

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій
Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і
технологій

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження параметрів діелектричної стержневої антени генератора
наднизької інтенсивності міліметрового діапазону»

ХАІ.502.560М.22о.172.1805009 ПЗ

Виконав: студент б курсу групи № 560М
Галузь знань 17 Електроніка та
телекомунікації

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка

Освітня програма «Радіоелектронні
комп'ютеризовані засоби»

(код і найменування напрямку підготовки)

Климчук М.О.

(прізвище й ініціали студента)

Керівник: Куліш С.М.

(прізвище й ініціали)

Рецензент: Невдюдов І. Ш.

(прізвище й ініціали)

Харків – 2022

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет Радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій
(повне найменування)
 Кафедра Радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій
(повне найменування)
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
 Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код та найменування)
 Освітня програма Радіоелектронні комп'ютеризовані засоби
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

О.В. Висоцька

(підпис)

(ініціали та прізвище)

« » 2022 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Климчук Михайло Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження параметрів діелектричної стержневої антени генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону

керівник роботи к.т.н., доцент, професор Куліш Сергій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 1496 - уч від « 27 » жовтня 2022 року.

2. Термін подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 15 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: частотний діапазон – 30...300ГГц; параметри та характеристики іскрового розряду; напруга джерела імпульсного розряду – 5-10 кВ; живлення – 5,5В; програмне забезпечення – COMSOL Multiphysics 5.6.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати):

4.1. Аналітичний огляд об'єкта дослідження.

4.2. Застосування інформаційних електромагнітних випромінювань у біології та медицині.

4.3. Дослідження параметрів випромінювача генератора іскрового розряду.

4.4. Розробка стартап проекту на провадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону.

5. Перелік графічного матеріалу:

5.1. Актуальність та новизна дослідження параметрів ДСА генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону;

5.2 Аналітичний огляд об'єкта дослідження;

5.3 Дослідження впливу геометричних розмірів антени на діаграму направленості;

5.4 Розробка стартап-проекту на провадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	к.т.н., доц. професор. Куліш С.М.	12.09.2022	

Нормоконтроль _____ В.М. Олійник «12» грудня 2022 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання «12» вересня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	15.09.2022	
2	Аналітичний огляд об'єкта дослідженні	29.09.2022 – 08.10.2022	
3	Застосування інформаційних електромагнітних випромінювань у біології та медицині	10.10.2022 – 24.10.2022	
4	Дослідження параметрів випромінювача генератора іскрового розряду	25.10.2022 – 07.11.2022	
5	Розробка стартап-проекту на провадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону	08.11.2022 – 30.11.2022	
7	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2022 – 10.12.2022	
8	Передзахист випускної роботи	11.12.2022 – 13.12.2022	
9	Захист випускної роботи	15.12.2022	

Здобувач вищої освіти

_____ Климчук М.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ С.М. Куліш
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: 108 стор., 26 рис., 20 табл., 34 джерел.

ДИЕЛЕКТРИЧНА СТРИЖНЕВА АНТЕНА, ВИПРОМІНЮВАЧ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, ІСКРОВИЙ РОЗРЯД, НИЗЬКОІНТЕНСИВНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, РАДІОТЕХНІЧНИЙ ПРИСТРІЙ.

Об'єкт дослідження – параметри діелектричної стержневої антени генератора іскрового розряду наднизької інтенсивності міліметрового діапазону та процеси генерування електромагнітних хвиль радіочастотного діапазону.

Мета роботи – визначення геометричних розмірів випромінювача генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону з не тепловим впливом на біологічний об'єкт.

Метод дослідження – математичний та розрахунковий метод моделювання параметрів діелектричної стержневої антени з урахуванням її геометричних розмірів та матеріалів.

В результаті визначено модель та метод формування електромагнітного випромінювання, досліджено вплив діаметру та довжини діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості, вплив матеріалу на діаграму спрямованості антени та визначено оптимальні розміри, та матеріал для діелектричної стержневої антени генератора наднизької інтенсивності, виконано розрахунки параметрів антени які підтвердили правильність проведених досліджень.

Розроблено стартап-проект на провадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону. Розробка призначена для фахівців у медичній сфері та для домашнього використання.

ABSTRACT

Explanatory note to the Master's thesis: 108 pages, 26 figures, 20 tables, 34 sources.

DIELECTRIC ROD ANTENNA, EMITTER ELECTROMAGNETIC FIELD, LOW-INTENSITY RADIATION, RADIO DEVICE, SPARK DISCHARGE.

The object of the study is the parameters of the dielectric rod antenna of the spark discharge generator of ultra-low intensity in the millimeter range and the processes of generating electromagnetic waves in the radio frequency range.

The purpose of the work is to determine the geometric dimensions of the emitter of the ultra-low intensity generator of the millimeter range with a non-thermal effect on the biological object.

The research method is a mathematical and computational method of modeling the parameters of the DSA, taking into account its geometric dimensions and materials.

As a result of the research, the following was obtained: the model and method of electromagnetic radiation formation was determined, the influence of the diameter and length of the dielectric rod antenna on its directional pattern was investigated, the effect of the material on the antenna directional pattern, and the optimal dimensions and material for the dielectric rod antenna of the ultra-low intensity generator were determined, the antenna parameters were calculated which confirmed the correctness of the conducted research.

A start-up project has been developed for the implementation of an ultra-low intensity generator of the millimeter range. The development is intended for specialists in the medical field and for home use.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Вступ.....	9
1 Аналітичний огляд об'єкта дослідження.....	11
1.1 Аналіз характеристик електромагнітного випромінювача.....	11
1.1.1 Енергетичний еквівалент нетеплової, інформаційної дії фізичного поля на біологічні об'єкти.....	11
1.1.2 Амплітудно–частотні властивості ЕМП.....	15
1.1.3 Спектри біологічно значимих частот.....	19
1.2 Аналіз методів та засобів формування електромагнітного випромінювання	21
2 Застосування інформаційних електромагнітних випромінювань у біології та медицині.....	27
2.1 Біофізичні основи електромагнітного випромінювання при лікуванні.	27
2.2 Інформаційно хвильові технології в біології та медицині.....	36
3 Дослідження параметрів випромінювача генератора іскрового розряду.....	39
3.1 Обґрунтування типу газового розряду.....	39
3.2 Модель формування електромагнітного випромінювання.....	41
3.3 Метод формування електромагнітного випромінювання.....	44
3.4 Випромінювання з відкритого кінця хвилеводу.	47
3.5 Діелектрична стержнева антена і її характеристика.....	57
3.6 Дослідження впливу геометричних розмірів стержневої антени на діаграму спрямованості.	60
3.7 Дослідження впливу матеріалу стержневої антени на характер діаграми спрямованості.	70
3.8 Визначення геометричних розмірів і параметрів діелектричної стержневої антени.	72

4 Розробка стартап проекту на провадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону.	84
4.1 Технологічний аудит ідеї проекту.	85
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.	86
4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту.	93
4.4 Розробка маркетингової програми стартап-проекту.	95
Висновки	98
Перелік джерел посилань	100
Додаток А Діаграма спрямованості з відкритого кінця хвилеводу	104
ДОДАТОК Б Вплив діаметру діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості	105
ДОДАТОК В Вплив довжини діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості	106
ДОДАТОК Г Вплив матеріалу діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- БАТ – біологічна активна точка;
БО – біологічний об'єкт;
ДСА – діелектрична стержнева антена;
ЕМВ – електромагнітне випромінювання;
ЕМІ – електромагнітні імпульси;
ЕМП – електромагнітне поле;
ІХТ – інформаційно хвильова терапія;
КВЧ – крайвисока частота;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ММ – міліметрового діапазону хвиль
НВЧ – надвисока частота.

ВСТУП

Радіотехнічні пристрої знайшли великий спектр застосування, їх використовують в фізиці, астрономії, медицині, хімії, будівництві та багато інших. Розвиток радіотехніки та пошук нових областей для її використання продовжується і по цей день.

В останні роки в медичній сфері розвивається методи підвищення ефективності лікування при зниженні застосування системних ліків, які мають виражені побічні дії пов'язано з більш широким втіленням в медичну практику нових фізіотерапевтичних технологій. Особливістю фізіотерапії останніх років є значні успіхи в дослідженні впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на живі організми, а також розробка нових немедикаментозних методів лікування і профілактики широкого спектру захворювань.

Актуальність роботи визначається необхідністю вдосконалення засобу формування електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону для досягнення прогнозованого біологічного ефекту з заданими параметрами на біологічні об'єкти.

Мета і задачі – визначення геометричних розмірів випромінювача генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону з не тепловим впливом на біологічний об'єкт.

Об'єкт дослідження – параметри діелектричної стержневої антени генератора іскрового розряду наднизької інтенсивності міліметрового діапазону та процеси генерування електромагнітних хвиль радіочастотного діапазону.

Предмет дослідження – модель джерела електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону з нетепловим впливом на біологічні об'єкти.

Метод дослідження – математичний та розрахунковий метод моделювання параметрів діелектричної стержневої антени з урахуванням її геометричних розмірів та матеріалів.

Наукова новизна. Полягає в підвищенні ефективності роботи генератора електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні наднизької інтенсивності з нетепловим впливом.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вибору методів і засобів генерування електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону з нетепловим характером дії на біологічні об'єкти в розділі проаналізовані фізичні характеристики електромагнітного випромінювання (ЕМВ).

1.1 Аналіз характеристик електромагнітного випромінювача

Специфіка нетеплового впливу ЕМВ обумовлена як об'єктивними енергетичними параметрами електромагнітного випромінювання – інтенсивністю і спектральною щільністю, так і істотно нелінійним відгуком біологічного об'єкту (БО) (чи його структур) на діючий чинник. Такий характер нетеплового впливу має назву інформаційного.

Найважливішою характеристикою, що визначає вид біологічної реакції, являється спектр електромагнітного випромінювання і його широкосмуговість. Проте, фізичні механізми впливу електромагнітного поля в різних інтервалах радіочастотного діапазону істотно розрізняються.

Окрім інтегральних енергетичних і спектральних характеристик біологічний ефект впливу нетеплового випромінювання залежить від: закону розподілу енергії в межах спектру, періодичності або стохастичності впливу цього випромінювання, поляризаційних ефектів, взаємної орієнтації джерела випромінювання і самого БО.

1.1.1 Енергетичний еквівалент нетеплової, інформаційної дії фізичного поля на біологічні об'єкти

Електромагнітне поле є фундаментальним екологічним чинником, що зумовлює як виникнення життя на Землі, так і забезпечує енергетичний баланс

біологічних об'єктів. Тому специфіку нетеплової дії розглянемо з позицій термодинаміки. Такий підхід дозволяє з феноменологічних позицій (перший і другий закони термодинаміки) оцінити енергетичні процеси у біосистемі і процеси енергообміну з довкіллям, у тому числі і у формі електромагнітних полів. Згідно з першим законом, поглинена системою теплота з довкілля йде на збільшення внутрішньої енергії і здійснення роботи цією системою: $dQ = dU + dA$, де dU – внутрішня енергія, dA – виконана робота.

Експериментальні дослідження підтвердили справедливість цього закону для біологічних систем [1].

З другого закону термодинаміки виходить, що ізольована фізична система мимоволі і безповоротно прагне до стану рівноваги, тобто до максимуму ентропії. Тому, зміна ентропії ізольованої системи завжди буде позитивною величиною:

$$dS = dQ/T \geq 0,$$

де dS – зміна ентропії;

T – абсолютна температура системи.

Живий організм є [1] відкритою термодинамічною системою, що знаходиться в стані динамічної рівноваги з довкіллям. Тоді в інтервалі часу, значно меншому, ніж тривалість характерних життєвих процесів, можна вважати ентропію біологічного об'єкту незмінною, тобто $S = \text{const}$, а отже, $dS = 0$. Тоді, зміну ентропії представляють, як суму доданків :

$$dS = d_i S + d_e S,$$

де $d_i S$ – зміна внутрішньої ентропії;

$d_e S$ – приплив або відтік зовнішньої ентропії.

Оскільки перший доданок завжди позитивний, тобто $d_i S > 0$, як для будь-якого об'єкту, що поглинає енергію, то для підтримки ентропії незмінної другий доданок має бути негативним: $d_e S < 0$.

Таким чином, живі організми виконують роботу проти урівноваження з довкіллям за рахунок утворення складних молекулярних структур, отримуючи негативну ентропію з довкілля – автотрофний (від Сонця шляхом фотосинтезу) або шляхом трофічних зв'язків (через продукти харчування)[3]. Очевидно, що в процесі енергообміну біоб'єктів з довкіллям, відбувається і інформаційний обмін. У роботі [1] запропонований підхід, що об'єднує ці два процеси.

Якщо ентропію вважати мірою невизначеності або недостатності інформації про систему, а інформацію – навпаки, то для будь-якої системи справедливий закон збереження інформації:

$$S + I = \text{const},$$

де S – ентропія,

I – інформація.

Ентропія також може бути представлена виразом $S = K \cdot \ln \Gamma$, де K – постійна Больцмана, Γ – статична вага системи (характеризує кількість способів реалізації системи).

З іншого боку, інформація про систему пов'язана із статистичною вагою виразу $I = C \cdot \log \Gamma$, де C – деяка постійна. У роботах [1,2] вважають, що постійна $C = 1$, а основу логарифма вибирають рівним двом (що відповідає мінімальній статистичній вазі системи з інформацією в один біт ($[I] = \text{біт}$)), тоді $I = \log_2 \Gamma = (\log_2 e) \ln \Gamma$, $\ln \Gamma = I / \log_2 e$. Тепер вираження, що зв'язує ентропію і інформацію, можна представити як:

$$S = (KI) / \log_2 e = 2,3 \cdot 10^{-24} I,$$

а в якості розмірності [S] необхідно взяти ентропійні одиниці ($[S] = [K] = \text{кал/град}$).

У роботах [1,2] приведена інформаційна і ентропійна оцінка багатоклітинного організму на прикладі людини $I_{\text{орг.люд.}} = 1,31 \cdot 10^{26}$ біт $S_{\text{орг. люд.}} \approx 301,5$ ентропійних одиниць. За цією оцінкою вважають, що з позицій термодинаміки виникнення життя вимагає дуже малих енергетичних витрат, а протікання життєвих процесів характеризується надвеликим об'ємом специфічної інформації. Як наслідок, роблять висновок, що вплив на організм будь-якого фізичного поля може мати як енергетичний, так і інформаційний характер[3].

Питання про абсолютну величину енергії інформаційного впливу розглянемо з урахуванням наступних властивостей біологічних об'єктів[4]. По-перше, біооб'єкти – система нелінійна, і зміни можуть грати роль тригера, спускового механізму, що переводить систему в інший режим функціонування; по-друге, можливий резонансний механізм, коли найбільш суттєва інформативна частота впливу, а його інтенсивність не грає принципової ролі. Реакція живих організмів на зовнішнє електромагнітне поле нелінійна. Вона нагадує криву деформації матеріалу при механічному навантаженні зразка (спочатку залежність реакції від інтенсивності практично пряма, потім – плато, далі знову зростання і при критичних значеннях – руйнування). На рис. 1.1 залежність коефіцієнта індукції K_i синтезу коліцину від щільності потоку потужності p електромагнітного випромінювання досліджена до стадії «плато».

Продовження експерименту до стадії «зламу» небезпечно для випробовуваного об'єкту. Графік на цьому рисунку примітний тим, що він залишиться вірним і у тому випадку, якщо по осі ординат поставити чисельну характеристику практично будь-якої життєвої функції організму, а по осі абсцис – потужність впливу (у відповідних межах).

Таким чином, нижню межу енергії інформаційного впливу визначити з термодинамічних позицій досить складно.

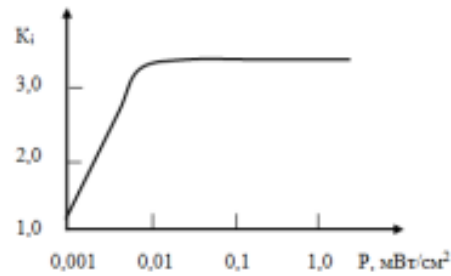


Рисунок 1.1 – Приклад залежності реакції біоструктури від інтенсивності впливу електромагнітного поля

В якості верхньої межі інформаційної впливу дослідники пропонують вибрати нетепловий критерій, тобто енергія впливу має бути істотно нижча енергії біохімічних процесів, що протікають в живому організмі і не впливають на біологічну функцію теплового поля об'єкту. Оскільки в роботі розглядаються ефекти впливу електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону, то пропонується в якості робочого значення рівня нетеплового інформаційного впливу узяти інтенсивність шумоподібного випромінювання живих клітин в цьому ж діапазоні частот рівного величині спектральної щільності потужності не вище 10^{-16} Вт/см² Гц.

1.1.2 Амплітудно–частотні властивості ЕМП.

Дослідження впливу низькоінтенсивних електромагнітних полів (ЕМП), проведені на моделях, ґрунтованих на законах рівноважної термодинаміки, призводили до висновку, що ці поля занадто слабкі, щоб взаємодіяти з біомолекулярними системами і тому не можуть впливати на фізіологічні функції. Проте в дослідженнях біоефектів на клітинному і молекулярному рівнях, де увага була сфокусована на енергіях, що не викликають нагрівання тканин, виявлено, що слабкі ЕМП значно посилюють дію слабких сигналів, що виникають при зв'язуванні гормонів, антитіл і нейротрансмітерів з рецепторними зонами на мембрані [5]. Виявилось, що ключову роль в цьому грають іони

кальцію. Ці дослідження вказують, що польова організація живої матерії знаходиться на значно тоншому рівні, ніж структурна і функціональна організація її молекул.

Амплітуда ЕМП оцінюється з позиції ефекту взаємодії енергії з функціональними системами живого організму. Високоамплітудні (високоінтенсивні) ЕМП, незважаючи на протидію механізмів терморегуляції, призводять до підвищення температури тіла, тому на перше місце виходять реакції організму, пов'язані з порушенням терморегуляції. Середньоамплітудні (середньоінтенсивні) ЕМП продукують в організмі надмірну кількість тепла, що компенсується роботою системи терморегуляції. Низькоамплітудні (низькоінтенсивні) ЕМП практично не впливають на роботу системи терморегуляції і не викликають істотних змін в температурі тіла організму.

Прийнято вважати, що якщо загальне або локальне підвищення температури організму під дією інтенсивності ЕМП не перевищує величини флуктуації природного теплового фону ($T < 0,1^{\circ}\text{C}$), то воно не є головним чинником впливу. Умовною межею нетеплових ЕМП прийнята щільність потоку ЕМП 10 мВт/см^2 , при якій підвищення температури шкіри людини не перевищує $0,1^{\circ}\text{C}$, що не вважається фізично значимою величиною. Слід зазначити, що ця величина значно вище гранично допустимих гігієнічних рівнів ЕМП в діапазоні частот 30 МГц – 300 ГГц, встановлених законодавствами багатьох країн (в Україні $2,5 \text{ мкВт/см}^2$).

При взаємодії неіонізуючих ЕМП з організмом теплові ефекти залежать від амплітуди і частоти випромінювання, а також від діелектричної проникності тканин. Порогові інтенсивності ЕМП для теплових ефектів в тканинах зменшуються з підвищенням частоти і коливаються від 10 – 50 мВт/см^2 в кілогерцовому діапазоні та до 7 мВт/см^2 в крайвисокому частотному (КВЧ) діапазоні. За іншими даними, поріг чутливості шкіри спини людини при тепловій дії ЕМП істотно розрізняється при впливу мікрохвиль різних частот: $4,5 \pm 0,6 \text{ мВт/см}^2$ при частоті 94 ГГц і $63,1 \pm 6,7 \text{ мВт/см}^2$ при частоті 2,45 ГГц. Очевидно,

що метод КВЧ терапії, в якому використовуються інтенсивності 1–7 мВт/см², застосовується на межі теплової і нетеплової дії міліметрових хвиль.

Експериментальні дослідження впливу низькоінтенсивних (менше 10 мВт/см²) міліметрових хвиль широко проводилися і були сконцентровані на двох напрямках. У першому з них використовувалися вузькосмугові генератори, налаштовані на певні частоти КВЧ-діапазону, а в другому застосовувалися шумові джерела, що генерують широкий спектр частот. До групи спеціальних генераторів слід також віднести прилади, що генерують широкосмугові сигнали наднизької (10^{-17} – 10^{-21} Вт/см² Гц) інтенсивності, що набуває особливого значення у зв'язку з виявленням віддалених негативних наслідків в діапазоні КВЧ[9].

Вважають, що здатність ЕМП нетеплової інтенсивності чинити регулюючу дію на функції живих організмів властива широкому діапазону частот, включаючи УКВ і довші хвилі при щільності потоку потужності (ЩПП), що не перевищують, при тривалому впливі.

При низьких частотах (нижче 50 Гц, а також між 50 і 200 Гц) ЕМП взаємодіють з біологічними тканинами не лише електромагнітним, але і механічним шляхом, створюючи вібраційний ефект. Амплітуда вібраційних відповідей тканини мозку постійна при частотах вібрації нижче 50 Гц, але при частотах між 50 і 200 Гц в тканині мозку спостерігається резонансна відповідь, яка зникає при частоті понад 200 Гц. Екзогенні низькочастотні ЕМП, діючи на живу тканину, викликають фізичні ефекти в клітинах: порушення їх мембранних потенціалів; зміна руху іонних струмів і перерозподіл іонів на поверхні клітин; поява механічних сил на поверхні клітин [6].

Під впливом зовнішніх ЕМП нетеплового впливу або нетеплових ЕМП мікрохвильового діапазону, модульованих низькочастотними коливаннями, можуть істотно змінюватися різні функції клітин, органів і систем, включаючи передачу інформації і продукцію ендогенних ЕМП. Виявлено, що в основі реакцій організму на дію таких ЕМП лежать нелінійні нерівноважні процеси в

критичних точках проходження сигналів через мембрани клітин. Ці події пов'язані з квантовими станами і резонансними відповідями у біомолекулярних системах.

Деякі діапазони ЕМП добре відомі і давно використовуються в клінічній практиці, наприклад, інфрачервоний, оптичний, ультрафіолетовий, ультрависокочастотний, надвисокочастотний. Інші діапазони ЕМП застосовуються в практичній медицині порівняно недавно. На початку 80-х років увагу лікарів притягнула інформація про високу лікувальну дію ЕМП мікрохвильового діапазону.

Згідно загальноприйнятої класифікації, до мікрохвиль відносять ЕМП з частотами від $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Мікрохвилі об'єднують ультрависокочастотне (дециметрове) випромінювання з частотою від $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^9$ Гц, надвисокочастотне(сантиметрове) випромінювання з частотою від $3 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^{10}$ Гц, вкрайвисокочастотне (міліметрове) з частотою від $3 \cdot 10^{10}$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц і дециміліметрове – з частотою від $3 \cdot 10^{11}$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц.

У області мікрохвиль високу лікувальну дію має діапазон міліметрових хвиль – діапазон з довжиною хвиль в повітрі 10^{-2} – 10^{-3} м (10...1 мм). Була виявлена незвичайна ефективність дії міліметрових хвиль на функції живих організмів. Уперше взаємозв'язок між міліметровими хвилями і біологічними структурами теоретично обґрунтував Г. Фрелих. Згідно з його гіпотезою, мембрани живих клітин мають дипольні коливання в міліметровому діапазоні частот (100–1000 ГГц). Як було сказано вище, енергія кванта міліметрових хвиль ($\lambda = 1-10$ мм, $\nu = 30-300$ ГГц) менше енергії електронних переходів, але здатна активувати коливання молекул і впливати на їх слабкі хімічні зв'язки. Г.Фрелих припустив, що, завдяки енергії метаболізму, в полярних молекулах виникають локальні нелінійні осередки коливань, які об'єднуються в довгий ланцюг резонансно-пов'язаних когерентних коливань частот, що проявляються на усіх системних рівнях організму.

Біоефекти міліметрових хвиль одними з перших досліджували наукові групи в Україні, Канаді, Німеччині та інших країн. В ході експериментальних досліджень і практичного застосування був виявлений терапевтичний, протибольовий, імунно-стимулюючий, радіопротекторний, протівірусний і антибактеріальний ефекти цієї області ЕМП [6].

1.1.3 Спектри біологічно значимих частот

Відомо, що більшість процесів в організмі людини протікають циклічно. Будь-яку біологічну систему можна розглядати як нелінійну і автоколивальну, тобто по суті, як набір пов'язаних синхронізованих нелінійних осциляторів. Відомі два типи біологічних ритмів : ендогенні і екзогенні. Перші обумовлені існуванням автоколивань в живому організмі, другі – прояви циклічних змін зовнішнього середовища. Практично усі земні ритми – ритми місця нашого існування – співпадають з ритмами Сонця і планет Сонячної системи. Сонячна система – сама по собі автоколивальна. Спільність же реакцій біологічних систем очевидна.

Є частотні вікна, в межах яких найяскравіше виражена реакція біооб'єкту. Ці вікна виявлені практично у усіх досліджених діапазонах частот, але переважно вони розташовані в діапазоні до 50 Гц і в діапазоні міліметрових хвиль. Можливо, більшість біоефективних частот пов'язана з резонансними ефектами [8]. Резонансних механізмів багато, але експериментальні дані показують, що найбільш виражена реакція організму виникає при частотах коливань впливаючого поля, близьких до частот параметричного резонансу[7]:

$$\nu_i = \frac{2\nu_0}{n},$$

де n – ціле число;

ν_0 – власні частоти мікро– і макроструктур організму.

Вікна бувають «депресивні», в них ефект дії негативний: погіршення самопочуття, розвиток захворювань(переважно онкологічних), підвищена нервова збудливість, депресивні стани і т. п.). Вікна, які «збуджують», тут ефект дії позитивний: поліпшення самопочуття, лікування захворювань, поліпшення пам'яті і т. п.

У клітинах, відповідно, змінюються швидкості протікання електрохімічних процесів; змінюється швидкість поширення нервових імпульсів.

Реакція на штучний електромагнітний шум; походження «біоефективних частотних вікон». Крім того, що біоефективні частоти і рівень поля, який треба відчуватися, «записувалися» живими організмами дуже довго. Проте, безліч електромагнітних шумів з'явилася зовсім нещодавно в порівнянні з часом виникнення людини на Землі. Отже, можна припустити, що реакція людини і на дію штучно створених полів деяких частот обумовлена «звичкою» реагувати на поля природного походження таких же частот.

Розглянемо, яким коливанням природного походження відповідають експериментально знайдені біоефективні частотні вікна. Низькочастотне вікно до 40 Гц відповідає діапазону варіацій геомагнітного поля, обумовлених шумановськими резонансами, частотами іоносферного альвенівського резонатора і резонансними коливаннями магнітних оболонок. Усе це – частоти, що співвідносяться з власними частотами великомасштабних структур організму (серця, нервовою і кровоносною систем і т. п.) [7]. Біоефективні вікна близькі до гігагерца починають грати роль резонансів дрібномасштабних структур : мембран, ДНК і т. п., що по частотному діапазону відповідає реліктовому випромінюванню космічного простору. Виходячи з цих фактів, можна висунути припущення, що вікна біоефективних частот не випадкові і визначаються не стільки внутрішньою будовою нашого організму, скільки «будовою» зовнішнього середовища.

Принцип суперпозиції і здатність біооб'єкту виділяти природне поле з штучного. Як вказувалося раніше, електромагнітний техногенний шум може бути набагато вищий по інтенсивності, ніж природний геомагнітний шум і рівень інтенсивності геомагнітного поля. Проте статистика показує, що активніше людина реагує на зміни саме геомагнітного поля. Очевидно відбувається селекція слабого природного поля з техногенного сильного.

З принципу суперпозиції полів виходить, що сильне поле включає слабке. Здавалося б, неможливо виділити слабке інформаційне з сильного фонового. Але відомо, як відрізняють поле магнітних аномалій від великомасштабного поля Землі – по просторовому градієнту. Поле локальних аномалій швидко убиває з відстанню. Людина ж, як протяжна субстанція, знімає не лише інтегральну характеристику навколишнього простору, але і диференціальну. Переміщаючись, до того ж, в просторі, організм здатний оцінювати яке поле є локальним шумом, а яке – великомасштабними варіаціями геомагнітного поля. Фізичною основою такої оцінки можуть бути струми, що збуджуються в різних частинах організму на різних макро і мікрорівнях його будови. Детально аналізуючи приведену структуру можна знайти відповідні біологічні ефекти дії електромагнітних випромінювань на будь-якій ділянці приведенного спектру, включаючи радіочастотний діапазон [9].

Проте найбільш виражений біологічний ефект був виявлений в міліметровому діапазоні довжин хвиль (30...300 ГГц). Найбільше число дослідників вказують інтервал частот від 40 ГГц до 65 ГГц.

1.2 Аналіз методів та засобів формування електромагнітного випромінювання

Розглядаючи узагальнені міркування, приведені в попередньому розділі, можемо виділити два радіотехнічні способи отримання електромагнітні імпульси (ЕМІ) із заданою цільовою функцією впливу [3].

Перший спосіб – побудова ряду діапазонних генераторів з плавною налаштуванням по частоті і амплітуді (інтенсивності) випромінювання, можливістю розширення спектру, шляхом зміни форми сигналу, застосуванням модуляції. Апаратна реалізація цього способу має інженерні рішення, що склалися, аж до верхньої межі дециметрового діапазону. Проте перекриття КВЧ діапазону зв'язане з необхідністю наявності досить великої кількості вузькосмугових апаратних засобів.

Перевага 1-го способу в принциповій можливості виявлення гострорезонансних ефектів при проведенні біологічних і медичних досліджень. До недоліків – слід віднести дороговизну і складність апаратної реалізації, що затрудняє використання такого способу в побудові пристроїв, для практичної медицини.

Другий спосіб – одночасне формування широкосмугового електромагнітного випромінювання наднизької інтенсивності шляхом використання імпульсних генераторів або теплових джерел. На відміну від завдань широкосмугової радіолокації, зондування, телекомунікацій, тут не потрібні джерела великої потужності. Явище тригерної залежності біологічного ефекту від нетеплових рівнів потужності впливу дозволяє мати велику нерівномірність амплітудно–частотної характеристики спектру ЕМІ. Основною вимогою до апаратної реалізації залишається присутність в спектрі біологічно активних складових. Вплив широкосмуговою ЕМІ дозволяє досягти інформаційного біологічного результату на частотах гострорезонансних ефектів, одночасно не створюючи енергетичного (теплого) навантаження на інших ділянках спектру.

В якості джерел широкосмугових електричних коливань(шумів) радіочастотного діапазону низької інтенсивності сучасна радіотехніка виділяє теплові, напівпровідникові, електровакуумні і газорозрядні(плазмові) генератори[10].

На перший погляд найбільшу біологічну адекватність впливу повинні створювати теплові генератори, які при певній температурі робочої речовини

мають достатню складову випромінювання в радіочастотному діапазоні. Але в їх випромінюванні неминуче є присутніми компоненти інфрачервоного діапазону, дія яких виходить за межі нетеплового критерію.

Найбільш прогнозовані спектри широкосмугового випромінювання з використанням різних методів модуляції забезпечують імпульсні генератори на напівпровідникових і електровакуумних приладах. До недоліків цих генераторів можна віднести зайву детерміновану відтворюваність спектрів при зменшенні шумоподібності діючого чинника.

Усунути вказані недоліки приведених джерел випромінювання дозволяють пристрої, побудовані на використанні електричного розряду в газовій суміші при оптимальних концентраціях складових: тиску газу, матеріалі і формі електродів, відстані між ними, а також підборі оптимальних характеристик розряду. Динамічні процеси, що протікають в короткотривалій міжелектродній плазмі, є джерелом широкосмугового ЕМІ, яке за своїми властивостями відповідає вимогам забезпечення біологічного ефекту. При використанні імпульсних розрядів в системі металевих електродів, що повторюються з частотою що відповідає низькочастотному вікну біологічної сприйнятливості, розрядний струм збуджує коливання, спектр яких має лінійчасту структуру, подібну до спектрів імпульсних генераторів на напівпровідникових і електровакуумних елементах. Активна ширина цього спектру залежить від тривалості розряду і буде тим більше, чим коротше час розряду.

З позицій фізичних явищ, електричний струм газового розряду пов'язаний з процесами іонізації і виникнення плазми. Тому, окрім дискретної складової спектру струмів що збуджують електромагнітні коливання виникатимуть коливання, обумовлені радіофізичними властивостями плазми .

Невід'ємним компонентом є радіотеплове випромінювання плазми. Радіояркісна температура плазми може досягати тисяч градусів. Її величина складним чином залежить від температури, тиску, газового складу, хімічного складу електродів і ряду інших чинників, які безпосередньо або побічно

впливають на концентрацію електронів і іонів в плазмі. Характерно, що спектр теплового випромінювання плазми безперервний, аж до деякої критичної частоти, залежної в основному від концентрації електронів.

Наступна складова електромагнітного випромінювання плазми - це гальмівне випромінювання. Причина його виникнення безпосередньо пов'язана з прискореним рухом зарядів в міжелектродному просторі і гальмуванням зарядженої частки при іонізації, зіткненнями з іншими частками і поверхнею електродів. При цьому частина кінетичної енергії зарядженої частки придбаною під дією прискорювання електричного поля переходить в енергію квантів електромагнітного випромінювання. Спектр гальмівного випромінювання також безперервний.

Якщо на плазму діє магнітне поле, то до перерахованих видів випромінювання додається ще бетатронне (магнітно-гальмівне) випромінювання. Фізична суть цього випромінювання пов'язана з дугоподібною або спіралевидною траєкторією руху заряджених часток(в основному електронів) в магнітному полі. Бетатронне випромінювання відбувається на частоті, яка залежить від напруженості магнітного поля : $f \approx 2,8H$ [МГц], де H – напруженість магнітного поля.

Черенковське випромінювання(Вавилова–Черенкова) виникає за умов, коли швидкість електрона перевищує фазову швидкість поширення хвилі. Виникає за нерівноважних умов формування плазми. Має, як правило, селективний характер. Додатковою компонентою електромагнітного випромінювання плазми в радіочастотному діапазоні є випромінювальні квантові переходи між енергетичними рівнями молекул і атомів. Для цього випромінювання характерна виражена селективність спектральних ліній. Також, спектр цього випромінювання залежить від хімічного складу речовини, наявності домішок, аерозолів, співвідношення концентрацій іонів і нейтральних часток.

За певних умов плазма може бути джерелом когерентного випромінювання в над високочастотному (НВЧ) діапазоні. Можливо також збудження поперечних і подовжніх хвиль. Зважаючи на неможливість безпосереднього випромінювання подовжніх хвиль у вільний простір мають бути присутніми умови перетворення подовжніх коливань в поперечні, наприклад шляхом трансформації подовжніх коливань в поперечні на межі розділу середовищ з різною діелектричною проникністю [10].

Перераховані фізичні явища дозволяють вважати газорозрядне джерело електромагнітних коливань таким, що досить повно відповідає завданню формування біологічно значимого спектру при нетепловій формі впливу.

Висновки до розділу. До нетеплових форм впливу електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону відносять впливи, які викликають локальне підвищення температури біооб'єкту не більше ніж на $0,1^{\circ}\text{C}$. Причому нижня енергетична межа впливу і верхня можуть викликати однотипну біологічну реакцію. Домінуючим чинником, що визначає тип біологічної реакції, являється частота електромагнітного випромінювання. Додатковими чинниками можуть бути: когерентність, модуляція високочастотних коливань шумоподібними низькочастотними, поляризація випромінювання, локалізація області впливу на біологічний об'єкт.

До найбільш біоефективних областей частотного спектру відносять інфраредні низькочастотні коливання до 40-50 Гц і частоти міліметрового діапазону хвиль 30-300 ГГц.

Отримати прогнозований біологічний (лікувальний) ефект впливу електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону нетеплової інтенсивності можна застосувавши локальний (зональний) вплив широкопasmовим сигналом. Підтвердженням ефективності цього способу є численні біологічні і медичні дослідження

В якості джерела біоефективного електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону з не тепловим впливом найкращим варіантом є

використання імпульсного електричного розряду в повітряному середовищі в системі електродів спеціальної форми. Це рішення має переваги над імпульсними генераторами на напівпровідникових і електровакуумних приладах, теплових джерел випромінювання, а також має властивості плазми для формування випромінювання з параметрами необхідними для біологічних і медичних застосувань.

2 ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ У БІОЛОГІЇ ТА МЕДИЦИНІ

В розділі проаналізовано дослідження з використання електромагнітних технологій в медицині та біології, їх біофізичні основи, методи застосування в медицині та біології.

Використання електромагнітних випромінювань в медицині і біології відкриває нові можливості для лікування людей і тварин безмедикаментозними методами. Експериментальні дослідження останніх років показує, що для вирішення даних задач слід використати інформаційні електромагнітні випромінювання [11]. Основними напрямками в дослідженнях, що проводяться, можна вважати застосування ЕМП для підвищення продуктивності і немедикаментозного лікування захворювань людей та тварин .

Дія електромагнітних випромінювань робить стимулюючий вплив на імунні тіла та імунні лімфоцити, які визначають захисний потенціал організму, стійкість до дії інфекційних мікроорганізмів [11]. На основі викладеного можна зробити висновок про необхідність подальшого вивчення безпосередньої дії КВЧ-випромінювання на шкірне депо лімфоцитів і тучні клітини, а також біологічна активна точка (БАТ), як можливого ефективного механізму стимуляції імунної системи тварин.

2.1 Біофізичні основи електромагнітного випромінювання при лікуванні

Інтенсивні дослідження з тематики дії на біологічні об'єкти інформаційного електромагнітного випромінювання тривалий час ведуться: в Харківському національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харківському НТУСХ ім. П. Василенка; Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України.

З аналізу експериментальних досліджень по дії ЕМВ на біологічні об'єкти різної природи витікає, що вона має стимулюючу дію на функції кровотворення і склад крові біологічних об'єктів [12].

При певних біотропних параметрах ЕМП, використовуваних для опромінення тварин, дослідниками були встановлені зміни в вмісті білку і білкових фракцій, у збільшенні в крові міді, гістаміну, холестерину.

У експериментах також було встановлено, що ЕМВ КВЧ діапазону сприяє підвищенню резистивності еритроцитів до впливу низьких температур і знижує ефект рентгенівського опромінення.

У деяких роботах також підтверджується терапевтична дія ЕМВ міліметрового діапазону при лікуванні домашніх тварин. Лікування домашніх тварин ЕМВ проводили при отитах і гастроентеритах. Лікування медикаментами відчутних результатів не приносило.

Підтверджена позитивна роль опромінення хвилями міліметрового діапазону при лікуванні злоякісних пухлин, регенерації м'яких і кісткових тканин [13]. Аналіз дії ЕМВ міліметрового діапазону на різні біологічні системи дозволив встановити, що біологічна дія цього виду випромінювання заснована на резонансному характері дії і вибіркова для різних біологічних систем .

Також, встановлено, що ЕМП з відповідними біотропними параметрами (частота, щільність потоку потужності, експозиція, модуляція) можуть стимулювати обмінні процеси в хворих органах і лікування шлунково-кишкових хвороб .

Структурні моделі і принцип роботи біологічних об'єктів можуть бути обґрунтовані на основі кібернетики і біокібернетики. Будь-який живий об'єкт, у тому числі і клітини біологічних об'єктів, є кібернетичною системою. Особливістю біологічних об'єктів як біокібернетичних систем являється їх особливість міняти тактику і стратегію управління так, щоб оптимальним чином використати сприятливі умови розвитку і адаптуватися до несприятливих чинників місця існування. Враховуючи, що основою усіх інформаційних обмінів

в ноосфері є ЕМП, слід погоджуватися з гіпотезою, згідно якої в мітохондріях процес біологічного окислення завершується не створенням АТФ, а створенням високочастотного ЕМП і іонізуючого протонного випромінювання, які і складають біополе клітини біологічного об'єкту [14].

Таким чином, біополе – це особливий вид випромінювання, основу якого складає в нерозривній єдності іонізуюче протонне випромінювання, що несе інформацію, і високочастотне змінне ЕМВ, що виходить з живої істоти. Біополе породжується в «силових станціях» клітин – мітохондріях – в процесі біологічного окислення, що відбувається в них, багаторазово посилюється за рахунок безперервного злиття високочастотних змінних ЕМП і все збільшуваного прискорення в них важких елементарних часток протонів: біополе забезпечує енергією усі енерговитратні процеси в організмі на рівні квантових взаємодій, а також синхронний міжклітинний міжорганний зв'язок і постійно спрямоване в зовнішнє від організму середовище, а також спрямоване на взаємодію з іншими біополями [14].

Механізм генерації клітин розглядається як коливання заряджених клітинних мембран, підтримувані за рахунок енергії хімічних реакцій, внаслідок чого клітина набуває властивість електромеханічного генератора. Передбачається, що в результаті коливань мембрани виникає дипольна компонента, момент якого визначається виразом:

$$\tilde{p} = P_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

Величину КВЧ випромінювання можна оцінити як:

$$P_{\text{кл}} = \frac{N_{\text{ак}} Q_{\text{ак}}}{2 / (2\pi)^3 \times (\lambda g / r)} \times 10^{-7} \quad (2.2)$$

де $N_{\text{ак}}$ – механічна потужність коливання;

$Q_{ак}$ – добротність акустичних коливань мембрани.

λg – довжина хвилі ЕМП;

r – розмір мультипольного моменту.

При типових параметрах : $f = 40$ ГГц; $r = 2 \cdot 10^{-4}$; $N_{ак} \approx 10^{-14} \dots 10^{-15}$ Вт, що відповідає диполю з моментом $p = 2 \cdot 10^{-16}$.

Далі була розглянута модель, в якій клітинні осцилятори забезпечують взаємодію ЕМП клітин один з одним. Потужність одного диполя, витрачається на підкачку іншого, взята у відношенні до потужності КВЧ випромінювання клітини, виражається співвідношенням:

$$P_{1,2}/P_{кл} = \left[3/(2\pi)^3 \varepsilon \right] (\lambda g/R)^3 \sin\varphi, \quad (2.3)$$

де ε – діелектрична проникність середовища;

R – міжклітинна відстань;

φ – зсув фаз між одночасними коливаннями двох пов'язаних диполів.

Для типових параметрів: $\varepsilon = 20$; $\lambda g = 8$ мм; $\varphi = 90$; концентрація клітин 10^6 см⁻³ з (2.3) отримаємо, що $P_{1,2}/P_{кл} = 4$ при зв'язку осциляторів, рівному 10^{-8} .

Отримані в нульовому наближенні чисельні оцінки для потужності, якою обмінюються клітини по КВЧ ЕМП, показують, що для забезпечення надійної взаємної синхронізації клітин потрібна потужність у декілька разів більше потужності випромінювання клітин.

При синхронізації зовнішнього ЕМП змінює спектральні характеристики усіх автогенераторів, при яких фази коливань автогенераторів співпадають з фазою зовнішнього поля в цьому об'ємі біологічного об'єкту. Як впливає зробіт синфазні коливання здатні викликати конформаційні перебудови клітинних структур, впливати на проникність біологічних мембран і служити інформаційним сигналом для регуляторних систем усього мікрооб'єкту.

Новітні дослідження підтверджують концепцію хвилевої природи передачі генної інформації [15].

Початкова послідовність полягає в ототожненні живої клітини з фотонною обчислювальною моделлю об'ємного типу, з обробкою інформації на ЕМП. Механізм перемикавання генної активності в процесі життєдіяльності біологічних об'єктів є найважливішим при рішенні проблем патогенезу, управління розвитком зародків в ембріогенезі. Аналіз же цих процесів переконливо свідчить про механізм цієї передачі як такої, що має хвилеву природу – сигналах ЕМП, що керують генною активністю.

Висока ефективність хвиль діапазону КВЧ для відновлення і підтримки гомеостазу живих організмів пов'язана з тим, що використовувані сигнали імітують сигнали, генеровані в тих же цілях самими організмами. КВЧ медицина заснована на відновленні за допомогою випромінювань діапазону КВЧ власності інформаційно-управляючої системи організму. З цим пов'язана і спостерігається при КВЧ-терапії повнота оздоровлення організму і можливість відносного швидкого усунення край важких порушень, а також відсутність небажаних побічних реакцій.

Передбачається, що стимулююча дія інформаційних ЕМП КВЧ діапазону на процес лікування пов'язана з формуванням і перебудовою біорідин, що характеризують процеси їх структурної альтерації. Локальна дія електромагнітних випромінювань на АПТ викликає трансформацію рідкокристалічних структур не лише безпосередньо в цитоплазмі клітин тканин, але і крові [11].

Безліч ефектів від дії інформаційних ЕМП на біологічні системи пов'язана з водою, яка в конденсованій фазі є сумішшю гексагональних фрагментів. Гексагональні фрагменти залежно від умов можуть об'єднуватися в кластери різного розміру. Співвідношення концентрації і розміри кластерів визначають структурний стан водного матриксу. Кластерні структури знаходяться в коливальному стані і утворюють систему осциляторів. Синфазні коливання

осциляторів здатні викликати конфірмаційні підстроювання клітинних структур, впливати на проникність мембран і служити інформаційним сигналом для регуляторних систем усього біологічного об'єкту [11].

Молекули води, що містяться у біологічних системах, завжди знаходяться під впливом присутніх в цих системах молекул речовин. Типи міжмолекулярних взаємодій визначають характер поглинання мм випромінювання, у тому числі впливають на глибину проникнення випромінювання. При цьому незалежно від того, чи являється водна система молекулярним розчином або колоїдним (шкіра), характер поглинання визначається хімічною природою присутніх речовин і загальним вмістом води в системі.

Слід зазначити, що при переході від низькомолекулярних речовин до високомолекулярних з'являється специфіка міжмолекулярних взаємодій, обумовлена структурою молекул цих з'єднань, що проявляється в характері поглинання мм-випромінювання такими системами.

Одним з можливих механізмів позитивної дії міліметрових (ММ) хвиль на організм пов'язаний з електроакустичними явищами на клітинних мембранах. Акусто-електричні хвилі під дією ММ-випромінювання можуть виникати також на внутрішніх мембранах мітохондрій, порушуючи хеміосмотичне сполучення. Це пов'язано, мабуть, з тим що погіршуються умови для клітинного дихання, зокрема перехід електронів по компонентах ланцюга цитохромів, що знижує споживання кисню клітинами, уповільнюючи процес утилізації іонів водню на внутрішній стороні мембрани. З іншого боку повинні враховуватися умови синтезу молекул АТФ, оскільки коливання мембрани приводять до збільшення швидкості руху протонів відносно мембрани по протонному каналу. Енергетика взаємодії молекул АДФ з протонами зростає, збільшуючи вірогідність проходження реакції $\text{АДФ} \rightarrow \text{АТФ}$. Таким чином, дію ММ-хвиль не можна зводити до простого відокремлення процесів клітинного дихання і окислювального фосфорилування. Швидше можна говорити про зміну балансу

хеміосмотичного сполучення на користь процесів фосфорилування при деякому антиоксидантному ефекті.

В якості одного з основних механізмів гнітючої дії КВЧ випромінювання на інфекційні мікроорганізми являється роль біологічних мембран в реакціях мікроорганізмів на електромагнітні випромінювання.

Вибір дослідниками біологічних мембран в якості предмета дослідження обумовлений, по-перше, їх повсюдністю і вирішальною роллю в життєдіяльності окремих клітин і організму в цілому; по-друге, їх першочерговістю до дій зовнішніх фізичних чинників. Тому, пошуки первинних механізмів дії низько енергетичних електромагнітних полів на клітину повинні йти паралельно з вивченням молекулярних принципів будови і функціонування мембран. Причому з'ясовувані специфічні механізми дії низько енергетичних ЕМП можуть визначати відповідні електричні і магнітні властивості мембранних молекул і процесів з їх участю [16].

Дія НВЧ-опромінення на біологічні мембрани багато в чому обумовлена особливостями структурної організації і функціонування мембран, що є високо впорядкованими надмолекулярними ансамблями з яскраво вираженими векторними властивостями. Основна частина, що поглинається в мембрані, надмірної НВЧ-енергії відразу ж розсіюється в середовище, підвищуючи загальну температуру об'єкту. При цьому дуже вірогідно, дія НВЧ-енергії спричиняє за собою перерозподіл електричних сил, що беруть участь в стабілізації мембрани. В результаті міняється ступінь зв'язування K^+ , Ca^{2+} і інших іонів в мембрані (у тому числі в іонних каналах), а також виникають локальні зміни фізико-хімічних властивостей поверхні мембран (мікрров'язкість, рН, поверхневе натягнення, ефективний заряд).

По сучасній теорії трансмембранного транспорту, саме електричне поле усередині мембрани створює потоки необхідних речовин із зовнішнього середовища всередину клітини і з клітини в зовнішнє середовище через спеціальні гідрофільні канали, найімовірніше, ліпопротеїнової природи.

Швидкість проникнення іонів через мембрану визначається такими властивостями, як товщина, значення діелектричної проникності, наявність фіксованих електромагнітних зарядів на мембрані, розміри і число пір в мембрані, наявність фіксованих зарядів в порах і деякими іншими .

Механічні порушення і дефекти в мембранах зв'язані з такими важливими біологічними процесами як злиття клітин, лізис, секреція, гемоліз та ін. [16].

Слід припустити, що відхилення мембран від рівноваги може статися під дією низькоенергетичних ЕМП за рахунок локального стискування в подовжньому або поперечному напрямі. Нині існують представлення, згідно з якими пробій мембран під дією електромагнітного потенціалу обумовлений особливостям поведінки локальних дефектів типу наскрізної пори в ліпідному шарі.

Теоретичний і експериментальний матеріал з проблеми біологічної дії мікрохвиль свідчить, що низькоенергетичне поглинання НВЧ випромінювання має резонансний характер, тобто біологічний ефект спостерігається у вузьких інтервалах. Біологічні макромолекули і надмолекулярні системи мають деякі власні частоти коливань, що лежать в діапазоні НВЧ. Так, у біомембранах полярні голівки фосфоліпідів здійснюють обертальний рух з частотою 10^9 Гц, а характеристична частота пов'язаної води лежить в області $10^8 \dots 10^9$ Гц. У області $10^{10} \dots 10^{11}$ Гц розташовані характеристичні частоти COO^- , NH_3^+ і інших груп, що відіграють важливу роль у функціонуванні білкових молекул. Кінетика елементарних актів ферментативного каталізу характеризується наступними часом: взаємне пізнавання ферменту і субстрату – $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с; локальні мікрохімічні зміни в активному центрі – $10^{-10} \dots 10^{-11}$ с; конформаційна релаксація у фермент-субстратному комплексі $10^{-3} \dots 10^{-7}$ с. Отже, у біологічному об'єкті резонансне поглинання енергії ЕМП можливе в дециметровому, сантиметровому і міліметровому довжин хвиль.

У роботі [17] вказано, що вплив зовнішніх КВЧ-випромінювань на організм пов'язаний з тим, що на певних резонансних частотах сигнали, що

надходять ззовні, імітують сигнали управління, інтегровані в ланцюгах збереження гомеостазу самим організмом.

Приведені в [13] експериментальні дані показали, що резонансна дія КВЧ-випромінювання на клітини пов'язана зі збудженням акустоелектричних хвиль в замкнених клітинних мембранах. Необхідно відмітити, що на відміну від електромагнітних хвиль, уповільнення яких в мембрані було б незначним, довжина акустоелектричної хвилі в мембрані приблизно в 10^6 разів менше довжини хвилі у вільному просторі, тому енергія електричного КВЧ-поля в ході коливань в основному перетвориться не в енергію магнітного поля, а в енергію акустичних КВЧ-коливань і назад.

Слід також відмітити, що величина щільності потоку потужності ЕМП для лікування тварин залежить від конкретних механізмів дії зовнішнього поля з патогенними мікроорганізмами, біотропних параметрів ЕМП, рівня шумів у біологічних об'єктах і повинна перевищувати рівень слабких нековалентних зв'язків в мікрооб'єкті (іонних взаємодій, водневих зв'язків і ван-дер-Ваальсових взаємодій). За допомогою цих зв'язків реалізується інформація, що знаходиться в послідовності макромолекулярних ланцюгів.

Незважаючи на певний прогрес, досягнутий в дослідженнях по дії низькоенергетичного ЕМП на біологічні об'єкти, багато первинних молекулярних механізмів цих дій теоретично і експериментально не розкриті. Ця неясність призводить до появи в літературі великого числа гіпотетичних механізмів дії ЕМП на біологічні об'єкти, які часто не відповідають фізичним процесам, що протікають в об'єктах. Це пов'язано з тим, що часто ускладнене, а іноді і неможливе знаходження адекватної простої моделі тих або інших фізичних процесів, що відбуваються у біологічних структурах. Знання ж первинних, фізично обґрунтованих механізмів дії низькоенергетичного ЕМП на біологічні системи, а також закономірностей взаємозв'язку молекулярного і системного рівнів, дозволить пояснити фазову направленість біоелектромагнітних ефектів.

2.2 Інформаційно хвильові технології в біології та медицині.

Використання мікрохвильового випромінювання у біології і медицині відкриває нові можливості для лікування людей і тварин безмедикаментозними засобами, що свідчить про високу терапевтичну ефективність, відсутності ускладнень і побічних ефектів.

Інформаційно-хвильова терапія (далі ІХТ) - синтез досягнень різних галузей європейської офіційної науки, східної медицини.

З погляду європейської науки ІХТ пов'язана з дослідженнями у галузі фізики космосу, космічних випромінювань та власних електромагнітних випромінювань людського організму.

З погляду східної медицини ІХТ спирається на її досвід, принципи цілісності та взаємозв'язку в організмі.

ІХТ – безконтактна технологія, що використовує принцип взаємодії з інформаційним полем хворого організму через окремі зони інформаційно хвильових взаємодій в діапазоні КВЧ.

Застосування інформаційних ЕМП КВЧ діапазону дає можливість лікування багатьох захворювань за рахунок залучення додаткових внутрішніх ресурсів (нервова, ендокринна, імунна, судинна системи та ін.), для відновлення систем саморегуляції, заблокованих негативною інформацією на клітинному рівні [18].

Основою цього методу є концепція розгляду людини і тварини як відкритої самоорганізуючої інформо-енергетичної нелінійної системи (ІЕС), що функціонує за синергетичними законами атракції, біфуркації, і дисипативності – у рамках єдиної теорії поля [18].

З аналізу експериментальних досліджень з впливу ЕМІ на біологічні об'єкти різної природи випливають, що зазначені впливу надаю стимулюючу дію на функції кровотворення та склад крові тварин. При певних біотропних параметрах ЕМП, використовуваних для опромінення тварин, були встановлені

зміни у вмісті білка та білкових фракцій у збільшенні в крові міді, гістаміну, холестерину .

В експериментах також було встановлено, що ЕМІ КВЧ діапазону сприяє підвищенню резистивності еритроцитів до впливу низьких температур, знижує ефект рентгенівського опромінення.

На даний момент часу в багатьох лікарнях вже використовують ІХТ, що дозволяє перервати хворобу в початковій стадії, коли вона перебуває на стадії порушення міжклітинних взаємодій і не виявляється чіткими клінічними симптомами.

У педіатрії технологія ІХТ виявилася просто знахідкою, оскільки дитячий організм дуже чутливий як до патогенних, так і здорових сигналів. Отриманий здоровий сигнал відновлює здоров'я малюка та дозволяє йому гармонійно розвиватися.

Сьогодні, використовуючи ІХТ в урології, гінекології, ендокринології та інших галузях медицини, більш ніж у половині випадків можна обійтися без хірургічного втручання – застосувавши органозберігаючі технології ІХТ.

Загоєння ран, переломів, виразок при використанні ІХТ відбувається в 1,5-2 рази швидше. При лікуванні ендокринної системи ІХТ є, мабуть, єдиним терапевтичним засобом, який не має протипоказань. Цікавий також супутній омолоджуючий та косметичний ефект.

У профілактиці ІХТ використовується з метою:

- Збільшення опірності організму до різних захворювань;
- профілактики та зняття хронічної втоми;
- Збільшення потенції;
- Зняття болю різного походження;
- профілактики остеохондрозу, радикулітів, невритів;
- Відновлення імунітету;
- профілактики розвитку атеросклерозу;
- збільшення тривалості життя, поліпшення її якості;

- запобігання загостренням та лікування хронічних захворювань різної етіології.

Висновки до розділу. В результаті аналізу біофізичних основ електромагнітного випромінювання при лікуванні ряд дослідників довів, що кожен біологічний об'єкт має біополе основу якого складає в нерозривній єдності іонізуюче протонне випромінювання, що несе інформацію, і високочастотне змінне ЕМВ.

Численні спостереження і аналітичні узагальнення лікувальних ефектів дають основу вважати, що КВЧ-випромінювання є чинником, що підвищує неспецифічну резистенцію організму. А оскільки в основі методу терапії міліметровими хвилями при їх резонансній дії лежить вплив на управляючу систему організму і коригування її для підтримки гомеостазу.

Проведений аналіз утвердив можливість прогнозованого терапевтичного ефекту від впливу ЕМВ КВЧ на БО. Для розробки приладу електромагнітної технології необхідно дослідити характеристики сигналу який повинен впливати на біологічно активні точки, його спектральну щільність, потужність.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОМІНЮВАЧА ГЕНЕРАТОРА ІСКРОВОГО РОЗРЯДУ

У розділі розглянуті основні фізичні процеси, характерні для газового розряду, розрахункові і фізичні моделі для визначення значень розрядного струму, його тимчасових характеристик і Фур'є гармонік. Виділені домінуючі чинники збудження електромагнітних коливань, у тому числі і для міліметрового діапазону довжин хвиль.

Розглянуто основні фізичні процеси випромінювання з відкритого кінця хвилеводу, приведено типову структуру діелектричної стержневої антени та її характеристика. Визначено вплив геометричних розмірів на діаграму направленості та вплив матеріалу з яких вона виготовляється. Розраховано коефіцієнт корисної дії для ДСА з заданими параметрами та потужність випромінювання.

3.1 Обґрунтування типу газового розряду

Основним аргументом для вибору газового розряду в якості джерела надширокосмугових електромагнітних коливань радіочастотного діапазону (від інфразвукових до частот міліметрового діапазону) послужило поєднання в ньому цілого ряду специфічних фізичних процесів.

До найважливішої властивості, що забезпечує широкосмуговість сигналу, необхідно віднести імпульсний розряд, що повторюється з деяким періодом T . При складі і тиску газу порядку атмосферного і високовольтного розряді, але малопотужному джерелі струму при пробі виникає переривчастий іскровий розряд.

Іскровий розряд характеризується проходженням електричного струму через газ по зигзагоподібних розгалужених вузьких каналах. Згідно класифікації приведеної в роботі цей електричний процес в газі відносять до імпульсного

стримерного розряду. Для цього процесу характерні швидкі зміни і взаємодія процесів прямої і ступінчастої іонізації і збудження ударами електронів і фотоіонізації газу в об'ємі, що призводить до розподілу через газ окремих ізольованих у просторі та часі стримерів і цей газорозрядний процес завершується утворенням високоіонізованих іскрових каналів при повному спотворенні первинного рівномірного поля іскрового проміжку. Також відзначається, що для цього типу розряду несуттєві елементарні процеси, що протікають на поверхні електродів розрядного проміжку. Таким чином, такий процес слід класифікувати, як періодичний імпульсний іскровий розряд в атмосферному повітрі із стримерним характером електричного пробою. Під стримерами розуміють - іонізовані канали, що розвиваються в розрядному проміжку завдяки посиленій фотоіонізації газу в об'ємі короткохвильовою радіацією, що випромінюється голівкою лавини, і шляхом злиття утвореної фотоелектронами лавини в один потужний стример. Введення поняття стримера дозволило пояснити динаміку іскрового розряду. Так, за даними експериментів, при нормальному атмосферному тиску і відстані між електродами 1 см час формування іскрового розряду менше 10^{-7} с.

Сучасна теорія іскрового розряду[19] ґрунтується на використанні ряду моделей, що описують розвиток окремих стадій розрядного процесу за конкретних умов його протікання. Попри те, що останнім часом досягнутий певний прогрес в описі повної картини розряду(від зародження електронної лавини до формування стримерного каналу), теорія іскри, яка дозволила б з єдиних позицій описувати еволюцію просторово-тимчасових розподілів струму і заряду в розрядному проміжку, практично відсутній. Труднощі, пов'язані з розробкою такої теорії, відносяться, передусім, до динаміки стримера, що являється істотно нелінійною. Крім того, різноманіття фізичних процесів, що впливають на протікання розряду(ударна іонізація, рекомбінації, утворення негативних іонів, різноманітні механізми електронної емісії, фотоіонізація, утворення об'ємного просторового заряду та ін.) не дозволяють створити моделі,

які враховували б усі ці процеси і одночасно піддавалися б теоретичному, або хоч би чисельному аналізу. У зв'язку з цим і аналіз процесів перенесення заряду в іскровому розряді, які могли б генерувати електромагнітне випромінювання в міліметровому діапазоні, може бути виконаний лише для окремих стадій процесу, моделі яких розвинені детальніше.

Нижче такі моделі представлені і використовуються для оцінок значень розрядного струму, його тимчасових характеристик і амплітуд Фур'є-гармонік, що дозволяє висунути припущення відносно механізмів генерування випромінювання іскровим розрядом, а також вирішити електродинамічне завдання збудження хвилеводу заданим розподілом струму для визначення спектральної щільності потужності випромінювання[20,21].

3.2 Модель формування електромагнітного випромінювання

Розглянемо імпульсний газовий розряд як первинний процес збудження широкосмугових електромагнітних коливань. Умови виникнення розряду :

- металеві електроди, розділені розрядним проміжком;
- міжелектродний газонаповнювач - повітря, за нормальних умов (тиск, хімічний склад, вологість);
- область розряду герметизована(захищена від попадання пилу і вологи);
- потужність іонізуючих випромінювань не перевищує норму, тобто 10 - 20 мкР/год.

Середнє значення напруги іскрового пробою між електродами, що проводять, в повітряному середовищі за нормальних умов складає 4.5 кВ на міліметр міжелектродної відстані.

При відстані між електродами 2...2,5 мм достатня амплітуда імпульсної напруги 8...10 кВ. Припустимо, що динаміка імпульсного іскрового розряду в реальному електричному ланцюзі може бути описана статичною вольтамперною характеристикою (ВАХ) газового розряду, яка відповідає часу впливу імпульсної

напруги (рис. 3.1). Причому напруга іскрового пробою U_n (запалення розряду) вища за напругу горіння U_r

При імпульсному розряді, після іскрового пробою, виникнення стадій тліючого розряду і тим більше, дугового, залежить від тривалості імпульсу і енергії джерела електричної енергії.



Рисунок 3.1 – ВАХ стаціонарного розряду

Залежно від резистивно- індуктивно- ємнісних властивостей розрядного ланцюга при поданні прямокутного імпульсу напруги величиною U_a може виникати одноразовий або багаторазовий цикл пробоїв розрядного проміжку. Еквівалентна модель розрядного ланцюга показана на рис. 3.2, де R , L , C - розподілені значення опору, індуктивності, ємності, а R_y - опір виточу, C_e - ємність електродів розрядника.

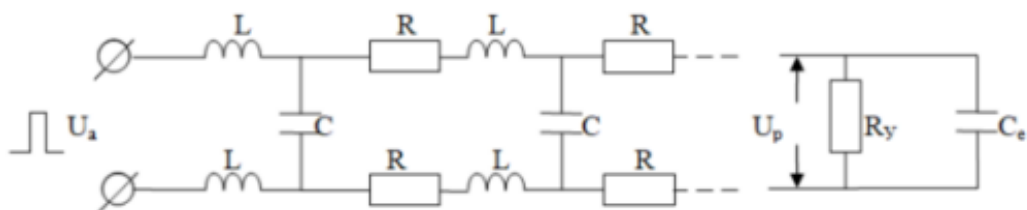
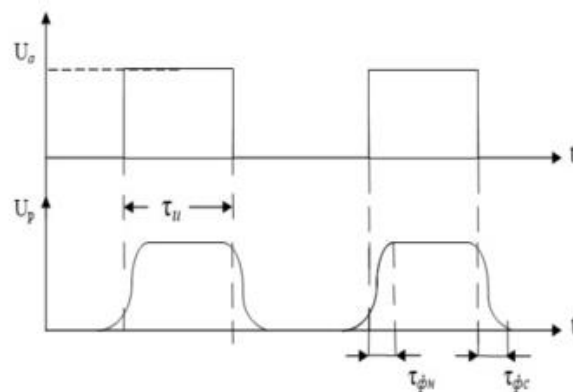


Рисунок 3.2 – Еквівалентна модель формування електромагнітного випромінювання

За відсутності пробую напруга на розряднику $U_p(t)$ матиме форму, показану на рис. 3.3.



а) Форма напруги на розряднику у відсутності пробую

Рисунок 3.3 – Модель газового розряду при відсутності пробую

Тривалість часів фронтів $\tau_{фн}$ - наростання і $\tau_{фс}$ - спаду залежать від конкретних значень R, L, C, C_e, R_y . Якщо $U_p \geq U_{п}$, де $U_{п}$ - напруга пробую, виникає однократний чи багаторазовий пробій, як показано на рис. 1.5 .

Окрім енергії підведеного імпульсу напругою U_a , на вірогідність виникнення одноразового або багаторазового пробую впливає активний опір плазмового проміжку в міжелектродному просторі у момент пробую. Враховуючи, що в розрядному ланцюзі після завершення пробую залишається накопичена енергія ($U_p(t) < U_r, U_{п}; U_a(t) \neq 0$) в реактивних L, C складових, то можливе виникнення затухаючих коливань змінного струму. Вид або характер протікання цього процесу показаний на рис. 3.4, де I_p - струм розряду.

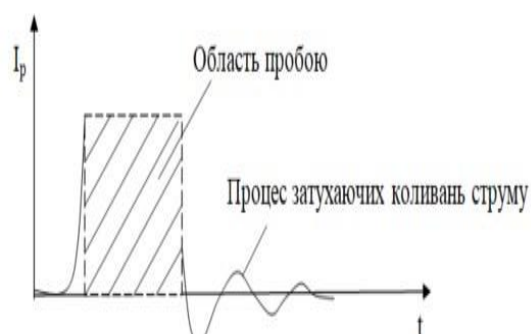


Рисунок 3.4 – Модель розрядного струму

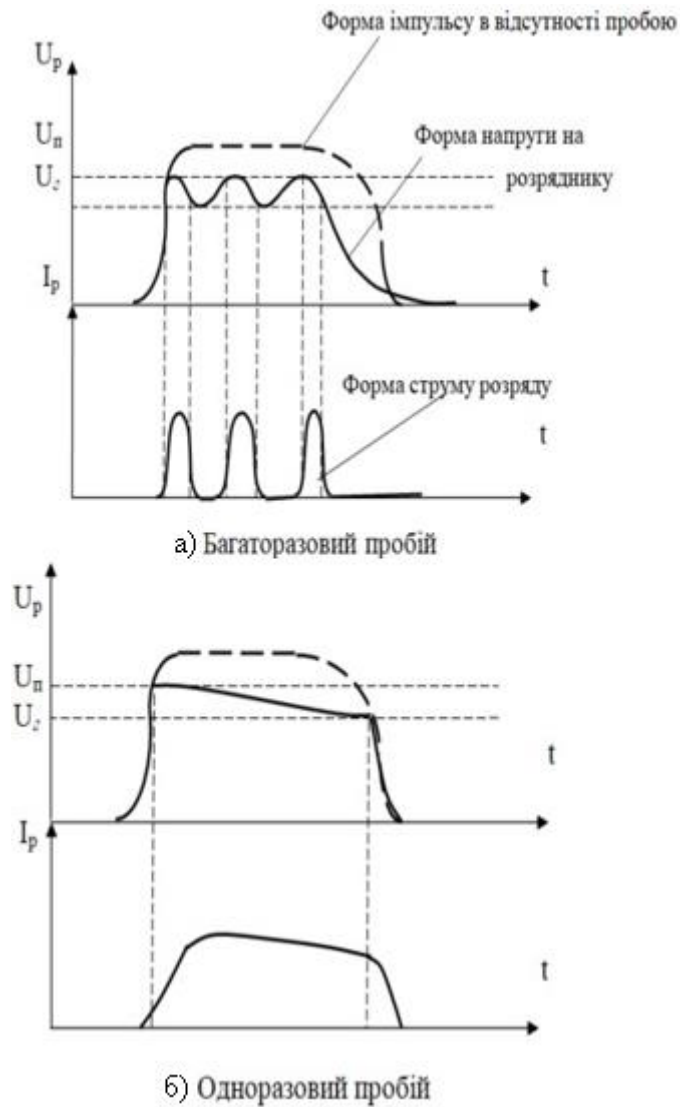


Рисунок 3.5 – Моделі варіантів газорозрядний процесів при багаторазовому і одноразовому пробою

Класифікуючи форму протікаючого струму, його можна віднести до імпульсного, а область пробою - спрощено представити у вигляді прямокутного імпульсу[22-24].

3.3 Метод формування електромагнітного випромінювання

Випромінювач в процесі іскрового розряду створює безліч полів різних типів. Більше того, можна стверджувати, що збудити в хвилеводі антени поле

тільки одного типу неможливо. Оскільки з позицій теоретичного аналізу стержневий напрямник може розглядатися як діелектричний хвилевід, застосуємо відповідну термінологію [25].

Дійсно, збудження поля пов'язане з введенням в хвилевід джерела, значить, поле в хвилеводі повинне задовольняти граничним умовам не лише на стінках хвилеводу, але і в точках, де знаходиться джерело, а поле одного типу задовольнити останній вимозі не можливо. Для цього знадобиться сукупність безлічі типів полів, які і утворюють в хвилеводі поле складної конфігурації.

Якщо розміри поперечного перерізу хвилеводу такі, що з безлічі типів полів лише одно, з найменшою критичною частотою (найбільшою критичною довжиною хвилі), може поширюватися в ньому, то усі інші поля будуть згасаючими. Такі поля в перенесенні енергії по хвилеводу не беруть участь, бо вони мають чисто коливальний характер. У міру віддалення від джерела напруженості згасаючих полів убивають. Значить, починаючи з деякої відстані від джерела, існуватиме фактично одна незгасаюча хвиля [26].

Структура поля несиметричної хвилі H_{11} , що виникає в круглому хвилеводі при способі збудження, приведеному на рис. 3.6, показана на рис. 3.7. Несиметричну хвилю E_{11} в такому хвилеводі можна збудити з торця двома штирями протифаз, паралельними осі хвилеводу.

При заповненні круглих хвилеводів однорідним ізотропним діелектриком структура поля в них не порушується.

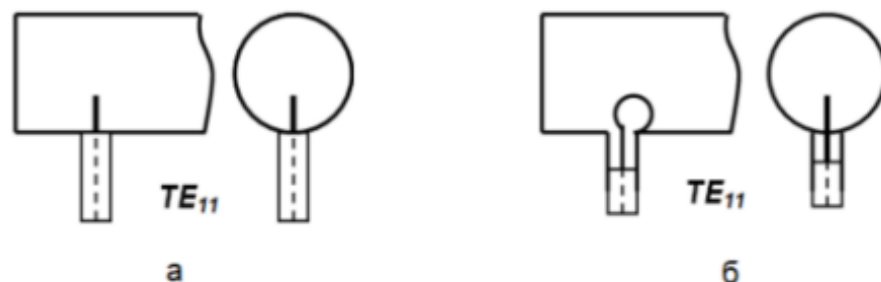


Рисунок 3.6 – Збудження несиметричних хвиль в круглому хвилеводі

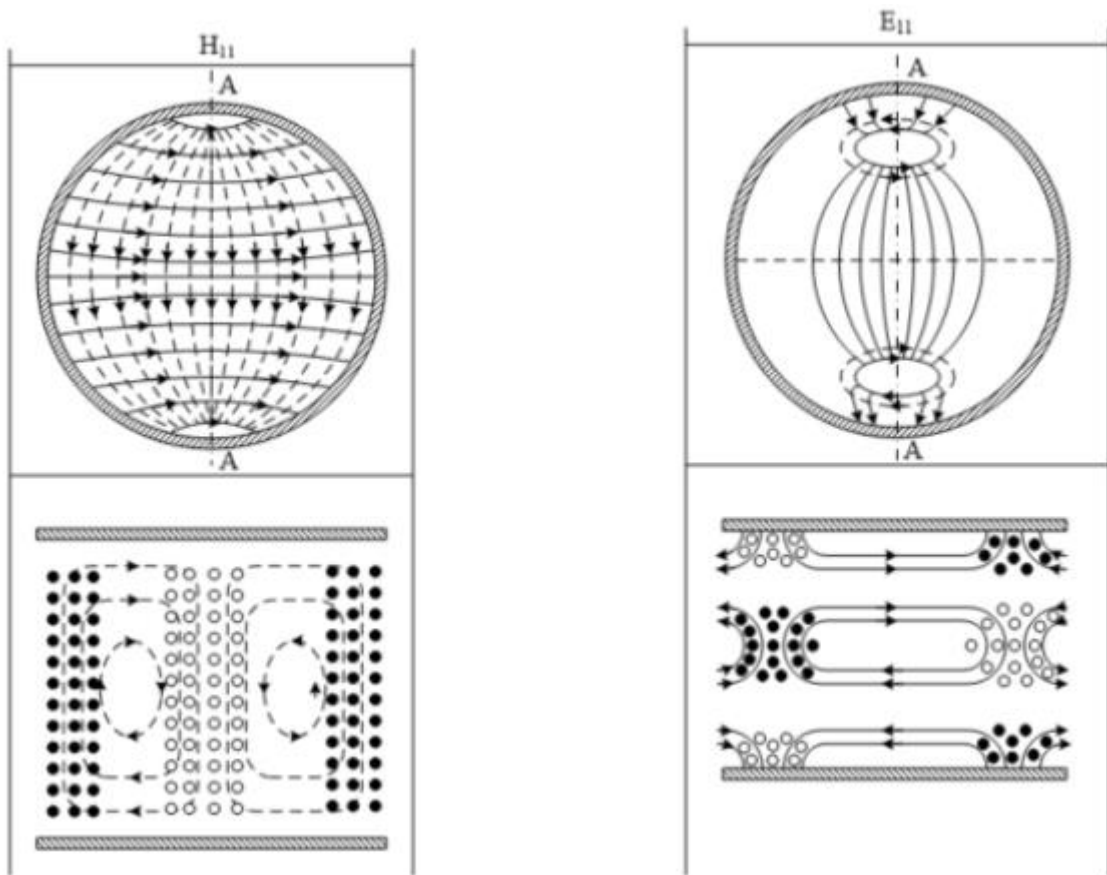


Рисунок 3.7 – Структура поля хвилі в круглому хвилеводі

У діелектричних же хвилеводах, що збуджуються з тим або іншим типом несиметричної хвилі, ситуація різко ускладнюється тією обставиною, що на відміну від металевого хвилеводу складові полів на межах розділу "діелектрик-повітря" не обмежуються стінками хвилеводу, а безперервні. Іншими словами, силові лінії електричного поля в діелектричному хвилеводі виходять назовні і замикаються через половину довжини хвилі. Так з'являється подовжня складова E_z , що свідчить про виникнення хвилі типу E_{11} (рис.3.8). Такі хвилі називаються гібридними (змішаними) і позначаються як HE_{11} . Перша буква означає первинну хвилю, гібридну, що викликала. При первинному збудженні в діелектричному хвилеводі хвилі E_{11} в ній існуватиме поле хвилі EH_{11} .

Хвилям, що виникають в стержні, відповідає певна система струмів зміщення, напрям яких співпадає з напрямом поляризації молекул діелектрика стержня, тобто з напрямом електричних силових ліній. Кожен елемент об'єму

стержня може розглядатися як елементарний випромінювач, в якому тече струм зміщення.

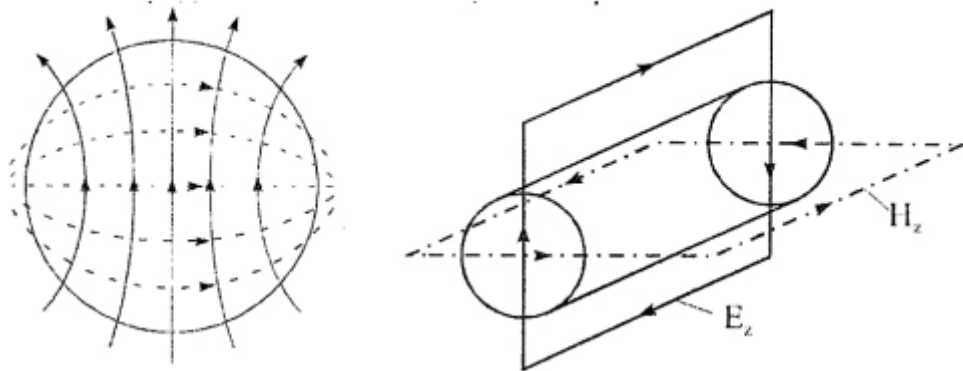


Рисунок 3.8 – Виникнення в діелектричному хвилеводі гібридної хвилі HE_1

Поле, створюване усією діелектричною антеною, дорівнює сумі полів усіх елементів вібраторів, а спрямовані властивості підкоряються теорії направлених антен [26].

Таким чином, нам необхідно мати випромінювач, напрям максимальної дії якого повинен співпадати з напрямом його осі. Це можливо, якщо в системі струмів зміщення, що виникають у випромінювачі, переважає поперечна складова. Крім того, ця складова струму повинна мати який-небудь переважний напрям в поперечній площині. В цьому випадку найбільш сприятлива хвиля типу H_{11} , що має структуру поля, показану на рис. 3.7, в якій переважає поперечна складова вектору E , паралельному осі X .

3.4 Випромінювання з відкритого кінця хвилеводу.

Найпростішим випромінювачем є розкритт хвилеводу. В нашому випадку ми розглядаємо круглий хвилевід, який сам по собі є аксіально-симетричним і по якому поширюється основна хвиля TE_{11} . Розріжемо круглий хвилевід

перпендикулярно його осі. Початок прямокутної декартової системи координат розташуємо в площині перерізу (див. рис. 3.9). Вісь z такої системи координат співпадає з напрямом поширення хвильоводної хвилі. Вважаємо, що в такому хвильоводі поширюється тільки основна хвиля TE_{11} . А для того, щоб круглий хвильовід був одномодовим, повинні виконуватися наступні умови. Критична довжина хвилі TE_{11} рівна $3,41a$. Тут a – це радіус круглого хвильоводу (див. рис. 3.9). Починаючи з довжини хвилі $\lambda_0 = 2,62a$ по хвильоводу одночасно з хвилею TE_{11} поширюватиметься перша вища хвиля круглого хвильоводу TM_{01} . Отже, для того, щоб по круглому хвильоводу поширювалася тільки основна хвильоводна хвиля TE_{11} , його радіус потрібно вибирати з умови:

$$2,62a < \lambda_0 < 3,41a. \quad (3.1)$$

Для позначеної нами частоти $f_0 = 60$ ГГц ($\lambda_0 = 6,0$ мм) вибираємо радіус круглого хвильоводу a з наступної нерівності:

$$1,955\text{мм} < a < 2,545\text{мм}. \quad (3.2)$$

Для подальшого аналізу, з урахуванням приведеної нерівності (3.2), виберемо радіус круглого хвильоводу a рівним $2,387$ мм. Це відповідає діаметру стандартного круглого хвильоводу, по якому поширюється основна хвильоводна хвиля TE_{11} , $2a = 4,775$ мм. Крім того вважаємо, що оскільки в розкритті хвильоводу існує електромагнітне поле, то в зовнішній області створюється електромагнітне випромінювання. Найбільше поширення при аналізі подібного типу випромінювачів отримав апертурний метод. При цьому використовуються наступні допущення: - розкритт хвильоводу є випромінюючою апертурою; - поза розкритвом хвильоводу збудливе поле відсутнє і тому дорівнює нулю; - поле в розкритті хвильоводу вважаємо таким самим, як і в поперечному перерізі хвильоводу на відстані в декілька довжин хвиль від розкриття; - по даному

круглому хвилеводу поширюється тільки основна хвиля TE_{11} ; - відбиттям від розкриву хвилеводу нехтуємо; - електромагнітне поле в межах апертури хвилеводу вважаємо лінійно поляризованим . При цьому вектор електричного поля E хвилі TE_{11} паралельний осі y , а вектор магнітного поля H паралельний осі x (див. рис. 3.9).

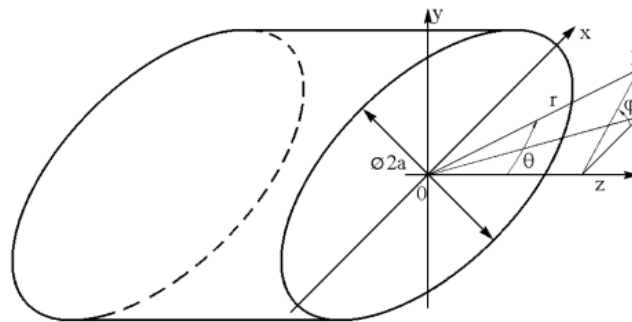


Рис. 3.9. – Система координат в розкритті круглого хвилеводу

Розрахований апертурним способом розподіл електромагнітного поля випромінювання з круглого хвилеводу, незважаючи на зроблені припущення, знаходиться в хорошій відповідності з вимірним. При використанні певного типу хвилі (у нашому випадку TE_{11}) результати тим точніше, чим більше розмір у апертури в порівнянні з довжиною хвилі λ_0 [26].

Крім того, відбиттям від розкриву можна нехтувати у тому випадку, якщо його геометричні розміри більше довжини хвилі. У нашому ж випадку виходить, що $2a / \lambda_0 = 4,775 / 6,0 = 1,06$. Таким чином, для отримання результатів розрахунку, які відображали б фактичний розподіл електричного поля поза круглим хвилеводом, необхідно вибрати $2a > \lambda_0$. Тому виберемо $2a / \lambda_0 = 1,5$. Звідси отримаємо, що $2a = 10$ мм.

В декартовій системі координат розподіл електричної компоненти збудливого поля запишемо в наступному виді:

$$\mathbf{E} = e_x E_x + e_y E_y + e_z E_z \quad (3.3)$$

Тепер по аналогії з тим, як це зроблено для декартової системи координат (3.3), запишемо вирази, що визначають збудливе поле в сферичній системі координат:

$$\mathbf{E} = e_r E_r + e_\phi E_\phi + e_\theta E_\theta \quad (3.4)$$

Використовуючи відомі формули [27] переходу, виразимо декартові координати через сферичні:

$$\begin{cases} E_x = -E_r \sin\theta \cos\phi - E_\phi \cos\phi \cos\theta, \\ E_y = E_r \sin\phi \sin\theta + E_\phi \cos\phi + E_\theta \sin\phi \cos\theta, \\ E_z = -E_r \cos\theta - E_\theta \sin\theta. \end{cases} \quad (3.5)$$

Ми розглядаємо круглий хвилевід, в якому збуджується тільки основна хвиля TE_{11} , розподіл електричного поля якої в межах розкриву лінійно поляризований, як ми поклали вище. В цьому випадку ця хвиля має тільки поперечну складову електричного поля E_y ($E_x = E_z = 0$) і тоді можемо вважати $E_r = 0$ (див. рис. 3.9). З рисунка виходить, що якщо розглядати E_x компоненту електричного поля, то тоді $\theta = \pi/2$, а $\phi = 0$. З першого виразу (3.5) видно, що другий і третій доданки дорівнюють нулю. І щоб E_x дорівнював нулю, E_r теж має дорівнювати нулю. На підставі сказаного вирази (3.5) набудуть вигляду:

$$\begin{cases} E_x = -E_\phi \sin\phi + E_\theta \cos\phi \cos\theta \\ E_y = E_\phi \cos\phi + E_\theta \sin\phi \cos\theta \\ E_z = -E_\theta \sin\theta. \end{cases} \quad (3.6)$$

Після підстановки значень складових електричного поля з (3.6) в співвідношення (3.3) отримаємо:

$$E = e_x(E_\phi \cos\phi \cos\theta - E_\theta \sin\phi) + e_y(E_\phi \cos\phi + E_\theta \sin\phi \cos\theta) - e_z E_\theta \sin\theta. \quad (3.7)$$

У сферичній системі координат складові електричного поля E_θ і E_ϕ для основної хвилі TE_{11} в розкритті круглого хвилеводу діаметром $2a$ визначаються виразами[60]:

$$E_\theta = A\omega\mu_a \left\{ 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta + r_0 \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \right\} J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} a \right) \frac{J_1(k a \sin\theta)}{\sin\theta}, \quad (3.8)$$

$$E_\phi = A\omega\mu_a k a \left\{ \cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} + r_0 \left(\cos\theta - \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right) \right\} J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}} a \right) \frac{J_1'(k a \sin\theta)}{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_0} \sin\theta \right)} \cos\phi, \quad (3.9)$$

де A – амплітудний коефіцієнт;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота;

$k = 2\pi/\lambda_0$ – хвильове число;

$\mu_a = \mu_0\mu_r$ – абсолютна магнітна проникність (μ_0 – магнітна стала, μ_r – відносна магнітна проникність);

λ_0 – як і вище, довжина хвилі у вільному просторі;

$\lambda_B = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_{кр})^2}$ – хвилеводна довжина хвилі;

$\lambda_{кр} = 3,41a$ – критична довжина хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі радіусу a ;

J_1 і J_1' – функція Бесселя першого порядку і її похідна по аргументу;

r_0 – одиничний орт.

З урахуванням зробленого вище припущення про лінійну поляризацію електричного поля хвилі TE_{11} в розкритті круглого хвилеводу ($E_r = 0$) вирази (3.8) і (3.9) можемо записати у виді:

$$E_{\theta} = A\omega\mu_a k a \left\{ 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right\} J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda_{kp}} a \right) \frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \sin\phi, \quad (3.10)$$

$$E_{\phi} = A\omega\mu_a k a \left\{ \cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right\} J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda_{kp}} a \right) \frac{J_1'(k a \sin\theta)}{1 - \left(\frac{\lambda_{kp}}{\lambda_0} \sin\theta \right)^2} \cos\phi, \quad (3.11)$$

Розглянемо E_x - складову електричного поля, що входить в співвідношення (3.7). Після підстановки в цей вираз значень E_{θ} и E_{ϕ} , визначуваних виразами (3.10) і (3.11), отримаємо:

$$E_x = E_{\theta} \cos\phi \cos\theta - E_{\phi} \sin\phi = A\omega\mu_a k a J_1 \left(\frac{2\pi}{\lambda_{kp}} a \right) \sin\phi \left[\left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \right] \times \\ \times \left[\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \cos\phi \cos\theta - \left(\cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right) \frac{J_1'(k a \sin\theta)}{1 - \left(\frac{\lambda_{kp}}{\lambda_0} \sin\theta \right)^2} \cos\phi \right] \quad (3.12)$$

З урахуванням того, що похідну по аргументу від функції Бесселя можна представити у виді:

$$J_m'(x) = \frac{m}{x} J_m(x) - J_{m+1}(x), \quad (3.13)$$

Запишемо вираз (3.12) у вигляді:

$$E_x = E_{\theta} \cos\phi \cos\theta - E_{\phi} \sin\phi = A\omega\mu_a k a J_1 \left(\frac{2\pi a}{\lambda_{kp}} \right) \left[\left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \right] \times \\ \times \left[\sin\phi \cos\phi \cos\theta - \left(\cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right) \frac{\cos\phi \sin\phi}{1 - \left(\frac{\lambda_{kp}}{\lambda_0} \sin\theta \right)^2} \left(\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} - J_2(k a \sin\theta) \right) \right] \quad (3.14)$$

Тепер розглянемо E_y - складову електричного поля, що входить в співвідношення (3.7). Як і вище, після підстановки в цей вираз значень E_θ і E_ϕ , визначуваних виразами (3.10) і (3.11) і з урахуванням (3.13), отримаємо:

$$E_y = E_\phi \cos\phi + E_\theta \sin\phi \cos\theta = A\omega\mu_a k a J_1 \left(\frac{2\pi a}{\lambda_{kp}} \right) \left[\left(\cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right) \frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \right] - \left[-J_2(k a \sin\theta) \frac{\cos^2\phi}{1 - \left(\frac{\lambda_{kp}}{\lambda_0} \sin\theta \right)^2} + \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \sin^2\phi \cos\theta \right] \quad (3.15)$$

Напишемо вираз, що визначає E_z - складову електричного поля, що входить в співвідношення (3.7). По аналогії з тим, як ми робили це вище, підставимо в цей вираз значення E_θ , визначуване виразом (4.10) і отримаємо:

$$E_z = E_\theta \sin\phi = A\omega\mu_a k a J_1 \left(\frac{2\pi a}{\lambda_{kp}} \right) \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \sin\phi \sin\theta. \quad (3.16)$$

У виразах (3.14) – (3.16) позначимо $C = A\omega\mu_a k a J_1(2\pi a/\lambda_{kp})$. Тепер можемо записати вирази, що визначають діаграму спрямованості круглого хвилеводу діаметром $2a$, в якому поширюється основна хвиля TE_{11} . Якщо покладемо $\phi = 0$, то з виразу (3.7) можемо отримати вираз, що визначає діаграму спрямованості даного хвилеводу в площині вектору \mathbf{H} хвилеводної хвилі (див. рис. 3.9). В цьому випадку з виразів (3.14) і (3.16) виходить, що $E_x = E_z = 0$, а E_y - складова електричного поля визначатиметься співвідношенням (див. вираз (3.15)):

$$E_y = C \left(\cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right) \left(\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} - J_2(k a \sin\theta) \right) \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda_{kp}}{\lambda_0} \sin\theta \right)^2}. \quad (3.17)$$

Враховуючи, що при скалярному перемножуванні одиничних ортів:

$$\begin{array}{cccc} & \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ \mathbf{e}_x & 1 & 0 & 0 \\ \mathbf{e}_y & 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{e}_z & 0 & 0 & 1 \end{array},$$

З виразу (3.7) отримаємо в остаточному виді вираз, що визначає діаграму спрямованості круглого хвилеводу в площині вектору \mathbf{H} .

$$|E_H|^2 = C^2 \left| \left(\cos\theta + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \right) \left(\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} - J_2(k a \sin\theta) \right) \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda_{kp}}{\lambda_0} \sin\theta \right)^2} \right|^2 \quad (3.18)$$

Якщо тепер покладемо $\varphi = \pi/2$, то з виразу (3.7) можемо отримати вираз, якій визначатиме діаграму спрямованості даного хвилеводу, по якому поширюється хвиля TE_{11} , в площині вектору \mathbf{E} (див. рис. 3.9). З виразу (3.14), як і у попередньому випадку, витікає, що $E_x = 0$. При цьому E_y - складова електричного поля, яка визначається виразом (3.15), матиме вигляд:

$$E_y = C \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \left(\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \cos\theta \right) \quad (3.19)$$

З виразу (3.16) отримаємо співвідношення для E_z - складової електричного поля:

$$E_z = C \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \left(\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \sin\theta \right) \quad (3.20)$$

Опускаючи проміжні викладення і з урахуванням того, що $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$, з виразів (3.7), (3.19) і (3.20) отримаємо в остаточному виді співвідношення, що визначає діаграму спрямованості круглого хвилеводу в площині вектору Е.

$$|E_E|^2 = C^2 \left| \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_B} \cos\theta \right) \left(\frac{J_1(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \right) \right|^2 \quad (3.21)$$

Таким чином, в результаті проведеного теоретичного аналізу ми отримали вирази (3.18) і (3.21), які описують діаграми спрямованості відкритого кінця круглого хвилеводу з хвилею TE_{11} в двох взаємно перпендикулярних площинах Н і Е. В якості наступного кроку побудуємо кутівий розподіл поля в площині вектору Н для радіусу круглого хвилеводу $a = 5$ мм. Для цього використовуємо вирази (3.18). Усі розрахунки проводитимемо на фіксованій частоті $f = 50$ ГГц ($\lambda_0 = 6,0$ мм). На рис. 3.10 представлена розрахована діаграма спрямованості відкритого кінця круглого хвилеводу, вказаних вище геометричних розмірів, в площині вектору Н (крива 1).

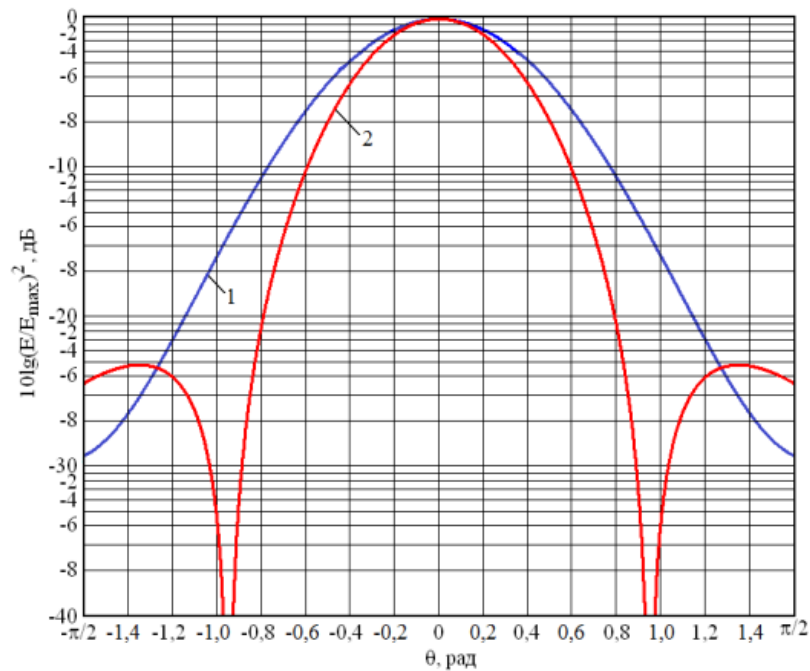


Рис. 3.10 – Діаграми спрямованості відкритого кінця круглого хвилеводу, побудовані в площинах векторів Н і Е основної хвилі TE_{11}

Як видно з приведенного рисунка, в цій площині ми маємо досить широку діаграму спрямованості круглого хвилеводу. Тут же приведена діаграма спрямованості круглого хвилеводу з хвилею TE_{11} в площині вектору E (крива 2), розрахована по формулі (3.21). В цьому випадку у вказаному діапазоні зміни кута θ в діаграмі спрямованості з'являються бічні пелюстки. Їх рівень складає -25 дБ. Крім того, ширина діаграми спрямованості відкритого кінця круглого хвилеводу в площині вектору H ширша, ніж в площині вектору E . Цей результат добре узгоджується з даними інших авторів[27].

Добре відомо, що дальня зона будь-якого випромінюючого розкриву визначається виразом $L \geq 2D^2/\lambda_0$. Тут D – найбільший геометричний розмір випромінюючої апертури. Для розкриву хвилеводу ($D = 2a = 4$ мм), що розглядається нами, дальня зона L розпочинається з відстані, рівної 8 мм. В цьому випадку діаметр основної пелюстки діаграми спрямованості круглого випромінюючого розкриву в двох взаємно перпендикулярних площинах (див. рис. 4.1) визначатиметься з рівнянь $x = 30 \text{tg} \theta_H$ і $y = 30 \text{tg} \theta_E$. При цьому ширина основної пелюстки діаграми спрямованості по рівню -3 дБ в площині вектору H (координата x) складає 10,2 мм. Ширина основної пелюстки діаграми спрямованості цього ж хвилеводу по рівню -3 дБ, але тепер в площині вектору E (координата y), складає 10,2 мм.

З приведенного графіку також видно, що діаграма спрямованості круглого хвилеводу діаметром 4 мм, по якому поширюється основна хвиля TE_{11} , має майже кругову форму. Проте, навіть в площині вектору E , в якій діаграма спрямованості даного розкриву по рівню -3 дБ вужче, ніж в площині вектору H , її діаметр перевищує дві довжини хвилі. Необхідно використати не відкритий кінець круглого хвилеводу, а інший випромінювач, який забезпечить необхідну діаграму спрямованості. Тому в якості наступного кроку розглянемо антени поверхневих хвиль (АПВ).

3.5 Діелектрична стержнева антена і її характеристика.

Діелектричні стержневі антени відносяться до антен поверхневих хвиль, з уповільненою фазовою швидкістю ($v_{\phi} < c$). Вони застосовуються на межі сантиметрового та дециметрового діапазонів хвиль.

На рис. 3.11 наведено найбільш типова схема діелектричної стержневої антени. Вона являє собою діелектричний стержень 1, збуджений круглим хвилеводом 2, збудником 3, імпульсний генератор 4, джерело живлення 5.

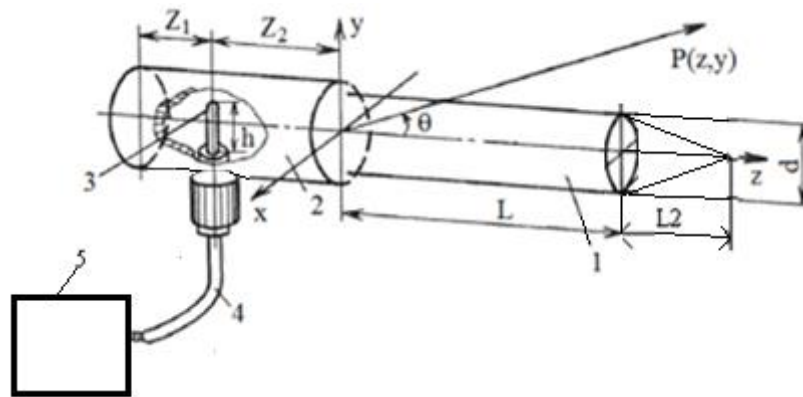


Рисунок 3.11 – Діелектрична стержнева антена

Залежно від вимог, які пред'являються антени, поперечний переріз стержня, збудник та його живлення можуть змінюватися. Найчастіше використовуються циліндричні та конічні стержні[28].

Діелектричний стержень антени можна розглядати як відрізок діелектричного хвилеводу. З теорії діелектричних хвилеводів відомо, що вони можуть поширювати як симетричні, так і несиметричні хвилі. Хвилі симетричного типу, як правило, не використовуються в діелектричних стержневих антенах, оскільки внаслідок осової симетрії вони не випромінюють уздовж осі стержня. Основною хвилею, що використовується з цією метою, є несиметрична хвиля типу HE_{11} , розподіл поля якої представлено на рис. 3.12 [28].

На відміну від хвилі типу H_{11} у круглому металевому хвилеводі, дотичні складові електричного поля хвилі до межі діелектрика відмінні від нуля через існування поля поза діелектричним стрижнем. Наслідком є наявність поздовжньої складової електричного поля хвилі HE , що пояснює одночасне існування в діелектричному хвилеводі несиметричних хвиль типу H і E .

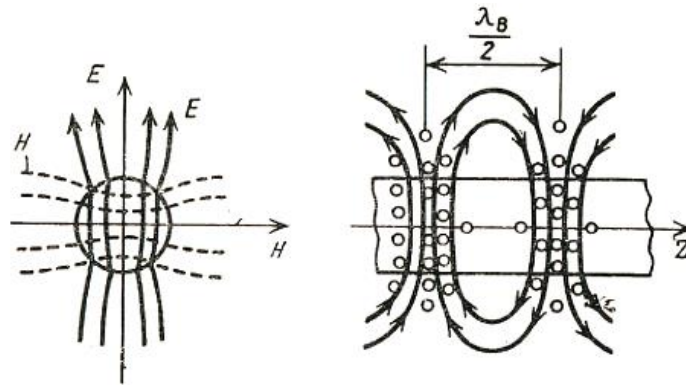


Рисунок 3.12 – Розподіл полі хвилі HE_{11}

Швидкість поширення хвилі вздовж діелектричного стержня мало залежить від довжини хвилі. Тому діелектричні стрижневі ширококутові антени та їх смуга пропускання обмежується, в основному, діапазонними властивостями збуджуючого пристрою. При ширококутовому збуднику вона може досягати 40-50%.

Діаграма спрямованості антени визначається вибором розмірів стержня a_0 , L та матеріалу стержня. Від розміру поперечного перерізу стержня залежить величина уповільнення хвилі. При тонкому стержні уповільнення близько до одиниці і майже вся енергія поверхневої хвилі переноситься поза стрижнем. Тому основна частина потужності збудника випромінюється безпосередньо, минаючи діелектричний стрижень. Результуюче поле випромінювання виявляється слабо спрямованим і наближається до поля випромінювання розкриття круглого хвилеводу. Зі збільшенням діаметра стержня збільшуються уповільнення та ефективність збудження поверхневої хвилі. Однак при товстому стержні через значне уповільнення хвилі зростають небажані відображення від

кінця стрижня, які спотворюють структуру поля в ньому, спотворюють діаграму спрямованості. Діаметр стрижня, крім того, обмежений розмірами круглого хвилеводу, в якому з урахуванням діелектричного заповнення збуджується хвиля типу H_{11} , а хвилі вищих типів мають бути в закритому режимі. Тому щодо діаметра стрижня слід вибирати компромісне рішення.

При виборі довжини стрижня враховуються такі міркування. З теорії антен хвилі, що біжить, відомо, що максимальний коефіцієнт спрямованої дії антени досягається при довжині стрижня, що дорівнює:

$$\frac{2L_{\text{опт}}}{\lambda} = \frac{1}{\gamma - 1} \quad (3.22)$$

Таку антену називають оптимальною. При заданому коефіцієнті уповільнення, який залежить від вибору діаметра a_0 і ξ матеріалу діелектричного стрижня, з наведеної формули (3.22) можна визначити оптимальну довжину антени.

Для довжини стержня, меншої оптимальної, характерно збільшення ширини основної пелюстки діаграми та зменшення рівня бічних пелюсток. Якщо довжина стержня трохи перевищує оптимальну, то основна пелюстка діаграми звужується, але швидко зростає рівень бічних пелюсток. Подальше збільшення довжини стержня може призвести до роздвоєння основної пелюстки діаграми.

У випадках, коли необхідне отримання більш вузьких діаграм спрямованості, ніж ті, що можуть забезпечити стандартні діелектричні стержневі антени, використовуються решітки антени, в яких діелектричні стрижневі антени є окремими випромінювачами. З урахуванням спрямованих властивостей випромінювачів, взаємозв'язок між ними та її вплив на вхідний опір слабший, ніж у ґратах, що складаються з вібраторів та щілин, що полегшує налаштування та керування решіткою.

Перевагою діелектричних антен є простота конструкції та малі поперечні розміри. Як і в усіх антен типу хвилі, що біжить з уповільненою фазовою швидкістю, їх особливістю є те, що звуження діаграми спрямованості відбувається за рахунок збільшення не поперечних розмірів антени, а поздовжніх розмірів при малому поперечному. Ця особливість визначає їх застосування, зокрема в авіаційних радіопристроях.

Недоліком діелектричних стрижневих антен є порівняно мала пропускна потужність і мала спрямованість випромінювання.

3.6 Дослідження впливу геометричних розмірів стержневої антени на діаграму спрямованості

Під випромінюючим розкритом діелектричної стержневої антени розуміють її бічну поверхню. Діаграма спрямованості такої антени кінцевої довжини L виражається формулою:

$$F(\theta) = F_0(\theta)F_c(\theta). \quad (3.23)$$

Тут $F_0(\theta)$ – діаграма спрямованості елементарного випромінювача, в якості якого приймають диск діаметром d і завдовжки Δz , яка значно менше довжини хвилі λ_0 ; $F_c(\theta)$ – це множник системи, який визначається формулою [64]:

$$F(\theta) = \frac{\sin[0.5kL(\xi - \cos\theta)]}{0.5kL(\xi - \cos\theta)}, \quad (3.24)$$

де $k = 2\pi/\lambda_0$ – хвилеве число;

$\xi = c/V_\phi$;

c – швидкість світла у вакуумі;

V_ϕ – фазова швидкість хвилі в діелектричному стержні.

Діаграма спрямованості елементарного випромінювача діелектричної стержневої антени в площині вектору E визначається виразом [27]:

$$F_{0E} = J_1 \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right) / \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right). \quad (3.25)$$

Тут $J_1 [(kd/2)\sin\theta]$ – функція Бесселя першого роду.

Діаграма спрямованості елементарного випромінювача діелектричної стержневої антени в площині вектору H описуватиметься виразом:

$$F_{0H} = \cos\theta J_1 \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right) / \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right). \quad (3.26)$$

Тепер з урахуванням виразів (3.24) запишемо формулу, що визначає діаграму спрямованості діелектричної стержневої антени в площині вектору E (площина yOz , див. рис. 3.9):

$$F_E = \left[J_1 \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right) / \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right) \right] \frac{\sin[0.5kL(\xi - \cos\theta)]}{0.5kL(\xi - \cos\theta)}. \quad (3.27)$$

Використовуючи вирази (3.22), (3.23) і (3.25), запишемо формулу, що визначає діаграму спрямованості діелектричної стержневої антени в площині вектору H (площина xOz , див. рис. 3.9):

$$F_H = \cos\theta \left[J_1 \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right) / \left(\frac{kd}{2} \sin\theta \right) \right] \frac{\sin[0.5kL(\xi - \cos\theta)]}{0.5kL(\xi - \cos\theta)}. \quad (3.28)$$

У формули (3.26) і (3.27) входить визначений вище параметр ξ , який слабо залежить від довжини хвилі λ_0 . Більшою мірою цей параметр залежить від діелектричної проникності матеріалу стержня ϵ' [29].

Аналізуватимемо діаграму спрямованості діелектричної стержневої антени з фторопласту-4. На першому етапі покладемо довжину антени $L = 10$ мм. Використовуючи графік залежності $V_{\phi/c} = \Psi(d/2\lambda_0)$ для фторопласту-4, приведений на рис. 3.13 (червона крива), та синя крива побудована для стержня з полістиролу ($\epsilon' = 2,5$) знайдемо, що при $d = 3$ мм = 1,037, при $d = 5$ мм = 1,1703, при $d = 7$ мм = 1,257, при $d = 10$ мм = 1,2903.

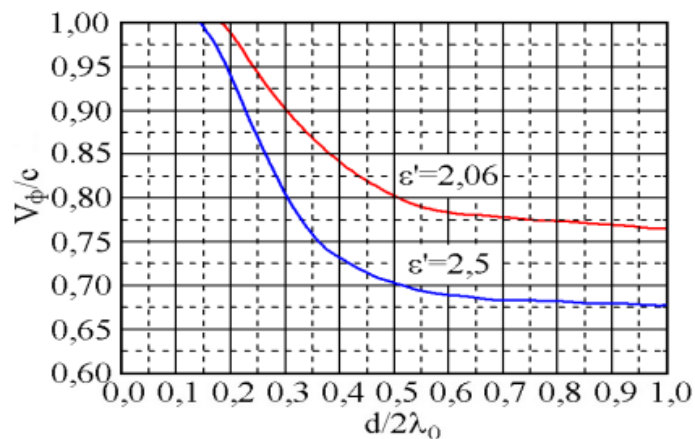


Рисунок 3.13 – Залежності фазової швидкості поширення хвилі HE_{11} в різних діелектричних стержнях від їх відносного діаметру

Результати розрахунку діаграм спрямованості стержневих антен різного діаметру в площині вектору H хвилі TE_{11} круглого хвилеводу (див. рис. 3.9) по формулі (3.27) представлені на рис. 3.14.

Крива 1 відповідає діаметру діелектричного стержня, рівному 3 мм, крива 2 – діаметру стержня, рівному 5 мм, крива 3 – діаметру стержня, рівному 7 мм, крива 4 – діаметру стержня, рівному 10 мм. Як видно з приведеного малюнка, у міру збільшення діаметру діелектричного стержня діаграма спрямованості даної антени звужується. При цьому зменшується рівень бічних пелюсток. Для стержня діаметром 10 мм ширина діаграми спрямованості основної пелюстки по

рівню -3 дБ на відстані 30 мм від випромінюючого торця діаметром 10 мм складає 12,6 мм.

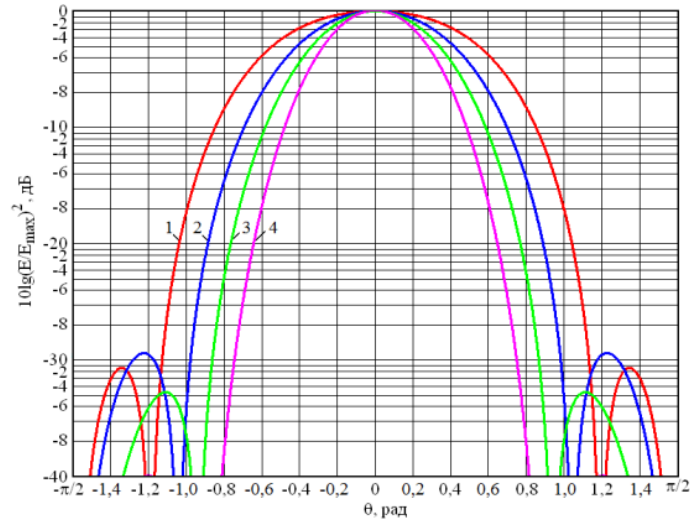


Рисунок 3.14 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різного діаметру в площині вектору Н хвилі TE_{11}

Тепер, використовуючи вираз (3.26), побудуємо діаграми спрямованості діелектричних стержнів, вказаних вище діаметрів, і тієї ж фіксованої довжини L в площині вектору E хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі. Результати розрахунку показані на рис. 3.15. Як і на попередньому малюнку, крива 1 відповідає діаметру діелектричного стержня, рівному 3 мм, крива 2 – діаметру стержня, рівному 5 мм, крива 3 – діаметру стержня, рівному 7 мм, крива 4 – діаметру стержня, рівному 10 мм. Як видно з приведеного малюнка, у міру збільшення діаметру стержня зменшується рівень бічних пелюсток і звужується діаметр основної пелюстки. В цьому випадку при діаметрі стержня, рівному 10 мм, на відстані 30 мм від випромінюючого торця по рівню -3 дБ ширина діаграми спрямованості складає 13,3 мм. Якщо порівняти цей її розмір з шириною головної пелюстки діаграми спрямованості відкритого кінця круглого хвилеводу в площині вектору E хвилі TE_{11} , то нескладно помітити, що завдяки діелектричній стержневій антені

вдалося добитися незначного її звуження у вказаній площині. Ми отримали 13,3 мм проти 14,3 мм.

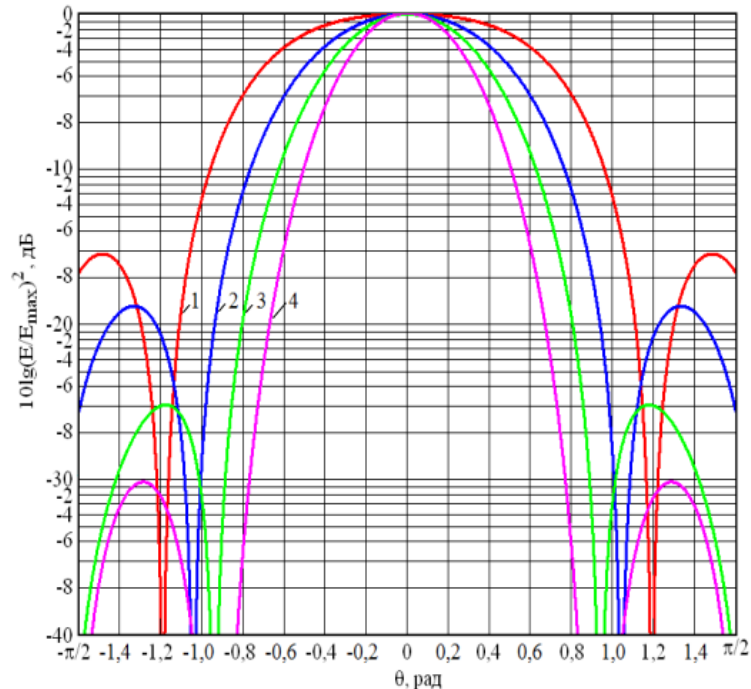


Рисунок 3.15 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різного діаметру в площині вектору Е хвилі TE_{11} .

Таким чином, діелектрична стержнева антена привела до сильнішого звуження діаграми спрямованості в площині вектору Н хвилі TE_{11} . Тому в якості наступного кроку розглянемо, як впливатиме на діаграму спрямованості діелектричної стержневої антени її довжина.

На підставі проведених вище досліджень (див. рис. 3.14 і рис. 3.15) вибираємо діаметр антени з фторопласту-4, рівний 10 мм. При цьому $\xi = 1,2903$. Дослідження проведемо для довжин антени L , рівних 10 мм, 15 мм, 20 мм і 25 мм. Результати розрахунку діаграм спрямованості діелектричних антен різної довжини в площині вектору Н, виконані по формулі (3.27), представлені на рис. 3.16.

Крива 1 відповідає довжині діелектричної стержневої антени рівною 10 мм, крива 2 – довжині антени, рівної 15 мм, крива 3 – довжині антени, рівної 20

мм, крива 4 – довжині антени, рівної 25 мм. З приведенного рисунка видно, що при збільшенні довжини антени з 10 мм до 15 мм, має місце звуження головної пелюстки діаграми спрямованості.

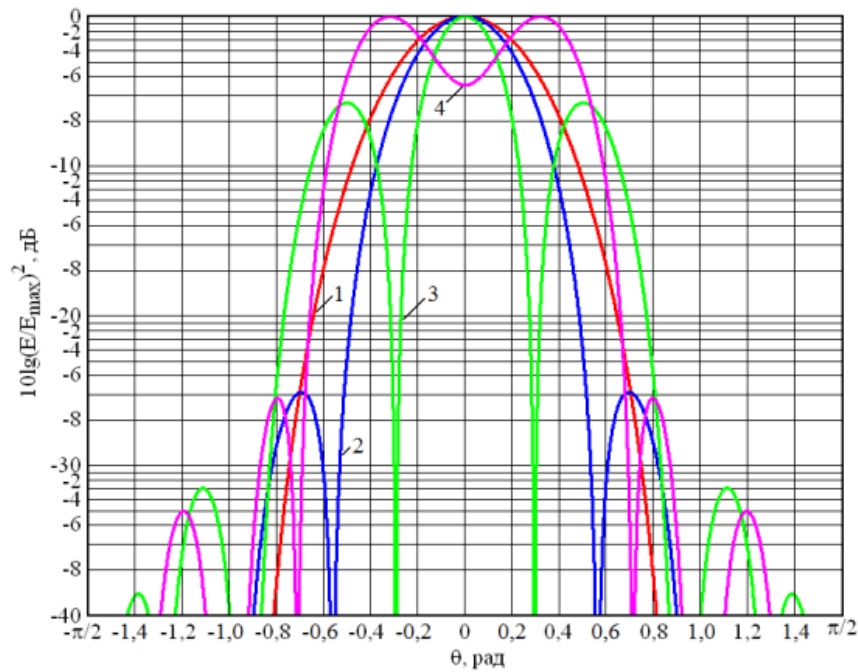


Рисунок 3.16 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різної довжини в площині вектору Н хвилі TE_{11}

Проте збільшення довжини антени призводить до зростання бічних пелюсток, рівень яких складає $-26,9$ дБ (крива 2) при $L = 15$ мм. При подальшому збільшенні довжини антени відбувається ще більше звуження головної пелюстки діаграми спрямованості, але рівень бічних пелюсток при $L = 20$ мм різко зростає до $-7,3$ дБ (крива 3). Зовсім цікаво поводиться діаграма спрямованості стержневої антени завдовжки 25 мм (крива 4). В цьому випадку спостерігається роздвоєння головної пелюстки діаграми спрямованості. Отриманий результат знаходиться в хорошій відповідності з результатами роботи і говорить про те, що при $L \geq 20$ мм довжина антени перевищує її оптимальний розмір.

Тепер аналогічно для вказаних вище параметрів побудуємо діаграми діелектричних стержневих антен в площині вектору E . Розрахунки виконані по формулі (3.26) і показані на рис. 3.17.

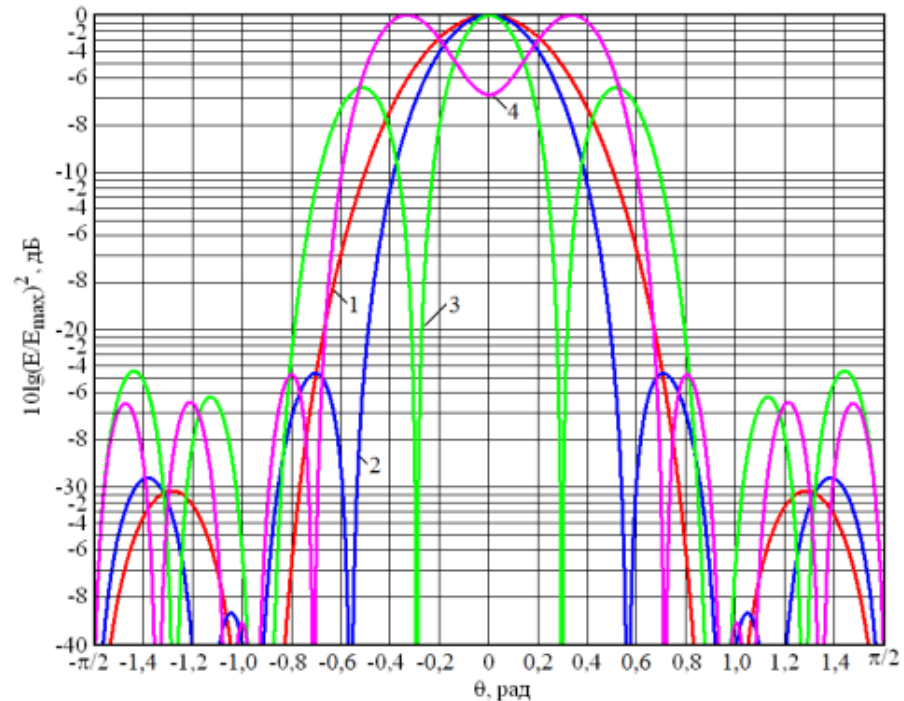


Рисунок 3.17 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різної довжини в площині вектору E хвилі TE_{11}

На рис. 3.17, як і на рис. 3.16, крива 1 відповідає довжині діелектричної стержневої антени рівної 10 мм, крива 2 – довжині антени, рівної 15 мм, крива 3 – довжині антени, рівної 20 мм, крива 4 – довжині антени, рівної 25 мм. З приведенного рисунка видно, що при збільшенні довжини антени з 10 мм до 15 мм, як і у разі H площини, має місце звуження головної пелюстки діаграми спрямованості. Зі збільшенням довжини антени ростуть бічні пелюстки діаграми спрямованості. В даному випадку при довжині антени, рівній 15 мм, рівень бічних пелюсток складає $-24,6$ дБ (крива 2), тобто він трохи вище, ніж у попередньому випадку. При $L = 20$ мм має місце подальше звуження головної пелюстки діаграми спрямованості. Проте на цьому фоні різко зростають бічні

пелюстки до рівня – 6,4 дБ (крива 3). Якщо довжина діелектричної антени складає 25 мм, то спостерігається роздвоєння головної пелюстки діаграми спрямованості (крива 4).

Проведений аналіз показує, що починаючи з $L = 20$ мм, довжина антени перевищує її оптимальний розмір. Аналогічний результат ми отримали для діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени в площині вектору H хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі. Тому представляє практичний інтерес проаналізувати діаграми спрямованості діелектричних стержневих антен в двох взаємно перпендикулярних H і E площинах при зміні їх довжини з кроком 1 мм. Нам необхідно отримати по рівню –3 дБ діаметр головної пелюстки діаграми спрямованості порівняно з довжиною хвилі. Вище (див. рис. 4.7 і рис. 4.8) ми показали, що ширина головної пелюстки діаграми спрямованості антени зменшується зі збільшенням її довжини. При цьому антени з $L \geq 20$ мм розглядати не доцільно. Тому за початковий розмір візьмемо $L = 15$ мм. Результати розрахунку діаграм спрямованості діелектричної стержневої антени з фторопласту-4 діаметром 10 мм, виконаного по формулі (3.27), показані на рис. 3.18.

Тут крива 1 відповідає довжині антени, рівній 15 мм, крива 2 – довжині антени, рівній 16 мм, крива 3 – довжині антени, рівній 17 мм, крива 4 – довжині антени, рівній 18 мм. З рисунку видно, що зі збільшенням довжини антени діаметр головної пелюстки діаграми спрямованості по рівню –3 дБ зменшується. Проте при цьому росте рівень бічних пелюсток. Так при $L = 17$ мм рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості складає –18,3 дБ, а при збільшенні довжини антени всього на один міліметр рівень бічних пелюсток буде вже –15,8 дБ. Але, отримана величина рівня бічних пелюсток в площині вектору H хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі при $L = 18$ мм є прийнятною величиною для вирішення поставленого завдання в роботі. Ширина головної пелюстки діаграми спрямованості у вказаній площині при $L = 18$ мм по рівню –3 дБ складає 7,906

мм. Ця величина всього в 1,19 разу більше довжини хвилі, що і необхідно було отримати.

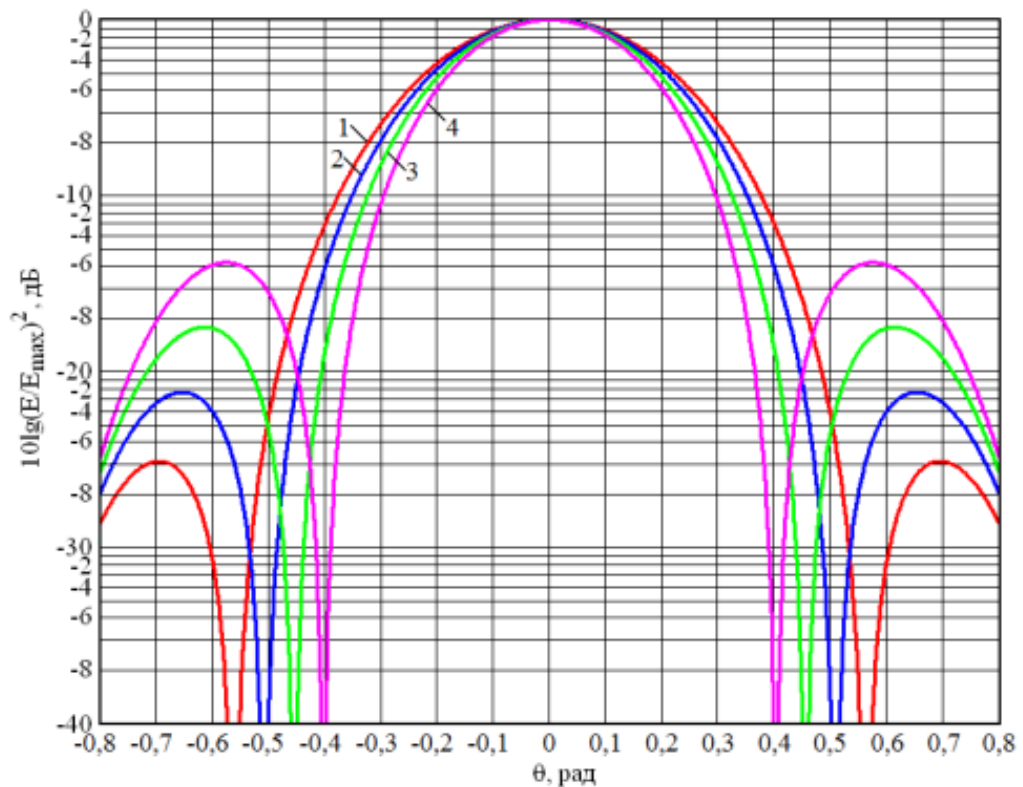


Рисунок 3.18 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени, довжина якої змінюється з кроком 1 мм, розраховані в площині вектору Н хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі

Тепер розглянемо, як поводитиметься діаграма спрямованості діелектричної стержневої антени з фторопласту-4 діаметром 10 мм при зміні її довжини у вказаних вище межах в площині вектору Е хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі. Для цього скористаємося формулою (3.26). Результати розрахунку представлені на рис. 4.10. Крива 1 відповідає довжині антени, рівній 15 мм, крива 2 – довжині антени, рівній 16 мм, крива 3 – довжині антени, рівній 17 мм, крива 4 – довжині антени, рівній 18 мм.

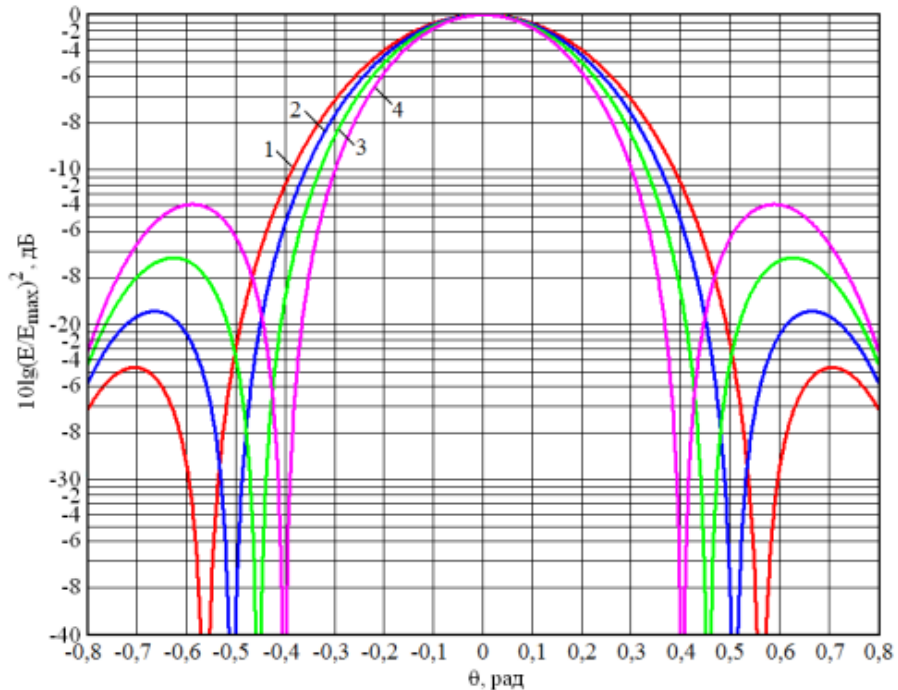


Рисунок 3.19 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени, довжина якої змінюється з кроком 1 мм, розраховані в площині вектору E хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі

З малюнка видно, що, як і у попередньому випадку, зі збільшенням довжини антени діаметр головної пелюстки діаграми спрямованості по рівню -3 дБ зменшується. При цьому відбувається зростання бічних пелюсток. Так при $L = 17$ мм рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості в цьому випадку складає $-17,3$ дБ, а при збільшенні довжини антени на один міліметр рівень бічних пелюсток буде вже $-13,9$ дБ. Якщо порівняти отриманий результат з попереднім випадком, то нескладно помітити, що рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості в E площині трохи вище, ніж в H площині. Це стосується усіх даних довжин діелектричної стержневої антени. Ширина діаграми спрямованості головної пелюстки при $L = 18$ мм по рівню -3 дБ складає $7,906$ мм, тобто вона така сама, як і для H площини. Як видно, ця величина всього в $1,19$ разу більше довжини хвилі. Таким чином, проведені дослідження показали, що при довжині діелектричної стержневої антени, рівній 18 мм, ширина головної

пелюстки діаграми спрямованості в Н- і Е- площинах у 1,19 разів перевершує довжину хвилі. Крім того, сама діаграма спрямованості у вказаних площинах однакова, що і потрібно для поставленого завдання.

3.7 Дослідження впливу матеріалу стержневої антени на характер діаграми спрямованості.

Усі проведені вище дослідження торкалися стержневої антени з фторопласту-4, який має малі втрати. Як було сказано вище, для цього матеріалу $\text{tg } \delta = 2,1 \cdot 10^{-4}$. Тому розглянемо діелектричну стержневу антену, виготовлену з іншого діелектрика, що має малі втрати. В якості такого матеріалу візьмемо полістирол, діелектрична проникність якого $\epsilon' = 2,522$, а $\text{tg } \delta = 2,5 \cdot 10^{-4}$. Таким чином, вибраний матеріал має більш високе значення діелектричної проникності при рівних втратах в порівнянні з фторопластом-4.

На рис. 3.20 показані результати розрахунку діаграм спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу діаметром 10 мм, виконані по формулі (3.27).

Тут крива 1 відповідає довжині антени, рівній 12 мм, крива 2 – довжині антени, рівній 13 мм, крива 3 – довжині антени, рівній 14 мм, крива 4 – довжині антени, рівній 15 мм. З рисунка видно, що зі збільшенням довжини антени діаметр головної пелюстки діаграми спрямованості по рівню -3 дБ зменшується.

Проте при цьому росте рівень бічних пелюсток. А при довжині антени, рівній 15 мм, випромінювання антени в осьовому напрямі падає. Таким чином, оптимальна довжина антени при розгляді діаграми спрямованості в площині вектору Н основної хвилі круглого хвилеводу TE_{11} дорівнює 12 мм. В цьому випадку рівень бічних пелюсток складає $-16,3$ дБ, що є цілком прийнятною величиною. При $L = 12$ мм (крива 1) по рівню -3 дБ на відстані 30 мм від розкриву ширина головної пелюстки складає 8,322 мм. Якщо порівняти цей розмір з аналогічним розміром для антени з фторопласту-4, що має такий же

діаметр, але при оптимальній довжині $L = 18$ мм, то нескладно помітити, що в другому випадку ширина діаграми вужче (7,906 мм).

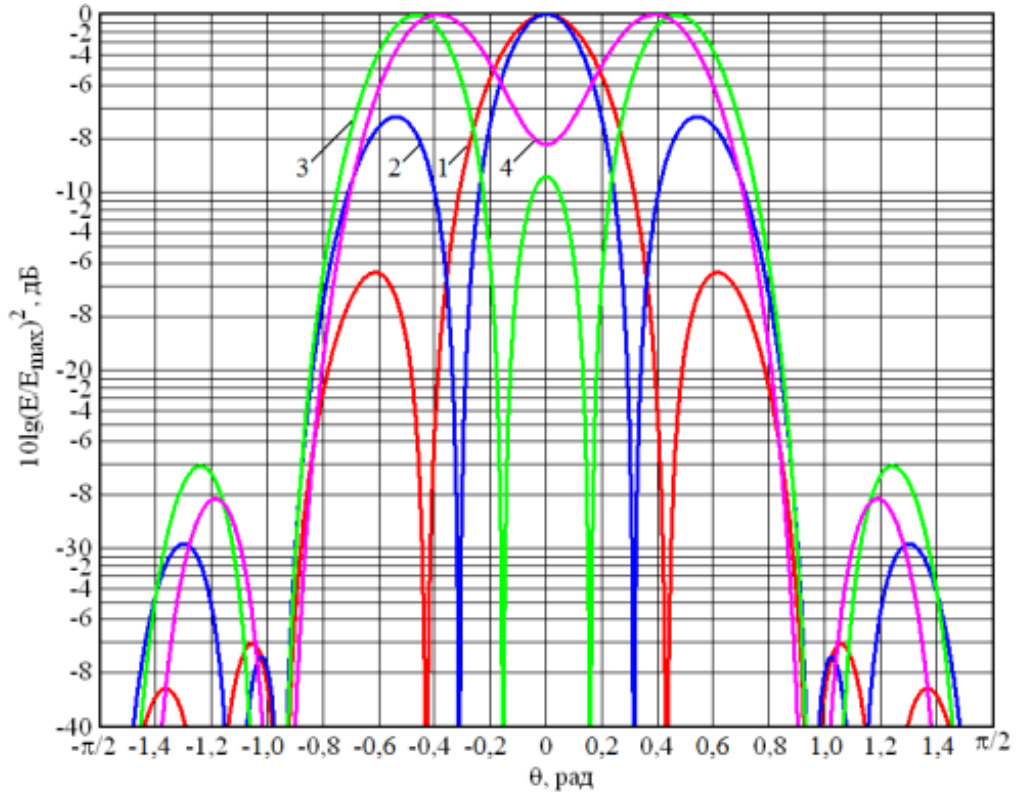


Рисунок 3.20 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу різної довжини, розраховані в площині вектору Н

Тепер розглянемо діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу вказаного вище діаметру в площині вектору E основної хвилі круглого хвилеводу. Для цього скористаємося формулою (4.26). Результати розрахунку представлені на рис. 3.21. Тут, як і вище, крива 1 відповідає довжині антени, рівній 12 мм, крива 2 – довжині антени, рівній 13 мм, крива 3 – довжині антени, рівній 14 мм, крива 4 – довжині антени, рівній 15 мм.

З малюнка видно, що зі збільшенням довжини антени діаметр головної пелюстки діаграми спрямованості по рівню -3 дБ зменшується. Окрім цього, для антен, що мають довжини 13 мм і 14 мм, у діаграм спрямованості різко ростуть бічні пелюстки. При $L = 15$ мм зменшується випромінювання уздовж осі антени.

Отже, і в площині E для вказаних вище розмірів антени оптимальною буде довжина, рівна 12 мм.

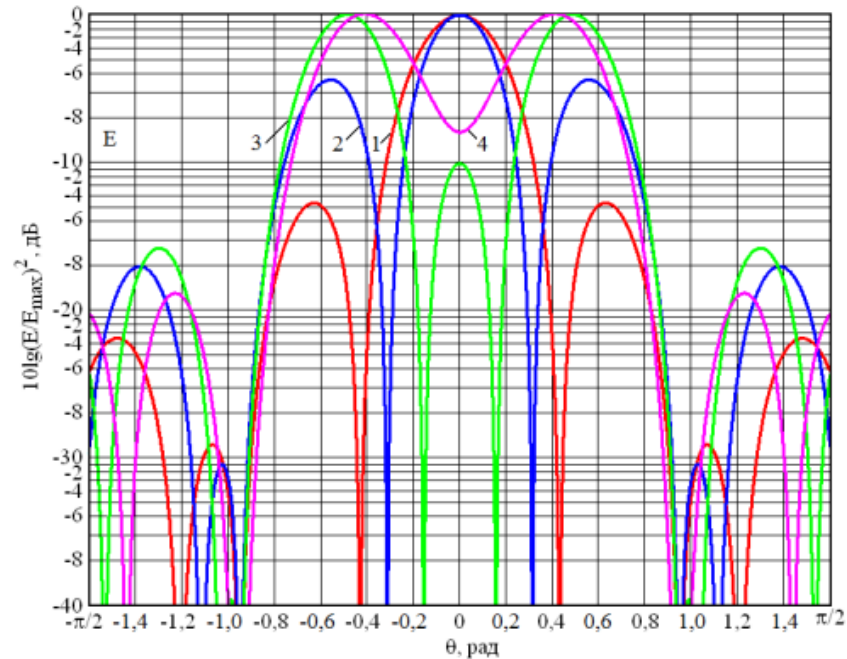


Рисунок 3.21 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу різної довжини, розраховані в площині вектору E

При такій довжині антени ширина її діаграми спрямованості по рівню -3 дБ складає 8,516 мм. Отже, збільшення діелектричної проникності матеріалу антени дозволяє зменшити її довжину, але не призводить до звуження головної пелюстки діаграми спрямованості.

3.8 Визначення геометричних розмірів і параметрів діелектричної стержневої антени.

Використовуючи формулу (3.27), розрахуємо діаграму спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу вказаних вище параметрів в площині вектору H хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі. Результати розрахунку представлені на рис. 3.22 (крива 1).

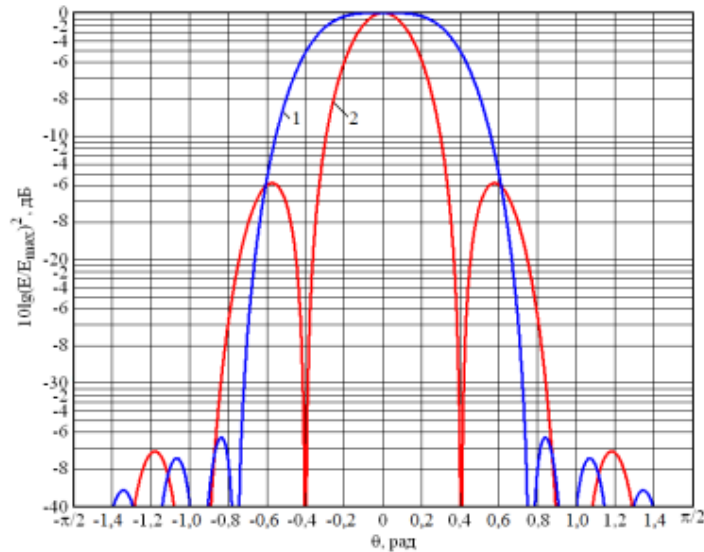


Рисунок 3.22. – Діаграми спрямованості діелектричних стержневих антен завдовжки 18 мм з полістиролу і фторопласту-4, розраховані в площині вектору \mathbf{H} хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі

Тут же для порівняння показана діаграма спрямованості антени таких же розмірів, але з фторопласту-4 (крива 2). Як видно з приведеного малюнка рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості антени з полістиролу істотно зменшився. Проте при цьому ширина головної пелюстки стала набагато ширша. По рівню -3 дБ на відстані 30 мм від випромінюючого торця ширина основної пелюстки діаграми спрямованості стержневої антени з полістиролу складає 20,418 мм, тоді як для антени з фторопласту-4 цей розмір дорівнює 7,906 мм. 104

Представляє також інтерес розглянути поведінку діаграм спрямованості діелектричних стержневих антен, виготовлених з вказаних вище матеріалів при фіксованих розмірах в площині вектору \mathbf{E} хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі. Результати розрахунку приведені на рис. 3.23.

З малюнка видно, що для стержневої антени завдовжки 18 мм з полістиролу має місце істотне зниження рівня бічних пелюсток в діаграмі спрямованості (крива 1). Тут же для порівняння приведена діаграма спрямованості аналогічної антени з фторопласту-4 (крива 2).

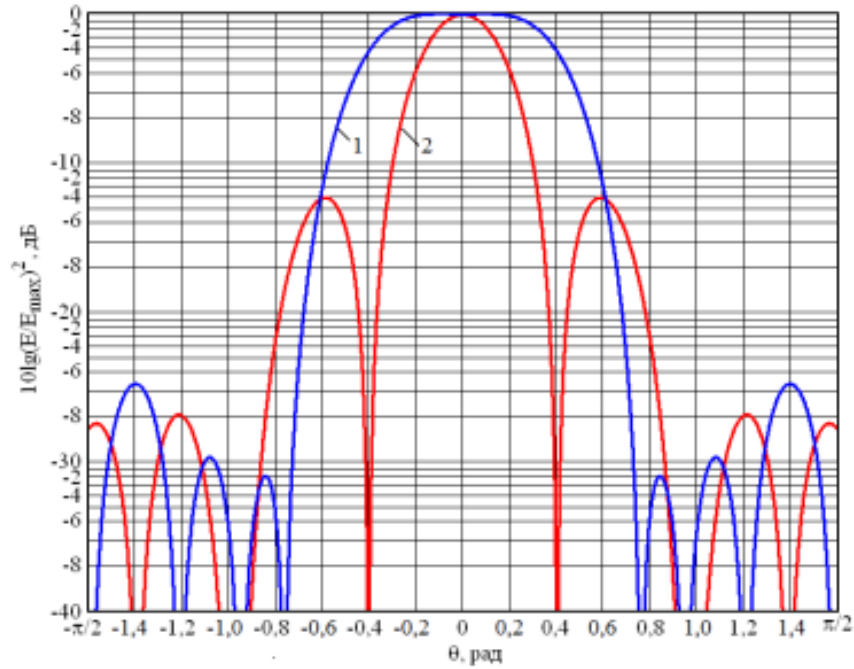


Рисунок 3.23 – Діаграми спрямованості діелектричних стержневих антен фіксованої довжини з полістиролу і фторопласту-4, розраховані в площині вектору E хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі

Ширина основної пелюстки діаграми спрямованості антени з полістиролу у вказаній площині значно ширше, ніж у разі антени з фторопласту-4. По рівню -3 дБ на відстані 30 мм від випромінюючого торця ширина основної пелюстки діаграми спрямованості стержневої антени з полістиролу складає 22,378 мм, тоді як для антени з фторопласту-4 цей розмір дорівнює 7,906 мм. Для H площини ширина основної пелюстки діаграми спрямованості антени з полістиролу виявилася приблизно на два міліметри менше. Тоді як для антени з фторопласту-4 ми отримали в двох ортогональних площинах однакові діаграми спрямованості.

Таким чином, проведений аналіз показав, що для вирішення поставленого в роботі завдання необхідно вибирати діелектричну стержневу антену з фторопласту-4, що має діаметр 10 мм і довжину 18 мм. Довжина звуження для отримання конічної форми ДСА повинна складати приблизно $2/\lambda \approx 3$ мм.

Проведемо аналіз власних випромінювань плазми іскрового розряду з позицій їх вкладу в спектр біологічно значимих частот радіочастотного діапазону [30,31].

Електромагнітні хвилі генеруються в плазмі при елементарних процесах, пов'язаних зі взаємодією між собою часток з яких складається плазма і із зовнішніми полями. Характер спектру генерованого випромінювання визначається природою елементарного процесу, що вносить основний вклад у випромінювання НВЧ діапазону [32].

Усі явища, що виникають в процесі іскрового розряду, визначають загальний енергетичний стан середовища. Інтегральною характеристикою такого стану може служити кількість тепла, що виділяється в області розряду і як наслідок виникнення теплового випромінювання.

Фізична суть теплового випромінювання полягає в перетворенні внутрішньої теплової енергії випромінюючого тіла в енергію електромагнітного поля, що поширюється за межі випромінюючого тіла.

Інтенсивність усіх цих процесів визначається температурою випромінюючого тіла, тому від температури залежить і середня потужність випромінювання.

Оскільки радіотеплове випромінювання є результатом збудження дуже великого числа елементарних осциляторів, причому момент і інтенсивність збудження кожного окремого осцилятора залежить від багатьох випадкових чинників(положення і орієнтація осцилятора відносно інших часток, енергія, швидкість) то і характеристики випромінювання в цілому будуть випадковими флуктуаціями часу.

Таким чином, радіотеплове випромінювання є випадковим процесом, визначення середніх характеристик якого можливо лише шляхом застосування статистичних методів. Звернемо увагу на те, що випадковий тепловий рух заряджених і поляризованих часток, що викликає випромінювання, є ні чим іншим, як тепловим шумовим струмом, властивості якого добре відомі.

Теоретично і експериментально встановлено, що основні характеристики радіотеплового випромінювання - залежність спектральної щільності від температури і частоти, розподілу миттєвих значень, подібні до аналогічних характеристик теплового шуму. З усього цього виходить дуже важливе виведення: радіотеплове випромінювання - це поле випромінювання теплових шумових струмів, що протікають в матеріалі випромінювача.

Оскільки вищезгадані чинники, що впливають на інтенсивність радіотеплового випромінювання реальних випромінювачів, в сукупності врахувати важко, в теорії випромінювання прийнято оперувати з так званим абсолютно чорним тілом(АЧТ)

У сантиметровому і міліметровому діапазонах випромінювальною здатністю, близькою до випромінювальної здатності АЧТ має плазма іонізованого повітряного середовища. Закони випромінювання АЧТ більшою чи меншою мірою застосовані до реальних теплових випромінювачів. Крім того, є закони і співвідношення, що зв'язують характеристики випромінювання з фізичними характеристиками випромінювачів. Таким джерелом випромінювання в міліметровому діапазоні може бути також плазма і електронний газ, що утворюється в процесі пробію. Для оцінки теплового випромінювання плазми скористаємося класичними виразами для абсолютно чорного тіла.

Одним з найбільш важливих законів теплового випромінювання є закон, що виражає залежність спектральної щільності випромінювання від його частоти і температури випромінювача. Цей закон описується формулою Планка:

$$R_{\text{ч}}(f, T) = \frac{2\pi f^2}{c^2} \times \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right)} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \times \text{м}^2} \right], \quad (3.29)$$

де $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ Дж*с – постійна Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення електромагнітних хвиль;

$k = 1,38 * 10^{-23}$ Дж/град – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура, °К;

f – частота, Гц.

На рис. 3.24 приведені криві $R_{\text{ч}}$ залежності частоти, відповідної максимальної спектральної щільності, від температури АЧТ описується формулою Віна :

$$f_m = 1,03 \times 10^{11} T \text{ Гц}, \quad (3.30)$$

де T – температура АЧТ, °К.

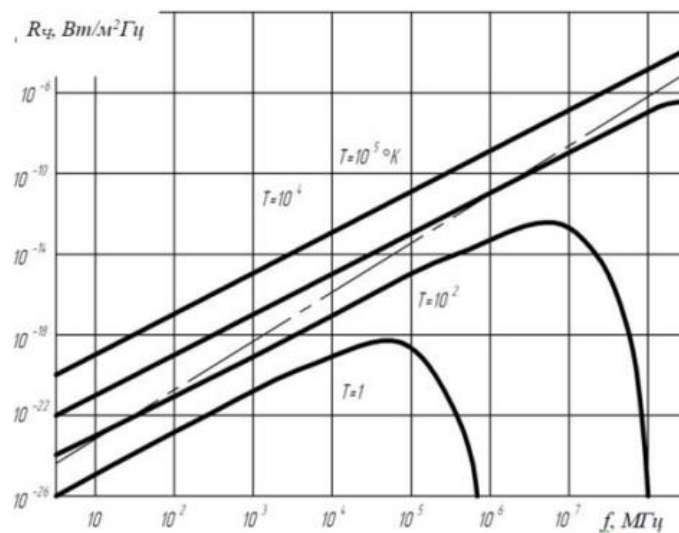


Рисунок 3.24 – Залежність яскравості випромінювання АЧТ від частоти і температури.

З формули Віна 3.30 і рис. 3.24 витікає, що температурам, більшим одного градуса Кельвіна, відповідають значення частоти f_m , більше 100 ГГц, тобто що область радіотеплового випромінювання лише частково захоплює ліві, висхідні гілки кривих спектральної щільності.

Шляхом інтеграції вираження для спектральної щільності по усій осі частот можна отримати вираз для енергетичної щільності випромінювання:

$$R_{\Sigma}(T) = \int_0^{\infty} R(f, T) df = \int_0^{\infty} \frac{2\pi f^2}{c^2} \times \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} df = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \sigma T^4 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (3.31)$$

де $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,71 * 10^{-8} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{град}^4} \right]$ – постійна Стефана.

Вираження (3.33) є математичним формулюванням закону Стефана-Больцмана. У діапазоні частот і температур, що цікавить нас, як правило, справедлива нерівність $hf \ll kT$, тому виявляється можливим спростити формулу Планка, представивши експоненціальну функцію у вигляді ряду:

$$\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) = +1 \frac{hf}{kT} + \frac{1}{1 \times 2} \left(\frac{hf}{kT}\right)^2 + \frac{1}{1 \times 2 \times 3} \left(\frac{hf}{kT}\right)^3 + \dots$$

Обмежуючись двома першими членами, отримуємо формулу Релея-Джинса;

$$R_{\text{q}}(f, T) = \frac{2\pi f^2}{c^2} kT = \frac{2\pi f kT}{\lambda^2} \approx 10^{-39} f^2 T \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{Гц}} \right], \quad (3.32)$$

Спектральна щільність випромінювання реальних тіл залежить від двох фізичних характеристик: коефіцієнта поглинання α і абсолютної температури T . Оперувати двома різнорідними характеристиками не завжди зручно, особливо коли доводиться порівнювати між собою різні випромінюючі тіла. Тому прийнято використати одну величину, рівну добутку коефіцієнта поглинання на абсолютну температуру:

$$T_{\text{я}} = \alpha T. \quad (3.33)$$

Величину $T_{\text{я}}$ називають радіояскрісною температурою цього випромінювача; вона дорівнює абсолютній температурі ідеального випромінювача, що створює випромінювання такої ж спектральної щільності, як

і цей випромінювач. Хоча на відміну від спектральної щільності випромінювання у виразі для радіояркісної температури не входить довжина хвилі, практично радіояркісна температура плазми суттєво залежить від довжини хвилі [33].

Також, радіояркісна температура металевих електродів розрядної порожнини не перевищує 10 - 20°К. Проте металеві електроди можуть інтенсивно перевипромінювати (відбивати) радіотеплове випромінювання, що падає на них. Сумарну спектральну щільність власного і відбитого випромінювань плазмового шнура іскрового розряду можна записати у виді:

$$R_{\text{заг}} = \frac{2\pi k}{\lambda^2} (\alpha T + \rho T_o) = \frac{2\pi}{\lambda^2} T_k, \quad (3.34)$$

$$T_k = \alpha T + \rho T_o, \quad (3.35)$$

де ρ – коефіцієнт відбиття;

T_o – радіояркісна температура відбитого випромінювання;

T_k – удавана температура випромінювача.

Для кількісної оцінки вважаємо, що удавана температура «холодної плазми іскрового розряду має величину близько 30...300 °К.

Тоді спектральна щільність потужності власного і відбитого теплового випромінювань плазмового шнура іскрового розряду на частоті 60 ГГц складе $\sim 10^{-20} \dots 10^{-19}$ Вт/см² Гц. Отриманий результат майже на 6-8 порядків перевершує спектральну щільність потужності імпульсного струму збудження приведену вище.

Проте, потужність радіотеплового випромінювання залежить не лише від удаваної температури, але і від площі випромінюючого об'єкту, його форми,

шорсткості поверхні і ряду інших чинників, що важко враховуються, особливо для іскрового проміжку імпульсного розряду.

Представимо іскровий розряд у формі тонкого плазмового циліндра розташованого в міжелектродному проміжку. Тоді вираження для потужності випромінювання може бути записане в наступному вигляді:

$$P_{\text{вип}} \approx \frac{2\pi}{\lambda^2} kT_K S_{\text{ц}} \Delta f \approx 10^{-39} f_{\text{ср}}^2 kT_K S_{\text{ц}} \Delta f, \quad (3.36)$$

де $S_{\text{ц}}$ – площа плазмового циліндра;

$f_{\text{ср}}^2$ – середнє значення частоти в даній смузі;

Δf – смуга частот, в якій оцінюється випромінювана потужність.

З урахуванням біологічної значимості випромінювання виберемо $f_{\text{ср}}$:

$$P_{\text{вип}} = 10^{-17} \dots 10^{-14} \text{ Вт.}$$

Отримана оцінка повною мірою відповідає критерію випромінювання надмалої потужності в радіочастотному діапазоні.

Наступним кроком необхідно визначити коефіцієнт корисної дії (ККД) діелектричної стержневої антени з визначеними геометричними параметрами, та матеріалом.

ККД діелектричної стержневої антени визначається по формулі [67]:

$$\eta_A = \frac{\alpha_{\Sigma} + \alpha_{\Pi} \exp[-2(1 + \alpha_{\Pi} l)]}{\alpha_{\Sigma} + \alpha_{\Pi}}, \quad (3.37)$$

де α_{Σ} – загасання хвилі уздовж стержня завдовжки l ;

α_{Π} – коефіцієнт загасання, обумовлений втратами в діелектриці.

$$\alpha_{\Pi} = \frac{\pi \epsilon t g \delta}{\lambda} R_3, \quad (3.38)$$

де $t g \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат для фторопласту $= 2 \cdot 10^{-4}$;
 R_3 – чинник загасання, який вибирається з рис. 3.25 [68].

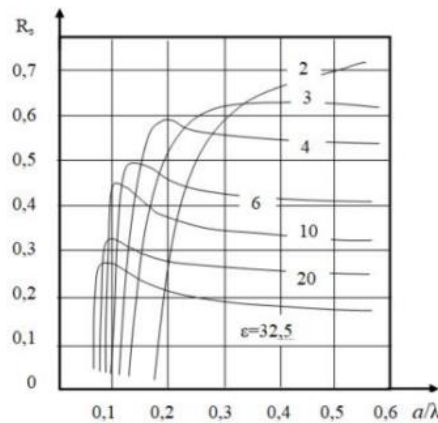


Рисунок 3.25 – Залежність чинника загасання від відносного радіусу ДСА

$\lambda_0 = 6,0$ мм; $l = 18$ мм; $\alpha_{\Sigma} = 0,0551$ /мм $\alpha_{\Pi} = 0,621 \cdot 10^{-4}$ 1/мм;
 $\alpha_{\Pi} * l = 0,0011$; $2(1 + \alpha_{\Pi} * l) = 2,0022$; $\exp[2(1 + \alpha_{\Pi} * l)] = 5,496$; ;
 $\exp[-2(1 + \alpha_{\Pi} * l)] = 0,0996$

$$\eta_A = 0,9967$$

Проведений розрахунок підтверджує досить високу ефективність (ККД ≈ 1) застосування діелектричної стержневої антени в якості випромінювача в КВЧ діапазоні.

Висновки до розділу. В якості джерела збудження електромагнітних коливань в смузі біологічно значимих частот може бути застосований періодичний імпульсний іскровий розряд в атмосферному повітрі із стримерним характером електричного пробою.

Сформований спектр коливань містить лінійчату і безперервну компоненти в радіочастотному діапазоні. Лінійчатий спектр обумовлений

періодичністю імпульсного іскрового розряду, інтервал між спектральними лініями дорівнює частоті повторення імпульсів, кожна спектральна лінія може підрозділятися на декілька складових при багатократному іскровому пробі або внаслідок тимчасового розкиду формування стримерів. Безперервний спектр обумовлений в основному тепловим випромінюванням плазми іскрового розряду.

В розділі був проведений аналіз випромінювання з відкритого кінця круглого хвилеводу який показав, що такий розкрив не забезпечує аксіально симетричну діаграму спрямованості, і ширина головної пелюстки в двох взаємно розташованих площинах значно перевищує довжину хвилі в бмм., тому для подальших досліджень було обрано діелектричну стержневу антену характеристики якої для цілей роботи підходять краще.

Визначено, що залежно від діаметру і матеріалу, з якого зроблена діелектрична стержнева антена, повинна мати оптимальну довжину. Якщо довжина антени перевищує оптимальну, то спочатку починається зростання бічних пелюсток. При подальшому збільшенні довжини антени випромінювання уздовж осі антени зменшується.

Так для розглянутої в розділі антени з фторопласту-4 ($\epsilon' = 2,06$) діаметром 10 мм оптимальна довжина дорівнює 18 мм. А для антени з полістиролу ($\epsilon' = 2,522$) і такого ж діаметру оптимальна довжина складає 12 мм. Крім того, збільшення діелектричної проникності матеріалу антени не призводить до звуження головної пелюстки діаграми спрямованості по рівню -3 дБ. Ширина основної пелюстки діаграми спрямованості антени з полістиролу у вказаній площині значно ширше, ніж у разі антени з фторопласту-4. Розмір діаграми спрямованості полістиролу різниться в різних площинах на відміну від фторопласту -4, таким чином прийнято рішення для подальших досліджень розглядати ДСА виконану з фторопласту.

Розраховано потужність випромінювання в радіочастотному діапазоні яка складає $P_{\text{випр}} = 10^{-17} \dots 10^{-14} \text{Вт}$. Отримана оцінка повною мірою відповідає критерію випромінювання надмалої потужності в радіочастотному діапазоні.

Визначено ККД для діелектричної стержневої антени з заданими параметрами, він склав $\eta_A = (0,9967)$. Отриманий результат свідчить про високу ефективність застосування ДСА в якості випромінювача в КВЧ діапазоні.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ НА ПРОВАДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА НАДНИЗЬКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

У цьому розділі проведено аналіз впровадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону. Ідея проекту – впровадження ІХТ технологій та засобів в медичну практику.

Таблиця 4.1 – Зміст ідеї і можливі потенційні ринки

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Створення приладу для ІХТ	1. Домашня терапія	Лікування ряду захворювань, до звернення у лікарню та профілактичні заходи.
	2. Терапія в медичних закладах	Використання можливе медичними працівниками з попереднім проходженням курсової підготовки ІХТ технологій.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг порівняно з пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик;

- визначення попереднього кола конкурентів або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проведення збору інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів конкурентів;

– проведення порівняльного аналізу показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційної пропозиції представлено в таблиці 4.2, що є підґрунтям для формування його конкуренто спроможності.

Таблиця 4.2 – Визначення характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запропо- нований метод	Загально- живаний й метод			
1.	Портативність апарату ІХТ	Дає змогу	Не дає змогу	–	Прилади для ІХТ терапії, що існують на сьогодення	Рішення є більш ефективним відносно інших
2.	Відсутність потреби калібровки	Дає змогу	Не дає змогу	–	Потребує перевірки на працездатніс- ть з визначеним періодом	Можливість використову- вати пацієнтом прилад без втручання лікарів

4.1 Технологічний аудит ідеї проекту

Було проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає

аналіз таких складових (табл.4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту;
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/допрацювати;
- чи доступні такі технології авторам проекту.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Портативність приладу	Поверхневий та традиційний монтаж	наявна	доступна
2	Відсутність необхідності перевірки на працездатність	Створення простої конструкції	наявна	доступна

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів. Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За результатами попереднього оцінювання ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проект

№ п/п	Показник стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних конкурентів	3
2.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
4.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, СТТУ, ТУУ
5.	Середня норма рентабельності в галузі або по ринку, %	90%

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Після визначення потенційних груп клієнтів проведений аналіз ринкового середовища: складені таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 4.6, 4.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	2	3	4	5

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5
1.	Періодична профілактика та терапія людини, що не має змоги відвідувати лікаря, діагностика організму	Люди з захворювання ми, що потребують регулярний терапію Працівники швидкої допомоги	особливостей купівлі та експлуатації товару немає	– надійність – мобільність – доступність – простота – зручність – швидкість

Таблиця 4.6 – Фактор загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Відсутність 100% точності	Для підтвердження результатів дослідження потрібно звернутися до спеціаліста	Укладання договорів з лікарнями, для подальшого направлення пацієнту до найближчого спеціаліста

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти та виробляти нові продукти, знижувати витрати на них	Ускладнення структури та функціональної наповненості пропозиції
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні доступної мобільної терапії	Рекламна діяльність, просування товару в Інтернеті

Надалі проведений аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції – олігополія	На ринку присутня невелика кількість підприємств, що займаються розробкою такого типу апаратів	Підвищувати якість послуг за рахунок використання прогресивних технологій
2. Локальний	Попит апарату на всій території країни	Окремий підхід до кожної локальної ділянки
3. Внутрішньо-галузева	Одноразова діагностика у лікарні коштує набагато дешевше приладу	Попереднє створення бази даних потенційних покупців
4. Товарно-видова	Потужність наявних технічних засобів для розгортання удосконаленого інтерфейсу мережі	За необхідності, використання обладнання схожого типу
5. Цінова	Можливість заощадити за допомогою ефективності терапії і профілактики	Гнучка політика цін
6. За інтенсивністю – марочна	Профілактичні та терапевтичні заходи мають бути стандартизованою	Реклама товару, проведення тендерів

Після аналізу конкуренції проведено більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 4.9)[34].

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі

Назва	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Технологічні постачальники	Необхідність пошуку дилерів з міжнародними зв'язками	Залучення малопопулярних постачальників	Незалежність у прийнятті клієнтських рішень	Надання переваги більш авторитетним технологічним рішенням
Висновки	Інтенсивність незначна	Можливість виходу на ринок є	Постачальники диктують цінову політику на обладнання	Клієнти диктують вимоги до якості	Обмеження існують лише у разі відмови від діагностики

На основі аналізу конкуренції, наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності представлений в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	2	3

Продовження таблиці 4.10

1	Раціональніший ціновий показник	Можливість більш раціонально використати ресурсів
2	Доступність	Значно нижча ціна ніж у конкурентів
3	Спектр застосувань	Використання для ряду потреб користувачів.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Раціональніший ціновий показник	18		+					
2	Доступність	20				+			
3	Спектр застосувань	17	+						

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад, зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити

прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони: створення апарату для ІХТ, за допомогою якого можна прискорити обстеження людини та визначити небезпечні відхилення на початкових стадіях.	Слабкі сторони: відсутність 100% точності, необхідність подальшого звернення до спеціалісту.
Можливості: попередня діагностика без звернення до лікаря при позитивних результатах.	Загрози: незацікавленість клієнтів, цінова конкуренція з одноразовим дослідженням у медичному закладі.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка обладнання, створення реклами, взаємодія з покупцями для перевірки працездатності обладнання	80%	6 міс
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, створення наукових ресурсів, розробка обладнання, тестування	65 %	1 рік

Обрано альтернативу №1.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 4.9, аналіз потенційних конкурентів).

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Швидка допомога	Готові	Високий	Середня	Середня
2.	Люди, з захворюваннями, що потребують лікування	Готові	Низький	Середня	Середня
Як цільову групу було обрано групу №1 та №2					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Використання альтернативних технологій та обладнання	Встановлення нового стандарту якості та ціни	Мобільність та віддаленість роботи	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Забирати існуючих та шукати нових	Так, основний функціонал	Наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл.

4.16) розробляється стратегія озиціонування (табл. 4.17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока якість послуг	Диференція	Універсальність запропонованого рішення, гарант якості та продуктивності	Якість, продуктивність, надійність

4.4 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 наведені результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість	Висока якість, сервісність	Якість
2	Портативність	Малий розмір апаратів	Портативність

Надалі розробляється трьохрівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумкою	Якісний товар та послуги, стандартизована якість послуг та обладнання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Н м	Вр/Тх/Тл/ Е/Ор
	1. Вартість обслуговування	М	
	2. Сумісність з більшістю об-ладнання	М	
	3. Висока надійність	М	
	4. Безпечний для користування	М	
	Якість: стабільна робота та високопродуктивний функціонал		
	Встановлення та налаштування		
III. Товар із підкріпленням	До продажу – послуги портативного дослідження		
	Після продажу – попереднє визначення типу захворювання		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити чим саме проект буде захищений від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає

аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	20000-60000 грн.	–	Високий	Н. 20000 – В. 60000 грн(Товар)

Останнім кроком буде визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення. Так як налаштування обладнання у кінцевого користувача не потребує певних професійних навиків від персоналу і обладнання налаштовано на стадії виробництва, то збут можна проводити в аптеках та медичних закладах.

Висновки до розділу. Було виконано опис ідеї проекту, що полягає у створенні приладу для ІХТ з можливістю використовувати його самостійно без звернення до спеціалістів. Побудова відбувалась за рахунок обрання найбільш оптимальних та підходящих систем для організації усієї роботи, застосування яких на сьогоднішній день є дуже перспективним напрямом розвитку. На сьогоднішній день на українському ринку не має аналогів.

Для впровадження стартапу доцільно обрати альтернативу дослідження поведінки споживачів, здійснити пошук наукових ресурсів, розробити необхідне технічне обладнання, налагодити зв'язки з рекламою, постійно взаємодіяти з покупцями для перевірки працездатності обладнання та отримання зворотного зв'язку. Подальше виконання стартап-проекту вважається доцільним.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі магістра було досліджено та представлено модель та засіб електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону з характеристиками не теплової дії на біологічні об'єкти.

Для досягнення поставленої задачі було проаналізовано характеристики випромінювання радіочастотного діапазону з не тепловим впливом на БО. Визначено що до нетеплових форм впливу ЕМВ радіочастотного діапазону відносять впливи, які викликають локальне підвищення температури БО не більше 0.1°C . До найбільш біоефективних областей частотного спектру відносять інфра- та низькочастотні коливання до $40\dots 50$ Гц і частоти міліметрового діапазону хвиль $30\dots 300$ ГГц.

В якості джерела збудження електромагнітних коливань в смузї біологічно значимих частот запропоновано використовувати періодичний імпульсний іскровий розряд в атмосферному повітрі із стримерним характером електричного пробую.

Проведено аналіз випромінювання з відкритого кінця круглого хвилеводу який показав, що такий розкрив не забезпечує аксіально симетричну діаграму спрямованості, і ширина головної пелюстки в двох взаємно розташованих площинах значно перевищує необхідну довжину хвилі, тому для подальших досліджень було обрано діелектричну стержневу антену характеристики якої для цілей роботи підходять краще.

Так для розглянутої в роботі антени з фторопласту-4 ($\epsilon' = 2,06$) діаметром 10 мм оптимальна довжина дорівнює 18 мм. А для антени з полістиролу ($\epsilon' = 2,522$) і такого ж діаметру оптимальна довжина складає 12 мм. Ширина основної пелюстки діаграми спрямованості антени з полістиролу у вказаній площині значно ширше, ніж у разі антени з фторопласту-4. Розмір діаграми спрямованості полістиролу різниться в різних площинах на відміну від фторопласту -4, таким

чином прийнято рішення для подальших досліджень розглядати ДСА виконану з фторопласту.

Визначено потужність випромінювання в радіочастотному діапазоні складає $P_{\text{випр}} = 10^{-17} \dots 10^{-14} \text{Вт}$. Отримана оцінка повною мірою відповідає критерію випромінювання надмалої потужності в радіочастотному діапазоні.

Визначено ККД для діелектричної стержневої антени з заданими параметрами, він склав $\eta_A = (0,9967)$. Отриманий результат свідчить про високу ефективність застосування ДСА в якості випромінювача в КВЧ діапазоні.

Було розроблено стартап проект на провадження генератора наднизької інтенсивності міліметрового діапазону. Розробка відбувалась за рахунок обрання найбільш оптимальних та підходящих систем для організації усієї роботи, застосування яких на сьогоднішній день є дуже перспективним напрямом розвитку. Визначено, що сьогоднішній день на українському ринку не має аналогів.

Для впровадження стартапу доцільно обрати альтернативу дослідження поведінки споживачів, здійснити пошук наукових ресурсів, розробити необхідне технічне обладнання, налагодити зв'язки з рекламою, постійно взаємодіяти з покупцями для перевірки працездатності обладнання та отримання зворотного зв'язку. Подальше виконання стартап-проекту вважається доцільним.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Волькенштейн М.В. Физика и биология / М.В. Волькенштейн. М.: Наука, 1980, – 124 с.
2. Тиманюк В.А. Биофизика: Учебник. – 2 –е издание / В.А. Тиманюк, Е.Н. Животнова. – К.: ИД «Профессионал», 2004. – 704 с.
3. Ситько С.П. Аппаратное обеспечение современных технологий квантовой медицины / С.П. Ситько, Ю.А. Скрипник, Ю.А. Яненко. Под ред. С.П. Ситько. – К.: ФАДА, ЛТД, 1999. – 199 с.
4. Медицинские приборы: Разработка и применение / Авт. кол.: Джон В. Кларк мл., Майкл Р. Ньюман, Валтер Х. Олсон и др.; Ред. Джон Г. Вебстер. – К.: Медторг, 2004. – 620 с.
5. Обухан К. І. Оцінка порогових рівней біологічної дії електромагнітних випромінювань на клітини системи / К. І. Обухан. - Київ, 1998. - 167 с.
6. Физиологические механизмы биологических эффектов низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ / Е.Н. Чуян, Н.А. Темурьянц, О.Б. Московчук, Н.В. Чирский, Н.П. Верко, Е.Н. Туманянц, В.П. Пономарева. – Симферополь : ЧП «Эльиньо», 2003. – 448 с
7. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. – [Чинний від 1996-29-08]. - Київ, 1996. - 27 с. – (Національний стандарт України).
8. Шахбазов В. Г. Новые представления о механизмах биологических эффектов СВЧ-излучений / В. Г. Шахбазов // Применение СВЧ-излучения в биологии и сельском хозяйстве : тез. Всесоюзной конф. - Кишинёв, 1991. - С. 58-59.
9. Киричук В. Ф. Информационное взаимодействие в живых объектах, подвергнутых воздействию электромагнитных КВЧ-колебаний на частотах молекулярных спектров поглощения и излучения оксида азота / В. Ф. 179 Киричук, А. В. Майбородин, М. В. Волин [и др.] // Миллиметровые волны в

медицине и биологии: 12 Российский симп. с межд. участием : сб. докладов. – М., 2000. – С.91-93.

10. Литвин В.В. Джерела електромагнітного випромінювання з біологічно значимим впливом / В.В. Литвин, В.П. Олійник, С.М. Куліш // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»: Тези наукових доповідей. Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 55 - 56.

11. Черенков А. Д. Влияние низкоэнергетических МП на клетки тканей вымени коров больных маститом / А. Д. Черенков, Л. Ф. Кучин. – Вісник ХДТУСГ. – 2001. – Вип. 6. – С. 32 – 33.

12. Hematological studies on changes caused by warming of the blood with microwaves / Kagi P., Riiegg R., Straub P.W., Hossli G. // Inflationsther. Klin. Er – nach. – 1977. – Vol. 4, № 5. – Pp. 285 – 289.

13. Орел А.Н. Лечение костной патологии животных низкоэнергетическим электромагнитным излучением СВЧ диапазона / Орел А.Н., Яковлев В.Ф. // Вісник ХДТУСГ. – Харків: ХДТУСГ. – 2003. – Вип. 19. – С. 197 – 201.

14. Петракович Г.Н. Биополе без тайн: Критический разбор теории клеточной биоэнергетики и гипотеза автора / Петракович Г.Н. // Русская мысль. – 1992. – № 2. – С. 66 – 71.

15. Selivanova, K. Determination of the basic parameters of sensor devices for the implementation of psychoneurological research with the introduction of multitouch technology / K. Selivanova, O. Avrunin, N. Kazimiprov//Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 2020 No.1 (11),P. 147–155.DOI:<https://doi.org/10.30837/2522-818.2020.11.147>

16. Чиркова Э.Н. Волновая природа регуляции генной активности: Живая клетка как фотонная вычислительная машина / Чиркова Э.Н. // Русская мысль. – 1992. – № 2. – С. 29 – 41.

17. Черенков А. Д. Изменение мембранного потенциала клеток биологических объектов находящихся во внешних электромагнитных полях. / А. Д. Черенков, Е. Л. Пиротти // Весник ХГПУ. – 2000. – Вып. 92.– С. 96 – 100.

18. Яшин А. А. Информационно-полевая самоорганизация биосистем / Яшин А. А. // Вестник новых медицинских технологий. 2000. – Т.VII, №31 – С. 30– 38.

19. Ю. А. Волошин Засоби формування ЕМ випромінювання радіочастотного діапазону з нетепловим ефектом впливу на біологічні об'єкти II Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні системи та технології в медицині" ІСМ–2019 28-29 листопада 2019 р., Харків.

20. С. М. Куліш, Ю. А. Волошин Дослідження параметрів широкосмугових імпульсних сигналів з використанням фрактального аналізу II Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні системи та технології в медицині" ІСМ–2019 28-29 листопада 2019 р., Харків.

21. С. М. Куліш, Ю. А. Волошин Дослідження факторів впливу на параметри генератору іскрового розряду Problems and Innovations in Science. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. Nika Publishing. London, Great Britain. 2020, V.2 Pp. 284-290.

22. Кулиш С.Н. Перспективы аппаратных применений ММ-технологий в медицине / С.Н. Кулиш, В.П. Олейник, В.В. Литвин // Міжнародна науковотехнічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007»: Тези доповідей. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2007. – С.

23. .Олейник В.П. Аппаратные методы исследования влияния электромагнитных полей на организм человека / В.П. Олейник, С.Н. Кулиш, В.В. Литвин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного 37 університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2007. вип. 6/2007 (47) частина 1, – С. 47 – 49.

24. Генерирование и оценка параметров широкополосного электромагнитного излучения КВЧ диапазона сверхнизкой интенсивности для информационных технологий в медицине//ВВ Литвин, ВП Олейник, СН Кулиш, ОС Аль//Радіоелектронні і комп'ютерні системи.

25. О факторе магнитного поля в информационно-волновом воздействии электромагнитного излучения на биологические объекты / В.П. Олейник, С.Н. Кулиш, В.В. Литвин, Аль Отти Сами // Радиотехника: Всеукр. Межвед. науч.-техн. сб. 2008. Вып. 154. – С.143 – 147. 184

26. Заикин И.П. Основы теории антенн / И.П. Заикин, А.В. Тощий, С.К. Абрамов, В.В. Лукин. – Х.: "ХАИ", 2005. – 100 с.

27. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ / В.Н. Егоров // Приборы и техника эксперимента. – 2007. - № 2. – С. 5-38.

28. Лавров А.С. Антенно-фидерные устройства / А.С. Лавров, Г.Б. Резников. – М.: Советское радио, 1974. – 368 с.

29. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ / В.Н. Егоров // Приборы и техника эксперимента. – 2007. - № 2. – С. 5-38.

30. Олейник В.П. Искровой разряд как источник электромагнитного излучения для КВЧ терапии / В.П. Олейник, С.Н. Кулиш, В.В. Литвин // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007»: Тези доповідей. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2007.

31. Y. A. Voloshyn, S. M. Kulish Assessment of the parameters of the spark discharge generator for compliance with sanitary standards Telecommunications and Radio Engineering, Volume 79, 2020 Number 12. – P. 1095-1107.

32. . Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние.- М.: Наука, 1984.

33. Ю. А. Волошин, С. Н. Куліш, В. П. Олійник Генератор електомагнітних випромінювань наднизької інтенсивності в медицині // Monograph. School of Economics and Management in Public Administration in Bratislava, 2021, pp. 107-124. ISBN 978 – 80 – 89654 – 73 – 4.

34. М. Портер // Конкурентна перевага. Як досягати стабільно високих результатів – 2019р.

ДОДАТОК А

Діаграма спрямованості з відкритого кінця хвилеводу

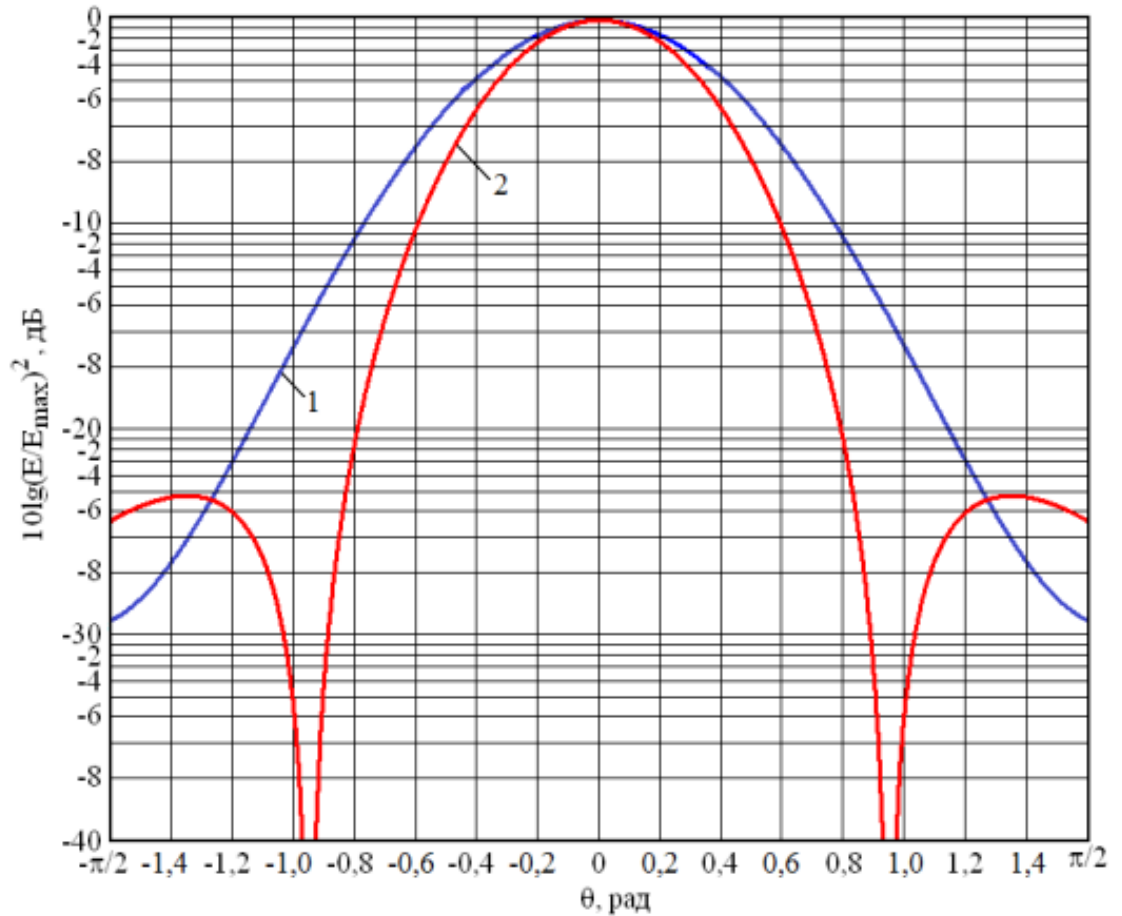


Рисунок Д.1.1 – Діаграми спрямованості відкритого кінця круглого хвилеводу, побудовані в площинах векторів Н і Е основної хвилі TE_{11}

ДОДАТОК Б

Вплив діаметру діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості

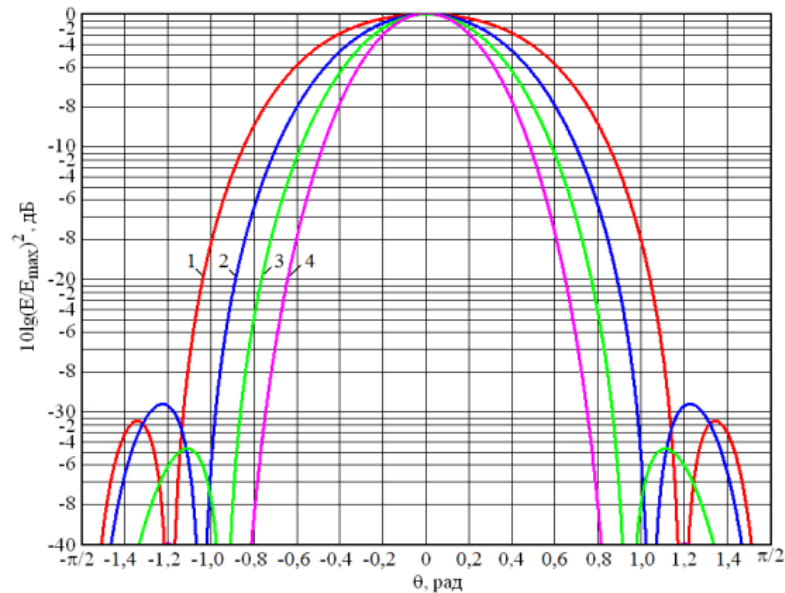


Рисунок Д.1.1 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різного діаметру в площині вектору Н хвилі TE₁₁

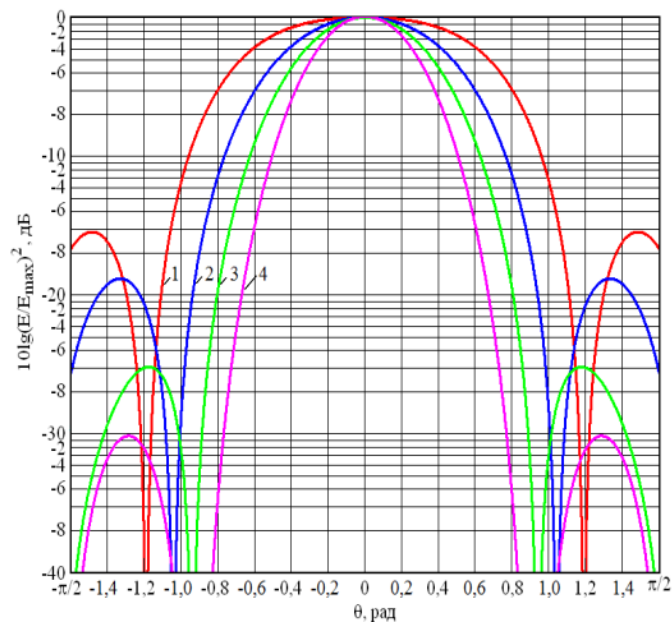


Рисунок Д.1.2 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різного діаметру в площині вектору Е хвилі TE₁₁.

ДОДАТОК В

Вплив довжини діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості

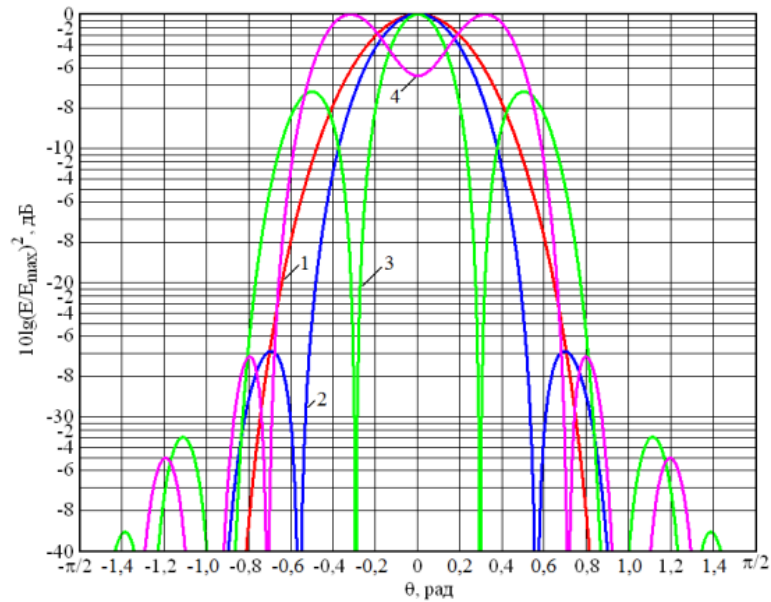


Рисунок Д.1.1 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різної довжини в площині вектору Н хвилі TE_{11}

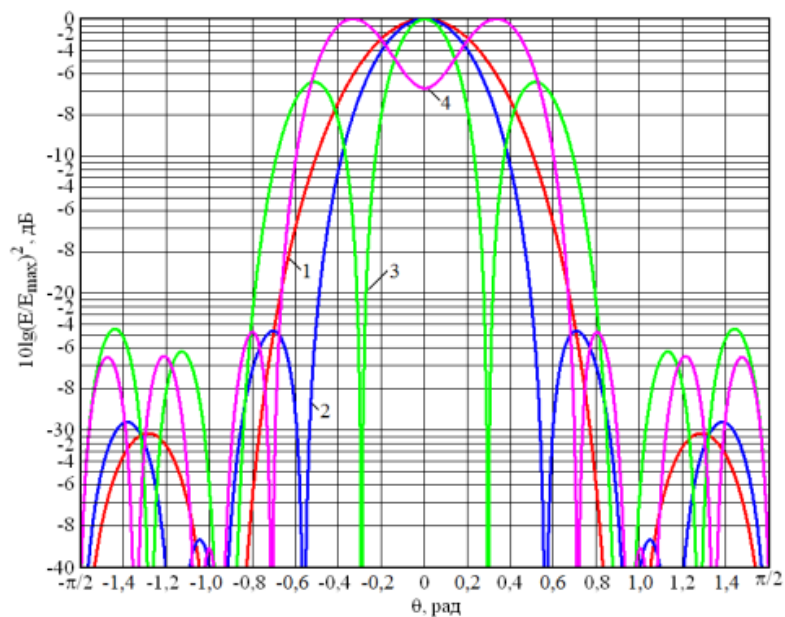


Рисунок Д.1.2 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени різної довжини в площині вектору Е хвилі TE_{11}

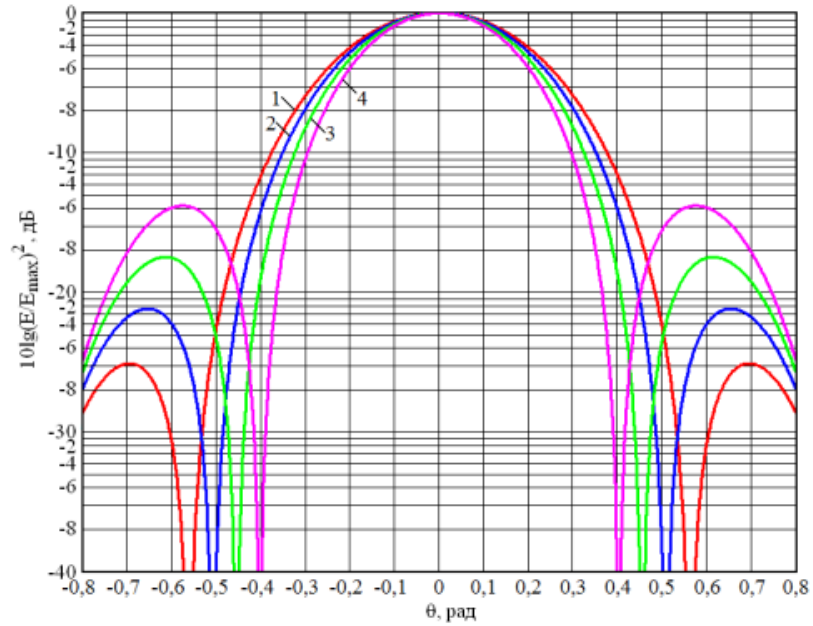


Рисунок Д.1.3 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени, довжина якої змінюється з кроком 1 мм, розраховані в площині вектору H хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі

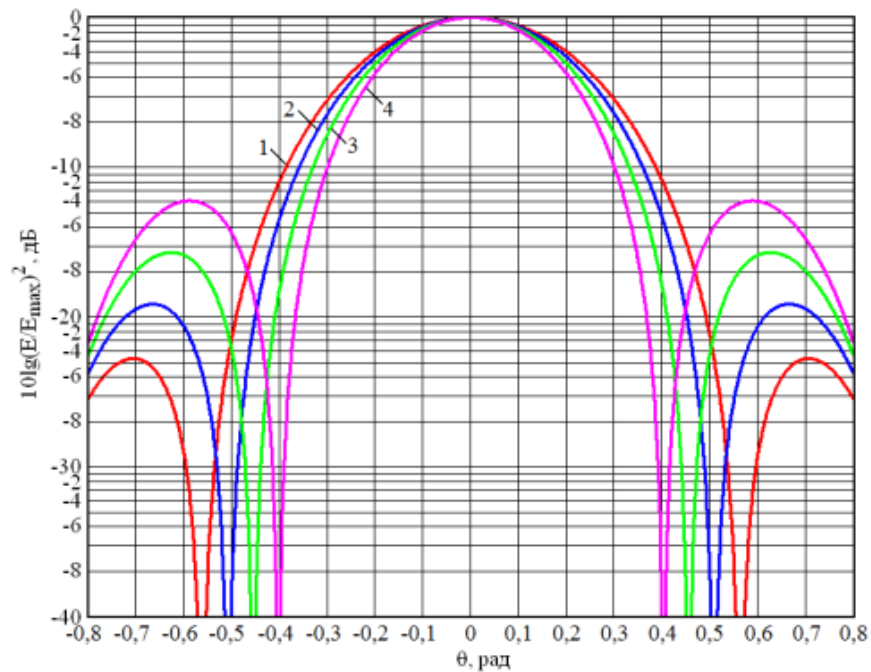


Рисунок Д.1.4 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени, довжина якої змінюється з кроком 1 мм, розраховані в площині вектору E хвилі TE_{11} в круглому хвилеводі

ДОДАТОК Г

Вплив матеріалу діелектричної стержневої антени на її діаграму спрямованості

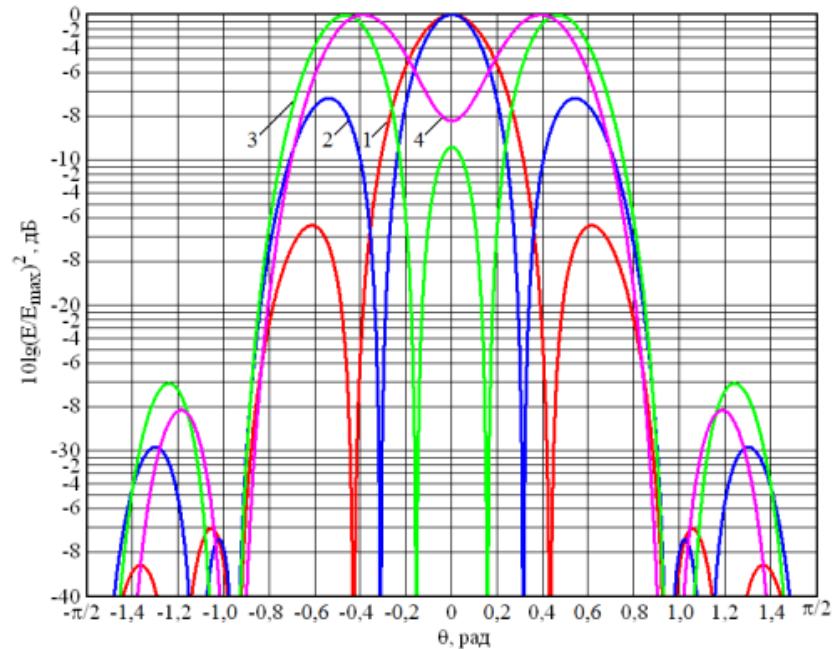


Рисунок Д.1.1 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу різної довжини, розраховані в площині вектору Н

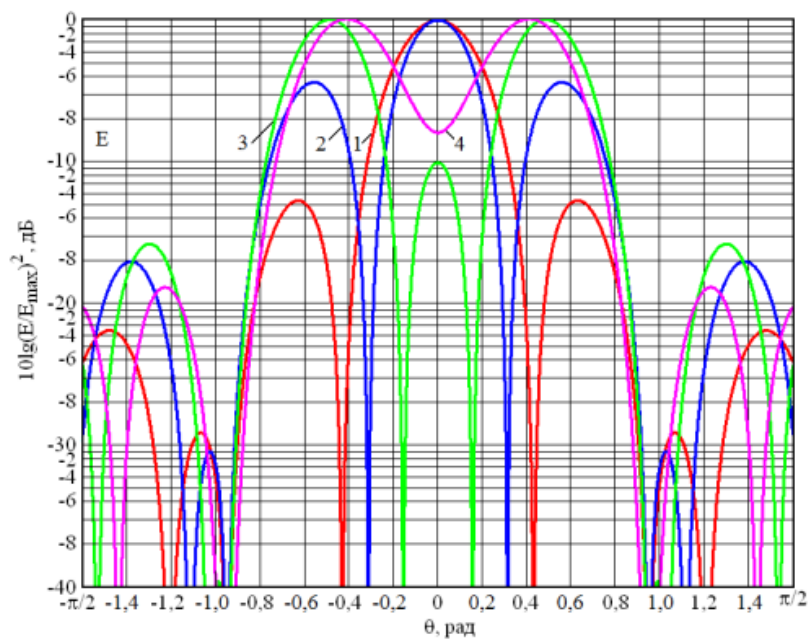


Рисунок Д.1.2 – Діаграми спрямованості діелектричної стержневої антени з полістиролу різної довжини, розраховані в площині вектору Е