



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ
ім. О.С. Попова

Кафедра технічної електродинаміки і систем радіозв'язку

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт студентів

з дисципліни

**“Поля і хвилі у системах технічного захисту інформації”
(розділ: “Технічна електродинаміка”)**

для студентів денної та заочної форм навчання
навчально-наукового інституту радіо, телебачення та електроніки

Одеса 2013

Укладач Гладкіх В.І.

Рецензенти: проф. кафедри ТЕД та СРЗ, М.Б. Проценко,
старш. викл. кафедри ТЕД та СРЗ М.С. Гринь.

Методичні вказівки до лабораторних робіт студентів з дисципліни “Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації” /Укл. Гладкіх В.І. – Одеса: Вид-во ОНАЗ ім. О.С.Попова, 2013. – 68 с.

Метою методичних вказівок є допомога студентам у підготовці до лабораторних занять з дисципліни “Поля і хвилі у системах технічного захисту інформації”. В методичних вказівках наведено ключові питання з тем занять, завдання для домашньої роботи, зразки оформлення звітів про виконання лабораторних робіт.

Методичні вказівки призначені студентам денної та заочної форм навчання інституту радіо, телебачення та електроніки.

Методичні вказівки ухвалено на кафедрі технічної електродинаміки і систем радіозв'язку, і рекомендовано до друку.

Протокол № 3 від 12.03.13 р.

Затверджено методичною радою академії зв'язку.

Протокол 3/14 від 09.04.13 р.

ЗМІСТ

Лабораторні роботи з дисципліни “Технічна електродинаміка”:

№ 1. Дослідження характеристик і параметрів електромагнітної хвилі:.....	4
1. Вимірювання довжини хвилі електромагнітного коливання у хвилеводі...4	
2. Вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі.....	11
№ 2. Дослідження режимів роботи хвилеводної лінії передачі.....	18
№ 3. Дослідження способів узгодження лінії передачі з довільним навантаженням.....	29
№ 4. Вивчення особливостей поширення радіохвиль у направляючих системах.....	40
№ 5. Дослідження хвилеводних розгалужень.....	47
№ 6. Дослідження спрямованого відгалужувача й адаптерного переходу.....	50
№ 7. Дослідження невзаємних хвилеводних пристроїв.....	55
ДОДАТОК А. Короткий технічний опис й інструкція з експлуатації вимірювальної хвилеводної лінії Р1-28.....	59
ДОДАТОК Б. Бланк звітів про виконання лабораторних робіт.....	62
ДОДАТОК В. Основні умовні позначення.....	63
Література.....	65

ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ

1. Вимірювання довжини хвилі електромагнітного коливання у хвилеводі

Мета роботи: вивчення будови і принципу роботи хвилеводної вимірювальної лінії; набуття навичок використання хвилеводної вимірювальної лінії при вимірюванні довжини хвилі електромагнітного коливання у хвилеводі.

Ключові положення. В направляючих системах можуть поширюватись електромагнітні хвилі чотирьох класів в залежності від присутності поздовжніх складових векторів електричного та магнітного полів.

Рівняння, що описують комплексні складові векторів електричного і магнітного полів у направляючій системі, мають наступний вид:

$$\begin{cases} \dot{E}(x, y, z) = E_m(x, y) \exp(-i\beta z) \\ \dot{H}(x, y, z) = H_m(x, y) \exp(-i\beta z) \end{cases} \quad (1.1)$$

де $E_m(x, y)$, $H_m(x, y)$ – амплітуди напруженості електричного і магнітного полів; $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{хв}}$ – поздовжнє хвильове число, постійна поширення поля або коефіцієнта фази.

Величина $\lambda_{\text{хв}}$ – довжина хвилі надвисокочастотного (НВЧ) коливання у направляючій системі (НС), тобто відстань між двома поверхнями рівних фаз, на яких фази відрізняються на 2π .

Довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі (хвилеводі) може бути визначена або експериментально, або розрахована за формулою

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}}, \quad (1.2)$$

де:

- $\lambda = v_0/f$ – довжина хвилі НВЧ коливання у вільному просторі з параметрами середовища, яке заповнює хвилевід, або інакше, довжина хвилі НВЧ коливання, що формується генератором;
- v_0 – швидкість світла у середовищі, яке заповнює хвилевід;
- f – частота НВЧ коливання, що формується генератором;
- $\lambda_{\text{кр}}$ – критична довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі.

Якщо довжина хвилі НВЧ коливання в хвилеводі $\lambda_{\text{хв}}$ визначена експериментально, тоді з формули (1.2) легко знайти довжину хвилі НВЧ коливання, формуючого генератором за формулою:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{ХВ}}}{\sqrt{1 + (\lambda_{\text{ХВ}}/\lambda_{\text{кр}})^2}}. \quad (1.3)$$

Для опису електромагнітної хвилі у направляючих системах найчастіше використовують хвильову модель, в основі якої припускається існування одночасно двох хвиль: *падаючої хвилі*, яка поширюється від генератора до навантаження, і *відбитої хвилі*, яка поширюється від навантаження до генератора. Наявність відбитої хвилі призводить до того, що амплітуда сумарної хвилі $E_{\Sigma}(z)$ в кожній точці z уздовж направляючої системи змінюється. Максимальне значення спостерігається у тих точках, де падаюча та відбита хвилі знаходяться в фазі і, навпаки, – мінімальне – там, де падаюча та відбита хвилі додаються у протифазі.

Амплітуда сумарної хвилі, як функції позовжньої координати, визначається наступною формулою:

$$|\dot{E}_{\Sigma}(z)| = E_0 \sqrt{1 + \Gamma_{\text{H}}^2 + 2\Gamma_{\text{H}} \cos(2\beta z - \varphi_{\text{H}})}, \quad (1.4)$$

де z – координата, відлічувана від навантаження в бік генератора; E_0 – амплітуда падаючої хвилі; Γ_{H} , φ_{H} – модуль і аргумент (фаза) коефіцієнта відбиття в місці підключення навантаження.

З формули (1.4) випливає, що при $\Gamma_{\text{H}} \neq 0$ зі змінюванням координати z уздовж направляючої системи амплітуда сумарної напруженості поля $|\dot{E}_{\Sigma}(z)|$ також змінюється, приймаючи мінімальне $E_{\text{min}} = E_0(1 - \Gamma_{\text{H}})$ і максимальне $E_{\text{max}} = E_0(1 + \Gamma_{\text{H}})$ значення (рис. 1.1).

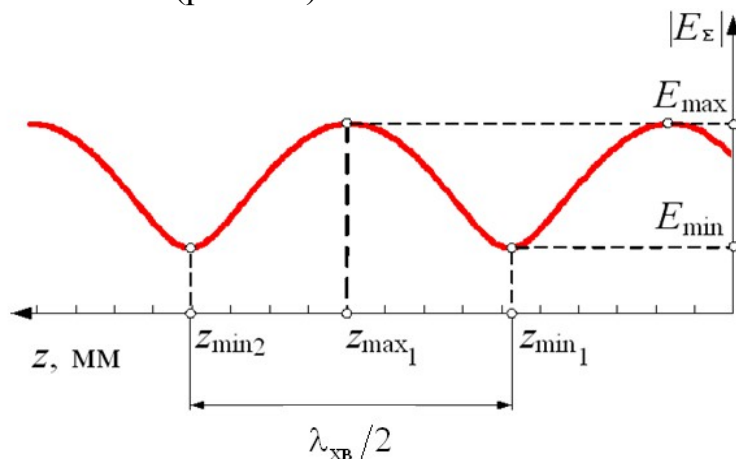


Рисунок 1.1 – Поздовжній розподіл амплітуди сумарної напруженості поля

При цьому координати вузлів та пучностей (при $z \geq 0$) визначаються за формулами:

$$z_{n \text{ min}} = \frac{\lambda_{\text{ХВ}}}{4} \left(\frac{\varphi_{\text{H}}}{\pi} + 2n - 1 \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1.5)$$

$$z_{n \text{ max}} = \frac{\lambda_{\text{ХВ}}}{4} \left(\frac{\varphi_{\text{H}}}{\pi} + 2(n - 1) \right), \quad n = 1, 2, \dots. \quad (1.6)$$

З формул (1.5) і (1.6) випливає, що відстань між сусідніми мінімумами – *вузлами*, або максимумами – *пучностями* дорівнює $\lambda_{\text{хв}}/2$. Таким чином, визначивши положення двох сусідніх вузлів (пучностей) у направляючій системі, можна розрахувати довжину хвилі НВЧ коливання у хвилеводі.

На практиці довжину хвилі НВЧ коливання у хвилеводі вимірюють за допомогою вимірювальної хвилеводної лінії (див. Додаток А). Вимірювальна хвилеводна лінія Р1-28 складається з відрізка прямокутного хвилеводу перетином 23×10 мм зі щілиною, прорізаною посередині широкої стінки хвилеводу, і зондової голівки, яка складається з вертикального зонда, зануреного усередину хвилеводу і зв'язаного через резонатор з детекторною секцією, який можна налаштувати. Зондова голівка встановлена на рухомій каретці, яка дозволяє рухати її уздовж хвилеводу. Наведений в зонді сигнал пропорційний напруженості електричного поля в місці розташування зонда і, після випрямлення детектором, подається у коло індикатора. Вимірюючи амплітуду сигналу на виході детектора при різноманітних положеннях каретки (зонду), можна побудувати залежність амплітуди сумарної хвилі уздовж хвилеводу, за якою можна визначити довжину хвилі НВЧ коливання у хвилеводі. Змінюючи глибину занурення зонда вимірювальної лінії, можна змінювати величину відбіраної потужності із хвилеводу, яка є пропорційною амплітуді сигналу на виході детектора (характеристика детектора квадратична).

Опис лабораторного стенда. Для проведення вимірювань у даній роботі використовується наступне обладнання (див. рис. 1.2 і 1.3): 1 – НВЧ-генератор; 2 – розв'язувальний феритовий вентиль; 3 – вимірювальна хвилевідна лінія Р1-28 (див. Додаток А); 4 – навантаження типу “короткого замикання” – металічна пластина (рис. 1.2); 4 – навантаження типу “короткого замикання” – короткозамкнутий рухомий поршень (рис. 1.3); 5 – індикаторний пристрій (вимірювальний низькочастотний підсилювач).

Примітка. Вимірювальні лінії двох сусідніх робочих місць підключені до одного НВЧ-генератора через хвилеводний трійник і феритові вентиля, які служать для розв'язки вимірювальних трактів.

Рисунок 1.2 – Структурна схема установки для вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання за допомогою нерухомого короткозамикача

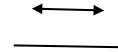


Рисунок 1.3 – Структурна схема установки для вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання за допомогою рухомого короткозамикача

Вимірювання довжини хвилі $\lambda_{\text{ХВ}}$ електромагнітного коливання в хвилеводі. Вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі можна проводити за структурною схемою рис. 1.2 з використанням двох варіантів.

Варіант 1, коли у якості навантаження 4 використовується короткозамикач у вигляді металевої пластинки, яка підключається до вільного фланцю вимірювальної хвилеводної лінії.

У цьому варіанті алгоритм вимірювань наступний:

1) Шляхом переміщення каретки вимірювальної лінії визначається координата одного з мінімумів (вузлів) z_{min_1} .

2) Також шляхом переміщення каретки вимірювальної лінії визначається координата сусіднього мінімуму (вузла) z_{min_2} .

3) Розраховується довжина хвилі НВЧ коливання у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$ за формулою $\lambda_{\text{ХВ}} = 2|z_{\text{min}_2} - z_{\text{min}_1}|$.

Варіант 2, коли в якості навантаження 4 використовується короткозамикач з рухомим поршнем, а зонд вимірювальної лінії залишається нерухомим (див. рис. 1.3). У цьому варіанті алгоритм вимірювань наступний:

1) Поршень короткозамикача встановлюється так, щоб положення першого мінімуму поздовжнього розподілу поля знаходилось на початку ходу каретки.

2) За шкалою на короткозамикачі визначається координата мінімуму z_{min_1} .

3) Шляхом переміщення поршня короткозамикача за його шкалою визначається координата z_{min_2} , за якої в місці розташування зонда вимірювальної лінії знову встановлюється мінімум.

4) Розраховується довжина хвилі НВЧ коливання у хвилеводі $\lambda_{\text{ХВ}}$ за формулою $\lambda_{\text{ХВ}} = 2|z_{\text{min}_2} - z_{\text{min}_1}|$.

При поздовжньому розподілі поля, який відповідає режиму змішаних хвиль, координати мінімумів (вузлів) не чітко виражені. Тоді для більш точного визначення розташування мінімумів i , відповідно, довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі $\lambda_{\text{хв}}$ можна скористуватися методом “вилки”, використовуючи ділянку характеристики з найбільшою крутизною. Для цього зонд виміральної лінії встановлюється в положення, яке є найближчим до мінімуму, відмічаються показники індикатора U і виконується відлік координати z^- , потім зонд переміщується на іншу сторону від мінімуму до відміченого показника U і виконується відлік координати z^+ (рис. 1.4).

Рисунок 1.4 – Метод “вилки” в

Положення мінімуму z_{min} визначається за формулою

$$z_{\text{min}} = \frac{z^- + z^+}{2}.$$

Домашнє завдання:

- 1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуватися до обговорення ключових питань.
- 2) Вивчіть технічний опис й інструкцію з експлуатації виміральної хвилеводної лінії P1-28 (див. Додаток А).
- 3) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який включає титульний лист установленого зразка, мету роботи, структурні схеми установок для вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі (див. Додаток Б).

Лабораторне завдання на експериментальній установці:

- 1) Зберіть установку і виконайте вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі **за допомогою нерухомого короткозамикача**:
 - визначте положення двох сусідніх мінімумів двома методами: шляхом установки зонда в точки мінімумів напруженості поля і методом “вилки”;
 - за існуючим положенням вузлів визначте довжину хвилі НВЧ коливання у хвилеводі.
- 2) Визначте довжину хвилі і частоту НВЧ коливання, яке формується генератором. Отримані результати відобразіть у табл. 1.1.
- 3) Порівняйте і поясніть отримані результати.

Примітка. Довжина хвилі λ НВЧ коливання, яке формує генератор, розраховується за формулою (1.3) з урахуванням $\lambda_{\text{кр}} = 2 \cdot 23 = 46$ мм; частота f НВЧ коливання, яке формує генератор, розраховується за формулою $f = \nu_0 / \lambda$, де $\nu_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла.

Таблиця 1.1 – Результати експериментальних досліджень

Вимірюваний параметр	Метод нерухомого короткозамикача	
	Установка зонда у точки мінімумів	Метод “вилки”
$z_{\min 1}$, мм		
$z_{\min 2}$, мм		
$\lambda_{\text{ХВ}}$, мм		
λ , мм		
f , ГГц		

Завдання для поглибленого вивчення (виконується факультативно):

4) Зберіть установку і виконайте вимірювання довжини НВЧ коливання у хвилеводі за допомогою **рухомого короткозамикача**:

– визначте відстань між сусідніми мінімумами шляхом переміщення поршня короткозамикача;

– за результатами вимірювань визначте хвилі НВЧ коливань у хвилеводі.

5) Визначте довжину хвилі і частоту НВЧ коливання, які формує генератор. Отримані результати відобразіть у табл. 1.2.

6) Порівняйте отримані результати з результатами табл. 1.1 й оцініть їх з точки зору точності.

Таблиця 1.2 – Результати експериментальних досліджень

Вимірюваний параметр	Метод рухомого короткозамикача	
	Установки зонда у точки мінімумів	Метод “вилки”
$z_{\min 1}$, мм		
$z_{\min 2}$, мм		
$\lambda_{\text{ХВ}}$, мм		
λ , мм		
f , ГГц		

Лабораторне завдання на віртуальній установці

(Лабораторна робота виконується на персональному комп'ютері):

1) Запустіть файл “ТЕД_ЛР 1 і 2.exe”. Вивчіть особливості графічного інтерфейсу і порядок проведення вимірювань на віртуальній лабораторній установці ВЛУ 1.

Порядковий номер бригади задається викладачем.

2) Виконайте вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі за допомогою нерухомого короткозамикача:

– визначте положення двох сусідніх мінімумів двома методами: шляхом установки зонда у точки мінімумів напруженості поля і методом “вилки”;

– за відомим положенням вузлів визначте довжину хвилі НВЧ коливання у хвилеводі.

3) Визначте довжину хвилі і частоту НВЧ коливання, що формується генератором. Отримані результати відобразіть у табл. 1.1.

4) Порівняйте і поясніть отримані результати.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

1) Титульний лист установленого зразка.

2) Мету роботи.

3) Структурні схеми установок для вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі.

4) Результати експериментального визначення положення вузлів і відстаней між сусідніми вузлами, розрахунки довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі, довжини хвилі і частоти НВЧ коливання, що формується генератором (табл. 1.1 і 1.2 у випадку виконання факультативного завдання).

5) Аналіз отриманих результатів і висновки.

Ключові питання:

1) Поясніть будову і принцип роботи хвилеводної вимірювальної лінії.

2) Зобразіть структурну схему установки для вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі за допомогою нерухомого короткозамикача.

3) Зобразіть структурну схему установки для вимірювання довжини хвилі НВЧ коливання у хвилеводі за допомогою короткозамкнутого поршня (короткозамкнутий поршень).

4) У чому полягає метод “вилки” визначення положення мінімуму напруженості поля?

5) Як за допомогою хвилеводної вимірювальної лінії визначити $\lambda_{\text{хв}}$?

6) Що таке “довжина хвилі НВЧ коливання у хвилеводі”?

7) Що таке “довжина хвилі НВЧ коливання, що формується генератором”?

8) Що таке “довжина хвилі НВЧ коливання у вільному просторі”?

9) Як визначити довжину хвилі НВЧ коливання, що формується генератором?

10) Як визначити частоту НВЧ коливання, яку формує генератор?

11) Поясніть графік поздовжнього розподілу напруженості поля.

2. Вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі

Мета роботи: вивчення будови та принципу роботи хвилеводної вимірювальної лінії; набуття навичок використання хвилеводної вимірювальної лінії для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ).

Ключові положення. Розглянемо відрізок регулярної направляючої системи, або просто – лінії передачі у вигляді хвилеводу, увімкненого між джерелом електромагнітних хвиль (генератором) і кінцевим пристроєм (навантаженням).

Нехай розміри направляючої системи такі, що в ній може поширюватися тільки один, основний тип хвиль. Згідно з хвильовою моделлю, підключення навантаження на кінці хвилеводу призводить, у загальному випадку, до появи у хвилеводі крім бігучої хвилі до навантаження – *падаючої хвилі*, додаткової хвилі, що поширюється від навантаження до генератора – *відбитої хвилі*.

Для характеристики навантаження, тобто для оцінки його “здібностей” поглинати потужність падаючої хвилі або ступеня узгодження лінії з навантаженням, використовують або комплексний коефіцієнт відбиття, або коефіцієнти бігучої або стоячої хвилі.

Комплексний коефіцієнт відбиття по електричному полю позначається через $\dot{\Gamma}_E$ і визначається за наступною формулою :

$$\dot{\Gamma}_E = \frac{\dot{E}_{\perp \text{ відб}} e^{-i\beta z}}{\dot{E}_{\perp \text{ пад}} e^{i\beta z}} = \dot{\Gamma}_H e^{-i2\beta z}, \quad \dot{\Gamma}_H = \Gamma_H e^{i\varphi_H}, \quad (1.7)$$

де:

- z – поздовжня координата направляючої системи, яка відраховується від навантаження, розташованого у перетині $z = 0$;
- $\dot{\Gamma}_H$ – комплексний коефіцієнт відбиття від навантаження;
- Γ_H, φ_H – модуль і аргумент (фаза) коефіцієнта відбиття від навантаження;
- $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{хв}}$ – поздовжнє хвильове число або коефіцієнт фази;
- $\lambda_{\text{хв}}$ – довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі, яка визначається за формулою (1.2)

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}},$$

де:

- $\lambda = v_0/f$ – довжина хвилі НВЧ коливання у середовищі, яке заповнює хвилевід;
- v_0 – швидкість світла у середовищі, яке заповняє хвилевід;
- f – частота НВЧ коливання, що формується генератором;
- $\lambda_{\text{кр}}$ – критична довжина хвилі НВЧ коливання в направляючій системі (для основного типу хвилі H_{10} прямокутного хвилеводу $\lambda_{\text{кр}} = 2a$).

Коефіцієнт відбиття від навантаження можна розрахувати за відомим значенням опору лінії передачі Z_{XB} і комплексного опору навантаження $\dot{Z}_H = R_H + iX_H$ за наступною формулою:

$$\dot{\Gamma}_H = \Gamma_H e^{i\varphi_H} = \frac{\dot{Z}_H - Z_{XB}}{\dot{Z}_H + Z_{XB}} = \frac{R_H + iX_H - Z_{XB}}{R_H + iX_H + Z_{XB}}. \quad (1.8)$$

Модуль Γ_H і аргумент (фаза) φ_H коефіцієнта відбиття в місці підключення навантаження визначаються на основі виразів:

$$\Gamma_H = \frac{|\dot{Z}_H - Z_{XB}|}{|\dot{Z}_H + Z_{XB}|} = \frac{\sqrt{(R_H - Z_{XB})^2 + X_H^2}}{\sqrt{(R_H + Z_{XB})^2 + X_H^2}}, \quad (1.9)$$

$$\varphi_H = \begin{cases} \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - Z_{XB}}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + Z_{XB}}\right), & \text{при } R_H \geq Z_{XB}; \\ \pi + \arctg\left(\frac{X_H}{R_H - Z_{XB}}\right) - \arctg\left(\frac{X_H}{R_H + Z_{XB}}\right), & \text{при } R_H < Z_{XB}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Амплітуда сумарної напруженості поля в направляючій системі змінюється уздовж поздовжньої осі за наступним законом (1.4):

$$|\dot{E}_\Sigma(z)| = E_0 \sqrt{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos(2\beta z - \varphi_H)},$$

де z – поздовжня координата направляючої системи, яка відраховується від навантаження в бік генератора; E_0 – амплітуда падаючої хвилі.

З формули (1.4) випливає, що при $\Gamma_H \neq 0$ зі змінюванням координати z уздовж направляючої системи амплітуда сумарної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|$ також змінюється, приймаючи мінімальне $E_{\min} = E_0(1 - \Gamma_H)$ і максимальне $E_{\max} = E_0(1 + \Gamma_H)$ значення (рис. 1.1).

Коефіцієнт бігучої хвилі (КБХ) позначається $K_{\text{бх}}$ і визначається як відношення мінімального і максимального значення амплітуди напруженості поля, тобто за наступною формулою

$$K_{\text{бх}} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}. \quad (1.11)$$

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) позначається $K_{\text{сх}}$ і визначається як відношення мінімального і максимального значення сумарної амплітуди напруженості поля або як величина, зворотна коефіцієнту бігучої хвилі, тобто за наступною формулою

$$K_{\text{сх}} = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{1}{K_{\text{бх}}}. \quad (1.12)$$

Тому що $E_{\min} = 1 - \Gamma_H$, а $E_{\max} = 1 + \Gamma_H$, то

$$K_{\text{бх}} = \frac{1 - \Gamma_H}{1 + \Gamma_H}, \quad K_{\text{сх}} = \frac{1 + \Gamma_H}{1 - \Gamma_H}. \quad (1.13)$$

З викладеного випливає, що K_{cx} і K_{bx} можуть бути визначені за допомогою вимірних значень амплітуди сумарної напруженості поля у вузлі та пучності. На практиці вимірювання K_{cx} і K_{bx} можливо проводити за допомогою вимірювальної лінії.

Опис лабораторного стенда. Для проведення вимірювань у даній роботі використовується наступне обладнання (див. рис. 1.5 і 1.6): 1 – НВЧ-генератор; 2 – розв'язувальний феритовий вентиль; 3 – вимірювальна хвилеводна лінія Р1-28 (див. Додаток А); 4 – індикаторний пристрій (вимірювальний низькочастотний підсилювач); 5 – навантаження типу індуктивної та ємнісної щілини (індуктивна і ємнісна діафрагми); 6 – узгоджене навантаження (поглинаюче хвилеводне навантаження) (рис. 1.6).

Примітка. Вимірювальні лінії двох сусідніх робочих місць увімкненні до одного НВЧ-генератора через хвилеводний трійник і феритові вентиля, які служать для розв'язки вимірювальних трактів.

4

5

Рисунок 1.5 – Структурна схема установки для вимірювання КСХ (КБХ) двополюсників

4

6

5

Рисунок 1.6 – Структурна схема установки для вимірювання КСХ (КБХ) чотиріполюсників

Вимірювання $K_{сх}$ методом “максимум – мінімум”. Структурна схема установки для вимірювання КСХ (КБХ) двополосників зображена на рис. 1.5. Вимірювання $K_{сх}$ методом “максимум – мінімум” із використанням стрілочного індикатора проводиться наступним чином:

– каретка вимірювальної лінії переміщується у положення, яке відповідає максимальному відхиленню стрілки індикатора (мілівольтметра), і визначається значення U_{max} ;

– шляхом переміщення каретки вимірювальної лінії в положення, яке відповідає мінімальному відхиленню стрілки індикатора (мілівольтметра), визначається значення U_{min} ;

– на основі показників індикатора (мілівольтметра) U_{max} і U_{min} з урахуванням квадратичної характеристики детектора числове значення КСХ розраховується за формулою $K_{сх} = \sqrt{U_{max}/U_{min}}$.

За значенням $K_{сх}$ можна визначити $K_{бх}$ і модуль коефіцієнта відбиття Γ_n за формулами:

$$K_{бх} = \frac{1}{K_{сх}}, \quad \Gamma_n = \frac{K_{сх} - 1}{K_{сх} + 1}.$$

Вимірювання $K_{сх}$ чотиріполосників. Вимірювання $K_{сх}$ чотиріполосників проводиться за структурною схемою, відображеній на рис. 1.6, також за методом “максимум – мінімум”, який описано вище.

Відмінність цього випадку від попереднього у тому, що чотиріполосник, який досліджується, розташовується між вимірювальною лінією і узгодженим хвилеводним навантаженням.

Домашнє завдання:

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуйтеся до обговорення ключових питань.

2) **Рішіть задачу.** До прямокутного хвилеводу перетином 23×10 мм² з повітряним наповненням увімкнено генератор, який формує НВЧ коливання з частотою 9939 МГц. Хвильовий опір $Z_{хв}$ основного типу хвиль H_{10} на заданій частоті (довжина хвилі λ) рівняється

$$Z_{хв} = \frac{b}{a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \approx 217 \text{ Ом}.$$

Розрахуйте величини Γ_n , $K_{сх}$ і $K_{бх}$ для наступних чотирьох навантажень хвилеводу:

а) $Z_{н1} = 0$ Ом;

б) $Z_{н2} = 217$ Ом;

в) $Z_{н3} = 25(n + 1)$ кОм;

г) $Z_{н4} = 217 + i30(n - 5)$ Ом,

де n – остання цифра номера залікової книжки.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай остання цифра номера залікової книжки 3, тоді $n = 3$, і відповідно

$$\dot{Z}_{н3} = 25(3 + 1) \cdot 1000 = 100000 \text{ Ом}, \quad \dot{Z}_{н4} = 217 + i30(3 - 5) = 217 - i60 \text{ Ом},$$

або остання цифра номера залікової книжки 8, тоді $n = 8$, і відповідно

$$\dot{Z}_{н3} = 25(8 + 1) \cdot 1000 = 225000 \text{ Ом}, \quad \dot{Z}_{н4} = 217 + i30(8 - 5) = 217 + i90 \text{ Ом}.$$

Методичні вказівки для рішення домашньої задачі. Для розрахунку Γ_n можна скористатися формулою (1.9), а для розрахунків $K_{сх}$ і $K_{бх}$ відповідними формулами (1.13).

3) Підготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який містить титульну сторінку устанавленого зразка, мету роботи, рішення задачі, структурні схеми установок для вимірювання КСХ (КБХ) (див. Додаток Б).

Лабораторне завдання на експериментальній установці:

1) Зберіть установку для вимірювання КСХ у хвилеводі і налаштуйте вимірювальну хвилеводну лінію при максимальному зануренні зонда.

2) Виміряйте максимальне U_{\max} і мінімальне U_{\min} значення відносної амплітуди напруженості поля для трьох навантажень хвилеводу: відкритий кінець хвилеводу, індуктивна й ємнісна діафрагми.

Зовнішній вигляд і еквівалентні схеми індуктивної й ємнісної діафрагм зображені на рис. 1.7.

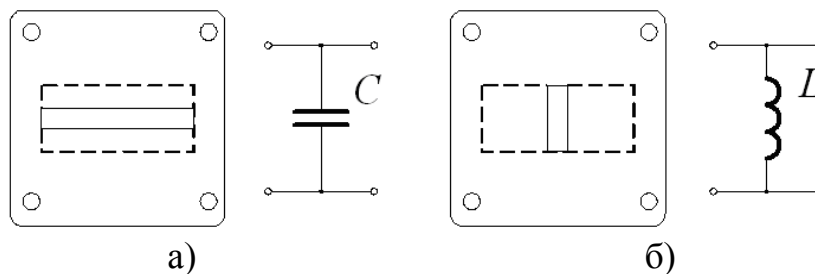


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд і еквівалентна схема:
а) ємнісної; б) індуктивної діафрагм

3) За виміряними значеннями U_{\max} і U_{\min} визначте КСХ, КБХ і модуль коефіцієнта відбиття Γ_n . Отримані результати відобразіть у табл. 1.3.

4) Порівняйте і поясніть отримані результати.

Таблиця 1.3 – Результати експериментальних досліджень

Вимірний параметр	Навантаження “відкритий кінець хвилеводу”	Навантаження “індуктивна діафрагма”	Навантаження “ємнісна діафрагма”
Максимальна глибина занурення зонда			
U_{\max} , мВ			
U_{\min} , мВ			
$K_{\text{сх}}$			
$K_{\text{бх}}$			
$\Gamma_{\text{н}}$			

Завдання для поглибленого вивчення (виконується факультативно):

5) Зменшіть глибину занурення зонда вимірювальної хвилеводної лінії так, щоб показання індикатора в пучності зменшились приблизно у десять разів (порівняно з показаннями при максимальному зануренні зонда) і налаштуйте, при цьому, вимірювальну хвилеводну лінію.

6) Виміряйте максимальне U_{\max} і мінімальне U_{\min} значення відносної амплітуди напруженості поля для тих самих трьох навантажень хвилеводу: відкритий кінець хвилеводу, індуктивна і ємнісна діафрагми.

7) За вимірними значеннями U_{\max} і U_{\min} визначте КСХ, КБХ і модуль коефіцієнта відбиття $\Gamma_{\text{н}}$. Отримані результати відобразіть у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати експериментальних досліджень

Вимірний параметр	Навантаження “відкритий кінець хвилеводу”	Навантаження “індуктивна діафрагма”	Навантаження “ємнісна діафрагма”
Зменшена глибина занурення зонда			
U_{\max} , мВ			
U_{\min} , мВ			
$K_{\text{сх}}$			
$K_{\text{бх}}$			
$\Gamma_{\text{н}}$			

8) Порівняйте і поясніть отримані результати з точки зору їх точності (за різної глибини занурення зонда).

Лабораторне завдання на віртуальній установці

(Лабораторна робота виконується на персональному комп'ютері):

1) Запустіть файл “ТЕД_ЛР 1 і 2.exe”. Вивчіть особливості графічного інтерфейсу і порядок проведення вимірювань на віртуальній лабораторній установці (ВЛУ 1) (див. Додаток Г).

Порядковий номер бригади задається викладачем.

2) Виміряйте максимальне U_{\max} і мінімальне U_{\min} значення відносної амплітуди напруженості поля для трьох навантажень хвилеводу: відкритий кінець хвилеводу, індуктивна і ємнісна діафрагми.

3) За вимірними значеннями U_{\max} і U_{\min} визначте КСХ, КБХ і модуль коефіцієнта відбиття Γ_n . Отримані результати відобразіть у табл. 1.3.

4) Порівняйте і поясніть отримані результати.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

- 1) Титульний лист установленого зразка.
- 2) Мету роботи.
- 3) Рішення домашньої задачі.
- 4) Структурні схеми установок для вимірювання КСХ (КБХ).
- 5) Результати вимірювань КСХ, а також розрахунків КБХ і модуля коефіцієнта відбиття Γ_n для усіх навантажень (табл. 1.3 і 1.4 у випадку виконання факультативного завдання).
- 6) Аналіз отриманих результатів і висновки.

Ключові питання:

- 1) Поясніть будову і принцип роботи хвилеводної вимірювальної лінії.
- 2) Дайте визначення коефіцієнта відбиття, КБХ, КСХ.
- 3) Які межі зміни модуля коефіцієнта відбиття, КБХ, КСХ.
- 4) Запишіть формулу, що пов'язує модуль коефіцієнта відбиття з коефіцієнтами бігучої і стоячої хвилі.
- 5) Запишіть формулу, що пов'язує коефіцієнт відбиття з опором навантаження.
- 6) Зобразіть структурну схему установки вимірювання КСХ (КБХ) у хвилеводі.
- 7) Як за допомогою хвилеводної вимірювальної лінії визначити K_{cx} ?
- 8) Чому точність вимірювання K_{cx} змінюється зі зміною глибини занурення зонда вимірювальної лінії?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ХВИЛЕВОДНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

Мета роботи: Дослідження режимів роботи хвильоводної лінії передачі; вимірювання коефіцієнтів бігучої і стоячої хвиль, коефіцієнта відбиття від навантаження.

Ключові положення. Згідно з хвильовою моделлю, на регулярній ділянці будь-якої лінії передачі електромагнітне поле можна представити у вигляді суперпозиції (накладення) падаючої і відбитої хвиль (див. рис. 2.1).

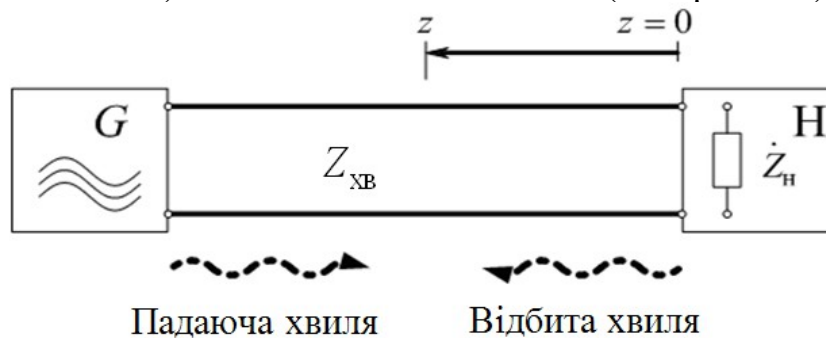


Рисунок 2.1 – Падаюча і відбита хвилі у лінії передачі

Падаючою хвилею називають хвилю, що створюється генератором і поширюється у направляючій системі від генератора до навантаження.

Вважаючи, що лінія передачі, втратами якої можна знехтувати, зорієнтована уздовж осі z і її початок відповідає місцю включення навантаження ($z = 0$) (рис. 2.1), комплексну амплітуду падаючої хвилі можна записати у наступному вигляді

$$\dot{E}_m^{\text{пад}} = E_0 e^{i\beta z}, \quad (2.1)$$

де:

- z – поздовжня координата направляючої системи, яка відраховується від навантаження, розташованого у перетині $z = 0$;
- E_0 – амплітуда падаючої хвилі;
- $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{хв}}$ – коефіцієнт фази або поздовжнє хвильове число;
- $\lambda_{\text{хв}}$ – довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі, яка визначається за формулою (1.2)

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}},$$

де $\lambda = v_0/f$ – довжина хвилі НВЧ коливання у середовищі, що заповнює хвильовід; v_0 – швидкість світла у середовищі, що заповнює хвильовід; f – частота НВЧ коливання, що формується генератором; $\lambda_{\text{кр}}$ – критична довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі (для основного типу хвилі H_{10} пря-

мокутного хвилеводу $\lambda_{кр} = 2a$; a – розмір широкої стінки прямокутного хвилеводу).

Відбитою хвилею називають хвилю, що породжується навантаженням (або неоднорідністю) і поширюється у зворотньому напрямку, тобто від навантаження до генератора. У прийнятій системі координат комплексна амплітуда відбитої хвилі має наступний вид

$$\dot{E}_m^{\text{відб}} = E_0 \Gamma_H e^{i\varphi_H} e^{-i\beta z}, \quad (2.2)$$

де Γ_H , φ_H – модуль і аргумент (фаза) коефіцієнта відбиття від навантаження.

Режимом бігучої хвилі називається режим, за якого амплітуда відбитої хвилі дорівнює нулю. При цьому, навантаження узгоджене з лінією передачі, тобто \dot{Z}_H чисто активне і дорівнює хвильовому опору лінії передачі $Z_{ХВ}$, тобто $\dot{Z}_H = R_H = Z_{ХВ}$.

Режим стоячих хвиль має місце, коли у лінії передачі амплітуда відбитої хвилі дорівнює амплітуді падаючої хвилі. Це можливо, якщо опір навантаження задовольняє одній із наступних умов: $\dot{Z}_H = \pm iX_H$ (навантаження чисто реактивне); $\dot{Z}_H = 0$ (ідеальне “коротке замикання”); $Z_H = \infty$ (ідеальний “холостий хід”). В усіх цих випадках навантаження не поглинає енергію, що переноситься падаючою хвилею.

На практиці, частіше за все, має місце режим змішаних хвиль коли у лінії передачі поширюються одночасно і падаюча, і відбита хвилі, проте амплітуда відбитої хвилі менша за амплітуду падаючої хвилі. В цьому випадку опір навантаження $\dot{Z}_H = R_H + iX_H$ має активну складову R_H , на якій поглинається частина енергії, що переноситься падаючою хвилею.

Відомо, що падаюча і відбита хвиля є ортогональними, тобто, потужність, що переноситься падаючою хвилею, не залежить від наявності відбитої хвилі.

Накладення падаючої і відбитої хвиль у лінії передачі приводить до інтерференції, тобто до утворення уздовж лінії передачі максимумів і мінімумів напруженості поля. При цьому, максимальне (мінімальне) значення спостерігається в тих точках, де падаюча і відбита хвилі знаходяться у фазі (проти-фазні).

За відсутності втрат у лінії, або коли втратами у лінії передачі можна знехтувати, амплітуда сумарної хвилі у кожному перетині лінії передачі визначається за формулою (1.4):

$$|\dot{E}_z(z)| = E_0 \sqrt{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos(2\beta z - \varphi_H)}, \quad (2.3)$$

в якій модуль Γ_H і аргумент (фаза) φ_H коефіцієнта відбиття від навантаження можна обчислити за формулами (1.9) і (1.10) відповідно:

$$\Gamma_H = \frac{|\dot{Z}_H - Z_{ХВ}|}{|\dot{Z}_H + Z_{ХВ}|} = \frac{\sqrt{(R_H - Z_{ХВ})^2 + X_H^2}}{\sqrt{(R_H + Z_{ХВ})^2 + X_H^2}}; \quad (2.4)$$

$$\varphi_{\text{H}} = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{\text{H}}}{R_{\text{H}} - Z_{\text{XB}}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + Z_{\text{XB}}}\right), & \text{при } R_{\text{H}} \geq Z_{\text{XB}}; \\ \pi + \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{\text{H}}}{R_{\text{H}} - Z_{\text{XB}}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{X_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + Z_{\text{XB}}}\right), & \text{при } R_{\text{H}} < Z_{\text{XB}}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Приклади поздовжніх розподілів амплітуди сумарної напруженості поля у лінії передачі без втрат для режимів бігучих ($\Gamma_{\text{H}} = 0$), стоячих ($\Gamma_{\text{H}} = 1$) і змішаних ($0 < \Gamma_{\text{H}} < 1$) хвиль, розрахованих на основі формули (2.3), зображені на рис. 2.2.

Рисунок 2.2 – Поздовжній розподіл напруженості поля

Із формули (2.3) і рис. 2.2 випливає:

а) Якщо $\Gamma_{\text{H}} \neq 0$ (режими стоячої і змішаних хвиль), то зі зміною координати z уздовж направляючої системи, змінюється амплітуда напруженості поля $|\dot{E}_{\Sigma}(z)|$, приймаючи в точках (див. також (1.5) і (1.6))

$$z_{n\min} = \frac{\lambda_{\text{XB}}}{4} \left(\frac{\varphi_{\text{H}}}{\pi} + 2n - 1 \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.6)$$

$$z_{n\max} = \frac{\lambda_{\text{XB}}}{4} \left(\frac{\varphi_{\text{H}}}{\pi} + 2(n - 1) \right), \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.7)$$

мінімальне $E_{n\min}$ і максимальне $E_{n\max}$ значення, які визначаються за наступними формулами

$$\begin{aligned} E_{n\min} &= E_0(1 - \Gamma_{\text{H}}), \\ E_{n\max} &= E_0(1 + \Gamma_{\text{H}}). \end{aligned} \quad (2.8)$$

б) Відстань між сусідніми мінімумами (вузлами) або максимумами (пучностями) дорівнює $\lambda_{\text{XB}}/2$.

в) При $\Gamma_{\text{H}} = 1$ (режим стоячої хвилі) амплітуда напруженості поля $|\dot{E}_{\Sigma}(z)|$ у вузлі дорівнює нулю, а в пучності дорівнює подвоєній амплітуді падаючої хвилі.

г) При $\Gamma_{\text{H}} = 0$ (режим бігучої хвилі) амплітуда напруженості поля $|\dot{E}_{\Sigma}(z)|$ у лінії передачі постійна уздовж хвилеводу.

Режим роботи лінії передачі в інженерній практиці прийнято характеризувати або *коефіцієнтом відбиття*, або *коефіцієнтом бігучої хвилі* (КБХ), або *коефіцієнтом стоячої хвилі* (КСХ).

За відсутності втрат у лінії передачі модуль коефіцієнта відбиття Γ_n не залежить від поздовжньої координати z , тому всі мінімуми і максимуми поздовжнього розподілу амплітуди напруженості поля $|\dot{E}_z(z)|$ у лінії відповідно однакові і КБХ (КСХ) постійні уздовж лінії.

Ефективність передачі потужності в навантаження прийнято характеризувати *коефіцієнтом корисної дії* (ККД), що дорівнює відношенню потужності P_n , яка виділяється в навантаженні, до потужності падаючої хвилі P_p , яка віддається генератором у лінію передачі. Відбиття падаючої хвилі від навантаження приводить до зменшення потужності, що віддається у навантаження в $\eta_0 = 1 - \Gamma_n^2$ разів і тому ККД лінії передачі без втрат дорівнює

$$\eta = \frac{P_n}{P_p} = \eta_0 = 1 - \Gamma_n^2 = \frac{4K_{\text{бх}}}{(1 + K_{\text{бх}})^2}. \quad (2.7)$$

Зі співвідношення (2.7) випливає, що найбільш сприятливі умови для передачі потужності мають місце при режимі узгодження, тобто при $K_{\text{бх}} = 1$. Режим узгодження лінії передачі найбільш сприятливий і з точки зору досягнення максимальної електричної міцності. Треба пам'ятати, що через збільшення амплітуди напруженості поля у неузгодженому хвилеводі може відбутися електричний пробій.

У реальних лініях передачі, з низки причин (частотна залежність опору навантаження, додаткові відбиття від нерегулярностей), режим ідеального узгодження виявляється недосяжним. Тому у технічних умовах оговорюється найменш допустиме значення КБХ, як для навантажень, так і для лінії передачі в цілому. Звичайно орієнтуються на допустиме значення КБХ не нижче 0,7... 0,8, хоча зустрічаються випадки, наприклад, у лініях передачі приймальних антен короткохвильового діапазону, коли допустиме значення КБХ знижується до 0,3...0,4.

Опис лабораторного стенда. Для проведення вимірювань у даній роботі використовується наступне обладнання (рис. 2.3 і 2.4): 1 – НВЧ-генератор; 2 – розв'язувальний феритовий вентиль; 3 – вимірювальна хвилеводна лінія Р1-28 (див. Додаток В); 4 – навантаження типу “короткого замикання” – металева пластина (рис. 2.3); 4 – неоднорідність послідовна (навантаження типу індуктивна або ємнісна діафрагми) (рис. 2.4); 5 – індикаторний прилад (вимірювальний низькочастотний підсилювач); 6 – узгоджене навантаження (поглинаюче хвилевідне навантаження) (рис. 2.4).

Примітка. Вимірювальні хвилеводні лінії двох сусідніх робочих місць підключені до одного НВЧ-генератора через хвилеводний трійник і феритові вентиля, що служать для розв'язки вимірювальних трактів.

Рисунок 2.3 – Структурна схема установки для дослідження позовжнього розподілу відносної напруженості поля у лінії передачі з навантаженням типу “короткого замикання”

6

4

Рисунок 2.4 – Структурна схема установки для дослідження позовжнього розподілу відносної напруженості поля у лінії передачі з неоднорідністю послідовною й узгодженим навантаженням

Домашнє завдання:

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуватись до обговорення ключових запитань.

2) **Рішіть задачу.** До прямокутного хвилеводу, перетином $23 \times 10 \text{ мм}^2$ з повітряним заповненням, підключений генератор, який формує НВЧ коливання з частотою 9939 МГц. Хвильовий опір $Z_{\text{хв}}$ основного типу хвилі H_{10} на заданій частоті (довжині хвилі λ) буде дорівнювати

$$Z_{\text{хв}} = \frac{b}{a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \approx 217 \text{ Ом}; \quad \lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \approx 40 \text{ мм}.$$

Розрахуйте і відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ для наступних трьох навантажень хвилеводу:

а) $\dot{Z}_{н1} = 0$ Ом;

б) $\dot{Z}_{н2} = 217$ Ом;

в) $\dot{Z}_{н3} = 217 + i30(n - 5)$ Ом,

де n – остання цифра номера залікової книжки.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай остання цифра номера залікової книжки 3, тоді $n = 3$ і, відповідно

$$\dot{Z}_{н3} = 217 - i30(3 - 5) = 217 + i60 \text{ Ом,}$$

або остання цифра номера залікової книжки 8, тоді $n = 8$, і відповідно

$$\dot{Z}_{н3} = 217 - i30(8 - 5) = 217 - i90 \text{ Ом.}$$

Методичні вказівки до рішення домашньої задачі. Для розрахунку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж ідеального прямокутного хвилеводу можна скористатися формулою (2.3), в якій Γ_n , φ_n – модуль і аргумент (фаза) коефіцієнта відбиття в місці включення навантаження, визначаються за відповідними формулами (2.4) і (2.5), а коефіцієнт фази, або поздовжнє хвильове число β – за формулою $\beta = 2\pi/\lambda_{хв}$. Залежності необхідно розраховувати і відображати в межах зміни z від 0 до 60 мм з інтервалом не більшим, ніж 4 мм. Для більш точного визначення місця знаходження екстремумів (положення мінімумів z_{\min} і максимумів z_{\max} поздовжнього розподілу відносної напруженості поля), можна скористатися формулами (2.6) і (2.7) відповідно.

Розрахунок і побудову графіків можна виконувати за допомогою спеціалізованих програм, наприклад, MathCAD, MATLAB або ін.

3) Заготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який включає титульний лист установленого зразка, мету роботи, рішення задачі, структурні схеми установок для дослідження поздовжнього розподілу відносної напруженості поля у лінії передачі (див. Додаток Б).

Лабораторне завдання на експериментальній установці:

1) Зберіть установку для дослідження поздовжнього розподілу відносної напруженості поля у лінії передачі (рис. 2.3) і перевірте налаштування вимірювальної хвилеводної лінії.

2) Виконайте вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі для наступних видів хвилевідних навантажень:

– $\dot{Z}_{н1} = 0$ Ом, КЗ – коротке замикання (рис. 2.3);

– $\dot{Z}_{н2} = Z_B = 217$ Ом, УН – поглинаюче (узгоджене) хвилеводне навантаження (рис. 2.4 – без навантаження 4);

– $\dot{Z}_{н3}$ Ом, ВКХ – відкритий кінець хвилеводу (рис. 2.3 – без навантажен-

ня 4);

Результати вимірювань відобразіть у табл. 2.1.

3) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектору. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати експериментальних досліджень

z , мм																			
$U(z)$, мВ при $\dot{Z}_{H1} = 0$ Ом, КЗ																			
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при $\dot{Z}_{H1} = 0$ Ом, КЗ																			
z , мм																			
$U(z)$, мВ при $\dot{Z}_{H2} = 217$ Ом, УН																			
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при $\dot{Z}_{H2} = 217$ Ом, УН																			
z , мм																			
$U(z)$, мВ при \dot{Z}_{H3} Ом, ВКХ																			
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при \dot{Z}_{H3} Ом, ВКХ																			

4) Відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж прямокутного хвилеводу для усіх трьох навантажень хвилеводу.

5) Визначте КБХ, КСХ і модуль коефіцієнта відбиття для усіх трьох навантажень хвилеводу.

6) Оцініть і поясніть отримані результати.

Завдання для поглибленого вивчення (виконується факультативно):

7) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі для наступних видів хвилеводного навантаження:

- $\dot{Z}_{H1} = 0$ Ом, КЗ – коротке замикання (рис. 2.3);
- $\dot{Z}_{H4} = \dot{Z}_c$ Ом, ЄН – ємнісна діафрагма (рис. 1.7), навантажена поглинаючим (узгодженим) хвилеводним навантаженням (рис. 2.4).

Результати вимірювань відобразіть у табл. 2.2.

8) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати експериментальних досліджень

z , мм															
$U(z)$, мВ при $\dot{Z}_{H1} = 0$ Ом, КЗ															
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при $\dot{Z}_{H1} = 0$ Ом, КЗ															
z , мм															
$U(z)$, мВ при $\dot{Z}_{H4} = \dot{Z}_c$ Ом, ЄН															
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при $\dot{Z}_{H4} = \dot{Z}_c$ Ом, ЄН															

9) Відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж прямокутного хвилеводу для цих навантажень.

10) З використанням отриманих значень розрахуйте комплексний опір навантаження \dot{Z}_H .

Методичні вказівки до розрахунку комплексного опору навантаження.

На основі результатів експериментальних досліджень комплексний опір навантаження \dot{Z}_H можна розрахувати за формулою

$$\begin{aligned} \dot{Z}_H &= Z_{XB} \frac{1 + \Gamma_H e^{i\varphi_H}}{1 - \Gamma_H e^{i\varphi_H}} = \\ &= Z_{XB} \left[\frac{1 - \Gamma_H^2}{1 + \Gamma_H^2 - 2\Gamma_H \cos\varphi_H} + i \frac{2\Gamma_H \sin\varphi_H}{1 + \Gamma_H^2 - 2\Gamma_H \cos\varphi_H} \right], \end{aligned}$$

де $Z_{\text{ХВ}}$ – хвильовий опір основного типу хвилі у лінії передачі; $\Gamma_{\text{Н}}$, $\varphi_{\text{Н}}$ – модуль і аргумент (фаза) коефіцієнта відбиття від навантаження, для розрахунку яких можна використати наступні формули:

$$\Gamma_{\text{Н}} = \frac{K_{\text{сх}} - 1}{K_{\text{сх}} + 1},$$

де $K_{\text{сх}} = \sqrt{U_{\text{max}}/U_{\text{min}}}$; U_{max} і U_{min} – максимальне та мінімальне значення відносної напруженості поля (рис. 2.5) визначаються із табл. 2.2;

$$\varphi_{\text{Н}} = 2\beta \Delta z^{\text{min}} - \pi = \pi \left(\frac{4\Delta z^{\text{min}}}{\lambda_{\text{ХВ}}} - 1 \right),$$

де:

- $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{ХВ}}$ – коефіцієнт фази або поздовжнє хвильове число;

- $\lambda_{\text{ХВ}}$ – довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі;

- Δz^{min} – мінімальна відстань між двома місцями розташування $z_{\text{min}}^{\text{КЗ}}$ і $z_{\text{min}}^{\text{ЄН}}$ (рис. 2.5), що відраховується від $z_{\text{min}}^{\text{КЗ}}$ у напрямку до джерела НВЧ коливання (до генератора); значення $z_{\text{min}}^{\text{КЗ}}$ і $z_{\text{min}}^{\text{ЄН}}$ визначаються із табл. 2.2.

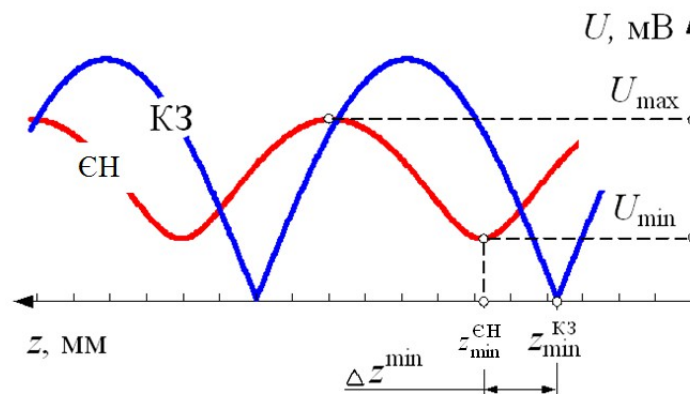


Рисунок 2.5 – До розрахунку комплексного опору навантаження

З урахуванням використання направляючої системи у виді прямокутного хвилеводу перетином $23 \times 10 \text{ мм}^2$ з повітряним заповненням, до якого підключений генератор, що формує НВЧ коливання з частотою 9939 МГц, хвильовий опір $Z_{\text{ХВ}}$ і довжина хвилі $\lambda_{\text{ХВ}}$ основного типу H_{10} будуть дорівнювати: $Z_{\text{ХВ}} \approx 217 \text{ Ом}$; $\lambda_{\text{ХВ}} \approx 40 \text{ мм}$.

Лабораторне завдання на віртуальній установці

(Лабораторна робота виконується на персональному комп'ютері):

1) Запустіть файл “ТЕД_ЛР 1 і 2.exe”. Вивчіть особливості графічного інтерфейсу і порядок проведення вимірювань на віртуальній лабораторній установці (ВЛУ 1) (див. Додаток Г).

Порядковий номер бригади задається викладачем.

2) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_{\Sigma}(z)|/E_0$ уздовж лінії передачі для наступних видів хвилеводного навантаже-

ння:

- $Z_{н1} = 0$ Ом, КЗ – коротке замикання;
- $Z_{н2} = Z_{хв} = 217$ Ом, УН – поглинаюче (узгоджене) хвилеводне навантаження;
- $Z_{н3}$ Ом, ВКХ – відкритий кінець хвилеводу.

Результати вимірювань відобразіть у табл. 2.1.

3) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 2.1.

4) Відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж прямокутного хвилеводу для усіх трьох навантажень хвилеводу.

5) Оцініть і поясніть отримані результати.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

- 1) Титульний лист установленого зразка.
- 2) Мету роботи.
- 3) Рішення домашньої задачі.
- 4) Структурні схеми установок для вимірювання поздовжнього розподілу відносної напруженості поля у лінії передачі.
- 5) Результати вимірювань відносної напруженості поля уздовж лінії передачі для різних навантажень (табл. 2.1, а також табл. 2.2 і результати розрахунку комплексного опору навантаження $Z_{н}$ у випадку виконання факультативного завдання).
- 6) Графіки залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ від координати уздовж лінії передачі для різних типів навантаження.
- 7) Аналіз отриманих результатів і висновки.

Ключові питання:

- 1) Охарактеризуйте режими бігучої, стоячої та змішаних хвиль.
- 2) Дайте визначення коефіцієнта відбиття, КБХ, КСХ.
- 3) Запишіть формули, що пов'язують коефіцієнт відбиття з коефіцієнтом бігучої хвилі, з коефіцієнтом стоячої хвилі і опором навантаження.
- 4) Чим визначається ефективність передачі потужності в навантаження?
- 5) Від чого залежить ККД лінії передачі?
- 6) Зобразіть структурну схему установки для дослідження поздовжнього розподілу відносної напруженості поля у лінії передачі, поясніть її роботу і

призначення всіх елементів.

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ УЗГОДЖЕННЯ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ З ДОВІЛЬНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Мета роботи: дослідження способів узгодження хвильоводної лінії передачі з навантаженням; набуття навичок вузькосмугового узгодження хвильоводу з навантаженням.

Ключові положення. Відомо, що оптимальним режимом роботи лінії передачі є *режим бігучої хвилі*, за якого ККД лінії передачі $\eta = 1$, що досягається узгодженням лінії передачі з навантаженням (див. (2.7) при $K_{\text{бх}} = 1$). Цей режим, якщо не виконується умова $K_{\text{бх}} \neq 1$, забезпечується, шляхом розташування між кінцем лінії передачі і навантаженням *узгоджуючого пристрою*, який із міркувань отримання високого ККД лінії передачі, виготовляється із реактивних елементів (без омичних втрат).

Найчастіше використовується, так зване *вузькосмугове узгодження*, за якого режим бігучої хвилі досягається на єдиній розрахунковій частоті. При відхиленні частоти від розрахункової величини виникає неузгодженість і спостерігається зниження $K_{\text{бх}}$. Смуга частот, для яких $K_{\text{бх}}$ перевищує встановлене допустиме значення $K_{\text{бх min}}$, називається *смугою частот узгодження*. При вузькосмуговому узгодженні смуга частот узгодження не контролюється. Вона визначається шляхом перевірного розрахунку, або експериментально.

При *широкосмуговому узгодженні* номінали узгоджуючих елементів визначаються із умови досягнення максимальної смуги частот узгодження.

При вузькосмуговому узгодженні достатньо компенсувати відбиття від навантаження на вибраній частоті, вносячи у лінію передачі додаткове відбиття. При цьому, для розширення смуги узгодження прагнуть зменшити довжину узгоджуючого пристрою та розташувати його якомога ближче до навантаження. Тоді при відхиленні частоти від розрахункової величини, зміна електричних довжин в узгоджуючому пристрої буде найменшою і неузгодженість зі зміною частоти буде зростати повільніше. При вузькосмуговому узгодженні звичайно використовують трансформатори у вигляді відрізків ліній передачі зі змінним хвильовим опором, а також розподілені і зосереджені реактивності (наприклад, шлейфи, діафрагми, стрижні), розташовані в потрібному перетині лінії передачі.

Шлейфом називають відрізок регулярної лінії передачі кінцевої довжини $L_{\text{ш}}$, навантажений з одного боку навантаженням величиною $\dot{Z}_{\text{н}}^{\text{ш}}$. Якщо змінювати довжину шлейфу $L_{\text{ш}}$, то вхідний опір $\dot{Z}_{\text{вх}}^{\text{ш}}$ шлейфу буде змінюватися у певних межах. На практиці, частіше за все, використовують реактивні шлейфи, в яких $\dot{Z}_{\text{н}}^{\text{ш}} = 0$ (короткозамкнуті шлейфи). Вхідний опір короткозамкнутого шлейфу завжди реактивний і визначається за наступною формулою

$$\dot{Z}_{\text{ВХ}}^{\text{ш}} = iZ_{\text{ХВ}}^{\text{ш}} \operatorname{tg} \frac{2\pi L_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ХВ}}}, \quad (3.1)$$

де $Z_{\text{ХВ}}^{\text{ш}}$ – хвильовий опір короткозамкнутого шлейфу.

Із формули (3.1) видно, що за допомогою короткозамкнутого шлейфу можна створити реактивне навантаження будь-якої величини. Наприклад, якщо $L_{\text{ш}}/\lambda_{\text{ХВ}}$ змінюється від нуля до 0,25, то вхідний опір короткозамкнутого шлейфу є *індуктивним* і змінюється від нуля до нескінченності. Якщо ж $L_{\text{ш}}/\lambda_{\text{ХВ}}$ змінюється від 0,25 до 0,5, то вхідний опір короткозамкнутого шлейфу є *емнісним* і змінюється від нескінченності до нуля.

Узгодження за допомогою зосереджених реактивностей. Цей метод був розроблений у 1931 р. В.В. Татариним і широко застосовується практично в усіх діапазонах довжин хвиль – від середніх до міліметрових.

Суть методу полягає в наступному. Якщо лінія передачі навантажена на опір, що не дорівнює хвильовому $Z_{\text{н}} \neq Z_{\text{ХВ}}$, то згідно з хвильовою моделлю у направляючій системі з'являється відбита хвиля. Якщо включити перед навантаженням будь-який реактивний елемент, від якого також відбивається хвиля, можна так підібрати величину реактивного опору (чи провідності) і місце розташування цього елемента, що хвилі відбиті від навантаження і відбиті від реактивного елемента будуть мати однакові амплітуди і протилежні фази, і тому будуть компенсувати одна одну (їх сума дорівнює нулю). У лінії передачі від генератора до місця включення узгоджувача буде існувати тільки бігуча хвиля.

Схеми заміщення для послідовної і паралельної реактивності показані на рис. 3.1. Для налаштування лінії передачі в режим бігучої хвилі, в кожній схемі слід вибрати місце включення реактивності та її величину.

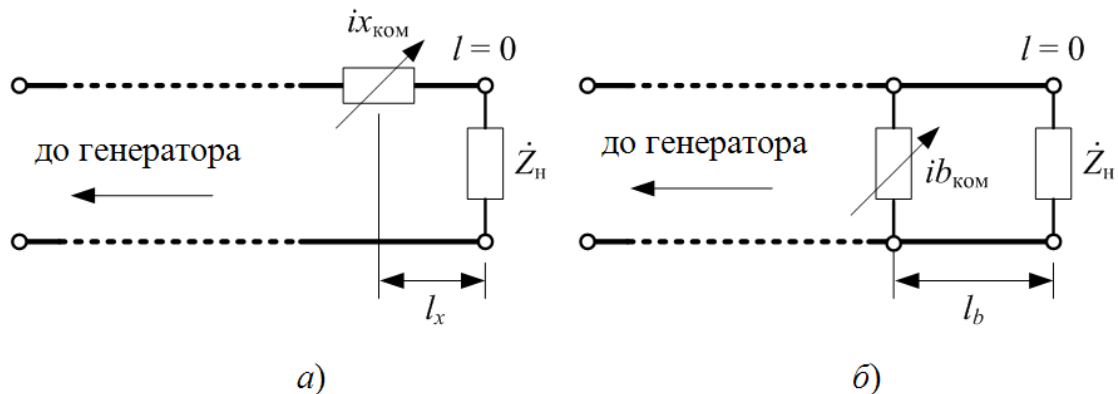


Рисунок 3.1 – Схеми заміщення: а) для послідовної; б) для паралельної реактивності

Послідовна компенсуюча реактивність $ix_{\text{КОМ}}$ (рис. 3.1, а) повинна бути включена в такий перетин лінії l_x , де дійсна частина повного опору точно дорівнює хвильовому опору лінії передачі. Уявна частина опору в цій точці в сумі з $x_{\text{КОМ}}$ може бути рівною нулю, що і забезпечить ідеальне узгодження на розрахунковій частоті.

У другому випадку компенсуюча реактивність $ib_{\text{КОМ}}$ підключається паралельно навантаженню на відстані l_b (рис. 3.1, б), де дійсна частина повної провідності точно дорівнює хвильовій провідності лінії передачі. Уявна частина провідності в цій точці в сумі з $b_{\text{КОМ}}$ може бути рівною нулю.

Узгодження за допомогою чвертьхвильового трансформатора. Цей метод вузькосмугового узгодження базується на використанні, так званого, чвертьхвильового трансформатора, що являє собою відрізок регулярної направляючої системи довжиною $\lambda_{\text{ХВ}}/4$, який включається безпосередньо між активним навантаженням $R_{\text{Н}}$ і хвилеводом з хвильовим опором $Z_{\text{ХВ}} \neq R_{\text{Н}}$. Якщо хвильовий опір трансформатора $Z_{\text{ТР}}$ вибрати рівним

$$Z_{\text{ТР}} = \sqrt{Z_{\text{ХВ}} R_{\text{Н}}}, \quad (3.2)$$

то на частоті, що відповідає вибраній $\lambda_{\text{ХВ}}$, відбиття від входу трансформатора будуть відсутні. Фізично це можна пояснити тим, що на цій частоті відбувається компенсація хвиль, відбитих від навантаження та входу трансформатора.

Чвертьхвильовий трансформатор широко використовується для з'єднання двох ліній передачі однакового типу, але з різними хвильовими опорами, величина яких визначається поперечними розмірами ліній передачі (рис. 3.2).

Наприклад, хвильовий опір двопровідної лінії та коаксіального кабелю, прямокутного хвилеводу з хвилею типу H_{10} і несиметричною смужковою (мікросмужковою) лінією визначаються відповідно наступними формулами:

$$Z_{\text{ХВ}} = 276 \lg \frac{D}{r}, \quad (3.3)$$

де D – відстань між провідниками двопровідної лінії; r – радіус провідників;

$$Z_{\text{ХВ}} = 60 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (3.4)$$

де μ , ε – відносні магнітна та діелектрична проникності середовища, що заповнює простір між провідниками коаксіального кабелю; r_1 і r_2 – радіуси внутрішнього і зовнішнього провідників коаксіального кабелю;

$$Z_{\text{ХВ}}^{H_{10}} = \frac{b}{a} \frac{Z_c}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}, \quad (3.5)$$

де a і b – розміри широкої та вузької стінок хвилеводу відповідно; Z_c – хвильовий опір середовища, що заповнює хвилевід (для хвилеводу з повітряним заповненням $Z_c = 120\pi \approx 377$ Ом);

$$Z_{\text{ХВ}} = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\frac{\omega}{h} + \frac{2}{\pi} \ln \left\{ 17,08 \left(\frac{\omega}{2h} + 0,92 \right) \right\} \right]^{-1} \quad \text{при } \frac{\omega}{h} > 2, \quad (3.6)$$

$$Z_{\text{ХВ}} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\ln \left(\frac{8h}{\omega} \right) + \frac{\omega^2}{32h^2\pi} l \right] \quad \text{при } \frac{\omega}{h} \leq 2,$$

де 0 – ширина смужкової лінії; h – відстань між смужковою лінією й екрануючою пластиною; ε – відносна діелектрична проникність діелектрика між смужковою лінією й екрануючою пластиною.

а) б) в) г)

Рисунок 3.2 – Лінії передачі та їх поперечні розміри:
а) двопровідна лінія; б) коаксиальний кабель; в) прямокутний хвилевід;
г) – несиметрична смужкова (мікросмужкова) лінія

Як широкосмугові узгоджуючі пристрої використовуються ступінчасті та плавні переходи, що являють собою направляючі системи складного поперечного перетину, які також розташовуються безпосередньо перед навантаженням. Величина хвильового опору переходу (трансформатора) плавно або стрибком змінюється від $Z_{\text{ХВ}}$ до $R_{\text{н}}$ за спеціальним законом.

Для практичної реалізації узгоджуючих елементів у металевих хвилеводах частіше за все використовуються реактивні стрижні і діафрагми (ємнісні та індуктивні).

Стрижень, що розташований паралельно вектору \vec{E} основного типу хвилі прямокутного хвилеводу вносить ємнісний опір, якщо його довжина менша $\lambda_{\text{ХВ}}/4$ і індуктивний, якщо його довжина більша $\lambda_{\text{ХВ}}/4$ і менша $\lambda_{\text{ХВ}}/2$.

У лабораторному макеті використовується трансформатор опорів у вигляді відрізка стандартного хвилеводу з двома з'єднувальними фланцями, посеред широкої стінки якого розташовані на відстані $l \approx \lambda_{\text{ХВ}}/4$ один від одного три отвори діаметром 1...2 мм. Через кожний отвір у хвилевід може бути введений металевий зонд (стрижень), глибину занурення якого можна змінювати, змінюючи при цьому амплітуду та фазу відбитої хвилі (рис. 3.3).

Розташовуючи трансформатор між хвилеводом і навантаженням і підбираючи глибину занурення кожного зонда, можна провести узгодження хвилеводу з навантаженням. Підбір необхідних (оптимальних) глибин занурення виконується шляхом почергового змінювання їх глибини занурення та контролю величини від-

битої хвилі на одному із виходів направлено відгалужувача.

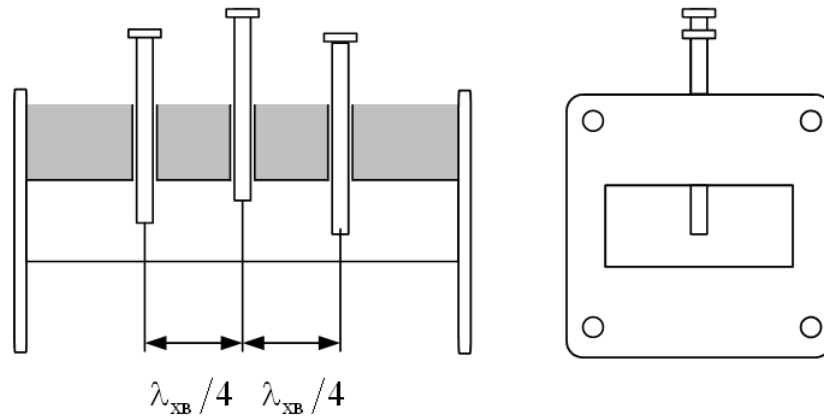


Рисунок 3.3 – Трансформатор опорів

Опис лабораторного стенда. Для проведення вимірювань в даній роботі використовується наступне обладнання (див. рис. 3.4): 1 – НВЧ-генератор; 2 – розв’язувальний феритовий вентиль; 3 – вимірювальна хвилеводна лінія Р1-28 (див. Додаток В); 4 – детекторна секція зі з’єднувальним кабелем; 5 – направлений відгалужувач (див. Додаток Д); 6 – хвилеводне навантаження; 7 – трансформатор опорів; 8 – неоднорідність послідовна (навантаження типу індуктивна або ємнісна діафрагми); 9 – індикаторний прилад (вимірювальний низькочастотний підсилювач).

Примітка. Вимірювальні хвилеводні лінії двох сусідніх робочих місць підключені до одного НВЧ-генератора через хвилеводний трійник і феритові вентиля, що служать для розв’язки вимірювальних трактів.



Рисунок 3.4 – Структурна схема установки для дослідження вузькосмугового узгодження з навантаженням

Домашнє завдання

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуйтеся до обговорення ключових питань.

2) **Решіть задачу.** Розрахуйте хвильовий опір і параметри чвертьхвильового трансформатора (довжину, розміри поперечного перетину) для з’єднання двох прямокутних хвилеводів з повітряним заповненням і з поперечними пере-

тинами: 23×10 мм і $23 \times 10(n + 2)$ мм, де n – остання цифра номеру залікової книжки. Генератор, що формує НВЧ коливання з частотою 9939 МГц.

Приклад вибору вихідних даних. Нехай остання цифра номеру залікової книжки 3, тоді $n = 3$, і відповідно $23 \times 10(3 + 2) = 23 \times 50$ мм.

Методичні вказівки до рішення домашньої задачі. Для узгодження двох прямокутних хвилеводів, працюючих в однохвильовому режимі на хвилі H_{10} і мають однакові широкі стінки a , але різні вузькі стінки b_1 і b_2 , використовують чвертьхвильовий відрізок прямокутного хвилеводу з поперечними розмірами $a_{\text{тр}}$ і $b_{\text{тр}}$ (рис. 3.5). Причому, $a_{\text{тр}} = a$, а величина $b_{\text{тр}}$ визначається із рівняння $Z_{\text{хвтр}}^{H_{10}} = \sqrt{Z_{\text{хв1}}^{H_{10}} Z_{\text{хв2}}^{H_{10}}}$, де відповідні хвильові опори $Z_{\text{хв}}^{H_{10}}$ визначаються із (3.5). Це дозволяє отримати $b_{\text{тр}} = \sqrt{b_1 b_2}$.

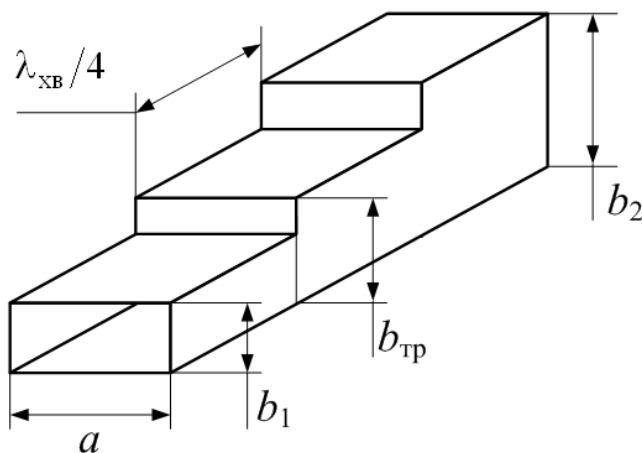


Рисунок 3.5 – Узгодження хвилеводів за допомогою чвертьхвильового трансформатора

Довжина трансформатора, виходячи із його назви, дорівнює $\lambda_{\text{хв}}/4$, де $\lambda_{\text{хв}}$ – довжина хвилі основного типу H_{10} у хвилеводі на заданій частоті (довжині хвилі λ) і визначається за формулою (1.2)

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}},$$

де:

- $\lambda = v_0/f$ – довжина хвилі НВЧ коливання у середовищі, що заповнює хвилевід;
- v_0 – швидкість світла у середовищі, що заповнює хвилевід (для хвилеводу з повітряним заповненням $v_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с);
- f – частота НВЧ коливання, що формується генератором;
- $\lambda_{\text{кр}}$ – критична довжина хвилі НВЧ коливання у направляючій системі (для основного типу хвилі H_{10} прямокутного хвилеводу $\lambda_{\text{кр}} = 2a$, a – розмір широкої стінки прямокутного хвилеводу).

3) Заготуйте бланк звіту з лабораторної роботи, який включає титульний лист установленого зразка, мету роботи, рішення задачі, структурні схеми установок для дослідження вузькосмугового узгодження з навантаженням (див. Додаток Б).

Лабораторне завдання на експериментальній установці:

1) Зберіть установку для дослідження вузькосмугового узгодження з навантаженням, як показано на рис. 3.4, і перевірте налаштування вимірювальної хвилеводної лінії.

2) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі для хвилеводного навантаження \dot{Z}_C (ЄН – ємнісна діафрагма (рис. 1.7), навантаженим поглинаючим (узгодженим) хвилеводним навантаженням).

Результати вимірювань відобразіть у табл. 3.1.

3) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 3.1.

4) За допомогою трансформатора опорів проведіть узгодження хвилеводу з хвилеводним навантаженням \dot{Z}_C шляхом підбирання глибини занурення кожного зонда. Найкращому ступеню узгодження відповідає мінімум потужності відбитої хвилі в детекторній секції 4.

5) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі після узгодження.

Результати вимірювань відобразіть у табл. 3.1.

6) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 3.1.

7) Відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж прямокутного хвилеводу до і після узгодження.

8) На основі побудованих залежностей, визначте КБХ до і після узгодження.

9) Оцініть отримані результати.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень

z , мм																		
$U(z)$, мВ при \dot{Z}_C , ЄН																		
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при \dot{Z}_C , ЄН																		
z , мм																		
$U(z)$, мВ після узгодження																		
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ після узгодження																		

Завдання для поглибленого вивчення (виконується факультативно):

10) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі для хвилеводного навантаження \dot{Z}_L (ІН – індуктивна діафрагма (рис. 1.7), навантаженого поглинаючим (узгодженим) хвилеводним навантаженням).

Результати вимірювань відобразіть у табл. 3.2.

11) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 3.2.

12) За допомогою трансформатора опорів проведіть узгодження хвилеводу з хвилеводним навантаженням \dot{Z}_L шляхом підбору глибини занурення кожного зонда. Найкращому ступеню узгодження відповідає мінімум потужності відбитої хвилі в детекторній секції 4.

13) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі після узгодження.

Результати вимірювань відобразіть у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних досліджень

z , мм																				
$U(z)$, мВ при \dot{Z}_L , ІН																				
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ при \dot{Z}_L , ІН																				
z , мм																				
$U(z)$, мВ після узгодження																				
$ \dot{E}_\Sigma(z) /E_0$ після узгодження																				

14) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 3.2.

15) Відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж прямокутного хвилеводу до і після узгодження.

16) На основі побудованих залежностей, визначте КБХ до і після узгодження.

17) Оцініть отримані результати.

Лабораторне завдання на віртуальній установці

(Лабораторна робота виконується на персональному комп'ютері):

1) Запустіть файл “ТЕД_ЛР 3.exe”. Вивчіть особливості графічного інтерфейсу і порядок проведення вимірювань на віртуальній лабораторній установці (ВЛУ 1) (див. Додаток Г).

Порядковий номер бригади задається викладачем.

2) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі для хвилеводного навантаження \dot{Z}_C (ЄН – ємнісна діафрагма (рис. 1.7), навантаженим поглинаючим (узгодженим) хвилеводним навантаженням).

Результати вимірювань відобразіть у табл. 3.1.

3) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 3.1.

4) За допомогою трансформатора опорів проведіть узгодження хвилевода з хвилеводним навантаженням Z_C шляхом підбирання глибини занурення кожного зонда. Найкращому ступеню узгодження відповідає мінімум потужності відбитої хвилі в детекторній секції 4.

5) Проведіть вимірювання розподілу відносної напруженості поля $U(z)$ уздовж лінії передачі після узгодження.

Результати вимірювань відобразіть у табл. 3.1.

6) Здійсніть нормування отриманих значень з урахуванням квадратичності характеристики детектора. Розподіл відносної напруженості поля дорівнює $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$, де $|\dot{E}_\Sigma(z)| \approx \sqrt{U(z)}$; $E_0 \approx (\sqrt{U_{\max}} + \sqrt{U_{\min}})/2$; $U(z)$ – показання індикаторного приладу, мВ; U_{\max} , U_{\min} , мВ – максимальне і мінімальне показання індикаторного приладу.

Результати нормування відобразіть у табл. 3.1.

7) Відобразіть на одному графіку залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ уздовж прямокутного хвилеводу до і після узгодження.

8) На основі побудованих залежностей, визначте КБХ до і після узгодження.

9) Оцініть отримані результати.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б).

1) Титульний лист устанавленого зразка.

2) Мету роботи.

3) Рішення домашньої задачі.

4) Структурну схему установки для дослідження вузько смугового узгодження з навантаженням.

5) Результати вимірювань і нормування відносної напруженості поля уздовж лінії передачі для різних навантажень (табл. 3.1).

6) Графіки залежності поздовжнього розподілу відносної напруженості поля $|\dot{E}_\Sigma(z)|/E_0$ від координати уздовж лінії передачі до і після узгодження.

7) Аналіз отриманих результатів і висновки.

Ключові питання:

- 1) Викладіть суть узгодження навантаження з лінією передачі.
- 2) Поясніть принцип вузькосмугового узгодження за допомогою реактивних елементів.
- 3) Які прилади використовуються в якості реактивних узгоджуючих елементів?
- 4) В чому відмінність вузькосмугового і широкосмугового узгодження навантаження з лінією?
- 5) Відобразіть схему підключення компенсуючої реактивності послідовного типу і поясніть принцип узгодження.
- 6) Відобразіть схему підключення компенсуючої реактивності паралельного типу і поясніть принцип узгодження.
- 7) Викладіть ідею узгодження хвилеводу з навантаженням за допомогою чвертьхвильового трансформатора.
- 8) Як реалізується ідея узгодження В.В. Татарінова при використанні тристрижневого трансформатора опорів?
- 9) В якому випадку чвертьхвильовий трансформатор необхідно підключати безпосередньо перед навантаженням ?
- 10) Чи можна використовувати чвертьхвильовий трансформатор для узгодження комплексних опорів?
- 11) Що таке реактивний шлейф?
- 12) Як змінюється вхідний опір короткозамкнутого шлейфа при зміні його довжини?

Лабораторна робота № 4

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ У НАПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМАХ

Мета роботи: ознайомлення з хвильовими процесами, які відбуваються у направляючих системах, вивчення особливостей поширення хвиль у направляючих системах.

Ключові положення. Направляючі системи (НС) різних типів використовуються у різних частотних діапазонах. Від постійного струму до сотень МГц використовують двопровідні і коаксіальні лінії. Порожнисті металеві хвилеводи різноманітних перетинів використовуються від ГГц до ТГц, хвилеводи поверхневої хвилі – від десятків МГц до тисяч ТГц. Світловоди, лінзові та дзеркальні системи використовуються в субміліметровому та оптичному діапазонах.

Спрямованими або власними хвилями називаються такі електромагнітні хвилі, структура векторів яких не змінюється в міру руху хвилі. Власні хвилі в НС прийнято класифікувати за величиною фазової швидкості і за структурою векторів \vec{E} і \vec{H} .

За величиною фазової швидкості власні хвилі в НС підрозділяють на повільні ($v_{\text{ф}} < v_0$) і швидкі ($v_{\text{ф}} > v_0$), де v_0 – швидкість світла у середовищі, що заповнює направляючу систему. Повільні хвилі можуть поширюватися в таких НС, як діелектричний хвилевід, світловід, хвилеводи поверхневої хвилі. Швидкі хвилі можуть поширюватися в таких НС, як: двопровідна лінія, прямокутний, круглий, еліптичний хвилеводи.

За структурою силові лінії векторів власних хвиль у НС підрозділяють на наступні чотири класи:

- ***T*-хвилі** (поперечні електромагнітні хвилі) – $E_z = 0, H_z = 0$;
- ***E*-хвилі** (електричні або поперечно-магнітні хвилі) – $E_z \neq 0, H_z = 0$;
- ***H*-хвилі** (магнітні або поперечно-електричні хвилі) – $E_z = 0, H_z \neq 0$;
- ***EH*-хвилі** (гібридні або змішані хвилі) – $E_z \neq 0, H_z \neq 0$.

Із наведеної класифікації видно, що клас хвилі визначається наявністю у цієї хвилі проекції векторів електромагнітного поля на вісь НС, тобто по-здовжніх складових.

Відмітимо деякі загальні властивості напрямних хвиль:

– у кожному із класів ***E*-хвилі**, ***H*-хвилі** і ***EH*-хвилі** присутнє нескінчене число власних хвиль, які прийнято називати типами хвиль або модами і позначати через E_{mn}, H_{mn}, EH_{mn} , де індекси m і n – будь-які цілі числа, наприклад, E_{11}, H_{10} ;

– фазова швидкість хвилі ***T*-хвилі** дорівнює швидкості світла і цей тип хвилі може поширюватися тільки в НС, по яких можливе передавання постійного струму. Виконання цієї умови можливе в НС, які мають, як мінімум, два ізо-

льованих провідники (двопровідна лінія, коаксіальний кабель, смугова лінія і т.д.)

– *E*-хвилі і *H*-хвилі можуть поширюватися практично в усіх вищеперелічених НС;

– *EH*-хвилі можуть поширюватися в діелектричних хвилеводах, світловодах і хвилеводах поверхневих хвиль.

Розглянемо особливості поширення швидких спрямованих хвиль, притаманні довільній НС.

Будь-яка *i*-а проекція комплексної амплітуди векторів \vec{E} або \vec{H} будь-якої спрямованої хвилі у довільній НС може бути представлена у наступному вигляді:

$$\dot{E}_{mi}(x, y, z) = \dot{E}_i(x, y)e^{-\alpha z}e^{-i\beta z} \text{ або } \dot{H}_{mi}(x, y, z) = \dot{H}_i(x, y)e^{-\alpha z}e^{-i\beta z}, \quad (4.1)$$

де $\dot{E}_i(x, y)$, $\dot{H}_i(x, y)$ – комплексні функції, модулі яких дорівнюють амплітудам відповідних проекцій і залежать тільки від поперечних координат; α – коефіцієнт загасання хвилі; β – коефіцієнт фази, інакше – поздовжнє хвильове число або постійна поширення.

Із (4.1) випливає, що поверхнею рівних фаз спрямованої хвилі є будь-яка площина, перпендикулярна осі направляючої системи (вісь *z* системи координат суміщена з віссю НС). Звідси випливає, що будь-яка спрямована хвиля (мода) є плоскою. Із (4.1) випливає також, що амплітуда проекції векторів змінюються на поверхні рівних фаз, тобто спрямовані хвилі є плоскими неоднорідними хвилями.

Коефіцієнт загасання α різний для будь-яких типів хвиль і визначає швидкість спадання амплітуди хвилі в міру її поширення. У загальному випадку α може бути визначена як

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_m, \quad (4.2)$$

де α_d – коефіцієнт загасання, обумовлений втратами в діелектрику, який наповнює хвилевід; α_m – коефіцієнт загасання, обумовлений втратами в металевих елементах направляючих систем.

Різноманітні типи хвиль відрізняються один від одного функціями $\dot{E}_i(x, y)$, $\dot{H}_i(x, y)$, які визначають структуру поля (поведінка векторів електромагнітного поля) хвилі.

Другою суттєвою відмінністю одного типу хвилі від іншого є те, що різні хвилі характеризуються різною величиною критичної частоти $f_{кр}$ або відповідної їй критичній довжині хвилі $\lambda_{кр} = v_0/f_{кр}$ (v_0 – швидкість поширення світла у середовищі, що заповнює хвилевід). Критична частота $f_{кр}$ (довжина хвилі – $\lambda_{кр}$) залежить від типу направляючої системи і, власне, визначає діапазон поширення (існування) хвилі. Саме, якщо виконується умова

$$\lambda < \lambda_{кр}, \quad (f > f_{кр}), \quad (4.3)$$

то даний тип хвилі (дана мода), на цих довжинах хвиль (частотах) може поширюватися в направляючій системі. Якщо умова (4.3) не виконується, то даний

тип хвилі не може поширюватися в направляючій системі. Такий режим роботи направляючої системи називають *поза межовим режимом* або *режимом відсіку*.

Відмітимо, що серед швидких хвиль в тій, або іншій НС можуть існувати хвилі з однаковою величиною критичної частоти (критичної довжини хвилі). Такі хвилі відрізняються одна від одної тільки структурою поля і називаються *виродженими хвилями*.

У власних хвилях з різними критичними частотами різні також і такі параметри, як: β – позадовжнє хвильове число, $\lambda_{\text{хв}}$ – довжина хвилі в хвилеводі, $v_{\text{ф}}$ – фазова швидкість і $v_{\text{гр}}$ – групова швидкість. Для випадку, коли стінки хвилеводу виготовлені з ідеального провідника і хвилевід заповнений діелектриком без втрат ($\alpha = 0$), позадовжнє хвильове число розраховується за формулою

$$\beta = k \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}, \quad \beta = k \sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{кр}}}{f} \right)^2}, \quad (4.4)$$

де $k = \omega \sqrt{\varepsilon_{\text{а}} \mu_{\text{а}}} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число вільного простору.

Із (4.4) випливає, що якщо виконується умова (4.3), то величина β є дійсним числом. Це каже про те, що даний тип хвилі (дана мода) при цих частотах (довжинах хвиль) поширюється в направляючій системі. Якщо умова (4.4) не виконується, то β стає чисто уявною величиною. У цьому випадку хвильовий процес у направляючій системі відсутній.

Довжина хвилі в НС розраховується за формулою:

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}})^2}}. \quad (4.5)$$

Із формули (4.5) випливає, що довжина хвилі у НС для швидких хвиль завжди більше довжини хвилі у вільному просторі.

Фазова швидкість $v_{\text{ф}}$ швидких хвиль у НС розраховується за формулою:

$$v_{\text{ф}} = \frac{\omega}{\beta} = \frac{v_0}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}})^2}}. \quad (4.6)$$

Із формули (4.6) випливає, що фазова швидкість у НС завжди більше швидкості світла у середовищі, що заповнює НС. Із формули (4.6) також випливає, що фазова швидкість є функція від частоти. Це говорить про те, що в направляючій системі без втрат спостерігається явище *дисперсії*, яке призводить, як відомо, до спотворення сигналу, що передається.

Групова швидкість $v_{\text{гр}}$ швидких хвиль у НС розраховується за наступною формулою:

$$v_{\text{гр}} = v_0 \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}})^2}. \quad (4.7)$$

Для будь-якої направляючої системи визначають *основний тип хвилі*, як хвилю з найбільшою $\lambda_{\text{кр}}$ або, інакше, з найменшою $f_{\text{кр}}$. Всі інші хвилі називають *хвилями вищих типів*. Зазначимо, що якщо у НС може поширюватися

хвиля типу T , то вона і є основним типом хвилі, тому що для хвилі типу T $\lambda_{кр} = \infty$.

Однохвильовим (одномодовим) режимом роботи хвилеводу називається режим, коли у хвилеводі може поширюватися тільки хвиля основного типу. Цей режим можливий за умови

$$\lambda_{кр 2} < \lambda < \lambda_{кр 1}, \quad (4.8)$$

де $\lambda_{кр 1}$ – критична довжина хвилі основного типу; $\lambda_{кр 2}$ – критична довжина першої хвилі вищого типу.

Останню умову називають умовою поширення хвиль у НС.

Як приклад розглянемо прямокутний хвилевід (рис. 4.1).

У прямокутному хвилеводі можуть поширюватися хвилі електричного E_{mn} і магнітного H_{mn} типів. Для прямокутного хвилеводу критична довжина хвилі залежить від розмірів поперечного перетину хвилеводу, типу хвилі і може бути розрахована за формулою

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad m, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (4.9)$$

де a і b – розміри широкої та вузької стінок хвилеводу.

Зазначимо, що для хвиль типу H_{mn} один із індексів m або n може набути значення нуля.

Зазначимо також, що індексам m та n , які визначають тип хвилі, можна надати чіткий фізичний сенс: індекси m (n) визначають число напівхвиль уздовж широкої (вузької) стінки хвилеводу.

Із формули (4.9) випливає, що у випадку $a > b$ величина $\lambda_{кр}$ набуває найбільше значення при $m = 1, n = 0$. Звідси випливає, що основним типом хвилі в прямокутному хвилеводі є хвиля H_{10} . При цьому критична довжина хвилі H_{10} дорівнює подвоєній ширині хвилеводу, тобто

$$\lambda_{кр} = 2a. \quad (4.10)$$

Вектора \vec{E} і \vec{H} хвилі H_{10} в хвилеводі без втрат визначаються наступними формулами:

Рисунок 4.1 – Структура поля хвилі H_{10}

$$\vec{E} = \vec{y}_0 E_0 \sin \frac{x\pi}{a} \cos(\omega t - \beta z), \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \vec{H} = & -\vec{x}_0 \frac{E_0}{Z_c} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \sin \frac{x\pi}{a} \cos(\omega t - \beta z) + \\ & + \vec{z}_0 E_0 \frac{\pi}{a\omega \mu_a} \cos\left(\frac{x\pi}{a}\right) \sin(\omega t - \beta z) \end{aligned}, \quad (4.12)$$

де E_0 – деяка постійна, яка визначається потужністю джерел, що збуджують хвилю;

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}. \quad (4.13)$$

Із формул (4.11) і (4.12) видно, що вектор \vec{E} спрямований перпендикулярно широкій стінці хвилеводу, вектор \vec{H} – паралельно. При цьому амплітуда вектора \vec{E} змінюється за законом $\sin(x\pi/a)$. Вона максимальна в точках посеред широкої стінки, і спадає до нуля при приближенні до вузьких стінок. Поперечні складові векторів \vec{E} і \vec{H} мають однакові фази, а поздовжня складова вектора \vec{H} відстає на 90° .

На рис. 4.1 показана структура поля хвилі H_{10} – напрям силових ліній векторів \vec{E} і \vec{H} у фіксований момент часу.

Із формул (4.4)...(4.7) випливає, що для основного типу хвилі прямокутного хвилеводу

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}, \quad v_{\text{ф}} = \frac{v_0}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}, \quad v_{\text{гр}} = v_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}. \quad (4.14)$$

Умова однохвильового режиму в прямокутному хвилеводі $2b < \lambda < 2a$ при $a \geq 2b$ має вигляд

$$a < \lambda < 2a. \quad (4.15)$$

На поверхні стінок хвилеводу протікають поверхневі струми, які зв'язані з вектором магнітного поля формулою $\vec{j}_s = [\vec{n}_0, \vec{H}]$. Структура цих струмів (силові лінії вектора \vec{j}_s) представлена на рис. 4.2

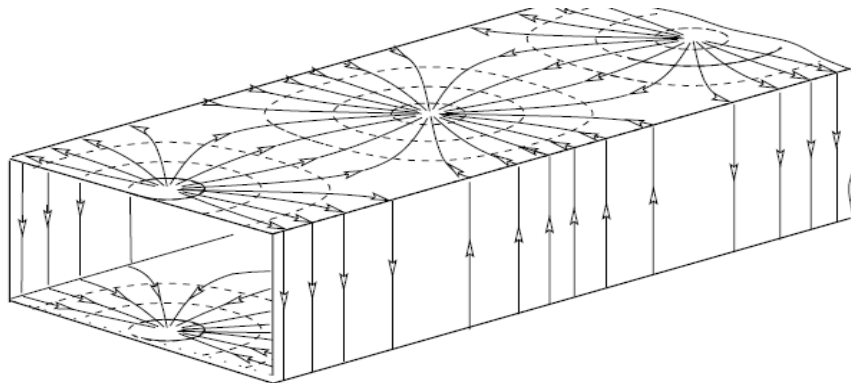


Рисунок 4.2 – Структура силових ліній струму провідності для хвилі основного типу в прямокутному хвилеводі

Поширення струму по стінках хвилеводу важливо знати при його конструюванні. Велика густина струмів через ребро хвилеводу потребує хорошої провідності цих ділянок. При створенні на базі хвилеводів пристроїв різноманітного призначення доводиться прорізати у ньому вузькі щілини. Щілини не викликають помітних втрат на випромінювання і не спотворюють структуру поля хвилі, якщо вони розташовані уздовж лінії струму. Для хвилі H_{10} такими щілинами є поперечні щілини на вузьких стінках і поздовжня щіли-

на, розташована посередині широкої стінки хвилеводу. На практиці часто виникає задача створення випромінюючої щілини, яка є елементом щілинної антени або використовується для введення енергії у хвилевід. Випромінююча щілина хоча б частину періоду пересікається лініями струму.

Домашнє завдання:

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуйтеся до обговорення контрольних питань.

2) **Рішіть задачу.** Розрахуйте і побудуйте залежність $\lambda_{\text{хв}}$ хвилі H_{10} у прямокутному хвилеводі від розміру широкої стінки хвилеводу. Розрахунок виконати з шагом 2 мм при змінюванні розміру a від 13 до 25 мм на частоті генератора лабораторної установки.

3) **Рішіть задачу.** Розрахуйте і побудуйте на одному графіку залежності фазової і групової швидкості від частоти f для хвилеводу з розмірами поперечного перетину $5n \times 3$ мм², де n – номер бригади. Розрахунок виконати в діапазоні частот, які відповідають однохвильовому режиму роботи хвилеводу.

Лабораторне завдання:

1) Перевірте налаштування вимірювальної хвилеводної лінії.

2) Зберіть установку для вимірювання розподілу поля уздовж осі прямокутного хвилеводу. Структурна схема установки представлена на рис. 4.3, де 1 – НВЧ генератор; 2 – вимірювальна хвилеводна лінія; 3 – електронний мілівольтметр; 4 – постійний короткозамикач.

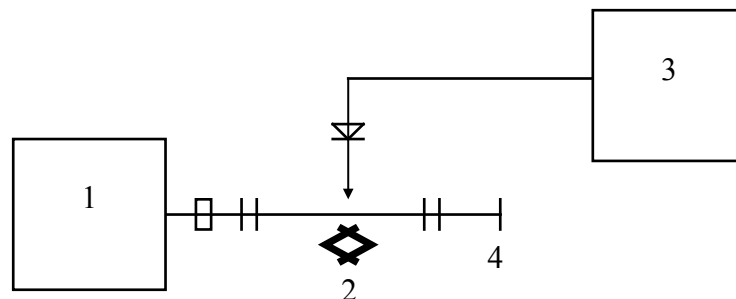


Рисунок 4.3 – Структурна схема установки для вимірювання розподілу поля уздовж осі прямокутного хвилеводу

3) Використовуючи хвилеводні вставки, які дозволяють змінювати поперечні розміри хвилеводу вимірювальної лінії, виміряйте $\lambda_{\text{хв}}$ для випадку, коли $a = 23, 21$ і 19 мм. Виміряні значення $\lambda_{\text{хв}}$ нанесіть на теоретичний графік, отриманий при виконанні домашнього завдання, і оцініть співвідношення теоретичних і експериментальних результатів.

Опис лабораторного стенда. В даній роботі використовується наступне обладнання:

- 1) Вимірювальна хвилеводна лінія.
- 2) Вимірювальний мілівольтметр.

3) Навантаження типу короткого замикання – металева пластина.

4) П-подібні хвелеводні вставки, які дозволяють змінювати розміри широкої стінки.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

1) Результати виконання домашнього завдання.

2) Структурну схему виміральної установки.

3) Результати вимірювань, їх аналіз і висновки.

Ключові питання:

1) Дайте визначення хвиль класів T , E , H і EH .

2) Поясніть сенс критичної довжини хвилі.

3) Який тип хвилі називається основним?

4) Який тип хвилі є основним в прямокутному хвелеводі?

5) Що таке однохвильовий режим роботи НС?

6) Поясніть поведження силових ліній векторів E і H хвилі H_{10} .

7) Дайте визначення фазової швидкості і поясніть, що таке дисперсія?

8) Дайте визначення групової швидкості і зобразіть графік її залежності від частоти.

9) Дайте визначення швидких і повільних хвиль.

10) Зобразіть графік залежності довжини хвилі у хвелеводі від частоти, від довжини хвилі, від розміру широкої стінки хвелеводу.

11) Поясніть структуру струмів на стінках хвелеводу.

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНИХ РОЗГАЛУЖЕНЬ

Мета роботи: вивчення будови і принципів дії хвильоводних розгалужень, вивчення основних параметрів подвійного хвильоводного трійника.

Ключові положення. Хвильоводні розгалуження (трійники). У лініях передачі НВЧ часто з'являється необхідність розгалужування хвильоводу на два або більше каналів. Така задача виникає, наприклад, при живленні декількох антен від одного джерела електромагнітних коливань.

У прямокутному хвильоводі для рішення цієї задачі часто використовують розгалуження для хвилі основного типу H_{10} .

Розрізняють декілька типів розгалужень:

- розгалуження в площині вектора \vec{E} – **Е-трійник** (рис. 5.1, а);
- розгалуження в площині вектора \vec{H} – **Н-трійник** (рис. 5.1, б);
- два відгалуження одночасно – в площині вектора \vec{H} і в площині вектора \vec{E} – **подвійний хвильоводний трійник** (рис. 5.1, в).

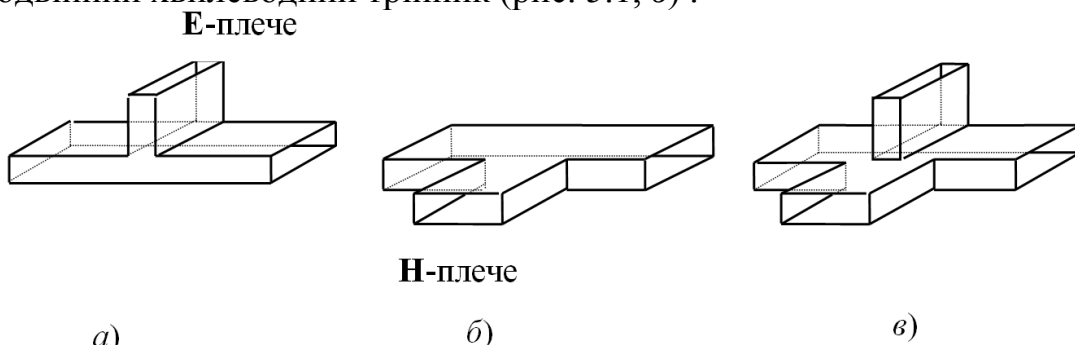


Рисунок 5.1 – Хвильоводні трійники: а) **Е-трійник**; б) **Н-трійник**; в) **подвійний хвильоводний трійник**

Ідеальний подвійний хвильоводний трійник має наступними властивостями за умови узгодження всіх плечей:

1) При надходженні енергії зі сторони **Е-плеча** енергія джерела поширюється порівну в бокові плечі, при чому хвилі у цих плечах протифазні, і енергія не надходить в **Н-плече**.

2) При надходженні енергії зі сторони **Н-плеча** енергія джерела розподіляється порівну в бокових плечах, при цьому хвилі синфазні, і енергія не надходить в **Е-плече**.

3) При синфазному живленні подвійного хвильоводного трійника зі сторони бокових плечей сумарна енергія поступає в **Н-плече**.

4) При протифазному живленні подвійного хвильоводного трійника зі сторони бокових плечей сумарна енергія надходить в **Е-плече**.

Двічі узгоджений трійник – це трійник, у якого відсутні відбиті хвилі від площини симетрії. Для цієї мети в **Е-плече** і **Н-плече** встановлюють реактивні елементи (штирі, діафрагми), розраховані таким чином, щоб відбиті від

реактивних елементів хвилі компенсували відбиті хвилі від площини симетрії трійника.

Якщо енергію від джерела подають на одне з бокових плечей двічі узгодженого трійника, то вона поділиться порівну між **Е**- і **Н**-плечем і не надійде в протилежне бокове плече.

Основні параметри подвійного хвилеводного трійника:

- величина розв'язки K_{EH} (K_{HE}) між **Е**- і **Н**-плечима, коли джерело підключено до **Е**-плеча (**Н**-плеча), визначається за однією з формул

$$K_{EH} = 10 \lg \frac{P_E}{P_H}, \quad K_{HE} = 10 \lg \frac{P_H}{P_E}, \quad (5.1)$$

де P_E , P_H – потужності в **Е**- і **Н**-плечах, відповідно;

- коефіцієнт бігучої хвилі у хвилеводному тракті за наявності подвійного трійника.

Домашнє завдання.

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуйтеся до обговорення ключових питань.

2) **Рішіть задачу.** До плеча **Е** двічі узгодженого подвійного трійника підключено генератор, який працює на частоті 10 ГГц. Потужність генератора 10 мВт. Інші плечі трійника навантажені узгоджено. Визначити потужність, яка виділяється в навантаженнях інших трьох плечей, якщо відомо, що розв'язка між **Е**- і **Н**-плечима трійника дорівнює 20 дБ.

3) **Рішіть задачу.** До плеча **Н** двічі узгодженого подвійного трійника підключено генератор потужністю 10 мВт, який працює на частоті 10 ГГц. Розв'язка між плечима **Н** і **Е** трійника дорівнює нескінченності. Чому буде дорівнювати потужність, яка виділяється в узгодженому навантаженні **Е**-плеча, якщо:

- 1) бокові плечі трійника мають рівні довжини і закорочені;
- 2) бокові плечі трійника закорочені, але довжина одного плеча більше іншого на величину $\lambda_{хв}/4$;
- 3) одне бокове плече закорочено, а інше навантажене на узгоджене навантаження.

Лабораторне завдання:

1) Зберіть установку для дослідження хвилеводних розгалужувань. Структурна схема установки наведена на рис. 5.2. На цьому рисунку: 1 - НВЧ генератор; 2 вимірювальна хвилеводна лінія; 3- детекторна секція; 4 - електронний мілівольтметр; 5 - досліджуваний пристрій (подвійний трійник).

2) За допомогою детекторної секції 3 виміряти потужність хвилі на виході вимірювальної лінії.

3) Підключіть до виходу вимірювальної лінії **Е**-плече подвійного трійника і за допомогою детекторної секції 3 виміряйте потужність на виході усіх плечей трійника. При цьому необхідно, щоб ті плечі, які при вимірюванні не

підключені до детекторної секції 3, були навантажені на узгоджене навантаження.

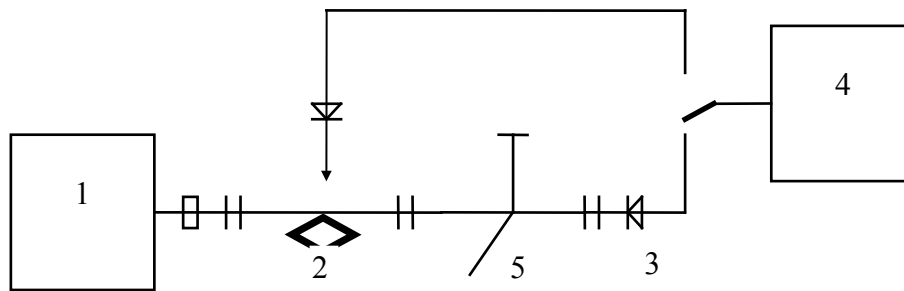


Рисунок 5.2 – Структурна схема установки для дослідження хвильоводних розгалужувань

4) Повторіть вимірювання п. 3 для випадку, коли до виходу вимірювальної лінії підключені інші плечі трійника.

5) Виміряйте КБХ з боку усіх плечей хвильоводного трійника. При цьому ті плечі трійника, які при даному вимірюванні не підключені до виходу вимірювальної лінії, повинні бути узгоджені.

6) Результати усіх вимірювань зведіть у таблицю. За результатами вимірювань розрахуйте розв'язку між усіма плечима трійника.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

- 1). Результати виконання домашнього завдання.
- 2). Структурну схему установки для дослідження хвильоводних розгалужень.
- 3). Таблицю вимірних значень КБХ подвійного трійника.
- 4). Таблицю величин розв'язок між плечима подвійного хвильоводного трійника.
- 5). Аналіз отриманих результатів і висновки.

Ключові питання:

- 1). Поясніть будову і принцип дії **Е**-трійника.
- 2). Пояснити будову і принцип дії **Н**-трійника.
- 3). Сформулюйте і докажіть основні властивості **Е(Н)** - трійника.
- 4). Як можна покращити ступінь узгодження **Е(Н)**-трійника?
- 5). Поясніть будову і принцип дії подвійного хвильоводного трійника.
- 6). Сформулюйте і докажіть основні властивості подвійного хвильоводного трійника
- 7). Що таке двічі узгоджений трійник?
- 8). Як розподіляється потужність між плечима подвійного трійника, якщо живлення трійника підводиться зі сторін: **Е**-плеча, **Н**-плеча, бокового плеча і синфазно (протифазно) з бокових плечей?
- 9). Чи змінюються властивості подвійного хвильоводного трійника, якщо для його живлення використовувати хвилі H_{20} , H_{11} , E_{11} ?

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ СПРЯМОВАНОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА Й АДАПТЕРНОГО ПЕРЕХОДУ

Мета роботи: вивчення будови і принципів дії спрямованого відгалужувача й адаптерного переходу, вимірювання основних параметрів спрямованого відгалужувача й адаптерного переходу.

Ключові положення. *Спрямований відгалужувач (СВ)* – являє собою два зв'язних прямокутних хвилеводи – основний і допоміжний – зі спільною стінкою, в якій є отвори зв'язку.

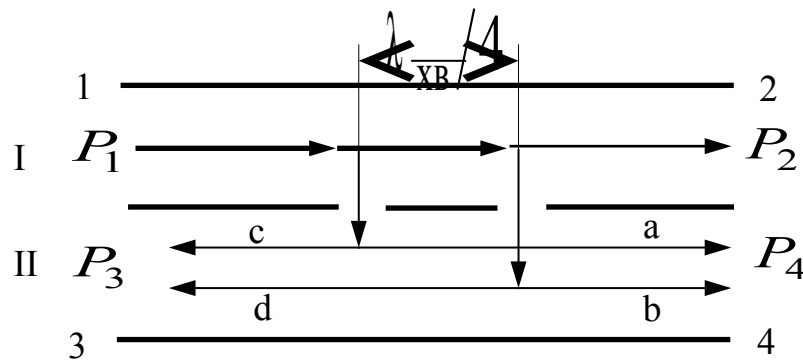


Рисунок 6.1 – Спрямований відгалужувач

Принцип дії СВ легко зрозуміти якщо розглянути рис. 6.1. На цьому рисунку зображені два однакових прямокутних хвилеводи I і II з загальною стінкою (наприклад, вузькою), де на відстані $\lambda_{\text{хв}}/4$ є два однакових отвори зв'язку. Якщо по хвилеводу I зліва направо поширюється хвиля, то вона збуджує крізь отвори зв'язку хвилі a , b , c і d у допоміжному хвилеводі II. Розглянемо хвилі a і b , які поширюються у хвилеводі II зліва направо. Ці хвилі мають однакові амплітуди і фази, тому що проходять однакові відстані, і, отже, додаються. Результуюча потужність на виході плеча 4 складає P_4 .

Розглянемо тепер хвилі, які поширюються у хвилеводі II справа наліво (хвиля c від лівого отвору, хвиля d – від правого). У будь-якому перетині плеча 3 ці хвилі мають зсув фаз, що дорівнює 180° , тому що їх шляхи відрізняються на $\lambda_{\text{хв}}/2$, і отже напруженості полів цих хвиль віднімаються. Якщо відстань між отворами точно дорівнює $\lambda_{\text{хв}}/4$, амплітуди хвиль в точності рівні (ідеальний випадок), то у хвилеводі II буде відсутня хвиля, яка поширюється справа наліво.

Нехай тепер у хвилеводі I хвиля поширюється справа наліво, тоді у допоміжному хвилеводі існує хвиля тільки на виході 3. Таким чином, розглянутий пристрій дозволяє виділити з двох хвиль, які поширюються в основному хвилеводі назустріч одна одній, окремо хвилю прямого і зворотнього напрямку.

Основними характеристиками спрямованого відгалужувача є:

1) *Перехідне послаблення*, яке визначається як

$$L = 10 \lg \frac{P_1}{P_4} \text{ [дБ]}, \quad (6.1)$$

де P_1 – потужність хвилі, яка поширюється по основному хвилеводу зліва направо; P_4 – потужність хвилі, по допоміжному хвилеводу у тому ж напрямку.

2) *Спрямованість*, яка характеризується відношенням потужності P_4 до потужності P_3 хвилі, яка поширюється по допоміжному хвилеводу справа наліво (при живленні основного хвилеводу зі сторони плеча 1).

$$N = 10 \lg \frac{P_4}{P_3} \text{ [дБ]}. \quad (6.2)$$

3) *Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) або коефіцієнт бігучої хвилі (КБХ)* з боку кожного плеча.

4) *Смуга робочих частот*, яка визначається як смуга частот, у межах якої характеристики спрямованого відгалужувача задовольняють наперед заданим умовам.

Адаптерний перехід призначений для з'єднання коаксіального кабелю з хвилею типу **T** і прямокутного хвилеводу з хвилею H_{10} та представляє собою короткозамкнений відрізок прямокутного хвилеводу з плоским з'єднувальним фланцем. У середині хвилеводу на відстані $l_3 \approx \lambda_{\text{хв}}/4$ (рис. 6.2, а) від його закороченого кінця розташований зонд (відрізок провідника), орієнтований перпендикулярно широкій стінці хвилеводу (паралельно вектору \vec{E} хвилі H_{10}). Зонд є продовженням внутрішнього провідника коаксіального кабелю, який входить крізь отвір у широкій стінці хвилеводу, розташованого приблизно на її середині. Зовнішній провідник кабелю з'єднується безпосередньо з зовнішньою поверхнею стінки хвилеводу.

Розміри поперечного перетину кабелю і хвилеводу, а також робоча частота вибираються такими, щоб кабель і хвилевід працювали в однохвильовому режимі. У цьому випадку при розгляданні принципу роботи адаптерного переходу можна розглянути тільки основні типи хвиль у кабелі і хвилеводі, тому що у цьому випадку вищі типи хвиль поширюватися не можуть.

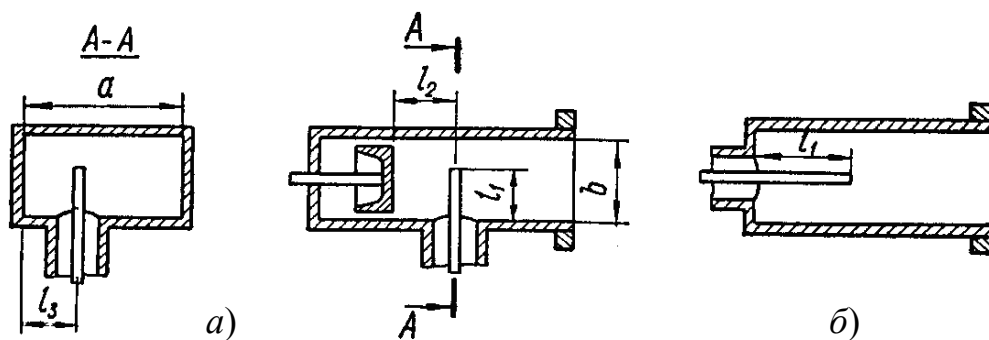


Рисунок 6.2 – Хвилеводно-коаксіальні переходи:
а) для всіх типів хвиль H ; б) для всіх типів хвиль E

Для тримання мінімального відбиття хвиль від переходу, необхідно коаксіальну лінію і хвилевід узгодити, тобто створити режим бігучих хвиль. Узгодження відбувається підбиранням довжини штиря l_1 , відстані l_2 від штиря до заглушки (поршня), яка замикає накоротко хвилевід, і відстані l_3 від штиря до найближчої вузької стінки хвилеводу (рис. 6.2, а).

Роботу адаптерного переходу можна розглянути як з боку кабелю, так і з боку хвилеводу. Нехай в кабелі поширюється Т-хвиля. В зонді, який є продовженням внутрішнього провідника кабелю, тече струм, який у хвилеводі збуджує (у принципі) як основну, так і вищі типи хвиль, які поширюються від зонда в обидві сторони. Тому що зонд розташовано посередині широкої стінки, то основна хвиля (хвиля H_{10}) збуджується з найбільш можливою амплітудою (посередині широкої стінки амплітуда вектора \vec{E} хвилі H_{10} також максимальна). Основна хвиля, яка йде від зонда у напрямку стінки хвилеводу, відбивається від неї і додається у фазі з хвилею, яка поширюється від зонда в іншому напрямку. Ця хвиля “набирає” фазу 360° за рахунок стрибка фази в 180° при відбитті від стінки (коефіцієнт відбиття дорівнює мінус одиниці) і за рахунок зміни фази на 180° при проходженні відстані $\lambda_{\text{хв}}/2$ (від зонда до стінки l_3 і назад). Таким чином, хвиля типу Т кабелю перетворюється (трансформується) у хвилю H_{10} прямокутного хвилеводу.

При живленні адаптерного переходу з боку хвилеводу розглядання принципу його роботи проводиться аналогічно.

Основними параметрами адаптерного переходу є:

- 1) Коефіцієнт передачі.
- 2) Коефіцієнт бігучої хвилі (КБХ).
- 3) Смуга робочих частот.

Налаштування адаптерного переходу на максимальний коефіцієнт передачі (з урахуванням взаємного впливу зонда і стінок хвилеводу) відбувається шляхом невеликої зміни положення зонда відносно стінок хвилеводу. Для розширення смуги робочих частот форма зонда виконується у вигляді каплі (каплевидна форма). Для налаштування адаптерного переходу на максимум $K_{\text{бх}}$ при зміні частоти генератора використовується рухома стінка, яка закорочує хвилевід.

Домашнє завдання:

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуйтеся до обговорення ключових питань.

2) **Рішіть задачу.** Розрахуйте величину потужностей P_1 і P_2 в плечах 1 і 2 спрямованого відгалужувача, виконаного на основі хвилеводу прямокутного перетину, якщо задано величини перехідного послаблення L і спрямованості N . При цьому потужності, які надходять у плечі 3 і 4 рівні, відповідно, P_3 і P_4 , відбиття від усіх плечей відсутнє. Вихідні дані приведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри відгалужувача

№ бригади	L , дБ	N , дБ	P_3 , Вт	P_4 , Вт
1	6	20	0,1	0,01
2	9	25	0,5	0,025
3	12	30	0,01	0,003
4	15	20	0,2	0.02

3). **Рішіть задачу.** Маємо узгоджений спрямований відгалужувач, у якого $L = 10$ дБ, $N = \infty$ до плеча 1 підключено генератор потужністю 10 мВт. Чому буде дорівнювати потужність, яка виділяється в узгодженому навантаженні плеча 3, якщо: а) плечі 2 і 4 навантажені на узгоджені навантаження; б) плече 2 навантажено на узгоджене навантаження, а плече 4 закорочене; в) плече 2 закорочене, а плече 4 навантажено на узгоджене навантаження.

Лабораторне завдання:

1) Зберіть установку для вимірювання параметрів спрямованого відгалужувача і адаптерного переходу. Структурна схема установки наведена на рис. 5.2, на якому місце трійника займає спрямований відгалужувач або адаптерний перехід.

2) Виміряйте за допомогою детекторної секції 3 потужність на виході вимірювальної лінії.

3) Підключіть до виходу вимірювальної лінії плече 1 (або плече 2) спрямованого відгалужувача і виміряти потужність на виході інших плечей спрямованого відгалужувача.

4) Підключіть до виходу вимірювальної лінії адаптерний перехід і виміряти його загасання, що вноситься.

5) Виміряйте за допомогою вимірювальної лінії КБХ з боку плеча 1 спрямованого відгалужувача, а також КБХ адаптерного переходу.

6) Результати вимірювань занесіть у табл. 6.1 і зробіть розрахунок величин L , N для спрямованого відгалужувача.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

- 1) Результати виконання домашнього завдання.
- 2) Структурну схему вимірювальної установки.
- 3) Таблиці вимірних значень параметрів досліджуваних вузлів.
- 4) Аналіз отриманих результатів, висновки.

Ключові питання.

- 1) Поясніть будову і принцип дії спрямованого відгалужувача.
- 2) Поясніть призначення поглинаючого навантаження, яке розташовано у допоміжному хвилеводі спрямованого відгалужувача.
- 3) Перерахуйте і поясніть основні властивості спрямованого відгалужувача.
- 4) Якими факторами визначається величина перехідного послаблення спрямованого відгалужувача?
- 5) Якими факторами визначається величина спрямованості відгалужувача?
- 6) Зобразіть структурну схему установки для дослідження властивостей спрямованого відгалужувача. Поясніть її роботу і призначення усіх елементів.
- 7) Поясніть будову і принцип дії адаптерного переходу.
- 8) Чому в адаптерному переході відстань між збуджуючим штирем і закороченою стінкою хвилеводу вибирається рівною $\lambda_{\text{хв}}/4$?
- 9) Перерахуйте основні вимоги, що вимагаються від адаптерного переходу.
- 10) Яким чином відбувається налаштування адаптерного переходу?
- 11) Як збільшити ширину смуги частот, які пропускаються адаптерним переходом?

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕВЗАЄМНИХ ХВИЛЕВІДНИХ ПРИСТРОЇВ

Мета роботи: ознайомлення з фізичними процесами, які відбуваються при поширенні електромагнітного поля в намагнічених феритах, дослідження феритового вентиля на ефекті зміщення поля і Y-циркулятора.

Ключові положення. Феритові вентиля. Однією з важливих практичних задач є задача забезпечення розв'язки між генератором (передавачем) і навантаженням (наприклад, антеною). Для цієї мети використовують феритові вентиля, представляючи собою чотириполюсник, в якому енергія хвилі, яка поширюється в одному напрямку, практично не зменшується, в той час як енергія хвилі зворотнього напрямку сильно поглинається.

Основними параметрами вентилів є:

- загасання в прямому і зворотньому напрямках

$$A_{\text{пр}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вх пр}}}{P_{\text{вих пр}}}, \quad A_{\text{зв}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вх зв}}}{P_{\text{вих зв}}}, \quad (7.1)$$

де $P_{\text{вх пр}}$, $P_{\text{вих пр}}$, $P_{\text{вх зв}}$, $P_{\text{вих зв}}$ – потужності на вході і виході вентиля, включеного в тракт у прямому і зворотньому напрямках, відповідно;

- коефіцієнт бігучої хвилі у хвилеводному тракті при увімкненому вентилі.

На практиці використовуються вентиля на основі явища феромагнітного резонансу, ефекту зміщення поля й ефекту Фарадея.

Конструктивно вентиля являють собою відрізки спрямованих систем, всередині яких розташовується ферит певної форми (пластина, стрижень), який знаходиться в полі постійного магніту.

Розглянемо будову і принцип роботи вентиля на ефекті зміщення поля в прямокутному хвилеводі. Поздовжній перетин цього вентиля показано на рис.7.1.

На рис.7.1 позначені: 1 - прямокутний хвилевід, який працює в однохвильовому режимі; 2 - феритова пластина; 3 - поглинаюча пластина.

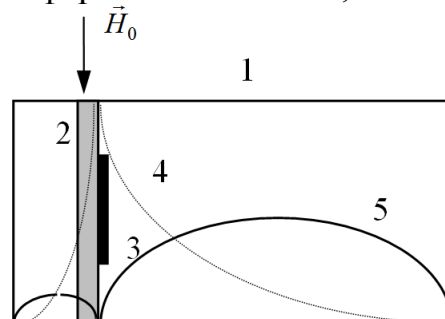


Рисунок 7.1 – Вентиль на ефекті зміщення поля

Феритова пластина 2, що має анізотропні властивості, по-різному змінює (спотворює) поширення поля хвилі H_{10} , що поширюється у хвилеводі 1 в прямому і зворотньому напрямках. Крива 5 відповідає розподілу амплітуди

вектора \vec{E} хвилі, яка поширюється в прямому напрямку, а крива 4 – для хвилі зворотнього напрямку. При такому розподілі амплітуди вектора \vec{E} , у поглинаючій пластині 3 наводиться струм тільки зворотною хвилею і, отже, ця хвиля послаблюється. Хвиля прямого напрямку в площині пластини 3 має амплітуду практично рівну нулю і тому втрат не зазнає.

Феритовий циркулятор – це багатополосник, в якому рух потоку енергії проходить у суворо певному напрямку, який залежить від орієнтації постійного магнітного поля. Циркулятори використовуються при одночасній роботі приймача і передавача на одну антену, незамінні в параметричних підсилювачах й ін.

Основні параметри циркулятора:

- смуга робочих частот;
- величина розв'язки між плечима циркулятора;
- коефіцієнт бігучої хвилі у хвилеводному тракті при увімкненні циркулятора;
- втрати в робочій смузі частот.

На практиці використовують Y-циркулятори, фазові циркулятори, циркулятори на ефекті Фарадея.

Y-циркулятор. В основі усіх Y-циркуляторів лежить симетричне 120-градусне розгалуження хвилеводної або смужової лінії передачі (рис. 7.2). Електромагнітна хвиля, яка надходить в плече 1 такого розгалуження, ділиться порівну між плечима 2 і 3. Оскільки плече 1 навантажено в такому випадку на опір, який дорівнює половині хвильового опору лінії, коефіцієнт відбиття дорівнює 1/3, а коефіцієнт стоячої хвилі дорівнює двом.

Помістивши в центр розгалуження намагнічений феритовий стрижень, можна перетворити таке розгалуження в циркулятор.

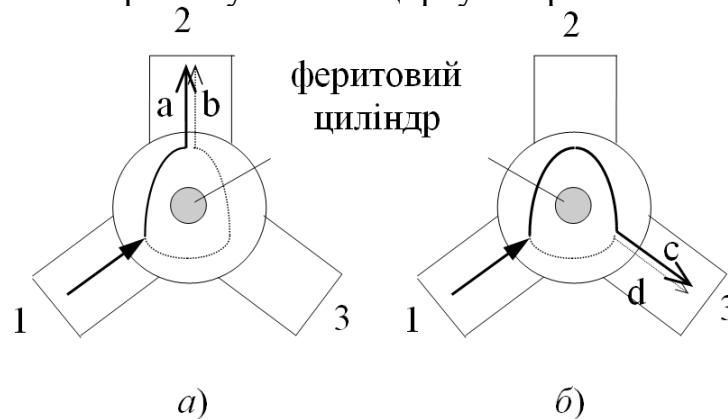


Рисунок 7.2 – Y-циркулятор

Нехай на вхід 1 надходить хвиля основного типу H_{10} . В результаті дифракції, якої зазнає ця хвиля на феритовому циліндрі, в плечі 2 і 3 циркулятора надходять по дві хвилі, які проходять різну довжину шляху, обминаючи ферит з різних сторін. Можна підібрати розміри і параметри фериту, а також величину H_0 підмагнічувального поля так, щоб електромагнітні хвилі a і b в плечі 2 додавались синфазно, а хвилі c і d в

плечі 3 – протифазно, тобто віднімались. У цьому випадку плече 3 опиниться розв'язним з вихідним плечем 1 (див. рис. 7.2, *a*).

В залежності від напрямку постійного магнітного поля електромагнітні хвилі будуть поширюватися або в напрямку 1-2-3 (див. рис. 7.2, *a*), або в зворотньому – 1-3-2 (див. рис. 7.2, *б*). Змінювання напрямку поширення електромагнітних хвиль здійснюється змінюванням намагнічуючого поля. При цьому виявляється, що до плеча 1 підключено опір плеча 2 або плеча 3. Тому в плечі 1 коефіцієнт відбиття дорівнює нулю, а $K_{СХ} = 1$. Просочування деякої частини енергії в розв'язане плече означає зміну хвильового опору, на яке навантажене плече 1, і поява, внаслідок цього, відбиття. Таким чином, видно, що при точному налаштуванні, циркулятор узгоджено з боку кожного з трьох плечей, а деякий розлад визиває неузгодженість системи. Це обумовлює вузькосмуговість і нетермостабільність циркуляторів цього типу. Деяке розширення смуги робочих частот досягається використанням діелектричних втулок навколо феритових стрижнів, які служать узгодженим пристроєм.

Домашнє завдання:

1) Вивчіть теоретичний матеріал і підготуйтеся до обговорення ключових питань.

2) **Рішіть задачу.** Маємо феритовий вентиль, з загасанням в прямому напрямку: 1 дБ, в зворотньому: 30 дБ. Визначити потужність на виході вентиля, якщо його підключено між генератором потужністю 10 мВт і навантаженням в прямому або зворотньому напрямках.

3) **Рішіть задачу.** Маємо Y-циркулятор у якого розв'язка між плечима 1 і 2 дорівнює одиниці, а між плечима 1 і 3 - 30 дБ. До плеча 1 циркулятора підключено генератор потужністю 10 мВт. Чому буде дорівнювати потужність в плечі 3, якщо: а) плече 2 навантажене на узгоджене навантаження; б) плече 2 закорочене.

Лабораторне завдання:

1) Зберіть установку для дослідження феритового вентиля і Y-циркулятора. Структурна схема установки наведена на рис. 7.3.

На цьому рисунку 1 – НВЧ генератор; 2 – вимірювальна хвилеводна лінія; 3 – детекторна секція зі з'єднувальним кабелем; 4 – феритовий вентиль зі зміщенням поля; 5 – Y-циркулятор; 6 – кінцеве поглинаюче навантаження; 7 – електронний мілівольтметр.

2) Виміряйте потужність електромагнітної хвилі на виході вимірювальної лінії.

3) Підключіть до виходу вимірювальної лінії феритовий вентиль у прямому, а потім у зворотньому напрямках і виміряйте потужність на його виході. Результати вимірювань занесіть в таблицю і розрахуйте коефіцієнт загасання вентиля в прямому і зворотньому напрямках.

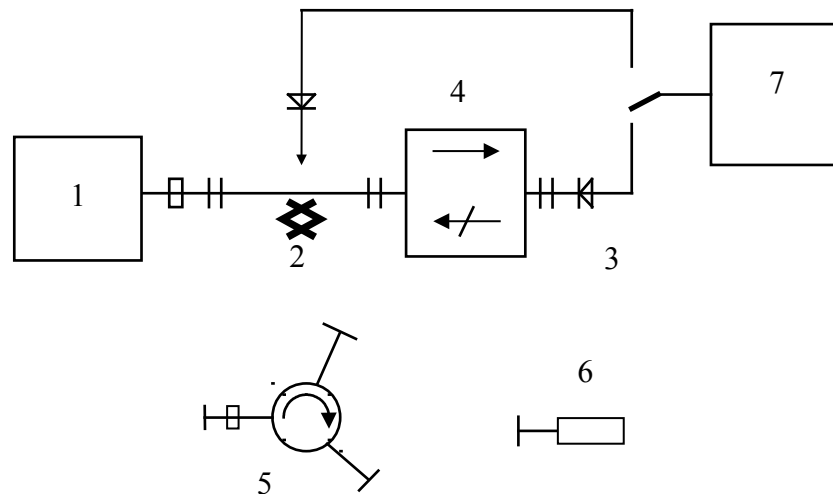


Рисунок 7.3 – Схема установки для дослідження феритового вентиля і Y-циркулятора

4) Підключіть одне з плечей Y-циркулятора до виходу вимірювальної лінії і виміряйте коефіцієнти передачі на усіх інших виходах циркулятора. Повторити вимірювання, коли до виходу вимірювальної лінії підключаються по чергово усі плечі циркулятора. Результати вимірювань занести у таблицю.

5) Підключіть до виходу вимірювальної лінії по чергово усі плечі вентиля і циркулятора, виміряйте КСХ у лінії. При цьому необхідно пам'ятати, що навантаження, яке підключається на виході (виходах) досліджуваного пристрою, повинно мати значно менший коефіцієнт відбиття, а ніж коефіцієнт відбиття від самого пристрою.

Зміст звіту. Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні дані (див. Додаток Б):

- 1) Результати виконання домашнього завдання.
- 2) Ескізи досліджуваних пристроїв.
- 3) Структурну схему установки для дослідження феритового вентиля і Y-циркулятора.
- 4) Таблицю вимірянних значень параметрів досліджуваних пристроїв.
- 5) Аналіз отриманих результатів.

Ключові питання:

- 1) Яке явище називається явищем феромагнітного резонансу?
- 2) У чому полягає ефект Фарадея, ефект зміщення поля?
- 3) Який пристрій називається вентиляем, циркулятором?
- 4) Перерахуйте основні параметри феритових вентилів, циркулятора.
- 5) Поясніть будову і принцип дії феритового вентиля зі зміщенням поля, ферорезонансного вентиля.

6) Поясніть будову і принцип дії феритового вентиля, який використовує ефект Фарадея, Y-циркулятора, фазового циркулятора.

7) Зобразіть схему використання циркулятора при роботі приймача та передавача на одну антену і поясніть її роботу.

Додаток А

КОРОТКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ОПИС

й інструкція з експлуатації хвилеводної вимірювальної лінії Р1-28

Лінія вимірювальна хвилеводна Р1-28 призначена для вимірювання параметрів електромагнітних хвиль пристроїв, виконаних на хвилеводних трактах перетином 23×10 мм.

Лінія може бути використана для вимірювання модуля і фази коефіцієнта відбиття двополюсників і чотиріполюсників, вимірювання довжини хвилі у хвилеводі, вимірювання малих послаблень хвилеводних чотиріполюсників.

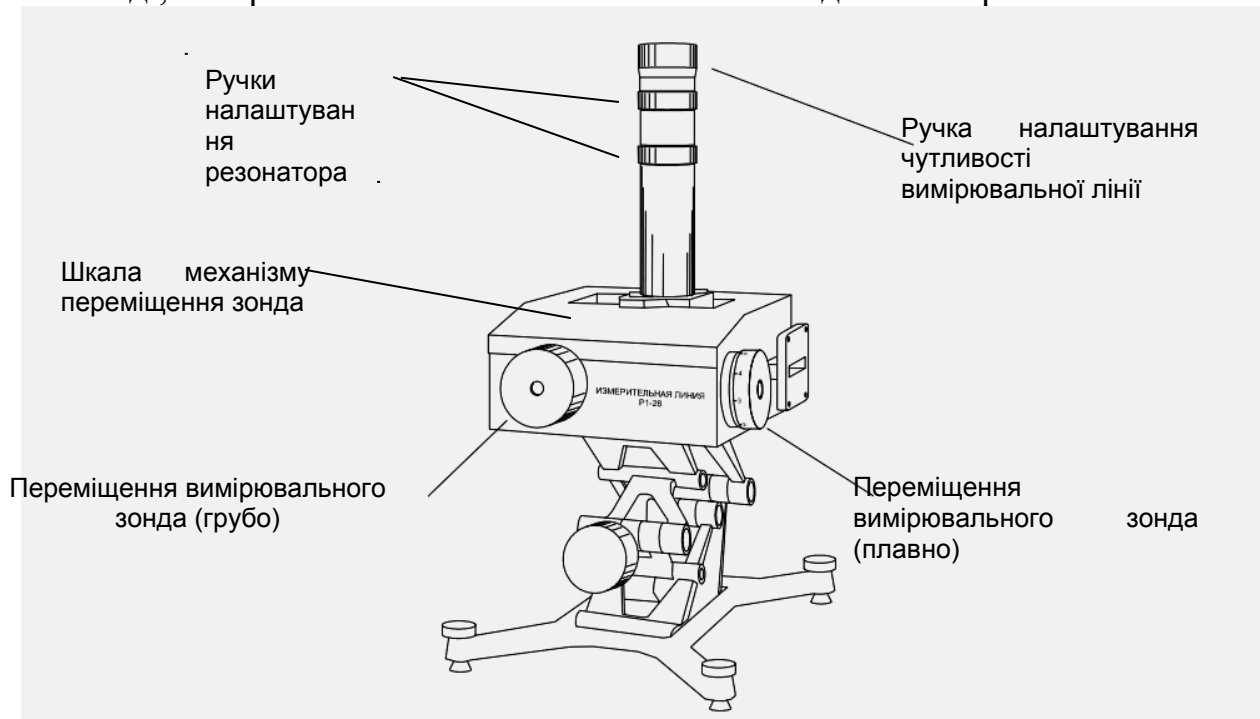


Рисунок А.1 – Загальний вид і розташування основних органів керування вимірювальної хвилеводної лінії Р1-28

Вимірювальна хвилеводна лінія Р1-28 складається (рис. А.2 і А.3) із відрізка прямокутного хвилеводу з вузькою щілиною, прорізаною посередині широкої стінки хвилеводу і рухомої каретки, та зондової головки, яка складається з вертикального зонда, який через налаштовуваний резонатор зв'язаний з детекторною секцією.

Хвилевід розміщується в корпус, який являє собою литу деталь. Каретка виконана у вигляді П-подібного кронштейна, який охоплює латунну пластину, яка одночасно є направляючою каретки. Конструкція механізму переміщення каретки зображена на рис. А.2.

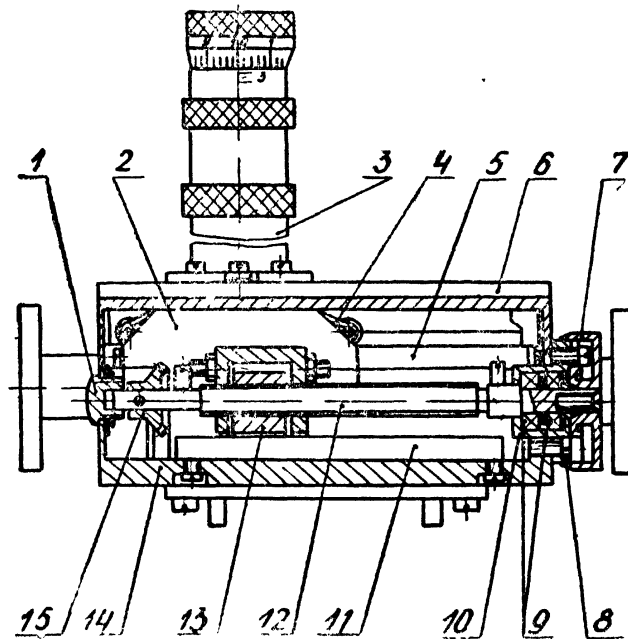


Рисунок А.2 – Конструкція механізму переміщення каретки:

1 – опора; 2 – каретка; 3 – зондова голівка; 4 – плоска пружина; 5 – пластина; 6 – кришка; 7 – лімб механізму переміщення; 8 – гвинт кріплення механізму переміщення; 9 – шарикопідшипники; 10 – втулка; 11 – направляюча; 12 – гвинт механізму переміщення; 13 – гайка механізму переміщення; 14 – корпус; 15 – колесо конічне

Переміщення каретки здійснюється обертанням гвинта механізму з шагом гвинтової лінії 1 мм. Конструкція зондової голівки зображена на рис. А.3.

Принцип роботи лінії заснований на дослідженні картини поля електромагнітної хвилі за допомогою зонда, який пропущено крізь щілину у внутрішню площину хвилеводу. Зонд зв'язаний з налаштовуваною вимірювальною зондовою голівкою. Голівка прикріплена на каретці, яка переміщається уздовж хвилеводу.

Зонд забезпечує слабкий зв'язок з електричним полем у хвилеводі. Наведений струм пропорційний напруженості електричного поля в місці розташування зонда. Після випрямлення детектором, струм поступає в ланцюг індикатора.

Налаштування вимірювальної голівки на максимальну чутливість дозволяє компенсувати реактивну складову провідності зонда, яка впливає на форму поля у хвилеводі, і зменшує похибку вимірювань, одночасно підвищуючи загальну чутливість лінії. Переміщення зонда уздовж лінії дозволяє визначити положення максимумів і мінімумів напруженості поля у лінії і їх відносні величини.

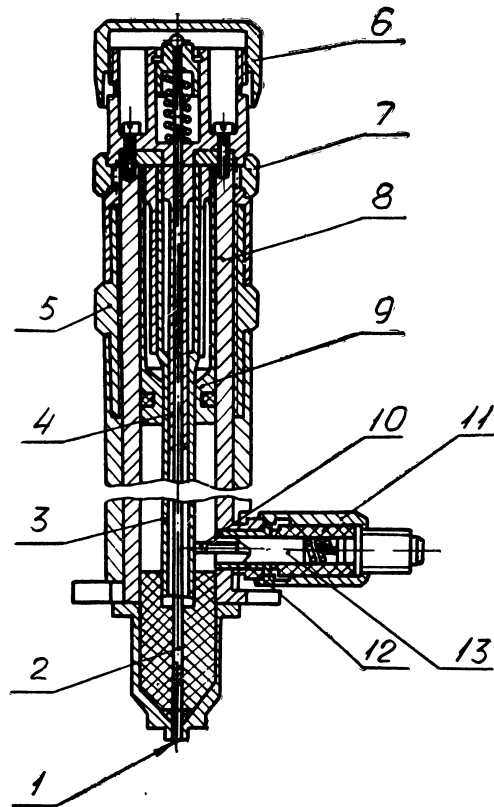


Рисунок А.3 – Конструкція зондової голівки:

1 – зонд; 2 – штир; 3 – середня трубка; 4 – внутрішній поршень; 5 – гайка зовнішнього поршня; 6 – лімб глибини занурення зонда; 7 – гайка внутрішнього поршня; 8 – зовнішня труба; 9 – зовнішній поршень; 10 – контакт; 11 – гайка; 12 – ізоляційна трубка; 13 – детектор

Вимірювальна хвилеводна лінія використовується у складі лабораторного макета, тому вона постійно підключена з одного боку до генератора крізь розв'язуючий феритовий вентиль.

Порядок роботи з вимірювальною хвилеводною лінією

До вільного фланця під'єднайте випробуваний хвилеводний тракт або навантаження.

Підключіть кабель від вимірювального низькочастотного підсилювача до штуцера низькочастотного гнізда зондової голівки лінії.

Включіть генератор й установіть необхідну глибину занурення зонда. Максимальна глибина занурення не повинна перевищувати 1,6 мм.

За максимумом показників індикатора налаштуйте в резонанс контур зонда, використовуючи верхню налаштовувану гайку зондової голівки, потім за допомогою нижньої гайки налаштуйте на резонанс детекторний контур зондової голівки. Налаштування контурів повторюйте до отримання максимуму показників індикатора.

Роботу лінії можна вважати нормальною, якщо максимумами, що спостерігаються уздовж лінії, відрізняються не більше ніж на 4%.





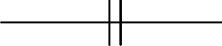
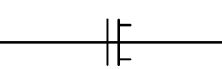
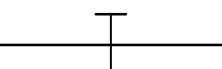
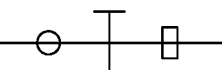
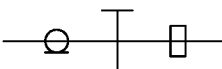

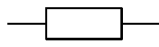
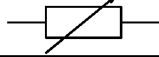
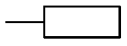

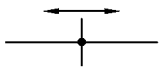

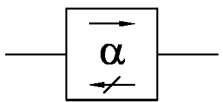

Додаток Б

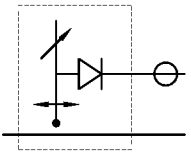
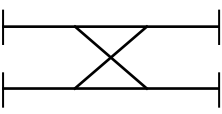
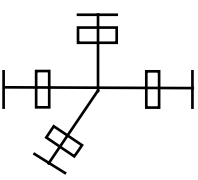
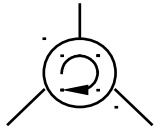
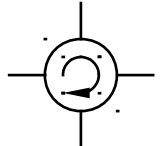
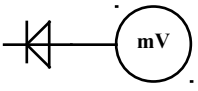
БЛАНК ЗВІТІВ ПРО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Кафедра _____ (назва кафедри)		
Дисципліна _____ (назва дисципліни)		
Група _____		
Студент _____ (прізвище та ініціали)	Викладач _____ (прізвище та ініціали)	
1 _____ (номер та назва лабораторної роботи)		
2 _____ (мета лабораторної роботи)		
3 Результати виконання домашньої роботи (схеми експерименту, апаратура, розрахункові формули, апіорні графіки або розрахунки, прогнози очікуваних закономірностей, попередньо зіставлені алгоритми або програми, заздалегідь заготовлені таблиці для реєстрації апостеріорних даних)		
4 Результати виконання лабораторного завдання (записи, які зроблені з урахуванням індивідуальних вихідних даних під час лабораторного експерименту і обробки експериментальних даних)		
5 Висновки (індивідуальні висновки за результатами виконання лабораторного завдання з поясненням отриманих результатів – найбільш відповідальна частина робочих записів, тобто вони відображають особисті думки студента, рівень його інтелекту)		
6 Дата, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою		
_____	_____	_____
(дата)	(підпис студента)	(оцінка, віза викладача)

Додаток В

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ХВИЛЕВОДИ	
	Загальне позначення
	хвилевід прямокутний
	хвилевід круглий
	хвилевід коаксіальний
ХВИЛЕВОДНІ З'ЄДНАННЯ ТА ПЕРЕХОДИ	
	контактне симетричне з'єднання хвилеводів
	дросельне з'єднання хвилеводів
	перехід з одного типу на інший (загальне позначення)
	перехід з круглого на прямокутний хвилевід
	перехід з коаксіального на прямокутний хвилевід
	перехід з круглого хвилеводу на коаксіальний
ЕЛЕМЕНТИ ХВИЛЕВІДНОГО ТРАКТУ	
	атенюатор постійний
	атенюатор змінний
	навантаження поглинаюче
	навантаження короткозамкнуте
	короткозамикач рухомий
	резонатор прохідний
	вентиль хвилеводний
	генератор НВЧ

	вимірювальна лінія
	спрямований відгалужувач
	подвійний хвилеводний трійник
	триплечовий Y-циркулятор
	чотириплечовий циркулятор
	детекторна вимірювальна секція з мілівольтметром

ЛІТЕРАТУРА

1. Вольман В.И. Техническая электродинамика : учеб. / В.И. Вольман, Ю.В. Пименов.— М.: Связь, 1971. — 487 с.
2. Семенов Н.А. Техническая электродинамика : учеб. пособие для вузов / Семенов. Н.А — М.: Связь, 1973. — 480 с.
3. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие / Никольский. В.В. — М.: Наука, 1973. — 608 с.
4. Красюк Н.П. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие для радиотехн. Вузов и факультетов / Красюк, Н.П. Дымович Н.Д.; под ред. Зернова. Н.В. — М.: Высш. Школа, 1974. — 536 с.
5. Черенков В.С. Технічна електродинаміка: конспект лекцій / Черенков В.С., Іваницький А.М. — Одеса: Вид-во ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004. — 156 с.
6. Черенков В.С. Электродинамика информационных систем: учеб. пособие / Черенков В.С., Драганов В.М., Соломко А.В. — Одесса: Изд-во УГАС им. А.С. Попова, 1997. — 90 с.
7. Техническая электродинамика: метод. руководство к практическим занятиям и самостоятельной работе / уклад. Черенков В.С. — Одесса: Изд-во ОНАС им. А.С. Попова, 2003. — 22 с.
8. Электродинамика и распространение радиоволн: метод. руководство к лабораторному практикуму / Драганов В.М., Черенков В.С. — Одесса: Изд-во УГАС им. А.С. Попова, 2002. — 52 с.
9. Черенков В.С. Техническая электродинамика: конспект лекций / Черенков В.С., Іваницький А.М. — Одесса: Изд-во ОНАС им. А.С. Попова, 2006. — 160 с.
10. Черенков В.С. Електродинаміка інформаційних систем : навч. посібник / Черенков В.С., Драганов В.М., Соломко О.В. — Одеса: Вид-во УДАЗ ім. О.С. Попова, 1995. — 94 с.
11. Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин ; под ред. Д.М. Сазонова. — М.– Л.: Энергия, 1967. — 376 с.
12. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. — М.: Советское радио, 1957. — 581 с.
13. Федоров Н.Н. Основы электродинамики : учеб. пособие для вузов / Н.Н. Федоров — М.: Связь, 1980. — 399 с.
14. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. для вузов / Б.М. Петров. — 2-е изд., испр. — М.: Горячая линия – Телеком, 2004. — 558 с.
15. Кураев А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. — Мн.: Бестпринт, 2004 — 357 с.
16. Фальковский О.И. Техническая электродинамика: учеб. для вузов связи / О.И. Фальковский — М.: Связь, 1978. — 432 с.

Навчально-методичне видання

Гладкіх В.І.

Методичні вказівки

до лабораторних робіт студентів з дисципліни
“Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації”

Редактор – Кодрул Л.А.
Комп’ютерна верстка – Гардиман Ж.А.

Здано до набору 25.11.13. Підписано до друку 10.12.13.
Обсяг 4,2 ум.-друк. арк.
Формат 90х60/16. Зам. № 5 . Наклад 50 прим.
Віддруковано на видавничому обладнанні фірми RISO
в друкарні редакційно-видавничого центру ОНАЗ ім. О.С. Попова
Одеса, 65021, вул. Ковалевського, 5
Тел. (0482) 705-04-94