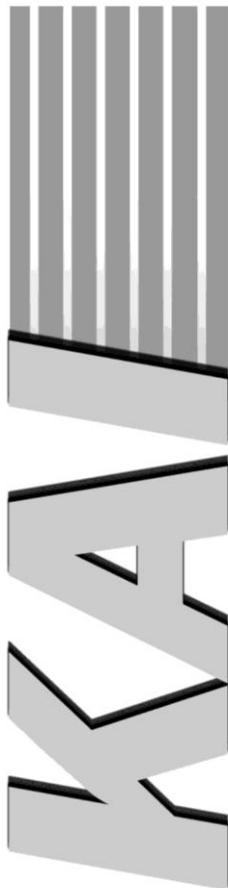


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Державний університет
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»



АНТЕННІ ПРИСТРОЇ

ТИПИ АНТЕН

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
для здобувачів вищої освіти
ОС «Бакалавр» спеціальності G5
«Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»



Київ 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Державний університет
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

АНТЕННІ ПРИСТРОЇ

ТИПИ АНТЕН

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
для здобувачів вищої освіти
ОС «Бакалавр» спеціальності G5
«Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»

Київ 2026

УДК 621.396.67(076.5)
А 72

Укладачі: *О. А. Щербина* – д-р техн. наук, проф.;
О. С. Задорожний – канд. техн. наук, доц.;
Л. В. Сібрук – д-р техн. наук, проф.;
Ю. В. Петрова – канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Р. С. Одарченко* – д-р техн. наук, проф.,
декан факультету аеронавігації, електроніки
та телекомунікацій (Державний університет
«Київський авіаційний інститут»)

Рекомендовано
Науково-методично-редакційною радою КАІ
(електронне видання).
Протокол № 7/25 від 17.11.2025

Антенні пристрої. Типи антен: лабораторний практикум / уклад.:
А 72 *О. А. Щербина, О. С. Задорожний, Л. В. Сібрук, Ю. В. Петрова.* –
Електронне видання. – К. : КАІ, 2026. – 40 с.

ISBN 978-617-8808-11-2

Містить базові теоретичні відомості та дослідження за допомогою моделювання в програмному середовищі FEKO різних типів антен: апертурних, із обертовою поляризацією, мікросмужкових, діелектричних.

Для здобувачів вищої освіти ОС «Бакалавр» спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка».

ВСТУП

Метою лабораторного практикуму з дисципліни «Антенні пристрої» є вивчення принципів побудови різних типів антен:

- дзеркальних (на прикладі параболічної антени);
- з обертовою поляризацією (на прикладі квадрифілярної спіральної антени);
- мікросмужкових (на прикладі мікросмужкової антени прямокутної форми);
- діелектричних (на прикладі діелектричної резонаторної антени прямокутної форми).

Для досягнення цієї мети треба ознайомитись із теоретичними відомостями з певної теми, спеціалізованим програмним забезпеченням віртуальної лабораторної установки (програмним середовищем електромагнітного моделювання ФЕКО), методикою виконання роботи, отриманими вихідними даними, які видає викладач.

Обладнання, прилади та програмне забезпечення.

Лабораторні роботи виконують у спеціалізованому комп'ютерному класі або дистанційно (за умови отримання програмного забезпечення). Здобувач вищої освіти (ВО) ознайомлюється з програмним середовищем ФЕКО на першому лабораторному занятті з дисципліни і в процесі виконання лабораторних робіт удосконалює свої знання.

Під час виконання та перед захистом лабораторної роботи здобувач ВО повинен вивчити теоретичний матеріал та вміти змістовно відповідати на питання для самоперевірки.

Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт.

Персональний комп'ютер приєднують до промислової мережі живлення напругою 230 В. Ця напруга є небезпечною для здоров'я людини, тому здобувач ВО не повинен здійснювати жодні дії з електричними пристроями, що приєднуються до промислової мережі живлення, без присутності викладача. Окрім того, здобувач не має права підключати до персонального комп'ютера зовнішні носії інформації.

Укладачі лабораторного практикуму вдячні компанії Altair Engineering Inc. за надане ліцензійне програмне середовище високочастотного електромагнітного моделювання ФЕКО.

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОДЗЕРКАЛЬНОЇ ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ

Мета роботи: вивчити принципи побудови дзеркальних антен на прикладі параболічної антени; дослідити залежність характеристики спрямованості параболічної антени від положення рупорного опромінювача та розміру розкриття параболічного дзеркала за допомогою математичного моделювання у програмному середовищі FEKO.

Основні теоретичні відомості

Дзеркальна або рефлекторна антена складається з опромінювача та відбивача (рефлектора), який становить собою провідну поверхню спеціальної форми і призначений для формування діаграми спрямованості (ДС) необхідного вигляду. Джерелом електромагнітних хвиль є опромінювач, який є слабконапрявленою антеною. Фронт хвилі, який створюється опромінювачем, є сферичним, і хвилі поширюються в бік дзеркала. Дзеркало призначене для перетворення сферичного фронту хвилі в плоский з метою забезпечення формування гострої ДС. Опромінювач розміщують у фокусі дзеркала F (рис. 1.1) [1, 2].

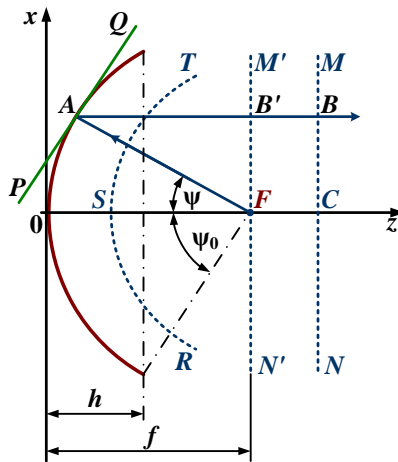


Рис. 1.1. Принцип формування поля однодзеркальною антеною

Розкрив антени має форму круга, що обмежений кромками дзеркала. Відстань від вершини дзеркала O до фокуса F є фокусною відстанню f . Якщо дзеркало параболічне, то перетин дзеркала будь-якою площиною, в якій лежить вісь Oz (оптична вісь антени), матиме форму параболи.

Розглянемо необхідність створення профілю дзеркала у вигляді параболи. Джерело поля в точці F створює випромінювання із сферичним фронтом RST . З точки F на поверхню дзеркала в довільно взяту точку A падає промінь FA . Після відбиття для створення вузької ДС потрібно, щоб відбитий промінь AB поширювався паралельно оптичній осі. Довжину шляху променю до площини MN , яка перпендикулярна до осі Oz , визначають як $FA+AB$. Промінь, що падає на дзеркало в точку O , після відбиття пройде шлях OC до площини MN . Поле в площині MN збуджуватиметься синфазно, якщо $FA + AB = FO + OC$. Перенесемо площину MN паралельно в точку F . Тоді попереднє рівняння матиме вигляд $FA + AB' = FO + OF$. Використовуючи позначення з рис. 1.1, $OF = f$, $FA = f$ і $AB' = \rho \cos \psi$. Умова синфазності поля в площині $M'N'$:

$$\rho + \rho \cos \psi = 2f. \quad (1.1)$$

Із формули (1.1) дістаємо рівняння кривої GOH (профілю дзеркала) у полярній та декартовій системах координат із центром у точці F :

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \psi}; \quad x^2 + y^2 = 4fz.$$

Параболічне дзеркало характеризується фокусною відстанню f , кутом розхилу $2\psi_0$ та глибиною дзеркала h . За величиною кута розхилу $2\psi_0$ антени наземних станцій поділяють на довгофокусні ($2\psi_0 < 120^\circ$), середньофокусні ($120^\circ < 2\psi_0 < 150^\circ$) і короткофокусні ($2\psi_0 > 150^\circ$). Зв'язок між глибиною дзеркала і кутом розхилу

$$h = fg^2 \frac{\Psi_0}{2}.$$

Можливі ще такі випадки розміщення опромінювача (рис. 1.2).

Вунадок 1 (рис. 1.2, *a*) – зміщення фазового центра опромінювача Δ позитивне, тобто фазовий центр зміщений від фокуса в напрямку від дзеркала; промінь ΦA відбивається під меншим

кутом, ніж промінь FA , і перетинає оптичну вісь антени в точці O' ; аналогічно і промінь $\Phi A'$, що відбивається від симетрично розташованої точки A' , поширюється в напрямку $A'D'$ і також перетинає оптичну вісь у точці O' . Отже в точці O' фокусуватимуться промені, що відбиваються від дзеркала; у подальшому ці промені розходяться, що призведе до розширення ДС антени; фронт хвилі KFL буде увігнутий.

Випадок 2 (рис. 1.2, б) – зміщення фазового центра опромінювача у бік дзеркала; відбиті промені AD і $A'D'$ розходяться; фронт хвилі KFL опуклий.

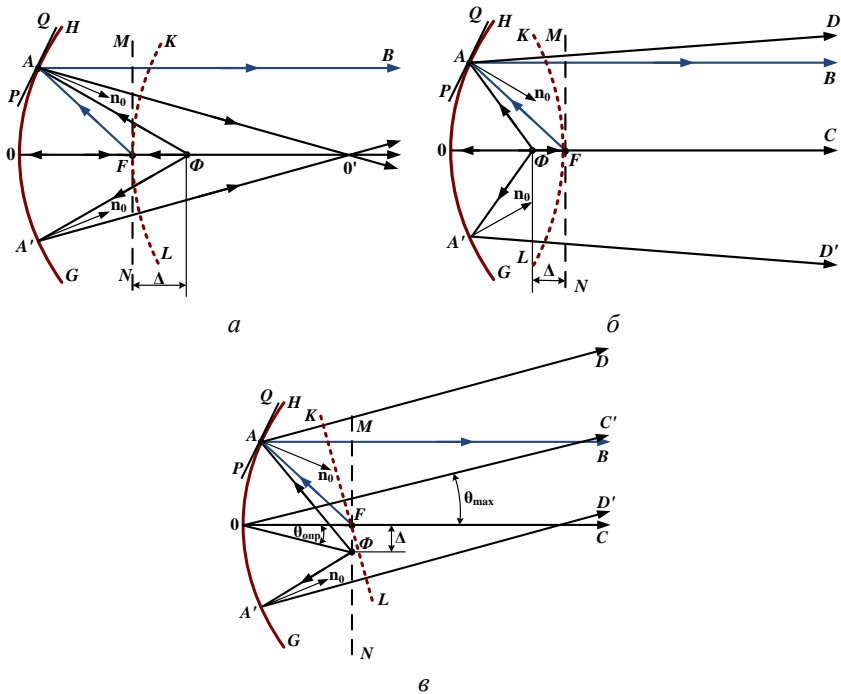


Рис. 1.2. Хід променів при різному розташуванні фазового центру

Випадок 3 (рис. 1.2, в) – зміщення фазового центра опромінювача Φ перпендикулярно до оптичної осі; фронт хвилі KFL за малих значень зсуву Δ залишається практично плоским; відбиті промені AD , $A'D'$ та OC' паралельні, але напрям максимального випромінювання відхиляється від оптичної осі антени на кут θ_{max} ; загалом кут θ_{max} залежить і від $\theta_{опр}$, і від відношення $f / 2R_0$, де $2R_0$ –

діаметр апертури, і від амплітудного розподілу напруженості поля в апертурі. У разі $\sin(\theta_{\max}) \ll 1$ кут відхилення максимуму випромінювання від оптичної осі можна обчислювати за формулою $\theta_{\max} \approx (\Delta \sin \psi_0) / R_0$; за значних зміщеннях Δ опромінювача від фокуса крім відхилення напряму максимального випромінювання виникають фазові спотворення в розкриві, які призводять до розширення ДС та зростання рівня бічних пелюсток.

Найпоширенішими однодзеркальними параболічними антенами є вісесиметрична та офсетна.

Вимоги до опромінювачів дзеркальних антен:

- опромінювач має створювати оптимальний амплітудний розподіл напруженості поля в апертурі антени;
- фазовий центр опромінювача повинен бути точковим, положення якого було б сталим у разі зміни довжини хвилі;
- випромінювання опромінювача має різко зменшуватися до нуля за межами кута розхилу дзеркала;
- рівень кросполяризації повинен бути низьким;
- опромінювач має добре узгоджуватися з фідером.

На практиці часто як опромінювач параболічної антени, використовують рупорну антену.

Розрахунок параболічної антени з різними типами опромінювачів детально описано в праці [2]. Використаємо декілька формул з методики для визначення таких параметрів:

- діаметр апертури

$$2R_0 \approx 70^\circ \lambda / 2\theta_{0,5}, \quad (1.2)$$

де $2\theta_{0,5}$ – потрібна ширина ДС дзеркальної антени;

- фокусна відстань

$$f = R_0 / 2 \operatorname{tg}(\psi_0 / 2), \quad (1.3)$$

де для довгофокусної антени $\psi_0 = 50^\circ$.

Послідовність виконання роботи

1. Креслення геометрії.

Геометрію створюємо за допомогою програми CADFEKO і записуємо у файл *.cfx. Для прикладу дослідження використаємо середню частоту $f = 3$ ГГц. Тобто середня довжина хвилі $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 3 \cdot 10^9 = 0,1$ м.

1.1. Обираємо одиниці довжини, які використовуватимемо в проєкті. В головному меню програми знаходимо **Model Units** і обраємо **Centimetres (cm)**.

1.2. Оскільки опромінювачем буде рупорна антена, моделювання якої детально описано в праці [3], то треба повторити підп. 1.2–1.3 лабораторної роботи 5 [3, с. 55–57] для іншої робочої частоти. Результат уведення змінних величин і основні характеристики рупорного випромінювача подані на рис. 1.3.

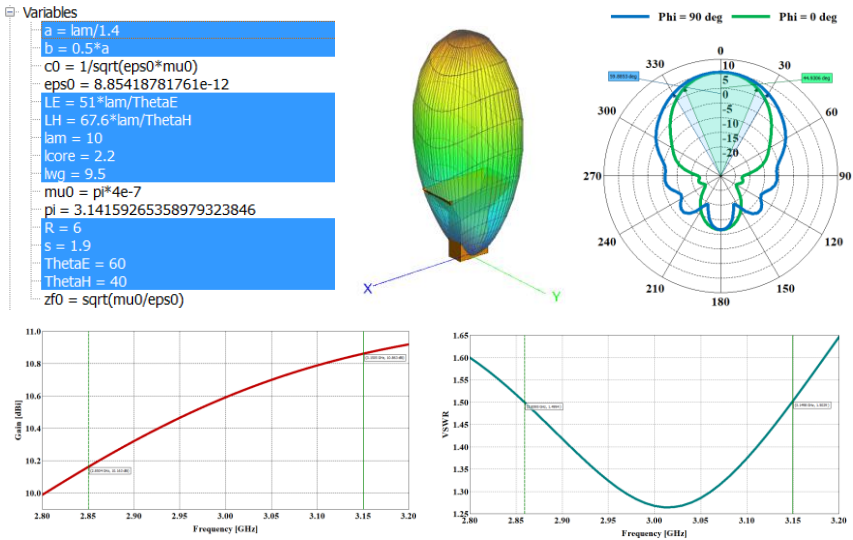


Рис. 1.3. Змінні величин та основні характеристики рупорного випромінювача

1.3. Для моделювання параболічного дзеркала додатково вводимо величини (рис. 1.4, *a*). У дереві проєкту **Construction** → **Variables** додаємо радіус розкриву дзеркала $R_0 = 70$ см за формулою (1.2) та фокусну відстань $f = 75$ см за формулою (1.3).

1.4. Створюємо параболічний рефлектор (дзеркало).

У вкладці **Construct** обираємо фігуру **Paraboloid**, обертаємо її розкрив у бік рупорної антени (рис. 1.4, *б*) та задаємо розміри, використовуючи змінні величини (рис. 1.4, *в*).

Об'єднуємо всі частини конструкції. Для цього виділяємо в основному дереві проєкту всі елементи (параболіод та рупор) і обираємо **Construct** → **Union**.

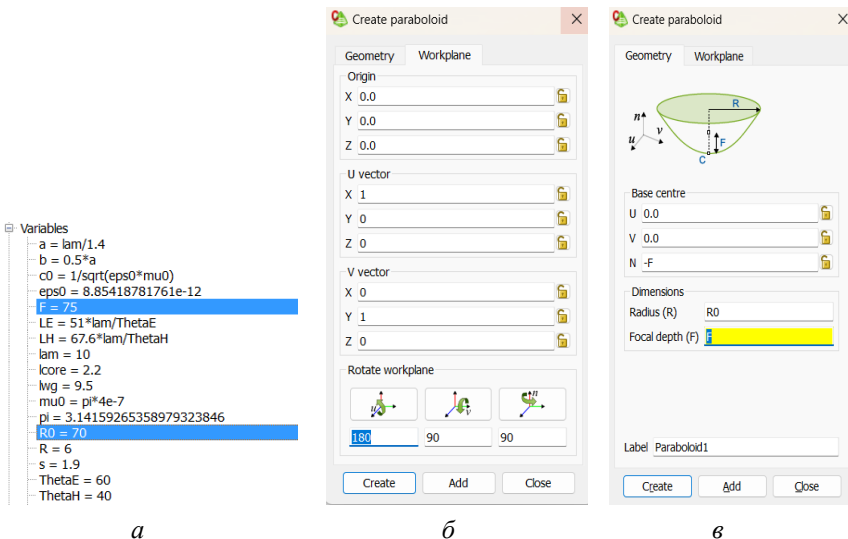


Рис. 1.4. Побудова параболічного дзеркала

2. Отримання результатів.

Перед початком розрахунків обираємо в основному меню вкладку **Home** → **FEKO solver**, а після виконання розрахунків відкриваємо програму перегляду результатів **POSTFEKO**.

2.1. Діаграму спрямованості дзеркальної антени в три- і двовимірному вигляді відповідно (рис. 1.5, *a*, *б*) отримуємо, використовуючи рекомендації підп. 3.2 лабораторної роботи 1 [3, с. 13] з такими правками. На правій панелі обираємо **Theta** → **0 deg**, **Phi** → **90 deg** для побудови ДС у площині *E*; для площини *H* використовуємо **Theta** → **0 deg**, **Phi** → **0 deg**.

Для дослідження залежності коефіцієнта підсилення антени від частоти (рис. 1.6) в напрямку максимального випромінювання повторюємо підп. 3.3 лабораторної роботи 1 [3, с. 14], але на правій панелі обираємо: **Theta** → **0 deg**; **Phi** → **0 deg**.

Щоб отримати оцінку узгодження антени з лінією живлення (50 Ом), повторюємо підп. 3.4 Лабораторної роботи 1 [3, с. 15] (**Home** → **Add results** → **Source data**; на правій панелі обираємо **Quantity** → **VSWR**. Дістаємо залежність коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) від частоти (рис. 1.7), з якої можна побачити смугу робочих частот (КСХН < 1,5), що свідчить про оптимальне узгодження дзеркальної антени.

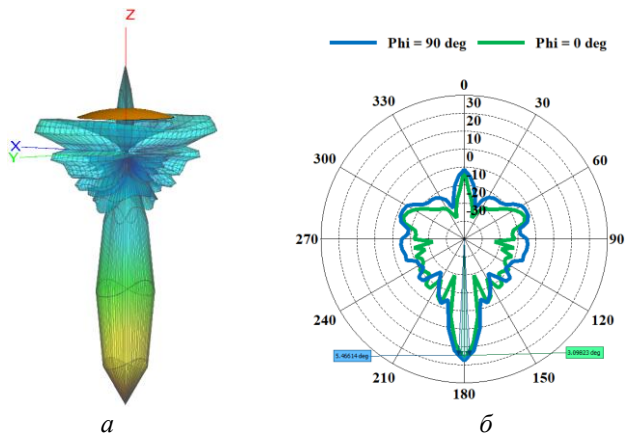


Рис. 1.5. Тривимірна ДС та ДС дзеркальної антени в полярній системі координат

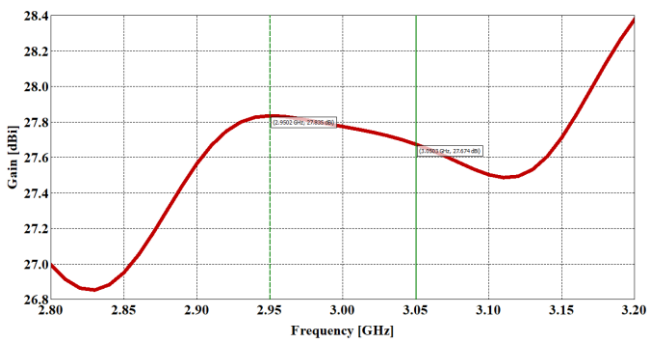


Рис. 1.6. Залежність коефіцієнта підсилення дзеркальної антени від частоти в напрямку максимального випромінювання

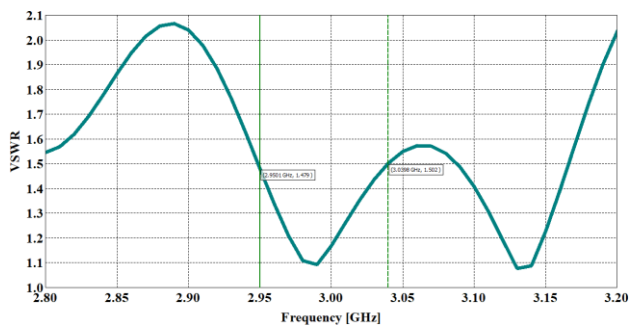


Рис. 1.7. Залежність КСХН дзеркальної антени від частоти

2.2. Для дослідження впливу положення опромінювача відносно дзеркала на характеристики випромінювання за вказівкою викладача змінюємо положення рупорного опромінювача (зсуваємо опромінювач до/від дзеркала або від осі симетрії параболи) і повторюємо підп. 2.1 цієї лабораторної роботи.

3. Підсумування результатів досліджень, готування висновків за результатами кожного етапу, оформлення та захист звіту з лабораторної роботи.

Питання для самоперевірки

1. Поясніть основне призначення параболічного профілю дзеркала.
2. Сформулюйте визначення: «фокусна відстань», «кут розхилу», «глибина дзеркала».
3. Що таке довго-, середньо- і короткофокусні дзеркальні антени?
4. Що зміниться при переміщенні опромінювача параболічного дзеркала від фокуса параболоїда обертання?
5. Сформулюйте основні вимоги до опромінювачів дзеркальних антен, аргументуючи їх значущість.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КВАДРИФІЛЯРНОЇ АНТЕНИ

Мета роботи: вивчити принципи побудови антен з обертовою поляризацією (на прикладі квадрифілярної спіральної антени); дослідити залежність параметрів квадрифілярної антени від частоти за допомогою математичного моделювання в програмному середовищі FEKO.

Основні теоретичні відомості

Антени з обертовою поляризацією поля найчастіше використовують у тому разі, коли складно створити умови для сталого положення площини поляризації електромагнітної хвилі і треба забезпечити більш надійний зв'язок.

Теорія побудови квадрифілярних спіральних антен (КСА) ґрунтуються на теорії спіральних антен, які широко застосовуються у діапазонах сантиметрових, дециметрових і метрових хвиль (рис. 2.1, *a*). Конструкція таких антен має вигляд спіралі, один кінець якої вільний, а другий під'єднується до центрального провідника коаксіального кабелю. Зовнішня обмотка кабелю приєд-

нується до диска, який є противагою антени. Крім того, диск виконує функцію рефлектора, зменшуючи випромінювання в задній півпростір. Циліндрична спіральна антена характеризується такими параметрами (рис. 2.1, б): довжиною витка L , діаметром витка $2a$, кроком обмотки спіралі S і числом витків n . Довжина антени $l = nS$.

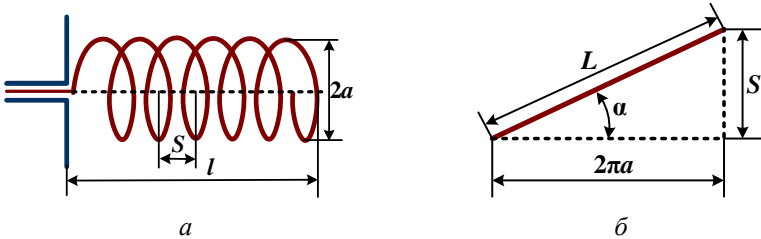


Рис. 2.1. Конструкція циліндричної спіральної антени

Під час роботи антени в спіралі виникають хвилі різних типів. Розрізняють три основні види випромінювання спіральних антен: ненапрявлене (дипольне), осьове і конічне. Докладно умови виникнення цих режимів розглянуто в лекційних матеріалах цієї дисципліни. Найбільше значення має режим осьового випромінювання, що існує за умови $0,25\lambda \leq 2a \leq 0,45\lambda$ [1, 4]. Тобто, якщо вздовж витка вкладається ціла хвиля: $L / \lambda \approx 1$.

Спіральну антену в режимі осьового випромінювання можна розглядати як сукупність n витків, які розташовані на одній осі і по яких протікає біжуча хвиля струму, або як сукупність n кільцевих антен із біжучою хвилею струму (антенна решітка (АР) осьового випромінювання з кільцевих елементів). Детальний аналіз такої апроксимації викладений у праці [1].

Характеристика спрямованості (ХС) спіральної антени:

$$f_{\theta}(\theta) = F_{\theta}^k(\theta) f_c(\theta); \quad f_{\phi}(\theta) = F_{\phi}^k(\theta) f_c(\theta),$$

де $F_{\theta}^k(\theta) = 2 \operatorname{ctg} \theta J_1(\sin \theta)$, $F_{\phi}^k(\theta) = J_0(\sin \theta) - J_2(\sin \theta)$ – ХС кільця, яке обтікається біжучою хвилею струму і має відносну довжину $L / \lambda = 1$, у двох площинах; $J_0(u)$, $J_1(u)$, $J_2(u)$ – функції Бесселя нульового, першого та другого порядків; $f_c(\theta)$ – множник системи.

Множник системи для спіральної антени:

$$f_c(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{nkl}{2} (\xi - \sin \alpha \cos \theta) \right]}{\sin \left[\frac{kL}{2} (\xi - \sin \alpha \cos \theta) \right]},$$

де ξ – коефіцієнт сповільнення.

Для спіральних антен з кутом піднесення $\alpha = 12...16^\circ$, які найчастіше використовуються на практиці, у результаті експериментальних досліджень знайдені такі співвідношення:

- ширина ДС за нулями і половиною потужністю відповідно: $2\theta_0 = 115^\circ / \left((L/\lambda) \sqrt{nS/\lambda} \right)$; $2\theta_{0,5} = 52^\circ / \left((L/\lambda) \sqrt{nS/\lambda} \right)$;
- коефіцієнт спрямованої дії: $D = 15(L/\lambda)^2 (nS/\lambda)$;
- вхідний опір антени: $R_A = 140L/\lambda$.

Спіральна антена працює в смузі частот біля 30 %.

Квадрифілярна спіральна антена має у своєму складі чотири спіральні елементи, кожен з яких збуджується струмом, фаза якого має зсув відносно сусіднього елемента на 90° . Кількість витків спіральних елементів залежить від необхідної ширини діаграми спрямованості (найчастіше використовують піввиткову КСА).

Для побудови дротової КСА застосуємо один з алгоритмів конструювання, який детально описано в праці [5]. Зобразимо дротову КСА у вигляді петель – малої М та великої В (рис. 2.2, а). Довжина одного плеча дорівнює півхвилі (рис. 2.2, б).

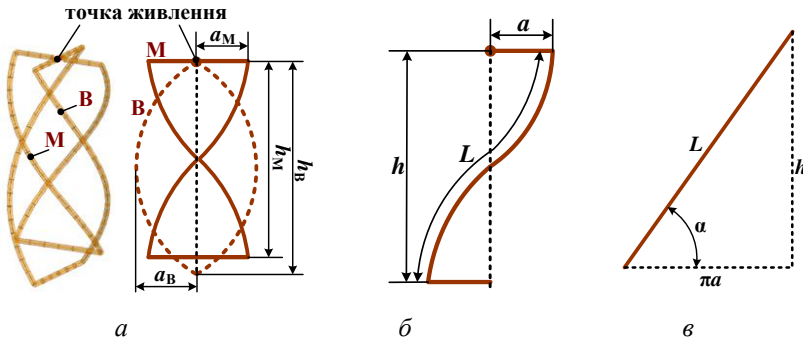


Рис. 2.2. Конструкція КСА: а – схематичне зображення; б – геометрія спірального плеча; в – геометрія піввитка

Довжину піввитка – плеча КСА (рис. 2.2, *в*) – обчислюємо за формулою:

$$L = h / \sin \alpha ,$$

де $\alpha = \arctg(h/(\pi a))$.

Обираємо тип живлення елементів антени. Як було зауважено вище, для створення обертової поляризації струми живлення кожного спірального елемента повинні мати однакові амплітуди і бути зсунуті за фазою на 90° відносно один одного.

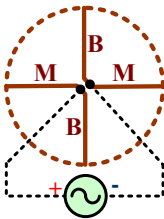


Рис. 2.3. Схема під'єднання живлення до дротової КСА

Для друкованих КСА використовують досить складний тип живильної мережі, що передбачає складну конфігурацію мікросмужкових ліній, на яких побудовані лінії затримки [6] або спеціальні мікросхеми фазообертачів; для дротових КСА застосовують відносно прості типи ліній живлення елементів. Схематичне зображення одного з варіантів під'єднання живлення проілюстровано на рис. 2.3.

Послідовність виконання роботи

1. Креслення геометрії.

Геометрію створюємо за допомогою програми **CADFEKO** і зберігаємо у файл *.cfx. Для дослідження використаємо середню частоту $f = 1270$ МГц. Тобто середня довжина хвилі $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 12,5 \cdot 10^8 = 0,236$ м.

1.1. Обираємо одиниці довжини, які використовуватимемо в проєкті. Для цього в головному меню програми знаходимо **Model Units** і обраємо **Millimetres (mm)**.

1.2. Вводимо змінні величини (рис. 2.4). В дереві проєкту **Construction** → **Variables** додаємо параметри великої і малої петель: діаметри $d_{\max} = 2a_{\max} = 31$ мм, $d_{\min} = 2a_{\min} = 31$ мм; висоту $h_{\max} = 84$ мм, $h_{\min} = 76$ мм; відстань між затискачами антени $s = 5$ мм.

1.3. Конструюємо КСА.

Створюємо спіральні елементи КСА – два для малої петлі і два для великої. Для цього в основному меню обираємо: **Construct** → **Create arc** → **Helix** і задаємо потрібні розміри і напрямок спіралі (рис. 2.5, *а*).

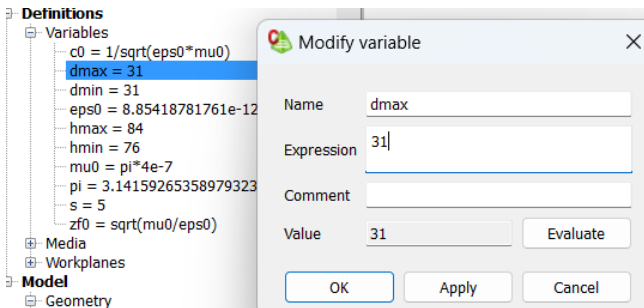


Рис. 2.4. Введення змінних величин

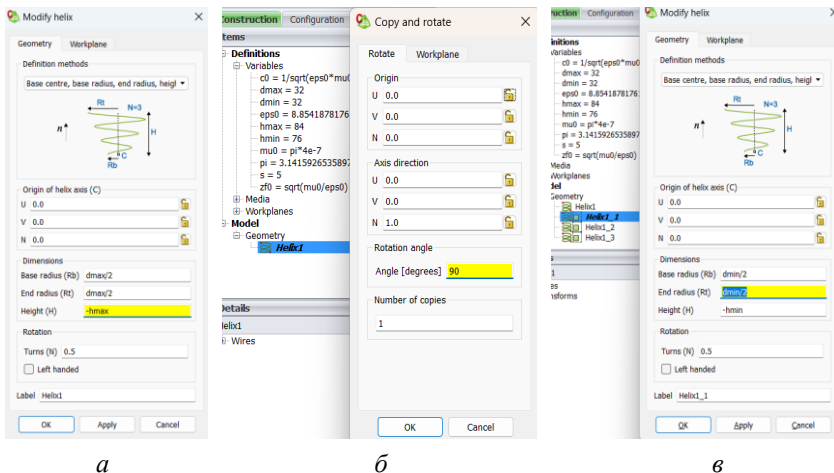


Рис. 2.5. Побудова спіральних елементів КСА

Другу, третю і четверту спіралі створюємо способом копіювання першої: правою кнопкою миші тиснемо на елемент основного дерева проекту **Helix1** і послідовно обираємо **Copy special** → **...and rotate** (рис. 2.5, б), а потім **Angle (degrees) 90°**, **180°** і **270°**. Отримавши чотири спіралі однакової висоти, другу і четверту спіралі зменшуємо по висоті (іноді змінюють і діаметр). Для цього в основному дереві проекту поступово обираємо елементи **Helix1_1** та **Helix1_3** і змінюємо їх висоту з h_{\max} на h_{\min} , а діаметр – з d_{\max} на d_{\min} (рис. 2.5, в).

Для об'єднання великих і малих спіралей у дві петлі створюємо низку ліній (**Construct** → **Create curve** → **Line**), як це зображено на рис. 2.6, 2.7.

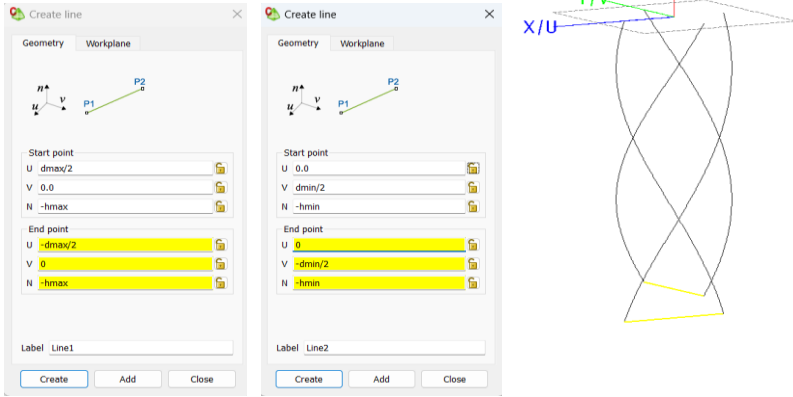


Рис. 2.6. Об'єднання нижньої частини петель КСА

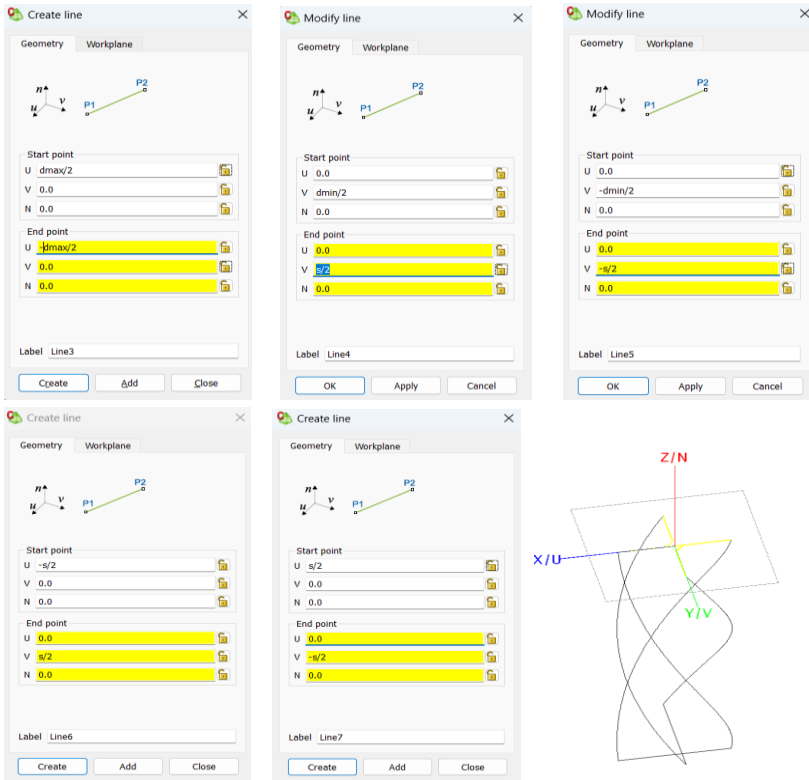


Рис. 2.7. Об'єднання верхньої частини петель КСА

Потім об'єднуємо всі частини конструкції. Для цього виділяємо в основному дереві проекту всі елементи (чотири спіралі та сім ліній) і обираємо **Construct** → **Union**.

Для створення дротового порту у верхній частині конструкції тиснемо на центральний дріт (рис. 2.8) правою кнопкою миші і обираємо **Create Port** → **Wire port**. Треба вказати, у якому місці дроту буде розташоване джерело напруги. Визначаємо середину дроту (**Middle**). Встановлення джерела напруги на порт було описано в лабораторній роботі 1 [3, с. 11].

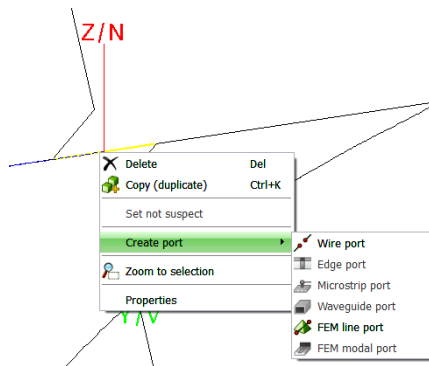


Рис. 2.8. Підключення порту

Задання початкових даних (частоти, характеристик дальнього поля та розбиття на сітку) робимо аналогічно п. 2 лабораторної роботи 1, [3, с. 11]. Для розбиття на сітку (**Create mesh**) обираємо радіус дроту 0,5 мм.

2. Отримання результатів.

Перед початком розрахунків обраємо в основному меню вкладку **Home** → **FEKO solver**, а після виконання розрахунків відкриваємо програму перегляду результатів **POSTFEKO**.

2.1. Діаграму спрямованості КСА в три- і двовимірному вигляді відповідно (рис. 2.9, а, б) отримуємо, використовуючи рекомендації п. 2.1 лабораторної роботи 5 [3, с. 50].

Для дослідження залежності коефіцієнта підсилення антени від частоти (рис. 2.10) в напрямку максимального випромінювання повторюємо підп. 3.3 лабораторної роботи 1 [3, с. 12], але на правій панелі обираємо: **Theta** → **0 deg**; **Phi** → **0 deg**.

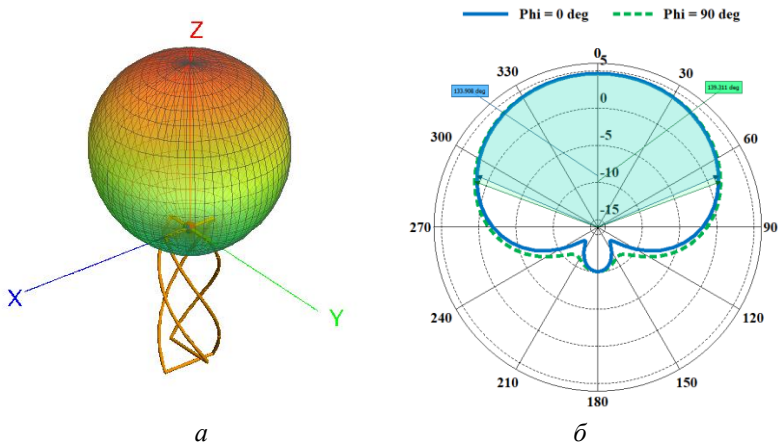


Рис. 2.9. Три- і двовимірна ДС КСА

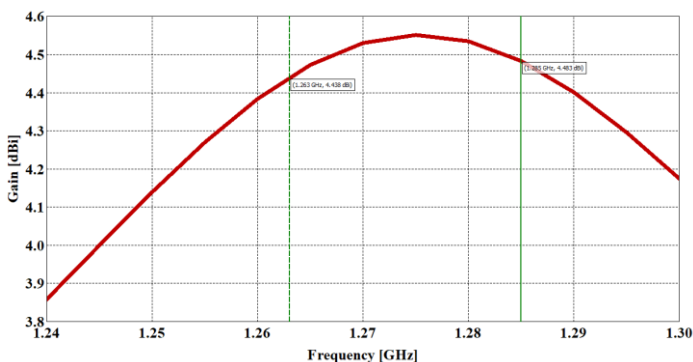


Рис. 2.10. Залежність коефіцієнта підсилення КСА від частоти в напрямку максимуму випромінювання

Щоб отримати оцінку узгодження антени з лінією живлення (50 Ом), повторюємо підп. 3.4 лабораторної роботи 1 [3, с. 13] (**Home** → **Add results** → **Source data**; на правій панелі обираємо **Quantity** → **VSWR**). Дістаємо залежність КСХН від частоти (рис. 2.11), з якої можна побачити смугу робочих частот (КСХН < 1,5), що свідчить про гарне узгодження КСА.

2.2. Для дослідження впливу напрямку намотування витків спіралі на напрямок поляризації (правогвинтова або лівогвинтова) за вказівкою викладача змінюємо напрямок спіральних елементів і повторюємо підп. 2.1 цієї лабораторної роботи.

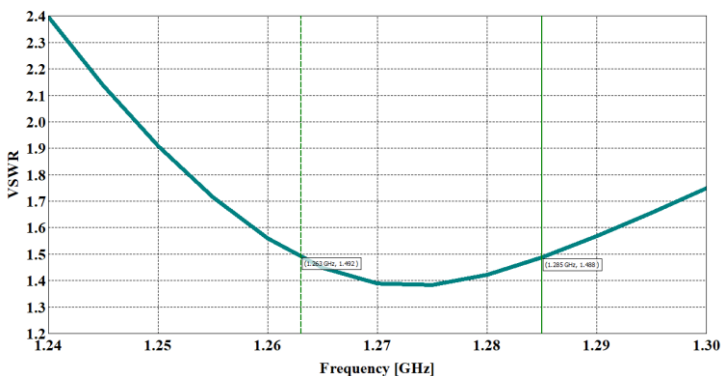


Рис. 2.11. Залежність КСХН КСА від частоти

3. Підсумування результатів досліджень, готування висновків за результатами кожного етапу, оформлення та захист звіту з лабораторної роботи.

Питання для самоперевірки

1. Які бувають види випромінювання спіральної антени? Поясніть принцип їх утворення.
2. Опишіть умову осевого випромінювання спіральної антени.
3. Наведіть формули й основні характеристики поля випромінювання спіральної антени.
4. За яким принципом будують КСА? Обґрунтуйте свою відповідь, використовуючи креслення антени і схему її під'єднання до джерела.
5. Що зміниться у випромінюванні КСА в разі збільшення кількості витків спіралі?

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ

Мета роботи: вивчити принципи побудови мікросмужкових антен на прикладі мікросмужкової антени прямокутної форми; дослідити залежність параметрів мікросмужкової антени від частоти за допомогою математичного моделювання у програмному середовищі FEKO.

Основні теоретичні відомості

Перспективним способом мініатюризації є використання друкованих технологій, тобто створення мікросмужкових випромінювачів. Розвиток друкованих технологій та теоретичні досягнення в аналізі електродинамічних процесів у мікросмужкових лініях передачі привели до появи такого класу антен, як мікросмужкові випромінювальні пристрої.

Мікросмужкові антени (МСА) виготовлені за технологією інтегральних схем, що забезпечує: високу повторюваність розмірів; низьку вартість; малі металоємність, габаритні розміри, масу. Антени цього класу, які здатні випромінювати електромагнітні хвилі з лінійною, круговою й еліптичною поляризацією, мають високі аеродинамічні характеристики, дають змогу створювати багатоеlementні фазовані антенні решітки (АР).

Недоліками МСА є відносно мала електрична міцність, що обумовлює низький рівень допустимих потужностей, труднощі в конструюванні пристроїв з переналаштуванням і зміною параметрів друкованих елементів.

Використовують МСА переважно на частотах 100 МГц – 30 ГГц.

Для пояснення принципу дії мікросмужкової антени розглянемо модель прямокутного випромінювача (рис. 3.1, *a*) [4]. Випромінювальний елемент 2, довжина якого L , а ширина W , живиться мікросмужковою лінією 1 (один із можливих способів живлення). Випромінювальний елемент і смужка виконані з металевої фольги й нанесені на шар діелектрика завтовшки h . На нижньому боці діелектрика розміщений металевий екран 4.

Хвиля струму, яка подається фідером 1, поширюється вздовж лінії 2 без зміни своєї структури з рівномірним розподілом у поперечному перерізі (вздовж осі Ox). У разі падіння на відкритий кінець елемента 2 хвиля відбивається і зміна напруженості поля спостерігається лише вздовж осі Oy . На рис. 3.1, *б* зображена конструкція прямокутного випромінювального елемента (патч-антени) на шарі діелектрика.

Довжина випромінювача $L \approx \lambda/2$. Як і у довгій лінії в просторі під елементом виникне стояча хвиля. Картина силових ліній електричного поля матиме вигляд, зображений на рис. 3.1, *в*. Нормальні складові вектора напруженості електричного поля на

лівій і правій гранях випромінювального елемента перебувають у протифазі, тому їх поля випромінювання в площині, перпендикулярній площині випромінювача, взаємно компенсуються, а отже їх внесок у поле випромінювання незначний.

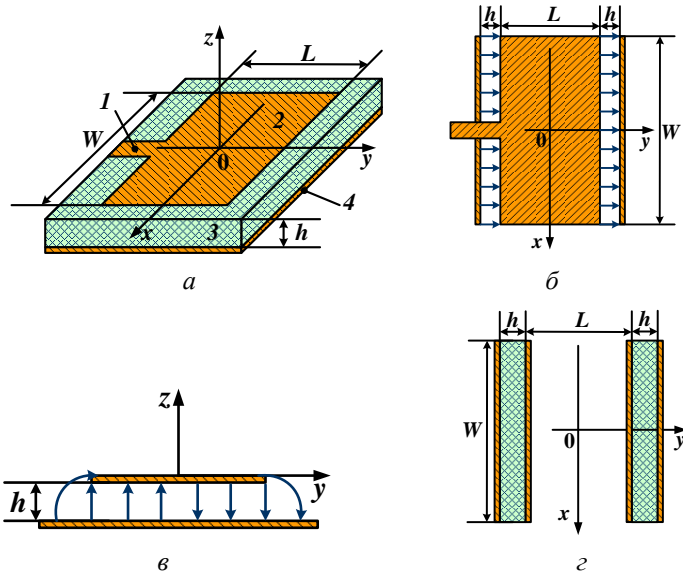


Рис. 3.1. Модель прямокутного мікросмушкового випромінювача

Тангенціальні складові з обох боків випромінювального патч-елемента перебувають у фазі, що приводить до формування у напрямку осі Oz максимуму випромінювання. Оскільки товщина діелектричної підкладки значно менша за довжину хвилі ($h \ll \lambda$), то впливом шару діелектрика на розподіл поля в просторі можна знехтувати. Отже, випромінювальний патч-елемент можна зобразити у вигляді двох щілин з рівномірним розподілом тангенціальних складових напруженості електричного поля вздовж повздовжнього розміру щілин (рис. 3.1, *з*). Вважаємо, що ширина щілин дорівнює товщині діелектричної підкладки, а довжина щілин – ширині випромінювального патч-елемента W . Відстань між щілинами визначаємо як довжину випромінювального елемента $L \approx \lambda/2$. Також вважаємо, що напруга між кромками щілин дорівнює напрузі між краєм елемента 2 і заземленим екраном 4 (рис. 3.1, *а*).

Діаграму спрямованості такої МСА в площині E визначають як добуток ХС однієї щілини і множника системи, що складається з двох елементів. У площині H поле випромінювання визначають як поле випромінювання однієї щілини.

Прямокутний патч-випромінювач за принципом дії належить до резонаторних антен, серед яких використовують досить багато резонаторів інших геометричних форм. Залежно від форми резонатора та способу його живлення можна отримати і лінійно поляризовані хвилі, і електромагнітні хвилі з коловою та еліптичною поляризацією.

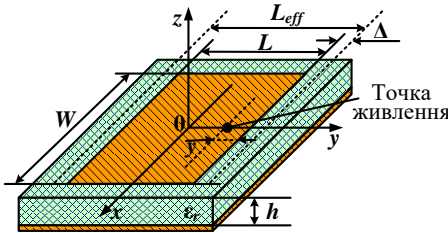


Рис. 3.2. Прямокутна МСА, що живиться коаксіальною лінією

Для процесу проектування і подальшого моделювання обираємо прямокутну МСА із живленням за допомогою коаксіального кабелю (рис. 3.2).

Для точних розрахунків прямокутної МСА можна використати методику, описану в праці [2]. Застосуємо декілька з формул методики побудови моделі:

1. Ширина пластини

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.1)$$

де c – швидкість світла; f – робоча частота; ϵ_r – відносна діелектрична проникність матеріалу підкладки.

2. Довжина антени для хвилі типу E_{010}

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} + 2\Delta, \quad (3.2)$$

де $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2}$ – ефективна діелектрична проник-

ність; $\Delta = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(W/h + 0.262)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(W/h + 0.813)} h$ – вкорочення пластини

(за тонкої підкладки значення Δ є від'ємним і геометрична довжина пластини зменшується).

3. Визначаючи вхідний опір МСА в разі збудження хвилі з лінійною поляризацією вважатимемо, що мікросмужкова лінія з обох кінців уздовж ширини W навантажена на щілинні випромінювачі. Активна вхідна провідність випромінювання одиночної щілини

$$G = \frac{\pi w}{W_c \lambda_0}, \quad (3.3)$$

де W_c – хвильовий опір середовища ($W_c = 120\pi$ Ом у разі вільного простору); $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – хвильове число.

Вхідний опір прямокутного патч-випромінювача на краю пластини ($y = L/2$) можна визначити за формулою:

$$R_{\text{вх}} = 1/2G. \quad (3.4)$$

Вхідний опір прямокутної МСА змінюється від нуля в центрі антени до відповідного значення на краю пластини за таким законом:

$$R_y = R_{\text{вх}} \cos^2 \frac{\pi y}{L}, \quad (3.5)$$

де $0 \leq y \leq L/2$ – відстань від центра пластини вздовж осі y (E -площина).

4. Точку під'єднання лінії живлення з потрібним вхідним опором обчислюють, використовуючи залежність

$$y = \frac{L}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{R_y}{R_{\text{вх}}}}. \quad (3.6)$$

Значення R_y дорівнює хвильовому опору стандартного коаксіального кабелю, який становить 50 Ом.

Послідовність виконання роботи

1. Креслення геометрії.

Геометрію створюємо за допомогою програми **CADFEKO** і записуємо у файл *.cfx. Для дослідження використаємо середню частоту $f = 2400$ МГц. Тобто середня довжина хвилі $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 2,4 \cdot 10^9 = 0,125$ м.

1.1. Обираємо одиниці довжини, які використовуватимемо в проєкті. В головному меню програми знаходимо **Model Units** і обираємо **Millimetres (mm)**.

1.2. Вводимо змінні величини (рис. 3.3, а). У дереві проєкту **Construction** → **Variables**, використовуючи для розрахунку формули (3.1)–(3.6), додаємо: ширину антени $W = 13,1$ мм; довжину антени $L = 12,1$ мм; координату підключення джерела живлення $y = 4$ мм; ширину підкладки $W_s = W + 5$ мм; довжину підкладки $L_s = L + 5$ мм; товщину підкладки $h = 1$ мм.

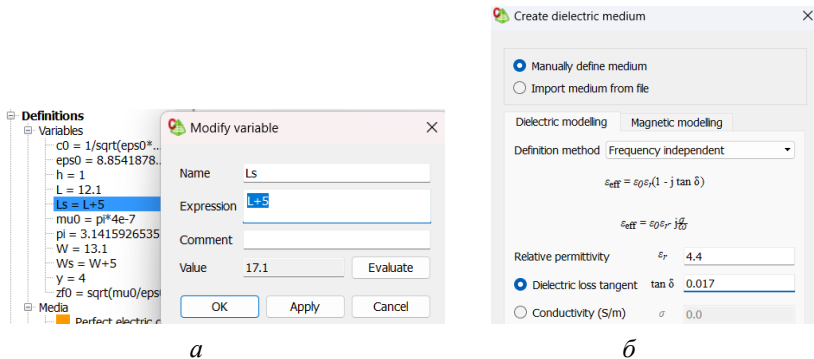


Рис. 3.3. Введення змінних величин і параметрів підкладки діелектрика

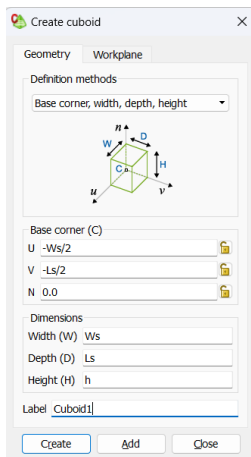
Для мікросмужкових антен важливими є характеристики діелектричної підкладки. Обираємо підкладку FR-4 з параметрами: відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 4,4$; тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta = 0,017$. Вводимо їх, перейшовши по шляху в головному дереві проєкту **Media** → **Dielectric medium** (рис. 3.3, б).

1.3. Конструюємо МСА.

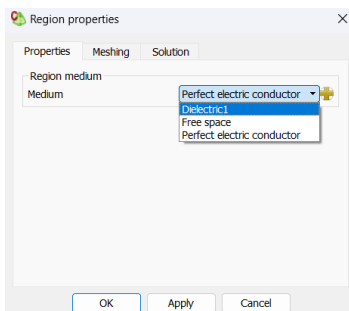
Створюємо діелектричну підкладку: **Construct** → **Cuboid** (рис. 3.4, а); натискаємо на фігуру правою кнопкою миші і обираємо матеріал підкладки: **Properties** → **Medium** → **Dielectric1** (рис. 3.4, б).

Будуємо металевий прямокутний випромінювач, використовуючи шлях **Construct** → **Polygon** із чотирьох елементів (рис. 3.5, а, б).

Для моделювання лінії живлення, на якій в подальшому буде встановлено джерело напруги, знаходимо у вкладці **Construct** фігуру **Line** і вводимо координати початку та кінця лінії (рис. 3.5, в).

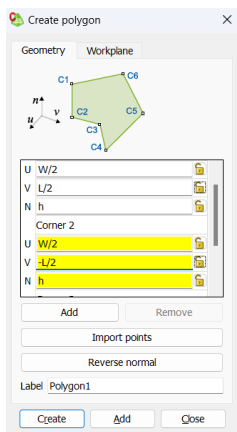


a

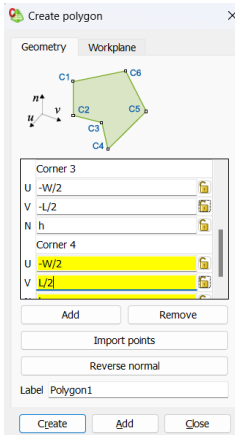


б

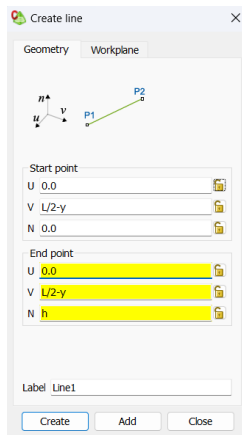
Рис. 3.4. Створення діелектричної підкладки



a



б



в

Рис. 3.5. Створення випромінювального елемента і лінії живлення

Об'єднуємо всі частини конструкції. Для цього виділяємо в основному дереві проекту всі елементи (кубоїд, полігон і лінію) та обираємо **Construct** → **Union**.

Для створення дротового порту в детальному дереві проекту (**Details**) знаходимо позначення **Wire**, виділяємо дріт, тиснемо на нього правою кнопкою миші й обираємо **Create Port** → **Wire port**.

Обираємо початок дроту (**Start**). Встановлення джерела напруги на порт було описано в лабораторній роботі 1 [3, с. 11].

У результаті об'єднання складових конструкції антени всі елементи набувають властивостей діелектрика. Тому виділяємо на моделі прямокутний полігон і нижню грань кубоїда та правою кнопкою миші обираємо **Properties** → **Medium** → **Perfect electric conductor** (рис. 3.6).

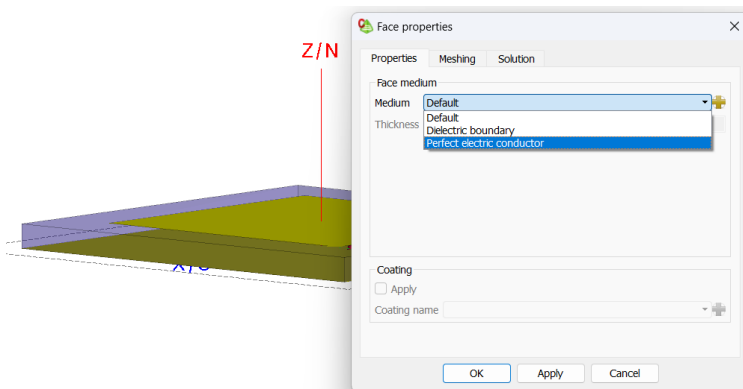


Рис. 3.6. Задання провідних властивостей елементам антени

Початкові дані (частоту, характеристики дальнього поля та розбиття на сітку) задаємо аналогічно п. 2 лабораторної роботи 1 [3, с. 11], але для смуги 5,5–6,1 ГГц. Для розбиття на сітку (**Create mesh**) обираємо радіус дроту 0,1 мм.

2. Отримання результатів.

Перед початком розрахунків обираємо в основному меню вкладку **Home** → **FEKO solver**. А після виконання розрахунків відкриваємо програму перегляду результатів **POSTFEKO**.

2.1. Діаграму спрямованості МСА в три- і двовимірному вигляді відповідно (рис. 3.7, а, б) отримуємо, використовуючи рекомендації підп. 2.1 лабораторної роботи 5 [3, с. 50].

Для дослідження залежності коефіцієнта підсилення МСА від частоти (рис. 3.8) повторюємо підп. 3.3 лабораторної роботи 1 [3, с. 12] (**Theta** → **0 deg**; **Phi** → **0 deg**).

Водночас на цьому самому графіку виводимо залежність коефіцієнта спрямованої дії (**Directivity**), що дасть змогу обчислити ККД антени і зробити висновок про доцільність використання підкладки FR-4 для конструювання антен цього діапазону частот.

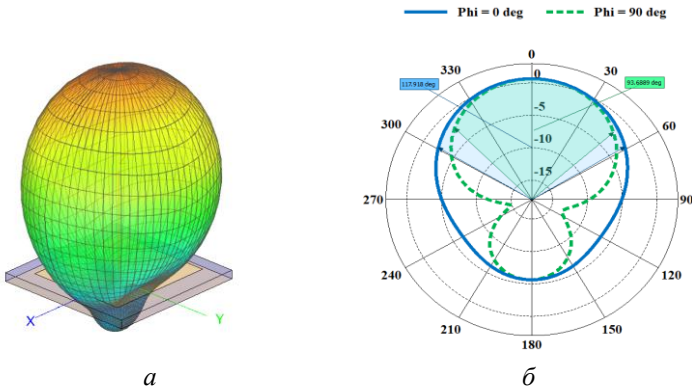


Рис. 3.7. Три- і двовимірна ДС МСА

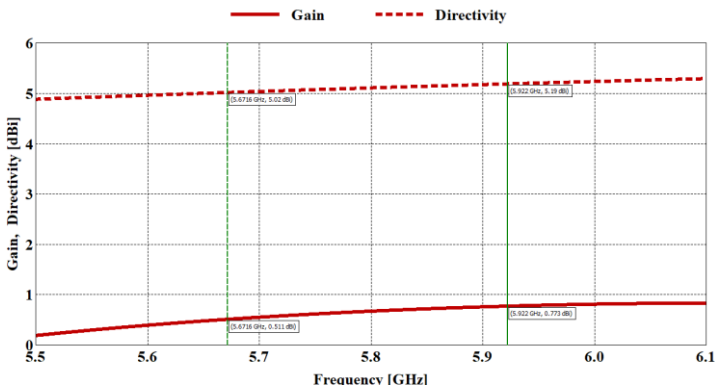


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнтів підсилення та спрямованої дії МСА від частоти в напрямку максимуму випромінювання

Щоб отримати оцінку узгодження антени з лінією живлення (50 Ом), повторюємо підп. 3.4 лабораторної роботи 1 [3, с. 13] (**Home** → **Add results** → **Source data**; на правій панелі обираємо **Quantity** → **VSWR**). Дістаємо залежність КСХН від частоти (рис. 3.9), з якої можна побачити смугу робочих частот (КСХН < 2), що свідчить про достатнє узгодження МСА.

2.2. Для дослідження впливу параметрів діелектричної підкладки на характеристики прямокутної МСА за вказівкою викладача треба обрати діелектричну підкладку з іншими параметрами і повторити підп. 2.1 цієї лабораторної роботи.

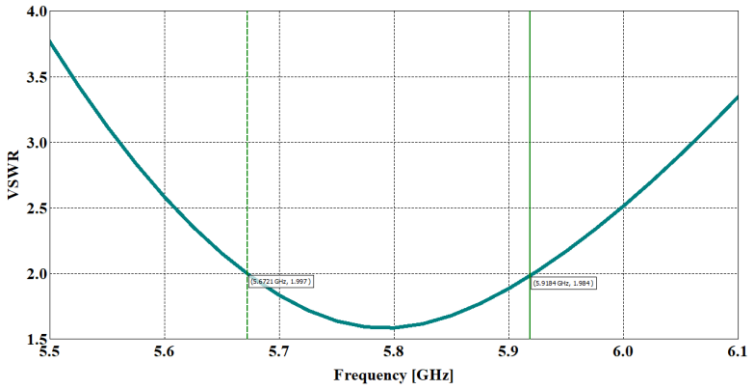


Рис. 3.9. Залежність КСХН МСА від частоти

3. Підсумування результатів досліджень, готування висновків за результатами кожного етапу, оформлення та захист звіту з лабораторної роботи.

Питання для самоперевірки

1. Як впливає на розміри мікросмужкових антен такий параметр діелектричної підкладки, як відносна діелектрична проникність?
2. Як впливає на характеристики мікросмужкових антен такий параметр діелектричної підкладки, як тангенс кута діелектричних втрат?
3. Поясніть зміну активної складової вхідного опору антени у разі зміщення точки живлення від краю пластини до центра.
4. Чому потрібно вкорочувати довжину МСА?
5. Які виокремлюють типи живлення прямокутної МСА? Поясніть переваги і недоліки кожного типу живлення.

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ РЕЗОНАТОРНОЇ АНТЕНИ

Мета роботи: вивчити принципи побудови діелектричних антен (на прикладі діелектричної резонаторної антени прямокутної форми); дослідити залежність параметрів діелектричної резонаторної антени від частоти за допомогою математичного моделювання у програмному середовищі FEKO.

Основні теоретичні відомості

Анени для портативних засобів бездротового зв'язку мають задовольняти такі вимоги: мінімальний розмір; хороші характеристики випромінювання і узгодження в заданому діапазоні; невелика вартість та високий коефіцієнт корисної дії. Виокремлюють два типи антен, які можуть задовольнити перелічені вимоги – мікросмужкові антени, приклад яких було розглянуто в лабораторній роботі 3, та діелектричні резонаторні антени.

У МСА в разі збільшення частоти значно зростають втрати у металевих елементах. Анени на основі діелектричних резонаторів не мають такої проблеми. Окрім цього, довжина хвилі в діелектрику зменшується зі збільшенням діелектричної проникності матеріалу резонатора, що дає змогу ефективно зменшувати габарити антени. На сьогодні існують термостабільні діелектрики, які мають низькі втрати та вартість. Це стало головною передумовою використання діелектричних резонаторних антен (ДРА) як основного типу антен у міліметровому діапазоні. Дослідження [7] показали, що ДРА є універсальним, ефективним випромінювачем. Конструктивна гнучкість цієї антени робить її привабливою альтернативою традиційним антенам низької напруги.

Зважаючи на швидкий розвиток ДРА, багато виробників почали поставляти на ринок різноманітні матеріали, які поєднують у собі низьку вартість, хороші характеристики з діелектричної проникності та стабільність до впливу термальних чинників.

На рис. 4.1 подані різні форми ДРА, а в табл. 4.1 наведені приклади діелектричних матеріалів та значення їх відносної діелектричної проникності.



Рис. 4.1. Діелектричні резонатори різних форм для ДРА

Матеріали для ДРА

Виробник	Назва матеріалу	Відносна діелектрична проникність ϵ_r
Hiltek Microwave Ltd.	Magnesium Manganese Aluminum Iron Ferrite	9.2 (± 0.46)
	Magnesium Titanate	16.0 (± 0.8)
	Lithium Ferrite	20.0 (± 1)
	Zirconium Tin Titanate	37.0 (± 1)
	Titania Ceramic	80-100
Morgan Electro Ceramics	Zr, Sn titanate	37
	Mg, Ca titanate	20
	Ba, Nd titanate	88
	Ba, Zn titanate	30
	Steatite	6

На рис. 4.2 зображена конструкція прямокутної ДРА із живленням за допомогою коаксіального кабелю. Методика розрахунку розмірів ДРА докладно описана в праці [8].

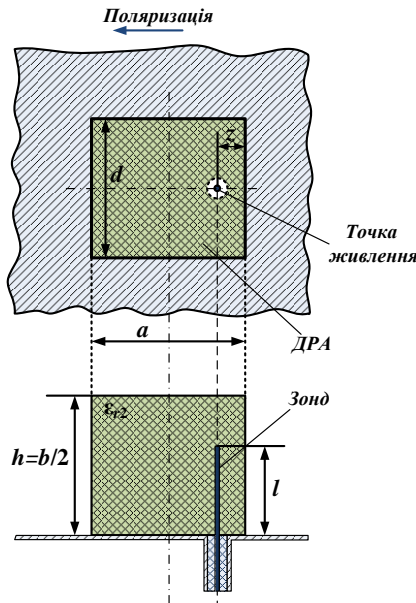


Рис. 4.2. Конструкція прямокутної ДРА

Для моделювання ДРА використана модель діелектричного хвилеводу, який обрізається вздовж повздовжнього напрямку на величину d . Ця модель може бути застосована для ізолюваної ДРА у вільному просторі (з розмірами a, b, d) або, як це відбувається на практиці, для ДРА із заземленням (з розмірами $a, h = b / 2, d$). В останньому випадку використана теорія дзеркальних зображень для видалення основної площини та подвоєння висоти ДРА.

Для прямокутної ДРА з розмірами $a, b > d$ найнижчим режимом коливаний буде $TE_{11\delta}$. За допомогою моделі діелектричного хвилеводу знайдено формули для опису складових поля в ДР:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{(k_x k_z)}{j\omega\mu_0} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z); \\ H_y &= \frac{(k_y k_z)}{j\omega\mu_0} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z); \\ H_z &= \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{j\omega\mu_0} \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z); \\ E_x &= k_y \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z); \\ E_y &= -k_x \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z); \quad E_z = 0, \end{aligned}$$

де $k_x = m\pi/a$, $k_y = n\pi/b$, $k_z = \sqrt{\epsilon_r k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}$ – хвильові числа вздовж осей; $k_0 = 2\pi f/c$ – хвильове число у вільному просторі; $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \epsilon_r k_0^2$.

Значення δ можна обчислити так: $\delta = k_z / (\pi/d)$.

Наведені вище формули були використані для побудови кривих (рис. 4.3). Ці криві – зразки зміни нормованої частоти F відповідно до співвідношень відносних розмірів ДРА d/b для різних співвідношень a/b . Нормовану частоту визначають за формулою

$$F = \frac{2\pi a f \sqrt{\epsilon_r}}{c}. \quad (4.1)$$

Криві, що зображені на рис. 4.3, досить загальні і можуть бути використані для швидкого визначення резонансної частоти ДРА без розв'язання трансцендентних рівнянь.

Довжина зонду l має приблизно дорівнювати чверті довжини хвилі в резонаторі

$$l \approx \frac{\Lambda}{4} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (4.2)$$

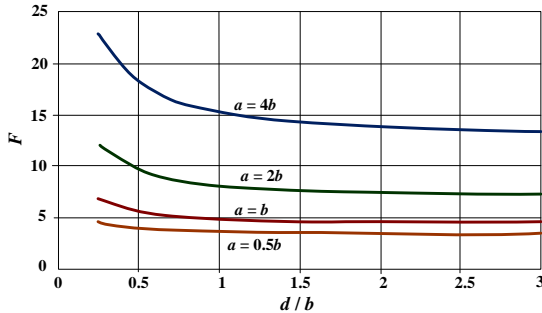


Рис. 4.3. Нормована частота ДРА

Послідовність виконання роботи

1. Креслення геометрії.

Геометрію створюємо за допомогою програми **CADFEKO** і записуємо у файл *.cfx. Для дослідження використаємо середню частоту $f = 2400$ МГц, як і для МСА в лабораторній роботі 3. Тобто середня довжина хвилі $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 2,4 \cdot 10^9 = 0,125$ м.

1.1. Обираємо одиниці довжини, які використовуватимемо в проєкті. В головному меню програми знаходимо **Model Units** і обираємо **Millimetres (mm)**.

1.2. Вводимо змінні величини (рис. 4.4, а). Використовуючи для розрахунку формули (4.1) і (4.2), у дереві проєкту **Construction** → **Variables** додаємо: розміри прямокутної антени $a = h = d = 7,1$ мм; довжину зонда $l = 2,6$ мм; ширину і довжину металевого екрана $W_s = L_s = 16$ мм; зсув зонду живлення $z = 1$ мм.

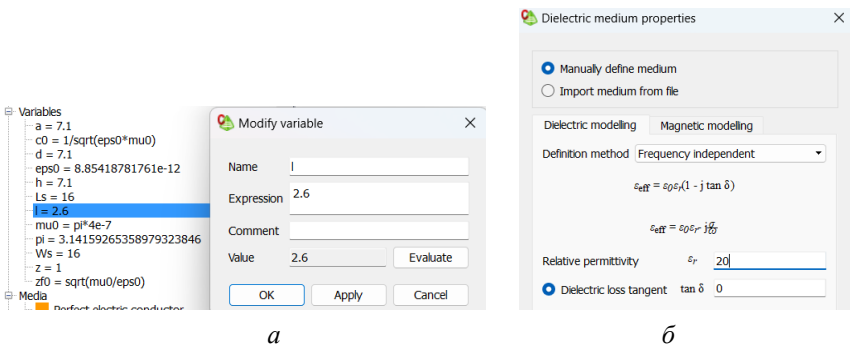
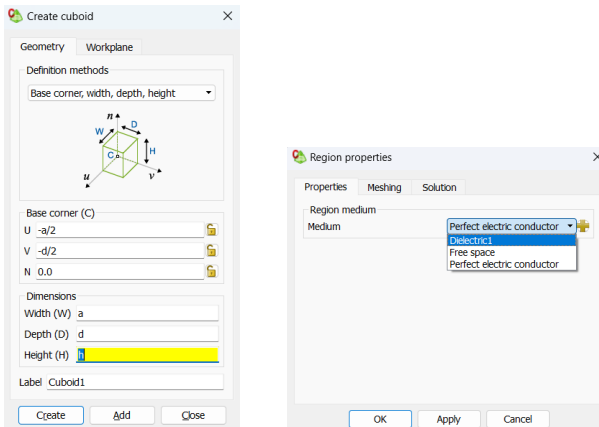


Рис. 4.4. Введення змінних величин і параметрів підкладки діелектрика

Обираємо матеріал діелектричного резонатора Lithium Ferrite з параметрами: відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 20$; тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta \approx 0$. Вводимо їх, перейшовши по шляху в головному дереві проекту **Media** → **Dielectric medium** (рис. 4.4, б).

1.3. Конструюємо ДРА.

Створюємо діелектричний резонатор: **Construct** → **Cuboid** (рис. 4.5, а). Натискаємо на фігуру правою кнопкою миші й обираємо матеріал підкладки: **Properties** → **Medium** → **Dielectric1** (рис. 4.5, б).



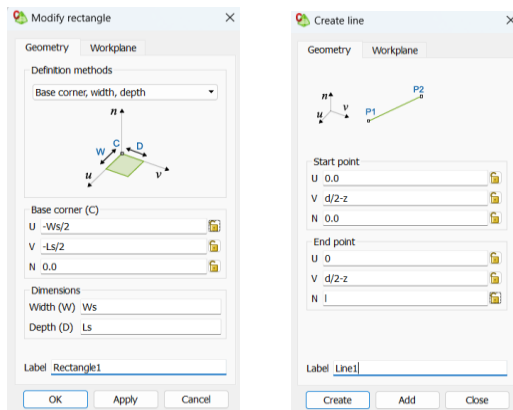
а б
Рис. 4.5. Створення діелектричного резонатора

Будуємо металевий прямокутний екран, використовуючи шлях **Construct** → **Rectangle** (рис. 4.6, а).

Для моделювання лінії живлення, на якій у подальшому буде встановлено джерело напруги, знаходимо у вкладці **Construct** фігуру **Line** і вводимо координати початку та кінця лінії (рис. 4.6, б).

Об'єднуємо всі частини конструкції. Для цього виділяємо в основному дереві проекту всі елементи (кубоїд, прямокутник і лінію) та обираємо **Construct** → **Union**.

Для створення дротового порту в детальному дереві проекту (**Details**) знаходимо позначення **Wire**, виділяємо дріт, тиснемо на нього правою кнопкою миші і обираємо **Create Port** → **Wire port**. Обираємо початок дроту (**Start**). Встановлення джерела напруги на порт описано в лабораторній роботі 1 [3, с. 11].



a

б

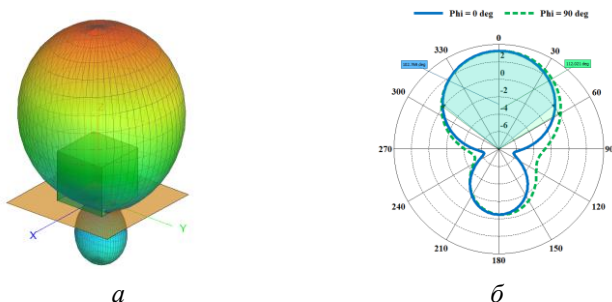
Рис. 4.6. Створення випромінювального елемента і лінії живлення

В результаті об'єднання конструкції антени площина стику діелектричного резонатора і металевого екрана може набути якостей діелектрика. У цьому разі виділяємо на моделі цю площину та правою кнопкою миші обираємо **Properties** → **Medium** → **Perfect electric conductor**.

Початкові дані (частоту, характеристики дальнього поля та розбиття на сітку) задаємо аналогічно підп. 1.3 лабораторної роботи 3.
2. Отримання результатів.

Перед початком розрахунків обираємо в основному меню вкладку **Home** → **FEKO solver**. А після виконання розрахунків відкриваємо програму перегляду результатів **POSTFEKO**.

2.1. Діаграму спрямованості ДРА в три- і двовимірному вигляді відповідно (рис. 4.7, *a*, *б*) отримуємо згідно з підп. 2.1 лабораторної роботи 5 [3, с. 50].



a

б

Рис. 4.7. Три- і двовимірні ДС ДРА

Для дослідження залежності коефіцієнта підсилення ДРА від частоти (рис. 4.8) повторюємо підп. 3.3 лабораторної роботи 1 [3, с. 12] (**Theta** → **0 deg**; **Phi** → **0 deg**).

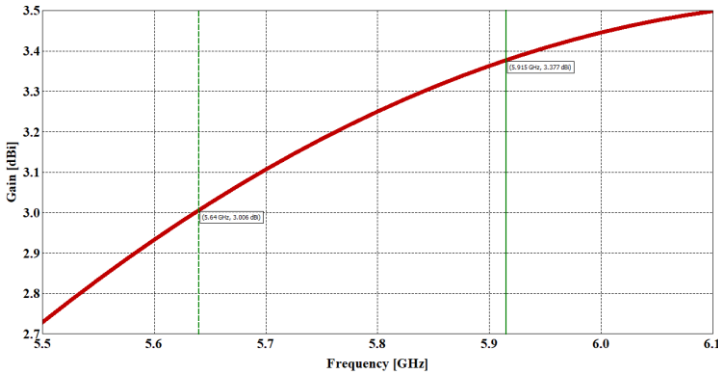


Рис. 4.8. Залежність коефіцієнта підсилення ДРА від частоти в напрямку максимуму випромінювання

Щоб отримати оцінку узгодження антени з лінією живлення (50 Ом), повторюємо підп. 3.4 лабораторної роботи 1 [3, с. 13] (**Home** → **Add results** → **Source data**; на правій панелі обираємо **Quantity** → **VSWR**). Дістаємо залежність КСХН від частоти (рис. 4.9), з якої можна побачити смугу робочих частот (КСХН < 2), що свідчить про достатнє узгодження ДРА.

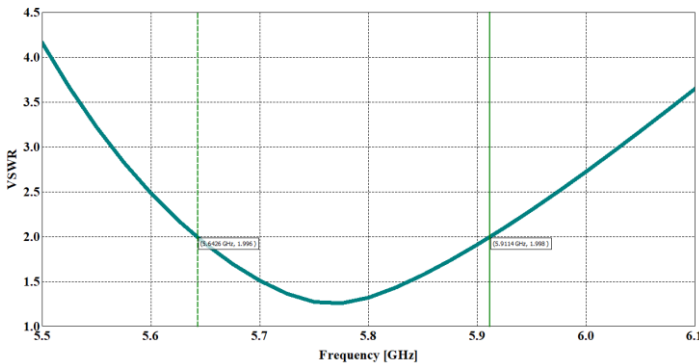


Рис. 4.9. Залежність КСХН ДРА від частоти

2.2. Для дослідження впливу параметрів матеріалу діелектричного резонатора на характеристики випромінювання і узгодження прямокутної ДРА за вказівкою викладача обираємо діелектрик

з іншими параметрами і повторюємо підп. 2.1 цієї лабораторної роботи. Усі характеристики ДРА в процесі моделювання рекомендовано порівнювати з характеристиками МСА з лабораторної роботи 3.

3. Підсумування результатів досліджень, готування висновків за результатами кожного етапу, оформлення та захист звіту з лабораторної роботи.

Питання для самоперевірки

1. Поясніть принцип побудови діелектричних антен на основі теорії діелектричних хвилеводів.
2. Як впливає на розміри ДРА відносна діелектрична проникність?
3. Перелічіть способи збудження ДРА. Наведіть креслення одного зі способів і поясніть принцип його роботи.
4. Виконайте порівняльний аналіз МСА та ДРА. Схарактеризуйте такі основні параметри: ширина смуги частот, коефіцієнт підсилення, розміри випромінювальної частини.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

У процесі виконання кожної лабораторної роботи здобувач ВО повинен виконати всі завдання, які в ній наведені.

Звіт із лабораторної роботи має бути оформлений відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення» та містити: назву, мету, короткі теоретичні відомості, результати виконання з побудованими графіками та отриманими числовими розрахунками, а також висновки.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ільницький Л. Я., Савченко О. Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот: підруч. для ВНЗ / за ред. Л. Я. Ільницького. Київ : Укртелеком, 2003. 496 с.
2. Ільницький Л. Я., Сібрук Л. В., Щербина О. А. Антенні пристрої: навч. посіб. Київ : НАУ, 2018. 200 с.
3. Антенні пристрої. Теорія антен: лабораторний практикум / уклад.: О. А. Щербина, О. С. Задорожний, Л. В. Сібрук, Ю. В. Петрова. Київ : КАІ, 2025. 64 с.
4. Yi Huang. Antennas from Theory to Practice. 2th Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2021. 505 p.
5. Shcherbyna, O., Tomai, O. and Kozhokhina, O., (2018) Quadrifilar Helical Antennas with Different Types of Supply Lines. Proc. of Proc. of International Conference on Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). P. 167–170. DOI: 10.1109/RTUWO.2018.8587877
6. Shcherbyna O., Kozhokhina O. Construction principles of quadrifilar helical antenna. Telecommunications and Radio Engineering. 2020. 79(16). P. 1441–1453. DOI: 10.1615//TelecomRadEng. v79.i16.30.
7. Keyrouz S., Caratelli D. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies, International Journal of Antennas and Propagation. 2016. 6075680. 20 p. DOI:10.1155/2016/6075680.
8. Luk K. M., Leung K. W. Dielectric Resonator Antennas. Research Studies, Baldock, 2002. 408 p.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Лабораторна робота 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОДЗЕРКАЛЬНОЇ ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ.....	4
Лабораторна робота 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КВАДРИФІЛЯРНОЇ АНТЕНИ.....	11
Лабораторна робота 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ	19
Лабораторна робота 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ РЕЗОНАТОРНОЇ АНТЕНИ.....	28
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ	37
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	38

Навчальне видання

АНТЕННІ ПРИСТРОЇ

ТИПИ АНТЕН

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
для здобувачів вищої освіти
ОС «Бакалавр» спеціальності G5
«Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка»

Укладачі:

ЩЕРБИНА Ольга Алімівна
ЗАДОРОЖНИЙ Олександр Сергійович
СІБРУК Леонід Вікторович
ПЕТРОВА Юлія Валеріївна

Електронне видання

Редактор *Н. М. Гурович*
Технічний редактор *А. І. Лавринович*
Коректор *Н. М. Гурович*
Комп'ютерна верстка *Н. В. Черної*

Підписано до видання 29.01.2026.
Формат 60x84/16. Обл.-вид. арк. 2,5.
Замовлення № 002.26/е.

Видавець і виготівник
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут» (КАІ)
03058, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 1.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 8460 від 24.09.2025.