

В.П. Манойлов, д.т.н., проф.
Д.С. Морозов, ст. викл.
В.В. Чухов, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

ВИПРОМІНЮВАЧ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ УСТАНОВОК ДІАТЕРМІЇ

Розглянуто конструкцію сучасних НВЧ-випромінювачів, що використовуються в діатермії. Проаналізовано основні їх недоліки. Запропоновано варіант конструкції НВЧ-випромінювача зі збільшеним коефіцієнтом спрямованої дії й зменшеним коефіцієнтом відбиття та довжиною випромінювача. Вдосконалення випромінювача досягнуто за допомогою використання в прямокутному хвилеводі діелектричних пластин, встановлених паралельно його бічним стінкам. Отримано рівняння для ефективної діелектричної проникності частково заповненого прямокутного хвилеводу, на основі якого створено випромінювач для установок діатермії. Наведено результати розрахунків різних конструкцій НВЧ-випромінювачів, в яких діелектричні пластини різняться товщиною, матеріалом і місцем розташування в хвилеводі. Результати розрахунків порівнюються з відповідними експериментальними даними і наводяться у вигляді графіків. Представлено результати випромінювання у вільний простір і опромінення різних ділянок тіла людини НВЧ-випромінювачем. Наведено основні параметри випромінювача.

Ключові слова: хвилевід; діелектрик; випромінювач.

Вступ. При поширенні електромагнітної хвилі у неідеальному діелектрику, яким є тканини людського організму, виникають втрати енергії, що супроводжуються виділенням тепла. На цьому фізіологічному явищі ґрунтується фізіотерапевтичний метод, що використовується для впливу НВЧ-тепла на тканини тіла людини. При цьому спрямований потік електромагнітної енергії створюється випромінювачем, що встановлюється безпосередньо перед частиною тіла, що опромінюється. Цей метод отримав широке використання в діапазоні дециметрових, а також сантиметрових хвиль [1, 2].

Метою цієї статті є аналіз недоліків існуючих установок діатермії та способів усунення цих недоліків.

Постановка проблеми. У дециметровому діапазоні довжин хвиль широко використовується установка для окремих частин тіла пацієнта, зокрема «Волна-2», що працює на довжині хвилі 12,6 см [1, 2]. Установка комплектується двома випромінювачами – видовженим і циліндричним. Видовжений випромінювач являє собою вкорочений півхвильовий диполь, розміщений над екраном, що має форму еліптичного циліндра. Диполь прикріплений до жорсткої коаксіальної лінії, що його живить та проходить через центр екрана й з'єднана з генератором. Розкрив випромінювача закритий діелектричною кришкою. Випромінювач створює потік енергії, що спрямований в протилежний від екрана бік, з максимальною інтенсивністю в його середній частині, яка рівномірно згасає до країв.

Циліндричний випромінювач складається з двох взаємно перпендикулярних півхвильових диполів, які закріплені над екраном конічної форми. Кінці диполя для зменшення їх розмірів загнуті під прямим кутом до екрану. Випромінювач створює вузький потік енергії, який спрямований вперед, з максимальною інтенсивністю в центрі. Для узгодження випромінювачів із хвильовим опором кабелю в жорсткій коаксіальній лінії розміщений чвертьхвильовий узгоджувачий трансформатор у вигляді центрального провідника лінії збільшеної товщини.

При розробці випромінювачів для діатермічних установок НВЧ діапазону зазвичай необхідно отримати вузьку діаграму направленості (ДН), високий ККД, малі габаритні розміри та його масу.

У процесі проектування випромінювачів виникає низка ускладнень. Зокрема, для підвищення коефіцієнта спрямованої дії (КСД) випромінювача часто доводиться збільшувати площу його розкриття, що призводить до росту перепаду опорів між окремими вузлами. У результаті збільшуються коефіцієнти відбиття (КВ) та втрати, знижується ККД. Для зменшення КВ необхідно збільшувати довжину випромінювача.

При цьому, в такому

випромінювачі утворюються хвилі вищих типів, що викликає розширення ДН і ріст бокових пелюсток.

Для усунення вказаних недоліків випромінювачів для діатермічних установок пропонується використати рупорну антену з діелектричним заповненням, яка є простою антеною, що має добру повторюваність при виготовленні і достатньо точний розрахунок електродинамічних параметрів [3, 4].

Для створення рупорного випромінювача з високими параметрами при його мінімальній довжині необхідно домогтися мінімального КВ і коефіцієнта перетворення (КП) основної хвилі в хвилі вищих типів. Такий випромінювач має формувати рівномірне поле при опроміненні плоских поверхонь і бути добре узгодженим з ними. В основу такого випромінювача покладено принцип, що запропоновано в роботі [5]. Рівномірне поле формується як електромагнітне поле ближньої зони випромінювання з прямокутного хвилеводу, частково заповненого діелектриком.

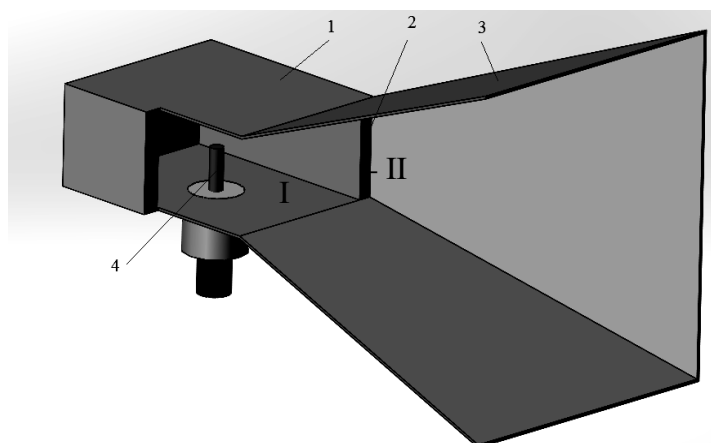


Рис. 1. Схема піромісального випромінювача для діатермії:
1 – прямокутний хвилевід; 2 – діелектричні прямокутні пластини;
3 – піромісальний рупор; 4 – коаксіальний збуджувач

Структура запропонованого випромінювача зображена на рисунку 1. В області I напруженість електричного поля основної хвилі H_{10} не залежить від координат x і y [5, 6]. На рисунку 2 показано розподіл поля в прямокутному частково заповненому хвилеводі.

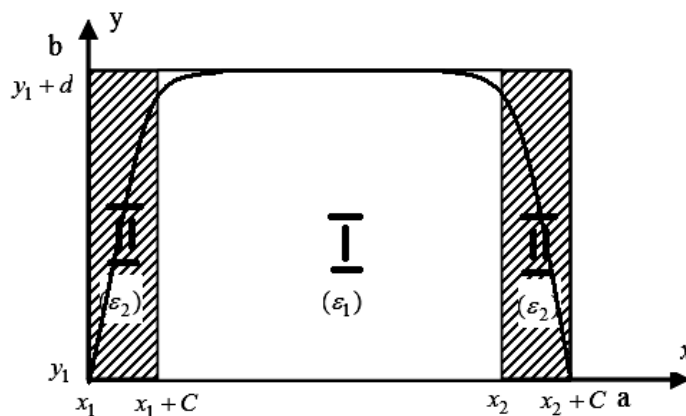


Рис. 2. Електромагнітне поле в частково заповненому хвилеводі

У зв'язку з цим можна розглянути дві групи питань. До першої належать проблеми обчислення електромагнітного поля в ближній і середній, по відношенню до випромінювача, зонах, для тканин з постійною діелектричною проникністю ϵ . До другої групи належать задачі, що пов'язані з обчисленням полів в середовищах, в яких ϵ змінюється внаслідок поглинання СВЧ енергії.

Обчислення електромагнітного поля в ближній і середній зонах випромінювача потребує точного визначення розподілу струмів на його апертурі або полів в його розкритті і становлять складну математичну задачу. Тому особливий інтерес являють ті задачі електродинаміки, для яких вдається знайти наближене рішення і оцінити вплив різноманітних факторів на розподіл поглинутої потужності в

середовищах. Для розв'язання нашої задачі можливо використовувати метод, викладений в роботах [7, 8].

Постановка завдання. Стала поширення електромагнітної хвилі у прямокутному хвилеводі має такий вигляд [9, 10]:

$$\gamma^2 = k^2 \varepsilon_r - \chi, \quad (1)$$

де $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число вільного простору; λ – довжина хвилі в повітрі; ε_r – відносна діелектрична проникність матеріалу, яким заповнений хвилевід; χ – поперечне хвильове число.

Оскільки $\gamma = \beta - i\alpha$ [10], то при малих втратах в хвилеводі можна наближено вважати, що $\gamma \approx \beta$ [11], а тоді отримуємо рівність:

$$\beta^2 = k^2 \varepsilon_r - \chi. \quad (2)$$

Як показано в роботах [7, 12], перший множник рівняння (1) можна представити як $k^2 \varepsilon_{ef}$, де ε_{ef} – ефективна діелектрична проникність шаруватої структури.

Вираз для ε_{ef} можна записати, використовуючи власні функції пусого хвилеводу [11]:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_{cp} - \varepsilon_{\perp}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{1}{S_{\perp}} \int_{S_{\perp}} \varepsilon_r(x, y) ds, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{1}{\varepsilon_{cp} S_{\perp}} \int_{S_{\perp}} \varepsilon_r(x, y) \vec{E}_{\alpha} \vec{E}'_{\alpha} ds, \quad (5)$$

де $\varepsilon_r(x, y)$ – розподіл ε_r у поперечному перерізі хвилеводу; $S_{\perp} = S_0 + S_d$ – площа поперечного перерізу хвилеводу, в якому знаходиться повітря і діелектрик; $\vec{E}_{\alpha}, \vec{E}'_{\alpha}$ – власні векторні функції прямокутного хвилеводу. В нашому випадку для основної хвилі H_{10} - $\vec{E}_{\alpha} = \vec{E}'_{\alpha}$.

Для частково заповненого хвилеводу в одній діелектричній пластині, яка розміщена біля вузької стінки хвилеводу (рис. 3.), маємо [12]:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left[1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + C)}{a} \sin \frac{\pi C}{a} \right] \frac{Cd}{ab}. \quad (6)$$

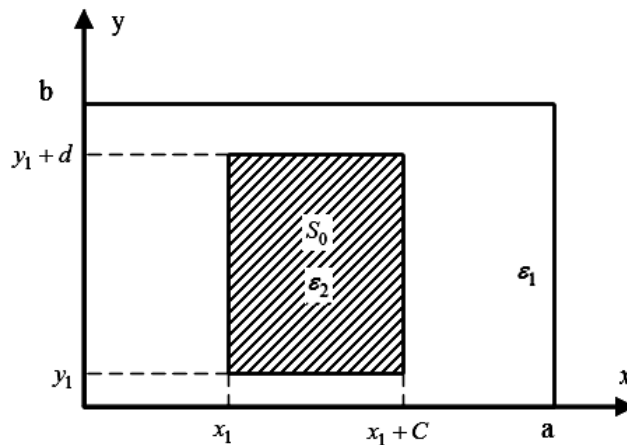


Рис. 3. Частково заповнений хвилевід з однією діелектричною пластинною

Якщо хвилевід заповнений повітрям, то $\varepsilon_1 = 1$, а діелектрик має проникність $\varepsilon_2 = \varepsilon_r$, тоді:

$$\varepsilon_{ef} = 1 + (\varepsilon_r - 1) \left[1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + C)}{a} \sin \frac{\pi C}{a} \right] \frac{Cd}{ab}. \quad (7)$$

Для спрощення викладок введемо коефіцієнт заповнення хвилеводу діелектриком:

$$\eta = \left[1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + C)}{a} \sin \frac{\pi C}{a} \right] \frac{Cd}{ab} = \left[1 - \cos \frac{\pi(2x_1 + C)}{a} \sin \pi t_x \right] t_x t_y, \quad (8)$$

де $t_x = \frac{c}{a}$; $t_y = \frac{d}{b}$.

Таким чином, вираз (7) запишеться як:

$$\varepsilon_{ef} = 1 + (\varepsilon_r - 1)\eta, \quad (9)$$

Звідси випливає, що для порожнього хвилеводу ($t_x = 0, t_y = 0$) $\eta = 0$ і $\varepsilon_{ef} = 0$, а для хвилеводу з діелектриком ($\varepsilon_r \neq 0, t_x = 1, t_y = 1$) $\eta = 1$ і $\varepsilon_{ef} = \varepsilon_r$, що підтверджує вираз (1).

Для частково заповненого хвилеводу з виразу (9):

$$0 < \eta \leq 1, \\ 1 < \varepsilon_{ef} < \varepsilon_r.$$

Згідно з [12], коефіцієнт уповільнення електромагнітної хвилі дорівнює:

$$m = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (10)$$

де Λ – довжина хвилі в лінії передачі, яка однозначно визначається фазовим коефіцієнтом:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (11)$$

Підставляючи (11) в (10), отримуємо:

$$m = \frac{\beta}{k}. \quad (12)$$

Звідси:

$$\beta = km. \quad (13)$$

З іншого боку, згідно з (2), маємо:

$$\beta^2 = k^2 \varepsilon_r - \chi^2 = k^2 \left[\varepsilon_r - \left(\frac{\chi}{k} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Порівнюючи вирази (13) і (14), отримуємо формулу для зв'язку між коефіцієнтами уповільнення m та діелектричною проникністю ε_r для частково заповненого хвилеводу:

$$m = \sqrt{\varepsilon_{ef} - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}, \quad (15)$$

тоді величина m буде знаходитись в наступних межах:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{\chi}{k} \right)^2} \leq m \leq \sqrt{\varepsilon_r - \left(\frac{\chi}{k} \right)^2}. \quad (16)$$

У випадку, коли пластини діелектрика розміщені коло бічних стінок прямокутних хвилеводів (рис. 2), виходячи за виразу (3), можна отримати наступний вираз для ε_{ef} :

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left[1 - \cos \frac{\pi(x_1 + x_2 + C)}{a} \cos \frac{\pi(x_1 - x_2)}{a} \sin \frac{C\pi t_x}{2} \right] t_x t_y, \quad (17)$$

де $t_x = \frac{2c}{a}$; $t_y = \frac{d}{b}$.

Якщо порівняти (17) і (9), отримаємо наступний вираз для коефіцієнта η :

$$\eta = \left(1 - \cos \frac{\pi(x_1 + x_2 + C)}{a} \cos \frac{\pi(x_1 - x_2)}{a} \sin \frac{C\pi t_x}{2} \right) t_x t_y \quad (18)$$

і тоді

$$\varepsilon_{ef} = 1 + (\varepsilon_r - 1)\eta. \quad (19)$$

Як приклад, на рисунках 4–6 наведено залежності $m(t)$ при різних значеннях ε_r , причому суцільні криві відповідають рішенню дисперсійних рівнянь (6), а пунктирні – наближеному рішенню рівняння (19).

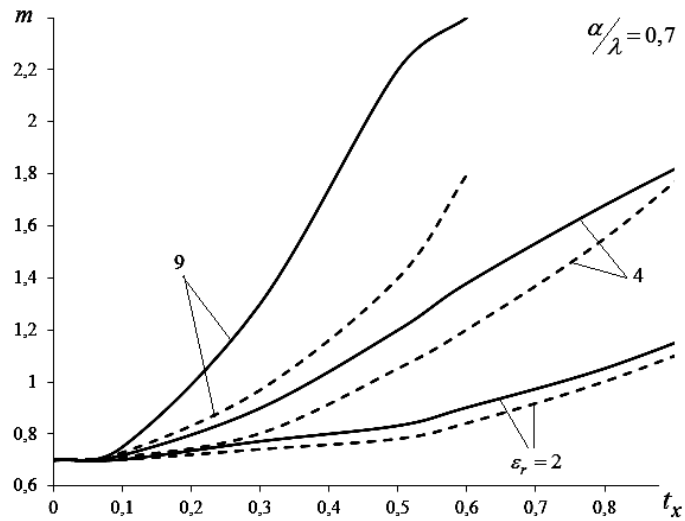


Рис. 4. Залежність $m(t)$ для двох пластин біля бічних стінок хвильоводу при $\alpha/\lambda = 0,7$

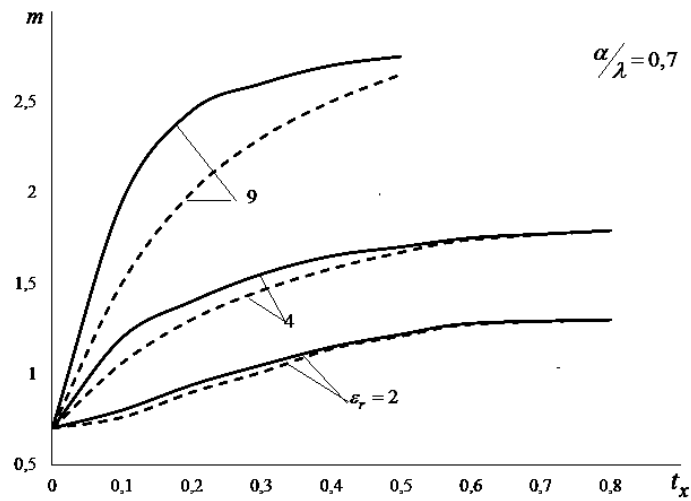


Рис. 5. Залежність $m(t)$ для однієї пластини в хвильоводі при $\alpha/\lambda = 0,7$

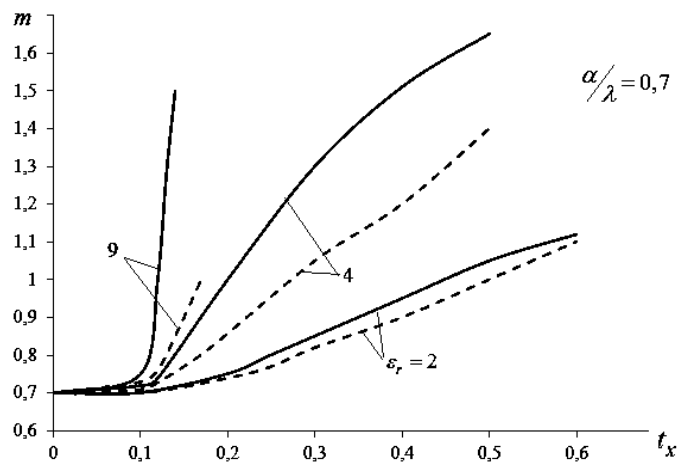


Рис. 6. Залежність $m(t)$ для однієї пластини в хвильоводі біля бічної стінки при $\alpha/\lambda = 0,7$

Як видно з наведених залежностей, (19) дає занижені результати, оскільки не враховується діелектричний ефект [5]. У [5] для визначення сталої поширення використано варіаційний метод і отримана формула повністю збігається з (19).

На рисунку 7 зображена залежність КСХН від частоти при опромінюванні різноманітних частин тіла людини.

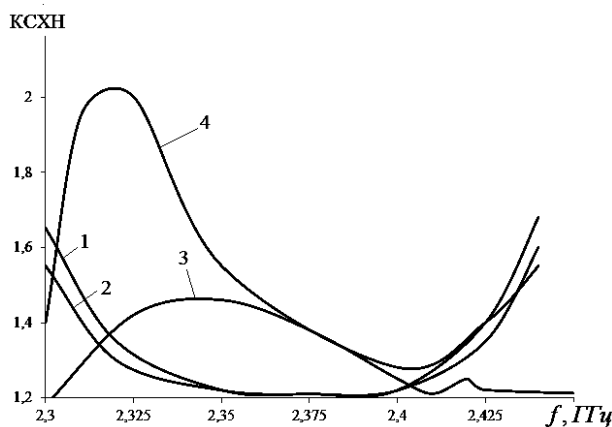


Рис. 7. Залежність КСХН при випромінюванні у вільний простір:
(1 – розрахунок; 2 – експеримент)
і КСХН при опроміненні передпліччя (крива 4) і плеча (крива 3)

Розроблений випромінювач має розміри 150x100 мм, довжина рупора з хвилеводом збудження 225 мм, коефіцієнт підсилення 24 дБ. Проведені вимірювання поля випромінювача показали, що рівномірне поле формується випромінювачем на частоті 2,37 ГГц.

Висновки. Таким чином, в даній статті запропоновано вдосконалення установки діатермії шляхом заміни діелектричного випромінювача на рупорний. Розроблено випромінювач для установки діатермії, що має малі розміри, масу і рівномірне поле випромінювання. Проведено математичне моделювання розробленої антени. Результати моделювання перевірені експериментально і корелюються з результатами експериментальних досліджень.

Запропонована конструкція рупорного випромінювача для діатермії дозволить збільшити ефективність лікування і покращити якість терапевтичних процедур.

Список використаної літератури:

1. Техника и методики физиотерапевтических процедур : справочник / под ред. В.М. Боголюбова. – Тверь : Пуб. медицина, 2002. – 408 с.
2. Лисенсон А.Р. Электромедицинская аппаратура / А.Р. Лисенсон. – М. : Медицина, 1981. – 344 с.
3. Марков Г.Т. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975. – 526 с.
4. Фрадин Н.З. Антенно-фидерные устройства / Н.З. Фрадин. – М. : Связь, 1977. – 440 с.
5. Егоров Ю.В. Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю.В. Егоров. – М. : Сов. радио, 1967. – 220 с.
6. Катилевич Б.Ю. Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры : справочник / Б.Ю. Катилевич, Е.Р. Трубахин. – М. : Радио и связь, 1990. – 272 с.
7. Почерняев В.Н. Постоянная распространения частично заполненного волновода / В.Н. Почерняев, Л.В. Скрытник // Изв. Вузov / Радиотехника. – 1968. – Т. 31, № 5. – С. 63–64.
8. Манойлов В.П. Розрахунок хвилеводів з частковим діелектричним заповненням / В.П. Манойлов, В.В. Чухов // Вісник НТУУ «КПІ» / Радиотехніка. Радіоапаратобудування. – 2006. – № 33. – С. 91–100.
9. Федоров Н.Н. Основы электродинамики / Н.Н. Федоров. – М. : Высшая школа, 1980. – 395 с.
10. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн / Б.М. Петров. – М. : Телеком, 2003. – 558 с.
11. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зарнов. – М. : Сов. радио, 1971. – 616 с.
12. Чухов В.В. Радіочастотні методи та засоби вимірювання параметрів хвилеводів із діелектричним заповненням : дис. ... канд. техн. наук / В.В. Чухов. – Вінниця : ВДТУ, 2007. – 175 с.

МАНОЙЛОВ В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- електродинаміка;
- прилади НВЧ та антени;
- біомедичні прилади та системи.

Тел.: (0412)41–39–63.

МОРОЗОВ Дмитро Сергійович – старший викладач кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- діелектрометрія;
- НВЧ методи дослідження складу речовини;
- об'ємні резонатори.

ЧУХОВ Владислав Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- радіовимірювання;
- пристрої НВЧ.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2015