

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІКРОХВИЛЬОВІ ПРИЛАДИ ТА АНТЕНИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Укладач: С. М. Перегудов

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

Рецензент

Піддубний, В.О., канд. техн. наук, доц., с.н.с.,
доцент кафедри радіотехнічних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний
редактор

Мовчанюк, А.В., канд. техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 2 від 06.11.2025 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 09/2025 від 27.10.2025 р.)*

У посібнику викладено методичні рекомендації щодо проведення лабораторних занять з дисципліни «Мікрохвильові прилади та антени». Він містить опис лабораторних робіт і список рекомендованої літератури. Основна увага надана пристроям вхідного тракту апаратури бездротового зв'язку. У посібнику наведено теоретичні відомості за темами робіт та порядок їх виконання. Наприкінці кожної теми запропоновані контрольні запитання.

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка». Він буде також корисним для студентів інших технічних спеціальностей у галузі знань «Електроніка та телекомунікації».

Мікрохвильові прилади та антени : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. М. Перегудов. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,30 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 70 с.

ЗМІСТ

Вступ	4
Лабораторна робота 1	
ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЯРНОСТЕЙ	
НВЧ ТРАКТУ МЕТОДОМ ЗМІЩЕННЯ ВУЗЛІВ	6
Контрольні запитання.....	14
Лабораторна робота 2	
ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НВЧ	
ПРИСТРОЇВ ПАНОРАМНИМ АНАЛІЗАТОРОМ Р2-69	15
Контрольні запитання.....	23
Лабораторна робота 3	
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРИТОВОГО ВЕНТИЛЯ....	24
Контрольні запитання.....	35
Лабораторна робота 4	
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНО	
КЕРОВАНОВОГО АТЕНЮАТОРА.....	37
Контрольні запитання.....	45
Лабораторна робота 5	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАМКОВОЇ АНТЕНИ	46
Контрольні запитання.....	55
Лабораторна робота 6	
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ	56
Контрольні запитання.	69
Список рекомендованої літератури.	70

ВСТУП

Дисципліна «Мікрохвильові прилади та антени» (ПО 03) належить до циклу професійно-практичної підготовки студентів першого (бакалаврського) рівню вищої освіти за спеціальністю «Електронні комунікації та радіотехніка». Дисципліна «Мікрохвильові прилади та антени» забезпечує вивчення дисципліни першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ступеня «Методи зв'язку в інтелектуальних радіоелектронних системах», в якій розглядаються питання розробки сучасних телекомунікаційних систем, зокрема в НВЧ діапазоні.

У зв'язку зі стійкою тенденцією мініатюризації та інтеграції пристроїв зв'язку визначаються два аспекти мікрохвильових приладів. По-перше, залишається суттєва відмінність у конструкція антен і вхідних трактів та методах обробки в них радіосигналів у порівнянні з низькочастотними пристроями. По-друге, в процесі їх розробки більшою мірою застосовуються спеціальна вимірювальна апаратура та відповідне програмне забезпечення. Враховуючи вище зазначене, саме на цих аспектах і робиться акцент.

Проведення лабораторних допомагає краще засвоїти матеріали лекцій та практичних занять і розвиває у студентів такі компетентності:

- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК 02);
- здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК 07);
- Здатність використовувати базові методи, способи та засоби отримання, передавання, обробки та зберігання інформації. (ФК 03);
- здатність здійснювати комп'ютерне моделювання пристроїв, систем і процесів з використанням пакетів прикладних програм (ФК 04);
- здатність застосовувати стандартні методи розрахунку при проектуванні вузлів телекомунікаційних та радіотехнічних пристроїв і систем (ФК 16);

Виконання завдань лабораторних робіт сприяє досягненню певних програмних результатів навчання, а саме:

- пояснювати результати, отримані в результаті проведення вимірювань, в термінах їх значущості та пов'язувати їх з відповідною теорією (ПРН 04);

- застосовувати фундаментальні і прикладні науки для аналізу та розробки процесів, що відбуваються в телекомунікаційних та радіотехнічних системах (ПРН 13);
- застосовувати основні методи та способи отримання інформації (ПРН 27);
- обирати конфігурацію, структуру, основні складові вузли та елементи радіоелектронної апаратури в залежності від її призначення (ПРН 29).

Тематика лабораторних занять відповідає силабусу навчальної дисципліни. Перші п'ять робіт присвячені лабораторним дослідженням нерегулярностей мікрохвильових ліній, приладів, що використовуються для узгодження частин НВЧ тракту (вентилі та атенюатори), для модуляції сигналів (електрично керовані атенюатори). Звертаючи увагу на застосування в радіосистемах все більш високочастотних діапазонів, у перших 4 роботах використовуються пристрої та вимірювальна апаратура міліметрового діапазону як найбільш перспективного для передачі великих обсягів даних в інформаційних радіомережах. В останніх двох роботах досліджуються властивості мікрохвильових антен. У 5-ій роботі для цього використовуються лабораторні вимірювання, а у 6-ій комп'ютерне моделювання. Використання спеціального імітаційної моделі суттєво спрощує дослідження та скорочує час розробки приладів.

Кожна лабораторна робота закінчується захистом її результатів і одержанням оцінки відповідно до РСО з дисципліни.

Лабораторна робота 1

ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЯРНОСТЕЙ

НВЧ ТРАКТУ МЕТОДОМ ЗМІЩЕННЯ ВУЗЛІВ

Мета та основні завдання роботи

Аналіз конструкцій різних нерегулярностей хвильоводного тракту та їх електричних характеристик.

Розрахунок та експериментальна перевірка електричних характеристик нерегулярностей тракту в заданому діапазоні частот.

Основні теоретичні відомості

На практиці часто приходиться мати справу зі складними хвильоводними пристроями, у яких форма хвильоводу стрибкоподібно змінюється. У середині хвильоводів розміщують стрижні, діафрагми та інші неоднорідності. Нерегулярність спотворює первинне поле хвильоводу. Створюється коливання вищого типу [1]. Завдяки запасу енергії у вищих типах коливань неоднорідність поводить як реактивний опір. Вона еквівалентна ємності, якщо енергія, що запасена у електричному полі, перебільшує енергію магнітного поля. Якщо ж співвідношення таких енергій протилежне, то неоднорідність еквівалентна індуктивності. У випадку рівності енергій має місце резонанс, і сигнал безперешкодно поширюється через хвильвід. Еквівалентність неоднорідності зосередженим елементам можлива лише в обмеженому діапазоні частот, який тим більше, чим менше геометричні розміри неоднорідності у порівнянні з довжиною хвилі. У випадку наближення розмірів до довжини хвилі змінюється співвідношення між накопленими електричною та магнітною енергіями, що спричиняє зміну величини і навіть характеру еквівалентного опору [2].

Основними параметрами хвильоводної неоднорідності є:

- а) повний опір – Z_H (або провідність Y_H), який визначається геометрією хвильоводу та НВЧ елемента;
- б) комплексний коефіцієнт відбиття від входу елемента – $\dot{\Gamma}$;
- в) комплексний коефіцієнт передачі – $\dot{T}$.

Повний опір неоднорідності дорівнює:

$$\dot{Z}_H = R_H + jX_H = Z_0 \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}}, \quad (1)$$

де Z_0 – хвильовий опір хвилеводу, R_H и X_H – активна и реактивна складова повного опору неоднорідності відповідно.

Якщо у неоднорідності та стінках хвилеводу відсутні втрати, то Z_H має чисто реактивний характер.

Діафрагми у хвилеводі

Діафрагмами називаються металеві перегородки, що частково перекривають поперечний переріз хвилеводу. У прямокутному хвилеводі в основному застосовуються такі діафрагми: симетрична ємнісна та індуктивна, а також резонансна (резонансне вікно) – рис. 1.1а-в.

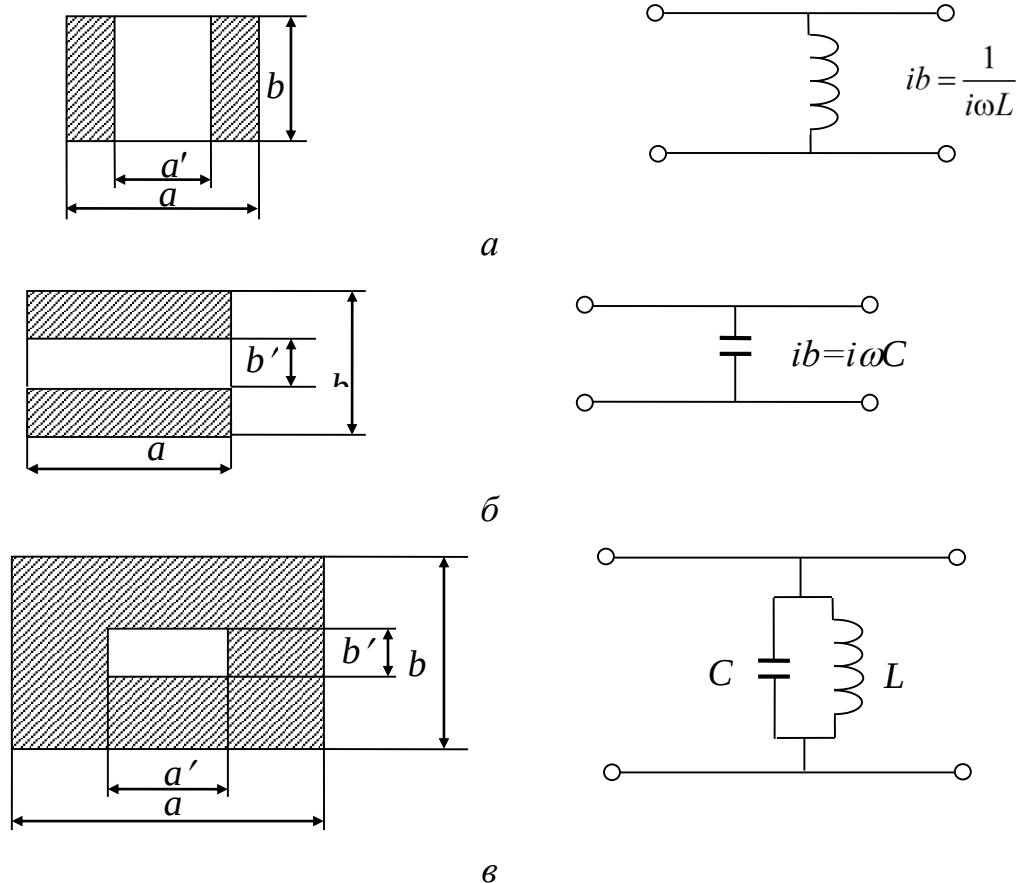


Рисунок 1.1 — Діафрагми у прямокутному хвилеводі

Ємнісна діафрагма зменшує висоту хвильоводу і спричиняє концентрацію силових ліній електричного поля, зосереджуючи певний запас реактивної енергії. Подовжні струми, що течуть через широкі стінки хвильоводу, частково відгалужуються на пластини діафрагми та замикаються у вигляді струмів зміщення у її зазорі. Тому еквівалентною схемою є зосереджена ємність, що увімкнена паралельно між провідниками двопровідної лінії (рис. 1.1а). Нормована реактивність ємнісної діафрагми визначається геометрією і дорівнює

$$b_c = \frac{4b}{\Lambda} \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi b'}{2b} \right) \right]. \quad (2)$$

У випадку індуктивної діафрагми (рис. 1.1б) подовжні струми течуть через протилежні широкі стінки хвильоводу і частково замикаються через пластини діафрагми, що з'єднані з цими стінками. Струми, що течуть через них створюють додаткове магнітне поле. Тому еквівалентною схемою буде зосереджена паралельна індуктивність. Нормована провідність індуктивної діафрагми залежить від геометричних розмірів і дорівнює

$$b_L = -\frac{\Lambda}{a} \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi a'}{2a} \right). \quad (3)$$

Ємнісна та індуктивна діафрагми застосовуються в основному як узгоджувальні пристрої, а також як елементи хвильоводних фільтрів та деяких сповільнювальних систем.

Крім того, у мікрохвильовій техніці широко використовуються резонансні вікна (рис. 1.1в) – металеві перегородки з отворами, які мають малий коефіцієнт відбиття на резонансній частоті f_0 (резонансній довжині хвилі λ_0). Вікно може закриватись тонкою діелектричною пластиною. Такі діафрагми дозволяють розділити хвильовід на дві ділянки – вакуумну та невакуумну, не порушуючи процес поширення хвиль. Резонансну довжину хвилі для заданих a , b , a' і b' можна розрахувати за допомогою формули

$$\lambda_0 = 2a' \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{b'a}{a'b} \right)^2}{1 - \left(\frac{b'}{b} \right)^2}}. \quad (4)$$

Мінімально можливий розмір a' , що задовольняє умові узгодження, дорівнює половині довжини хвилі у вільному просторі, а значення b' може бути практично нульовим. Це означає, що у принципі відбиття хвилі має бути відсутнім, якщо вікно має нехтовно малу висоту b' , а ширину a' , близьку до $\Lambda/2$.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Експериментальне дослідження повних провідностей (або опорів) нерегулярностей хвильоводного тракту здійснюється за допомогою лабораторної установки, блок-схема якої показана на рис. 1.2. Основними елементами її є: генератор, що відтворює електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі біля 1 см; вимірювальна лінія з індикатором; досліджувана неоднорідність та коротко замкнений шлейф змінної довжини (короткозамикач).

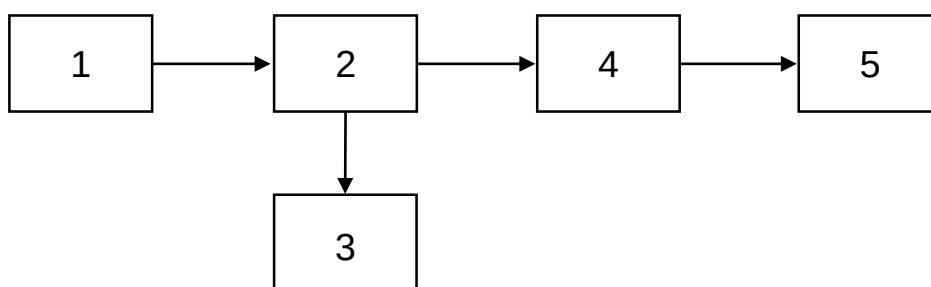


Рисунок 1.2 — Структурна схема лабораторної установки:

- 1) генератор НВЧ сигналів Г4-156; 2) вимірювальна лінія Р1-31;
- 3) індикатор (цифровий вольтметр В7-27А або іншого типу);
- 4) досліджувана нерегулярність; 5) короткозамикач

Через прямокутний хвильовід коливання поступають до вимірювальної лінії (2), за допомогою якої визначається розподіл електромагнітного поля вздовж осі хвильоводу та повна провідність неоднорідності. Сигнал зонда вимірювальної лінії подається до індикатора (3).

У роботі досліджуються нерегулярності у вигляді тонких діафрагм, розміщених у хвильоводному тракті. Довжина хвилі Λ визначається за допомогою вимірювальної лінії як подвійна відстань між двома сусідніми мінімумами.

Хвильовий опір хвилеводу Z_0 потрібно розраховувати для кожного частоти, на якій проводиться вимірювання.

Для моди H_{10} прямокутного хвилеводу

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\lambda_0 / 2a\right)^2}}, \quad (5)$$

де λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі; a – ширина хвилеводу; μ , ε – відносні магнітна та діелектрична проникності середовища усередині хвилеводу. Для хвилеводу з повітряним заповненням μ і ε дорівнюють 1.

2. Метод вимірювань

Метод зміщення вузлів застосовують для визначення характеристик *тільки реактивних* нерегулярностей тракту. Для проведення вимірювань даним методом до виходу відрізка хвилеводу з певною нерегулярністю приєднується коротко замкнений шлейф змінної довжини. Оскільки таке навантаження не має втрат, у тракті встановлюється режим стоячої хвилі. Змінюючи довжину шлейфа і спостерігаючи за зміщенням вузлів у вимірювальній лінії, можна визначити провідність неоднорідності, увімкненої між входом вимірювальної лінії та шлейфом.

Нехай вихід вимірювальної лінії (переріз 1 на рис. 1.3) навантажений коротко замкненим відрізком хвилеводу (короткозамкнений шлейф) довжиною $\Delta l_{\text{шл}}$. Якщо $\Delta l_{\text{шл}} = 0$, то розподіл напруженості вздовж лінії передачі (суцільна крива на рис. 1.3) від перерізу короткого замикання у напрямі до генератора буде визначатись законом $\sin \beta l$, де l відлічується від перерізу 1 у бік генератора.

Встановимо довжину шлейфа рівною $\Delta l_{\text{шл}}$. При цьому розподіл напруженості електричного поля у лінії буде описуватись тим же законом, проте уся картина стоячих хвиль зміститься у бік навантаження на відстань $\Delta l_y = \Delta l_{\text{шл}}$. Якщо тепер шлейф у перерізі 1 замінити реактивним навантаженням з провідністю, рівною провідності шлейфа $y_{\text{шл}} = -i \operatorname{ctg}(\beta \Delta l_{\text{шл}})$, то розподіл напруженості у лінії залишиться точно таким же, як при підключеному шлейфі, при

цьому зсув вузла напруженості залишиться рівним Δl_y . Тому, якщо до лінії у перерізі 1 приєднати замість шлейфа невідому реактивність та виміряти зсув вузла Δl_y відносно положення вузлів при режимі КЗ в перерізі 1, то невідому реактивну провідність можна розрахувати за формулою

$$y_n = -i \operatorname{ctg}(\beta \Delta l_y).$$

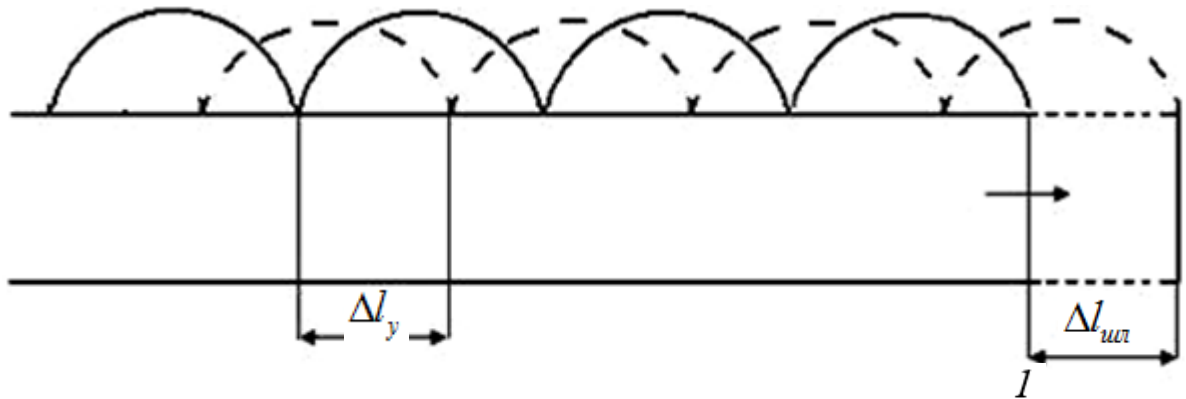


Рисунок 1.3 — Розподіл напруженості електричного поля вздовж лінії з реактивним навантаженням

Враховуючи вище викладене, для вимірювання провідності нерегулярності у хвильоводному тракті може бути використана така процедура.

Крок 1. Приєднаємо до виходу вимірювальної лінії у перерізі 1 (рис. 1.4) короткозамкнену секцію хвильоводу такої довжини $l_{кз}$, щоб її переріз короткого замикання точно збігався з площиною, у якій потім (у кроці 2) буде увімкнена досліджувана неоднорідність (діафрагма). Вимірюючи розподіл напруженості вздовж вимірювальної лінії, (суцільна крива на рис. 1.4), знаходимо положення вузлів у розподілі напруженості вздовж хвильоводного тракту.

Крок 2. Приєднуємо до виходу вимірювальної лінії прохідну хвильоводну секцію з досліджуваною неоднорідністю довжиною $l_{секц}$, яка у свою чергу навантажена короткозамкненим шлейфом змінної довжини. Підбираємо довжину шлейфа такою, щоб положення вузлів у вимірювальній лінії збігалось з їх положенням, яке зафіксоване для короткозамкненої секції. Це означає, що поршень короткозамикача знаходиться від неоднорідності на відстані, рівній

цілому числу півхвиль $n\Lambda/2$ (на рисунку $n=1$), в результаті чого переріз вузла напруженості збігається з перерізом, у якому знаходиться неоднорідність, забезпечуючи у цьому перерізі режим КЗ. У такому разі еквівалентна провідність у перерізі неоднорідності стає нескінченною і ні яким чином не впливає на положення вузлів у лінії.

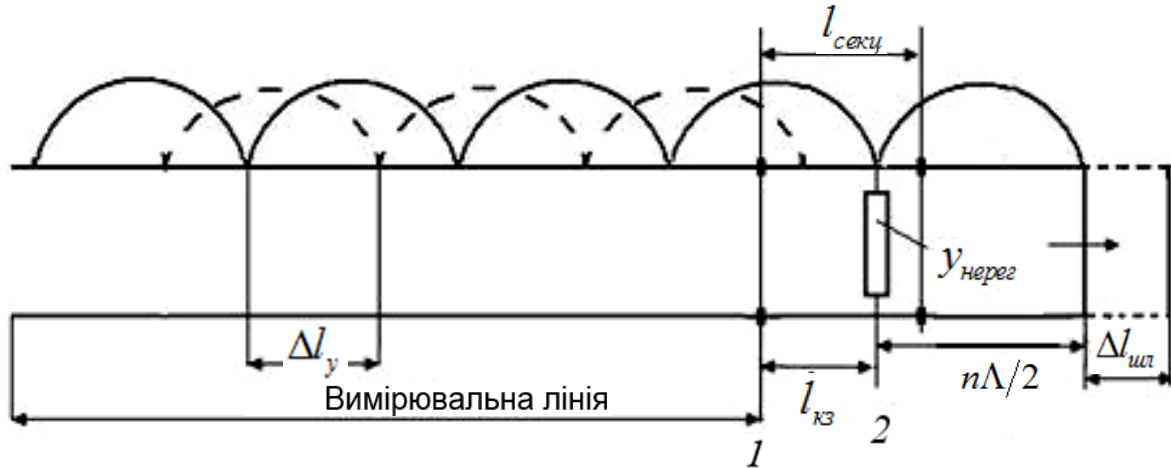


Рисунок 1.4 — Пояснення методу зміщення вузлів

Крок 3. Збільшимо довжину шлейфа на $\Delta l_{шл}$. При цьому у вимірювальній лінії отримаємо новий розподіл напруженості (нанесено пунктиром), вузли якого зміщені на відстань Δl_y відносно вузлів на кроці 2. Якби у перерізі 2 неоднорідність була відсутня, то Δl_y и $\Delta l_{шл}$ були б однакові. Проте, якщо у цьому перерізі увімкнена деяка неоднорідність, то її провідність y_n додається до провідності шлейфа. Тому зсув вузла буде таким, якщо б ми увімкнули у перерізі 2 замість неоднорідності та реального шлейфа еквівалентний шлейф довжиною $\Delta l_{ше} = \Delta l_y$. Таким чином провідність еквівалентного шлейфа стає рівною сумі провідностей реального шлейфа та неоднорідності

$$y_{ше} = -i \operatorname{ctg}(\beta \Delta l_y) = y_{нерег} - i \operatorname{ctg}(\beta \Delta l_{шл}). \quad (6)$$

Звідси

$$y_{нерег} = i \operatorname{ctg}(\beta \Delta l_{шл}) - i \operatorname{ctg}(\beta \Delta l_y). \quad (7)$$

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Встановити частоту генератора f , задану викладачем і, підключаючи короткозамкнену секцію до виходу вимірювальної лінії виконати крок 1 п. 3.2. Результати вимірювання занести в таблицю, відмічаючи положення мінімумів напруженості поля.

3.2. Від'єднати короткозамкнену секцію і замість неї приєднати до виходу вимірювальної лінії досліджувану діафрагму та короткозамикач змінної довжини. Обертаючи мікрометричний гвинт, добитись, щоб мінімуми електричного поля у лінії опинились у тому ж положенні, як у п. 1. Показання мікрометричного гвинта короткозамикача записати.

3.3. Задати довжину короткозамкненого шлейфа $\Delta l_{\text{шл}}$, зміщуючи поршень короткозамикача на відстань 1 мм¹ у бік генератора².

3.4. Визначити за допомогою вимірювальної лінії нове положення мінімумів напруженості електричного поля у хвилеводі та знайти зміщення їх відносно положення мінімумів у п. 1 (тобто визначити Δl_y).

3.5. Визначити за формулою (7) приведену провідність досліджуваної нерегулярності.

3.6. Повторити п. 1-5 для всіх нерегулярностей, виданих викладачем.

3.7. Порівняти результати вимірювань і розрахунку за формулами (2-4).

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) результати розрахунку приведеної провідності неоднорідності та висновки з порівняння їх з результатами вимірювань;
- 6) висновки.

¹ або інше, вказане викладачем.

² тобто збільшити показання мікрометричного гвинта на задану величину, змінюючи таким чином довжину короткозамкненого шлейфа.

Контрольні запитання

1. Що таке нерегулярність мікрохвильового тракту і чим вона відрізняється від неоднородності?
2. Які види нерегулярностей Ви можете привести як приклад.
3. Як трансформуються напруженості електричного та магнітного полів поблизу нерегулярності?
4. Що таке ємнісна, індуктивна та резонансна діафрагма? Чому дорівнює ширина резонансної діафрагми в прямокутному хвилеводі?
5. Поясніть метод вимірювань провідності нерегулярності, який використовується в лабораторній роботі.
6. Чи можна застосовувати цей метод для вимірювання активних провідностей?
7. Чому дорівнює модуль коефіцієнта відбиття від двополюсника з чисто реактивною провідністю?
8. Чому довжину хвилі варто визначати як подвійну відстань між мінімумами, а не максимумами стоячої хвилі?
9. Чим можна пояснити розбіжність між значеннями виміряної та розрахованої провідності нерегулярності?
10. Які фактори впливають на точність визначення довжини хвилі за допомогою вимірювальної лінії?

Лабораторна робота 2

ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОХВИЛЬОВИХ ПРИБОРІВ ПАНОРАМНИМ АНАЛІЗАТОРОМ Р2-69

Мета та основні завдання роботи

Ознайомлення з принципом дії скалярного вимірювача параметрів мікрохвильових трактів Р2-69.

Вивчаються методи використання його для дослідження частотних характеристик пристроїв мікрохвильового діапазону.

Основні теоретичні відомості

1. Короткі технічні дані панорамного аналізатора Р2-69

Прилад Р2-69 призначений для спостереження на екрані індикатора частотних характеристик хвильоводних двополіусників і багатополіусників та вимірювання їх КСХН та ослаблення.

Технічні дані приладу:

1. Діапазон робочих частот 53,57-78,33 ГГц (хвилевід 3,6х1,8 мм);
2. Смуга зміни хитної частоти від 780 МГц до повного частотного діапазону.

3. Вихідна потужність не менше 1 мВт.

4. Основні метрологічні характеристики:

– діапазон вимірювання КХВН від 1,1 до 5,0 з похибкою

$$\delta K_{CXH} = \pm(5 \cdot K_{CXH} + 5) \text{ (при } 1,1 \leq K_{CXH} \leq 2,0 \text{) і}$$

$$\delta K_{CXH} = \begin{cases} + \frac{K_{CXH} + 1}{20 - K_{CXH}} \cdot 100 \\ - \frac{K_{CXH} + 1}{20 + K_{CXH}} \cdot 100 \end{cases} \text{ (при } 2,0 \leq K_{CXH} \leq 5,0 \text{);}$$

– діапазон індикації КСХН – от 5,0 до ∞ ;

– діапазон вимірювання ослаблення А= 0-30дБ з похибкою

$$\delta A = \pm(0,05A + 0,75) \text{ дБ.}$$

– похибка задання частоти не перевищує 1% для нормальних умов і 1,5% для робочих умов.

2. Структурна схема та принцип роботи Р2-69

Прилад складається з блоків генератора хитної частоти (ГХЧ 69) та індикатора Я2Р-67, комплекту спрямованих відгалужувачів (СВ) і детекторних голівок (рис. 2.1).

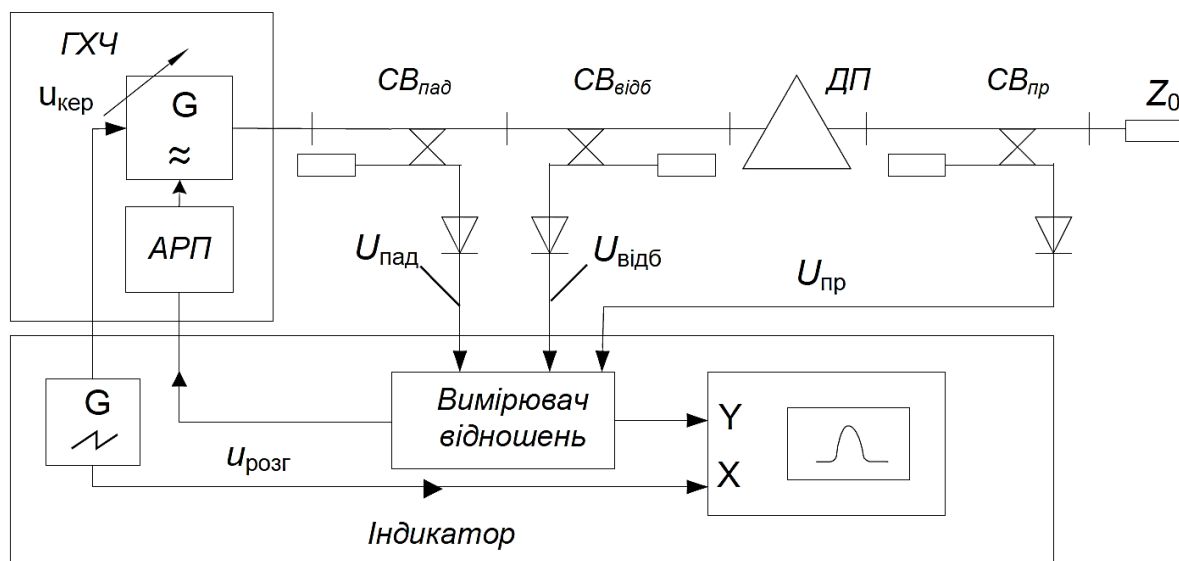


Рисунок 2.1 — Структурна схема панорамного аналізатора

Спрямованість відгалужувачів складає не менше 25 дБ, чутливість детекторних голівок не менше 170 мВ/мВт.

Генератор хитної частоти (ГХЧ) забезпечує ручну автоматичну зміну частоти в установлених межах F1-F2. Головні вимоги до ГХЧ — широкий діапазон зміни частоти з мінімальною варіацією амплітуди, рівень вихідної потужності не менший за 1 мВт, відсутність побічних коливань і гармонік. Зазначені вимоги суперечливі і обмежують діапазон перебудови частоти. Частота ГХЧ керується пилоподібною напругою розгортки, а амплітуда вихідного сигналу — системою автоматичного регулювання потужності (АРП).

Зазвичай генератор хитної частоти разом з елементами вимірювального тракту (переходами, атенюаторами, блоком живлення тощо) виконують у вигляді окремого блоку.

Як джерело мікрохвильових коливань у ГХЧ використана лампа зворотної хвилі (ЛЗХ) з розв'язуючим атенуатором на виході. Керування частотою коливань, генерованих ЛЗХ, здійснюється за допомогою зміни напруги на уповільнювальній системі лампи, а вихідна потужність регулюється напругою на її керуючому електроді. Регулювання рівня вихідного сигналу ГХЧ і стабілізація його амплітуди проводиться системою АРП. Причому сигнал помилки для регулювання виробляється шляхом порівняння продетектованого сигналу падаючої хвилі $U_{\text{пад}}$ та опорної напруги $U_{\text{оп}}$. Регулюючим елементом у системі АРП є електрично керований напівпровідниковий атенуатор, що встановлюється на виході генераторного блоку.

Контроль роботи системи АРП проводять, подаючи на індикатор сигнал падаючої хвилі. У разі правильної роботи на екрані індикатора має бути горизонтальна лінія. Проте треба пам'ятати, що система АРП отримує інформацію про амплітуду генерованого сигналу зі спрямованого відгалужувача падаючої хвилі ($CB_{\text{над}}$). Тому при нерівномірності АЧХ цього відгалужувача з'явиться частотна залежність амплітуди вихідного сигналу, яка має інвертований вигляд відносно АЧХ відгалужувача падаючої хвилі: там, де його перехідне ослаблення зменшується, система АРП збільшить амплітуду (і навпаки). Вигляд цієї залежності називають власною АЧХ приладу. Для компенсації її нерівномірності використовують вимірювачі відношень напруг продетектованих сигналів падаючої та відбитої хвиль, а також прагнуть використовувати спрямовані відгалужувачі з однаковими параметрами.

Регулюючи опорну напругу АРП, можна керувати середньою потужністю генератора. Рівень же потужності його сигналу зазвичай регулюють вихідним атенуатором, який виконує також функцію розв'язки. Для роботи низькочастотного індикаторного блоку (підсилювачів та вимірювачів відношень напруг) використовують амплітудну модуляцію (маніпуляцію) НВЧ сигналу. Це дозволяє простіше посилювати вихідні вимірювальні сигнали та фільтрувати їх від завад. Частоту модуляції вибирають близько десятків кілогерц, форму сигналу модуляції – прямокутні імпульси (меандр, в вимірювачі Р2-69 частота модуляції дорівнює 100 кГц).

Низькочастотна частина панорамного аналізатора — це індикаторний блок (рис. 2.2). Він має загальний вимірювальний канал для сигналів падаючої та відбитої хвиль (А), які подають з детекторних голівок відгалужувачів залежно від вимірюваного параметра. Додатковий канал падаючої хвилі (С) призначений для контролю рівномірності власної АЧХ генератора та роботи системи АРП.

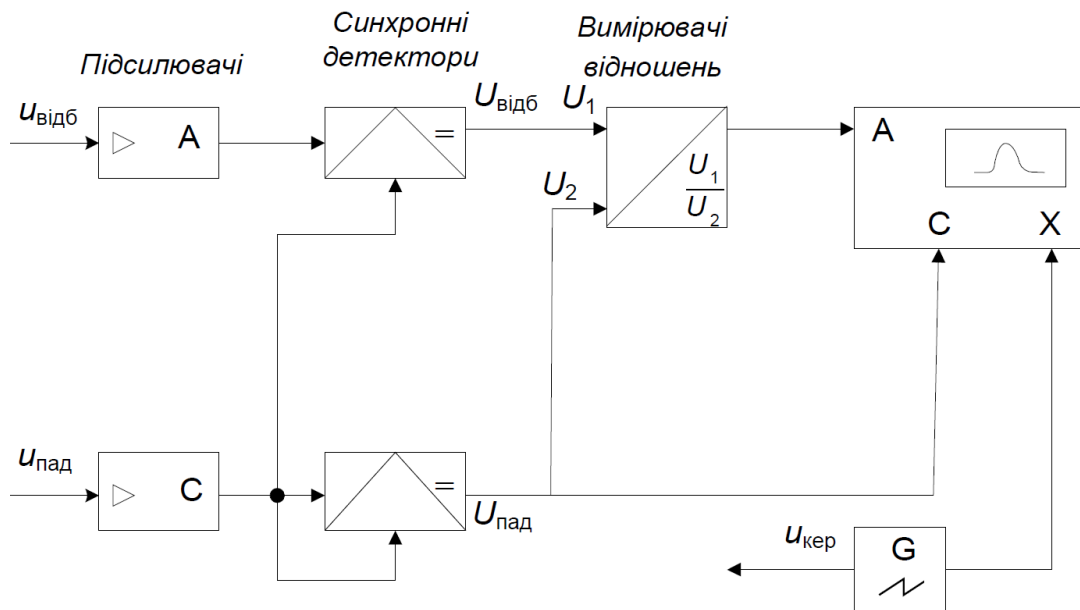


Рисунок 2.2 — Вимірювальний блок панорамного аналізатора

На блок індикатора подають продетектовані НЧ сигнали падаючої, відбитої (прохідно) хвилі. Ці сигнали надходять на вузькосмугові підсилювачі і далі — на синхронні детектори (СД).

Синхронний детектор — це перетворювач частоти, у якому частота сигналу дорівнює частоті гетеродина, але в виході з допомогою вузькосмугового ФНЧ виділяють сигнал різницевої частоти – постійна напруга. Перевага синхронних детекторів — їх хороші фільтруючі властивості і завадозахищеність. Як сигнал гетеродина СД використовують посилений сигнал падаючої хвилі. Недолік синхронних детекторів — залежність вихідного сигналу від фазового зсуву вхідних НЧ напруг — в даному випадку не є фактором впливу. СД дозволяють отримати постійну напругу, пропорційну квадрату амплітуд (потужності) падаючої $U_{\text{пад}} \sim P_{\text{пад}}$ та відбитої/прохідної хвиль ($U_{\text{відб}}$, $U_{\text{пр}}$).

Виділену напругу сигналу подають на вимірювач відношень і далі — на Y канал осцилографічного індикатора. На канал X подають сигнал від генератора пилкоподібної напруги, який зазвичай розміщують також індикаторному блоці. Тривалість прямого ходу пилкоподібної напруги визначає час аналізу частотної характеристики. У приладі використовують стандартні значення 0,08 с, 1 с та 40 с. Вибір більшого часу аналізу здійснюють з метою виключення динамічних похибок при дослідженні вузькосмугових НВЧ пристроїв. Передбачений режим роботи від зовнішнього керуючого напруги, а також режим ручної зміни частоти. В останньому випадку вимірювач перетворюється на одночастотний генератор зі стабільною амплітудою та ручним регулювання частоти в заданому діапазоні. Це дозволяє проводити точні вимірювання на фіксованих частотах з використанням зовнішніх вольтметрів і частотомірів.

Для отримання зображення частотної залежності в панорамних аналогових приладах використовують осцилографічний індикатор. Фактично це спрощений осцилограф, в якому передбачені два канали (X — горизонтального відхилення, а — вертикального відхилення) і використовується електронно-променева трубка зі збільшеним післясвіченням. На канал X подають напругу розгортки, на канал — вихідний сигнал з вимірювача відношень напруг, пропорційний потужності хвилі, що проходить (відбитої). На канал Y також надходять сигнали частотних міток блоку ГХЧ. Їхні зображення на осцилограмі створюються у вигляді коротких імпульсів. Частота кожної позначки відображається на цифровому табло. Поєднуючи мітку з точкою досліджуваної характеристики, що цікавить, по табло відраховують її частоту.

Вертикальна шкала осцилографічного індикатора має розмір квадрата модуля коефіцієнта відображення/передачі. Це справедливо при нормуванні амплітуди падаючої хвилі до одиниці. Перед вимірами прилад калібрують за двома рівнями. Перше калібрування — за нульовим рівнем сигналу (зазвичай робиться при налаштуванні приладу). Поєднують осцилограму без вимірювального сигналу (наприклад, при встановленні узгодженого навантаження) з нульовою лінією шкали індикатора. Калібрування одиничного рівня коефіцієнта відображення проводиться з короткозамикачем.

При цьому поєднують криву відбитої хвилі з лінією одиничного коефіцієнта відображення вертикальної шкали індикатора (позначка $K_{CBH} = \infty$).

При вимірі ослаблень калібрування роблять для коефіцієнту передачі, що дорівнює 1. Для цього СВ падаючої і прохідної хвиль орієнтують в одному напрямку і встановлюють на індикаторі АЧХ сигналу, що відповідає прохідної хвилі на рівні лінії коефіцієнта передачі 0 (за дБ-шкалою). В англomовній літературі такий вид калібрування позначають аббревіатурою *SLT* (*Short* — закорочування, *Load* — узгоджене навантаження, *Through* — пряме з'єднання).

Для зручності визначення величин вимірюваних параметрів в індикаторному блоці використовують електронний візир і додаткові шкали КСХН і ослаблення (в дБ). Встановлюючи лінію електронного візирu на обраних точках частотної характеристики, визначають величину КСХН або ослаблення за відповідними шкалами. Докладніше процедура вимірювань за допомогою приладу R2-69 наведена в [3].

У процесі даної та наступних лабораторних робіт досліджуються частотні характеристики мікрохвильових чотириполіусників, зокрема ферритового вентиліа (лабораторна робота 3) та електрично керованого аттенюатора (лабораторна робота 4), принцип дії та особливості конструкції яких викладені в матеріалах лекцій курсу та в навчальному посібнику [2, с. 113-114, 171-180].

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з лабораторного стенда з джерелом живлення змінної та постійної напруги, панорамного аналізатора P2-69 (рис. 2.3) та мікрохвильового пристрою ДП (рис. 2.1).

2. Метод вимірювань

Вимірювання частотних характеристик ДП проводиться стандартними методами. Порядок вимірювання вказано в технічному опису [3].

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Підготовка установки до роботи.

Ознайомитись з технічним описом панорамного вимірювача P2-69 [3].

За вказівкою викладача в лабораторній роботі виконується дослідження у мікрохвильовому діапазоні чотирьохполюсних пристроїв (ДП):

- механічно керованого аттенюатора і
- резонатора прохідного типу.

Перед вимірюванням характеристик здійснити підготовку Р2-69 до роботи. Для цього необхідно з'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі і хвилі в одному напрямку і проведіть калібрування панорамного аналізатора. В даному випадку прилад повинен показувати власну АЧХ.



Рисунок 2.3 — Зовнішній вигляд панорамного аналізатора Р2-69

3.2. Встановити у хвильоводний тракт механічно керований атенюатор. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти внесене ним ослаблення.

3.3. Виміряти амплітудно-частотну характеристику атенюатора в зазначеному викладачем діапазоні частот для трьох значень внесеного загасання (за шкалою атенюатора). Результати вимірювань занести в таблицю 1, вказуючи в комірках відповідне ослаблення атенюатора.

3.4. Спрямовані відгалужувачі підключити до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти КСВН його входу. Виміряти частотну залежність КСХН атенюатора в зазначеному викладачем діапазоні для трьох

позначок його шкали: 0, 10, 20. Результати вимірювань занести в таблицю 2, вказуючи в комірках відповідне значення КСХН атенюатора.

Таблиця 1 — Ослаблення атенюатора

позн. шкали \ F, ГГц										
0										
10										
20										

Таблиця 2 — КСХН атенюатора

позн. шкали \ F, ГГц										
0										
10										
20										

3.5. З'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі та прохідної хвилі одному напрямку, і перевірити калібрування Р2-69. При цьому прилад повинен показувати власну АЧХ.

3.6. Встановити у тракт панорамного аналізатора хвилеводний резонатор. Спрямовані відгалужувачі підключаються до нього таким чином, щоб можна було виміряти внесене ним ослаблення.

3.7. Виміряти частотні залежності внесеного ослаблення в зазначеному викладачем діапазоні частот. Результати вимірювань занести в таблицю 3.

3.9. Спрямовані відгалужувачі підключити до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти КСВН його входу. Виміряти частотну залежність КСХН резонатора. Результати занести в таблицю 2.

Таблиця 3 — Амплітудно-частотна характеристика резонатора

f, ГГц										
A _{пр} , дБ										
КСХН										

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) графіки амплітудно-частотної характеристики атенюатора та резонатора;
- 6) висновки.

Контрольні запитання

1. Назвати основні метрологічні характеристики панорамного аналізатора Р2-69. Який його робочий діапазон частот.
2. Пояснити структурну схему та принцип роботи панорамного аналізатора Р2-69 та окремих його блоків (ГХЧ та індикатора).
3. Пояснити принцип роботи синхронного детектора. Які його переваги та недоліки у порівнянні детекторами іншого типу.
4. В чому полягає суть роботи системи автоматичного регулювання потужності приладу панорамного аналізатора?
5. Що таке власна АЧХ генератора хитної частоти?
6. Як здійснюється калібрування цього приладу під час вимірювань?
7. Пояснити схему вимірювання ослаблення та КСХН за допомогою панорамного аналізатора.
8. Що входить до складу лабораторної установки?
9. Які режими роботи панорамного аналізатора Ви можете назвати?
10. В чому полягає особливість вимірювання АЧХ вузькосмугових пристроїв мікрохвильового діапазону?

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРИТОВОГО ВЕНТИЛЯ

Мета та основні завдання роботи

Ознайомлення з принципом дії феритових вентилів та їх застосуванням.
Дослідження основних характеристик феритового вентиля.

Основні теоретичні відомості

1. Застосування та основні параметри феритових вентилів

Феритовий вентиль (ФВ) — це невзаємний чотирьохполюсник, що не створює суттєвого згасання для хвилі, що поширюється уздовж лінії передачі в одному (прямому) напрямку, проте вносить велике згасання для іншого (зворотного) напрямку передачі енергії.

ФВ знайшли широке практичне застосування для розв'язки різних частин НВЧ тракту між собою, а також усувannya шкідливого впливу відбитих сигналів на передавальні та приймальні пристрої систем бездротового зв'язку.

Застосування ФВ значно покращує роботу НВЧ генераторів, сприяє зменшенню затягування частоти та спотворення спектра сигналів, усуває ефект довгої лінії тощо. Вентиль включається між генератором і навантаженням (рис. 3.1) таким чином, щоб енергія падаючої хвилі, яка поширюється від генератора до навантаження, проходила ФВ у прямому напрямку (воно вказується стрілкою на корпусі ФВ) з малими втратами, а відбита від навантаження хвиля, яка поширюється в зворотному напрямку, поглиналася у вентилі.

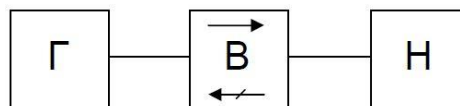


Рисунок 3.1 — Феритовий вентиль як розв'язуючий елемент

Основними характеристиками ФВ є:

- втрати, що вносяться в прямому напрямку (прямі втрати) $S_{\text{пр}}$;
- загасання у зворотному напрямку $S_{\text{зв}}$;

- діапазон і смуга робочих частот;
- коефіцієнт стоячих хвиль з напруги (КСХН) входу в смугі робочих.

1. Прямі втрати $C_{\text{пр}}$ визначаються як відношення в децибелах потужності на вході вентиля к потужності на його виході в прямому напрямку

$$C_{\text{пр}} = 10 \lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вих}}) \text{ (дБ)}. \quad (1)$$

2. Прямі втрати $C_{\text{зв}}$ визначаються як відношення в децибелах потужності на вході вентиля к потужності на його виході в зворотному напрямку

$$C_{\text{пр}} = 10 \lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вих}}) \text{ (дБ)}. \quad (2)$$

3. Ефективність вентиля (якість розв'язки) можна характеризувати вентильним числом (добротністю) — відношенням ослаблень зворотної та прямої хвиль, вираженим у децибелах

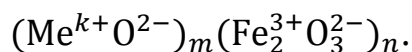
$$B = C_{\text{зв}}/C_{\text{пр}}. \quad (3)$$

У реальних конструкціях ФВ $C_{\text{пр}}$ зазвичай складає величину від 0,1 до 1,5 дБ, а $C_{\text{зв}}$ — від 10 до 70 дБ. КСХН при цьому не перевищує 1,2. Залежно від застосування та умов експлуатації ФВ вибирають із такими характеристиками, щоб вони повною мірою задовольняли певним вимогам, тобто. Необов'язково мати одночасно високі показники за всіма характеристиками.

2. Властивості феритів у надвисокочастотному полі

Структура феритів

Основним «робочим тілом» ФВ є феритова пластина або феритовий стрижень. Ферит (англ.: *ferrite*) — магніто-діелектричний матеріал з кристалічною структурою. До його складу входить окис заліза Fe_2O_3 , а також оксиди інших матеріалів. Склад фериту можна описати формулою



Ферити — це тверді тіла, які створюються спіканням порошку окису заліза з оксидами нікелю, цинку, марганцю, хрому, міді та ін. Особливістю феритів є поєднання властивостей хорошого діелектрика ($\sigma = 0,0005-0,002$) і феромагнетика ($\mu = 10-70$). Початкова відносна магнітна проникність НВЧ феритів у слабких низькочастотних полях $\mu = 10-3000$. На НВЧ за відсутності постійного магнітного поля вона лише незначно відрізняється від одиниці.

Феромагнітний резонанс

Якщо електрон розглядати як електрично заряджений об'єкт, що обертається навколо власної осі, то у багатьох відношеннях він нагадує механічний гіроскоп (дзигу), що має власний механічний момент кількості руху $\mathbf{s}$ і магнітний спиновий момент $\mathbf{m}$, які виникають завдяки обертанню електрона і спрямованими в протилежні сторони. У присутності зовнішнього постійного магнітного поля напруженістю $\mathbf{H}_0$, яке збігається з напрямком $\mathbf{m}$ (рис. 3.2), на електрон почне діяти пара сил, тобто момент обертання. Під дією цього моменту спини електрона прагнуть орієнтуватися у напрямку прикладеного поля, прецесуючи подібно гіроскопу навколо осі, яка збігається за напрямком з $\mathbf{H}_0$, утворюючи з ним правовинтову систему.

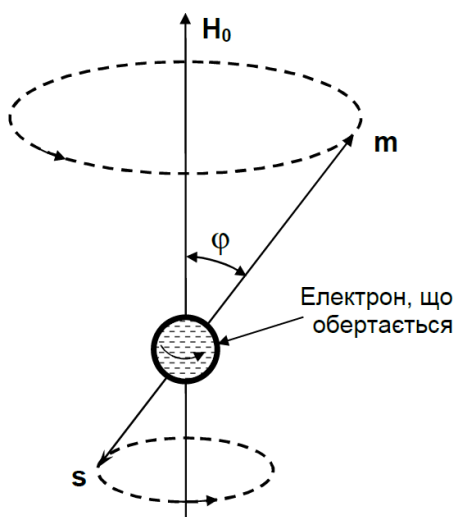


Рисунок 3.2 — Прецесія магнітного моменту електрона у постійному магнітному полі

Частота вільної прецесії, яка називається частотою феромагнітного резонансу, може бути визначена з формули

$$\omega = \gamma H_0. \quad (4)$$

де H_0 – напруженість діючого постійного магнітного поля в ерстедах; $1 \text{ E} = 1000/\pi \approx 80 \text{ (A/m)}$;

$\gamma = 2,8 \text{ МГц/Е}$ – гіромагнітне відношення електрона, тобто відношення модуля його магнітного моменту m до модуля механічного моменту s .

За відсутності втрат вільна прецесія тривала б з постійним кутом φ . У реальних же феромагнітних середовищах завжди мають місце втрати, тому кут φ починає швидко зменшуватися (кінець вектора $\mathbf{m}$ рухається по спіралі, що згортається). Через час порядку 10^{-8} с вільна прецесія практично повністю зникає, вектори магнітних спінових моментів всіх електронів встановлюється паралельно $\mathbf{H}_0$, і ферит намагнічується до насичення. Якщо присутнє високочастотне магнітне поле $\mathbf{H}$, з круговою поляризацією та частотою в напрямку, перпендикулярному $\mathbf{H}_0$ (рис. 3.3), то при збігу напрямків обертання $\mathbf{m}$ і $\mathbf{H}$ у фериті спостерігається так звана вимушена прецесія, зростання амплітуди якої (тобто збільшення φ) обмежене магнітними втратами. В результаті настає такий режим ($\varphi = \text{const}$), при якому енергія високочастотного магнітного поля розсіюється у вигляді тепла в кристалічній решітці фериту.

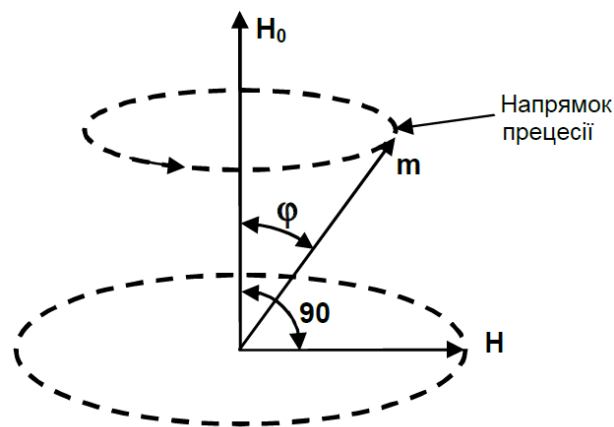


Рисунок 3.3 — Вимушена прецесія магнітного моменту електрона

При $\omega \neq \omega_0$ ефект взаємодії зменшується, і втрати у фериті знижуються. У разі протилежних напрямків обертання $\mathbf{m}$ і $\mathbf{H}$ поле НВЧ та речовина фериту практично не взаємодіють. Ферит для такого поля є діелектриком і поглинання енергії практично не відбувається. Описане явище називається явищем *феромагнітного резонансу* і відіграє важливу роль у теорії та практиці застосування феритів в мікрохвильовому діапазоні. Розглянуте явище невзаємного резонансного поглинання електромагнітних хвиль при феромагнітному резонансі в поперечно намагніченому ферит використовується в резонансних хвилеводних і коаксіальних феритових вентилях.

Отже у присутності постійного магнітного поля в залежності від поляризації хвилі (правої чи лівої) змінюватиметься її взаємодія магнітним моментом фериту. У свою чергу магнітна проникність для вказаних хвиль буде різною. Залежність дійсної частини μ'_+ комплексної магнітної проникності від H_0 для хвилі з правою поляризацією має резонансний характер, а уявна складова μ''_+ , яка характеризує втрати у фериті, максимальна для резонансу. Для лівополяризованої хвилі напрямок обертання поля та прецесії електронів протилежні, і резонанс неможливий, тому магнітна проникність μ'_- — дійсна і змінюється повільно. Типовий графік залежності вказаних величин від напруженості магнітного поля приведений на рис. 3.4.

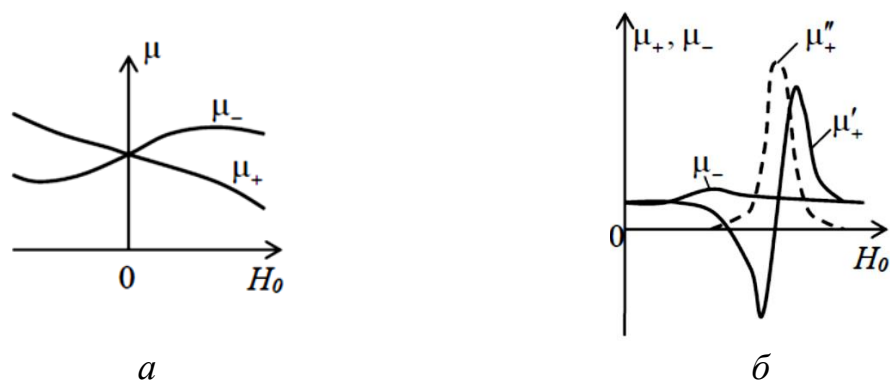


Рисунок 3.4 — Залежність магнітної проникності фериту від напруженості постійного магнітного поля поблизу 0 (а) та резонансу (б)

Ефект Фарадея

Ефект Фарадея полягає у в повороті площини поляризації електромагнітної хвилі під час її поширення вздовж вектора поля підмагнічення $\mathbf{H}_0$. Якщо хвиля поширюється у гіротропному середовищі від т. А до т. В (рис. 3.5а) у напрямку вектора $\mathbf{H}_0$ електричний вектор повертається за годинниковою стрілкою на кут Δ , а для зворотного поширення хвилі (рис. 3.5б) — проти годинникової стрілки на той же самий кут Δ , якщо дивиться вздовж напрямку поширення. Цей факт пояснюється тим, що величина ефективної магнітної проникності для хвиль кругової поляризації має різні значення: μ_+ — для правої та μ_- — для лівої поляризації (рис. 3.5). Поле лінійно поляризованої хвилі можна представити як суперпозицію полів двох хвиль з круговою поляризацією E^+ и

E^- . Для прямого поширення хвилі ($H_0 > 0$), оскільки $\mu_+ < \mu_-$, фазовий кут вектора E^+ в т. В менш, ніж вектора E^- . Підсумковий вектор E_B повертається на кут

$$\Delta = (\varphi^- - \varphi^+)/2.$$

Аналогічно для зворотного напрямку поширення хвилі. Для слабких полів кут повороту прямо пропорційний напруженості поля H_0 та відстані L . Для великих значень H_0 настає насичення. Ефект Фарадея невзаємний: кут повороту площини поляризації не залежить від напрямку поширення хвилі.

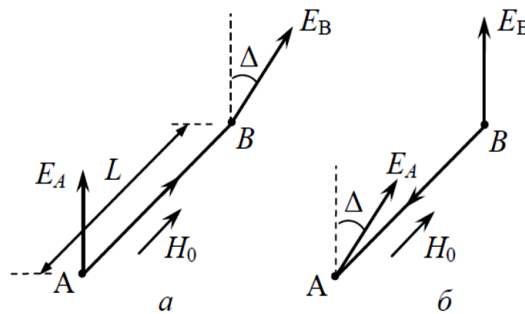


Рисунок 3.5 — Поворот площини поляризації електромагнітної хвилі, що поширюється в напрямку магнітного поля (а) та назустріч йому (б)

Ефект зміщення поля

Зазначене явище спостерігається в прямокутному хвилеводі, в якому розміщені відносно товсті феритові пластини, намагнічені сильним поперечним полем H_0 . Суть явища полягає у тому, що для падаючої хвилі (рис. 3.6а) ферит має негативну магнітну проникність. У такому разі стала поширення у фериті — уявна величина (див. рис. 3,4б). Хвиля усередині феритового зразка поширюватися не може і «витискується» з нього. При зворотному напрямі поширення хвилі (рис. 3.6б) магнітна проникність фериту близька до одиниці. У цьому випадку феритова пластина веде себе як діелектричний хвилевід ($\epsilon=5...20$), у якому поширюється поверхнева HE -хвиля. Її поле концентрується біля пластини (більш детально див. [2]). При подальшому збільшенні напруженості поля підмагнічування H_0 до значень, близьких до резонансних, загасання правополяризованої хвилі суттєво зростає, що спричиняє ще більшу різницю у загасанні хвиль, що поширюються у протилежних напрямках.



Рисунок 3.6 — Поле падаючої (а) та відбитої (б) хвилі типу H_{10} в прямокутному хвилеводі з підмагніченою феритовою пластину

3. Основні типи феритових вентилів

Резонансний вентиль (англ.: *resonance isolator*) містить підмагнічену феритову пластину, що розташована у площині прямокутного хвилеводу, де магнітне поле має кругову поляризацію (рис. 3.7а). Поле підмагнічування створюється постійним магнітом і відповідає полю гіромагнітного резонансу. Для отримання невзаємного ефекту відповідно до викладеної вище теорії при конструюванні резонансного ФВ на базі прямокутного хвилеводу, що працює на хвилі H_{10} , бажано розташувати ферит у тій ділянці хвилеводу, де високочастотне магнітне поле має кругову поляризацію [2]. Падаюча хвиля, що має ліву поляризацію у фериті, незначно послаблюється, а відбита з правою поляризацією сильно загасає через втрати у фериті внаслідок феромагнітного резонансу.

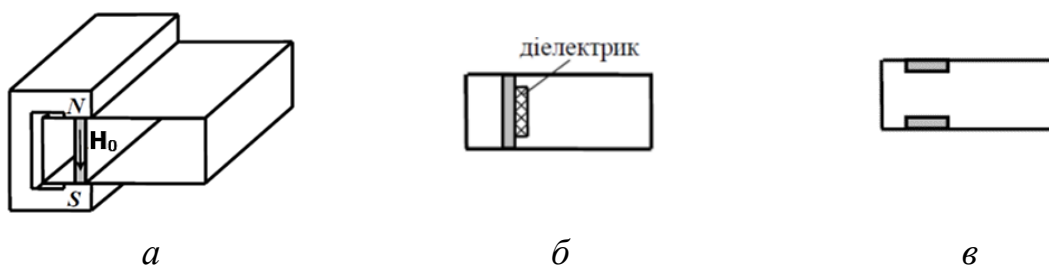


Рисунок 3.7 — Конструкція резонансного вентилля (а) і можливе розташування феритових пластин уздовж вузької (б) та широкої (в) стінки

Параметри поля підмагнічування і положення пластини у хвилеводі залежать від частоти, що зменшує смугу робочих частот. Для її розширення використовують діелектричні вставки (рис. 3.7б), які сприяють концентрації електромагнітного поля поблизу фериту. Для покращення тепловідводу феритові

пластини розміщують на широких стінках хвиевод (рис. 3.7в), проте така конструкція потребує значно більшої напруженості поля підмагнічення у порівнянні з попередньою конструкцією.

Фарадеївський вентиль (англ.: *Faraday isolator*) містить відрізок круглого хвиеводу з феритовим стрижнем, що розміщено на осі хвиеводу, зовнішнє джерело поля повздовжнього підмагнічування. З обох сторін круглий хвиевід з'єднується через плавні переходи з прямокутним хвиеводом. Посередині переходу паралельно широкій стінці встановлено поглинаючу пластину. Довжину круглого хвиеводу з феритовим стрижнем і поле підмагнічування вибрано таким чином, що поворот площини поляризації складає 45° .

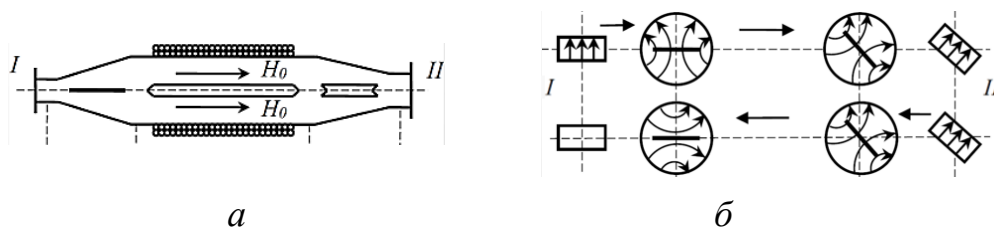


Рисунок 3.8 — Конструкція (а) і пояснення принципу роботи (б) фарадеївського вентиля

Вихідний прямокутний хвиевід також повернуто на кут 45° відносно вхідного. Тому у напрямі $II-I$ буде поглинатися, а у напрямі $I-II$ — ні.

Найчастіше фарадеївські вентиля, через простоту конструкції, використовуються в мм-діапазоні. Їх втрати складають близько 1 дБ, розв'язка — не менш 20 дБ, а КСХН — не більш 1,2. Напруженість поля підмагнічування H_0 лежить в межах 10-15 Е.

Вентиль зі зміщенням поля (англ.: *field-displacement isolator*) на прямокутному хвиеводі містить феритову пластину з поглинаючою металевою плівкою на поверхні (рис. 3.9). Тому відбита хвиля, яка концентрується біля фериту, поглинається. На падаючу хвилю плівка практично не діє. Вентилі зі зміщенням поля у порівнянні з резонансними мають суттєво меншою за масою магнітну систему, більший робочий діапазон частот, проте вони можуть застосовуватися при відносно невеликих рівнях НВЧ потужності.

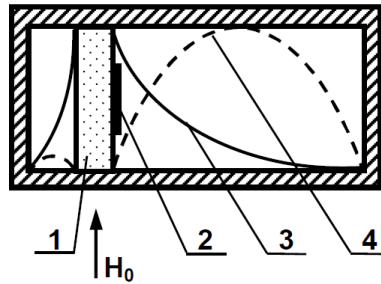
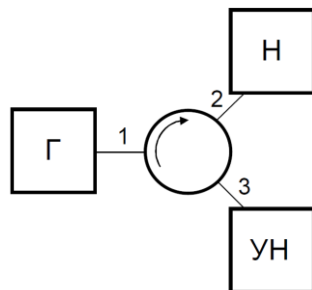


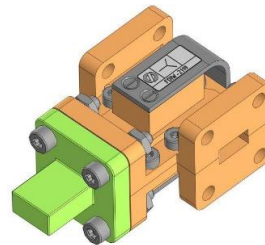
Рисунок 3.9 — Вентиль на основі ефекту зміщення поля:

1 – феритова пластина; 2 – поглинаюча плівка; 3 – розподіл електричного поля зворотної хвилі; 4 – розподіл поля прямої хвилі

Вентиль на основі циркулятора. *Циркулятором* називається багатоплюсний пристрій для спрямованої передачі енергії електромагнітних коливань між його плечима відповідно до порядку їх чергування. У феритовому циркуляторі цей порядок визначається напрямком постійного магнітного поля, що прикладене до нього. У багатьох випадках циркулятори використовуються як вентилі для усунення хвилі, відбитої від навантаження. Схема триплечого циркулятора у ролі узгоджувального вентилі зображено на рис. 3.10а.



а



б

Рисунок 3.10 — Структура (а) та зовнішній вигляд (б) вентилі на основі феритового циркулятора

Потужність від НВЧ генератора Γ надходить у плече 1 циркулятора і проходить у плече 2, до якого підключено робоче навантаження (наприклад антена). Відбита від навантаження H хвиля повертається до плеча 2 циркулятора і проходить у плече 3, яке з'єднане з узгодженим навантаженням $УН$. Якщо

його коефіцієнт відбиття дуже малий, то зворотна хвиля, що повертається до генератора НВЧ, буде значно ослабленою.

Перевагою використання циркулятора у порівнянні з вентилями, розглянути вище є можливість зменшення ваги та габаритів. Крім того, енергія відбитої хвилі у такій конструкції поглинається не феритом, а зовнішнім узгодженим навантаженням, що дозволяє працювати з великими потужностями та спрощує систему охолодження.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з лабораторного стенда з джерелом живлення змінної напруги, панорамного аналізатора Р2-69 (рис. 2.3) та двох феритових вентилів міліметрового діапазону, які є досліджуваними пристроями ДП. Схема вимірювань приведена на рис. 2.1.

2. Метод вимірювань

Вимірювання характеристик вентилів проводиться стандартними методами. Порядок вимірювання вказано в технічному опису [3].

3. Завдання на лабораторну роботу

В заданому викладачем діапазоні визначити частотну залежність основних параметрів вентиля:

- втрат, що вносяться в прямому напрямку (прямі втрати) $C_{\text{пр}}$;
- загасання у зворотному напрямку $C_{\text{зв}}$;
- КСХН входу в смузі робочих.

Вимірювання провести для двох вентилів, у яких використано:

- ефект Фарадея (вентиль 1) і
- феритовий циркулятор (вентиль 2).

3.1. Підготувати до роботи панорамний аналізатор Р2-69 згідно з технічним описом. Для цього необхідно з'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі і хвилі в одному напрямку і проведіть калібрування панорамного аналізатора. В даному випадку прилад повинен показувати власну АЧХ.

3.2. Встановити у хвильоводний тракт *вентиль 1* таким чином щоб позначка стрілки на ньому збігалася з напрямком поширення хвилі у вимірювальному НВЧ тракті. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти внесене ним ослаблення.

3.3. Виміряти амплітудно-частотну характеристику прямих втрат ($C_{\text{пр}}$) *вентилья 1* в зазначеному викладачем діапазоні. Результати вимірювань занести в таблицю 1, вказуючи в комірках відповідне значення параметра.

3.4. Встановити у хвильоводний тракт *вентиль 1* таким чином щоб позначка стрілки на ньому була протилежна напрямку поширення хвилі у вимірювальному НВЧ тракті. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти внесене ним ослаблення.

3.5. Виміряти амплітудно-частотну характеристику прямих втрат ($C_{\text{зв}}$) *вентилья 1* в зазначеному викладачем діапазоні. Результати вимірювань занести в таблицю 1, вказуючи в комірках відповідне значення параметра.

3.6. Спрямовані відгалужувачі підключити до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти КСВН його входу. Виміряти частотну залежність КСХН *вентилья 1* в заданому діапазоні. Результати вимірювань занести в таблицю 1.

3.7. З'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі та прохідної хвиль одному напрямку, і перевірити калібрування Р2-69 згідно з технічним описом. При цьому прилад Р2-69 має показувати власну АЧХ.

Таблиця 1 — Частотна залежність параметрів *вентилья 1*

Ф, ГГц										
$C_{\text{пр}}$										
$C_{\text{зв}}$										
КСХН										

3.8. Повторити пп. 3.2-3.7 для *вентилья 2* і занести результати вимірювань в таблицю 2.

Таблиця 2 — Частотна залежність параметрів *вентилів* 2

F, ГГц										
$C_{\text{пр}}$										
$C_{\text{зв}}$										
КСХН										

3.9 Визначити смугу робочих частот вентилів, у якій: $C_{\text{пр}} \leq 1,5$ дБ; $C_{\text{зв}} \geq 20$ дБ і $\text{КСХН} \leq 1,3$.

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань та графіки частотної залежності параметрів вентилів;
- 5) визначений діапазон робочих частот за вказаними в п. 3.9 критеріями;
- 6) висновки (у висновках має бути пункт щодо порівняння робочих діапазонів досліджених феритових вентилів).

Контрольні запитання

1. Що таке феритовий вентиль і де він використовується?
2. Які основні параметри феритових вентилів?
3. Який метод узгодження реалізується за допомогою феритових вентилів?
4. Які властивості феритів Ви можете назвати? До якого класу їх можна віднести за електричними та магнітними характеристиками?
5. Поясніть природу феромагнітного резонансу.
6. Як змінюється характеристики феритових матеріалів в залежності від поляризації електромагнітних хвиль, що у них поширюються, і зовнішнього постійного магнітного поля?

7. Поясніть природу ефекту Фарадея. Наведіть приклади його використання.
8. У чому полягає ефект зміщення поля? Чи залежить його існування від типу мікрохвильової лінії передачі?
9. Які типи феритових вентилів Ви можете назвати?
10. Для якого типу вентиля потрібна більша напруженість поля намагнічування? А для якого — менша?
11. Як потрібно розташовувати феритові пластини в резонансному вентилі, щоб збільшити його робочу потужність?
12. Вентиль якого типу має найбільшу смугу робочих частот?
13. Поясніть принцип роботи вентиля на ефекті Фарадея.
14. Що таке феритовий циркулятор?
15. Поясніть структуру та принцип роботи вентиля, побудованого на основі феритового циркулятора. В чому переваги такого вентиля у порівнянні з іншими?
16. Поясніть суть методу вимірювання основних параметрів феритових вентилів, який використовується в даній роботі.
17. Яким чином проводиться калібрування панорамного аналізатора?
18. Чим відрізняються схеми вимірювання прямих, зворотних втрат та КСХН?

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНОГО АТЕНЮАТОРА

Мета та основні завдання роботи

Ознайомлення з принципом дії електрично керованих атенюаторів мікрохвильового діапазону. Дослідження властивостей і характеристик атенюатора на розподіленому *pin*-діоді міліметрового діапазону.

Основні теоретичні відомості

Електрично керовані атенюатори (ЕКА) — один із ключових елементів мікрохвильової апаратури. Вони забезпечують ідеальний контроль амплітуди сигналів в широкому діапазоні частот із високою стабільністю та точністю без суттєвої зміни форми чи спектрального складу. Вони використовуються для каліброваного вимірювання рівня потужності сигналу, зниження чутливості характеристик вузла апаратури до змін імпедансу навантаження. В автоматизованій апаратурі НВЧ діапазону ЕКА певним чином змінюють коефіцієнт передачі, реалізують балансування каналів та узгодження міжкаскадних кіл, дозволяють реалізувати складні види модуляції сигналів.

1. Принцип роботи електрично керованих атенюаторів

Ключовим елементом ЕКА є *pin*-діод, структура яких містить сильно леговані *p*- та *n*- області, і високоомну *i*- область (базу), яка має товщину w від одиниць до сотень мікрометрів (рис. 4.1). Концентрація носіїв заряду в базі складає біля 10^{13} см^{-3} . Області *p* і *n*, як правило, сильно леговані (позначено p^+ , n^+), тому що часто використовуються безпосередньо для контакту з металевими виводами. Якщо джерело зовнішньої постійної напруги підключено плюсом до шару p^+ , а мінусом — до n^+ , то в *i*-області збільшується концентрація електронів та дірок до 10^{16} – 10^{17} см^{-3} . Через структуру тече постійний струм I_0 густиною I_0/S близько 10 А/см^2 . При зворотному зміщенні концентрація носіїв $Q_{\text{нак}}$ в *i*-шарі падає приблизно на порядок відносно початкового значення (10^{13} см^{-3}).

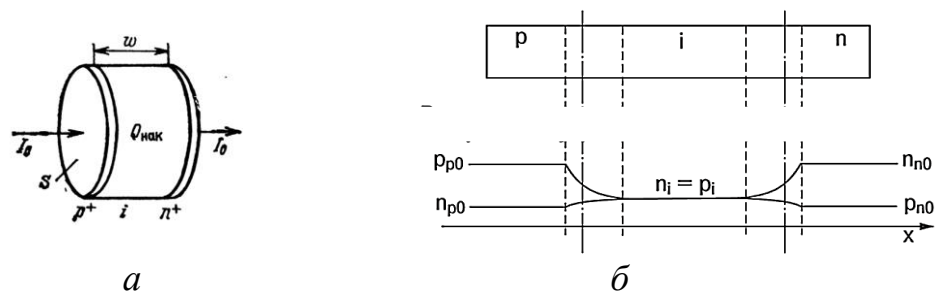


Рисунок 4.1 — Структура *pin*-діода (а) та її профіль легування (б)

Конструктивно *pin*-діоди можуть бути корпусними або безкорпусними. На рис. 4.2 представлені типові варіанти безкорпусних конструкцій діодів. Діоди найпростішої конструкції (рис. 4.2а) призначені для герметичних пристроїв (атенюаторів, модуляторів, перемикачів) і мають параметри товщина *i*-шару *w* — від 50 до 100 мкм, а діаметр структури *D* — від 0,5 до 3 мм. На рисунку позначено: 1 — омічний контакт, 2 — *p*-шар, 3 — *i*-шар, 4 — *n*-шар. Монтаж у виріб реалізується за допомогою паяння або механічного притиску.

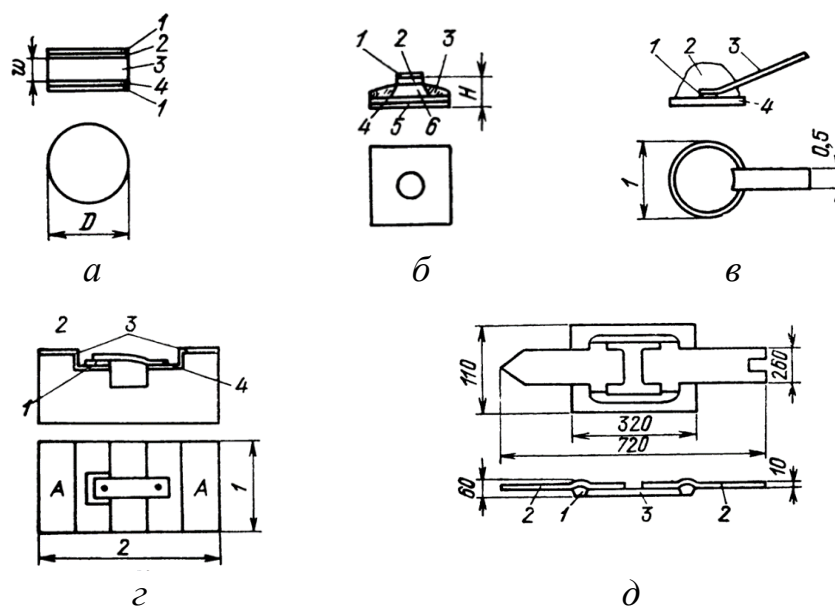


Рисунок 4.2 — Типові конструкції безкорпусних *pin*-діодів

Конструкція на рисунку 4.2б є мезаструктурою. Тут 1 і 5 — омічні контакти, 2 — *p*-шар, 3 — захисний шар зі скла, 4 — *n*-шар, 6 — *i*-шар. Діоди у вигляді мезаструктур використовуються у мікросмужкових пристроях мікрохвильового діапазону, а також як основний елемент корпусних діодів. Слід зазначити,

що мезаструктура є найбільш універсальним конструктивним елементом *pin*-діодів. Її ширина складає від 0,5 до 3 мм, а висота — від 0,15 до 0,3 мм. Покриття бокової поверхні шаром скла добре захищає діод від пробоя та електричних витоків, що підвищує надійність роботи на великих рівнях сигналу.

Для включення в інтегральні лінії, зокрема мікросмужкової, передачі розроблені спеціальні форми діодів. На рис. 4.2в показано діод, що складається з напівпровідникової структури 1, металічної основи 4 і плоского виводу 3. Структура захищена від механічного впливу і частково від дії вологи пластмасовим покриттям 2.

Конструкція діод, показаного на рис. 4.2г, має керамічну основу типу «ліжка». Тут 1 – напівпровідникова структура, 2 – керамічна основа, 3 – металізовані ділянки кераміки, 4 – з'єднувальна пласка перемичка. Металізованими площинками 4 діод припаюється до мікросмужкової лінії (МСЛ), яка має розрив верхньої смужки близько 0,5 мм, і встановлюється в лінію послідовно (рис. 4.3). Напівпровідникова структура покривається лаком, що захищає її від впливу механічних чинників та вологи.

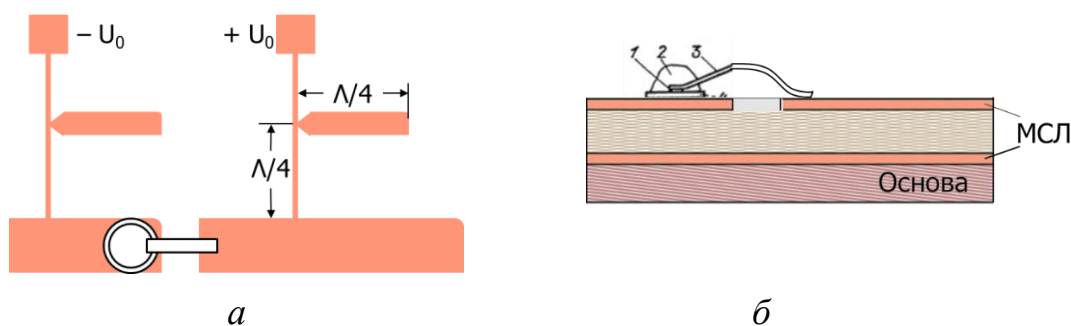


Рисунок 4.3 — Послідовне включення безкорпусного *pin*-діода в мікросмужкову лінію: а) вид зверху; б) вид збоку

Конструкція, яка наведена на рис. 4.2д (розміри вказано у мікрометрах), є мініатюрним поверхнево орієнтованим діодом з балочними виводами. Діод містить кристал кремнію 3, у якому є два кармани, що заповнені металом. Навколо карманів створені *p*-та *n*-області, між якими знаходиться *i*-область. Верхня поверхня кристала захищена окисом кремнію. Пластина кремнію закріплена на скляній основі (рамці) 1. Балочні виводи 2 призначені для монтажу

діода у розрив мікросмужкової лінії. Малий об'єм i -області передбачає роботу діода на малому рівні НВЧ потужності. Кращі зразки діодів даного типу мають невеликі значення ємності (0,01-0,02 пФ).

Корпусні діоди, як правило, призначені для використання в хвильоводних і коаксіальних пристроях НВЧ діапазону, в також в конструкціях, де поверхневий монтаж неможливо реалізувати. Крім того, в ряді випадків вони дозволяють підвищити швидкодію перемикачів та атенюаторів.

На рис. 4.4 показана конструкція корпусного *pin*-діода, яка містить: мідний утримувач 1, керамічну втулку 2, кільце 3, — кришку 4, — вивід у вигляді смужки 5 та, *pin*-структуру 6.

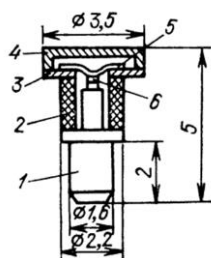


Рисунок 4.4 — Конструкція корпусного *pin*-діода

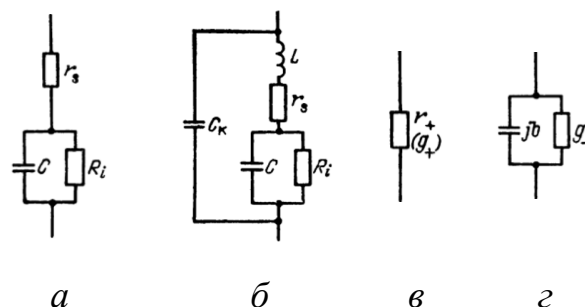


Рисунок 4.5 — Еквівалентна схема *pin*-діода

На рис. 4.5 представлені еквівалентні схеми *pin*-діодів:

- корпусного у відкритому (а) та закритому (б) стані та
- безкорпусного у відкритому (в) та закритому (г) стані.

Закритий безкорпусний *pin*-діод часто представляють як паралельне з'єднання активного опору $R = 1-10$ кОм та загальної ємності діода $C = 0,3-1$ пФ.

У верхній частині сантиметрового діапазону і в міліметровому діапазоні використовують так звані розподілені *pin*-діодні структури, які мають довжину та ширину порівняною з довжиною хвилі. Проте висота, яка визначається в основному шириною бази w , залишається малою. Розподілені діоди встановлюються за допомогою паяння в діафрагму, яка розміщена в хвильоводі (рис. 4.6) і має бути узгоджена з ним. У разі подання на діод позитивного керувального зміщення, величиною 1-2 В опір бази падає через її наповнення вільними носіями струму — дірками з p -області та електронами з n -області.

Негативна півхвиля НВЧ коливання не встигає витягнути з бази діода просторовий заряд. Тому в ній залишаються вільні носії заряду, до яких передається енергія електромагнітної хвилі, що поширюється у хвилеводі.

У свою чергу набута ними енергія розсіюється через взаємодію з атомами кристалічної решітки. Час увімкнення *pin*-діода складає 1 нс - 10 мкс, вимикання — у декілька разів більше. Комутаційні *pin*-діоди дозволяють керувати проходженням в тракті НВЧ сигналів імпульсною потужністю до 100 кВт при середній потужності до 1 кВт.

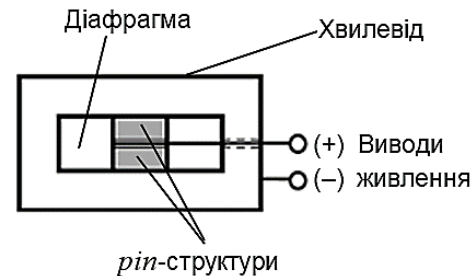


Рисунок 4.6 — Розміщення *pin*-діода в прямокутному хвилеводі

2. Основні параметри і характеристики *pin*-атенюаторів

ЕКА, що побудовані на *pin*-діодах, часто називають *pin*-атенюаторами. Їхніми основними технічними характеристиками є:

- діапазон робочих частот;
- максимально допустимий струм керування $I_{\text{макс}}$ (мА);
- мінімальне (початкове) ослаблення (при $I = 0$), $A_{\text{мін}}$ (дБ);
- максимальне ослаблення (при $I = I_{\text{макс}}$), $A_{\text{макс}}$ (в дБ);
- КСХН входу (виходу);
- максимально допустима вхідна потужність, $P_{\text{макс}}$ (Вт);
- маса та габарити.

Слід зазначити, що у закордонні виробники в документації на пристрій використовують два значення допустимої потужності $P_{\text{макс}}$ (*power handling*):

- 1) максимальна потужність, коли атенюатор ще функціонує без деградації своїх характеристик (*full performance*) і
- 2) максимальна потужність, при якій атенюатор не виходить з ладу, проте характеристики його деградують (*no damage*).

У другому випадку для оцінки лінійності пристроїв вводять такі показники як $P_{0,1 \text{ дБ}}$ і $P_{1 \text{ дБ}}$, що фіксують значення вхідної потужності, при яких внесені втрати збільшуються відносно номінальних (малосигнальних) паспортних значень відповідно на величину 0,1 та 1 дБ.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з лабораторного стенда з джерелом живлення змінної напруги, панорамного аналізатора Р2-69 (рис. 2.3) , регульованого джерела постійного струму, міліамперметра та атенюатора на *pin*-діодах, який є досліджуваним пристроєм ДП (див. рис. 2.1). Схема вимірювання ослаблення електрично керованого атенюатора приведена на рис. 4.7а, а КСХН його входу (виходу) — на рис. 4.7б.

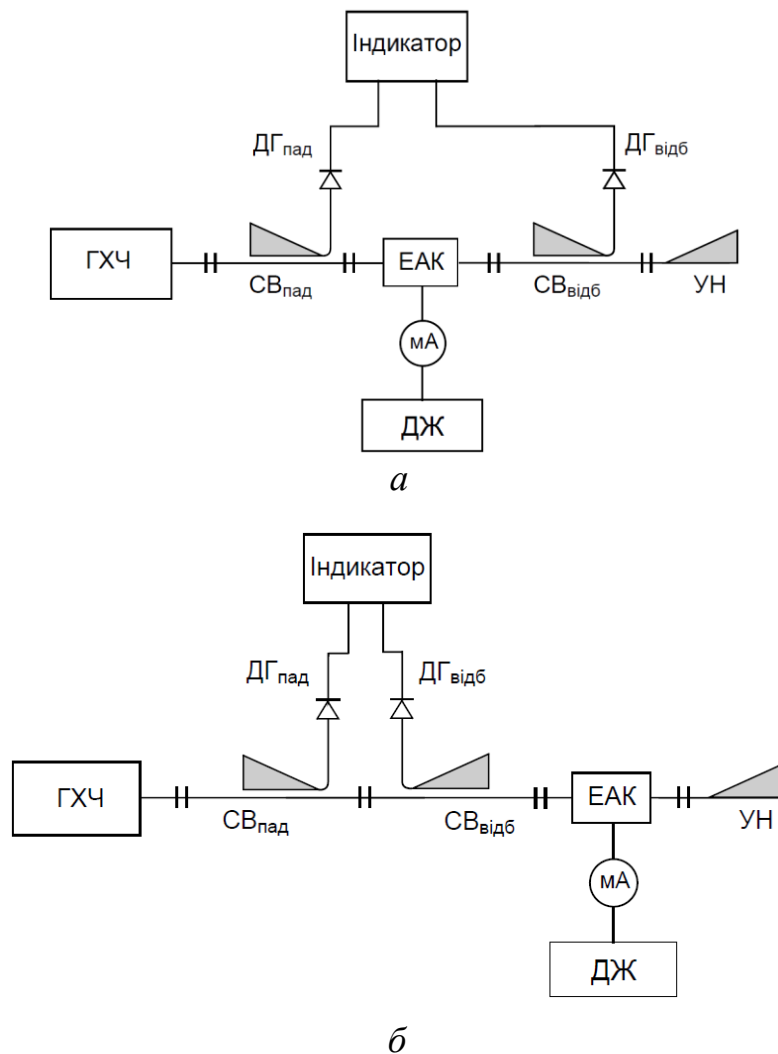


Рисунок 4.7 — Блок-схема лабораторної установки: а) в режимі вимірювання ослаблення атенюатора; б) в режимі вимірювання КСХН атенюатора

Установка містить панорамний аналізатор Р2-69, електрично керований атенюатор, джерело постійного струму для керування атенюатором, міліамперметр (мультиметр) для контролю струму керування.

До складу Р2-69 входять: генератор хитної частоти (ГХЧ), індикатор, два спрямованих відгалужувача падаючої ($СВ_{пад}$) та відбитої ($СВ_{відб}$) хвиль з детекторними голівками ($ДГ_{пад}$, $ДГ_{відб}$) та узгоджене навантаження (УН). Загальний вигляд панорамного аналізатора Р2-69 (рис. 2.3) та принцип його роботи приведено в методичних рекомендаціях до лабораторної роботи 2.

2. Метод вимірювань

Вимірювання характеристик електрично керованого *pin*-атенюатора проводиться стандартними методами. Вимірювання загасання проводиться відповідно до схеми рис. 4.7а, а КСХН — згідно зі схемою рис. 4.7б. Порядок вимірювання вказано в технічному опису панорамного аналізатора Р2-69 [3].

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Підготувати до роботи панорамний аналізатор Р2-69 згідно з технічним описом. Для цього необхідно з'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі і хвилі в одному напрямку і проведіть калібрування панорамного аналізатора. В даному випадку прилад повинен показувати власну АЧХ.

3.2. Встановити в хвилеводний тракт панорамного вимірювача атенюатор, що електрично керується, і з'єднати його з джерелом постійного струму. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти послаблення, що вноситься ним (рис. 4.7а).

3.3. Виміряти амплітудно-частотну характеристику електрично керованого атенюатора в зазначеному викладачем діапазоні частот для трьох значень струму управління: 0, 10 і 20 мА. Результати вимірювань занести в таблицю 1, вказуючи в комірках відповідне ослаблення атенюатора.

3.4. Виміряти залежність ослаблення атенюатора (у дБ) від струму керування для вказаної викладачем частоти. Результати занести в таблицю 2.

Визначити $A_{\max}$ (дБ) і $A_{\min}$ (дБ) та динамічний діапазон атенюатора як різницю $A_{\max} - A_{\min}$.

Таблиця 1 — Ослаблення електрично керованого атенюатора

$F, \text{ГГц}$ $I, \text{мА}$										
0										
10										
20										

Таблиця 2 — Залежність ослаблення атенюатора від струму керування

$I, \text{мА}$										
$A, \text{дБ}$										

3.5. Спрямовані відгалужувачі підключити до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти КСВН його входу. Виміряти частотну залежність КСВН атенюатора в зазначеному викладачем частотному діапазоні для трьох значень струму керування: 0, 10 і 20 мА.

Результати вимірювань занести в таблицю 3, вказуючи в комірках відповідне КСХН атенюатора.

Таблиця 3 — КСХН електрично керованого атенюатора

$F, \text{ГГц}$										
0										
10										
20										

3.6. З'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі та прохідної хвиль одному напрямку, і перевірити калібрування Р2-69 згідно з технічним описом. При цьому прилад Р2-69 має показувати власну АЧХ. У разі виявлення відхилення лінії нульових втрат більше, ніж допустима похибка вимірювань повторити калібрування приладу, а також попередні вимірювання.

3.7. Визначити смугу робочих частот атенюатора, у якій: $A \leq 1,2 \text{ дБ}$ (при $I = 0$); $A \geq 20 \text{ дБ}$ (при $I = 20$) і $\text{КСХН} \leq 2,0$.

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) графіки частотної залежності параметрів атенюатора та залежність ослаблення від струму керування;
- 6) визначений діапазон робочих частот за вказаними в п. 3.7 критеріями;
- 7) висновки.

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип роботи електрично керованого атенюатора? Де використовуються електрично керовані атенюатори, які в них переваги?
2. Чим відрізняється структура *pin*-діода від детекторного діода?
3. Пояснити ефект поглинання електромагнітної хвилі в *pin*-діоді?
4. Які типи безкорпусних *pin*-діодів для інтегральних ліній передачі Ви знаєте, поясніть особливості їх конструкції.
5. Які переваги та недоліки у корпусних і безкорпусних *pin*-діодів?
6. Привести і пояснити еквівалентну схему корпусного діода.
7. Що таке розподілений *pin*-діод, яким чином він встановлюється в хвиловодну лінію?
8. Які основні параметри електрично керованих атенюаторів?
9. Як визначається допустима вхідна потужність електрично керованого атенюатора?
10. Чим відрізняються схема вимірювання ослаблення атенюатора від схеми вимірювання КСХН його входу?
11. Що входить до складу лабораторної установки? Пояснити методи вимірювань основних параметрів електрично керованого атенюатора.
12. Як визначити смугу робочих частот атенюатора та його динамічний діапазон?

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАМКОВОЇ АНТЕНИ

Мета та основні завдання роботи

Ознайомлення з методом вимірювання напруженості надвисокочастотного поля в ближній зоні джерела випромінювання. Дослідження характеристик рамкової антени.

Основні теоретичні відомості

1. Основні визначення

Випромінювач — це пристрій, призначений для збудження випромінювання або приймання електромагнітних хвиль.

Первинний випромінювач — елемент антени безпосередньо зв'язаний з направляючою системою або з пристроєм, що генерує, посилює або перетворює електромагнітні коливання. Розміри первинного випромінювача звичайно порівняні з довжиною хвилі.

Вторинний випромінювач — це випромінюючий елемент антени посилює або перетворює електромагнітні коливання та збуджується електромагнітним полем первинного випромінювача. Він не має безпосереднього зв'язку з направляючою системою або генераторним пристроєм. Розміри вторинного випромінювача можуть значно перевищувати довжину хвилі.

Антенний елемент — це первинний або вторинний випромінювач.

Антенна — це пристрій, що містить один або кілька антенних елементів і призначений для випромінювання електромагнітних хвиль.

Випромінювання електромагнітних хвиль антеною — процес перетворення енергії електромагнітних коливань, що генеруються радіоелектронним пристроєм, в енергію електромагнітних хвиль, що поширюються в просторі.

Приймання електромагнітних хвиль антеною — це процес перетворення енергії електромагнітних хвиль, що поширюються в просторі, в енергію спрямованих електромагнітних хвиль, або в енергію електромагнітних коливань. Антени є важливою частиною систем бездротового зв'язку радіочастотного і

мікрохвильового діапазонів комерційного та військового призначення. Для опису властивостей антени використовують поняття ближнього та далекого полів або ближньої та далекої зон випромінювання.

Ближнє поле — це поле, що створюється біля антени. Іноді його називають індукційним полем через індукційну дію, яка нагадує процес створення струмом, що протікає через провідник, магнітного поля.

Далеке поле є те, що лежить за межами ближнього поля. Енергія далекого поля випромінюється у простір, тому його часто називають *радіаційним* полем. Вона не передається безпосередньо антені, як у випадку з ближнім полем.

Далека зона антени (хвильова зона, зона Фраунгофера) — це область простору навколо антени, всі точки якої знаходяться на відстані r від центра випромінюючої системи (антени), яка задовольняє умові [5]

$$r \geq 2L^2/\lambda, \quad (1)$$

де L — характерний (найбільший) розмір антени; λ — довжина хвилі, що випромінюється або приймається антеною.

Ближня зона антени (ближнє поле, зона індукції) — область простору біля антени, усі точки якої знаходяться на відстані

$$r < 0,25L + 0,5L(L/\lambda)^{1/3}, \quad (2)$$

від центра випромінюючої системи (антени) [5].

У ближній зоні електромагнітне поле носить складний характер (у ньому присутні всі проекції векторів поля), а вектор Пойнтинга є комплексний і може не збігатися за напрямком з радіусом-вектором точки спостереження. В результаті розв'язку рівнянь Максвелла за умови нехтування розмірами антени для різних зон можна зробити такі висновки.

1. Якщо джерелом поля є електричний вібратор (наприклад, штирова антена), то в ближній зоні напруженість електричного поля E залежить від відстані як $1/r^3$, а магнітного поля H — як $1/r^2$, тому характеристичний опір

$$Z_0 = E/H \sim 1/r. \quad (3)$$

2. Якщо джерелом поля є магнітна рамка, то в ближній зоні напруженість H змінюється як $1/r^3$, а напруженість E як $1/r^2$, і характеристичний опір

$$Z_0 = E/H \sim r. \quad (4)$$

3. У далекій зоні напруженості обох полів незалежно від типу випромінювача змінюються як $1/r$, а характеристичний опір дорівнює

$$Z_0 = 120\pi \approx 377 \text{ (Ом)} \quad (5)$$

В узагальненому вигляді характер електромагнітного поля та зміни характеристичного опору залежно від відстані до джерела ілюструється рис. 5.1.

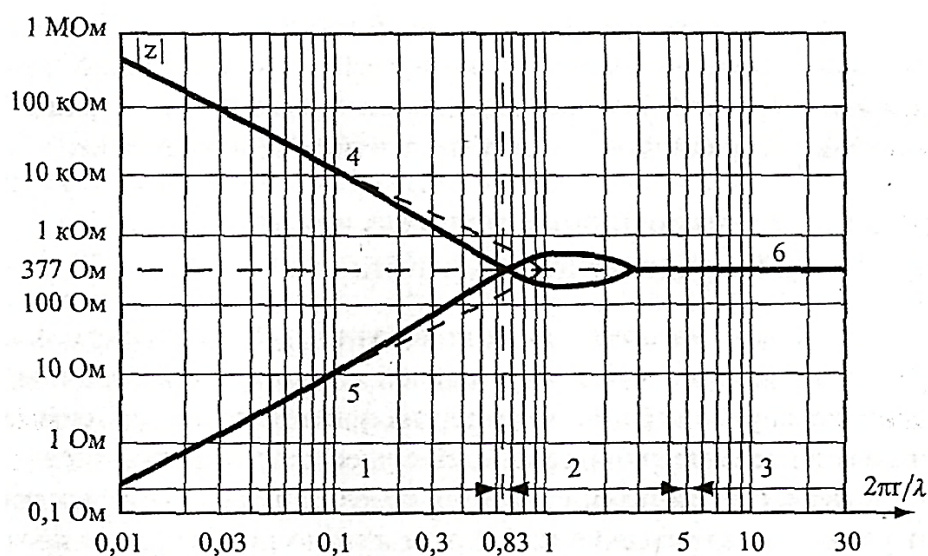


Рисунок 5.1 — Залежність характеристичного опору точкового випромінювача від відстані

Позначення на рисунку такі:

1 – ближня зона, 2 – перехідна зона, 3 – далека зона, 4 – високоомне електричне поле, 5 – низькоомне магнітне поле, 6 – електромагнітне поле. Пунктиром показана математична залежність, що апроксимує реально отриману.

Видно, що в залежності від джерела випромінювання для ближньої зони характерне перевага електричного поля (і великий характеристичний опір), або магнітного поля (і малий характеристичний опір). Зі збільшенням відстані від штирової антени хвильовий опір зменшується зі швидкістю приблизно 20 дБ/декада від великих значень (сотні кОм) і наближається до хвильового опору вакууму. Хвильовий опір рамкової антени, навпаки, збільшується від часток ома зі швидкістю 20 дБ/декада і також асимптотично наближається до хвильового опору вакууму. У перехідній зоні спостерігається коливання хвильового опору. У далекій зоні незалежно від виду джерела хвильовий опір у

вакуумі становить 377 Ом. Отже, під час оцінки рівнів радіосигналів поблизу джерел випромінювання необхідно враховувати складний характер електромагнітного поля у порівнянні з полем в далекій зоні.

2. Характеристики та параметри антен

Амплітудна характеристика спрямованості (АХС) антени $F(\theta, \varphi)$ — це функція, що відображує залежність амплітуди вектора напруженості електричного поля антени, центр випромінювання якої знаходиться на початку сферичної системи координат, від азимутального кута φ та кута місця θ точки спостереження, що знаходиться на фіксованій відстані в далекій зоні, причому $[F(\theta, \varphi)]_{max} = 1$.

Діаграма спрямованості (ДС) антени — це графічне зображення АХС антени. На рис 5.2 показана типова ДС. Найбільша частина енергії зосереджена в одному напрямку, в певному тілесному куті. Цю частину ДС називають головною (передньою) пелюсткою (*a*). Передня пелюстка — важлива характеристика, на яку, перш за все, звертають увагу, коли оцінюють антену.

Якщо антена є всеспрямованою, або *ізотропною*, то енергія буде рівномірно розподілятися у всіх напрямках.

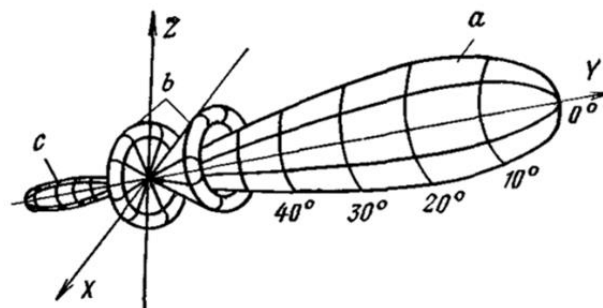


Рисунок 5.2 — Типова діаграма спрямованості антени

Найчастіше діаграму спрямованості зображують в двох площинах: азимутальної (залежність від кута φ) і вертикальної (залежність від кута θ).

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) — це позитивне число, яке показує у скільки разів інтенсивність в напрямку максимального випромінювання антени більше інтенсивності випромінювання ізотропної антени, за умови рівності повних потужностей, що випромінюються антенами.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) антени — відношення потужності випромінювання антени до всієї потужності, що підводиться до антени.

Коефіцієнт підсилення антени (КП) — це позитивне число, що показує, у скільки разів інтенсивність в напрямку максимального випромінювання антени, більше ніж інтенсивність випромінювання ізотропної антени з ККД, що дорівнює одиниці, за умови рівності потужностей, що підводяться до обох антен. КП вимірюється в дБ (dB) або в дБі (dBi). «дБі» — це відносна одиниця, нічим по суті від простого децибела не відрізняється, крім визначення еталону, відносно якого здійснюється відлік.

Варто розрізняти КСД та КП антени. КСД повністю визначається формою ДС і не враховує ККД антени та втрати на відбиття, тобто втрати енергії в елементах конструкції антени та об'єктах, розташованих у ближній зоні антени.

Опір випромінювання антени — це дійсний коефіцієнт, що зв'язує потужність випромінювання антени з квадратом ефективного значення струму в заданій точці антени. Величина опору випромінювання залежить від форми антени, її геометричних розмірів та робочої довжини хвилі.

Принцип взаємності антен сформульовано на основі теореми взаємності. Будь-яка антена, що не містить невзаємних елементів, може бути як приймальною, так і передавальною. Чим ефективніше антена випромінює енергію електромагнітного поля, тим краще вона буде її приймати.

3. Рамкова антена

Рамкова антена — це вид спрямованої антени, яка виконана у вигляді одного або декількох витків дроту. Вона має менші габарити ніж електричний диполь, але забезпечує, зокрема, набагато слабкіший прийом. Для покращення характеристик прийому сигналу використовують активні рамкові антени. Зовнішній вигляд рамкових антен показано на рис. 5.3.

Спрямовані властивості рамкової антени широко використовуються у пристроях радіонавігації для визначення місцезнаходження джерела радіохвиль та системах бездротового зв'язку для визначення рівню завад.



Рисунок 5.3 — Варіанти пасивної (а, б) і активної (в) рамкової антени

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять селективний мікровольтметр SMV 11 з комплектом вимірювальних антен FMA 11 як приймач НВЧ сигналів (рис. 5.4) та осцилограф (OWON PDS5022S або інший), який підключено до НЧ виходу SMV 11 для контролю обвідної сигналу, що приймається.



а



б

Рисунок 5.3 — Селективний мікровольтметр SMV 11 (а) і рамкові антени FMA 11 (б)

Блок-схема лабораторної установки приведена на рис. 5.4. Вона складається з двох частин: передавача і приймача з рамковою антеною. Передавач містить у своєму складі генератор Г4-143, амплітуда вихідного

сигналу якого модулюється напругою низької частоти F_0 генератора M . Промодульований радіосигнал випромінюється передавальною антеною.

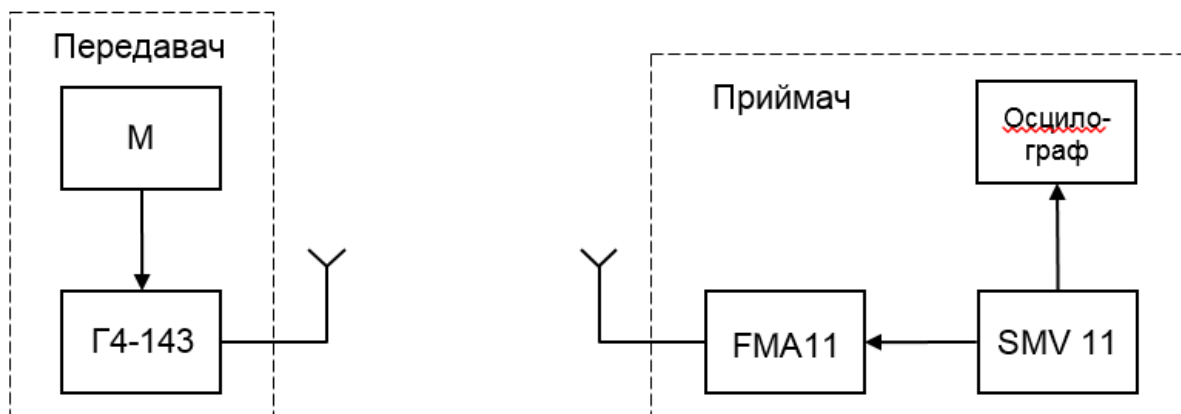


Рисунок 5.4 — Блок-схема лабораторної установки

Сигнал, що випромінюється, поступає на рамкову антену приймача (FMA 11) і далі на селективний мікровольтметр SMV11. Сигнал обвідної частоти F_0 з низькочастотного входу SMV 11 подається на вхід осцилографа.

Рівень реєстрованого сигналу залежить від орієнтації рамкової антени FMA 11. Оцінка амплітуди сигналу, що приймається, здійснюється за допомогою осцилографа, а точне визначення його напруги — за допомогою селективного мікровольтметра.

2. Метод вимірювань

Дослідження властивостей рамкової антени здійснюється за допомогою стандартних методів вимірювання параметрів електромагнітного випромінювання та електричних сигналів. Визначення характеристик антени проводиться згідно зі схемою, що представлена на рис. 5.4. Порядок вимірювання напруженості електромагнітного поля описано у технічному паспорті селективного мікровольтметра SMV11 та антени FMA 11.

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Увімкнути прилади, що входять до складу лабораторної установки, та підготувати їх до роботи згідно з інструкціями з експлуатації.

3.2. Вибрати зручний режим його роботи осцилографа.

3.3. Перемикач внутрішнього атенюатора SMV11 встановити в положення 25-30 дБ.

3.4. Перемикач режиму вимірювань встановити в положення «AVlog», при цьому відлік рівнів сигналів, що аналізуються, слід вести за нижньою шкалою стрілочного пристрою SMV 11 та цифрового індикатора атенюатора (показники сумуються).

3.5. Перемикач смуги пропускання приймача приладу встановити в положення «9 kHz».

3.6. Кнопки «▼» (калібровки), «▶» та «▶» необхідно відтиснути.

3.7. Ручку регулювання вихідного НЧ сигналу встановити в середнє положення.

3.8. За допомогою ручок настроювання частоти визначити параметри електричного поля у навколишньому середовищі:

- частоту (в МГц) та
- напругу (в дБмкВ).

При цьому треба слідкувати за зміною рівня сигналу за допомогою стрілочного пристрою приладу SMV 11 і своєчасно вводити додаткове ослаблення вхідного атенюатора за допомогою ручки «dBμV», щоб не перевантажити вхідний тракт приладу.

Максимальний рівень сигналу буде відповідати частоті знайденого сигналу. Щоб добитися точної настройки, треба користуватися ручкою « f » та слідкувати за індикатором « f ». Момент, коли починають мигати нижні риси індикатора, відповідає точному настроюванню приладу на частоту вхідного сигналу. Відлік значення частоти здійснюється за цифровим індикатором.

3.9. Визначити величину напруги (U) на вході селективного мікровольтметра, а також значення частоти (F_0) та амплітуди сигналу модуляції (U_0) за допомогою осцилографа.

3.10. Визначити рівень напруженості електричного поля за формулою

$$E_{\text{дБ}} = U + K,$$

де E визначається в дБ відносно 1 мкВ/м; напруга U визначалася за логариф-

мічною шкалою «AVlog» SMV 11 (п. 3.4) і виміряна в дБ відносно 1 мкВ; а коефіцієнт K для антени FMA 11 дорівнює $29,8 \pm 1$ (дБ) відносно 1 м^{-1} (згідно з технічним паспортом). Таким чином,

$$E = 10^{0,05 E_{\text{дБ}}} \text{ (мкВ/м)}.$$

3.11. Повертаючи антену відносно початкового положення на кут φ , повторити вимірювання за пунктами 3.8-3.10. Результати занести в таблицю 1.

3.12. Повернути антену у початкове положення.

3.13. Повторити пункти 3.8-3.10, змінюючи відстань r між антеною та передавачем (джерелом сигналу). Результати занести в таблицю 2.

Таблиця 1 — Залежність напруженості вхідного сигналу від кута повороту

φ , град	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
E , мкВ/м										

Таблиця 2 — Залежність напруженості вхідного сигналу від потужності передавача

$\lg(P/P_{\text{max}})$	0	-0,5	-1	-1,5	-2,0	-2,5	-3,0	-3,5	-4	-4,5
E , мкВ/м										

3.14. Побудувати графіки діаграми спрямованості у площині кута φ , використовуючи дані табл. 1.

3.15. Побудувати залежність напруженості електричного поля E біля антени від відносної потужності переданого сигналу P/P_{max} .

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) графіки залежності напруженості електричного поля E від φ та r .
- 6) висновки.

Контрольні запитання

1. Який пристрій називається антеною і які його складові?
2. Пояснити, що таке ближня та далека зони антени? Як вони залежать від розмірів антени та довжини хвилі?
3. Як змінюється характеристичний опір в ближній і далекій зонах?
4. Чим відрізняються амплітудна характеристика спрямованості антени від діаграми спрямованості?
5. Що називається головною пелюсткою діаграми спрямованості?
6. Яку антену вважають ізотропною? Що означає одиниця «дБі»?
7. Як пов'язані коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени та її коефіцієнт підсилення (КП)?
8. Пояснити, що означає принцип взаємності для антен.
9. Пояснити принцип дії рамкової антени. Назвіть основні її переваги і недоліки. Приведіть приклади застосування такої антени.
10. Яка антена називається активною, а яка пасивною? В яких випадках використовують активну антену?
11. Пояснити структурну схему лабораторної установки та призначення кожного з приладів, які вона містить.
12. Як визначається напруженість електричного поля на вході рамкової антени?

Лабораторна робота 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ

Мета та основні завдання роботи

Моделювання дипольної антени та дослідження її основних характеристик у середовищі програмного пакету *COMSOL Multiphysics* (версія 5.4-5.6).

Основні теоретичні відомості

З основними методами моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics приведені в посібнику [6], пояснення щодо дослідження мікрохвильових антен розглядаються в [11].

Дипольна антена є одним з найпростіших конфігурацій антен. Вона може бути реалізована за допомогою двох тонких металевих стрижнів, між якими прикладається синусоїдальна напруга. Довжина плеча підбирається рівною приблизно чверть довжини хвилі на робочій частоті. Така антена має діаграму спрямованості (ДС) у вигляді «яблука».

Модель дипольної антени (рис. 6.1) складається з двох провідних циліндричних провідників та джерела синусоїдальної напруги між ними. Область вільного простору обмежується ідеально узгодженим шаром (PML — *perfectly matched layer*).

Довжина хвилі у вільному просторі на робочій частоті дорівнює 4 м, таким чином, кожне плече має довжину 1 м вздовж осі z . Радіус циліндрів вибирається рівними 5 см. Коли радіус стає майже нульовим, характеристики такої антени можна отримати аналітично. У проміжку між циліндрами розміром 1 см знаходиться джерело напруги. Спосіб підведення сигналу безпосередньо в моделі не задається і передбачається, що змінна напруга розподілена по поверхні зазору рівномірно.

Поверхні двох плечей диполя моделюються, використовуючи граничну умову **Impedance Boundary Condition**. У цьому випадку провідність поверхні має таку ж величину, яку має провідник, товщина якого багато більше, ніж глибина скін-шару. Ця гранична умова враховує резистивні втрати поверхні.

Повітряна область навколо антени моделюється як сфера вільного простору радіусом 2 м, що приблизно відповідає межі між ближньою та далекою зонами антени. Ця сфера контактує з ідеально узгодженим шаром (PML), який діє як поглинач випромінювання. Діаграма спрямованості дальнього поля розраховується на межі між областями повітря та області PML.

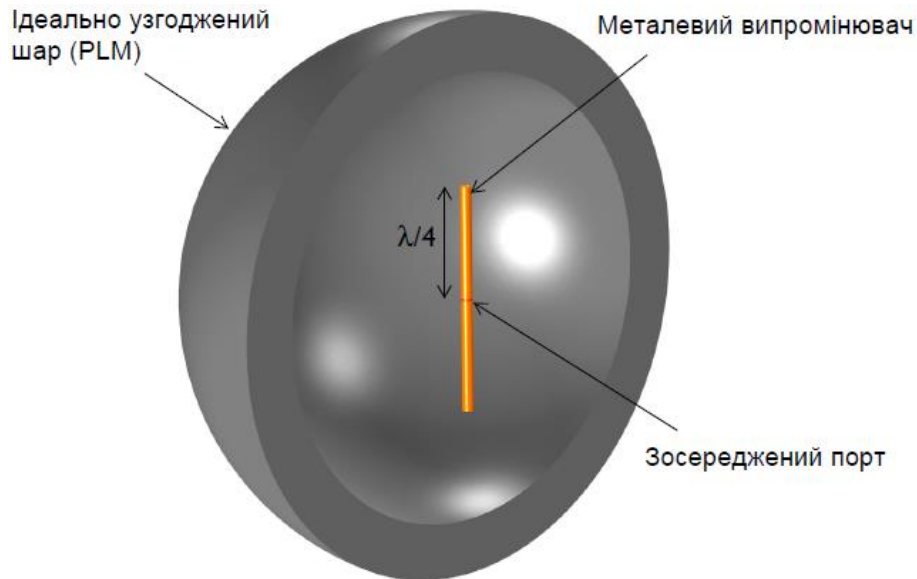


Рисунок 6.1 — Дипольна антена

Сітка розбиття призначається такою, що на довжину хвилі складає не менше, ніж п'ять довжин елементів сітки, а межа антени має ще більш дрібне розбиття.

Інструкції щодо моделювання дипольної антени та робочий файл знаходиться в бібліотеці моделей RF_Module/Antennas/dipole_antenna програми *COMSOL Multiphysics*.

Порядок виконання роботи

1. Побудова комп'ютерної моделі

Запустити програму і з меню **File**, виберіть **New**. У вікні **New**, клацніть **Model Wizard**. Потім виконайте такі кроки:

- 1) у вікні **Model Wizard** виберіть **3D**;
- 2) в дереві проекту **Select physics**, виберіть **Radio Frequency > Electromagnetic Waves, Frequency Domain (emw)**;

- 3) клацніть **Add**;
- 4) далі натисніть **Study**;
- 5) у дереві Select study, виберіть General Studies > Frequency Domain;
- 6) і натисніть **Done**.

1.1. ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ (GLOBAL DEFINITIONS > PARAMETERS 1)

У панелі **Model Builder** робочого вікна клацніть на вузлу дерева моделі **Parameters 1** і в панелі властивостей (**Settings**) для **Parameters**, знайдіть секцію **Parameters**. В таблиці треба ввести такі установки, як показано на рис. 6.2.

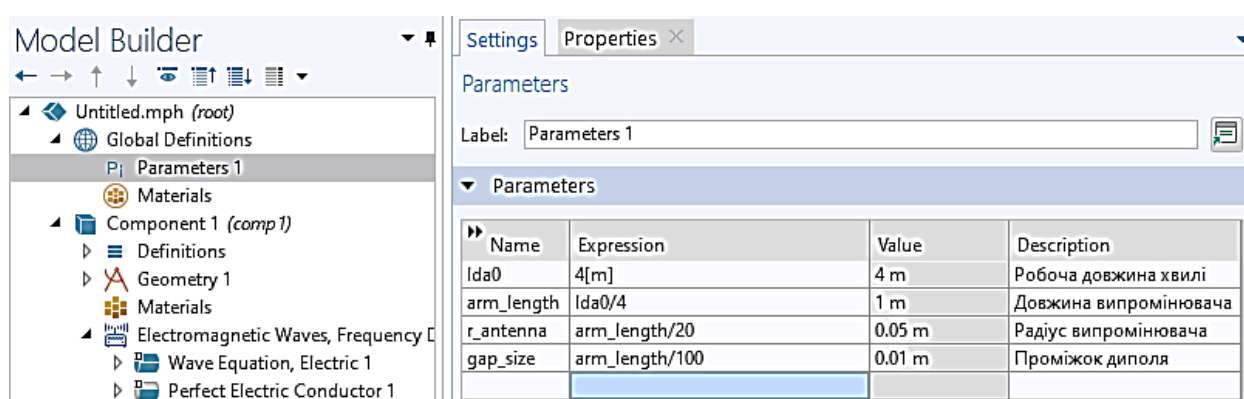


Рисунок 6.2 — Задання параметрів моделі

Далі у гілці **Study 1** виділіть вузол **Step 1: Frequency Domain**.

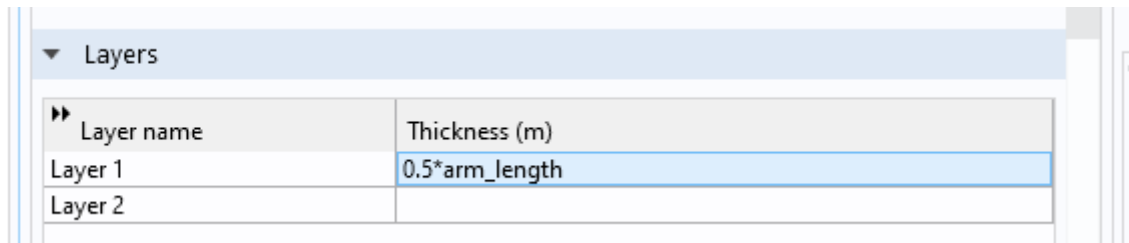
В ПІВ (**Settings**) для даного вузла знайдіть секцію **Study Settings** і в полі **Frequencies** наберіть **c_const/lda0**.

1.2. ПОБУДОВА ОБЛАСТІ МОДЕЛЮВАННЯ (GEOMETRY)

Створіть сферу **Sphere 1** (sph1) у вигляді шару, який представляє PML. Для цього виконайте такі кроки:

- 1) в меню **Geometry**, клацніть **Sphere**;
- 2) в панелі властивостей (**Settings**) для вузла дерева моделі **Sphere**, знайдіть секцію **Size**;
- 3) в полі Radius, введіть $2.5 * \text{arm_length}$;
- 4) клацніть розширення секції **Layers** і заповніть таблицю як на рис. 6.3;
- 5) натисніть кнопку  **Build Selected** в панелі властивостей;

- 6) виберіть дротяний вигляд (Wireframe), щоб краще бачити внутрішню структуру, для чого натисніть кнопку **Wireframe Rendering** в меню вікна **Graphics**.



Layer name	Thickness (m)
Layer 1	0.5*arm_length
Layer 2	

Рисунок 6.3 — Задання параметрів сферичного шару

Потім додайте циліндр із шарами. Верхня та нижня частини — це антенні плечі. Невеликий проміжок між плечима антени призначений для джерела напруги. Для цього виконайте такі кроки:

- 1) в меню **Geometry**, натисніть **Cylinder**;
- 2) в ПВ для вузла **Cylinder**, знайдіть розділ **Size and Shape**;
- 3) в полі **Radius** введіть **r_antenna**;
- 4) в полі **Height** надрукуйте $2*arm_length+gap_size$;
- 5) потім знайдіть секцію **Position** і в текстовому полі **z** надрукуйте:
 $-(arm_length+gap_size/2)$;
- 6) розкрийте список в секції **Layers** і заповніть таблицю як показано на рис. 6.4;
- 7) зніміть позначку у прапорці **Layers on side**;
- 8) встановіть позначки у прапорцях **Layers on bottom** та **Layers on top**;
- 9) натисніть кнопку **Build Selected**.

Область всередині випромінювачів антени — це простір, в якому моделювання не виконується. Тому її треба виключити. Для цього виконайте операцію булевого віднімання (рис. 6.5):

- 1) на вкладці **Geometry** стрічки інструментальних панелей в списку **Booleans and Partitions** виберіть **Difference**;
- 2) виберіть тільки об'єкт **sph1**;

- 3) в ПВ для вузла **Difference** знайдіть секцію **Difference** , де у підрозділі **Objects to subtract** Виберіть опцію **Active**. Використовуючи перемикач , виділіть усі об'єкти та введіть їх у відповідне вікно, а потім зайві видаліть, залишивши тільки **cyl1** (рис. 6.6);
- 4) натисніть кнопку  **Build All Objects** .

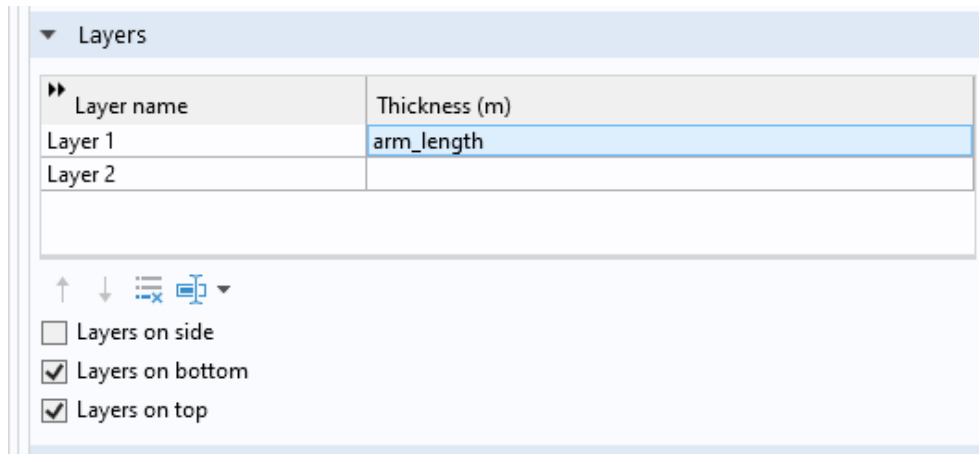


Рисунок 6.4 — Задання параметрів випромінювача

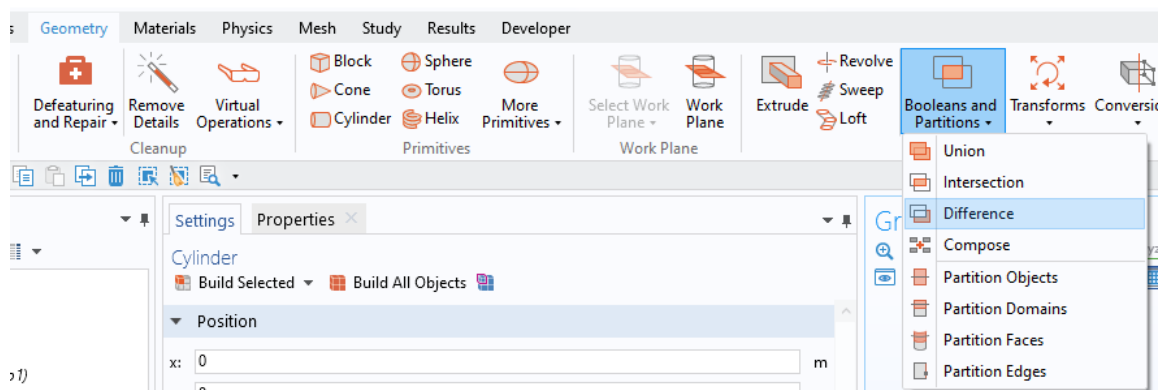


Рисунок 6.5 — Операція булевого віднімання

1.3. ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПОНЕНТА МОДЕЛІ (COMPONENT 1 > DEFINITIONS)

Для подальшого моделювання необхідно створити сукупність вибірок (виділень), яка спрощує процес налаштування фізичного інтерфейсу. Спочатку слід зробити вибір для поверхні випромінювача антени, для чого:

- 1) в меню **Definitions**, клацніть **Explicit**;
- 2) в ПВ (**Settings**) вузла дерева моделі **Explicit**, знайдіть секцію **Input Entities**;

- 3) у списку **Geometric entity level**, виберіть **Boundary**;
- 4) клацніть Paste Selection (рис. 1-7) і в діалоговому вікні Paste Selection введіть полі Selection: 13-15, 18-20, 28, 30, 39, 41;
- 5) натисніть **OK**;
- 6) клацніть правою кнопкою миші по вузлу **Component 1 (comp1)>Definitions> Explicit 1** та виберіть **Rename**;
- 7) в діалоговому вікні **Rename Explicit** надрукуйте в полі **New label** **Antenna**;
- 8) натисніть **OK**.

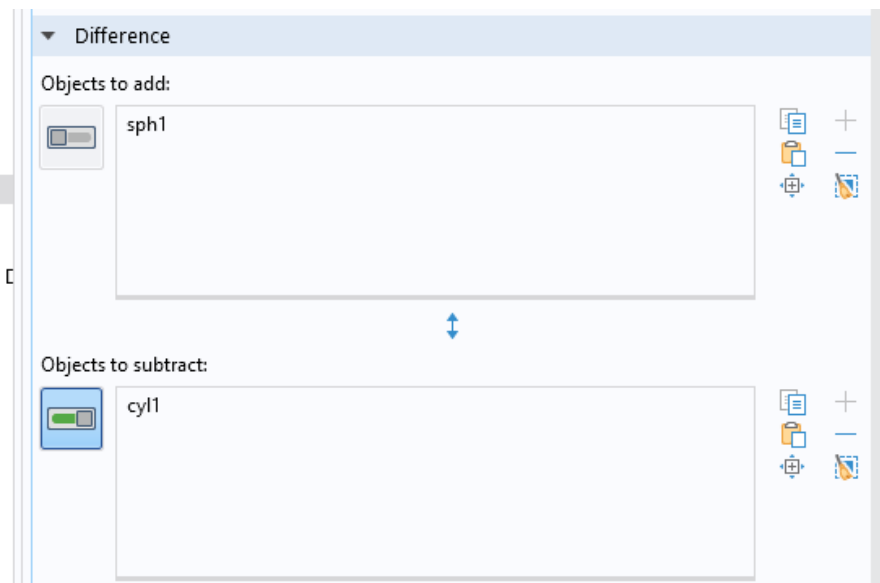


Рисунок 6.6 — Вибір об'єктів для операції булевого віднімання

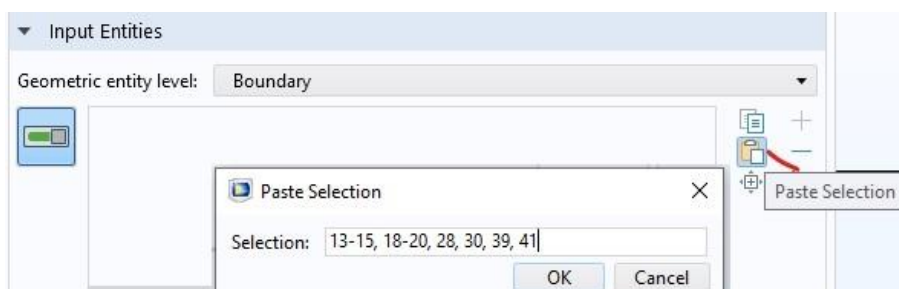


Рисунок 6.7 — Вибір границь для вузла дерева моделі **Explicit**

Далі необхідно додати ідеально поглинальний шар на зовнішній поверхні сфери **sph1**. Для цього потрібно виконати такі дії:

- 1) в меню **Definitions**, натисніть кнопку  (**Perfectly Matched Layer**); (рис. 6.8)
- 2) виберіть області (**Domains**): 1–4 і 6–9;
- 3) в ПВ (**Settings**) для вузла **Perfectly Matched Layer**, знайдіть секцію **Geometry**;
- 4) зі списку **Type**, виберіть **Spherical**.

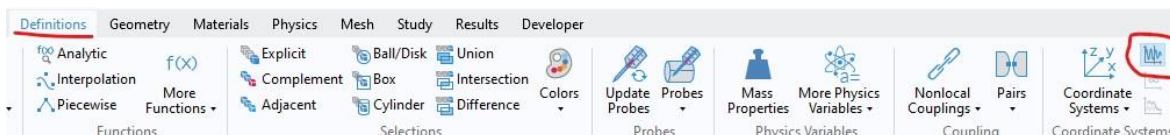


Рисунок 6.8 — Задання ідеально поглинального шару

Для зручності користування моделлю доцільно приховати деякі області та межі, що допоможе побачити внутрішні частини під час задання фізичних властивостей та сітки розбиття:

- 1) клацніть правою кнопкою миші по вузлу **View 1** та виберіть в контекстному меню **Hide for Physics** і ПВ для вузла **Hide for Physics 1** дерева знайдіть секцію **Geometric Entity Selection**; зі списку **Geometric entity level** виберіть **Domains** і залиште видимими тільки області 1 і 2;
- 2) знов клацніть правою кнопкою миші по вузлу та виберіть в контекстному меню **Hide for Physics** і ПВ для вузла **Hide for Physics 2** дерева зі списку **Geometric entity level** виберіть **Boundary** та виділіть тільки поверхні 9 і 10.

1.4. НАЛАШТУВАННЯ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ В ЧАСТОТНОЇ ОБЛАСТІ

Додамо граничні умови **Impedance Boundary Condition**, які перепишуть граничну умову за замовчуванням PEC (Perfect Electrically Conducting — ідеально провідний матеріал) на поверхні випромінювання антени.

Імпедансні граничні умови (Impedance Boundary Condition 1)

- 1) Виберіть в контекстному меню вузла Component 1 (comp1) > Electromagnetic Waves, Frequency Domain (emw) пункт Impedance Boundary Condition.

- 2) В панелі властивостей створеного таким чином вузла **Impedance Boundary Condition** знайдіть секцію **Boundary Selection 1** та в списку **Selection** виберіть **Antenna**.

Зосереджений порт (Lumped Port 1)

- 1) На стрічці інструментальних панелей перейдіть на вкладку **Physics** і в списку **Boundaries** виберіть **Lumped Port** (рис. 6.9, ліворуч).

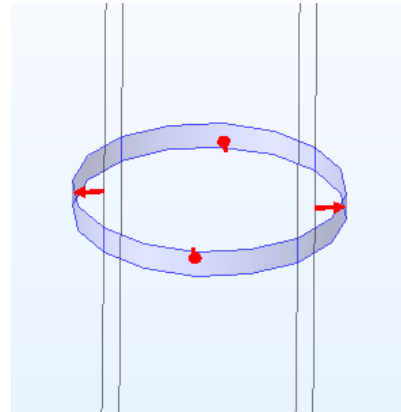
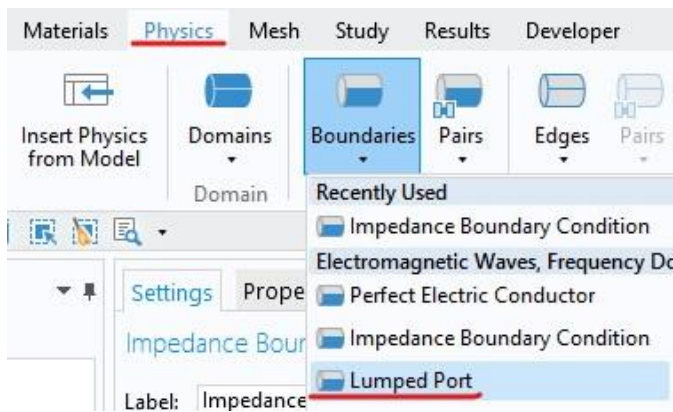


Рисунок 6.9 — Задання зосередженого порту

- 2) Збільшуючи масштаб у графічному вікні (інструмент ) , забезпечте чітке зображення зазору між плечима антени (рис. 6.9, вправоруч).
- 3) Виберіть тільки границі **16** , **17** , **29** і **40**.
- 4) В ПВ вузла Lumped Port знайдіть секцію Lumped Port Properties і в списку Type of lumped port виберіть User defined.
- 5) В текстовому полі h_{port} наберіть **gap_size**.
- 6) В текстовому полі w_{port} наберіть вираз **2*pi*r_antenna**.
- 7) Задайте вектор $\mathbf{a}_h$:

0	x
0	y
1	z

Для порту, що задається першим, хвильове збудження увімкнено (**on**) за замовчуванням.

- 8) Натисніть кнопку  (**Zoom Extents**) на панелі інструментів вікна **Graphics**, щоб повернутись до звичайного вигляду моделі.

Далека зона антени (Far-Field Domain 1)

На стрічці інструментальних панелей перейдіть на вкладку **Physics** і в списку **Domains** (див. рис. 6.9, ліворуч) виберіть **Far-Field Domain**.

1.5. ЗАДАННЯ МАТЕРІАЛІВ (MATERIALS)

Спочатку повітря призначається як матеріал для всіх областей моделі, а потім для випромінювача антени він замінюється на мідь.

Додавання матеріалів (Add Material)

- 1) На вкладці **Home** стрічки інструментальних панелей клацніть на інструменті  **Add Material**, (рис. 6.10) щоб відкрити відповідне діалогове вікно для додавання матеріалів.

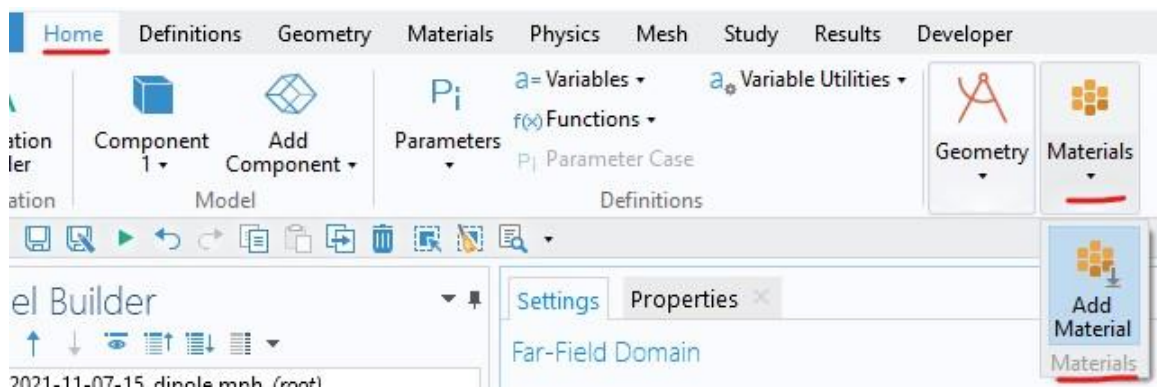


Рисунок 6.10 — Додавання матеріалів

- 2) У зазначеному вікні, яке розташовано праворуч від графічного вікна, виберіть у дереві бібліотеки матеріалів вузол **Built-in > Air**, після чого клацніть по кнопці  **Add to Component**, яка розміщена зверху.
- 3) Виберіть вузол дерева матеріалів **Built-in > Copper** і дайте мідь як матеріал.
- 4) Клацніть по кнопці  **Add Material**, (див. рис. 6.10), щоб закрити діалогове вікно бібліотеки матеріалів.

Щоб призначити мідь як матеріал антени, потрібно вибрати вузол дерева моделі **Copper (mat2)** і в його ПВ у списку **Geometric entity level** вибрати **Boundary**, а в списку **Selection** — **Antenna**.

1.6. ПОБУДОВА СІТКИ (MESH 1)

В дереві моделі знайдіть вузол **Component 1 (comp1) > Mesh 1**, клацніть по ньому правою кнопкою миші та виберіть з контекстного меню пункт **Build All**. В результаті буде проведено розбиття простору моделі на скінченні елементи (рис. 6.11).

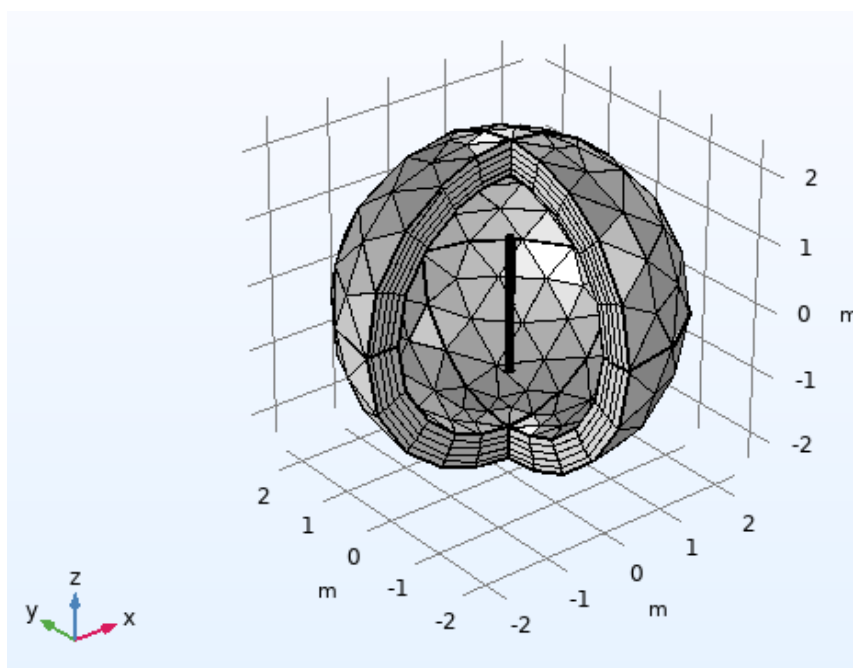


Рисунок 6.11 — Розбиття простору моделі на скінченні елементи

2. Методика обробки результатів моделювання

На вкладці **Home** стрічки інструментальних панелей натисніть кнопку

 **Compute**

За замовчанням в результатах моделювання виводяться розподіл нормальної складової електричного поля, діаграма спрямованості в полярній системі координат та 3D діаграма спрямованості, а також зображення поверхонь рівної потужності в далекій зоні.

Multislice

- 1) В дереві моделі виділіть вузол **Results > Electric Field (emw) > Multislice 1**. В його ПВ знайдіть секцію **Multiplane Data**. В текстовому полі **Planes** пункту **X-planes** введіть **0**.
- 2) Таке ж значення (**0**) введіть і в текстовому полі **Planes** пункту **Z-planes**.
- 3) Розкрийте секцію **Range**. Поставте позначку **Manual color range**, а в текстовому полі **Maximum** введіть **20**.
- 4) Виберіть кольорову схему JupiterAuroraBorealis в списку Color table секції Coloring and Style.
- 5) Натисніть клавішу  **Plot** в панелі властивостей даного вузла.

Напрямок електричного поля (Arrow Volume 1)

- 1) В контекстному меню вузла **Results > Electric Field (emw)** виберіть пункт **Arrow Volume**.
- 2) В панелі властивостей створеного вузла **Arrow Volume 1** знайдіть секцію **Arrow Positioning** і в пункті **Xgrid points** в текстовому полі **Points** наберіть **21**.
- 3) В аналогічних текстових полях пунктів **Ygridpoints** і **Zgridpoints** наберіть відповідно **1** і **21**.
- 4) В секції Coloring and Style в списку Arrow length виберіть Logarithmic. А в списку Color — White.
- 5) Натисніть клавішу  **Plot** в панелі властивостей даного вузла.

Зріз напруженості поля (Slice 1)

- 1) В дереві моделі виділіть вузол **Results > Electric Field (emw)** і в його контекстному меню виберіть пункт **Slice**.
- 2) В панелі властивостей створеного вузла **Slice 1** знайдіть секцію **Expression** і в текстовому полі **Expression** надрукуйте вираз **20*log10 (emw.normH)**.
- 3) В секції **Plane Data** у списку **Plane** виберіть **XY-planes**, а в текстовому полі **Planes** введіть **1**.
- 4) В секції Coloring and Style у списку Color table виберіть ThermalLight і поставте позначку Reverse color table.

5) Натисніть клавішу  **Plot** в панелі властивостей даного вузла.

Transparency 1

В контекстному меню вузла Results > Electric Field (emw) > **Slice 1** виберіть **Transparency** і в ПІВ створеного вузла **Transparency** в секції **Transparency** задайте величину **0.25**.

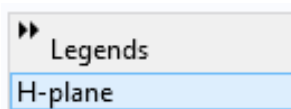
Поверхні однакової напруженості електричного поля

- 1) Розкрийте гілку Results > Electric Field (emw) і в ПІВ вузла **3D Plot Group** знайдіть секцію **Selection**.
- 2) В списку **Geometric entity level** виберіть **Domain**. У вікні **Paste Selection** введіть в текстове полі **5** (див. п. 3 і рис. 6.7) і натисніть **OK**.
- 3) Натисніть кнопку  **Plot** в панелі властивостей даного вузла. В результаті у графічному вікні з'являться поверхні однакової напруженості електричного поля.

Розподіл поля в далекій зоні антени

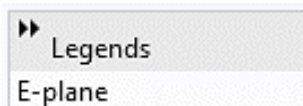
Спочатку потрібно визначити масштаб осей.

- 1) Розкрийте гілку Results > 2D Far Field (emw). В ПІВ Polar Plot Group вузла 2D Far Field (emw) знайдіть секцію **Axis** і поставте позначку **Manual axis limits**.
- 2) В текстовому полі **r minimum** наберіть **-20**, а в текстовому полі **r maximum** введіть **0**.
- 3) В панелі властивостей вузла **2D Far Field (emw) > Radiation Pattern 1** в секції **Expression** в текстовому полі **Expression** наберіть вираз **emw.normdBefar**.
- 4) Розкрийте секцію **Legends** і в списку **Legends** виберіть **Manual**.
- 5) В таблиці введіть такі налаштування:



- 6) Натисніть кнопку  **Plot** в панелі властивостей даного вузла. В результаті буде побудована діаграма спрямованості в полярній системі координат для *H*-площини.

- 7) Виберіть у контекстному меню вузла Results > 2D Far Field (emw) > Radiation Pattern 1 пункт Duplicate.
- 8) В ПВ для вузла **Radiation Pattern** знайдіть секцію **Evaluation** і в пункті **Normal vector** в текстовому полі **y** наберіть **1**, а в полі **z** — **0**.
- 9) В пункті **Angles** цієї ж секції у списку **Compute beam width** виберіть **On**, а в текстовому полі **Level down** надрукуйте **3**.
- 10) В секції **Legends** в списку **Legends** виберіть **Manual**.
- 11) В таблиці зробіть такі налаштування:



- 12) Натисніть кнопку  Plot в панелі властивостей даного вузла. В результаті буде побудована діаграма спрямованості в полярній системі координат для Е-площини.

3D Far Field (emw)

Якщо вибрати вузол **3D Far Field (emw) > Radiation Pattern 1**, то в графічному вікні буде представлена тривимірна діаграма спрямованості (рис. 6.12).

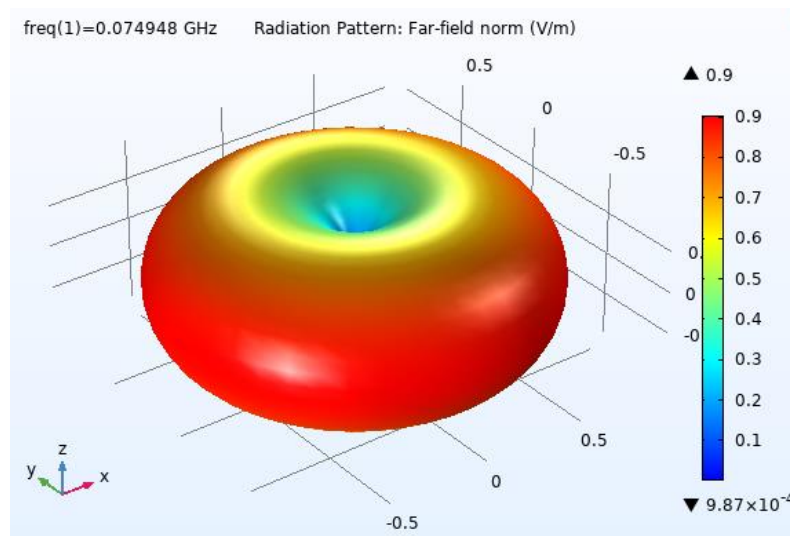


Рисунок 6.12 — Тривимірна діаграма спрямованості антени

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис комп'ютерної моделі:
 - описати основні етапи побудови моделі (до запуску обчислень);
- 4) результати моделювання:
 - привести розподілу електричного поля в просторі навколо диполя і користуючись панеллю властивостей вузла **Results > Electric Field (emw)** з'ясувати в яких одиницях приведена кольорова шкала (*Legend*)
 - привести розподіл вектора електричного поля **E** (у вигляді стрілок *Arrow Volume*);
 - представити діаграму спрямованості в *H*-площині, оцініть ККД антени.
 - представити діаграму спрямованості в *E* –площині, вказуючи ширину головної пелюстки за рівнем 3 дБ;
- 5) розраховане в результаті моделювання значення КСХН антени;
- 6) висновки.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії дипольної антени.
2. Чому дорівнює довжина дипольної антени?
3. Що таке півхвильовий та чвертьхвильовий вібратор?
4. Яким чином в моделі враховувалась провідність металевих частин?
5. Що таке *PML*-шар?
6. Поясніть, що означає «імпедансна» умова?
7. Яким чином в моделі задавалося поле збудження? Який у нього напрямок і амплітуда?
8. Наскільки за результатами моделювання розрізняються коефіцієнт спрямованості антени та її коефіцієнт підсилення?
9. Чи можна вважати диполь в *H*-площині ізотропним випромінювачем? Чому його використовують в мережах *Wi-Fi*?

Список рекомендованої літератури

Основна

1. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1: Підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усин, В. С. Вунтесмері, Д. В. Грецьких . – Харків: ХНУРЕ; Колігіум, 2010. – 416 с.
2. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2: Підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усин, В. С. Вунтесмері, Д. В. Грецьких. – Харків: ХНУРЕ; Колігіум, 2010. – 435 с.
3. Измерители КСВН и ослабленный панорамные Р2-68, Р2-69. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГВ2.744.020. ТО. Вильнюс: ВЗРИП, 1991. – 194 с.
4. Ільницький Л.Я. Пристрої надвисоких частот та антени : Навч. посібн./ Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Щербина О.А. – К: НАУ, 2013. – 188 с.
5. Цалієв Т.А. Антени та пристрої НВЧ. Частина 1. Термінологія та методи теорії антен : Посібник /Цалієв Т.А. – Одеса: ОНАЗ, 2005 – 56 с.
6. Доля П. Г. Основи моделювання в COMSOL Multiphysics / Доля П. Г.; ХНУ ім. Каразіна. – Електрон. текст. дані (14,58 МБ). – Х.: ХНУ ім. Каразіна, 2019 р. – 529 с. – Режим доступу: http://geometry.karazin.ua/resources/documents/20191219182458_3cc8431d.pdf. – Назва з екрана.

Додаткова

7. Дмитренко В. П. Пристрої НВЧ. Основи теорії / Дмитренко В. П., Бугрова Т. І., Логачова Л. М. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 280 с.
8. Pozar, D.M. Microwave Engineering / David M. Pozar – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.
9. Laverghetta T. S. Microwaves and wireless simplified / Thomas S. Laverghetta. – 2nd ed. – Boston-London: Artech House, Inc., 2005. – 300 p.
10. Millimeter Wave Wireless Communications / T. S. Rappaport, R. W. Heath, R. C. Daniels, J. N. Murdock – Prentice Hall, 2014. – 657 p.
11. Modeling Antennas with COMSOL Multiphysics and the RF Module. COMSOL, Inc.: Website. URL: <https://www.comsol.com/video/modeling-antennas-with-comsol-multiphysics-and-the-rf-module>