

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ підпис ініціали, прізвище

“ ____ ” _____ 20__ року

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: **ЩІЛИННІ ВИПРОМІНЮВАЧІ ДЛЯ МІКРОХВИЛЬНОЇ
ГІПЕРТЕРМІЇ SLOT RADIATORS FOR MICROWAVE
HYPERTHERMIA**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РЕ-61
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка
освітньо-професійна програма «Фізична та біомедична
електроніка»

Олег Фоміченко.

Керівник
доктор фіз.-мат. наук,
професор

Сергій Берднік

Консультант
к.ф.-м.н., ст.н.с.

Сергій Берднік

2023 рік

Зміст

Вступ.....	3
Розділ 1 Теоретичні основи роботи щілинних випромінювачів.....	5
1.1 Фізичні основи роботи щілинних випромінювачів.....	5
1.2 Типи щілинних випромінювачів.....	8
1.3 Випромінювання систем хвилевідно-щілинних випромінювачів у біологічне середовище.....	10
Розділ 2 Розробка моделі щілинного випромінювача	12
2.1 Метод електромагнітного моделювання.....	12
2.2. Постановка, параметри й спосіб вирішення задачі.....	14
2.3. Розподіл інтенсивності електромагнітного поля в ближній зоні випромінювання хвилевідно-щілинних випромінювачів кругової поляризації.....	19
2.4. Розподіл ближнього поля в біологічному середовищі систем хвилевідно-щілинних випромінювачів на основі взаємно ортогональних щілин й електрично довгих щілин	27
Висновки.....	36
Список використаних джерел.....	39

Вступ

У сучасній клінічній медицині широко застосовується електромагнітне випромінювання надвисокочастотного (НВЧ) діапазону для цілей мікрохвильової гіпертермії, що дозволяє створювати глибоке кероване нагрівання різних тканин і органів живого організму, що знаходяться як поблизу поверхні, так й усередині нього. Залежно від розташування областей, що прогріваються, НВЧ енергія може підводитися через зовнішні випромінювачі-аплікатори або за допомогою антен-зондів, що вводять безпосередньо в організм. Серед вимог, що висувуються до випромінювачів для потреб НВЧ гіпертермії, основними є такі: забезпечення глибокого нагрівання з можливістю фокусування випромінюваного поля і його сканування, а також рівномірного розподілу температурного поля залежно від типу й структури тканин, що прогріваються; гарне узгодження з живильним трактом; малі геометричні розміри й вага аплікаторів і зондів.

Мікрохвильова гіпертермія (МГТ) - це метод лікування, при якому використовується мікрохвильове випромінювання для підвищення температури тканини в організмі. МГТ використовується для лікування різних захворювань, таких як рак, ракові пухлини, артрити та інші.

Щілинні випромінювачі - це один з типів мікрохвильових випромінювачів, які використовуються в МГТ. Щілинні випромінювачі мають ряд переваг, які роблять їх придатними для використання в МГТ, зокрема:

Хвилевідно-щілинні випромінювачі та їх системи мають широкі можливості для формування різних просторових розподілів полів у ближній зоні випромінювача при заданих електрофізичних параметрах навколишнього середовища, що може бути використано при створенні медичних аплікаторів для мікрохвильової гіпертермії на основі таких випромінювачів. Зокрема, це показано в нашій роботі [2] при дослідженні

електричного поля випромінювання в матеріальне середовище системи нерезонансних близько розташованих поперечних щілин у широкій стінці прямокутного хвилеводу. Певним вибором геометричних параметрів системи (зокрема, довжини кожної із щілин) можна досягти необхідної інтенсивності електромагнітного поля в одній або декількох ближніх просторових областях антени.

Незважаючи на те, що останнім часом у зв'язку з бурхливим прогресом в області комп'ютерних технологій особливу роль набули методи чисельного моделювання, такі як метод скінченних елементів (FEM) і метод скінченних різниць у часовій області (FDTD), що дозволяють досить ефективно вирішувати задачі з різноманітними початковими й граничними умовами, їхнє застосування для вирішення задач про електрично довгі щілини й багатoelementні щілинні системи з великою кількістю випромінювачів ускладнено, а іноді й практично неможливо у зв'язку з великими вимогами до обчислювальних потужностей й об'ємів пам'яті, виникають також складності з перевіркою отриманих результатів, їхньою фізичною інтерпретацією, узагальненням і передбаченням основних закономірностей фізичних процесів.

Мета дипломної роботи.

Мета дипломної роботи полягає в дослідженні характеристик щілинних випромінювачів для МГТ. У роботі будуть розглянуті такі питання:

Теоретичні основи роботи щілинних випромінювачів;

Розробка моделі щілинного випромінювача.

Структура дипломної роботи складається: з вступу, двох розділів, висновку та списку використаних джерел.

Розділ 1 Теоретичні основи роботи щілинних випромінювачів

1.1 Фізичні основи роботи щілинних випромінювачів

Щілинні випромінювачі - це пристрої, які перетворюють електричну енергію в електромагнітне випромінювання. Вони широко використовуються в різних областях, таких як радіолокація, радіоастрономія, лазерна техніка та ін.

Фізична основа роботи щілинних випромінювачів полягає в тому, що коли через щілину проходить електричний струм, то в щілині виникає електромагнітне поле. Це поле поширюється в просторі у вигляді хвилі.

Розміри щілини і частота електричного струму визначають властивості випромінювання, що випускається щілинним випромінювачем[1, с.12].

Основні параметри щілинних випромінювачів.

Основними параметрами щілинних випромінювачів є:

Ширина щілини - визначає довжину хвилі випромінювання.

Довжина щілини - визначає ширину смуги пропускання випромінювання.

Кут розсіювання випромінювання - визначає кут, в якому випромінюється електромагнітна хвиля.

Типи щілинних випромінювачів.

Існує кілька типів щілинних випромінювачів, які відрізняються формою щілини і способом її виготовлення.

Плоскі щілинні випромінювачі - мають плоску щілину.

Круглі щілинні випромінювачі - мають круглу щілину.

Аналог щілинних випромінювачів - мають щілину, яка утворена виступами на поверхні металу.

Переваги і недоліки щілинних випромінювачів.

До переваг щілинних випромінювачів відносяться:

Простота конструкції.

Висока ефективність.

Широкий діапазон частот.

До недоліків щілинних випромінювачів відносяться:

Необхідність використання високоякісних матеріалів.

Чутливість до механічних впливів.

Перспективи розвитку щілинних випромінювачів[2, с.22].

Розвиток щілинних випромінювачів спрямований на підвищення їх ефективності, зменшення розмірів і вартості, а також на розширення діапазону частот.

Одним з перспективних напрямків розвитку щілинних випромінювачів є використання нанотехнологій. Нанотехнології дозволяють створювати щілинні випромінювачі з високою ефективністю і малими розмірами.

Щілинний випромінювач - це пристрій, який перетворює електричну енергію в електромагнітне випромінювання. Він складається з двох пластин, між якими знаходиться щілина. На пластини подається електричне поле, яке створює в щілині електромагнітне поле. Це поле випромінюється в навколишнє середовище.

Фізичні основи роботи щілинного випромінювача можна пояснити на основі хвильової теорії світла. Електромагнітне поле, що створюється електричним полем на пластинах, є електромагнітною хвилею. Ця хвиля поширюється в щілині, а потім випромінюється в навколишнє середовище

Ширина щілини визначає довжину хвилі випромінювання. Чим вже щілина, тим коротша довжина хвилі. Це пов'язано з тим, що електромагнітна хвиля, що поширюється в щілині, відбивається від її країв. Відбиття хвилі призводить до її розкладання на хвилі з різними довжинами. Чим уже щілина, тим більше цих хвиль, і тим коротша довжина найкоротшої з них.

Інтенсивність випромінювання також залежить від ширини щілини. Чим уже щілина, тим більша інтенсивність випромінювання. Це пов'язано з тим, що більш вузька щілина дозволяє випромінювати коротші хвилі, які мають більшу інтенсивність.

Щілинні випромінювачі широко використовуються в різних областях, таких як:

Оптоелектроніка.

Радіотехніка.

Світлодіодна техніка[3, с.40].

В оптоелектроніці щілинні випромінювачі використовуються для створення лазерів, світлодіодів, а також для генерації електромагнітного випромінювання в інших діапазонах частот.

В радіотехніці щілинні випромінювачі використовуються для створення антен, які випромінюють електромагнітне випромінювання в радіочастотному діапазоні.

В світлодіодній техніці щілинні випромінювачі використовуються для створення світлодіодів, які випромінюють електромагнітне випромінювання в видимому діапазоні частот.

Щілинні випромінювачі мають ряд переваг перед іншими типами випромінювачів. Вони мають високу інтенсивність випромінювання, малі розміри і можуть генерувати електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні частот.

Щілинний випромінювач - це пристрій, який генерує електромагнітні хвилі в результаті коливань струму в щілині. Принцип роботи щілинного випромінювача полягає в тому, що електромагнітні хвилі випромінюються внаслідок резонансу між струмом в щілині і електромагнітним полем

Щілинний випромінювач складається з двох плоских металевих пластин, розділених зазором, який називається щілиною. На пластинах нанесені провідні смуги, які утворюють електричний контур. Коли в контурі протікає струм, в щілині виникає електромагнітне поле.

Резонанс між струмом в щілині і електромагнітним полем відбувається, коли частота струму дорівнює частоті електромагнітних хвиль, що випромінюються щілиною. Частота електромагнітних хвиль, що

випромінюються щілиною, визначається шириною щілини, відстанню між пластинами і довжиною хвилі електромагнітних хвиль.

Щілинний випромінювач може випромінювати електромагнітні хвилі в будь-якому діапазоні частот, від радіохвиль до інфрачервоного випромінювання.

1.2 Типи щілинних випромінювачів

Щілинні випромінювачі можна класифікувати за різними ознаками, зокрема:

За діапазоном частот: радіохвильові, мікрохвильові, інфрачервоні, видимі, ультрафіолетові, рентгенівські.

За формою щілини: прямокутні, круглі, овальні, еліптичні.

За способом виготовлення: механічні, електрохімічні, фотолітографічні.

Радіохвильові щілинні випромінювачі.

Радіохвильові щілинні випромінювачі застосовуються в радіотехніці для генерації радіохвиль. Вони мають ширину щілини від декількох мікрометрів до декількох сантиметрів[5, с.58].

Мікрохвильові щілинні випромінювачі.

Мікрохвильові щілинні випромінювачі застосовуються в мікрохвильовій техніці для генерації мікрохвиль. Вони мають ширину щілини від декількох нанометрів до декількох мікрометрів.

Інфрачервоні щілинні випромінювачі.

Інфрачервоні щілинні випромінювачі застосовуються в оптиці для генерації інфрачервоного випромінювання. Вони мають ширину щілини від декількох мікрометрів до декількох міліметрів.

Видимі щілинні випромінювачі.

Видимі щілинні випромінювачі застосовуються в оптиці для генерації видимого випромінювання. Вони мають ширину щілини від декількох мікрометрів до декількох міліметрів.

Ультрафіолетові щілинні випромінювачі.

Ультрафіолетові щілинні випромінювачі застосовуються в оптиці для генерації ультрафіолетового випромінювання. Вони мають ширину щілини від декількох нанометрів до декількох мікрометрів.

Рентгенівські щілинні випромінювачі[6, с.72].

Рентгенівські щілинні випромінювачі застосовуються в рентгенографії для генерації рентгенівського випромінювання. Вони мають ширину щілини від декількох нанометрів до декількох мікрометрів

Щілинні випромінювачі з прямокутною щілиною

Щілинні випромінювачі з прямокутною щілиною є найпростішим і найпоширенішим типом щілинних випромінювачів. Вони мають високу ефективність випромінювання і широкий діапазон частот.

Щілинні випромінювачі з круглою щілиною.

Щілинні випромінювачі з круглою щілиною мають більш вузький діапазон частот, ніж щілинні випромінювачі з прямокутною щілиною. Однак, вони мають більш високу інтенсивність випромінювання.

Щілинні випромінювачі з овальною або еліптичною щілиною.

Щілинні випромінювачі з овальною або еліптичною щілиною мають спрямований характер випромінювання. Вони застосовуються для створення вузьких променів електромагнітних хвиль.

Механічні щілинні випромінювачі.

Механічні щілинні випромінювачі виготовляються шляхом механічного прорізання щілини в металевій пластині. Вони мають високу точність виготовлення, але складні в виробництві.

Електрохімічні щілинні випромінювачі[7, с.82].

Електрохімічні щілинні випромінювачі виготовляються шляхом електрохімічного травлення металевої пластини. Вони мають меншу точність

виготовлення, ніж механічні щілинні випромінювачі, але прості в виробництві.

Фотолітографічні щілинні випромінювачі.

Фотолітографічні щілинні випромінювачі виготовляються шляхом фотолітографічного процесу. Вони мають найвищу точність виготовлення, але складні в виробництві.

1.3 Випромінювання систем хвилевідно-щілинних випромінювачів у біологічне середовище

Хвилевідно-щілинні випромінювачі та їх системи мають широкі можливості для формування різних просторових розподілів полів у ближній зоні випромінювача при заданих електрофізичних параметрах навколишнього середовища, що може бути використано при створенні медичних аплікаторів для мікрохвильової гіпертермії на основі таких випромінювачів. Зокрема, це показано в роботі при дослідженні електричного поля випромінювання в матеріальне середовище системи нерезонансних близько розташованих поперечних щілин у широкій стінці прямокутного хвилеводу. Певним вибором геометричних параметрів системи (зокрема, довжини кожної із щілин) можна досягти необхідної інтенсивності електромагнітного поля в одній або декількох ближніх просторових областях антени.

Незважаючи на те, що останнім часом у зв'язку з бурхливим прогресом в області комп'ютерних технологій особливу роль набули методи чисельного моделювання, такі як метод скінченних елементів (FEM) і метод скінченних різниць у часовій області (FDTD), що дозволяють досить ефективно вирішувати задачі з різноманітними початковими й граничними умовами, їхнє застосування для вирішення задач про електрично довгі щілини й багатoeлементні щілинні системи з великою кількістю випромінювачів ускладнено, а іноді й практично неможливо у зв'язку з

великими вимогами до обчислювальних потужностей й об'ємів пам'яті, виникають також складності з перевіркою отриманих результатів, їхньою фізичною інтерпретацією, узагальненням і передбаченням основних закономірностей фізичних процесів.

До найбільш ефективних і строгих методів розрахунку систем щілинних випромінювачів довільної довжини варто віднести метод інтегральних рівнянь, метод моментів, метод Гальоркіна (або узагальнений метод наведених магніторушійних сил [14]). Межі застосовності цих чисельних методів до розрахунку щілинних випромінювачів досить широкі. Суть їх, загалом, полягає в тому, що на підставі граничних умов для електричного поля (магнітного струму) у щілині й умов неперервності тангенціальних складових магнітного поля на відповідній границі щілина-електродинамічний об'єм, крайова задача зводиться до розв'язання системи інтегральних рівнянь, що вирішується або безпосередньо чисельними методами, або зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь [14, 15]. Найбільш універсальним методом розв'язання інтегральних рівнянь є метод моментів, у якому невідома функція розподілу поля в щілині представляється у вигляді лінійної комбінації заданих, так званих, базисних функцій, що є повною системою функцій в обраному функціональному просторі, з невідомими коефіцієнтами, а доданки, які визначаються полями, що збуджують щілину, також розкладаються по системі лінійно незалежних вагових або пробних функцій.

Вирішення задачі про випромінювання системи щілин, укритої з боку зовнішнього півпростору багатошаровим середовищем із втратами, що модулює біологічний об'єкт, з різними значеннями діелектричної проникності в прошарках математично значно складніше, ніж випромінювання в півпростір, заповнений однорідним діелектриком із втратами. Крім того, випромінювання з-під діелектричного укриття товщиною 0.5λ (λ – довжина хвилі, що розповсюджується в просторі, заповненому діелектриком із проникністю ϵ) не буде відрізнятися від випадку

випромінювання щілини в простір, повністю заповнений діелектриком (поверхневі хвилі, що виникають на границях діелектричних прошарків). У цьому зв'язку, поряд з випромінюванням у багатошарове середовище із втратами, розглянуте зовнішнє укріття хвилевідно-щілинних випромінювачів у вигляді півпростору, заповненого діелектриком із втратами з діелектричною проникністю, що відповідає деяким тканинам людини. Досліджено ближні поля систем щілинних випромінювачів у даних матеріальних середовищах з метою з'ясування можливості використання таких випромінюючих систем як елементів аплікаторів для застосування в гіпертермії.

Розділ 2 Розробка моделі щілинного випромінювача

2.1 Метод електромагнітного моделювання

Метод електромагнітного моделювання - це метод розрахунку характеристик електромагнітних систем, що заснований на математичному моделюванні електромагнітних полів.

Основні принципи методу електромагнітного моделювання

Основні принципи методу електромагнітного моделювання можна сформулювати наступним чином:

Електромагнітна система представляється у вигляді математичної моделі.

Характеристики електромагнітних полів у моделі обчислюються за допомогою методів математичної фізики.

Результати розрахунків переносяться з моделі на реальну систему.

Етапи методу електромагнітного моделювання.

Метод електромагнітного моделювання можна розділити на наступні етапи:

Формулювання математичної моделі.

Розв'язання математичних рівнянь.

Аналіз результатів розрахунків.

Формулювання математичної моделі[11, с.132].

На першому етапі методу електромагнітного моделювання необхідно сформулювати математичну модель електромагнітної системи. Математична модель повинна містити опис геометричної структури системи, а також законів електромагнітного поля в системі.

Розв'язання математичних рівнянь.

На другому етапі методу електромагнітного моделювання необхідно вирішити математичні рівняння, що описують електромагнітні поля в моделі. Для цього можна використовувати різні методи математичної фізики, наприклад, методи скінченних елементів, методи скінченних інтегралів, методи граничних елементів.

Аналіз результатів розрахунків.

На третьому етапі методу електромагнітного моделювання необхідно проаналізувати результати розрахунків. Для цього можна використовувати різні методи аналізу, наприклад, методи статистичної обробки даних, методи теорії прийняття рішень.

Метод електромагнітного моделювання є потужним інструментом для дослідження електромагнітних систем. Він дозволяє отримувати точні результати розрахунків, які можуть бути використані для розробки нових електромагнітних пристроїв.

Розглянуті аналітичні й числено-аналітичні методи електродинамічно строгого рішення задач по визначенню характеристик електромагнітного поля, випромінюваного електричними (у тому числі імпедансними) або магнітними вібраторами розкривають можливості й перспективи при побудові математичних моделей по визначенню просторово-енергетичних, поляризаційних, частотних і часових характеристик електромагнітного поля, створюваного такими випромінювачами (або системою випромінювачів) у біологічному середовищі.

Для середовищ із втратами були використані матеріальні характеристики деяких біологічних середовищ, наприклад, м'язової й жирової тканин людини. Було показано, що для системи збуджуваних синфазно вібраторів з різними величиною й типом поверхневого імпедансу (що залежить від електрофізичних параметрів середовища) можлива реалізація поля випромінювання кругової (еліптичної) поляризації, при якому розподіл поля в ближній зоні системи виявляється більш рівномірним, чим при синфазному збудженні однакових випромінювачів. Таку поляризацію електромагнітного поля також можна одержати для системи схрещених однакових ідеально провідних вібраторів, у яких різниця фаз збудження становить 90° [9]. Тому було висловлене припущення про можливість використання таких випромінюючих систем в якості елементів аплікаторів для застосування в гіпертермії.

У дійсності реальні біологічні об'єкти відрізняються від розглянутих, по-перше багат шаровою структурою біологічних тканин, а по-друге - наявністю границь між шарами з різними матеріальними параметрами. В [10] розглянута задача про нормальне падіння плоскої хвилі на модель біологічного об'єкта. Електромагнітні поля в цьому випадку мають лише компоненти, паралельні границям між різними середовищами. На практиці для медичних цілей застосовуються випромінювачі кінцевих розмірів, а об'єкти опромінення перебувають у їхній ближній зоні випромінювання, у якій вектори електромагнітних полів мають всі просторові компоненти. Це значно ускладнює побудову аналітичного рішення про проникнення електромагнітного поля в біологічні об'єкти.

2.2. Постановка, параметри й спосіб вирішення задачі

Розглянемо систему щільних випромінювачів, прорізаних в широкій стінці товщиною h прямокутного хвильоводу з поперечним перерізом $a \times b$ (рис. 2.1), що випромінює в матеріальне середовище із втратами, яке

характеризується комплексною діелектричною проникністю $\epsilon^{\text{ext}} = \epsilon' - i\epsilon''$. Зв'яжемо із хвилеводом декартову систему координат x, y, z . Геометричні розміри щілин можуть бути різними. Запровадимо нумерацію щілин і позначимо через $2L_n$ і d_n довжину й ширину щілини з номером n ; z_n і x_n – відповідні координати центра щілини в широкій стінці хвилеводу. Хвильовід збуджується як в одномодовому, так й у багатомодовому режимах.

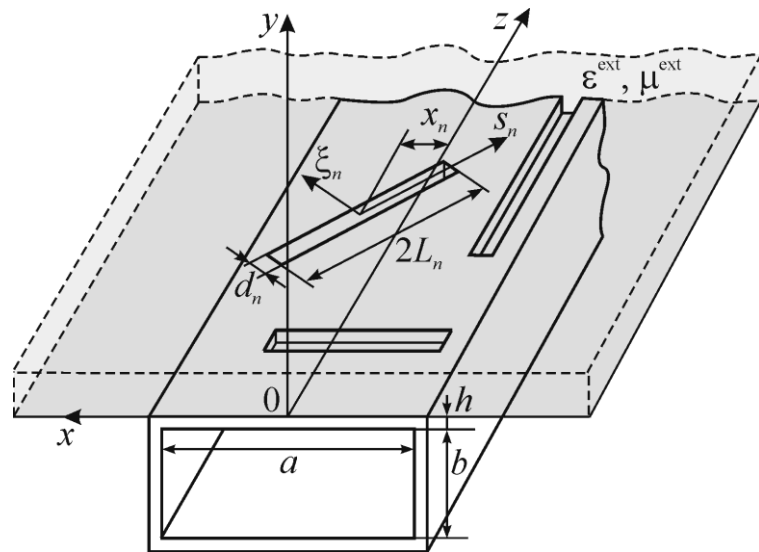


Рисунок 2.1. Геометрія задачі й прийняті позначення.

Урахування товщини стінки хвилеводу в задачі про систему щілин зводиться до вирішення задачі про зв'язок трьох електродинамічних об'ємів: “in” (об'єм хвилеводу), “v” (порожнина щілини) і “ext” (зовнішній півпростір) для кожної із щілин системи. На поверхнях щілин, звернених відповідно до внутрішнього “in” і зовнішнього “ext” об'ємів, потрібне виконання умови неперервності тангенціальних складових магнітного поля. У результаті одержуємо систему функціональних рівнянь для визначення дотичних складових електричних полів на поверхнях щілин. Умови неперервності тангенціальних складових магнітного поля $\vec{H}$ на поверхнях щілин $\zeta_{m'}$ й ζ_m , звернених відповідно до внутрішнього й зовнішнього об'ємів приймають вигляд:

$$\text{на } \zeta_{m'} : \sum_{n'=1}^N \vec{H}_{\tau}^{\text{in}}(\vec{e}_{\zeta_{n'}}) + \vec{H}_{0\tau}^{\text{in}} = \vec{H}_{\tau}^{\text{v}}(\vec{e}_{\zeta_{m'}}) + \vec{H}_{\tau}^{\text{v}}(\vec{e}_{\zeta_m}),$$

$$\text{на } \zeta_m : \vec{H}_{\tau}^{\text{v}}(\vec{e}_{\zeta_{m'}}) + \vec{H}_{\tau}^{\text{v}}(\vec{e}_{\zeta_m}) = \sum_{n=1}^N \vec{H}_{\tau}^{\text{ext}}(\vec{e}_{\zeta_n}),$$

112(.)

де індекси m' й n' відповідають нумерації поверхонь щілин з боку об'єму “in” і приймають значення від 1 до N кожний; m, n відповідають нумерації поверхонь цих же щілин з боку об'єму “ext” і також приймають значення від 1 до N ; $\vec{e}_{\zeta_{m'}}, \vec{e}_{\zeta_{n'}}, \vec{e}_{\zeta_m}, \vec{e}_{\zeta_n}$ – електричні поля, що наводяться відповідно на поверхнях щілин $\zeta_{m'}, \zeta_{n'}$ (з боку об'єму “in”) і ζ_m, ζ_n (з боку об'єму “ext”) і які є вторинними джерелами електромагнітного поля в об'ємах “in”, “ext”, “v”. $\vec{H}_{\tau}^{\text{in}}(\vec{e}_{\zeta_{n'}}), \vec{H}_{\tau}^{\text{ext}}(\vec{e}_{\zeta_n}), \vec{H}_{\tau}^{\text{v}}(\vec{e}_{\zeta_{m'}}), \vec{H}_{\tau}^{\text{v}}(\vec{e}_{\zeta_m})$ – тангенціальні складові магнітного поля, що збуджується дотичними складовими електричних полів $\vec{e}_{\zeta_{m'}}, \vec{e}_{\zeta_{n'}}, \vec{e}_{\zeta_m}, \vec{e}_{\zeta_n}$ на відповідних поверхнях щілин в об'ємах “in”, “ext” й “v”, $\vec{H}_{0\tau}^{\text{in}}$ – первинне магнітне поле, що збуджує щілину.

Розв'язання системи функціональних рівнянь 12 для визначення законів розподілу дотичних складових електричних полів $\vec{e}_{\zeta_{n'}}, \vec{e}_{\zeta_n}$ на внутрішній і зовнішній поверхнях щілин у строгій електродинамічній постановці є досить складним завданням. Найбільш простим і зручним методом вирішення інтегро-диференціальних рівнянь, обумовлених 12, є метод Гальоркіна, коли шукані векторні функції $\vec{e}_{\zeta_{n'}}, \vec{e}_{\zeta_n}$ апроксимуються лінійними комбінаціями координатних базисних функцій:

$$\vec{e}_{\zeta_{n'(n)}} = \sum_{q=1}^Q V_{qn'(n)} \vec{e}_{qn'(n)} \quad 324(.)$$

де $V_{qn'(n)}$ – комплексні амплітудні коефіцієнти, що підлягають визначенню; $\vec{e}_{qn'(n)}$ – задані на поверхнях щілин, дотичні до них, лінійно незалежні векторні функції, що задовольняють на контурах щілин крайовим умовам. У випадку вузьких щілин ($d_n / (2L_n) \ll 1, d_n / \lambda \ll 1$) припускаємо, що тангенціальні складові електричного поля на поверхнях щілин мають лише

одну компоненту поля, спрямовану поперек щілини. Тоді векторні функції $\vec{e}_{qn'(n)}$ в системі координат, зв'язаній із щілиною з номером $n'(n)$, коли початок системи координат збігається із центром щілини (рис. 2.1), можна представити в наступному вигляді:

$$\vec{e}_{qn'(n)} = \vec{\xi}_{n'(n)}^0 \frac{1}{d_{n'(n)}} \sin \frac{q\pi(s_{n'(n)} + L_{n'(n)})}{2L_{n'(n)}} \quad 536(.)$$

При такому виборі власних функцій коефіцієнти $V_{qn'(n)}$ набувають сенсу амплітуд напруг відповідних просторових гармонік поля у щілині.

Застосування процедури методу Гальоркіна (моментів) до системи рівнянь 12 приводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих амплітуд гармонік $V_{qn'(n)}$:

$$\begin{aligned} \sum_{n'=1}^N \sum_{q=1}^Q V_{qn'} \left(Y_{pq,m'n'}^{\text{in}} + Y_{pq,m'n'}^{\text{v}} \delta_{pq} \delta_{m'n'} \right) + \sum_{q=1}^Q V_{qm} Y_{pq,m'm}^{\text{v}} \delta_{pq} &= F_{pm}^{\text{in}}, \\ m' &= 1, 2, 3, \dots, N, \quad p = 1, 2, 3, \dots, Q; \\ \sum_{q=1}^Q V_{qm'} Y_{pq,mm'}^{\text{v}} \delta_{pq} + \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^Q V_{qn} \left(Y_{pq,mn}^{\text{ext}} + Y_{pq,mn}^{\text{v}} \delta_{pq} \delta_{mn} \right) &= 0, \\ m &= 1, 2, 3, \dots, N, \end{aligned} \quad 748(.)$$

де δ_{pq} - символ Кронекера. Матричні елементи СЛАР 48 є комбінаціями провідностей $Y_{pq,m'(m')n'(n')}^{\text{in(v,ext)}}$. Коли $m' = n'$ ($m = n$) — це власні провідності щілини, а при $m' \neq n'$ ($m \neq n$) — взаємні часткові провідності щілин $\zeta_{m'(m)}$ й $\zeta_{n'(n)}$ й обумовлені парціальними функціями розподілу поля на щілинах $\vec{e}_{pm'(m)}$ й $\vec{e}_{qn'(n)}$ у кожній з областей “in”, “v” “ext”. Провідності $Y_{pq,m'(m')n'(n')}^{\text{in(v,ext)}}$ визначаються шляхом інтегрування по площі щілин:

$$Y_{pq,m'(m')n'(n')}^{\text{in(v,ext)}} = \int_{\zeta_{m'(m)}} \left[\vec{e}_{pm'(m)}, \vec{H}^{\text{in(v,ext)}} \left(\vec{e}_{qn'(n)} \right) \right] \vec{n}^{\text{in(v,ext)}} d\zeta, \quad 9510(.)$$

де $\vec{n}^{\text{in},(\text{v},\text{ext})}$ – орти нормалей до поверхонь інтегрування, звернені, відповідно, усередину цих областей.

Права частина системи 48 сформована парціальними магніторухливими силами $F_{pm'}^{\text{in}(\text{ext})}$:

$$F_{pm'}^{\text{in}} = \int_{\zeta_{m'}} \left[\vec{e}_{pm'} \vec{H}_{0\tau}^{\text{in}} \right] \vec{n}^{\text{ext}} d\zeta \quad . \quad 11612(.)$$

Магнітне поле $\vec{H}^{\text{in},(\text{v},\text{ext})}(\vec{e}_{qn'(n)})$ в кожному з об'ємів може бути визначене за допомогою магнітних тензорних функцій Гріна $\hat{G}^{\text{in},(\text{v},\text{ext})}$ для векторного потенціалу:

$$\vec{H}^{\text{in}(\text{v},\text{ext})}(\vec{e}_{qn'(n)}) = \frac{1}{4\pi i \omega \mu_a} (\text{grad div} + k^2) \int_{\zeta_{n'(n)}} \left[\vec{e}_{qn'(n)}, \vec{n}^{\text{in},(\text{v},\text{ext})} \right] \hat{G}^{\text{in},(\text{v},\text{ext})}(r/r') d\zeta$$

Розв'язання системи рівнянь 48 дозволяє визначити поля $\vec{e}_{\zeta_{n'}}$ й $\vec{e}_{\zeta_n}$, а отже й електродинамічні характеристики щілинного випромінювача: коефіцієнти випромінювання й відбиття, діаграму спрямованості, коефіцієнт спрямованої дії, розподіл електромагнітного поля випромінювання та ін.

У припущенні, що хвилевід збуджується хвилею одиничної потужності, коефіцієнти випромінювання й відбиття можуть бути визначені за формулами:

$$|S_{\Sigma}|^2 = \frac{1}{2} \text{Re} \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^Q \sum_{q=1}^Q V_{pn} V_{qn}^* Y_{pq,nn}^{\text{ext}} \quad , \quad S_{11} = -\frac{1}{4} \sum_{n'=1}^N \sum_{p=1}^Q V_{pn'} F_{pn'}^{\text{in}} \quad .$$

Електричне поле, що випромінюється n -ою щілиною в середовищі може бути визначене за формулою:

$$\vec{E}_n = -\frac{1}{2\pi} \text{rot} \int_{\zeta_n} \left[\vec{e}_{\zeta_n}, \vec{n}^{\text{ext}} \right] \hat{G}^{\text{ext}}(r/r') d\zeta \quad , \quad 13714(.)$$

$$\hat{G}^{\text{ext}}(r/r') = \frac{e^{-ik\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}}}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon^{\text{ext}}}$$

де

Таким чином, компоненти електричного поля, яке випромінюється поздовжньою щілиною з номером n , згідно 714 з урахуванням 24, у декартовій системі координат можна визначити за формулами:

$$E_{xn}(x, y, z) = -\frac{ik}{\pi} \sum_{q=1}^Q V_{qn} \int_{-d_n/2-L_n}^{d_n/2} \int_{-L_n}^{L_n} \sin \frac{q\pi(L_n+s_n)}{2L_n} \frac{e^{-ikR(s_n, \xi_n)}}{R^2(s_n, \xi_n)} \left[1 + \frac{1}{ikR(s_n, \xi_n)} \right] y ds_n d\xi_n,$$

$$E_{yn}(x, y, z) = \frac{ik}{\pi} \sum_{q=1}^Q V_{qn} \int_{-d_n/2-L_n}^{d_n/2} \int_{-L_n}^{L_n} \sin \frac{q\pi(L_n+s_n)}{2L_n} \frac{e^{-ikR(s_n, \xi_n)}}{R^2(s_n, \xi_n)} \left[1 + \frac{1}{ikR(s_n, \xi_n)} \right] (x - \xi_n - x_n) ds_n d\xi_n,$$

$$E_{zn}(x, y, z) = 0,$$

$$R(s_n, \xi_n) = \sqrt{(x - \xi_n - x_n)^2 + y^2 + (z - s_n - z_n)^2}$$

Компоненти електричного поля, яке випромінюється поперечною щілиною з номером n у декартовій системі координат:

$$E_{xn}(x, y, z) = 0,$$

$$E_{yn}(x, y, z) = \frac{ik}{\pi} \sum_{q=1}^Q V_{qn} \int_{-d_n/2-L_n}^{d_n/2} \int_{-L_n}^{L_n} \sin \frac{q\pi(L_n+s_n)}{2L_n} \frac{e^{-ikR(s_n, \xi_n)}}{R^2(s_n, \xi_n)} \left[1 + \frac{1}{ikR(s_n, \xi_n)} \right] (z - \xi_n - z_n) ds_n d\xi_n,$$

$$E_{zn}(x, y, z) = -\frac{ik}{\pi} \sum_{q=1}^Q V_{qn} \int_{-d_n/2-L_n}^{d_n/2} \int_{-L_n}^{L_n} \sin \frac{q\pi(L_n+s_n)}{2L_n} \frac{e^{-ikR(s_n, \xi_n)}}{R^2(s_n, \xi_n)} \left[1 + \frac{1}{ikR(s_n, \xi_n)} \right] y ds_n d\xi_n,$$

$$R(s_n, \xi_n) = \sqrt{(x - s_n - x_n)^2 + y^2 + (z - \xi_n - z_n)^2}.$$

Сумарне електричне поле системи щілинних випромінювачів:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{x}^0 \sum_{n=1}^N E_{xn}(x, y, z) + \vec{y}^0 \sum_{n=1}^N E_{yn}(x, y, z) + \vec{z}^0 \sum_{n=1}^N E_{zn}(x, y, z)$$

15816(.)

2.3. Розподіл інтенсивності електромагнітного поля в ближній зоні випромінювання хвилевідно-щілинних випромінювачів кругової поляризації

У випадку реалізації поля випромінювання кругової (еліптичної) поляризації, розподіл поля в ближній зоні системи виявляється більш рівномірним, ніж при синфазному збудженні однакових випромінювачів. При використанні щілинних випромінювачів, кругову поляризацію

електромагнітного поля можна одержати у випадку двох взаємно ортогональних щілин, розташованих у широкій стінці хвильоводу так, щоб при збудженні хвильоводу основним типом хвилі різниця фаз електричних полів у щілинах становила 90° , а амплітуди полів у щілинах при цьому повинні бути рівні.

Таким вимогам задовольняє система, що складається із двох щілин – поперечної й поздовжньої в широкій стінці прямокутного хвильоводу, навантаженого на узгоджене навантаження (рис. 2.2). Тут і далі використається прямокутний хвильвід з узгодженим навантаженням з розмірами поперечного перетину $a \times b = 90 \times 45 \text{ мм}^2$ і товщиною стінки $h = 2.5 \text{ мм}$, що збуджується хвилею основного типу на частоті $f = 2.45 \text{ ГГц}$. Довжини щілин системи, зображеної на рис. 2.2, близькі до резонансних при випромінюванні у вільний півпростір і для поздовжньої й поперечної щілин відповідно рівні $2L_1 = 59 \text{ мм}$ і $2L_2 = 57.5 \text{ мм}$. Ширини щілин $d_1 = d_2 = 3 \text{ мм}$. Координати центрів поздовжньої й поперечної щілини в широкій стінці хвильоводу відповідно рівні: $x_1 = 41 \text{ мм}$, $z_1 = 29.5$; $x_2 = 10 \text{ мм}$, $z_2 = 29.9$. Геометричні розміри щілин та їхнє розташування в широкій стінці хвильоводу підібрані таким чином, що в напрямку нормалі до площини щілин формується поле із круговою поляризацією й при цьому така система щілин при випромінюванні у вільний півпростір має коефіцієнт випромінювання $|S_\Sigma|^2 = 0.9$. Коефіцієнт відбиття по полю даної системи із двох взаємно ортогональних щілин дуже низький: $|S_{11}| = 0.0037$. При випромінюванні системи щілин у матеріальні середовища з електрофізичними параметрами, що відповідають жировій тканині й шкірі, коефіцієнт випромінювання значно зменшується, але слід зазначити, що при випромінюванні в багатошарове середовище (повітря (5мм) – шкіра (2мм) – жирова тканина (10мм) – м'язи), коефіцієнт випромінювання вищий, ніж при випромінюванні в згадані середовища. У цьому випадку $|S_\Sigma|^2 = 0.27$ й $|S_{11}| = 0.013$. Підвищити коефіцієнт випромінювання можна при розташуванні випромінювача в стінці прямокутного хвильоводу з навантаженням, що відбиває, або в стінці резонатора.

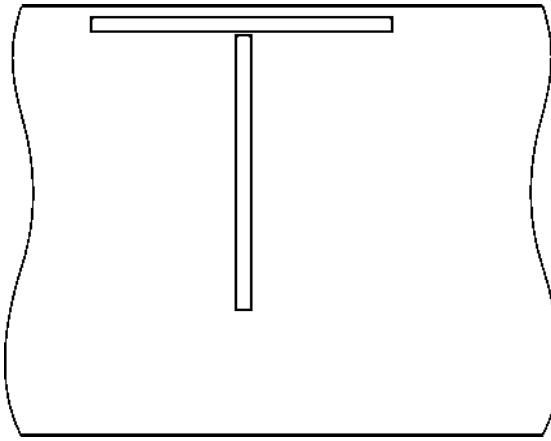


Рисунок 2.2. Система із двох взаємно ортогональних щілин.

Розподіли інтенсивності ближнього поля системи із двох взаємно ортогональних щілин (у площинах $y = \text{const}$) у вільному півпросторі, жировій тканині ($\epsilon' = 5.56, \epsilon'' = 0.86$) і шкірі ($\epsilon' = 5.56, \epsilon'' = 0.86$) у наближенні напівнескінченного середовища представлені на рис. 2.3 – рис. 2.5, а розподіл ближнього поля цієї ж

системи щілин у площинах $y = \text{const}$, але при випромінюванні в багатошарове матеріальне середовище із втратами (повітря (5мм) – шкіра (2мм) – жирова тканина (10мм) – м'язи), що моделює біологічну структуру представлені на рис. 2.6. Завдяки тому, що випромінювач формує поле кругової поляризації, розподіл інтенсивності ближнього поля випромінювача в матеріальному середовищі на деякій відстані $y = \text{const}$ стає близьким до осесиметричного (рис. 2.3б – рис. 2.5б) і інтенсивність поля рівномірно зменшується при віддаленні від осі симетрії. Наявність багатошарового середовища призводить до деякого відхилення максимуму амплітуди поля від нормалі до площини випромінювача.

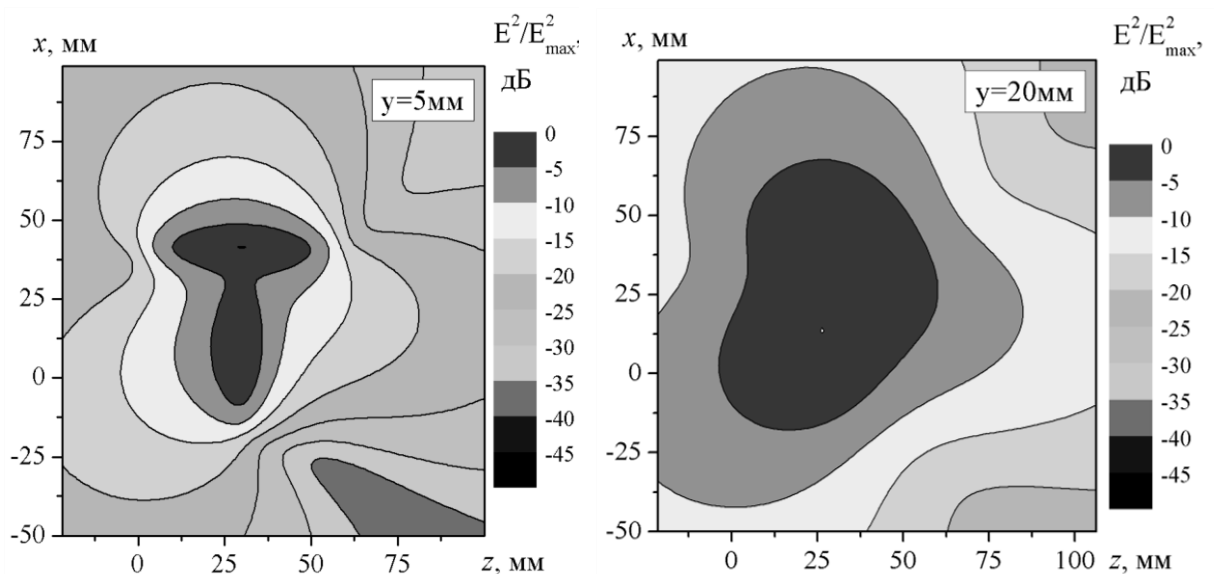


Рисунок 2.3. Розподіл ближнього поля системи із двох взаємно ортогональних щілин у вільному півпросторі в площинах $y = 5_{\text{мм}}$ і $y = 20_{\text{мм}}$.

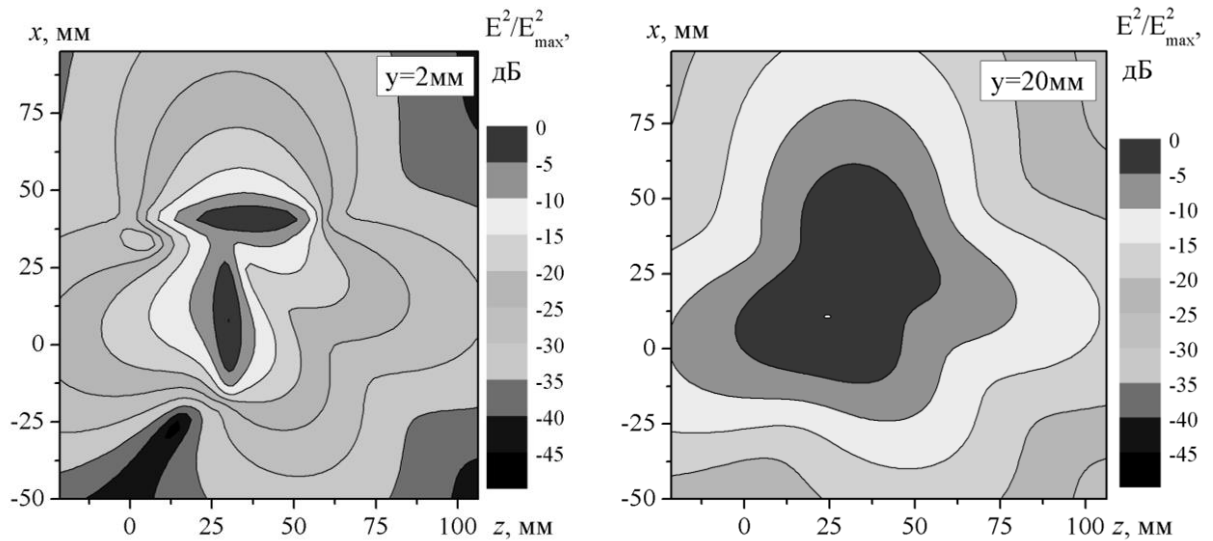


Рисунок 2.4. Розподіл ближнього поля системи із двох взаємно ортогональних щілин у жировій тканині в площинах $y = 2_{\text{мм}}$ і $y = 20_{\text{мм}}$.

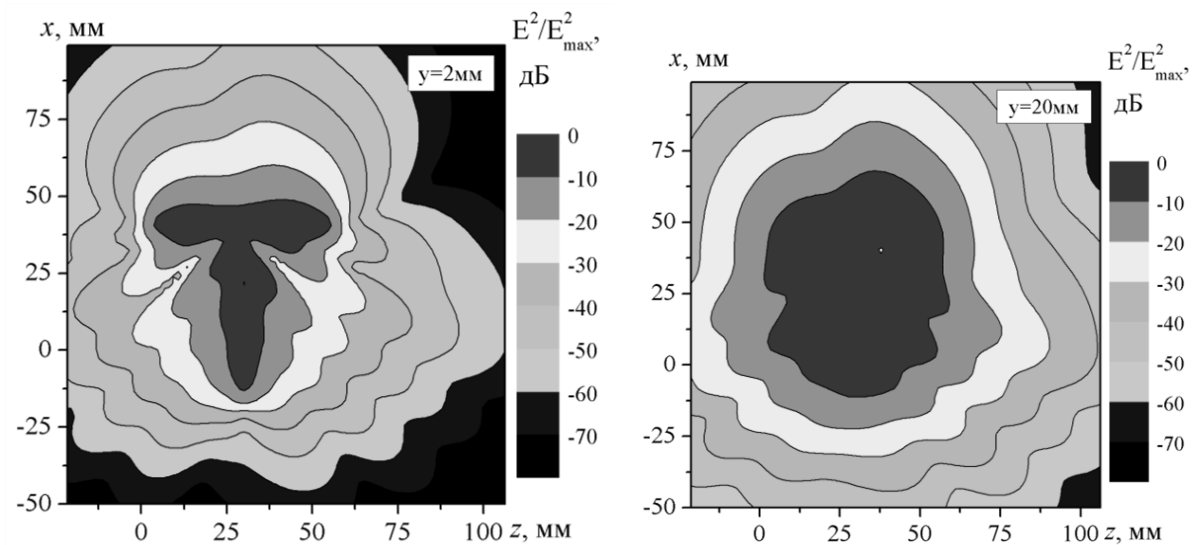
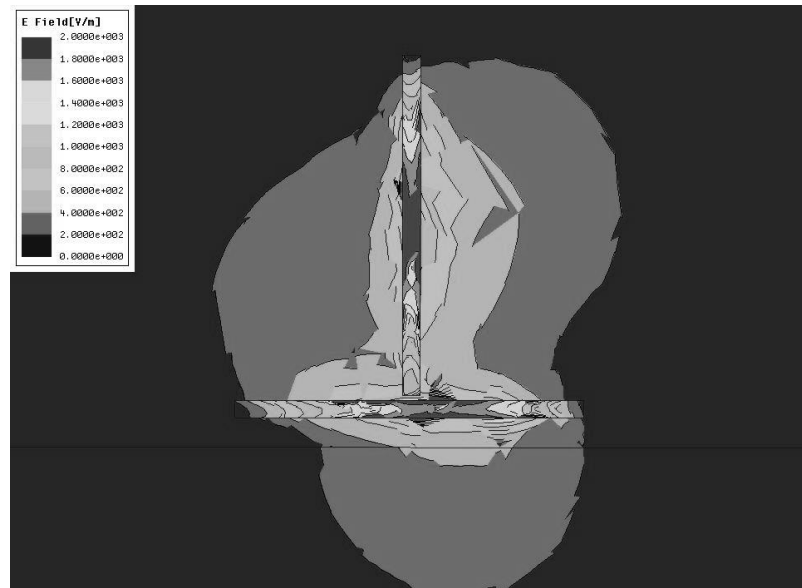
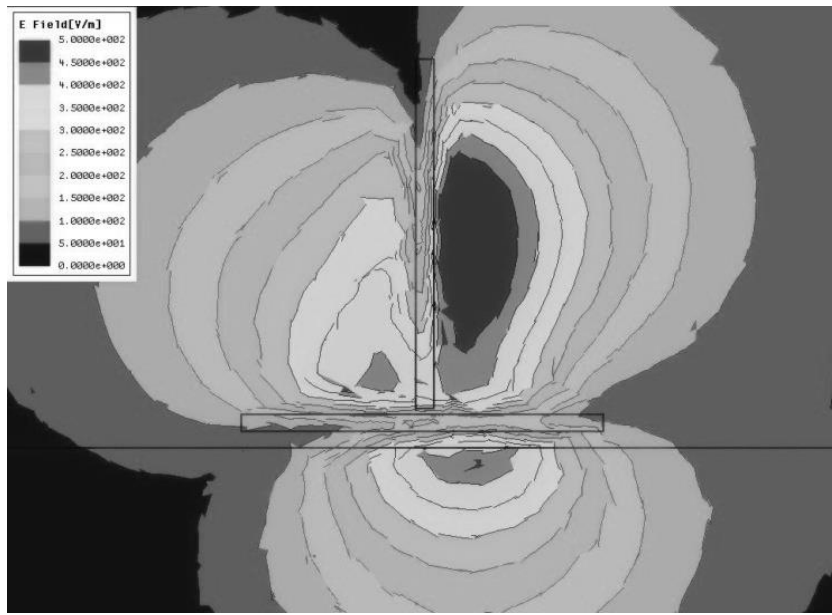


Рисунок 2.5. Розподіл ближнього поля системи із двох взаємно ортогональних щілин у матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі в площинах $y = 2_{\text{мм}}$ і $y = 20_{\text{мм}}$.

При переході від прошарку до прошарку розподіл амплітуди поля значно змінюється (рис. 2.6). Це пов'язано з різними змінами амплітуд нормальної й тангенціальної до площини розмежування середовищ компонент поля при

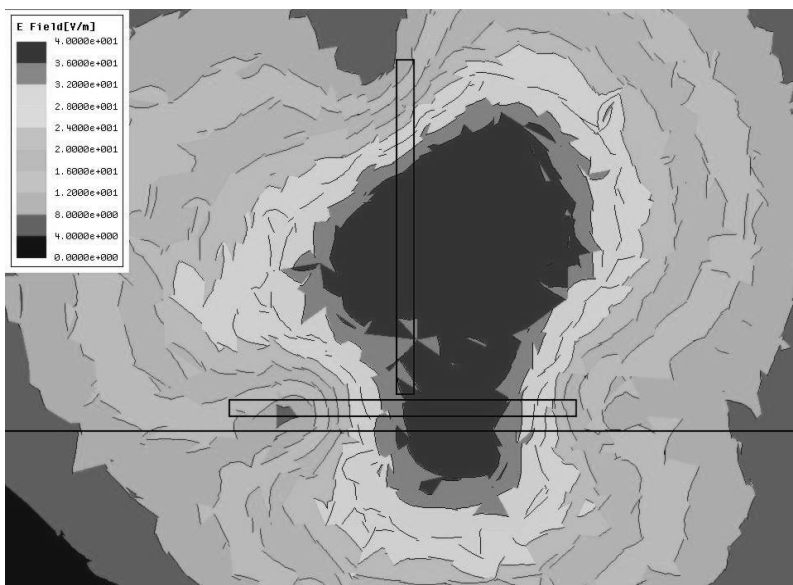
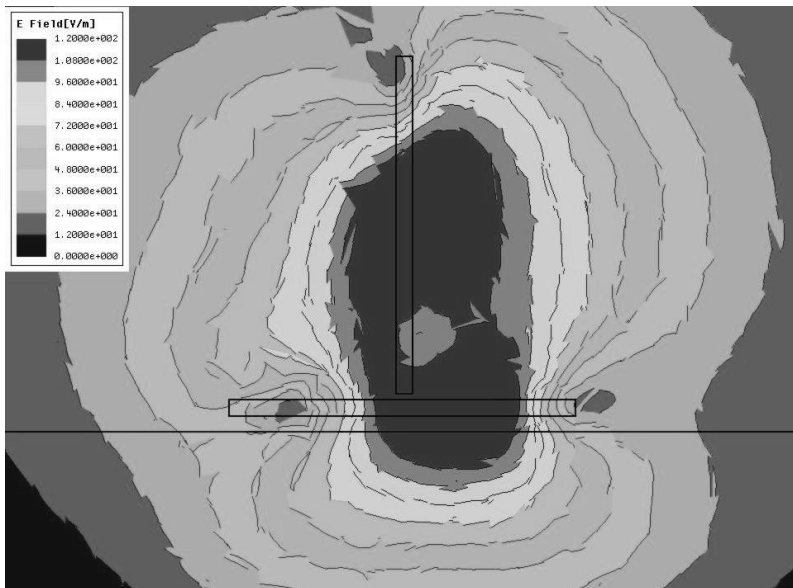
переході через границю розмежування середовищ. Як відзначалося в розділі 1, основну роль у переносі енергії від випромінюючої системи усередину багатшарового поглинаючого середовища відіграє тангенціальна складова електричного поля. Так, досить нерівномірний розподіл поля в приграничному прошарку повітря-шкіра в площині $y=5$ мм з боку повітря (рис. 2.6б) стає рівномірним при переході через границю прошарків повітря-шкіра в шкіру (рис. 2.6в). Але при цьому максимальна амплітуда поля зменшується приблизно в 4.5 рази. Поле, що проходить у м'язову тканину, також сконцентровано в одній області й рівномірно спадає при віддаленні від максимуму інтенсивності поля.





a)

б)



B)

Г)

Рисунок 2.6. Розподіл ближнього поля системи із двох взаємно ортогональних щілин при випромінюванні в тришарове середовище: у площині випромінювача (а); на границі прошарків повітря-шкіра (у площині $y = 5_{\text{мм}}$) з боку повітря (б) і з боку шкіри (в); на границі прошарків жиру-м'яза (у площині $y = 17_{\text{мм}}$) з боку м'язів (г).

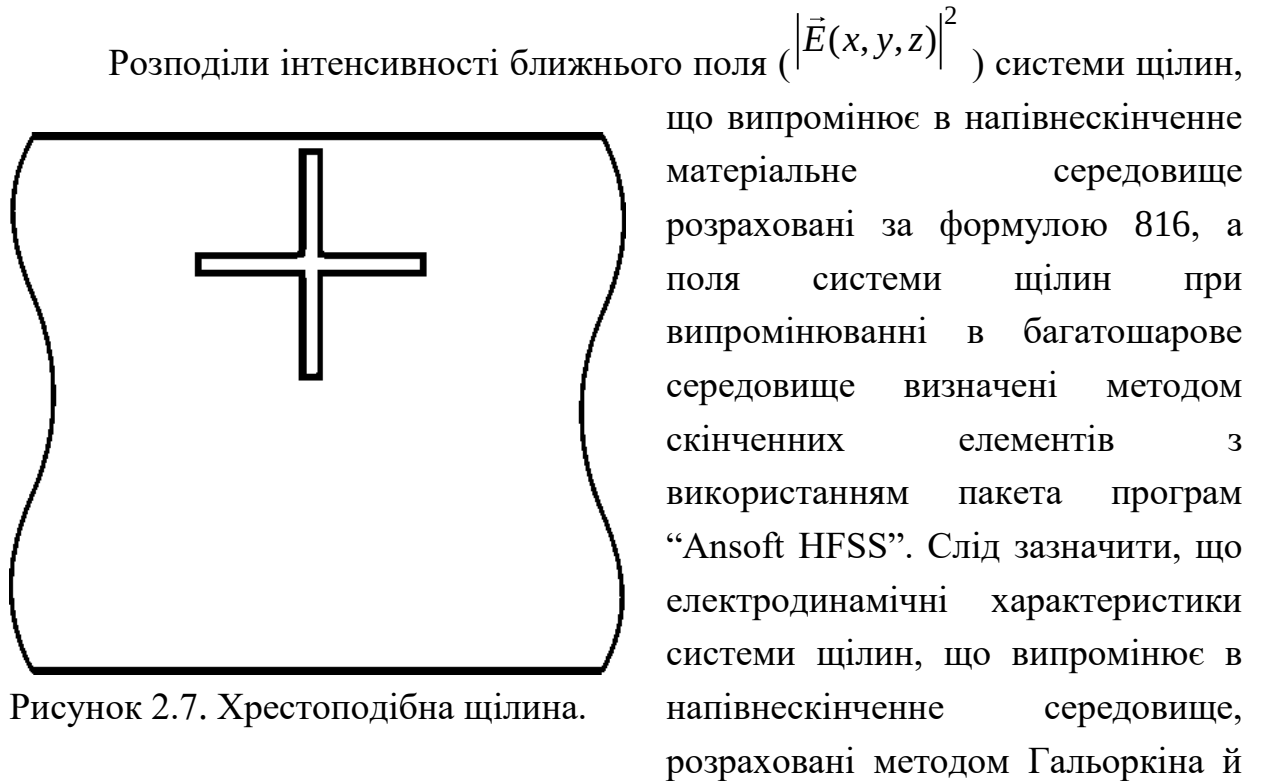


Рисунок 2.7. Хрестоподібна щілина.

На рис. 2.7 зображена хрестоподібна щілина, утворена двома щілинами в широкій стінці хвилеводу: поздовжньою і поперечною, котра, як і раніше розглянута система, формує поле із круговою поляризацією в напрямку нормалі до площини щілин. Розміри щілин $2L_1 = 2L_2 = 38_{\text{мм}}$, $d_1 = d_2 = 3_{\text{мм}}$; $x_1 = x_2 = 23.5_{\text{мм}}$.

Розподіли ближнього поля хрестоподібної щілини (у площинах $y = 2$ мм і $y = 20$ мм) у жировій тканині й у матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі, представлені на рис. 2.8–рис. 2.9.

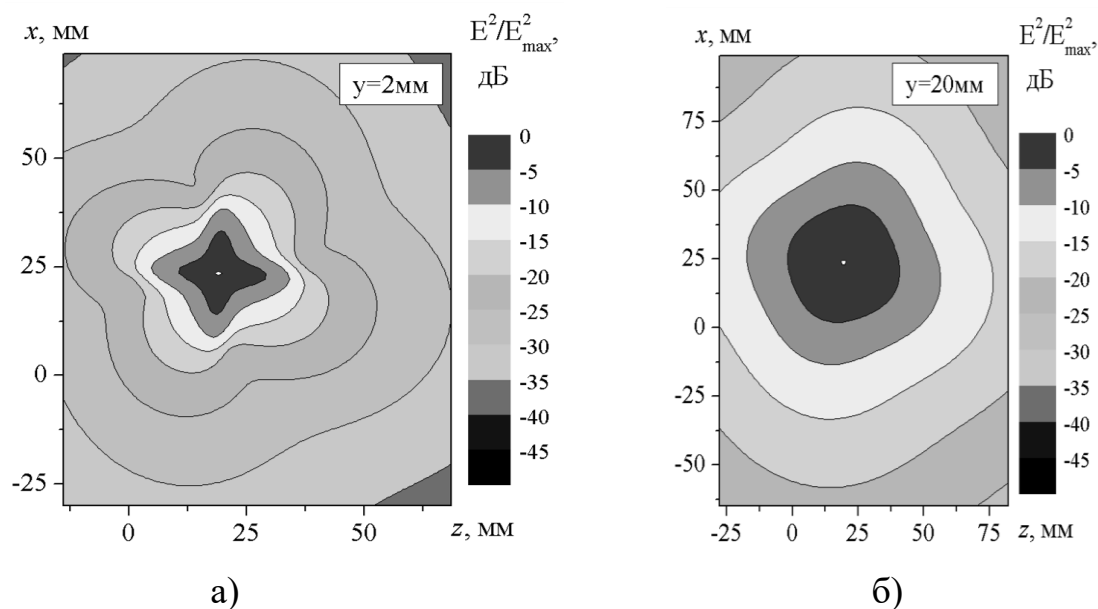


Рисунок 2.8. Розподіл ближнього поля хрестоподібної щілини в жировій тканині в площинах $y = 2$ мм і $y = 20$ мм.

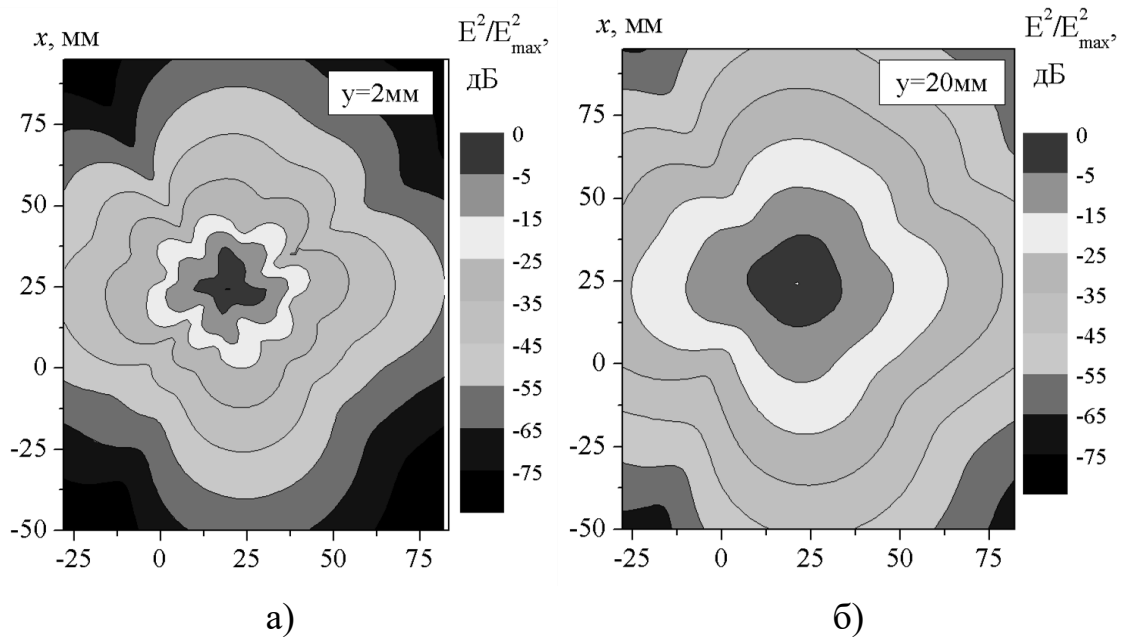


Рисунок 2.9. Розподіл ближнього поля хрестоподібної щілини в матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі, в площинах $y = 2 \text{ мм}$ і $y = 20 \text{ мм}$.

Випромінювач у матеріальному середовищі формує поле із близькою до осової симетрією. Поле сконцентроване в одній області простору. Аналогічні результати можна очікувати й від хрестоподібної щілини, утвореної двома щілинами в широкій стінці прямокутного хвильоводу, розташованими під кутом 45° до осі хвильоводу, яка також випромінює поле із круговою поляризацією.

2.4. Розподіл ближнього поля в біологічному середовищі систем хвилевідно-щілинних випромінювачів на основі взаємно ортогональних щілин й електрично довгих щілин

Для прогріву великої області біологічної тканини в мікрохвильовій гіпертермії можна застосовувати решітки хвилевідно-щілинних випромінювачів. Крім того, у цьому випадку можна збільшити й коефіцієнт випромінювання системи, що підвищує ефективність такого аплікатора.

На рис. 2.10 приведено систему хрестоподібних щілин у широкій стінці прямокутного хвильоводу. Решітка складається з 12 схрещених щілин. Довжини поздовжніх щілин – 38 мм, поперечних – 28 мм, ширини щілин – 3 мм. Відстань між схрещеними щілинами уздовж осі z дорівнює 21 мм. Відстань від осі z до центрів щілин дорівнює 13 мм.

Розподіл ближнього поля системи хрестоподібних щілин у вільному півпросторі (у площині $y=5\text{ мм}$) і в шкірі (площини $y=2\text{ мм}$) представлені на рис. 2.11 й 2.12. На рис. 2.11б також приведений розподіл тангенціальної до площини решітки компоненти електричного поля, що відіграє основну роль у переносі енергії від випромінюючої системи усередину багат шарового поглинаючого середовища. Спостерігається рівномірний уздовж системи розподіл інтенсивності поля окремих випромінювачів.

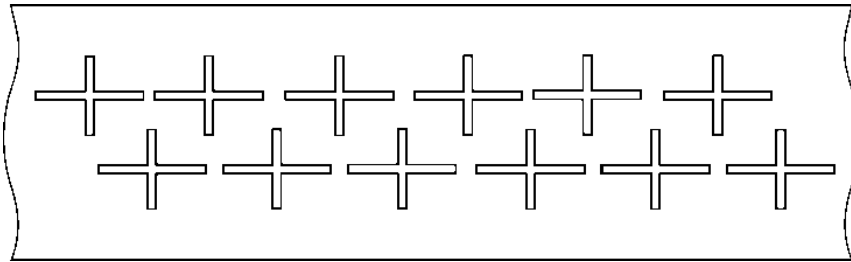


Рисунок 2.10. Система хрестоподібних щілин.

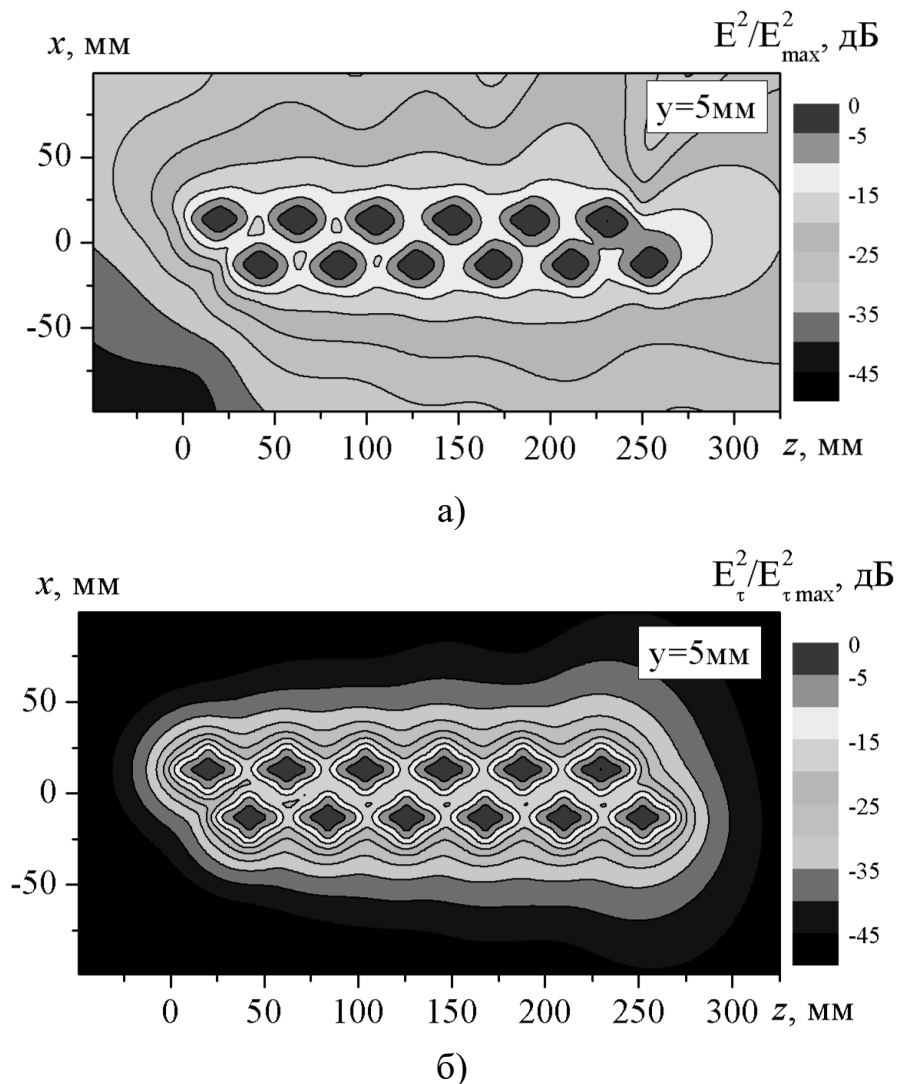


Рисунок 2.11. Розподіл ближнього поля системи хрестоподібних щілин у вільному півпросторі в площині $y=5\text{ мм}$.

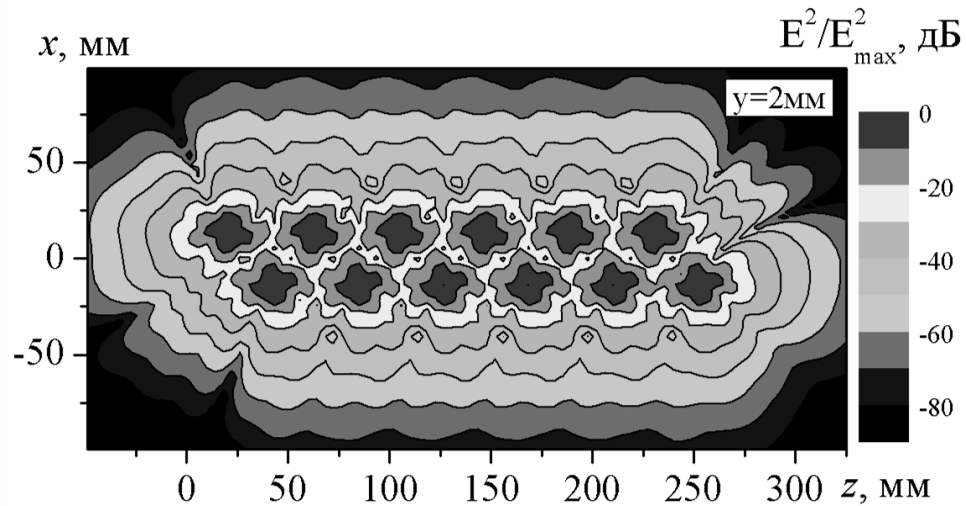


Рисунок 2.12. Розподіл ближнього поля системи хрестоподібних щілин у матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі, в площині $y = 2$ мм.

Ефективну випромінюючу систему можна також реалізувати на основі систем поперечних і поздовжніх щілин, зображених на рис. 2.13. Решітка складається з 16 поздовжніх й 16 поперечних щілин. Довжини поздовжніх щілин – 59 мм, поперечних – 56 мм, ширини щілин – 3 мм відстань між поздовжніми й поперечними щілинами уздовж осі z дорівнює 20.87 мм ($\lambda_g/8$, де $\lambda_g/8$ – довжина хвилі у хвилеводі). Відстань центрів поздовжніх щілин від осі z дорівнює 34 мм й 41 мм, поперечних – 0 мм.

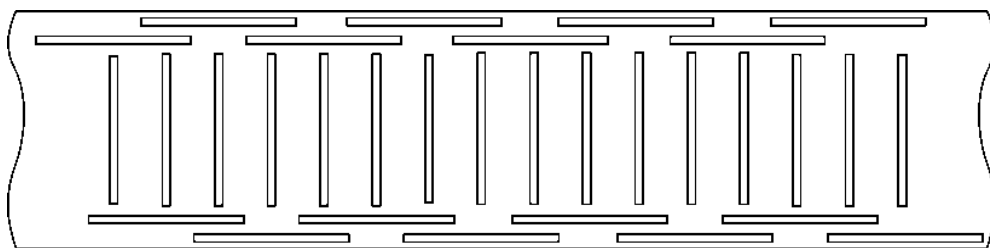


Рисунок 2.13. Система з поздовжніх і поперечних щілин.

Розподіл ближнього поля системи щілин у вільному півпросторі (у площині $y = 5$ мм) і в матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі в площинах $y = 2$ мм і $y = 10$ мм представлені на рис. 2.14 й 2.15. Видно, що нерівномірний розподіл інтенсивності поля у вільному півпросторі (рис. 2.14) стає рівномірним при випромінюванні в шкіру (рис. 2.15).

При випромінюванні у вільний півпростір коефіцієнт випромінювання й відбиття даної системи щілин дорівнюють $|S_{\Sigma}|^2 = 0.93$, $|S_{11}| = 0.24$, а при випромінюванні в шкіру – $|S_{\Sigma}|^2 = 0.25$, $|S_{11}| = 0.002$.

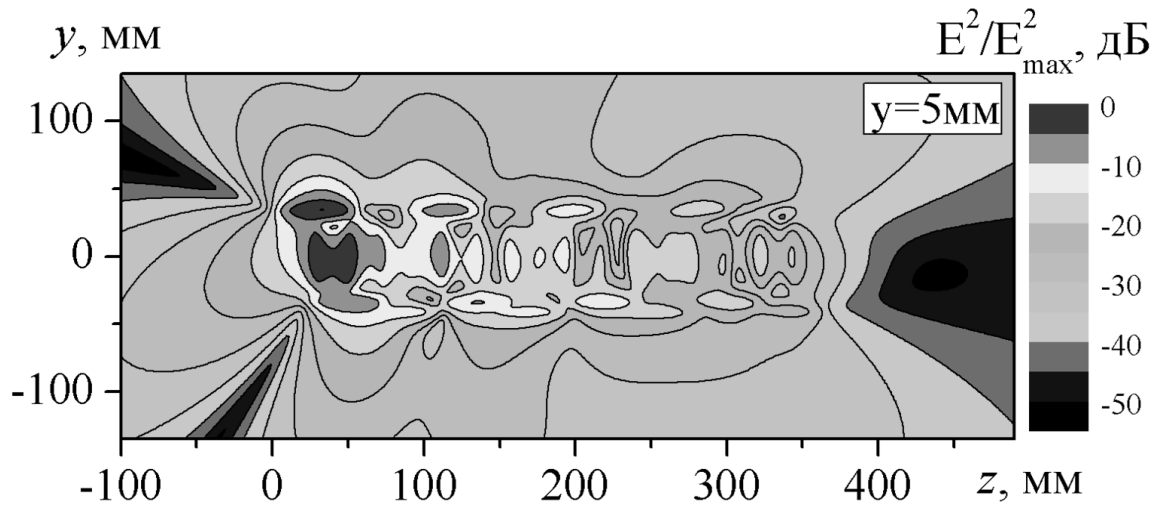
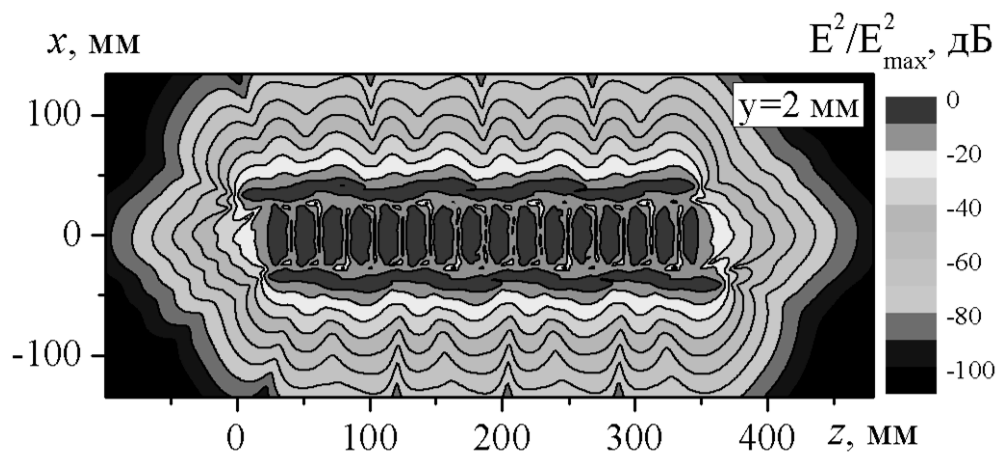
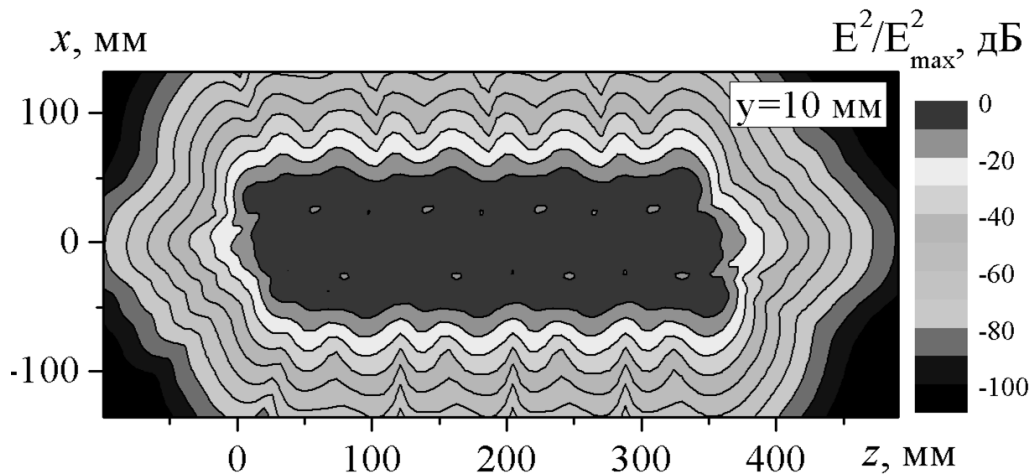


Рисунок 2.14. Розподіл ближнього поля системи щілин, зображеної на рис. 2.13, у вільному півпросторі в площині $y = 5 \text{ mm}$.



а)



б)

Рисунок 2.15. Розподіл ближнього поля системи щілин, зображеної на рис. 2.13, у матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі в площинах $y=2_{\text{мм}}$ і $y=10_{\text{мм}}$.

Система щілин, зображена на рис. 2.16, відрізняється від системи рис. 2.13 тим, що замість 16 поздовжніх щілин з довжинами, близькими до $\lambda/2$ (λ – довжина хвилі у вакуумі) використовуються 2 поздовжні електрично довгі щілини. Довжини поздовжніх щілин – 339 мм, поперечних – 57.5 мм, ширини щілин – 3 мм, відстань між поперечними й між поздовжніми щілинами уздовж осі z дорівнює 20 мм. Відстань центрів поздовжніх щілин від осі z дорівнює 37 мм, поперечних – 0 мм.

Розподіли ближнього поля даної системи щілин вільному півпросторі (у площині $y=5_{\text{мм}}$) і в матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі, в площині $y=2_{\text{мм}}$ представлені на рис. 2.17 і рис. 2.18. Як і попередня решітка, дана система щілин формує рівномірний розподіл інтенсивності поля в біологічному середовищі.

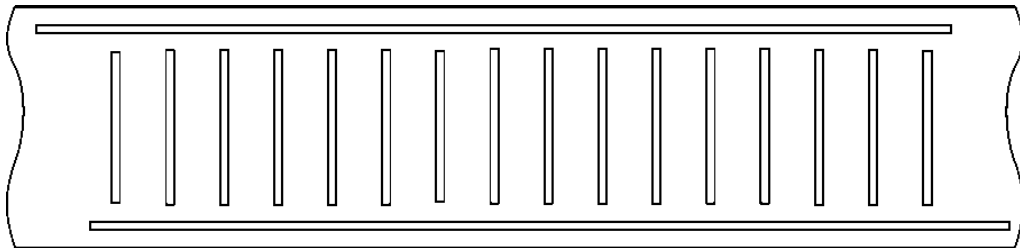


Рисунок 2.16 Система щілин з електрично довгими щілинами.

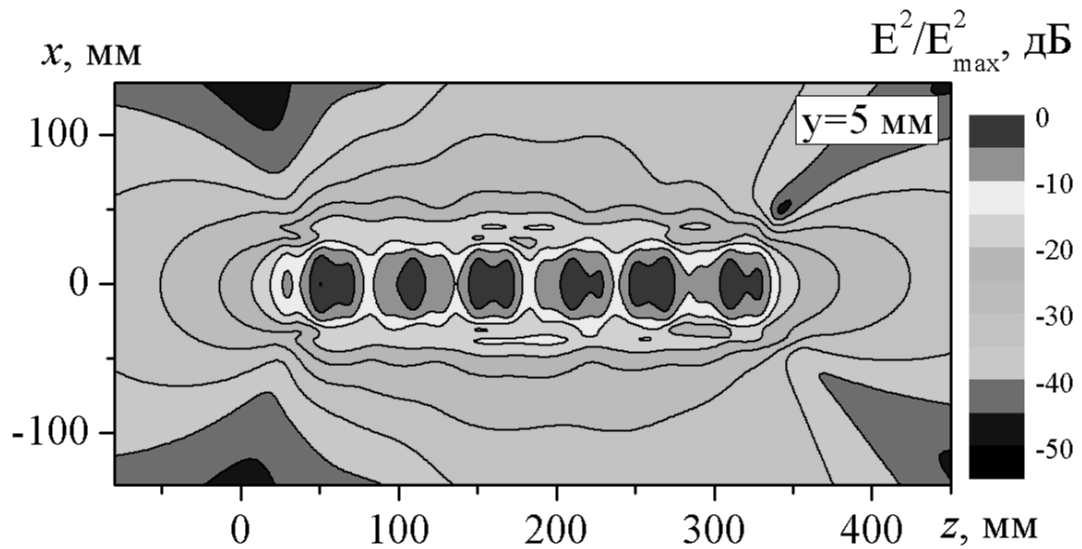


Рисунок 2.17. Розподіл ближнього поля системи щілин рис. 2.16 у вільному півпросторі в площині $y=5$ мм.

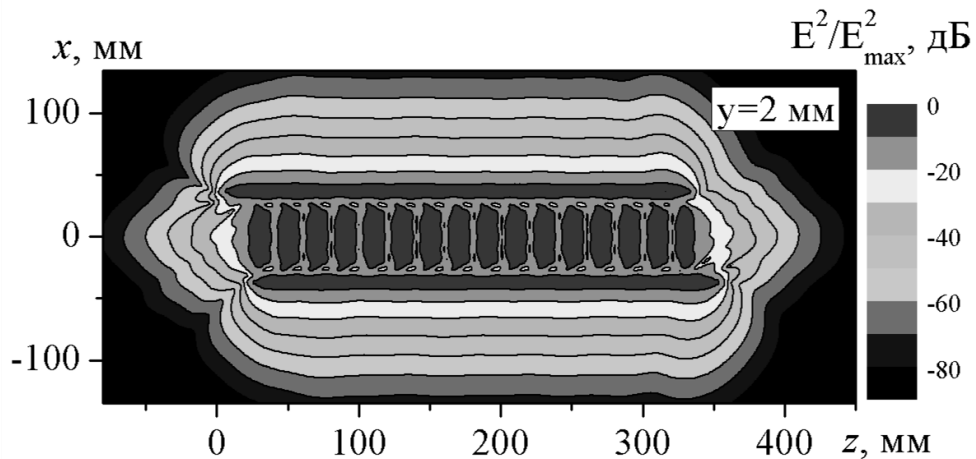


Рисунок 2.18. Розподіл ближнього поля системи щілин рис. 2.16 у матеріальному середовищі з електрофізичними параметрами, що відповідають шкірі в площині $y=2$ мм.

Потрібно відзначити, що електрично довгі щілини також можуть бути використані в мікрохвильовій гіпертермії в якості аплікаторів. Амплітудний розподіл у таких щілинах при випромінюванні в матеріальні середовища з електрофізичними параметрами, що відповідають біологічним тканинам, наближається до постійного АР і при випромінюванні в різні матеріальні середовища ближнє поле стає більш рівномірним у порівнянні з випромінюванням у вільний півпростір. АР поля в щілині, довжиною $2L_1 = 10\lambda$ ($\lambda = 122.4$ мм ($f = 2.45$ ГГц)), і шириною $d = 3$ мм, прорізаної у

хвильоводі $a \times b = 90 \times 45 \text{ мм}^2$, $h = 2.5 \text{ мм}$, $x_1 = 35 \text{ мм}$ при випромінюванні в різні середовища представлено на рис. 2.19, а відповідні нормовані розподіли інтенсивності ближнього поля щілини в площині $x = x_1$ — на рис. 2.20.

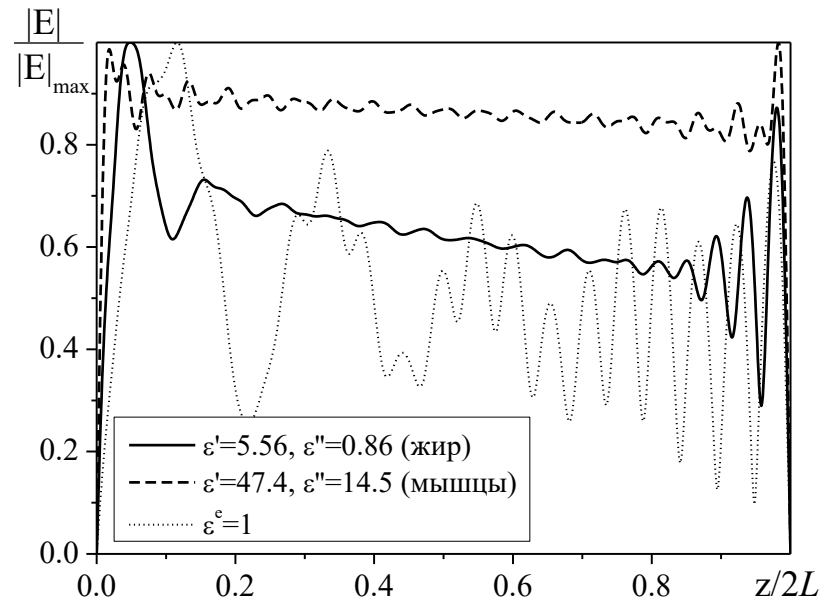
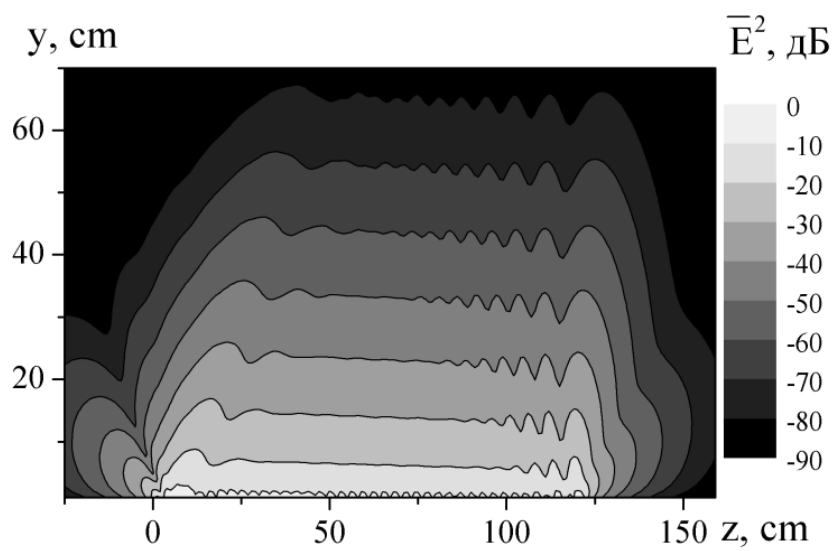
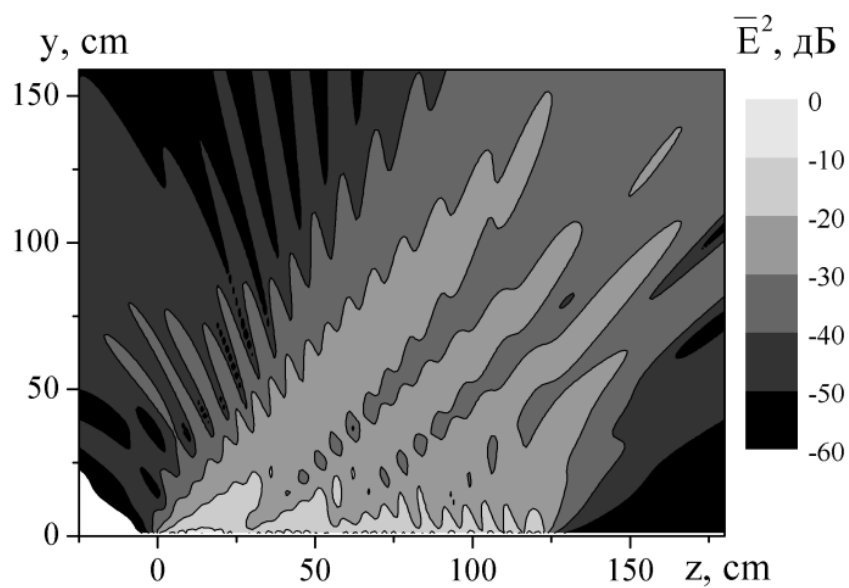
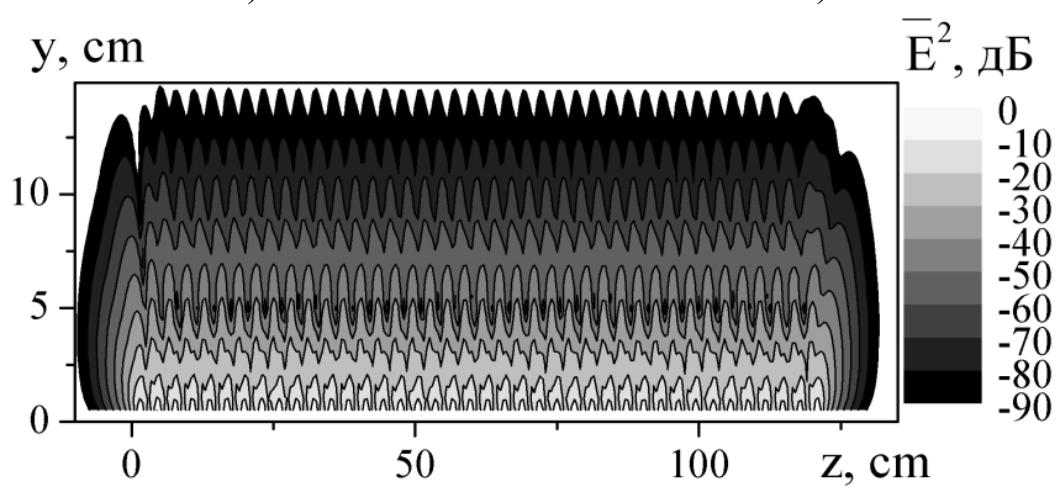


Рисунок 2.19. Амплітудний розподіл поля в щілині довжиною $l = 10\lambda$, що випромінює в різні середовища.



a)

б)



в)

Рисунок 2.20. Нормовані розподіли інтенсивності ближнього поля щілини довжиною $l = 10\lambda$ в різних середовищах: а) вільний півпростір; б) жирова тканина; в) м'язова тканина.

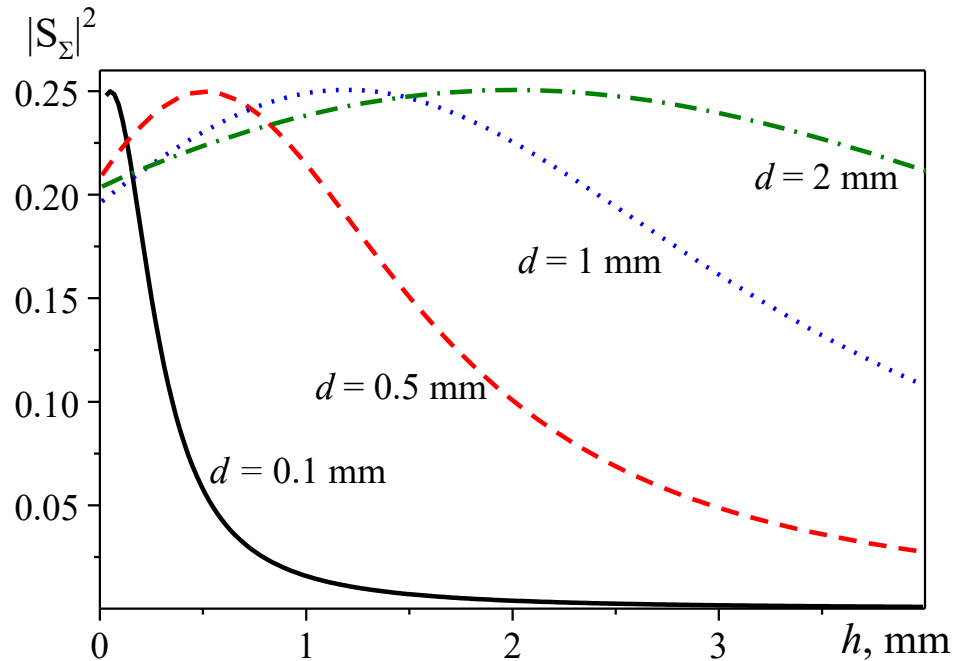


Рис. 2.1. Залежність коефіцієнтів випромінювання від товщини стінки волноводу, збуджуваного хвилею H_{30} ($\lambda = 16$ мм) для щілин $l = 7.5$ мм, $x_0 = 4.75$ мм за різної їх ширини d

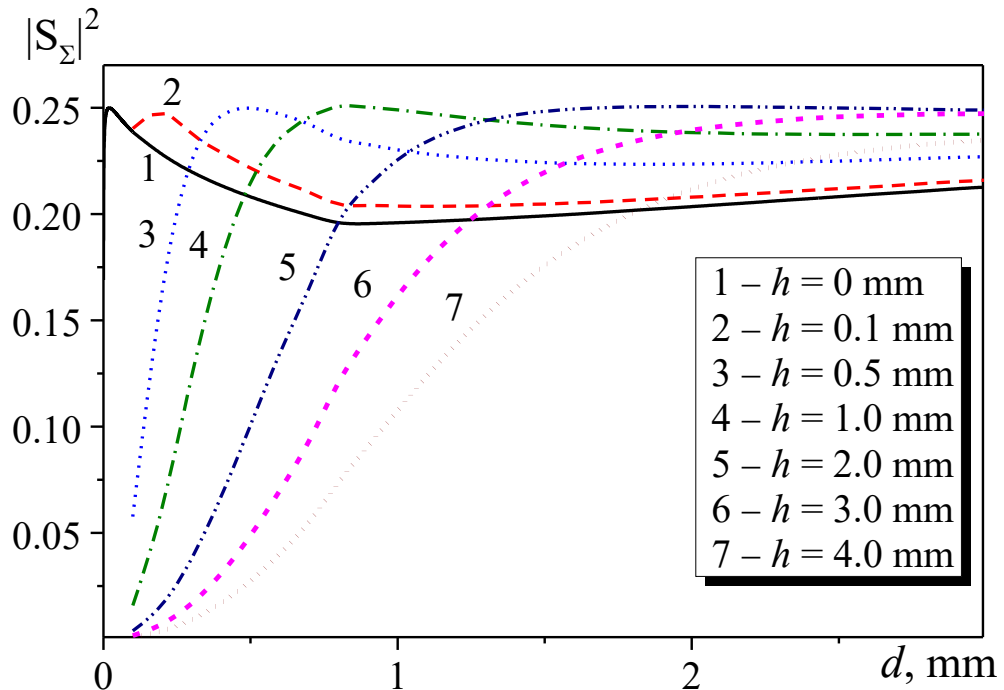


Рис. 2.2. Залежність коефіцієнтів випромінювання від ширини щілин

$l = 7.5$ мм, $x_0 = 4.75$ мм при різній товщині стінки h волноводу, збуджуваного хвилею H_{30} ($\lambda = 16$ мм)

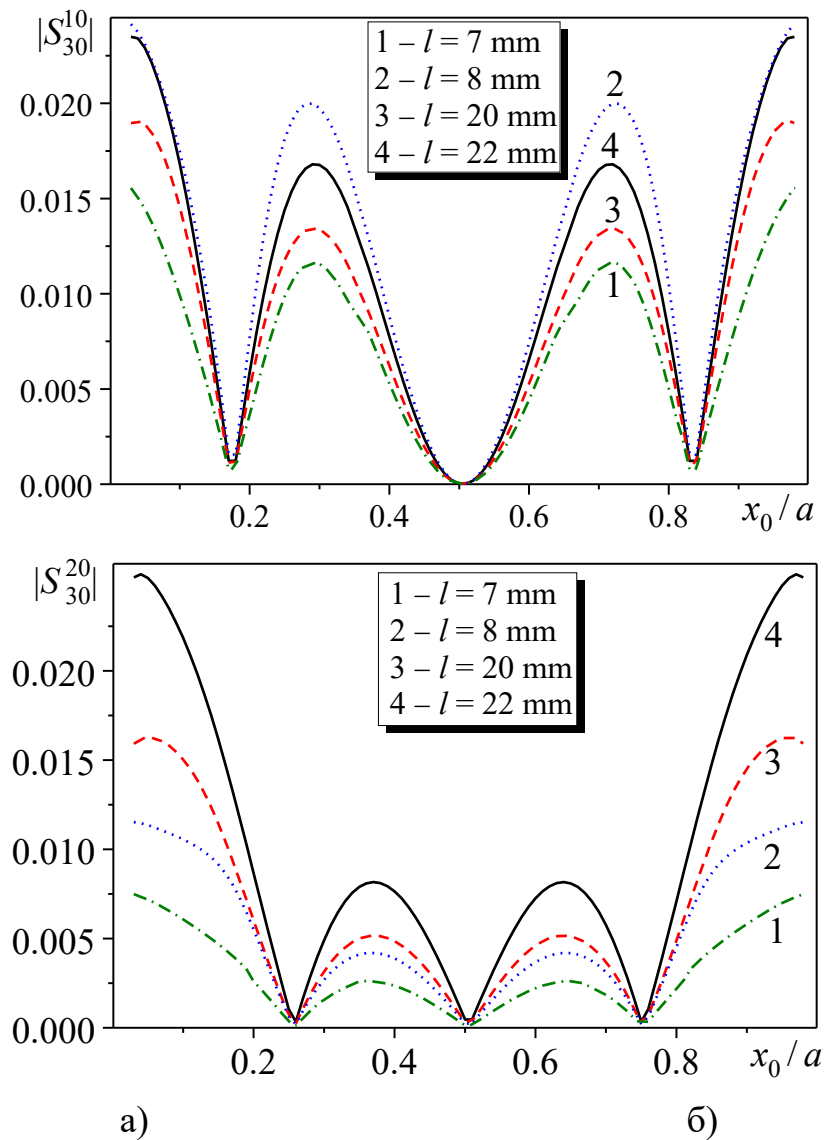


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнтів перетворення хвилі H_{30} в H_{10} (а) та H_{20} (б) від параметра x_0/a для щілин різної довжини

Таким чином, на основі взаємно ортогональних і схрещених щілин у стінках хвилеведучих трактів можна створити аплікатори для медичної гіпертермії, що випромінюють поле кругової поляризації й розподіл поля в біологічному середовищі має чітко виражений максимум по нормалі до випромінювача. При використанні систем хвилевідно-щілинних випромінювачів на основі взаємно ортогональних щілин, а також електрично

довгих щілин можна одержати рівномірний розподіл інтенсивності поля в біологічному середовищі.

Висновки

Щілинні випромінювачі є важливим елементом електроніки. Вони використовуються в різних пристроях, таких як:

Анени. Щілинні випромінювачі використовуються в антенах для випромінювання електромагнітних хвиль.

Радіолокатори. Щілинні випромінювачі використовуються в радіолокаційних системах для виявлення об'єктів.

Щілинні випромінювачі мають ряд переваг, зокрема:

Висока ефективність випромінювання. Щілинні випромінювачі можуть випромінювати до 90% енергії, що подається на них.

Широкий діапазон частот. Щілинні випромінювачі можуть працювати в широкому діапазоні частот, від радіохвиль до інфрачервоного випромінювання.

Невелика габаритність. Щілинні випромінювачі мають невеликі розміри, що дозволяє використовувати їх в різних пристроях.

Одним із напрямків розвитку щілинних випромінювачів є використання нанотехнологій. Наноструктури можуть бути використані для підвищення ефективності випромінювання і розширення діапазону частот.

Іншим напрямком розвитку щілинних випромінювачів є використання нових матеріалів. Новий матеріали можуть мати кращі характеристики, ніж традиційні матеріали, наприклад, метали, діелектрики та напівпровідники.

Розвиток щілинних випромінювачів дозволить зробити електроніку більш ефективною і безпечною.

Особливості застосування щілинних випромінювачів в мікрохвильовій гіпертермії

У мікрохвильовій гіпертермії щілинні випромінювачі використовуються для локального нагрівання тканин організму. Вони можуть використовуватися для лікування пухлин, запалення та болю.

Щілинні випромінювачі для МГТ мають ряд особливостей, які відрізняють їх від інших типів випромінювачів, таких як:

Висока ефективність випромінювання. Щілинні випромінювачі для МГТ повинні мати високу ефективність випромінювання, щоб забезпечити ефективне нагрівання тканин організму.

Широкий діапазон частот. Щілинні випромінювачі для МГТ повинні мати широкий діапазон частот, щоб забезпечити ефективне нагрівання тканин організму в різних областях.

Невелика габаритність. Щілинні випромінювачі для МГТ повинні бути невеликими, щоб їх можна було легко розміщувати в тілі людини.

Розробники щілинних випромінювачів для МГТ працюють над підвищенням ефективності випромінювання, розширенням діапазону частот і зменшенням габаритних розмірів.

Результати проведених досліджень характеристик мікрохвильових випромінювачів різної конструкції й можливості застосування їх у якості медичних аплікаторів показали наступне:

1. Відстань випромінювача до поверхні шаруючи шкіри й товщина останнього впливають на входні характеристики випромінювача по системі живлення, а значить і на його ефективність.

2. Поляризація випромінювання, що проходить у біологічні середовища, не змінюється при переході через границі розмежування між різними шарами.

3. Розподіл у просторі величини коефіцієнта поляризації випромінювання можна регулювати за допомогою різниці фаз збудження між вібраторами.

4. Різниця фаз збудження величиною 90° забезпечує кругову поляризацію випромінювання в напрямку нормалі до випромінювача й границь шарів.

5. Запропонований випромінювач із криволінійними напівхвильовими випромінювачами має високу ефективність і узгодженість з

біологічним об'єктом, що збільшує частку НВЧ потужності генератора, що проникає усередину шару м'язової тканини.

6. На основі взаємно ортогональних і схрещених щілин у стінках хвилеведучих трактів можна створити аплікатори для медичної гіпертермії, що випромінюють поле кругової поляризації.

7. Розподіл у біологічному середовищі електричного поля таких хвилевідно-щілинних випромінювачів має чітко виражений максимум по нормалі до випромінювача.

8. При використанні систем хвилевідно-щілинних випромінювачів на основі взаємно ортогональних щілин, а також електрично довгих щілин можна одержати рівномірний розподіл інтенсивності поля в біологічному середовищі уздовж системи.

9. Проведено дослідження характеристик (КСХН і ближнє поле) двох оптимізованих конструкцій компактних плоских мікросмужкових випромінювачів, які можуть використовуватися в якості аплікаторних антен при локальному прогріві біологічних тканин.

Список використаних джерел

1. Внутрішня медицина: Підручник, заснований на принципах доказової медицини / А.С. Свінціцький та ін. –«Практична медицина», 2018. – 1632 с.
2. Лянной Ю. О. Основи фізичної реабілітації: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / Ю. О. Лянной; ред. Ю. О. Лянной. - Суми : Вид-во Сум. ДПУ ім. А. С. Макаренка, 2020. – 368 с.
3. Основи фізичної реабілітації: навч. посіб. / Херсон. держ. ун-т ; [уклад.] Ю. В. Карпухіна. - Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. - 306 с.
4. Передерій В. Г. Основи внутрішньої медицини : підруч. для студ. вищ. мед. навч. закл. Т.1. Захворювання органів дихання. Захворювання органів травлення. Захворювання системи крові і кровотворних органів. Захворювання ендокринної системи / В. Г. Передерій, С. М. Ткач. -Вінниця : Нова книга, 2018. - 640 с.
5. Практичні аспекти фізичної терапії та ерготерапії: навч. посіб. / [Н. А. Добровольська та ін.; під ред. Н. А. Добровольської та ін.]; Тавр. нац. ун-т ім. В. І. Вернадського. - Київ: Гельветика, 2020. - 367 с.
6. Фізична, реабілітаційна та спортивна медицина/ Підручник для студентів і лікарів за редакцією проф. В.М.Сокрута.- Краматорськ: Каштан.- 2019.- Т.1.- 478 с.
7. Богдановська Н. В. Фізична реабілітація засобами фізіотерапії: підруч. для здобувачів ступеня вищ. освіти магістра спец. "Фізична терапія, ерготерапія" / Н. В. Богдановська, І. В. Кальонова. - Суми : Унів. кн., 2020. - 328 с.
8. Григус І. М. Фізична реабілітація при захворюваннях дихальної системи: навч. посіб. - Львів: Новий світ-2000, 2020. - 170 с.
9. Жадан А. В. Физическая реабилитация при сердечной недостаточности // Ліки України. – 2019. - №7 (233). – С. 55-60.

10. Калмиков С. А. Фізична реабілітація при захворюваннях органів травлення :навчальний посібник. Харків : Панов А. М., 2016. 222 с.
11. Лікувально-реабілітаційний масаж: навч. посіб. / Д. В. Вакуленко [та ін.]. - Київ : ВСВ Медицина, 2020. - 568 с.
12. Майструк М. І. Фізична реабілітація хворих на хронічне обструктивне захворювання легень : монографія / М. І. Майструк. - Рівне, 2018. - 340 с.
13. Міжнародна класифікація функціонування, обмеження життєдіяльності та здоров'я. Наказ МОЗ України від 23 травня 2018 року № 981 (у редакції наказу МОЗ України від 21.12.2018 № 2449). – Київ, 2018. – 73 с.
14. Мироненко С.Г. Фізична реабілітація при захворюваннях органів дихання: Навчальний посібник. – Полтава, 2019. – 50 с.
15. Беляєв Д. А., Котов К. В., Єрмолаєв А. А. Щілинні випромінювачі для мікрохвильової гіпертермії // Мікрохвильова та оптична техніка. – 2019. – Т. 61, № 12. – С. 3362-3367.
16. Клименко М. В., Яковенко В. С., Вихованець А. В., Шевчук І. В. Моделювання щілинних випромінювачів для мікрохвильової гіпертермії // Електроніка і електромеханіка. – 2016. – № 11. – С. 53-57.
17. Мельник В. О., Свистунов А. О., Кальченко Д. В., Яковенко В. С. Моделювання напруженості поля в щілинних випромінювачах для мікрохвильової гіпертермії // Електроніка і електромеханіка. – 2017. – № 12. – С. 55-59.
18. Беляєв Д. А. Моделювання та дослідження щілинних випромінювачів для мікрохвильової гіпертермії: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07 / Беляєв Дмитро Олександрович. – Київ, 2019. – 177 с.