

## Лабораторна робота №1

### Хвилі у хвилеводах

Мета роботи:

1. Практичне ознайомлення з особливостями металевих хвилеводів.
2. Вивчення режимів роботи хвилеводів, вимірювання опорів хвилеводних елементів.
3. Вивчення режимів роботи ліній передач.

### 1 Короткі теоретичні відомості

#### 1.1 Різновиди довгих ліній

Лінії передач, що містять не менше двох паралельних провідників, називають довгими лініями. Деякі з них показано на рисунку 1.1.

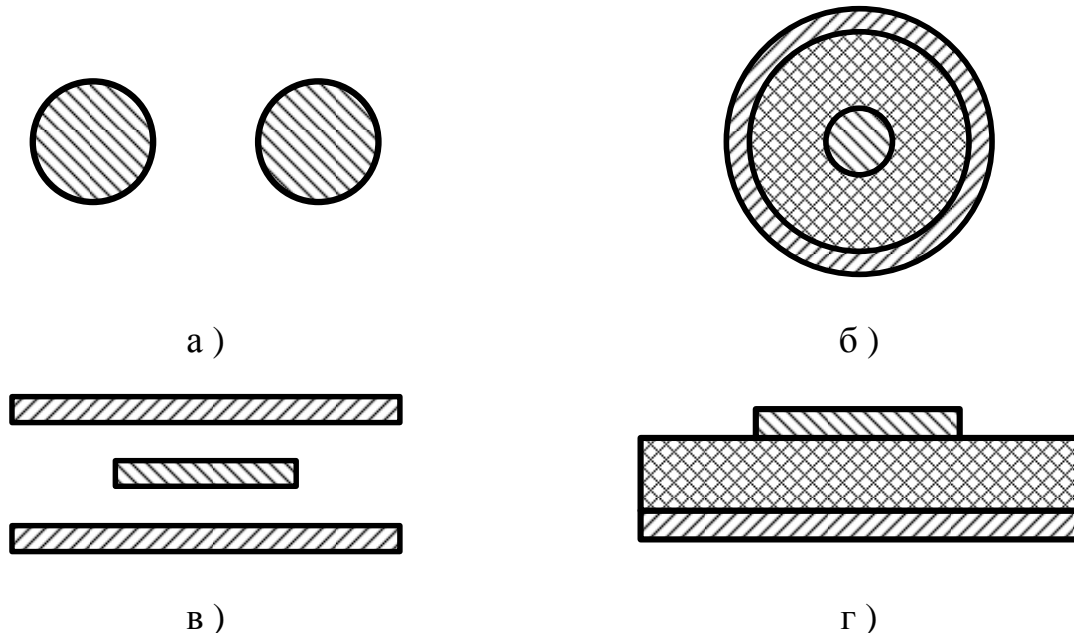


Рисунок 1.1 – Поперечні перерізи довгих ліній: а) двопровідна лінія; б) коаксіальна лінія (з твердим діелектриком); в) симетрична смужкова лінія; г) мікросмужкова лінія (несиметрична смужкова лінія)

У лініях, повністю заповнених діелектриком, хвилею основного типу є хвиля ТЕМ, для якої властиво: 1) швидкість її поширення дорівнює швидкості світла у середовищі, що заповнює лінію; 2) електричне та магнітне поля суто поперечні та мають статичний характер у площинах, що перпендикулярні поздовжній вісі лінії передач; 3) критична частота дорівнює нулю, тому за допомогою ТЕМ-хвиль можна передавати енергію на будь-яких частотах, у т.ч. на нульовій (постійний струм).

У лініях, частково заповнених діелектриком (рисунок 1.1., г) ТЕМ-хвиля існувати не може, проте в таких лініях хвиля основного типу зазвичай близька за властивостями до ТЕМ-хвилі (квазі-ТЕМ-хвиля).

## 1.2. Розподіл напруги та струму уздовж лінії

1.2.1. У лінії, до одного кінця якої підключено генератор, а до іншого – навантаження з опором  $\dot{Z}_l$  (рисунок 1.2), в загальному випадку є дві хвилі – біжуча, яка поширюється від генератора до навантаження, та відбита, що поширюється їй назустріч.

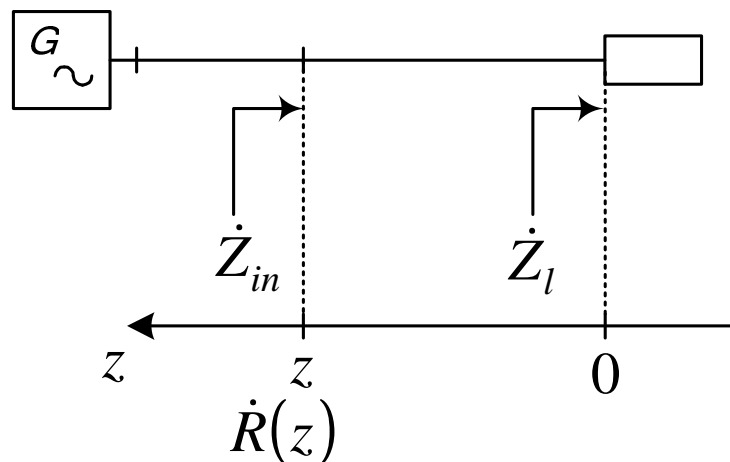


Рисунок 1.2 – Система генератор – лінія передачі – навантаження

Якщо вздовжню координату  $z$  відраховувати від місця підключення навантаження (див. рисунок 1.2), то розподіл комплексних амплітуд напруги та струму у лінії можна записати як суму падаючих та відбитих хвиль напруги та струму:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}(z) &= \dot{U}_+ e^{ikz} + \dot{U}_- e^{-ikz} = \dot{U}_+ e^{ikz} - \dot{U}_- e^{ikz} = \\ &= \dot{U}_+ e^{ikz} [1 + \dot{R}(z)]; \\ \dot{i}(z) &= \dot{i}_+ e^{ikz} + \dot{i}_- e^{-ikz} = \frac{\dot{U}_+}{W} e^{ikz} - \frac{\dot{U}_-}{W} e^{ikz} = \\ &= \frac{\dot{U}_+}{W} e^{ikz} [1 - \dot{R}(z)]; \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

де  $k$  – хвильове число даного середовища;  $W$  – хвильовий опір лінії.

Відношення комплексних амплітуд напруги відбитої та падаючої хвиль у перерізі  $z$ :

$$\dot{R}(z) = \frac{\dot{U}_- e^{-ikz}}{\dot{U}_+ e^{-ikz}} = \frac{\dot{U}_-}{\dot{U}_+} e^{-i2kz} = \dot{R}(0) e^{-i2kz}, \quad (1.2)$$

називають *коефіцієнтом відбиття за напругою*. Коефіцієнт  $\dot{R}(0)$  залежить лише від властивостей навантаження. Тому величину  $\dot{R}(0) = \dot{R}_l$  називають коефіцієнтом відбиття від неоднорідності (коефіцієнтом відбиття навантаження). Вхідний опір лінії передач у перерізі  $z$  пов'язаний з  $\dot{R}(z)$  співвідношенням

$$\dot{Z}_{ex}(z) = \frac{\dot{U}(z)}{\dot{I}(z)} = W \frac{1 + \dot{R}(z)}{1 - \dot{R}(z)}, \quad (1.3)$$

з якого випливає зв'язок між  $\dot{R}(0)$  та  $\dot{Z}_l$ :

$$\dot{R}_l = \dot{R}(0) = R_l e^{i\varphi_l} = \frac{\dot{Z}_l - W}{\dot{Z}_l + W} = \frac{\dot{Z}'_l - 1}{\dot{Z}'_l + 1}, \quad (1.4)$$

де  $\dot{Z}'_l = \frac{\dot{Z}_l}{W}$  – нормований (до хвильового опору лінії передачі) опір навантаження.

З виразів (1.1) випливає, що максимальне значення модуля напруги в лінії передач без втрат  $U_{\max} = |\dot{U}_+| + |\dot{U}_-|$ , а мінімальне  $U_{\min} = |\dot{U}_+| - |\dot{U}_-|$ . Відношення цих величин називають *коефіцієнт стоячої хвилі за напругою* (КСХН):

$$K_{cmU} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{|\dot{U}_+| + |\dot{U}_-|}{|\dot{U}_+| - |\dot{U}_-|} = \frac{1 + |\dot{R}|}{1 - |\dot{R}|} \equiv K_{cm}, \quad (1.5)$$

Якщо коефіцієнт відбиття дорівнює нулю, то  $K_{cm} = 1$ , тобто максимуми та мінімуми напруги в лінії передач відсутні. Якщо хвиля повністю відбивається від навантаження ( $|\dot{R}| = 1$ ), то  $K_{cm} \rightarrow \infty$ .

1.2.2. Важливими для практики є випадки узгодженої, короткозамкненої та розімкненої ліній.

*Узгоджена лінія:*  $\dot{Z}_l = W$  ( $\dot{Z}'_l = 1$ ),  $\dot{R}_l = 0$ ,  $K_{cm} = 1$ ,  $\dot{U}(z) = \dot{U}_+ e^{ikz}$ ,  $\dot{I}(z) = \frac{\dot{U}_+}{W} e^{ikz}$ ,  $\dot{Z}_{in} = W$ . В узгодженій лінії існує лише падаюча хвиля, а вхідний опір лінії передач не залежить від координати  $z$  і дорівнює її

хвильовому опору. Такий режим роботи лінії передач називається *режимом узгодження (режимом біжучої хвилі)*.

*Короткозамкнена лінія:*  $\dot{Z}_l = 0$  ( $\dot{Z}'_l = 0$ ),  $\dot{R}_l = 0$ ,  $K_{cm} \rightarrow \infty$ ,  
 $\dot{U}(z) = 2i\dot{U}_+ \sin kz$ ,  $\dot{I}(z) = \frac{2\dot{U}_+}{W} \cos kz$ ,  $\dot{Z}_{in}(z) = iW \operatorname{tg} kz$ . Так як  $\dot{Z}_l = 0$ , такий режим роботи лінії передач називають *режимом короткого замикання*.

*Розімкнена лінія:*  $\dot{Z}_l = \infty$  ( $\dot{Z}'_l = \infty$ ),  $\dot{R}_l = 1$ ,  $K_{cm} \rightarrow \infty$ ,  $\dot{U}(z) = 2\dot{U}_+ \cos kz$ ,  
 $\dot{I}(z) = i\frac{2\dot{U}_+}{W} \sin kz$ ,  $\dot{Z}_{in}(z) = -iW \operatorname{ctg} kz$ . Порівнюючи вхідні опори короткозамкненої та розімкненої ліній передач, бачимо, що в цих лініях встановлюються стоячі хвилі напруги та струму, а вхідний опір за будь-яких значень  $z$  суто уявний.

*Суто реактивне навантаження:*  $\dot{Z}'_l = iX'_l$ . За формулою (1.4) маємо:

$$|\dot{R}_l| = \frac{|iX'_l - 1|}{|iX'_l + 1|} = \frac{(X'_l)^2 + 1}{(X'_l)^2 + 1} = 1,$$

тобто у лінії також встановлюється стояча хвиля.

Якщо лінію навантажити на довільне комплексне навантаження, то уздовж лінії встановлюється *режим змішаних хвиль*. Розподіл напруги, струму та вхідного опору легко зрозуміти, розглядаючи функції  $1 \pm \dot{R}(z)$ , що входять до формули (1.1). На комплексній площині (рисунок 1.3) перший доданок цих функцій – одиничний дійсний вектор, доданок  $\dot{R}(z) = R e^{i\varphi} e^{-i4\pi z/\Lambda}$  – вектор довжини  $R$ , орієнтований під кутом  $\varphi - 4\pi z/\Lambda$  до дійсної осі ( $\Lambda$  – довжина хвилі у лінії передач).

Суми  $1 \pm \dot{R}(z)$  – замикаючі вектори обох доданків. При збільшенні  $z$  від нуля вектор  $\dot{R}(z)$ , залишаючись незмінним по довжині (якщо лінія передач без втрат), обертається за годинниковою стрілкою, здійснюючи один оберт при зміні  $z$  на  $\Lambda/2$ . Вектори  $1 \pm \dot{R}(z)$  (аналогі напруги та струму) будуть при цьому змінюватись за модулем та фазою. Нескладно переконатись у тому, що:

а) Графіки  $|1 \pm \dot{R}(z)|$  (тобто, по суті, амплітудні розподіли напруги та струму) є ідентичними періодичними функціями з періодом  $\Lambda/2$ , зсунуті одна відносно одної на  $\Lambda/4$ .

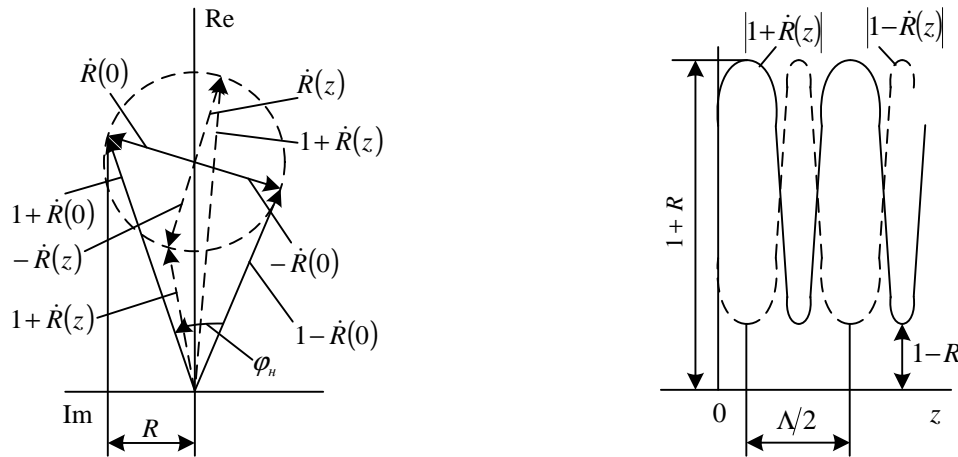


Рис. 1.3. Векторна діаграма функцій  $1 \pm \dot{R}(z)$

б) У перерізах лінії, де коефіцієнт відбиття суто дійсний та додатний ( $\dot{R}(z) = R$ ), спостерігається максимум напруги та мінімум струму. У перерізах, де  $\dot{R}(z) = -R$ , ситуація протилежна.

в) Вхідний опір лінії у точках максимуму  $\dot{U}(z)$  суто дійсний і більший за  $W$ , у точках мінімуму дійсний і менший за  $W$  (це впливає з формули (1.3)).

г) У точках лінії, де  $1 + \dot{R}(z)$  випереджає по фазі  $1 - \dot{R}(z)$ , вхідний опір комплексний та має індуктивний характер. У точках лінії, де  $1 + \dot{R}(z)$  відстає по фазі від  $1 - \dot{R}(z)$ , вхідний опір комплексний та має ємнісний характер.

д) Коефіцієнт біжучої хвилі (КБХ), що визначається як

$$K_{\text{бх}} = \frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{max}}}, \quad (1.6)$$

та пов'язаний з модулем коефіцієнта відбиття простим співвідношенням

$$K_{\text{бх}} = \frac{1 - R}{1 + R}. \quad (1.7)$$

1.2.4. За експериментально виміряною кривою розподілу  $\dot{U}(z)$ , та відомим  $W$ , можна визначити опір навантаження  $\dot{Z}_l$ .

За експериментальними значеннями  $U_{\max}$  і  $U_{\min}$  обчислюють КБХ за формулою (1.6), а потім за формулою (1.7)  $R$ . На комплексній площині будується коло радіуса  $R$  з центром у точці  $+1$ . Потім розраховують величину

$$|1 + \dot{R}(0)| = \frac{2U(0)}{U_{\max} + U_{\min}}.$$

З початку координат проводять коло радіуса  $|1 + \dot{R}(0)|$ , знаходять точки його перетину з раніше побудованим колом радіуса  $R$ . Якщо за експериментальною кривою напруга при віддаленні від кінця лінії збільшується (як на рисунку 1.3), то закінченню лінії відповідає ліва точка перетину, якщо напруга зменшується, – то права. Вибравши потрібну точку перетину, легко побудувати вектори  $1 + \dot{R}(0)$  і  $1 - \dot{R}(0)$ ; при цьому визначиться кут  $\varphi$  (див. рисунок 1.3). Дійсну та уявну частини  $\dot{Z}_l$  можна розрахувати за формулами

$$R_l = W \frac{|1 + \dot{R}(0)|}{|1 - \dot{R}(0)|} \cos \varphi_l, \quad X_l = W \frac{|1 + \dot{R}(0)|}{|1 - \dot{R}(0)|} \sin \varphi_l.$$

При цьому  $\varphi_l > 0$ , якщо  $1 + \dot{R}(0)$  випереджає  $1 - \dot{R}(0)$ , і  $\varphi_l < 0$  у протилежному випадку.

## 2.1 Особливості електромагнітних хвиль у хвилеводах

2.1.1 Хвилеводами називають систему провідників і (або) діелектриків, що використовуються для спрямованої передачі електромагнітної хвилі (рисунок 1.4).

Власні хвилі поздовжньо-однорідного хвилеводу поділяють на такі класи: Н-хвилі, Е-хвилі, та НЕ(ЕН)-хвилі, або хвилі магнітного (Н), електричного (Е) типів і гібридного типів. Кожен з цих класів містить нескінченну множину мод або типів хвиль ( $H_{mn}$ ,  $E_{mn}$ ,  $HE_{mn}$ ,  $EH_{mn}$ ).

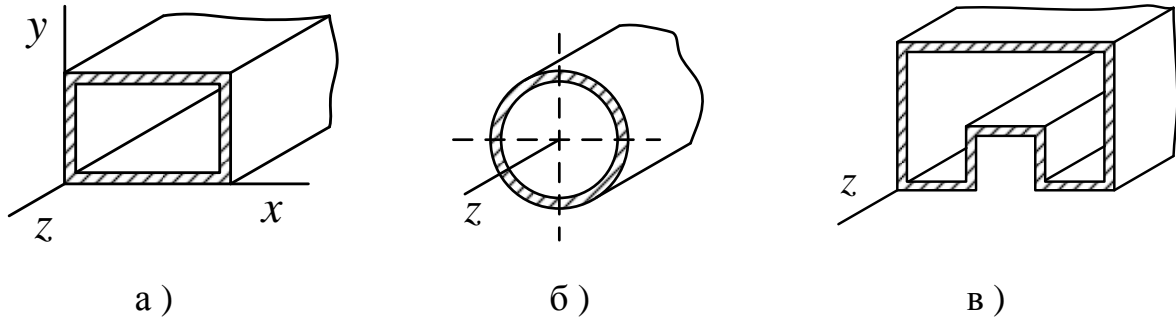


Рисунок 1.4 – Хвилеводи прямокутного (а), круглого (б) та П-подібного перерізів (в)

Структура електромагнітного поля хвиль класу Н характеризується наявністю поздовжньої складової магнітного поля  $\vec{H}$  та відсутністю поздовжньої складової електричного поля  $\vec{E}$  ( $H_z \neq 0$ ,  $E_z = 0$ ). У хвиль класу Е, навпаки,  $H_z = 0$ ,  $E_z \neq 0$ . У гібридних хвиль  $H_z \neq 0$ ,  $E_z \neq 0$ .

2.1.2. Залежності від  $z$  всіх компонент електромагнітного поля хвилеводних хвиль – експоненційна:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}_{\perp}(x, y)e^{\mp i\gamma z}; \vec{H}(x, y, z) = \vec{H}_{\perp}(x, y)e^{\mp i\gamma z}. \quad (1.8)$$

Величина  $\gamma$ , що стоїть в показнику експоненти, називається *поздовжнім хвильовим числом (сталюю поширення)* і для будь-якого хвилеводу записується у вигляді

$$\gamma = \sqrt{k^2 - \chi^2} = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_a \mu_a - \chi^2}. \quad (1.9)$$

Величина  $\chi$  (*поперечне хвильове число*) залежить від розмірів поперечного перерізу хвилеводу і типу хвилі. При цьому, чим вищий тип хвилі, тим більше поперечне хвильове число. Хвилі, в яких  $\chi = 0$ , у хвилеводах існувати не можуть.

Якщо  $\gamma$  дійсна ( $\omega^2 \varepsilon_a \mu_a > \chi^2$ ), то хвиля поширюється по хвилеводу. Довжина хвилі  $\Lambda$  у хвилеводі та фазова швидкість  $v_{\phi}$  пов'язані з  $\gamma$  співвідношеннями

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\gamma} = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - \chi^2}}; v_{\phi} = \frac{\omega}{\gamma} = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 - \chi^2}}. \quad (1.10)$$

Оскільки  $\gamma = \sqrt{k^2 - \chi^2} < k$ , фазова швидкість  $v_{\phi}$  більша за швидкість світлі у вільному просторі  $c = \omega/k$ . Таким чином, хвилеводні хвилі є

«швидкими». З цієї ж причини довжина хвилі в хвилеводі більша за довжину хвилі  $\lambda = 2\pi/k$  у вільному просторі. Якщо  $\gamma$  уявна ( $\omega^2 \varepsilon_a \mu_a < \chi^2$ ), то експоненційний множник у виразі (1.8) стає дійсною експонентою:  $e^{\mp i\gamma z} = e^{\mp |\gamma|z}$ . Хвиля при цьому не поширюється уздовж хвилеводу. Її амплітуда залежно від зміни  $z$  монотонно збільшується або зменшується.

2.1.3. Частота, за якої  $\gamma = 0$  ( $\omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = \chi$ ), називається критичною ( $\omega_{cr}$ ) для даної хвилі. На частотах, менших за  $\omega_{cr}$ , дана хвиля не поширюється (поза межний режим роботи хвилеводу), а на частотах  $\omega > \omega_{cr}$  – поширюється. Критична частота пропорційна поперечному хвилевому числу:

$$\omega_{cr} = \frac{\gamma}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}. \quad (1.11)$$

Критичною довжиною хвилі  $\lambda_{cr}$  називається довжина хвилі у вільному просторі, яка відповідає критичній частоті:

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi}{\gamma}. \quad (1.12)$$

Хвиля, у якої найменше значення поперечного хвилевого числа серед всіх хвиль даного хвилеводу, називається *хвилею основного типу*. Вона також має найменшу критичну частоту.

2.1.4. Найчастіше на практиці НВЧ використовують хвилеводи прямокутного перерізу. Хвилею основного типу для нього є  $H_{10}$  (рисунок 1.5).

Її електромагнітне поле записується так:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\mp} &= \vec{y}_0 E_{\max} \sin \frac{\pi x}{a} \cdot e^{\mp i\gamma z}; \\ \vec{H}_{\mp} &= \frac{E_{\max}}{\omega \mu_a} \left( \mp \vec{x}_0 \gamma \sin \frac{\pi x}{a} + i \vec{z}_0 \frac{\pi}{a} \cos \frac{\pi x}{a} \right) e^{\mp i\gamma z}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

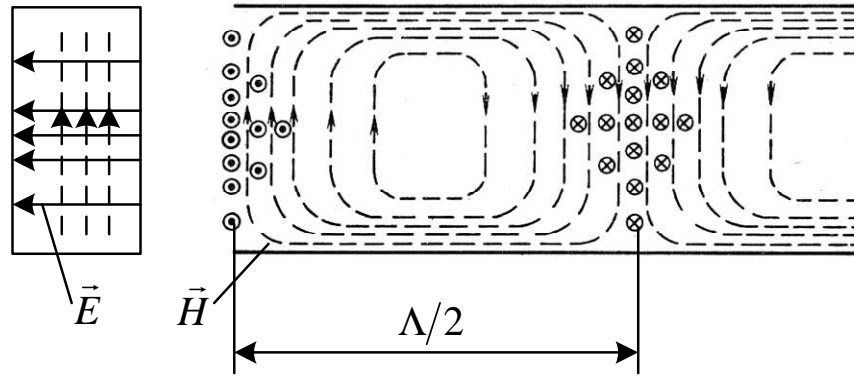


Рисунок 1.5 – Конфігурація силових ліній хвилі  $H_{10}$

Знак мінус у цих виразах відповідає хвилі, що поширюється уздовж додатної піввісі  $z$ , знак плюс – хвилі протилежного напрямку. Поперечне хвильове число цієї хвилі  $\chi = \pi/a$ , критична частота  $\omega_{cr} = \frac{\pi}{a\sqrt{\epsilon_a\mu_a}} = \frac{c\pi}{a\sqrt{\epsilon\mu}}$ , а критична довжина  $\lambda_{cr} = 2a$ . Довжина хвилі у хвилеводі при цьому дорівнює  $\Lambda = \lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}$ .

## 2.2. Особливості електромагнітних хвиль у хвилеводах

2.2.1. Зазвичай розміри поперечного перерізу хвилеводу вибирають таким чином, щоб у робочому діапазоні частот по ньому поширювалась лише хвиля основного типу.

У даній роботі досліджуються випадки, коли відрізок такого хвилеводу є лінією передачі та з'єднує НВЧ-генератор з навантаженням.

2.2.2. У загальному випадку навантаження не є узгодженим, тобто створювана генератором хвиля, що має на кінці лінії амплітуду  $\dot{C}_+$ , частково відбивається від навантаження і поширюється до генератора у вигляді тієї ж хвилі, але з амплітудою  $\dot{C}_-$  (рисунок 1.6). Розподіл електричного та магнітного полів хвилі основного типу в хвилеводі записують як суму падаючих і відбитих хвиль:

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, y, z) &= \dot{C}_+ \vec{E}_{\perp+} e^{i\gamma z} + \dot{C}_- \vec{E}_{\perp-} e^{-i\gamma z}; \\ \vec{H}(x, y, z) &= \dot{C}_+ \vec{H}_{\perp+} e^{i\gamma z} + \dot{C}_- \vec{H}_{\perp-} e^{-i\gamma z}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

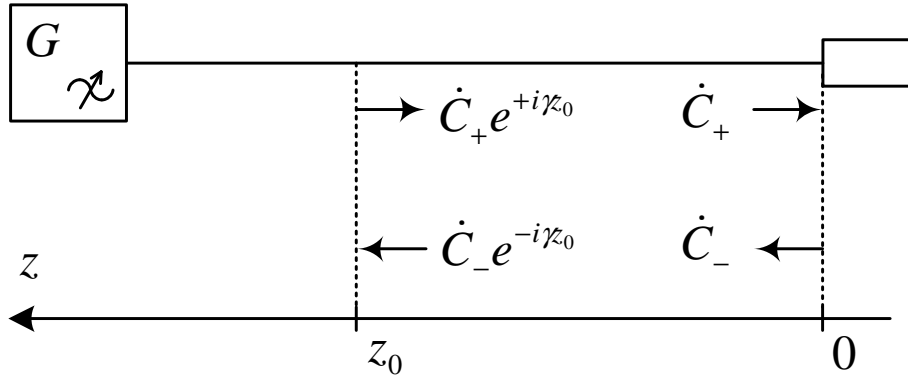


Рисунок 2.3 – Система генератор – хвилевід – навантаження

Для хвилі  $H_{10}$  справедливе відношення  $\vec{E}_{\perp+} = \vec{E}_{\perp-}$ . Тому розподіл електричного поля можна записати так:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}_{\perp+} (\dot{C}_+ e^{i\gamma z} + \dot{C}_- e^{-i\gamma z}) = \dot{C}(z) \vec{E}_{\perp+} \quad (1.15)$$

2.2.3. Залежність амплітуди  $\dot{C}(z)$  від координати  $z$  така ж сама, як для напруги  $\dot{U}(z)$  у лініях з хвилями TEM. Це дозволяє перенести деякі поняття теорії довгих ліній у теорію хвилеводів. Винісши у  $\dot{C}(z)$  за дужки амплітуду падаючої хвилі у переріз  $z$  ( $\dot{C}_+ e^{i\gamma z}$ ), отримаємо

$$\dot{C}(z) = \dot{C}_+ e^{i\gamma z} [1 + \dot{R}(z)] \quad (1.16)$$

Величина  $\dot{R}(z)$  є коефіцієнтом відбиття по електричному полю:

$$\dot{R}(z) = \frac{\dot{C}_- e^{-i\gamma z}}{\dot{C}_+ e^{i\gamma z}} = \frac{\dot{C}_-}{\dot{C}_+} e^{-i2\gamma z} = \dot{R}(0) e^{-i2\gamma z} \quad (1.17)$$

який є комплексною величиною з модулем, що не залежить від  $z$ , та фазою, лінійно залежною від  $z$ , причому період  $\dot{R}(z)$  дорівнює  $\Lambda/2$ . Коефіцієнт відбиття від кінця лінії  $\dot{R}(0)$  слід розглядати як первинну характеристику навантаження. У загальному випадку значення  $\dot{R}(0)$  залежить від частоти.

2.2.4. По аналогії з довгими лініями вводять поняття «нормований вхідний опір хвилеводу»:

$$\dot{Z}'_{in}(z) = \frac{1 + \dot{R}(z)}{1 - \dot{R}(z)}. \quad (1.18)$$

При  $z=0$  нормований вхідний опір дорівнює нормованому вхідному опору навантаження:

$$\dot{Z}'_{in}(0) = \dot{Z}'_l = \frac{1 + \dot{R}(0)}{1 - \dot{R}(0)}. \quad (1.19)$$

Потрібно мати на увазі, що цю величину, так само, як і  $\dot{Z}'_{in}$ , не можна трактувати, по аналогії з ТЕМ-лініями, як відношення опору навантаження до «хвильового опору хвилеводу». Поняття опору як відношення напруги до струму для навантажень НВЧ незастосовне. Не має однозначного змісту і поняття «хвильовий опір хвилеводу».

### **2.3 Розподіл електричного поля уздовж хвилеводу при різних навантаженнях**

2.3.1 Розподіл електричного поля уздовж хвилеводу (1.16) повністю визначається коефіцієнтом відбиття від навантаження  $\dot{R}(0)$  чи його нормованим опором  $\dot{Z}'_l$ . Аналіз розподілу  $C(z)$  можна зробити так само, як і для довгих ліній. Тому тут наведемо лише кінцеві результати з деякими коментарями.

2.3.2 Коли  $\dot{R}(0)=0$  ( $\dot{Z}'_l=1$ ), кажуть про режим узгодженого навантаження. У хвилеводі при цьому є лише падаюча хвиля, яка поширюється від генератора та повністю поглинається навантаженням. Практично таким навантаженням може бути вставка спеціальної форми з поглинаючого матеріалу, такі узгоджені навантаження часто використовують при вимірюваннях на НВЧ. Властивості узгодженого навантаження може мати той чи інший споживач енергії НВЧ, наприклад, антени, що живляться через хвилеводні лінії передач (фідери). У таких випадках вживають спеціальних заходів, щоб звести до мінімуму відбиття від входів таких антен.

2.3.3 Якщо хвилевід на кінці закорочено металевою заглушкою, то для забезпечення рівності нулю поперечної (дотичної до заглушки) складової електричного поля амплітуди відбитої та падаючої хвиль повинні бути на кінці хвилеводу рівні за величиною та протифазні. При цьому  $\dot{R}(0) = -1$ , і в хвилеводі встановлюється стояча хвиля з нулем електричного поля на кінці. Поперечне магнітне поле також буде розподілене за законом стоячої хвилі, проте з максимумом на кінці.

2.3.4 Випадок відкритого кінця хвилеводу, на перший погляд, аналогічний випадку лінії, розімкненої на кінці. Але це не так. Розімкнена лінія – це лінія, навантажена на опір  $Z'_l = \infty$ . Таке навантаження не може поглинати потужність, у зв'язку з чим падаюча хвиля повністю відбивається від розімкненого кінця, і в лінії встановлюється стояча хвиля.

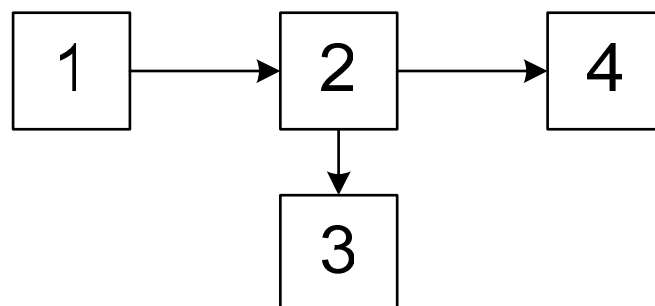
Проте відкритий кінець хвилеводу, що має поперечні розміри, порівнювані з довжиною хвилі, є невеликою антеною, яка випромінює потужність у навколишній простір. Тому для хвилеводу його відкритий кінець відповідає навантаженню з активною частиною, що не дорівнює нулеві. В силу цього у лінії встановлюється режим змішаних хвиль.

2.3.5 Для довільного навантаження розподіл електричного поля уздовж хвилеводу аналогічний розподілу у довгій лінії. Модуль  $|1 + R(z)|$  є функцією координати  $z$  з максимумами та мінімумами, що періодично чергуються. Відстань між сусідніми максимумами (мінімумами) дорівнює  $\Lambda/2$ , відстань між сусіднім максимумом та мінімумом дорівнює  $\Lambda/4$ . У перерізах, де має місце максимум (мінімум), падаюча та відбита хвилі синфазні (протифазні), коефіцієнт відбиття в цих перерізах дійсний та додатний (від'ємний), а вхідний опір  $Z'_{in}$  більший (менший) за одиницю.

2.3.6 Оскільки нормований вхідний опір хвилеводу та довгої лінії виражають аналогічними формулами, для виконання розрахунків хвилеводних ліній можна використовувати кругову діаграму повних опорів.

## 2 Лабораторна установка

Структурну схему лабораторної установки зображено на рисунку 1.7.



1 – НВЧ-генератор;

3 – індикаторний пристрій;

2 – вимірювальна лінія;

4 – досліджуване навантаження

Рисунок 1.7 – Структурна схема лабораторної установки

### 3 Хід виконання роботи

3.1 Ознайомтесь з лабораторною установкою та додатковими вказівками по роботі з приладами. Ввімкніть генератор та індикаторний пристрій. Налаштуйте генератор на задану викладачем частоту. Налаштуйте вимірювальну лінію, орієнтуючись на максимум показів індикаторного пристрою.

3.2 Вивчення режимів роботи лінії передачі.

3.2.1 Встановіть каретку вимірювальної лінії (ВЛ) в нуль по лінійній шкалі. Під'єднайте до виходу ВЛ узгоджене навантаження та подайте на її вхід коливання. Запишіть покази індикатора  $\alpha$ . Переміщуючи каретку ВЛ з кроком  $\approx 0,1\lambda$  до кінця лінійної шкали, фіксуйте на кожному кроці покази індикатора.

3.2.2 Повторіть п. 3.2.1, під'єднуючи по черзі до виходу ВЛ короткозамикач та досліджуваний НВЧ-вузол.

3.3. Вимірювання довжини хвилі в хвилеводі.

3.3.1 Під'єднайте до ВЛ короткозамикач. Визначте точку положення мінімуму  $a_1$  методом «вилки» (рисунок 1.8): зонд ВЛ встановіть у положення, близьке до мінімуму, зафіксуйте покази індикатора  $\alpha_0$  і виконайте відлік по шкалі механізму переміщення  $z_1$ , потім зонд перемістіть по інший бік мінімуму

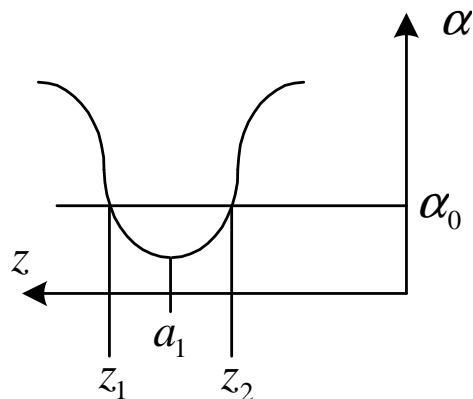


Рисунок 1.8 – Визначення точки положення мінімуму методом вилки

до зафіксованого показу індикатора  $\alpha_0$  і виконайте відлік  $z_2$  по шкалі механізму переміщення. Положення мінімуму  $a_1$  визначте за формулою

$$a_1 = \frac{z_1 + z_2}{2}.$$

3.3.2 Перемістіть каретку до сусіднього мінімуму. Аналогічним способом визначте точку його положення  $a_2$ .

3.3.3 Обчисліть довжину хвилі у хвилеводі  $\Lambda = 2|a_2 - a_1|$ , та довжину хвилі у вільному просторі  $\lambda = \frac{\Lambda \cdot \lambda_{cr}}{\sqrt{\Lambda^2 + \lambda_{cr}^2}}$  ( $\lambda = \Lambda$  для лінії передач з ТЕМ хвилею).

Розрахуйте частоту електромагнітних коливань, що відповідає  $\lambda$ .

3.4 Вимірювання КСХ заданого об'єкта методом «максимум-мінімум»:

3.4.1 Під'єднайте до ВЛ досліджуваний об'єкт.

3.4.2 Перемістіть каретку ВЛ у положення, що відповідає максимальному відхиленню стрілки індикатора, запишіть його покази  $\alpha_{max}$ .

3.4.3 Перемістіть каретку лінії в положення, що відповідає мінімальному відхиленню  $\alpha_{min}$  стрілки індикатора, запишіть його покази.

3.4.4 Розрахуйте КСХ за формулою  $K_{cm} = \sqrt{\frac{\alpha_{max}}{\alpha_{min}}}$  (якщо характеристика детектора ВЛ квадратична, інакше без обчислення кореня квадратного частки).

3.5 Вимірювання вхідного опору чотиріполіусників.

3.5.1 Визначте умовний кінець лінії, для чого до вихідного фланця ВЛ під'єднайте хвилеводний короткозамикач. Визначте положення першого мінімуму  $z_1$  зі сторони вихідного фланця методом «вилки». Ця точка і буде умовним кінцем лінії (рисунок 1.9).

3.5.2 Під'єднайте до ВЛ досліджуваний чотиріполіусник, навантажений на узгоджене навантаження.

3.5.3 Визначте положення першого мінімуму  $z_2$  в бік генератора методом «вилки» при підключеному чотиріполіуснику. Розрахуйте відстань від умовного кінця лінії до першого мінімуму в сторону генератора  $\Delta z = |z_2 - z_1|$ .

3.5.4 Виміряйте КСХ чотиріполіусника, навантаженого на узгоджене навантаження, методом «максимум-мінімум».

3.5.5 Обчисліть фазовий кут у радіанах  $\beta \Delta z = \frac{2\pi}{\Lambda} \Delta z$ .

3.5.6 Обчисліть повний опір навантаження  $\dot{Z}_l$ :

$$\dot{Z}_l = R + iX,$$

$$\text{де } R = W \frac{K_{cm}(1 + \operatorname{tg}^2 \beta \Delta z)}{K_{cm}^2 + \operatorname{tg}^2 \beta \Delta z}; \quad X = W \frac{(K_{cm}^2 - 1) \operatorname{tg} \beta \Delta z}{K_{cm}^2 + \operatorname{tg}^2 \beta \Delta z};$$

$$W = 120\pi \frac{\Lambda}{\lambda} - \text{хвильовий опір прямокутного хвилеводу для хвилі } H_{10}.$$

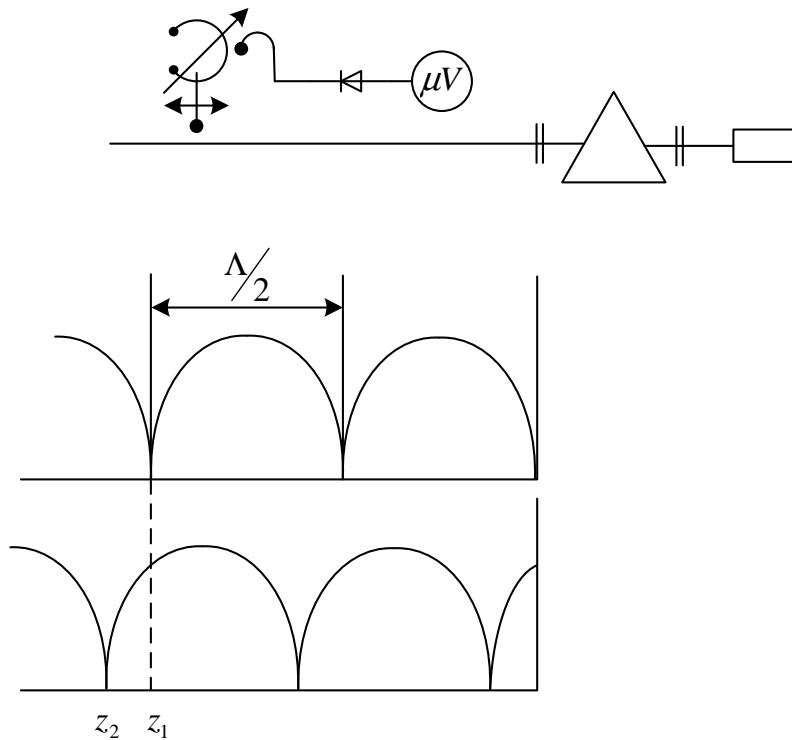


Рисунок 1.9 – Зміщення мінімумів при вимірюванні повного опору чотирьохполюсника

3.5.7 Обчисліть повний нормований опір навантаження  $\dot{Z}'_l = \frac{R}{W} + i \frac{X}{W}$ .

3.5.8 Обчисліть модуль коефіцієнта відбиття  $R = \frac{K_{cm} - 1}{K_{cm} + 1}$ , та його фазу

у радіанах  $\varphi = \beta l - \pi$ , звідки  $\dot{R} = R e^{i\varphi}$ .

3.6 Підключіть на вихід ВЛ №1 вимірювальну лінію №2, вихід якої навантажте на узгоджене навантаження (рисунок 1.10). Вихід детекторної секції ВЛ №2 підключіть до індикаторного пристрою, підготуйте цю ВЛ до роботи.



6. Як пов'язані між собою коефіцієнт відбиття та вхідний опір у довільному перерізі лінії?

7. Що таке коефіцієнт стоячої хвилі?

8. Принцип роботи та будова вимірювальної лінії.

9. Сутність методу вимірювання довжини хвилі у хвилеводі, КСХ методом «максимум-мінімум».

10. Метод вимірювання повного опору чотиріполюсників.