)} \sin \psi + H_\phi^{(306H)} \cos \psi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Підставляючи поля (1), (2) та компоненти  $E_\phi$  і  $H_\phi$ , які знаходимо з рів-

нянь Максвелла в граничні умови (3) одержимо однорідну систему лінійних алгебраїчних рівнянь 4-го порядку для амплітуд  $A, B, C, D$ . Нетривіальні рішення цієї системи можливі, якщо її детермінант дорівнює нулю. Рівність нулю детермінанта є дисперсійним рівнянням:

$$ka = \gamma a \cdot \operatorname{tg} \psi \sqrt{\frac{I_0(\gamma a) K_0(\gamma a)}{I_1(\gamma a) K_1(\gamma a)}} \quad (4)$$

Фазову швидкість і фазове сповільнення розраховуємо за формулами

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = c \frac{\omega}{c\beta} = c \frac{ka}{\beta a} = c \frac{ka}{\sqrt{(\gamma a)^2 + (ka)^2}}, \quad \frac{c}{v_\phi} = \frac{\beta a}{ka} = \sqrt{1 + \frac{(\gamma a)^2}{(ka)^2}}$$

Дисперсійне рівняння (4) разом з виразом для поперечного хвильового числа  $\gamma a = \sqrt{(\beta a)^2 - (ka)^2}$  дозволяють розрахувати дисперсійні характеристики азимутально однорідних хвиль в спіралі і визначити співвідношення між амплітудами  $A, B, C, D$ , що дозволяє розрахувати розподіл поля в спіралі і поза нею, зокрема, співвідношення, при яких буде досягтися однорідне поле. Розрахована залежність фазового сповільнення від параметра  $ka$  при декількох значеннях  $\psi$  наведена на рис. 3,

з якого видно, що при  $\psi=1.2$  маємо майже однорідне ЕМП, бо значення  $V_\phi$  близьке до  $c$ .

На рис. 4 наведена залежність параметрами  $ka$  від параметра  $\gamma a$  для декількох значень  $\psi$ . Ця залежність необхідна для того, щоб при відомому значенні параметра  $ka$  знайти значення параметра  $\gamma a$ .

Розраховано розподіл полів всередині спіралі і поза нею. На рис. 5 зображено розподіл квадрату поля (величини, яка в першому наближенні визначатиме розподіл температур в опромінюваному біооб'єкті) як функції радіуса. Радіус спіралі прийнято за одиницю; параметр  $\gamma a$  - 0,6; 0,8; 1,0.

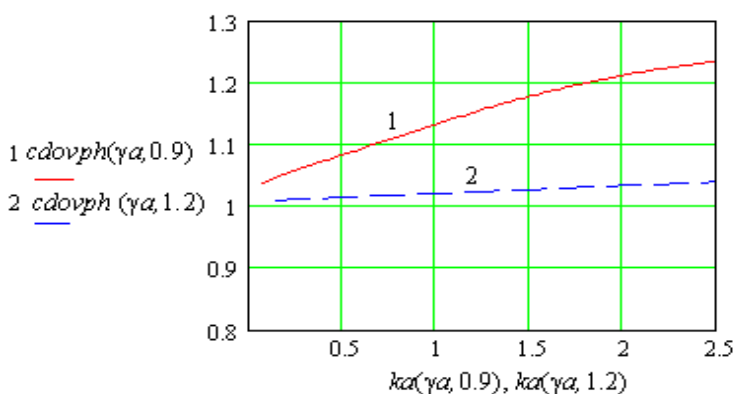


Рис. 3. Залежність фазового сповільнення від параметра  $ka$

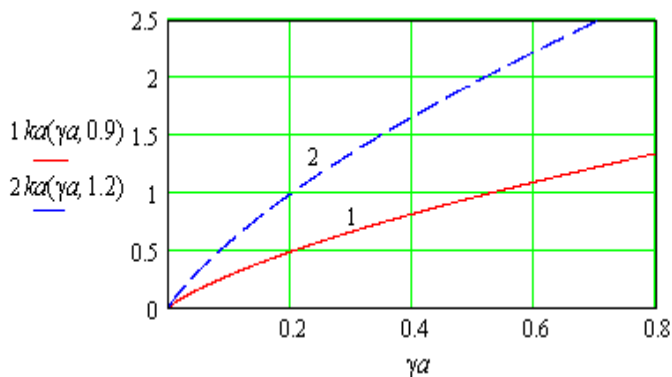


Рис. 4. Залежність параметра  $ka$  від параметра  $\gamma a$

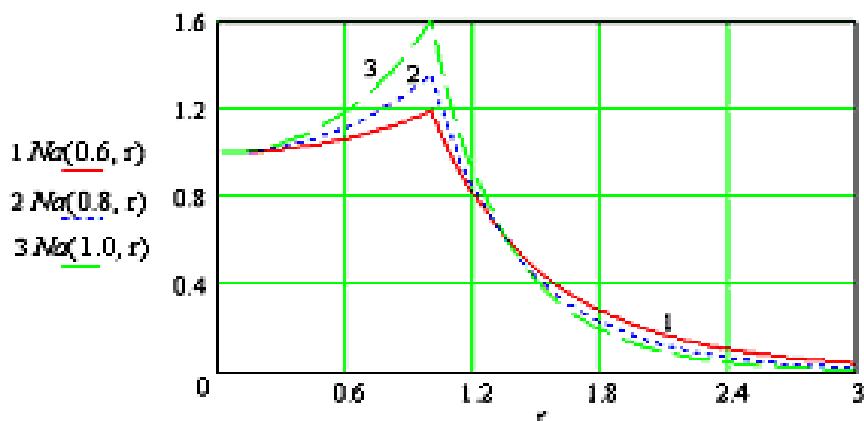


Рис. 5. Квадрат поля як функція радіусу

Отже, якщо припускається однорідність потоку потужності в середині спіралі на рівні 20%, то прийнятна крива 1. Якщо ж припускається менша однорідність поля, то можна взяти криву 2 або й криву 3. Як видно з рис. 5 поле поза спіраллю спадає тим швидше, чим менша однорідність поля всередині спіралі.

#### Висновки

Запропонована періодична структура для створення гіпертермічних аплікаторів дозволяє досягти в області нагрівання однорідний або близький до нього розподіл електромагнітного поля. Модель спіральньо-провідного циліндра підтверджує можливість побудови аплікаторів з достатньо однорідним полем всередині спіралі. Наведені розрахунки дозволяють обґрунтовано підійти до вибору розмірів спіралі і конструювання аплікатора. Спіральний аплікатор може бути як зовнішнім, так і інтерстиціальним. Отримані результати свідчать про перспективність продовження досліджень, з метою виявлення впливу на характеристики аплікатора діаметра екрану, параметрів середовища всередині спіралі і поза нею т.ін.

#### Література

1. Гельвич Э. А., Мазохин В. Н. Технические аспекты электромагнитной гипертермии в медицине // Биомедицинская радиоэлектроника.-1998.- №1.- с. 37-47.
2. Аксиально – симметричные периодические структуры и резонаторы / В. И. Найденко, Ф. Ф. Дубровка.– К.: Вища школа, 1985.-224 с.
3. Силин Р. А. Периодические волноводы. – М.: Фазис, 2002.- 440 с.
4. Ватсон Н. Теория бесселевых функций. – М.: Ил, 1949.- 798 с.

<p>Сергиенко А. В., Найденко В. И.  <b>СВЧ аплікатор для гипертермии на основе спиральной периодической структуры</b>                  Предложено использование периодических структур для создания апликаторов с однородным или близким к нему распределением электромагнитного поля. Результаты моделирования и числовые расчёты показывают перспективность таких апликаторов.</p>	<p>Sergienko A. V., Naydenko V. I.  <b>Microwave applicator for hyperthermia on the basis of spiral periodic structure</b>                  The use of periodic structures for creation of applicators with the homogeneous or near to him distributing of the electromagnetic field is offered. The given results of modeling of the offered structure and the numerical accounts show prospects of such applicators.</p>
--	--