

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
з дисципліни “Технічна електродинаміка”

Укладачі: Манько О.О., Бондаренко Т.Г.

Київ – 2015

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ФАРАДЕЯ

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи
з дисципліни “Технічна електродинаміка”

1. Мета роботи.

Ознайомлення з процесами в немагнітних феритах, поміщених у надвисокочастотне електромагнітне поле.

Експериментально дослідити явище Фарадея в круговому хвилеводі, який містить феритовий стержень.

2. Ключові положення.

Явище Фарадея полягає в тому, що площина поляризації, тобто площина, що проходить через вектор E і вектор Умова – Пойнтінга, при поширенні в анізотропному середовищі змінює своє положення, точніше обертається навколо вектора Умова – Пойнтінга.

Відомо, що плоскополяризовану хвилю можна представити як суму право- і лівополяризованих хвиль. Магнітна проникність для право- і лівополяризованих хвиль різна, тому і хвильові числа для правополяризованої хвилі K_+ і лівополяризованої K_- будуть різні. Різним буде і зміна фази хвиль на одній і тій же ділянці довжиною 1:

$$\varphi_+ = K_+ 1 - \omega \sqrt{\varepsilon \mu + 1}; \quad \varphi_- = K_- 1 - \omega \sqrt{\varepsilon \mu - 1}.$$

Кут повороту площини поляризації при проходженні ділянки з феритом довжиною 1 дорівнює:

$$\varphi = 0.5(K_+ - K_-) 1.$$

Магнітні проникності μ_+ і μ_- залежать від величини підмагнічуваючого поля H_0 , тому і кут повороту площини поляризації залежить від H_0 .

Важливо відзначити, що для спостерігача, який дивиться в напрямлені руху хвилі, обертання площини поляризації відбувається по годинниковій стрілці, якщо хвиля розповсюджується в напрямку силових ліній підмагнічуваючого поля, і проти годинникової стрілки, якщо хвиля розповсюджується проти силових ліній підмагнічуваючого поля.

На практиці ферити розміщують у хвилеводі. Зокрема, для використання явища Фарадея феритовий стержень розташовують вздовж осі хвилеводу з хвилею H_{11} . Повздовжнє намагнічування створюється соленоїдом, вісь якого збігається з віссю хвилеводу. Явище Фарадея при цьому полягає в тому, що вся картина поля в поперечному перерізі після проходження фериту повертається на деякий кут φ .

3. Ключові питання.

3.1. Що називається явищем Фарадея?

3.2. Поясніть структурну схему лабораторної установки.

3.3. Намалюйте розподіл силових ліній полів для хвилі H_{11} в круговому хвилеводі.

3.4. Намалюйте розподіл силових ліній полів для хвилі H_{10} в прямокутному хвилеводі.

3.5. Поясніть залежність сигналу на виході детекторної секції від кута повертання площини поляризації круглому хвилеводі з феритом.

3.6. Де на практиці застосовується явище Фарадея?

4. Домашнє завдання.

4.1. Ознайомитися з процесами, що відбуваються в немагнітних феритах, а також з особливостями явища Фарадея і принципом його застосування в різних пристроях СВЧ.

4.2. Вивчити структурну схему лабораторної установки. Розібратися в призначенні окремих елементів лабораторної установки.

4.3. Намалювати структуру силових ліній і струмів провідності в стінках круглого хвилеводу при збудженні в ньому хвилі типу H_{11} .

4.4. Замалювати криві залежності магнітної проникності немагнітного фериту для хвилі правої і лівої кругової поляризації.

5. Лабораторне завдання.

5.1. Налаштувати генератор СВЧ. Розв'язуючим атенюатором 2 установити ослаблення порядку 10...15 дБ. Підібрати відповідну чутливість вимірювального пристрою 4. Для цього, обертаючи секцію хвильового переходу 1, зв'язану з детекторною секцією 3, знайти таке положення при якому потужність високочастотного сигналу, відзначена індикатором вимірювального підсилювача, була б максимальною. Підібрати чутливість вимірювального підсилювача таким чином, щоб відхилення індикатора відповідало приблизно повній шкалі.

5.2. Зняти криву залежності значень сигналу на виході детекторної секції 3 від кута повороту хвильового переходу 1.

Секція хвильового переходу від круглого поперечного переріза до прямокутного являє собою трансформатор типів коливання - хвиля H_{11} в круглому хвилеводі трансформується в хвилю H_{10} в прямокутному хвилеводі. Величина коефіцієнта передачі цієї секції залежить від взаємної орієнтації поляризації хвилі H_{11} , що надходить на вхід з боку з круглим поперечним перерізом, і положення виходу секції з прямокутним поперечним перерізом.

Коефіцієнт передачі максимальний, якщо площина поляризації хвилі H_{11} перпендикулярна широкій стінці прямокутного вихідного перетину хвилеводу і мінімальний, якщо площина поляризації хвилі H_{11} паралельна широкій стінці прямокутного хвилеводу. Таким чином, перехідна секція від круглого до

прямокутного хвилеводу виконує роль аналізатора положення площини поляризації хвилі H_{11} в круглому хвилеводі з феритом.

Криві залежності вихідної потужності P від кута повороту хвилевидного переходу із детекторної секції зняти при п'яти різних значеннях струму підмагнічування I_0 . Значення I_0 задавати в інтервалі 0...60мА.

5.3. Побудувати криві $P(\varphi)$ по результатам вимірів пункту 5.2.

5.4. Побудувати залежність координати максимуму кривої від величини струму підмагнічування, тобто побудувати залежність $\varphi_{\max} = f(I_0)$.

6. Опис лабораторного макета.

Структурна схема лабораторної установки для експериментального дослідження явища Фарадея представлена на Рис.1.

Установка складається з генератора СВЧ, розв'язуючий атенюатор секція кругового хвилеводу 2, який має феритовий стержень, двух хвиле провідних переходів 1, які забезпечують перехід від прямокутного перерізу до круглого, детекторної секції 3 і вимірювального підсилювача 4. Секція круглого хвилеводу 2 розміщена у котушку намагнічування 5, яка підключена до джерела постійного струму 6. Джерело постійного струму дозволяє вимірювати і регулювати струм намагнічування фериту.

Детекторна секція 3, твердо з'єднана з хвильовим переходом 1, може з допомогою спеціального приладдя обертатися відносно секції круглого хвилеводу, містить ферит, навколо спільної вісі системи.

7.Зміст протоколу.

7.1. Пункти 4.1 – 4.2 домашнього завдання.

7.2. Результати експериментального дослідження явища Фарадея згідно пунктів 5.2 –5.4.

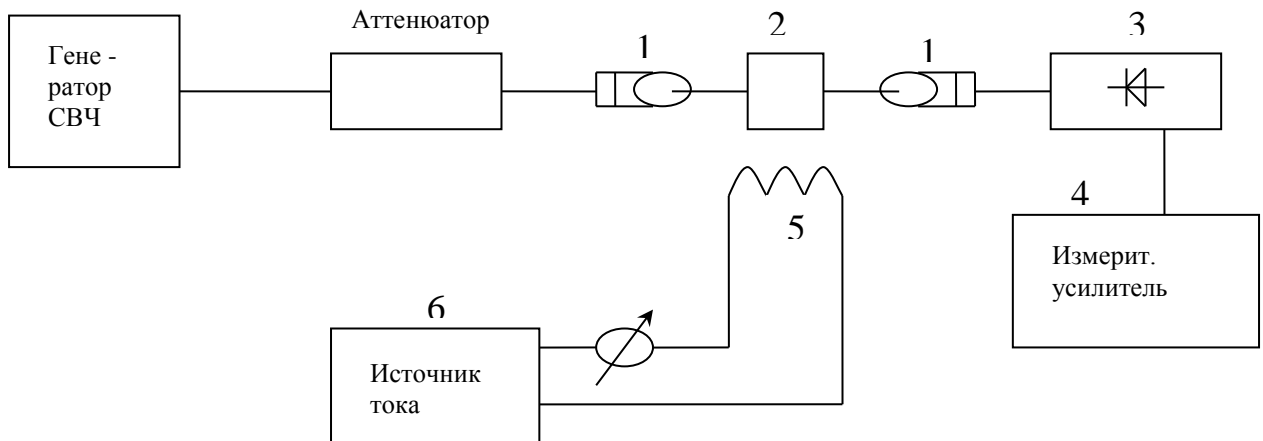
7.3. Висновки по роботі.

8. Література.

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ, т.1. – М.; Высшая школа, 1970, с. 254 – 262.

2 Карбовский С.Б., Шахгеданов В.Н. Ферритовые циркуляторы и вентили. – М., Сов. радио, 1970.

Структурна схема установки.



ВИВЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕПРОХІДНОГО ОБ'ЄМНОГО РЕЗОНАТОРА

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи
з дисципліни “Технічна електродинаміка”

1.МЕТА РОБОТИ

- 1.1.Вивчення основних параметрів об'ємних резонаторів НВЧ .
- 1.2.Вимір резонансних частот, коефіцієнта зв'язку з лінією передачі і добротності непрохідного резонатора.

2.КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ І ПАРАМЕТРИ РЕЗОНАТОРІВ

Резонатор - це пристрій, який може довго підтримувати періодичні коливання, викликані зовнішнім імпульсом. Резонатор володіє частотною вибірковістю по відношенню до зовнішнього гармонічного впливу : амплітуда його коливань максимальна на резонансній частоті і зменшується по мірі віддалення від неї. В діапазоні НВЧ застосовують резонатори, в яких електромагнітні коливання виникають всередині обмеженого об'єму. Такі резонатори називають об'ємними. Резонатори, які являють собою замкнутий об'єм з металевими стінками, називаються закритими. В міліметровому і оптичному діапазонах довжин хвиль використовуються відкриті резонатори, що являють собою відрізки полоскових чи діелектричних хвилеводів, тіла різної форми із діелектриків або фериту з високим значенням діелектричної проникності ϵ . Серед закритих резонаторів виділяють квазістаціонарні і резонатори на відрізках короткозамкнутих хвилеводів. Квазістаціонарні резонатори мають чітко виражені області існування електричного і магнітного полів. Вони використовуються в електронних приладах НВЧ (тороїдальний резонатор клістрона, резонатори магнетрона). Розглянемо резонатори на відрізках порожнистих металічних хвилеводів довжиною l , замкнутих на кінцях відбиваючими поверхнями. Умовами резонансу в таких резонаторах є відношення

$$l = p\lambda_g / 2$$

Де $p = 1, 2, 3, \dots$, λ_g - довжина хвилі у відповідному хвилеводі

Якщо в основному хвилеводі розповсюджуються хвилі E_m , то можливий випадок $P = 0$. Резонансна частота тоді не залежить від довжини резонатора і дорівнює критичній частоті хвилі E_m . Резонансна частота коливань в резонаторі на короткозамкнутому відрізку хвилеводу

$$f_0 = \frac{V_0}{1} \frac{1}{\sqrt{1/\lambda_{кр}^2 - (p/2l)^2}} \quad ($$

2.1)

Де V_0 - швидкість світла в середовищі, що заповнює резонатор, $\lambda_{кр}$ - критична довжина хвилі, що розповсюджується у відповідному хвилеводі.

Кожній резонансній частоті відповідає визначена структура електромагнітного поля - вид або тип коливань резонатора. Так само, як і у висхід-

ному хвилеводі, коливання підрозділяються на типи $E_{mnp}, H_{mnp}, TEM_{mnp}$.

Три індекси позначають число варіацій поля в поперечному і поздовжньому

перерізі резонатора.

Так для резонатора, утвореного відрізком прямокутного металічного хвилеводу з перерізом $a \times b$, підставляючи вираз для $\lambda_{кр}$ типів хвиль

E_{mn} і H_{mn}

в (2.1) отримаємо резонансну частоту

$$f^{E_{mnp}, H_{mnp}} = \frac{V_0}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}$$

(2.2)

де m, n, p – число максимумів в розподіленні поля по трьом сторонам резонатора

Для коливань E_{mnp} $m, n = 1, 2, 3, \dots, p = 0, 1, 2, \dots$

Для коливань H_{mnp} $m, n, p = 1, 2, 3, \dots$, один з індексів m або n може обертатись у нуль.

Тип коливань, що має найменшу резонансну частоту, називається основним або нижчим типом коливань. У основного типу коливань в прямокутному резонаторі нульовий індекс відповідає найменшій стороні резонатора, тобто вектор E паралельний цій стороні. Наприклад, в резонаторі з $b < a$ та $b < l$ основним є коливання типу H_{101} .

При неоднакових розмірах ребер резонатора коливання типів $E_{110}, H_{101}, H_{011}$ мають різні резонансні частоти. При рівності двох або трьох сторін спостерігається дво- або трикратне виродження.

Кожен тип коливань характеризується добротністю Q – мірою розсіювання високочастотної енергії.

$$Q = 2\pi \frac{W_{cp}}{P_n \cdot T}$$

де W_{cp} - середня електромагнітна енергія, запасена в резонаторі,
 T – період коливань, P_n - середня потужність втрат,
 $\Delta W = P_n \cdot T$ - зміна енергії, запасеної в резонаторі, за період T .

Розрізняють власну Q_0 , зовнішню $Q_{вн}$ і навантажену Q_n добротності резонатора.

Власна добротність – добротність ізольованого резонатора. Вона визначається власними втратами в резонаторі

$$Q_0 = 2\pi \frac{W_{cp}}{\Delta W_{мет} + \Delta W_{\delta} + \Delta W_{изл}}$$

де $\Delta W_{мет}$ - енергія втрат за період в металевій оболонці резонатора,
 ΔW_{δ} - енергія втрат в середовищі, яке заповнює резонатор,
 $\Delta W_{изл}$ - енергія, яка втрачається на випромінювання.

Зовнішня добротність - це добротність без врахування власних втрат резонатора. Вона визначається енергією, що віддається в зовнішнє обладнання (навантаження, підключене до резонатора).

$$Q_{вн} = 2\pi \frac{W_{cp}}{\Delta W_E}$$

де ΔW_E - енергія, що віддається у зовнішній пристрій.

Навантажена добротність - це повна добротність резонатора і визначається повними втратами.

$$Q_n = 2\pi \frac{W_{cp}}{\Delta W_{мет} + \Delta W_{изл} + \Delta W_{\delta} + \Delta W_E}$$

Добротності зв'язані між собою співвідношенням

$$\frac{1}{Q_n} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{вн}}$$

Для резонатора з коливанням H_{101} власна добротність дорівнює

$$Q_0^{H_{101}} = \frac{\omega_0 \mu_a}{2R_s} \cdot \frac{abl(l^2 + a^2)}{la(l^2 + a^2) + 2b(l^3 + a^3)} \quad (2.3)$$

де $\omega_0 = 2\pi f_0$ - кругова резонансна частота ;

$R_s = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu_a}{\sigma}}$ - активна частина поверхневого опору стінок,

μ_a - магнітна проникність стінок резонатора. Для всіх металів, крім феромагнітних, $\mu_a = \mu_0$.

σ - питома провідність стінок резонатора.

В техніці НВЧ резонатори використовують в генераторах, підсилувачах, фільтрах, вимірювальних приладах. До інших приладів вони підключені з допомогою ліній передачі і зв'язані з останніми за допомогою елементів зв'язку.

При використанні одного елемента зв'язку і схеми включення, показаної на рис.2.1.а, резонатор називають непрохідним.

При використанні двох елементів зв'язку і схеми включення, показаної рис.2.1.б, резонатор називають прохідним.

Вхідний опір резонатора вимірюється в лінії передачі на вході в резонатор перед елементом зв'язку (рис.2.1). Цей перетин лінії передачі називають вхідною площиною або площиною відліку. При резонансі вхідний опір резонатора активний і визначає потужність втрат в резонаторі.

$$P_{p0} = U^2 / R_{p0}$$

де U - напруга в площині відліку, R_{p0} - вхідний опір резонатора на резонансній частоті.

Відношення потужності, яка передається збудженим резонатором в навантаження P_{n0} , до потужності, що втрачається в резонаторі P_{p0} на резонансній частоті, називають коефіцієнтом зв'язку K_{cv} . Оскільки

$$P_{p0} = \frac{U^2}{Z_n}, \text{ то } K_{cv} = \frac{P_{n0}}{P_{p0}} = \frac{R_{p0}}{Z_n}$$

де Z_n - опір навантаження

Для узгоджених навантажень $Z = Z_v$,

де Z_v - хвильовий опір лінії передачі.

Тоді отримаємо

$$K_{cv} = \frac{R_{p0}}{Z_v} \tag{2.4}$$

Виходячи з визначення добротностей, можна показати, що

$$\frac{Q_0}{Q_{вн}} = \frac{P_{n0}}{P_{p0}} = K_{cv} \tag{2.5}$$

$$\frac{Q_0}{Q_n} = 1 + \frac{Q_0}{Q_{en}} = 1 + K_{ce} \quad (2.6)$$

На частотах, які відрізняються від резонансної, вхідний опір резонатора комплексний і залежить від частоти. Ця залежність називається резонансною характеристикою резонатора.

2.2. Методи вимірювання параметрів непрохідних резонаторів

2.2.1. Вимірювання резонансної частоти

При дослідженні непрохідного резонатора останній включається по схемі двополюсника (див. рис.2.1.а). В загальному випадку резонатор є для лінії передачі неузгодженим навантаженням. Виникаюча відбита хвиля складається з падаючої. В лінії передачі утворюється чергування мінімумів (вузлів) і максимумів (пучностей) напруги поля - режим змішаних хвиль.

Коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ) по напрузі K називають відношення напруги поля в пучності E_{\max} до напруги поля у вузлі E_{\min}

$$K = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.7)$$

де $|\Gamma|$ - модуль коефіцієнта відбиття.

На резонансній частоті коефіцієнт відбиття від резонатора, а отже і КСХ в лінії передачі, досягають найменшого значення (рис.2.2.). Точність вимірювання резонансної частоти можна підвищити використовуючи метод "вилки", визначивши значення частот, які відповідають одному рівню сигналу по обидві сторони від резонансної частоти, і вирахувавши їх напівсуму.

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

(див. Рис.2.2.)

2.2.2. Вимірювання коефіцієнту зв'язку резонатора з лінією передачі

Прийнято розрізняти три степені зв'язку, виходячи з виразу (2.4):

Слабка	$K_{ce} < 1$	$(R_{p0} < Z_e)$
Критична	$K_{ce} = 1$	$(R_{p0} = Z_e)$
Сильна	$K_{ce} > 1$	$(R_{p0} > Z_e)$

Якщо вимірюючу систему підключити до узгодженого зі сторони

генератора вимірюючого тракту, то на резонансній частоті коефіцієнт відбиття

а) $\frac{1 - K_{cs}}{1 + K_{cs}}$ при слабкому зв'язку

$$\Gamma = |\Gamma| = \left| \frac{R_{p0} - Z_{\epsilon}}{R_{p0} + Z_{\epsilon}} \right| =$$

б) $\frac{K_{cs} - 1}{K_{cs} + 1}$ при сильному зв'язку

Враховуючи (2.7), отримаємо $K_{cs} =$

а) $1/K$ при слабкому зв'язку

б) K при сильному зв'язку

(2.8)

Отже, для визначення коефіцієнта зв'язку необхідно виміряти КСХ в узгодженій зі сторони генератора лінії передачі, яка навантажена на резонансну систему, і встановити характер зв'язку. Характер зв'язку установлюється по виду фазо-частотної характеристики коефіцієнта відбиття.

Перед резонатором включається вимірювальна лінія і на резонансній частоті її зонд установлюється в точку мінімуму стоячої хвилі. При відхиленні частоти генератора від резонансної мінімум зміщується. Якщо при збільшенні частоти мінімум зміщується до резонатора - зв'язок сильний, якщо до генератора - зв'язок слабкий.

2.2.3. Вимірювання добротності резонатора

Для вимірювання добротності резонатора використовуються різні методи [8.3 – 8.4.]

Нижче описано метод повного вхідного опору $Z^p(\square)$. Вхідний опір резонатора близько резонансу з достатньою мірою наближення можна виразити таким же рівнянням, як і опір паралельного резонансного контура.

$$Z_p(\omega) = R_{p0}(1 + j\varepsilon) \quad (2.9)$$

де $\varepsilon = 2Q_n \Delta f / f_0$ - узагальнена розстройка. Цей опір резонатор має в своїй вхідній площині і перерізах лінії передачі, навантаженої резонансною системою, які віддалені від вхідної площини на ціле число напівхвиль.

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

На відстанях, кратних непарному числу четвертей довжин хвиль від вхідної площини $l = (2n - 1) (\lambda / 4)$ характер змін опору лінії такий же, як

і в послідовному резонансному контурі

$$Z_{ex} = Z_g^2 / R_{p0} (1 + j\varepsilon)$$

Перші площини прийнято називати площинами паралельного резонансу, другі – послідовного.

Нормований вхідний опір в площині паралельного резонансу

$$Z_{exn} = \frac{Z_{ex}}{Z_g} = \frac{R_{p0}}{Z_g} (1 + j\varepsilon) = R'_g + jX'_g; \quad (2.10)$$

Тобто $R'_g = K_{cv}$. Метод його вимірювання описано вище (див.2.2.2.).

Оскільки

$$Q_n = f_0 / 2\Delta f_p \quad (2.11)$$

де $2\Delta f_p$ - полоса пропускання резонатора за рівнем половинної напруги, то при $\Delta f = \Delta f_p$ отримаємо

$$\varepsilon = 2Q_n \frac{\Delta f}{f_0} = 2 \frac{f_0}{2\Delta f_p} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} = 1$$

і тоді $R'_g = X'_g$.

На коловій діаграмі повних опорів (Рис.2.3) геометричним місцем точок, для яких $R = X$, є дуга кола з центром в точці $R = O$, $X = 1$ і що проходить через точки $R = O$, $X = O$, $R = \infty$, $X = \infty$. Ця дуга перетинає коло постійного R'_g в точці 1, якій відповідає значення КСХ K^1 . За частотною характеристикою КСХ в лінії передачі можна визначити смугу частот, що відповідає рівню K^1 , а потім обчислити Q_n за формулою (2.11). Із виразів (2.5) та (2.6) власна добротність

$$Q_0 = Q_n (1 + K_{cv}) \quad (2.12)$$

і зовнішня

$$Q_{вн} = Q_0 \cdot K_{cv} \quad (2.13)$$

3. КЛЮЧОВІ ПИТАННЯ

3.1. Які типи резонаторів використовують в діапазоні НВЧ?

3.2. Що таке тип коливань резонатора? Як здійснюється класифікація

типів коливань?

3.3. Чим визначаються резонансні частоти резонатора?

3.4. Який тип коливань називається нижчим типом? Назвіть нижчий тип коливань в прямокутному резонаторі.

3.5. Що таке власна, зовнішня і навантажена добротності

резонатора?

- 3.6. Який резонатор нахивають прохідним, а який - непрохідним?
- 3.7. Як виміряти резонансні частоти непрохідного резонатора?
- 3.8. Що таке коефіцієнт зв'язку резонатора з лінією передачі? Як

він

вимірюється?

- 3.9. Як виміряти добротність резонатора методом повного опору?

4. ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

Вивчіть властивості об'ємних резонаторів у відповідності з ключовими положеннями.

Розрахуйте резонансні частоти перших двох нижчих типів коливань прямокутного резонатора розмірами $a \times b \times l$ з параметрами, вказаними в табл. 4.1. Номер варіанту m відповідає номеру бригади. Визначіть основний тип коливань. Розрахуйте власну добротність резонатора для типу коливань H_{101} .

Зобразьте картину силових ліній поля основного типу коливань в резонаторі (дві проекції) з указанням місця розміщення приладу збудження.

Ознайомтеся з апаратурою макету і лабораторним завданням. Підготуйте план роботи і схему досліджень.

Підготуйте в робочому зошиті бланк протоколу вимірювань.

5. ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

По вказівці викладача виконайте попереднє регулювання панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі K і ослаблення.

5.1. Вимкніть тумблер НВЧ на передній панелі ГКЧ. Зберіть лабораторну установку для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі в тракці перед резонатором згідно структурної схеми Рис.6.1.

5.2. Ввімкніть тумблер НВЧ. В режимі панорамного вимірювання КСХ положення ручок $S = 0.08$, $f_1 = 8$ ГГц, $f_2 = 12$ ГГц.

Виміряйте резонансні частоти і відповідний їм КСХ K в тракці.

5.3. Для кожного типу коливань виміряйте коефіцієнт зв'язку резонатора з хвилеводом (див.розд. 2.2.2). Для цього перейдіть в режим ручного качання частоти і з допомогою вимірювальної лінії визначіть координати мінімуму стоячої хвилі на резонансній частоті і на частоті вищій резонансної. Якщо другий мінімум ближче до резонатора, то зв'язок сильний, якщо до генератора, то зв'язок слабкий.

5.4. Виміряти добротності резонатора. Використовуючи значення $R_3 = K_3$

за коловою діаграмою повних опорів визначити значення КСХ K_1 для якого $X'_3 = R'_3$ (див.2.2.3.). Перейти в режим панорамного вимірювання КСХ і для знайденого рівня K_1 визначити відповідну смугу частот. За (2.11) – (2.13) розрахувати добротності резонатора.

Вимірювання провести на кожній резонансній частоті.

6. ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ

Структурна схема лабораторного макету представлена на мал.6.1.

В склад панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) входять генератор хитаючої частоти (ГХЧ), вимірювач КСХ і ослаблення, два направлених детектора. Вимірювальна лінія 2 використовується для вимірювання координат мінімуму стоячої хвилі у хвилеводі перед резонатором. Через щілину в широкій стінці хвилевода в нього опущено зонд. Зонд зв'язаний з вимірювальною голівкою, яка розміщена на каретці, що переміщається вздовж хвилевода. Головка вимірювальної лінії повинна бути настроєна на частоту сигналу в лінії.

В якості індикаторного приладу 3 використовується мілівольтметр.

Непрохідний резонатор 4 представляє собою короткозамкнутий відрізок прямокутного хвилеводу. Він зв'язаний з основним хвилеводом через отвір в стінці. Довжина резонатора змінюється в невеликих межах шляхом переміщення короткозамкнутого поршня.

7. ЗМІСТ ПРОТОКОЛУ

- 7.1. Ціль роботи.
- 7.2. Перелік апаратури.
- 7.3. Результати вимірів.
 - 7.3.1. Резонансні частоти.
 - 7.3.2. Коефіцієнт зв'язку на кожній резонансній частоті.
 - 7.3.3. Значення K і відповідна смуга частот для розрахунку Q_n на кожній резонансній частоті.
 - 7.3.4. Результати розрахунку добротностей Q_0 , $Q_{вн}$.
- 7.4. Висновки
- 7.5.

8. ЛІТЕРАТУРА

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М: Связь, 1971, 487 с..
2. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1978
3. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона. – М.: Сов. радио, 1970.
4. Валитов Р.А., Сретенский В.Н. Радиотехнические измерения. – М: Сов. радио, 1970.

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ У ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ НА ПРЯМОКУТНОМУ ХВИЛЕВОДІ

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи
з дисципліни “Технічна електродинаміка”

1. Мета роботи.

Експериментальне дослідження параметрів ємнісної діафрагми в прямокутному хвилеводі.

2. Теоретичні положення.

2.1. Неоднорідністю в хвилеводах називають об'єкт, електродинамічні параметри якого відрізняються від параметрів середовищ, що заповнюють лінію передачі. Такою неоднорідністю може бути металева перегородка, діафрагма, штир, реактивний шлейф, діелектричний циліндр, місце з'єднання двох ліній передачі з різною формою. У всіх випадках в місці розташування неоднорідності змінюється структура поля у порівнянні з полем у регулярній лінії. Від неоднорідності буде відбиватись зворотна електромагнітна хвиля у напрямку до генератора.

На практиці неоднорідності в техніці НВЧ використовують для узгодження лінії передачі з навантаженням методом компенсації, коли відбита від неоднорідності хвиля компенсує хвилю, відбиту від навантаження. У цьому випадку до генератора не буде поступати відбита хвиля.

Для узгодження методом компенсації використовують неоднорідність, що має реактивну провідність $Y_n = iB_n$.

Якщо у перерізі лінії передачі з вхідною провідністю $Y_{ex} = G_{ex} + iB_{ex}$ паралельно включити неоднорідність для узгодження, то сумарна провідність буде дорівнювати сумі вхідної провідності та провідності неоднорідності:

$$Y_{\Sigma} = Y_{ex} + Y_n = G_{ex} + iB_{ex} + iB_n = G_{ex} + i(B_{ex} + B_n).$$

Для досягнення режиму узгодження необхідно знайти переріз лінії передачі, де активна складова вхідної провідності G_{ex} дорівнює хвилевій провідності

$$G_{ex} = \frac{1}{Z_{xg}},$$

та включити неоднорідність з провідністю $B_n = -B_{ex}$ в цьому місці. У такому випадку сумарна провідність буде дорівнювати хвилевій провідності:

$$Y_{\Sigma} = Y_{ex} + Y_n = \frac{1}{Z_{xg}} + i(B_{ex} - B_{ex}) = \frac{1}{Z_{xg}}.$$

В лінії передачі від генератора до місця встановлення неоднорідності буде режим біжучих хвиль і не буде відбитих хвиль.

Таким чином, існує задача побудови неоднорідності з заданим значенням реактивної провідності. В якості таких пристроїв часто використовують ємнісні, індуктивні та резонансні діафрагми.

Діафрагмою називається тонка металева пластина в поперечній площині хвилеводу, що перекриває частину його перерізу.

В ємнісній діафрагмі щілина рівнобіжна (паралельна) широкій стінці хвилеводу (рис.1):

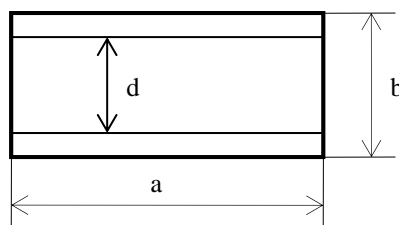


Рис.1. Симетрична ємнісна діафрагма.

При симетричному розташуванні щілини діафрагму називають симетричною, при несиметричному – несиметричною.

Поблизу діафрагми виникає реактивне поле, у якому переважає електрична складова. Тому на еквівалентній схемі діафрагма представляє ємнісну реактивну провідність B_c . Для тонкої симетричної діафрагми нормоване значення \bar{B}_c :

$$\bar{B}_c \approx \frac{B_c}{Y_{xв}} = \frac{4b}{\lambda_{xв}} \cdot \ln \left(\cos ec \frac{\pi d}{2b} \right) = -\frac{4b}{\lambda_{xв}} \cdot \ln \left(\sin \left(\frac{\pi d}{2b} \right) \right);$$

(1)

де:

$$\bar{B}_c = \frac{B_c}{Y_{xв}} = B_c \cdot Z_{xв} - \text{нормована провідність діафрагми,}$$

$\lambda_{xв}$ - довжина хвилі в хвилеводі,

d - ширина діафрагми,

$Y_{xв}$ - хвильова провідність хвилеводу,

b - ширина вузької стінки хвилеводу,

У індуктивній діафрагмі щілина рівнобіжна (паралельна) вузьким стінкам хвилеводу (рис.2).

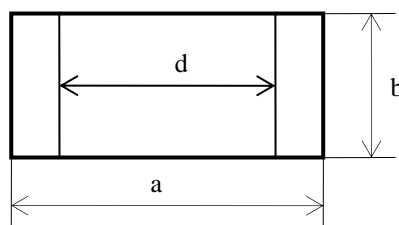


Рис.2. Симетрична індуктивна діафрагма.

Щілина може розташовуватися симетрично і несиметрично. У реактивному полі поблизу діафрагми переважає магнітна складова, на еквівалентній схемі заміщення така діафрагма представляє індуктивну реактивну провідність \bar{B}_L .

Для тонкої симетричної індуктивної діафрагми нормована провідність

$$\bar{B}_L = -\frac{\lambda_{xв}}{a} \cdot ctg^2 \frac{\pi d}{2a};$$

Ємнісна й індуктивна діафрагма використовуються в якості елементів, що відбивають, для вузькополосного узгодження хвилеводів і хвилеводних пристроїв, у фільтрах НВЧ і т.д.

Резонансна діафрагма утвориться при накладенні ємнісної й індуктивної діафрагм і представляється еквівалентною схемою заміщення у вигляді рівнобіжного коливального контуру. На резонансній частоті хвиля безперешкодно проходить через діафрагму. Резонансні діафрагми з припаяною діелектричною пластиною використовуються для відділення вакуумної частини в приладах НВЧ і називаються резонансними вікнами.

2.2. Хвильовий опір прямокутного хвилеводу при розповсюдженні хвилі основного типу H_{10} визначається формулою:

$$Z_{xв} = \frac{Z}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \quad (2)$$

де

$Z = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$ – характеристичний опір діелектрика, що заповнює хвилевод. У випадку,

якщо це повітря, то $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$ Ом,

λ – довжина електромагнітної хвилі в необмеженому діелектрику (повітрі),

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

c – швидкість світла,

f – частота генератора,

$\lambda_{кр} = 2a$ – критична довжина хвилі типу H_{10} у прямокутному хвилеводі,

a – розмір широкої стінки хвилеводу.

2.3. Довжина хвилі у прямокутному хвилеводі $\lambda_{xв}$ та довжина хвилі у необмеженому повітрі λ пов'язані рівнянням:

$$\lambda_{xв} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (3)$$

Довжину хвилі у хвилеводі легко виміряти за допомогою вимірювальної лінії. Для цього потрібно виміряти значення напруги вздовж лінії так, щоб отримати не менше двох мінімумів напруги (рис. 3):

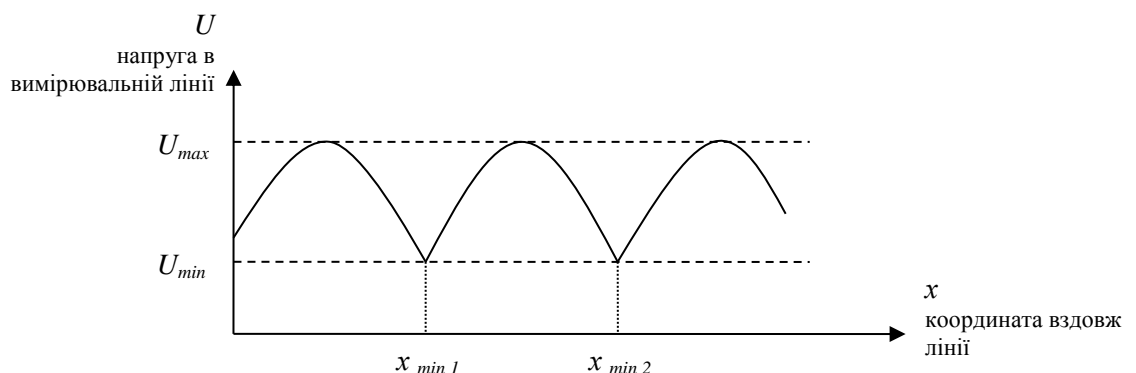


Рис.3. Розподіл напруги вздовж вимірювальної лінії.

Відомо, що відстань між двома сусідніми мінімумами напруги ($x_{min2} - x_{min1}$) дорівнює половині довжини хвилі у хвилеводі:

$$|x_{min2} - x_{min1}| = \frac{\lambda_{xв}}{2}.$$

Довжина хвилі у вільному середовищі знаходиться з рівняння (3):

$$\lambda = \frac{\lambda_{xв}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_{xв}}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (4)$$

Режими роботи лінії передачі характеризується таким параметром, як коефіцієнт стоячої хвилі K_{CX} . Це відношення максимального значення напруги у вимірювальній лінії до мінімального значення (рис.3):

$$K_{CX} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}. \quad (5)$$

2.4. Модуль коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$ визначає коефіцієнт стоячої хвилі K_{CX} в лінії передачі перед діафрагмою:

$$K_{cx} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (6)$$

В свою чергу, коефіцієнт відбиття Γ пов'язаний з величиною навантаження в лінії передачі і з провідності діафрагми B_c .

Якщо в лінію передачі, яка на кінці з'єднана з узгодженим навантаженням, вставити діафрагму, ми отримаємо в місті встановлення діафрагми паралельне з'єднання хвильової провідності (від узгодженого навантаження $Z_{xв}$) та діафрагми. Тому сумарна вхідна комплексна провідність буде визначатися формулою:

$$Y_{вх} = \frac{1}{Z_{xв}} + iB_c. \quad (7)$$

Вхідний опір в місті підключення діафрагми

$$Z_{вх} = \frac{1}{Y_{вх}}.$$

Модуль коефіцієнта відбиття в місці підключення діафрагми

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{вх} - Z_{xв}}{Z_{вх} + Z_{xв}} \right|. \quad (8)$$

Таким чином, від величини провідності діафрагми залежить вхідний опір, коефіцієнт відбиття та коефіцієнт стоячої хвилі, який легко виміряти.

3. Контрольні питання

- 3.1. Який хвильоводний елемент називається діафрагмою?
- 3.2. Які існують типи діафрагм?
- 3.3. Яку схему заміщення має діафрагма і чим визначаються параметри цієї схеми?
- 3.4. У чому полягає сутність узгодження генератора з навантаженням за допомогою діафрагми?
- 3.5. Приведіть приклади застосування діафрагм.

4. Лабораторне завдання.

4.1. До складу лабораторної апаратури входять:

- генератор НВЧ (із складу вимірювача КСХН панорамного),
- вимірювальна лінія Р1-28,
- мілівольтметр Ф5053,
- хвильовод з діафрагмою, що вивчається,
- узгоджене навантаження.

Намалювати у звітах структурну схему лабораторного макету.

4.2. Включити лабораторну установку:

- на генераторі НВЧ включити тумблер СЕТЬ,
- на мілівольтметрі натиснути кнопку СЕТЬ,

- встановити на мілівольтметрі найбільш чутливий діапазон вимірювань (3 або 10 мВ),
- перевірити встановлення в хвилевід діафрагми,
- налагодити вимірювальну лінію, для чого в невеликих межах обережно обертати коло налагодження на вимірювальній лінії до появи сигналу в мілівольтметрі,
- переміщаючи штир вимірювальної лінії вздовж хвилевода, збільшити показники мілівольтметра, знайти максимум,
- по мірі налагодження вимірювальної лінії на частоту генератора переходити на більш грубий діапазон мілівольтметра,
- перевірити, що при переміщенні штиря вимірювальної лінії показники мілівольтметра змінюються.

4.3. Виміряти довжину хвилі у хвилеводі $\lambda_{xв}$ за методикою, що описана у п.2.3.

Координати штиря вимірювальної лінії поблизу двох мінімумів напруги записувати через 1 мм. При вимірюваннях поблизу мінімуму переходити на більш чутливий діапазон мілівольтметра.

Заповнити таблицю з результатами вимірювань:

Координата штиря, мм															
Показники мілівольтметра, мВ															

Намалювати графік залежності напруги вимірювальної лінії від координати.

4.4. За формулою (4) розрахувати довжину хвилі у вільному середовищі λ та відповідну частоту генератора f . Значення $\lambda_{кр} = 2a$ знайти, виміряв ширину стінки хвилевода a .

4.5. За формулою (5) розрахувати експериментальний коефіцієнт стоячої хвилі $K_{СХ}$.

4.6. Вийняти діафрагму із хвилевода, виміряти її геометричні розміри.

Знайти теоретично, який повинен бути коефіцієнт стоячої хвилі з такою діафрагмою.

Для цього за формулою (1) розрахувати нормовану провідність діафрагми \bar{B}_c .

За формулою (2) розрахувати хвильовий опір $Z_{xв}$.

Розрахувати провідність діафрагми $B_c = \frac{\bar{B}_c}{Z_{xв}}$.

Знайти вхідну комплексну провідність $Y_{вх} = \frac{1}{Z_{вх}} + iB_c$ та вхідний опір в місці підключення діафрагми $Z_{вх} = \frac{1}{Y_{вх}}$.

Розрахувати модуль коефіцієнта відбиття в місці підключення діафрагми за формулою (8).

Знайти за формулою (6) відповідний теоретичний коефіцієнт стоячої хвилі.

4.7. Порівняти розрахований теоретично (п.4.6) та знайдений експериментально (п.4.5.) коефіцієнти стоячої хвилі. Зробити висновки.

5. Зміст протоколу

5.1. Мета роботи.

5.2. Структурна схема лабораторного макету.

5.3. Результати вимірів:

- таблиця з результатами вимірювань,
- графік залежності напруги вимірювальної лінії від координати штиря,
- довжина хвилі у хвилеводі,
- частота генератора,

- вимірний коефіцієнт стоячої хвилі.

5.3. Результати розрахунків:

- геометричні розміри та розрахована провідність діафрагми,

- теоретичний коефіцієнт стоячої хвилі,

5.4. Висновки за результатами розрахунків та вимірювань.

6. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.

Вихідні дані для розрахунку провідності діафрагм.

Таблиця1.

Номер варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Макет	1									
Розміри перетину хвилеводу, мм	a=48, b=24									
Тип діафрагми	Ємнісна симетрична					Індуктивна симетрична				
S, мм	14	14	7	7	7	22	22	25	25	25
f_{II} , МГц	4,5	4,6	4,5	4,6	5,0	4,5	4,6	4,5	4,6	5,0
Δf , МГц	1,0	0,8	1,0	0,8	0,5	1,0	0,8	1,0	0,8	0,5
$f_{с}$, МГц	7,5	7,0	7,5	7,0	6,5	7,5	7,0	7,5	7,0	6,5
Макет	2									
Розміри перетину хвилеводу, мм	a=23, b=10									
Тип діафрагми	Ємнісна симетрична					Індуктивна симетрична				
S, мм	3	3	3	4	4	12	12	12	15	15
f_{II} , МГц	8	8,5	9	9	10	8	8,5	9	8	8,5
Δf , МГц	1	0,5	0,6	0,8	0,5	1	1	0,6	1	1
$f_{с}$, МГц	11	10	10,8	11,4	12	11	11,5	11,8	11	11,5

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСІЇ У ПОРОЖНИННОМУ МЕТАЛЕВОМУ ХВИЛЕВОДІ

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи
з дисципліни “Технічна електродинаміка”

3. Мета роботи.

Вивчення методики вимірювання довжини хвилі і фазової швидкості в порожнинному металевому хвилеводі

Дослідження залежності від частоти фазової швидкості основного типу хвилі в прямокутному хвилеводі .

4. Теоретичні положення.

2.1. Хвилевод являє собою полу металеву трубу довільного перерізу всередині якої можуть розповсюджуватись електромагнітні хвилі .Найбільшого поширення набули хвилеводи прямокутного і круглого поперечного перерізу .

Комплексні вектори електричного і магнітного полів у хвилі, що розповсюджується, залежать від координат точки спостереження (x, y, z) :

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y) \exp j(\omega t - \beta z),$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y) \exp j(\omega t - \beta z),$$

де $\vec{E}_0(x, y), \vec{H}_0(x, y)$ - функції поперечних координат x і y , що описують розподіл поля хвилі в поперечному перерізі;

β - повздовжня стала розподілу хвилі (фазова стала);

$\omega = 2\pi f$ - кругова частота;

f - частота електромагнітної хвилі.

На основі аналізу процесу розповсюдження електромагнітних хвиль шляхом рішення рівнянь Максвелла встановлено, що повздовжня стала розповсюдження β є дійсною і хвиля буде розповсюджуватися, якщо

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon\mu}} < \lambda_{\text{ед}},$$

(2.1)

де λ - довжина хвилі в середовищі, що наповнює хвилевод;

ϵ_r і μ_r - відносні діелектрична і магнітна проникності цього середовища ;

λ_0 - довжина хвилі в вакуумі ;

$\lambda_{\text{ед}}$ - критична довжина хвилі для конкретного типу хвилі.

Для повітря $\epsilon_r \approx 1, \mu_r \approx 1$.

Нерівність (2.1) являє собою умову, при якій заданий вид хвилі може розповсюджуватись в хвилеводі .

Частота , що відповідає $\lambda_{\text{ед}}$, називається критичною частотою :

$$f_{\text{ед}} = \frac{V_0}{\lambda_{\text{ед}}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \lambda_{\text{ед}}}},$$

(2.2)

де $\tilde{N} = 3 \cdot 10^8 \frac{i}{\tilde{n}}$ – швидкість світла у вакуумі,

$$V_0 = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} - \text{швидкість електромагнітної хвилі в необмеженому середовищі,}$$

що заповнює хвилевід.

Так як частота зворотно пропорційна довжині хвилі, то

$$f = \frac{V_0}{\lambda}, \quad f_{\text{гд}} = \frac{V_0}{\lambda_{\text{гд}}},$$

(2.3)

і умова розповсюдження будь-якого виду хвиль має вигляд $f > f_{\text{гд}}$.

Критична довжина хвилі визначається розмірами і формою поперечного перерізу хвилеводу. В прямокутному хвилеводі для хвиль типу E_{mn} і H_{mn}

$$\lambda_{\text{гд}} = \frac{2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}},$$

(2.4)

де a і b - розміри поперечного перерізу (широкої стінки a та вузької стінки b , $a > b$);

m, n - цілі числа, що характеризують структуру електромагнітної хвилі в площині поперечного перерізу хвилеводу.

Тип хвилі, який має найбільшу критичну довжину хвилі або найменшу критичну частоту, називається основним типом. Основний тип хвилі може розповсюджуватись у хвилеводі один, без інших типів хвиль. Всі інші типи хвиль називаються вищими типами.

В прямокутному хвилеводі основним є тип хвилі H_{10} ($m=1, n=0$), для якого з формули (2.4) виходить, що $\lambda_{\text{гд}} = 2a$.

2.2. Різні типи хвиль в хвилеводі мають різну довжину хвиль в хвилеводі, різні фазові і групові швидкості, коефіцієнт загасання.

Довжиною хвилі $\lambda_{\text{оа}}$ в хвилеводі називається найменша відстань, у напрямку розповсюдження хвилі, на якій фаза коливань змінюється на 2π :

$$\lambda_{\text{оа}} = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{гд}})^2}},$$

(2.5)

$$\text{де } \lambda = \frac{V_0}{f}.$$

2.3. Фазовою швидкістю V_{ϕ} хвилі називається швидкість руху фазового фронту, який є геометричним місцем точок з однакою фазою хвилі.

Фазову швидкість хвилі дорівнює довжині хвилі, поділеній на час, який потрібен на проходження цієї відстані, тобто на період коливань:

$$V_{\phi} = \frac{\lambda_{\text{оа}}}{T} = \lambda_{\text{оа}} \cdot f = \frac{\lambda \cdot f}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{гд}})^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{гд}})^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{1 - (f_{\text{гд}}/f)^2}}.$$

(2.6)

Як випливає з (2.6), фазова швидкість хвилі залежить від частоти і завжди перевищує швидкість світла V_0 в необмеженому середовищі, що заповнює хвилевід. Залежність фазової швидкості від частоти називається дисперсією. Фазова швидкість зменшується зі збільшенням частоти. Така дисперсія називається нормальною.

Вимірювання довжини хвилі H_{10} в прямокутному хвилеводі ґрунтується на створенні режиму стоячих хвиль в напрямку розповсюдження хвилі, тобто вздовж осі z .

В кінці відрізка хвилеводу, з'єданого з вимірювальною лінією того ж перерізу, підключається навантаження, опір якого значно відрізняється від хвильового опору хвилі H_{10} . В якості такого навантаження обирається коротке замкнення. Від короткого замкнення відбивається хвиля, яка йде в зворотному напрямку до генератора. Відбита хвиля додається до падаючої хвилі. Вздовж хвилеводу виникають мінімуми (вузли, де хвилі протифазні) і максимуми (пучності, де хвилі синфазні) напруженості електричного поля – виникає стояча хвиля. Відстань між двома сусідніми вузлами дорівнює половині довжини хвилі в хвилеводі:

$$|z_{\min 2} - z_{\min 1}| = \frac{\lambda_{\text{св}}}{2}.$$

(2.7)

Положення мінімумів напруженості електричного поля $z_{\min 1}$ та $z_{\min 2}$ вимірюється за допомогою вимірювальної лінії.

Таким чином, щоб визначити фазову швидкість, достатньо виміряти довжину хвилі у хвилеводі та знати частоту коливань генератора f .

5. Контрольні питання

- 3.1. Що таке критична довжина хвилі, критична частота? Чому дорівнюють ці параметри для основного типу хвилі в прямокутному хвилеводі?
- 3.2. Яка швидкість називається фазовою швидкістю хвилі в хвилеводі?
- 3.3. На чому основана методика вимірювання довжини хвилі в хвилеводі?
- 3.4. Яке очікуване співвідношення фазової швидкості в хвилеводі та у вільному просторі?
- 3.5. Яке очікуване співвідношення довжини хвилі в хвилеводі та у вільному просторі?
- 3.7. Яка очікувана залежність фазової швидкості хвилі від частоти?

6. Лабораторне завдання.

4.1. До складу лабораторної апаратури входять:

- генератор НВЧ ГКЧ-61 із складу вимірювача КСХН панорамного,
- вимірювальна лінія Р1-28,
- мілівольтметр Ф5053,
- хвилевод прямокутного перерізу,
- коротке замкнення.

Ознайомитись з приладами та намалювати у звітах структурну схему лабораторного макету.

4.2. Включити лабораторну установку:

- на генераторі ГКЧ-61 включити тумблер СЕТЬ,
- на мілівольтметрі Ф5053 натиснути кнопку СЕТЬ,
- зачекати одну хвилину для прогріву приладів,
- встановити на мілівольтметрі найбільш чутливий діапазон вимірювань (3 або 10 мВ),
- перевірити підключення до хвилеводу короткого замкнення, положення якого можна регулювати, обертаючи корпус приладу,
- на генераторі перевірити положення органів управління. Повинні бути натиснуті кнопки:

ВНУТР. МОДУЛЯЦІЯ;
РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ F_1, F_2 ;
СКОРОСТЬ ПЕРЕСТРОЙКИ РУЧН.;
ИЗМЕРЯЕМАЯ ЧАСТОТА F_1 ;

- перевірити можливість регулювання частоти генератора ручкою РУЧ. у межах від 9 до 12 ГГц,
- встановити частоту, що вказана викладачем, в діапазоні від 9,5 до 12 ГГц.

4.3. Налагодити вимірювальну лінію, для чого в невеликих межах дуже обережно обертати кільце налагодження на циліндрі вимірювальній лінії до появи сигналу в мілівольтметрі,

- переміщаючи штир зв'язку вимірювальної лінії вздовж хвилеводу, збільшити показники мілівольтметра. Знайти таке положення штиря, при якому будуть максимальні показники мілівольтметра,

- продовжити налагодження вимірювальної лінії на частоту генератора, обертаючи кільце. По мірі налагодження вимірювальної лінії та збільшення показників мілівольтметра переходити на більш грубий діапазон мілівольтметра, до 30 або 100 мВ,

- перевірити, що при переміщенні штиря вимірювальної лінії показники мілівольтметра змінюються.

4.4. Виміряти довжину хвилі у хвилеводі $\lambda_{xв}$.

Для цього встановити штир вимірювальної лінії на нуль по шкалі, обертаючи барабан переміщення штиря.

Переміщуючи штир вимірювальної лінії, визначити координати двох мінімумів напруженості електричного поля Z_{min1} та Z_{min2} .

Координати штиря вимірювальної лінії поблизу мінімумів напруженості змінювати через 1 мм. При вимірюваннях поблизу мінімуму переходити на більш чутливий діапазон мілівольтметра.

Занести результати в таблицю та розрахувати довжину хвилі за допомогою формули (2.7).

Частота, ГГц	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
Координата Z_{min1} , мм						
Координата Z_{min2} , мм						
Експериментальна довжина хвилі у хвилеводі, $\lambda_{xв}$, мм						
Експериментальна швидкість хвилі у хвилеводі, $V_{ф}$, м/с						
Довжина хвилі у вільному просторі λ , мм						
Теоретична швидкість хвилі у хвилеводі $V_{\delta \delta}$, м/с						

4.5. Розрахувати експериментальну швидкість хвилі у хвилеводі

$$V_{\delta \delta} = \lambda_{\delta \delta} \cdot f .$$

4.6. Розрахувати довжину хвилі у вільному просторі на цій частоті:

$$\lambda = \frac{\tilde{N}}{f} .$$

4.7. Розрахувати критичну довжину хвилі $\lambda_{\delta \delta} = 2a$.

4.8. Розрахувати теоретичну швидкість хвилі у хвилеводі на цій частоті:

$$V_{\delta \delta} = \frac{\tilde{N}}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\delta \delta})^2}}$$

4.9. Змінити частоту на 0,5 ГГц та повторити розрахунки та вимірювання.

Всього вимірювання зробити на трьох частотах. Після кожної зміни частоти повторити налагодження вимірювальної лінії, при цьому налагодження починати з встановлення мілівольтметра на самий чутливий діапазон вимірювань (3 або 10 мВ).

4.10. Побудувати в одній системі координат графіки залежності від частоти:

- швидкості хвилі у вільному просторі;
- фазової швидкості у хвилеводі експериментальної;
- фазової швидкості у хвилеводі теоретичної.

Зробити висновки.

7. Зміст протоколу

5.1. Мета роботи.

5.2. Структурна схема лабораторного макету.

5.3. Результати вимірів:

- таблиця з результатами вимірювань,
- графіки залежності швидкості від частоти.

5.3. Результати розрахунків.

5.4. Висновки за результатами розрахунків та вимірювань.

8. Література

Техническая электродинамика / Пименов Ю. В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В.Пименова. Учеб. пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 2000.-536с.

Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1992.-416с.

Семенов Н. А. Технічна електродинаміка. М.- Зв'язок, 1973.