

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра радіотехніки
та телекомунікацій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №1

“ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ У ХВИЛЕВОДНИХ ЛІНІЯХ ПЕРЕДАЧІ”

з курсу “ПНВЧ та А”
для студентів спеціальності 7.090.701
усіх видів навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №1 “Дослідження неоднорідностей у хвиле водних лініях передачі ” з курсу “ПНВЧ та А” для студентів усіх видів навчання. / Склали Логачова Л. М., Бугрова Т. І., Дмитренко В. П.-Запоріжжя.-ЗНТУ.-2010.-26 с./

ЗМІСТ

1. Еквівалентні параметри лінії передачі.....	4
2. Коефіцієнт відбиття, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт біжучої хвилі, вхідний опір лінії передачі.....	6
3. Основні режими роботи лінії передачі.	10
4. Неоднорідності в лінії передачі.....	17
5. Опис лабораторної установки і мета лабораторної роботи.....	23
6. Розрахункове завдання.....	23
7. Експериментальна частина.....	24
7.1. Метод Татарінова.....	24
7.2. Метод зміщення вузлів (S-криві)	26
7.3. Метод 3-х коефіцієнтів відбиття.....	26
8. Зміст звіту.....	27
9. Контрольні запитання.....	27
Список використаних джерел.....	27

Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ У ХВИЛЕВОДНИХ ЛІНІЯХ ПЕРЕДАЧІ

Мета роботи: ознайомитися з методами вимірювання повних опорів, з методикою налаштування хвильоводів на біжучу хвилю шляхом включення неоднорідностей у хвильовід.

1. ЕКВІВАЛЕНТНІ ПАРАМЕТРИ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

При теоретичному аналізі хвиль, що розповсюджуються у хвильоводі, мається на увазі, що хвильовід має нескінченну довжину. У дійсності хвильовід має завжди кінцеву довжину. Розподіл векторів $\vec{E}$ і $\vec{H}$ у реальному хвильоводі залежить від умов на його кінці. Якщо на кінці хвильовода у місці переходу енергії в навантаження існують такі граничні умови, які можуть зберегти структуру електромагнітного поля, встановлено у біжучій (падаючій) хвилі, то енергія біжучої хвилі повністю поглинається в навантаженні і структура поля залишається такою, як і у хвильоводі нескінченної довжини. В протилежному випадку так само, як у звичайній лінії кінцевої довжини, відбувається відбиття енергії. Амплітуда та фаза відбитих хвиль виходить такими, що у місці відбиття задовольняються граничні умови.

При аналізі процесів, які відбуваються у хвильоводах кінцевої довжини, звичайно користуються методами довгих ліній. Теорія довгих ліній заснована на концепції падаючих і відбитих хвиль. Структура окремої падаючої, або відбитої хвилі припускається такою ж, як і в лінії розглядається як сума напруг та струмів падаючої і відбитої хвиль:

$$U(z) = U_0(\exp(j\gamma z) + p \exp(-j\gamma z)); \quad (1.1)$$

$$I(z) = I_0(\exp(j\gamma z) - p \exp(-j\gamma z)), \quad (1.2)$$

де Z – відстань від кінця лінії до розглядуємого перетину (рис. 1);

$U(z), I(z)$ – комплексні напруги та струми у перерізі;

p – коефіцієнт відбиття по напрузі;

$\gamma = 2\pi / \lambda_{\text{ХВ}}$ – стала розповсюдження;

$\lambda_{\text{ХВ}}$ – довжина хвилі лінії.

Відношення амплітуд напруги та струму у біжучій хвилі (падаючої хвилі) дорівнює хвильовому опору лінії:

$$Z_{\text{ХЛ}} = U_m / I_m \quad (1.3)$$

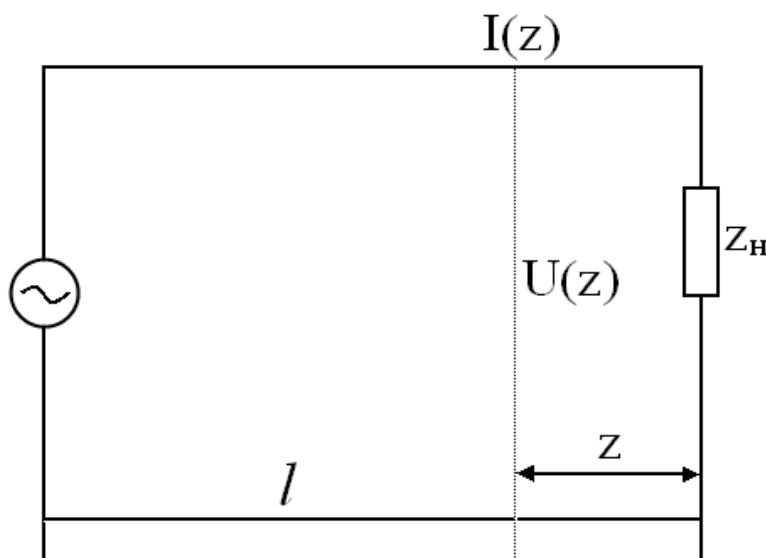


Рисунок 1 – Довга лінія

~ Одне з основних понять теорії довгих ліній є поняття про еквівалентний опір лінії. Відношення:

$$Z(z) = U(z) / I(z) \quad (1.4)$$

називається еквівалентним опором лінії $Z(z)$.

Еквівалентний опір лінії має ясний фізичний зміст. Якщо обрізати лінію у точці z і залишену частину лінії (від генератора до перерізу з координатою z) навантажити на опір, рівний $Z(z)$, то розподіл напруги і струму у лінії залишиться тим самим.

Еквівалентний опір, обчислений для перерізу, відповідного до входу лінії ($z = 1$), називають вхідним опором лінії:

$$Z_{\text{вх}} = Z(l) = U(l) / I(l) \quad (1.5)$$

На кінці лінії еквівалентний опір завжди дорівнює опору навантаження:

$$Z(0) = Z_{\text{н}} \quad (1.6)$$

Відношення еквівалентного опору до опору лінії прийнято називати нормованим еквівалентним опором лінії:

$$Z' = Z / Z_{\text{хв}} = r + jx, \quad (1.7)$$

Відповідно, величини

$$Z' = Z_{\text{вх}} / Z_{\text{хв}} = r_{\text{вх}} + jx_{\text{вх}}, \quad (1.8)$$

$$Z' = Z_{\text{н}} / Z_{\text{хв}} = r_{\text{н}} + jx_{\text{н}}, \quad (1.9)$$

називається нормованим вхідним опором лінії та нормованим опором навантаження.

Одним із видів ліній передачі енергії є хвилевід, тому усі одержані результати теорії довгих ліній можна використовувати при розгляді хвилеводів. У деяких випадках виявляється більш зручним замість хвилевода розглядати еквівалентну йому двопровідну лінію 1.

Хвилевий опір має відмінний вигляд для різних типів хвиль, а саме:

у випадку Н – хвиль

$$Z_{\text{с}}^{\text{Н}} = 120\pi / [1 - (\lambda / \lambda_{\text{хв}})^2]^{1/2}, \quad (1.10)$$

а у випадку Е – хвиль

$$Z_{\text{с}}^{\text{Е}} = 120\pi [1 - (\lambda / \lambda_{\text{хв}})^2]^{1/2}. \quad (1.11)$$

У хвилеводній техніці завжди використовують тільки нормовані опори.

2. КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, КОЕФІЦІЄНТ ЮЖУЧОЇ ХВИЛІ. ВХІДНИЙ ОПІР ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

Розглянемо лінію передачі з неоднорідністю, збуджена хвиля, яка розповсюджується вправоруч (падаюча хвиля). Під впливом поля цієї хвилі на поверхні неоднорідності виникають струми, що породжують хвилі різних типів, які розповсюджуються вліворуч та вправоруч від неї. Припустимо, що лінія передачі працює у одно хвильовому режимі. Тоді на досить великій відстані від неоднорідності існують тільки три хвилі одного і того ж типу: падаюча та відбита – ліворуч, хвиля, яка пройшла – праворуч від неоднорідності. Якщо вибрати початок координат у місці розташування неоднорідності, та направити вісь Z у бік генератора (рис. 2), то напругу у лінії передачі при $Z > 0$ можна записати як суму напруг прямої та відбитої хвилі:

$$U(z) = U_{na\partial} + U_{\partial\partial\bar{a}} = U^+ \exp(j\gamma z) + U^- \exp(-j\gamma z) \quad (2.1)$$

Коефіцієнт відбиття хвилі Γ знаходиться як відношення амплітуд напруг відбиття та прямої хвилі:

$$\Gamma(z) = U_{\partial\partial\bar{a}} / U_{na\partial} = (U^+ / U^-) \exp(-2j\gamma z) \quad (2.2)$$

Визначимо коефіцієнт відбиття у місці розташування неоднорідності, при умові $Z = 0$. При $Z = 0$ електромагнітне поле має складний характер і із нього важко відзначити поле даного типу хвилі. Тому величину $\Gamma(0)$ слід сприймати як значення коефіцієнта відбиття у регулярній лінії передачі, яка збуджена відбитою хвилею такої ж амплітуди і фази, як хвиля, обумовлена не явністю неоднорідності. Коефіцієнт $\Gamma(0)$ залежить тільки від властивостей неоднорідності. Тому величину $\Gamma(0) = \Gamma_n$ називають коефіцієнтом відбиття від неоднорідності (коефіцієнтом відбиття навантаження). Отже,

$$\Gamma(z) = \Gamma_n \exp(-2j\gamma z) = \Gamma_n \exp(-2j\alpha z) \exp(-2j\beta z) \quad (2.3)$$

коефіцієнт відбиття можна показати як вектор комплексній площині (рис. 3а). Із (2.3) виходить, що при посуванні вздовж лінії передачі кінець вектора $\Gamma(z)$ описує спіраль, причому переміщення до генератора відповідає обертання вектора $\Gamma(z)$ по годинниковій стрілці, а переміщення до навантаження – проти годинниковій стрілки. Повороту вектора $\Gamma(z)$ на 360° відповідає переміщення вздовж лінії передачі на відстань Z , яка визначається із умови:

$$2\beta\Delta Z = 4\pi\Delta Z / \lambda_{\chi\epsilon} = 2\pi,$$

завдяки $\Delta Z = \lambda_{\chi\epsilon} / 2$

При посуванні до генератора модуль коефіцієнта відбиття зменшується, тому що амплітуда падаючої хвилі росте, а відбитої – зменшується. Якщо втрати у лінії передачі не враховувати, ($\alpha = 0$), то кінець вектора коефіцієнта відбиття описує коло (рис. 3.б).

Із (21) виходить, що максимальне значення модуля напруги в лінії передачі без втрат $U_{\max} = |U_{na\partial}| + |U_{\partial\partial\bar{a}}|$, а мінімальне $U_{\min} = |U_{na\partial}| - |U_{\partial\partial\bar{a}}|$. Відношення цих величин зветься коефіцієнтом стоячої хвилі напруги:

$$KCH = U_{\max} / U_{\min} = (|U_{na\partial}| + |U_{\partial\partial\bar{a}}|) / (|U_{na\partial}| - |U_{\partial\partial\bar{a}}|) = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|) \quad (2.4)$$

Якщо $\Gamma = 0$, то $KCH = 1$, тобто максимуми та мінімуми напруги у лінії передачі відсутні. Якщо $|\Gamma| = 1$, то $KCH \rightarrow \infty$. Розглянемо еквівалентний струм у лінії передачі з неоднорідністю. Для $Z > 0$

$$I(z) = I_{na\partial} + I_{\partial\partial\bar{a}} = I^+ \exp(j\gamma z) + I^- \exp(-j\gamma z). \quad (2.5)$$

Введемо коефіцієнт відбиття по струму

$$\Gamma_I(z) = I_{\partial\partial\bar{a}} / I_{na\partial} = I^- / I^+ \exp(-2j\gamma z).$$

Якщо виразити I^+ та I^- через U^+ та U^- і хвильові опори $Z_{\chi\epsilon}^+$ та $Z_{\chi\epsilon}^-$:

$$\Gamma_I(z) = (U^- Z_{\chi\epsilon}^+ / U^+ Z_{\chi\epsilon}^-) \exp(-2j\gamma z).$$

Відомо, що при зміні напрямку розповсюдження хвилі знак потоку енергії змінюється на протилежний, то із (2.3) виходить, що:

$$\Gamma_I(z) = -\Gamma(z) \quad (2.6)$$

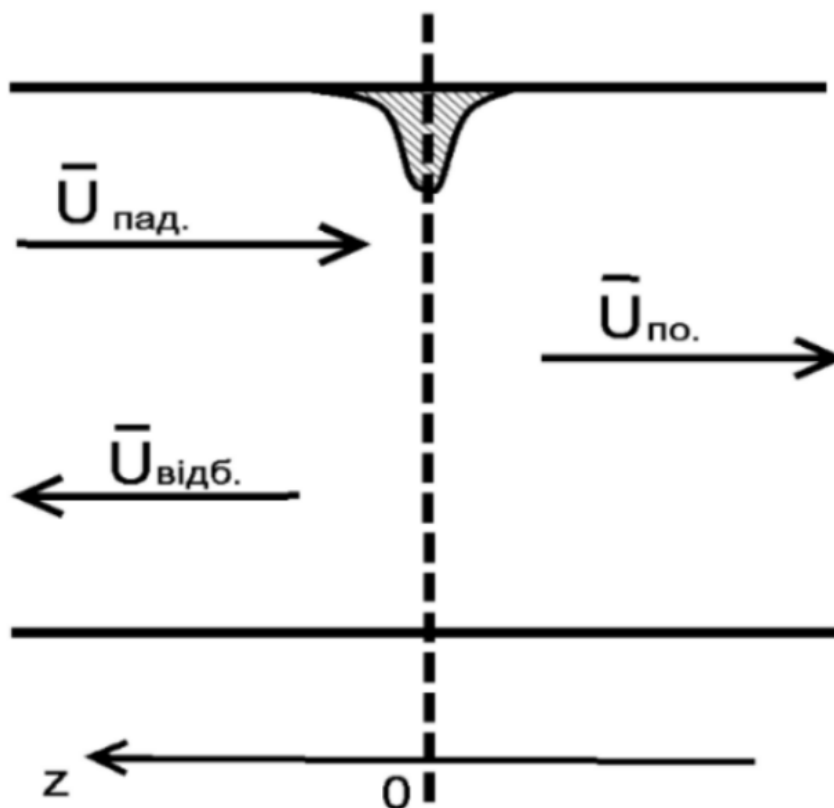


Рисунок 2 – Лінія передачі з неоднорідністю

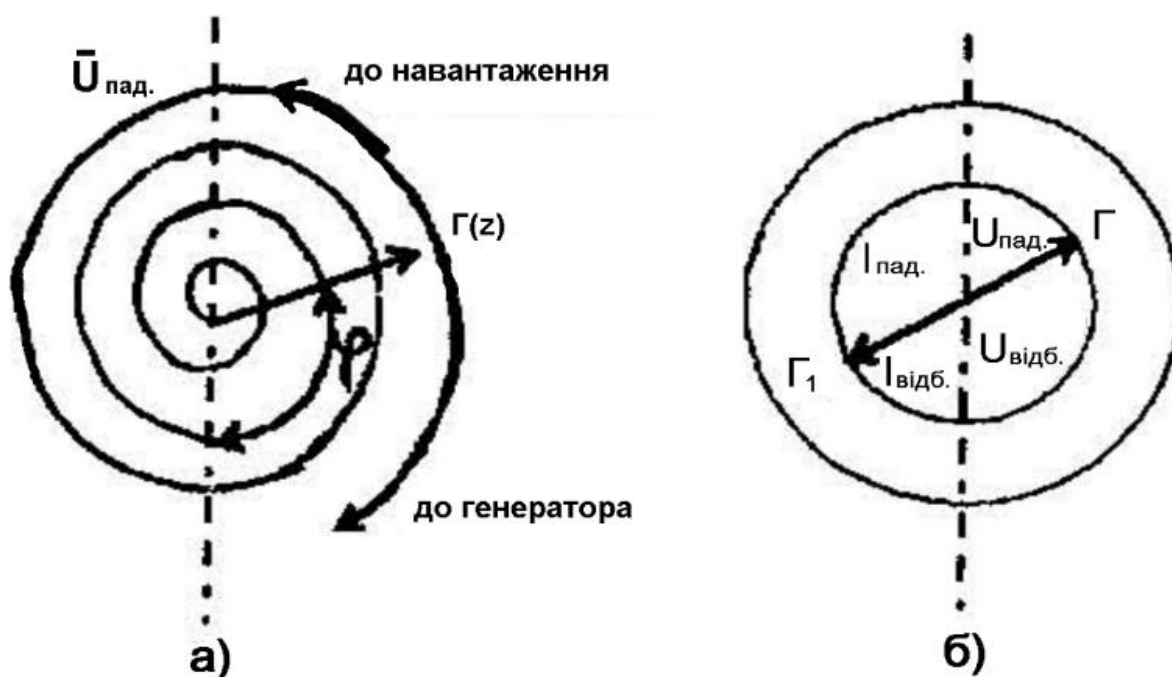


Рисунок 3 – Вектор напруги падаючої та відбитої хвиль: а) витратна лінія передачі; б) безвитратна лінія передачі

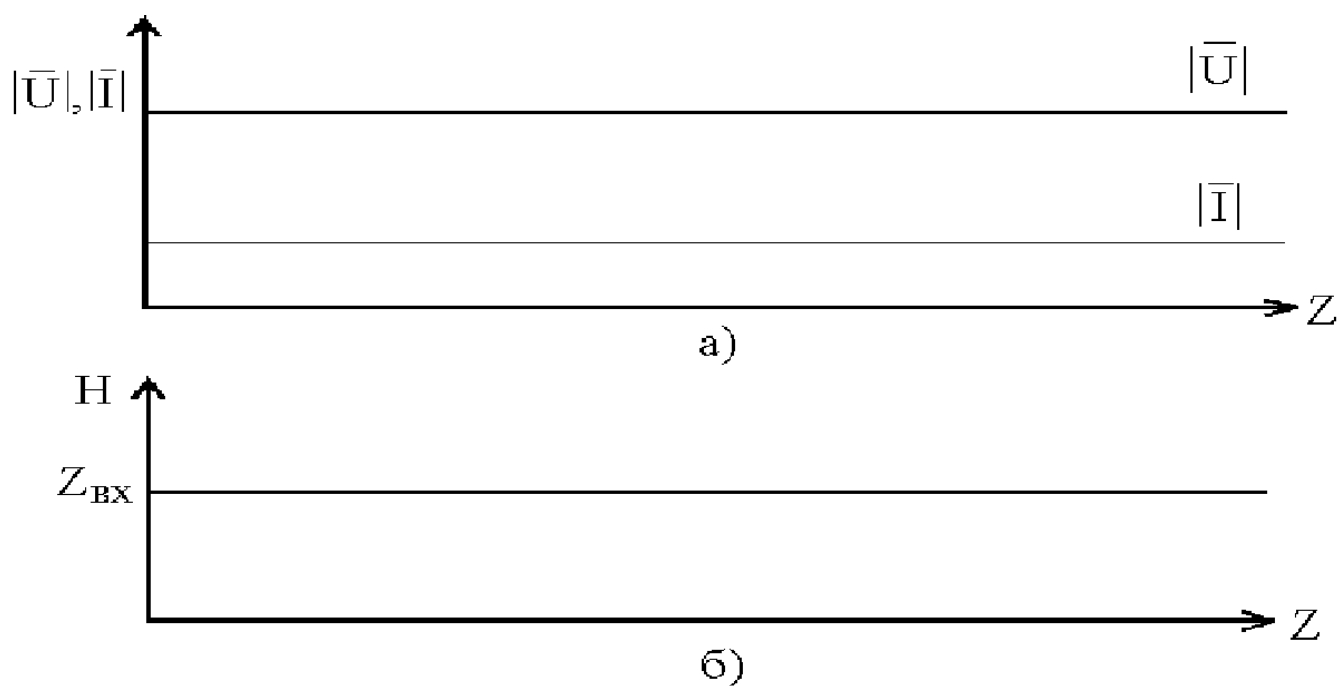


Рисунок 4 – Режим узгодження залежності напруги, струму (а), та нормованого опору (б) лінії передачі від координати z : а) розподіл модулів напруги та струму; б) розподіл вхідного опору

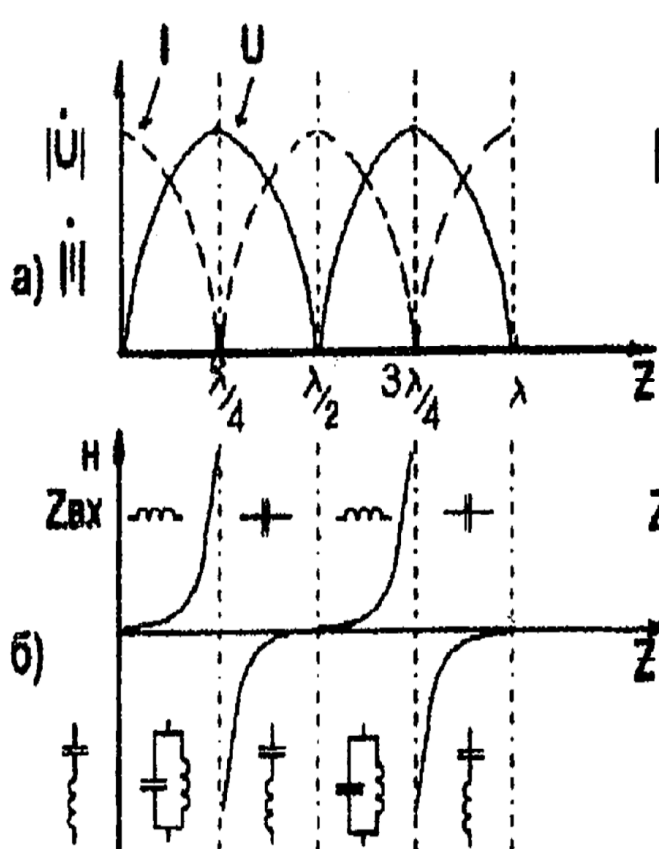


Рисунок 5 – Режим короткого замкнення

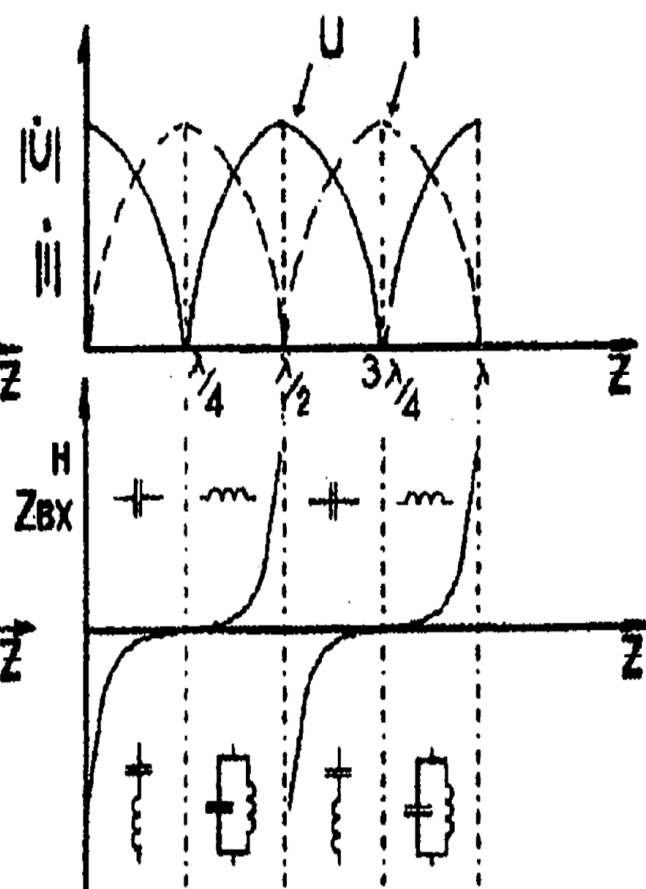


Рисунок 6 – Режим холостого ходу

На комплексній площині Γ_I відображується вектором, діаметрально протилежним вектору Γ (рис. 3.6).

Вхідний опір лінії передачі з неоднорідністю визначається як відношення еквівалентної напруги до еквівалентного струму у даному перерізі.

$$Z_{ex}(z) = U(z) / I(z) \quad (2.7)$$

Якщо у (2.7) підставити вирази (2.1) і (2.5) і скористатися означенням для Γ і Γ_I , то матимемо:

$$\begin{aligned} Z_{ex}(z) &= Z_x(1 + \Gamma(z) / 1 - \Gamma(z)), \\ Z_{ex}^H(z) &= Z_x(1 + \Gamma(z) / 1 - \Gamma(z)), \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $Z_{ex}^H = Z_{ex} / Z_{x6}$ – нормований вхідний опір.

Формально поклавши в (2.7) $Z = 0$, знайдемо вхідний опір лінії розташування неоднорідності його значення визначається тільки її властивостями, тому величина $Z_{ex}(0)$ зветься опором неоднорідності (навантаження) Z_H :

$$Z_H^H = Z_{ex}^H(0) = 1 + \Gamma_H(z) / 1 - \Gamma_H(z); \quad Y_H^H = 1 - \Gamma_H(z) / 1 + \Gamma_H(z) \quad (2.9)$$

Вирази (2.8), (2.9) дають можливість знайти зворотні співвідношення для коефіцієнтів відбиття $\Gamma(z)$ та Γ_H :

$$\Gamma(z) = (Z_{ex}^H - 1) / (Z_{ex}^H + 1); \quad \Gamma_H = (Z_H^H - 1) / (Z_H^H + 1); \quad (2.10)$$

$$\Gamma(z) = (1 - Y_{ex}^H) / (1 + Y_{ex}^H); \quad \Gamma_H = (1 - Y_H^H) / (1 + Y_H^H); \quad (2.11)$$

де $Y_{ex}^H = Y_{ex} / Y_{x6}$; $Y_H^H = Y_H / Y_{x6}$.

Щоб знайти зв'язок між вхідним опором і опором навантаження потрібно в формулу (2.9) підставити значення Γ і Γ_H із виразів (2.3) та (2.10):

$$Z_{ex}^H = \frac{1 + \Gamma_H e^{-2j\gamma z}}{1 - \Gamma_H e^{-2j\gamma z}} = \frac{Z_H^H + 1 + (Z_H^H - 1)e^{-2j\gamma z}}{Z_H^H + 1 - (Z_H^H - 1)e^{-2j\gamma z}}$$

Якщо помножити здобутий вираз (чисельник та знаменник) на $e^{j\gamma z}$ і користатися формулами Ейлера, то після неважких перетворень будемо мати:

$$Z_{ex}^H = (Z_H^H + jtg(\gamma z)) / (1 + jZ_H^H tg(\gamma z)). \quad (2.12)$$

Для провідностей має місце таке співвідношення:

$$Y_{ex}^H = (Y_H^H + jtg(\gamma z)) / (1 + jY_H^H tg(\gamma z)). \quad (2.13)$$

3. ОСНОВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

В залежності від співвідношення між опором навантаження Z_n і хвильовим опором лінії передачі $Z_{xв}$, можливі наступні режими роботи лінії передачі:

1) $Z_n = Z_{xв}$ (дзеркальне навантаження), ($Z_n^H = 1$). У цьому випадку $\Gamma = 0$, $KCX = 1$, тобто в лінії передачі існує тільки біжуча (падаюча) хвиля, розподіл амплітуд напруги і струму цього режиму показані на рис. 4а. У відповідності з (2.12) вхідний опір лінії передачі не залежить від координати Z і дорівнює її хвильовому опору (рис. 4б.). Такий режим роботи лінії передачі називається узгодженим режимом.

2) $Z_n = 0$. При цьому коефіцієнт відбиття $\Gamma = -1$, $KCX = \infty$. В лінії передачі існує стояча хвиля, розподіл амплітуд напруги та струму показані на рис. 5а. З виразу (2.12) можна визначити вхідні опір та провідність лінії передачі:

$$Z_{ex}^H = jtg(\gamma l); \quad Y_{ex}^H = -jctg(\gamma l). \quad (3.1)$$

Якщо лінія безвтратна ($\gamma = \beta$) Z_{ex} та Y_{ex} – уявні величини. Залежності Z_{ex} , Y_{ex} від координати Z зображені на рис. 5б. Режим лінії передачі при $Z_n = 0$ називається режимом короткого замикання. Із графіка рис. 5 бачимо, що за допомогою КЗ лінії можливо відтворити будь-який реактивний опір. точки довкола яких знаходяться вузли ($l = n\lambda_{xв}/2$), або видуги ($l = (2n-1)\lambda_{xв}/4$) напруги, частотні властивості лінії мають такий самий характер, як і у послідовного або паралельного коливальних контурів.

3) $Y_n = 0$ ($Z_n = \infty$). Коефіцієнт відбиття $\Gamma = 1$, $KCX = \infty$, це значить, що в лінії теж існує стояча хвиля (рис. 6а). Залежність вхідного опору і вхідної провідності від координати Z описується виразами:

$$Z_{ex}^H = -jctg(\beta l); \quad Y_{ex}^H = jtg(\beta l). \quad (3.2)$$

Якщо лінія безвтратна, то (3.2) реактивні величини. На рис. 6б показана залежність Z_{ex} від координати Z . У цьому разі при $Z = 0$, $I = 0$. Ми маємо режим холостого ходу. Частотні властивості мають такий самий характер як і послідовний (при $l = \lambda_{xв}(2n-1)/4$ – вузли напруги) і паралельний (при $l = \lambda_{xв}n/2$ – видуги напруги) коливальний контури.

4) $Z_n = jX_n$ (реактивне навантаження) коефіцієнт відбиття у цьому випадку дорівнює:

$$|\Gamma_n| = |(jX_n - 1)/(jX_n + 1)| = (X_n^2 + 1)/(X_n^2 + 1) = 1,$$

Тобто в лінії теж маємо стоячу хвилю. Напруга зворотної хвилі в точці відбиття зміщена по фазі відносно напруги падаючої хвилі на кут φ_u . При скінченному X_n , значення кута φ_u знаходиться між 0 та π . Внаслідок цього на кінці лінії, на відміну від попередніх випадків, тепер нема ні вузла, ні видуги напруги. Те ж саме можна сказати і про струм, бо коефіцієнт відбиття $\Gamma_I = -\Gamma_n$.

Припустимо, що лінія замкнена на індуктивний опір ($X_n > 0$). В цьому випадку $0 \leq \varphi_u \leq \pi$, отже, вузли напруги будуть розташовані зліва від точок $\lambda/4$, $3\lambda/4$, ..., $(2n+1)\lambda/4$, Криві розподілу амплітуд струму та напруги показані на рис. 7.а. Залежність вхідного опору лінії, навантаженої на індуктивний опір від її довжини, показана на рис. 7.б з рис. 7 видно, що індуктивність, якою навантажена лінія, може бути замінена короткозамкненим відрізком, який здовжує лінію на величину $l_0 < \lambda/4$. Цю величину l_0 можна визначити із рівняння:

$$Z_{ex} \operatorname{tg}(\beta l_0) = \omega L.$$

Якщо лінію навантажити на ємність, то кут $\varphi = \arctg(Z_n / X_n)$ буде від'ємним, причому $-\pi/2 \leq \varphi \leq 0$. В цьому випадку вузли напруги будуть розташовані праворуч відносно точок $\lambda/4$, $3\lambda/4$, ... до навантаження (рис. 8). Вхідний опір лінії, навантаженої на ємність змінюється так, як показано на рис. 8.б. Із порівняння рис. 7 та рис. 8 видно, що лінія при ємнісному навантаженні еквівалентна розімкненій лінії, здовженої на величину l_0 . Величина l_0 може бути визначена із рівняння:

$$\operatorname{tg}(\beta l_0) = Z_n \omega C.$$

Режим мішаних хвиль. В лінії, яка навантажена на комплексний, або активний опір, не рівний хвильовому, встановлюється так званий режим мішаних хвиль. Для цього режиму також властива наявність відбитої хвилі, але вона буде меншої інтенсивності, ніж падаюча хвиля, тому що частина потужності поглинається опором навантаження.

Якщо $Z_n = R_n \neq Z_{xв}$ т.ч. являється активним опором то коефіцієнт відбиття $\Gamma = (R_n - Z_n) / (R_n + Z_n)$ виявляється дійсним і величина його менше одиниці, а знак залежить від співвідношення R_n та $Z_{xв}$.

Припустимо, що $m = (Z_{xв} / R_n) < 1$, тобто $R_n > Z_{xв}$. Графіки розподілу амплітуд напруги та струму вздовж лінії показані на рис. 10. У цих кривих є особливість: вони мають точки, де напруга та струм приймають екстремальні значення. Максимум напруги і максимум струму в точках $l = 0$, $\lambda/2$, λ , ... , мінімуми напруги і максимумами струму – при $l = \lambda/4$, $3\lambda/4$,

При збільшенні R_n , $U_{\min}$ і $I_{\min}$ будуть зменшуватися, у границі $R_n \rightarrow \infty$, вони будуть наближатися до 0. Це означає, що мішані хвилі у даному випадку вироджуються у стоячі, які спостерігаються в розімкненій лінії.

Для випадку, коли $m > 1$ тобто $R_n < Z_{xв}$ криві розподілу амплітуд напруги та струму показані на рис. 10. По своєму вигляду вони аналогічні попереднім, однак в кінці лінії тепер мають місце максимум струму та мінімум напруги.

При $R_n \rightarrow 0$ (режим короткого замикання), $U_{\min}$ знову перетворюються в нулі, тобто у лінії встановлюється режим стоячих хвиль.

При $m \rightarrow 1$, тобто $R_n = Z_{xв}$, $U_{\min} \rightarrow U_{\max}$ і режим мішаних хвиль переходить у режим біжучих хвиль.

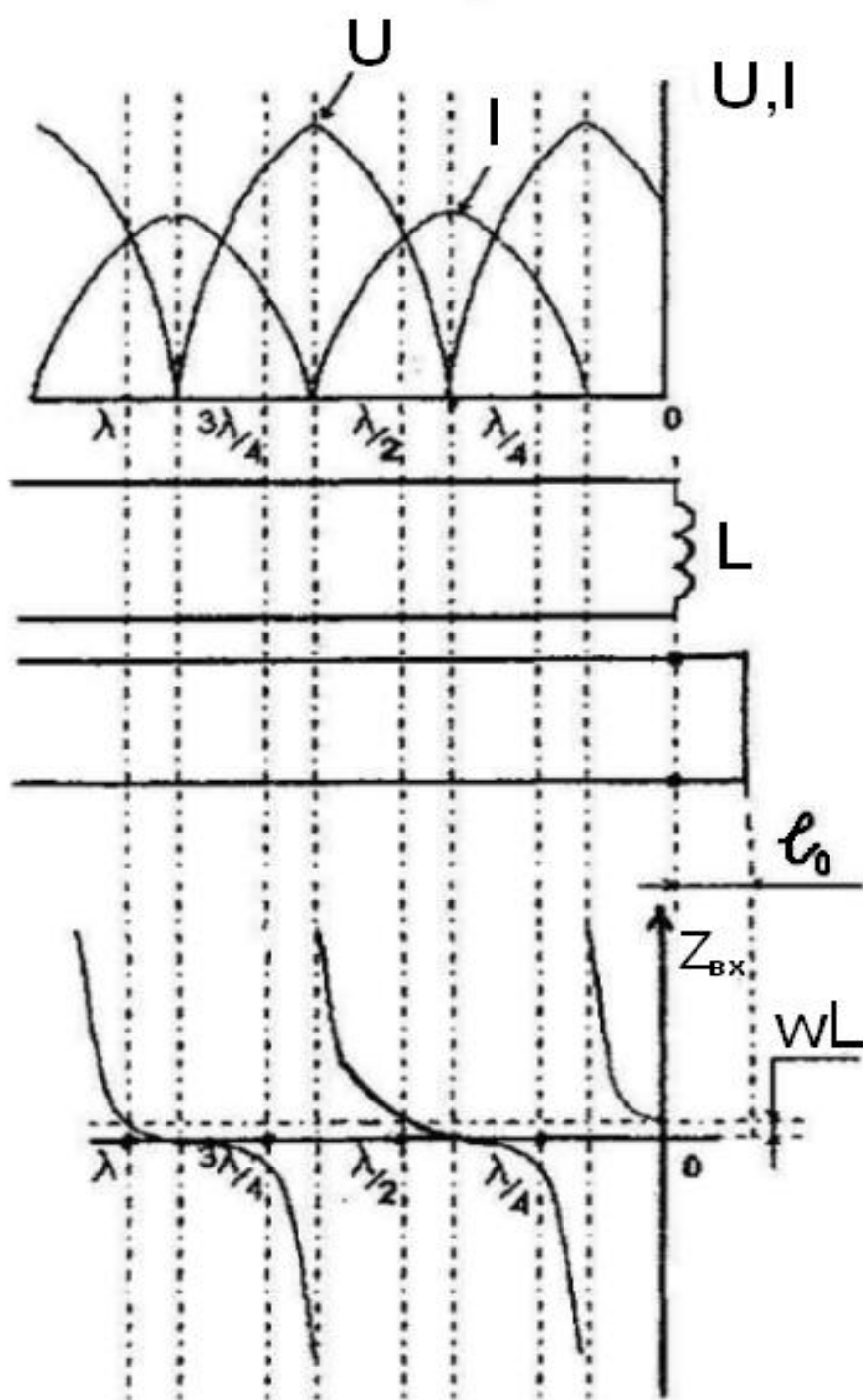


Рисунок 7 – Розподіл амплітуд напруги і струму вздовж лінії, що навантажена на індуктивність та залежність вхідного опору лінії від довжини.

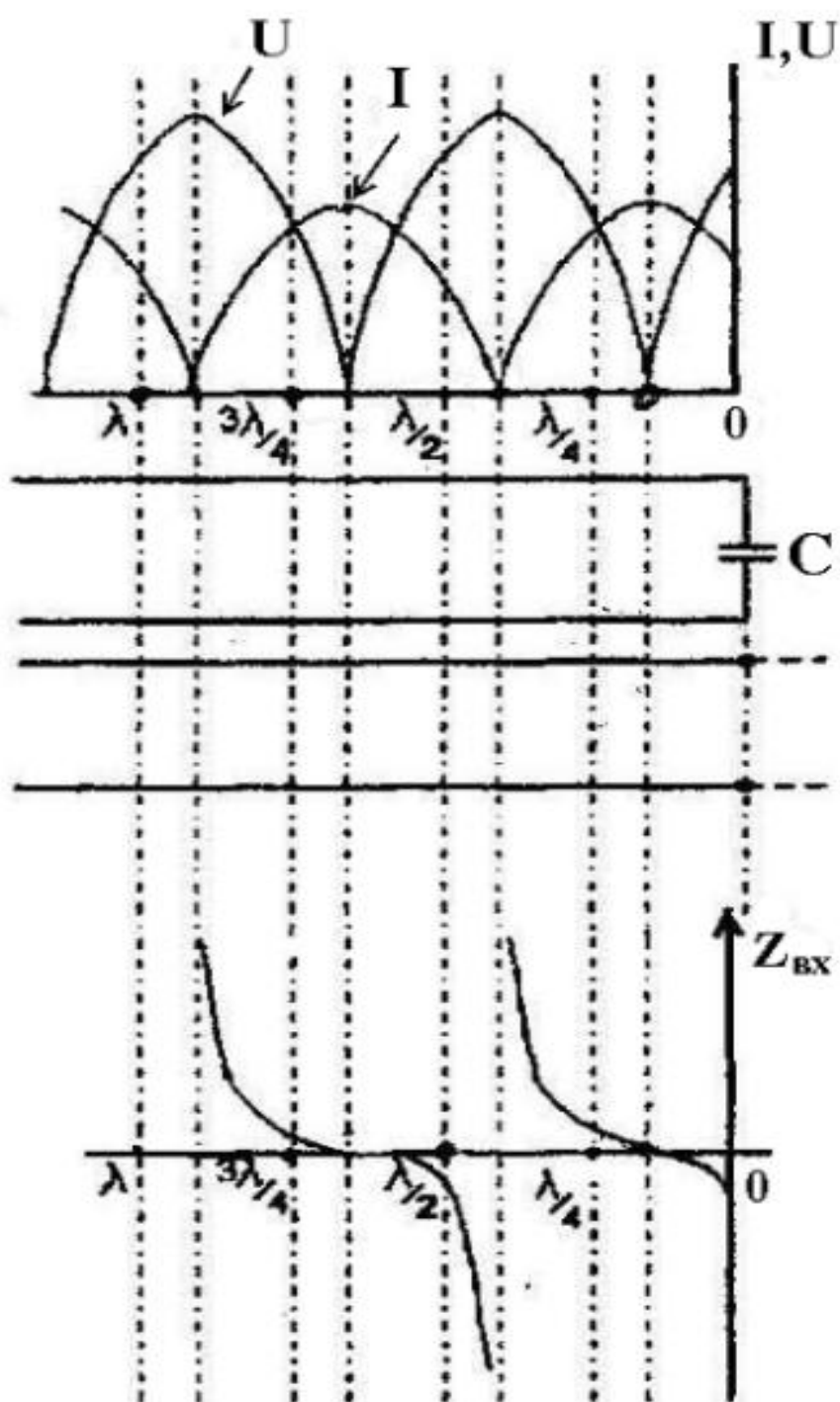


Рисунок 8 – Розподіл амплітуд напруги та струму вздовж лінії, що навантажене на ємність та залежність вхідного опору лінії від її довжини

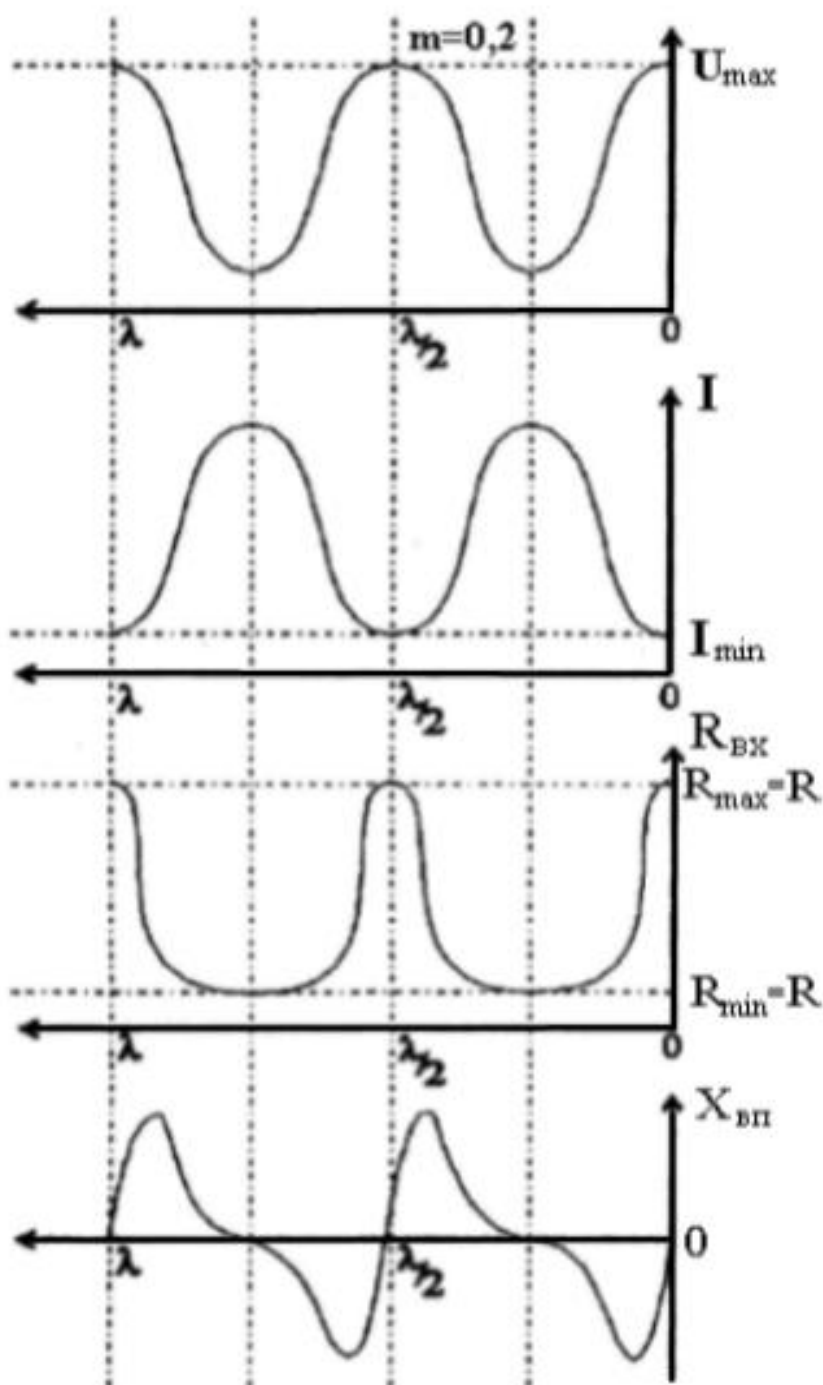


Рисунок 9 – Розподіл амплітуд напруги та струму вздовж лінії в режимі мішаних хвиль ($R_n < Z_{\text{хв}}$) і залежність складових вхідного опору лінії для $m=0.2$

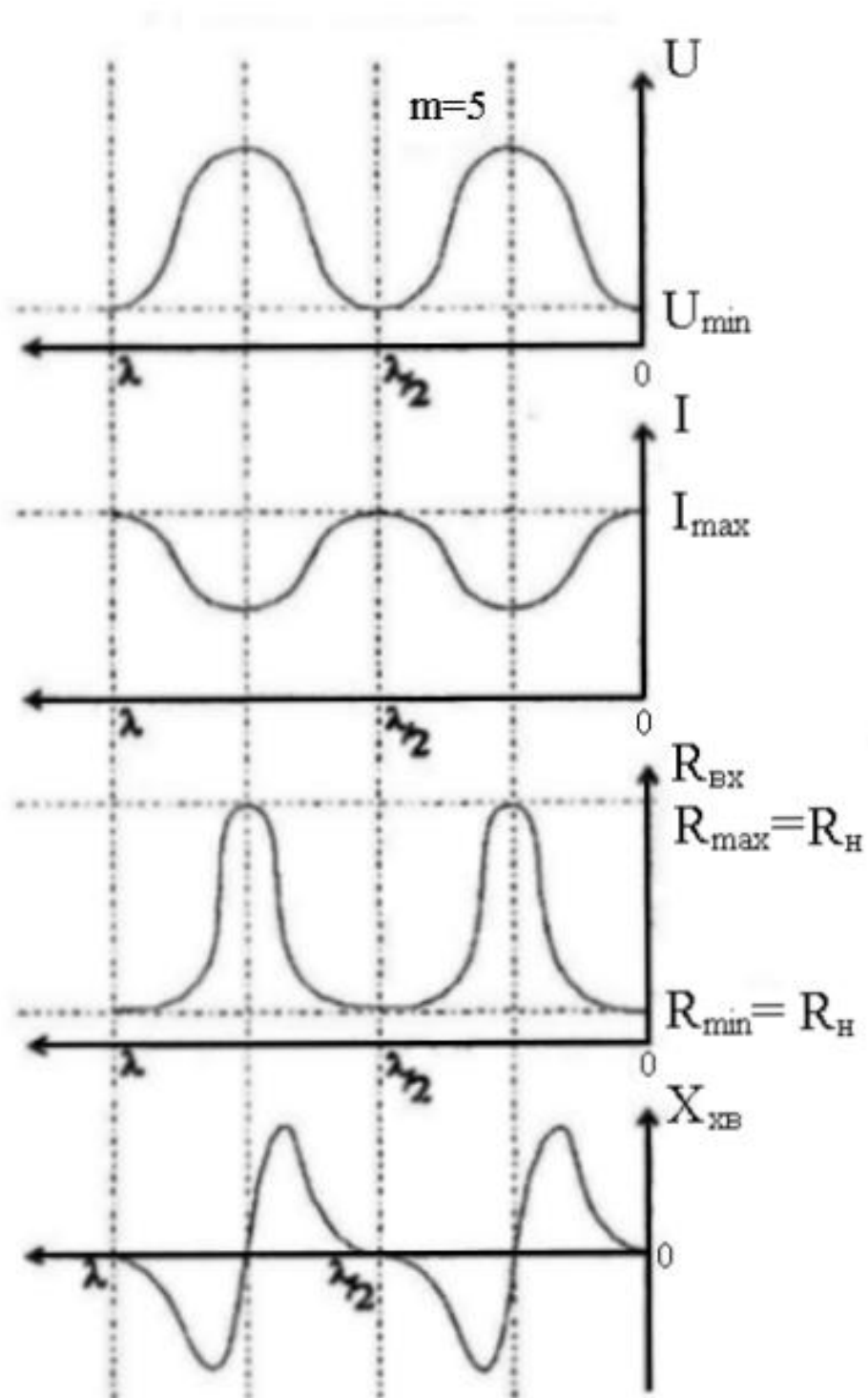


Рис. 10 – Розподіл амплітуд напруги та струму вздовж лінії в режимі мішаних хвиль ($R_H < Z_{\text{хв}}$) та залежність складових вхідного опору лінії для $m=5$

б) Лінія, яка має комплексне навантаження: як було показано у п.5, вхідний опір лінії, яка навантажена на активний опір, у довільній точці $l \neq n\lambda/4$ ($n=1,2,3, \dots$) має комплексний характер:

$$Z_{\text{вх}}(l') = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}}.$$

На відміну від випадку активного навантаження вислідні амплітуди U та I в кінці лінії тепер не мають ні максимумів, ні мінімумів і в лінії встановлюється режим мішаних хвиль.

4. НЕОДНОРІДНОСТІ У ЛІНІЯХ ПЕРЕДАЧІ

Уявимо собі, що до навантаження підключений не один відрізок однорідної лінії передачі, а два: один на вході, (лінія 1 на рис. 11) навантаження, другий на її виході (лінія 2 на рис. 11). Тоді, крім хвилі, що проходить через навантаження і подається у лінію на вході. Якщо уявити, що лінія передачі на вході і виході навантаження працює у одно хвильовому режимі, то у перерізах I і II (рис. 11), достатньо віддалених від навантаження, амплітуда хвилі як у перерізі I, так і тієї, що пройшла (у перерізі II) хвилі, практично не відрізняються від структури поля нижчого типу у кожній лінії передачі. Навантаження, зображене на мал. 11 можна уявити у вигляді чотириполюсника (рис. 12), підключеного у еквівалентну лінію, що створює у лінії такі ж відбиття і хвилю, що пройшла, що і навантаження на рис. 11 у підключених до неї відрізках лінії передачі. Клеми чотириполюсника розташовані у перерізах I і II, де амплітуда вищих типів хвиль є порівняно малою.

Для характеристики чотириполюсників на НВЧ звичайно використовують хвильову матрицю розсіювання $\|S\|$ і хвильову матрицю передачі $\|T\|$. Елементами матриці розсіювання є коефіцієнти пропорційності між амплітудами падаючих і відбитих хвиль у перерізах I і II:

$$E_{T\text{вдб}} = S_{11}E_{T\text{над}} + S_{12}E_{1\text{над}} \quad (4.1)$$

$$E_{1\text{дсл}} = S_{21}E_{T\text{над}} + S_{22}E_{1\text{над}}$$

т. б.

$$\|S\| = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

характеристикою чотириполюсника і дозволяє розрахувати його режим при будь-якому увімкненні (підключенні).

Для вимірювання елементів матриці розсіювання існує велика кількість методів. У даній лабораторній роботі використовуються методи змінного навантаження, справедливі для взаємного чотириполюсника (метод Дешана, 3-х коефіцієнтів відбиття і т. ін.). З'ясуємо один з цих методів – метод 3-х коефіцієнтів відбиття.

Метод вимірювання елементів матриці розсіювання взаємного чотириполюсника НВЧ методом трьох коефіцієнтів відбиття полягає у наступному. У загальному виді коефіцієнт відбиття $\Gamma_{\text{вх}}$ на вході чотириполюсника зв'язаний з коефіцієнтом відбиття $\Gamma_{\text{вих}}$ від навантаження, що приєднано до його виходу, наступним співвідношенням:

$$\Gamma_{\text{вх}} = S_{11} + (\Gamma_{\text{вих}}S_{21}S_{12})/(1 - \Gamma_{\text{вих}}S_{22}). \quad (4.3)$$

Якщо задатися трьома різними значеннями $\Gamma_{\text{вих}}$ і заміряти відповідні їм $\Gamma_{\text{вх}}$ можна одержати три рівняння для визначення S_{11} ,

$S_{21} = S_{12}$, S_{22} . У лабораторній роботі використовується такі значення $\Gamma_{\text{вих}}$:

$$\Gamma'_{\text{вих}} = 0 \text{ (узгоджене навантаження)}$$

$$\Gamma''_{\text{вих}} = 1 \text{ (холостий хід)}$$

$$\Gamma'''_{\text{вих}} = -1 \text{ (коротке замикання)}$$

Позначимо відповідні замірні значення вхідного коефіцієнта відбиття $\Gamma_{\text{вх}}$ та $\Gamma_{\text{вих}}$ у (4.3), то маємо:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \Gamma'_{\text{вх}}; \\ S_{12} = S_{21} &= [2(\Gamma'''_{\text{вх}} - \Gamma'_{\text{вх}})(\Gamma''_{\text{вх}} - \Gamma'_{\text{вх}})/(\Gamma'''_{\text{вх}} - \Gamma''_{\text{вх}})]^{1/2}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$S_{22} = (2\Gamma'_{\text{вх}} - \Gamma''_{\text{вх}} - \Gamma'''_{\text{вх}}) / (\Gamma'''_{\text{вх}} - \Gamma''_{\text{вх}}).$$

Значення S_{21} по формулі (4.4) визначається неоднозначно з точністю до знаку. Ця неоднозначність має місце тому що S_{21} визначається за вимірюванням вхідного коефіцієнту відбиття.

Більшість неоднорідностей, що вводять в лінію передачі, мають втрати, якими звичайно нехтують, т. ч. еквівалентні цим лініям чотириполюсники можна розглядати як суто реактивні. Приміром таких реактивних чотириполюсників можуть бути відрізки хвильоводів прямокутного перерізу з вставленими до них неоднорідностями.

Проаналізуємо деякі неоднорідності які чисто зустрічаються у хвильоводі прямокутного перерізу, де розповсюджується основна хвиля H_{10} :

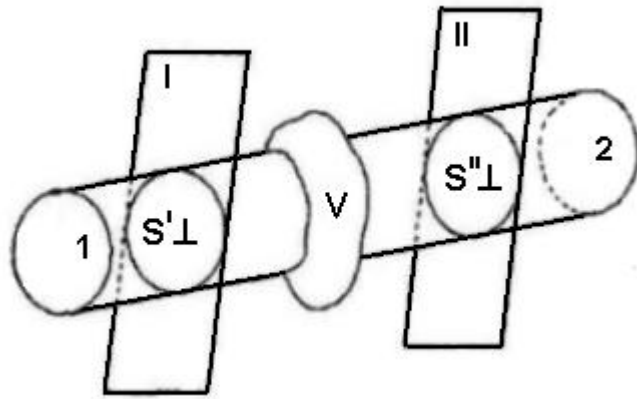


Рисунок 11 – Навантаження у вигляді відрізків довгої лінії

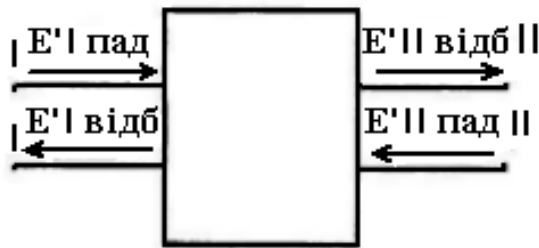


Рисунок 12 – Навантаження у вигляді чотириполюсника

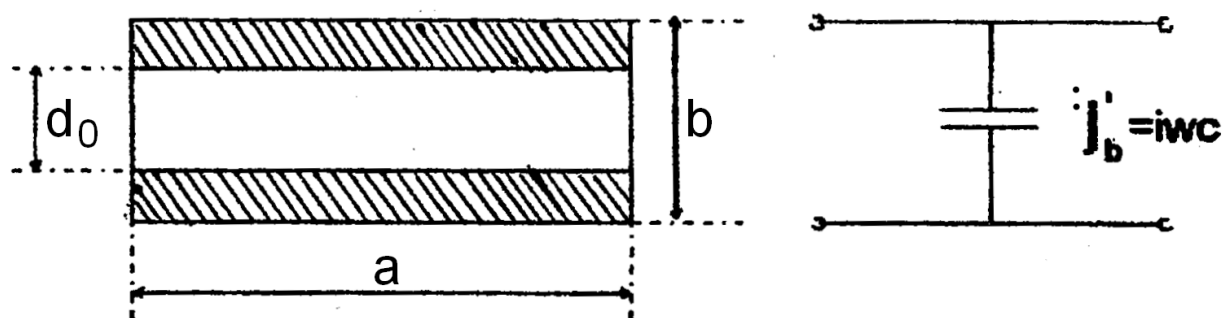


Рисунок 13 – Симетрична ємнісна діафрагма та її схема заміщення

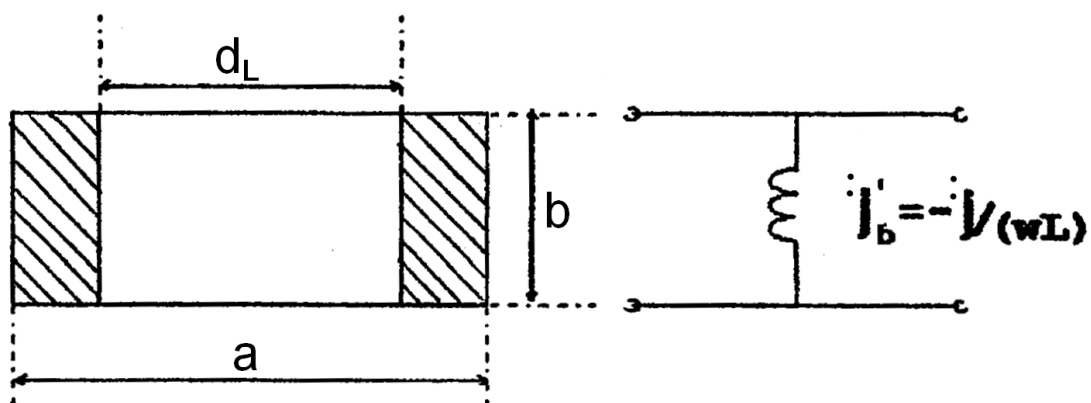


Рисунок 14 – Симетрична індуктивна діафрагма та її схема заміщення

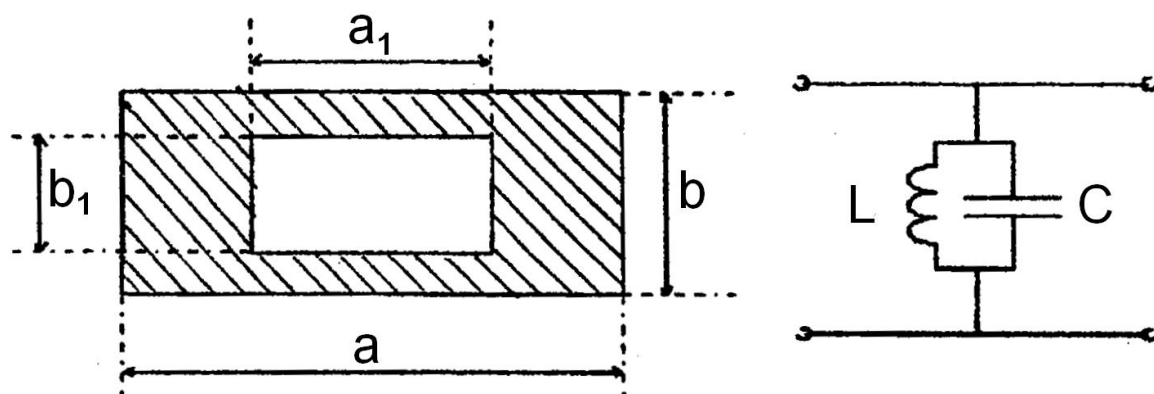


Рисунок 15 – Резонансна діафрагма та її схема заміщення

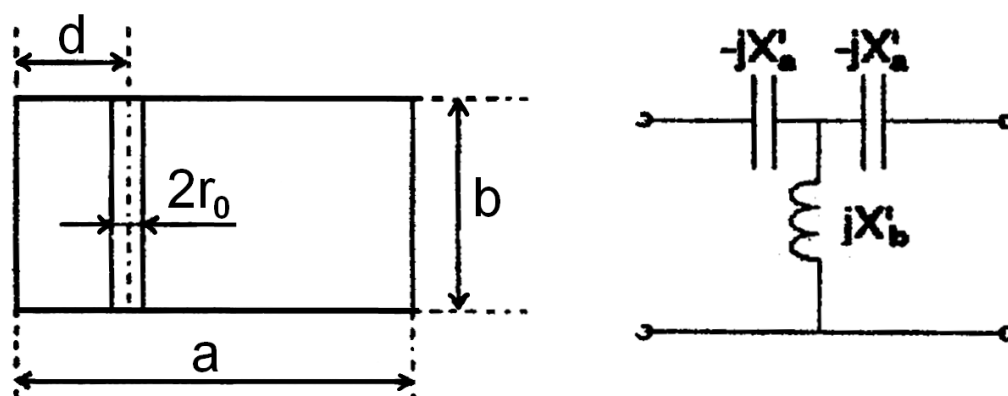


Рисунок 16 – Індуктивний штир та його схема заміщення

1. Діафрагми у хвилеводі з прямокутним перерізом. Діафрагми – це тонкі металеві перегородки, які частково перекривають поперечний переріз хвилевода. У хвилеводах з прямокутним перерізом застосовуються будь-які види діафрагм. Найбільш типовими з них є симетрична ємнісна, симетрична індуктивна і резонансна діафрагми (рис. 13, рис. 14 і рис. 15).

Ємнісна діафрагма зменшує зазор між широкими стінками хвилевода. У проміжку між краями діафрагми відбувається концентрація силових ліній електричного поля і зосереджується деякий запас реактивної енергії. Повздовжні струми, які течуть на широких стінках хвилевода, частково відгалужуються на пластинки діафрагми і замикаються у виді струмів зміщення у зазорі. Тому схемою заміщення ємнісної діафрагми буде зосереджена ємність, яка включена між провідниками двопровідної лінії.

В разі індуктивної діафрагми повздовжні струми на протилежних широких стінках хвилевода частково замикаються через пластини, вони є безпосередньо з'єднані з цими стінками. Від струмів, що течуть по пластинках діафрагми, зосереджується магнітне поле. Тому схема заміщення індуктивної діафрагми зображується зосередженою індуктивністю, яка включена між провідниками двопровідної лінії.

Нормована реактивна провідність ємнісної діафрагми (рис. 13) приблизно визначається формулою:

$$B'_c \approx [(4b)/(\lambda_{xg}^{H10})] \ln[\operatorname{cosec}(\pi d_0 / 2b)]. \quad (4.5)$$

Нормована реактивна провідність індуктивної діафрагми приблизно визначається формулою:

$$B'_c \approx [(\lambda_{xg}^{H10})/(a)] \operatorname{ctg}^2[\pi d_1 / 2a]. \quad (4.6)$$

У формулах (4.5) і (4.6) λ_{xg} – довжина хвилі H_{10} і хвилеводі, а інші позначення зрозумілі із рис. 13 та рис. 14.

Ємнісну і індуктивну діафрагми застосовують у хвиле водному тракті як пристрої узгодження, або як складова частина резонаторів НВЧ.

Якщо хвилеводний тракт призначений для пропускання великих потужностей, то віддається перевага індуктивній діафрагмі, тому що вона на відзнаку від ємнісної не знижує електричну міцність хвилевода.

Резонансна діафрагма (по іншому резонансне вікно) має вид пластинки з отвором, частіше усього, прямокутної форми (рис. 15). Із рис. 15 бачимо, що резонансна діафрагма містить в собі однозначно елементи ємнісної та індуктивної діафрагми.

Форму і розмір резонансної діафрагми підбирають таким чином, щоб на заданий резонансній частоті, діафрагма не мала впливу на розповсюдження хвилі у хвилеводі, тобто провідність діафрагми повинна дорівнювати 0. На більш низьких частотах провідність має індуктивний характер, а на більш високих частотах – ємнісний. Схемою заміщення резонансної діафрагми є паралельний резонансний контур, який включається між провідниками двопровідної лінії.

Резонансні діафрагми застосовуються у хвилеводних фільтрах, як елемент схем ширококутового узгодження, як складова частина розрядника НВЧ і комутатор, а також як герметичні вікна (при цьому отвір діафрагми заповнюється діелектриком).

2. Резонансні штирі у хвилеводі. Поряд з діафрагмами велике практичне вживання мають поперечні штирі, які застосовуються як пристрої для узгодження та трансформації. У цій роботі вивчаються індуктивний та ємнісний штирі.

Індуктивний штир – це металевий провідник колового перерізу, який встановлюється у поперечному перерізі хвилевода в напрямі силових ліній електричного поля, а також з'єднаний з обох кінців з широкими стінками хвилевода (рис. 16). Індуктивний штир діє як еквівалентно включена шунтуюча провідність індуктивного характеру. У схему заміщення штиря включені також два послідовних опора ємнісного характеру, які урахують скінчену товщину неоднорідності. Ці опори звичайно малі і для тонких штирів можуть не прийматися до уваги. Нормоване значення шунтуючого опору еквівалентної схеми індуктивного штиря приблизно можна розрахувати по формулі: $X_a = (a / 2\lambda_g^{H10}) \operatorname{cosec}^2(\pi d / a) \{ \lg[2a / \pi_0] \sin(\pi d / a) - 2 \sin^2(\pi d / a) \}$,

$$(4.7)$$

де $\lambda_{\text{хв}}^{H_{10}}$ – довжина хвилі у хвилеводі для хвилі H_{10} ;

d – відстань до будь-якої із вузьких стінок ($r_0 \ll d$ і $r_0 \ll (a-d)$);

r_0 – радіус штиря.

Ємнісний штир, зображений на рис. 17, являє собою металевий провідник колового перерізу. Він встановлений у поперечному перерізі хвилевода у напрямі силових ліній електричного поля, а також з'єднаний одним кінцем з широкою стінкою хвилевода. Струми провідності, що затікають з широкої стінки на штир, переходять потім у струмі зміщення, які, досягнувши другої широкої стінки хвилевода знову перетворюються у струми провідності. Ця фізична картина якісно пояснює характер еквівалентної схеми штиря у вигляді послідовного коливального контура. При малій глибині занурення штиря у хвилевід, провідність шунтованого ланцюга має ємнісний характер, який і дає назву штирю. При значній глибині занурення ємнісного штиря у хвилевід, провідність шунтуючого ланцюга може виявитися нескінченною і хвилевід буде повністю закороченим. Такий послідовний резонанс має місце при довжині штиря, близькій до $\lambda/4$ довжини хвилі (у вільному просторі). Подальше збільшення глибини занурення штиря призводить до того, що провідність шунтуючого ланцюга на еквівалентній схемі приймає індуктивний характер. Послідовні опори ємнісного характеру на еквівалентній схемі ураховують скінченну товщину штиря. При малих діаметрах штиря ці опори малі і їх впливом можна зневажити.

Нормована провідність шунтуючої ланки у схемі заміщення ємнісного штиря, який знаходиться у середній площині хвилевода, може бути розрахована по формулі:

$$B_0 = S / \{ (\lambda / \lambda_B - \lambda_B / \lambda) [1 - (\lambda / 2a)^2]^{1/2} \}, \quad (4.8)$$

де λ_B – резонансна довжина хвилі штиря;

S – коефіцієнт, який можна знайти графічно (рис. 18).

Конструктивно ємнісний штир зручно зробити у вигляді гвинта, що ввертається у широку стінку хвилевода. Якщо у хвилеводі розташувати на фіксованих відстанях два чи три таких штиря, то вони утворять зручний перестроюваний пристрій. Ємнісний штир так, як і ємнісна діафрагма знижує електричну міцність тракту; від цієї вади звільнений індуктивний штир.

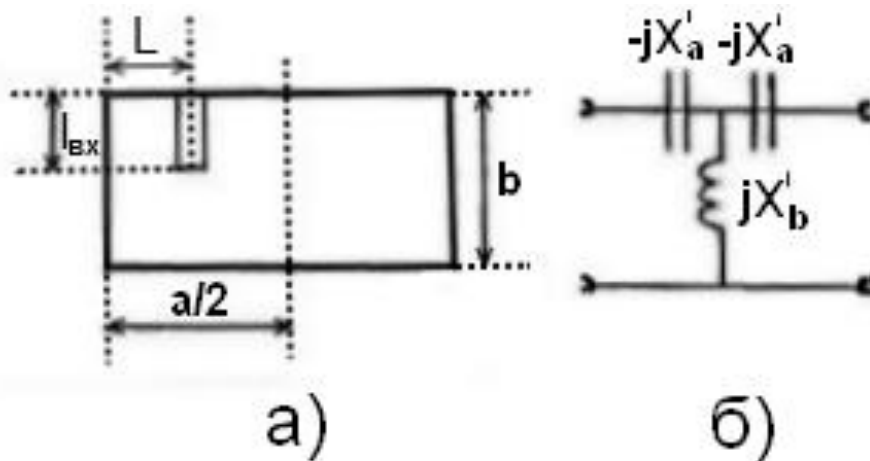


Рисунок 17 – Ємнісний штир (а) та його схема заміщення (б)

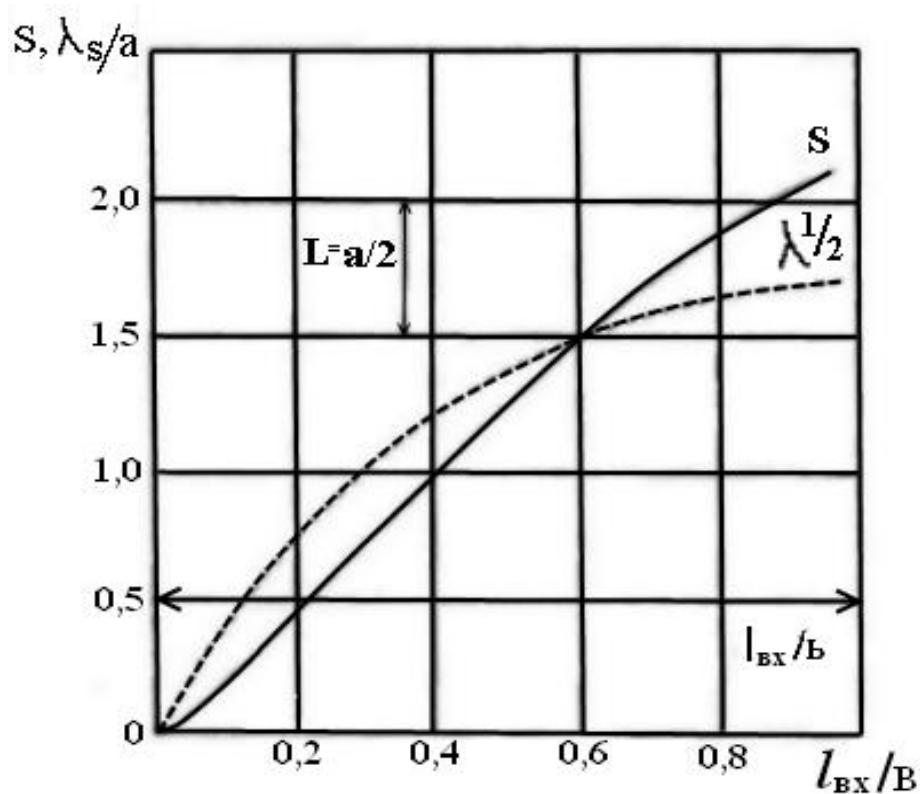


Рисунок 18 – Графіки допоміжних параметрів для знаходження провідності ємнісного штиря

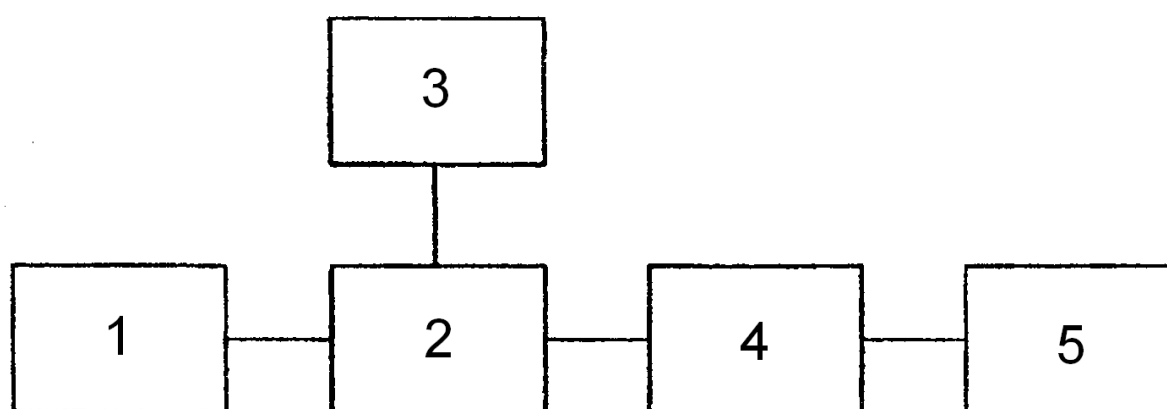


Рисунок 19 – Блок-схема установки для дослідження неоднорідностей хвильоводного тракту:
 1 – високочастотний генератор ГУ-109А;
 2 – хвиле видна вимірювальна лінія;
 3 – реєстрація показань;
 4 – дослідження неоднорідностей;
 5 – скінченне навантаження.

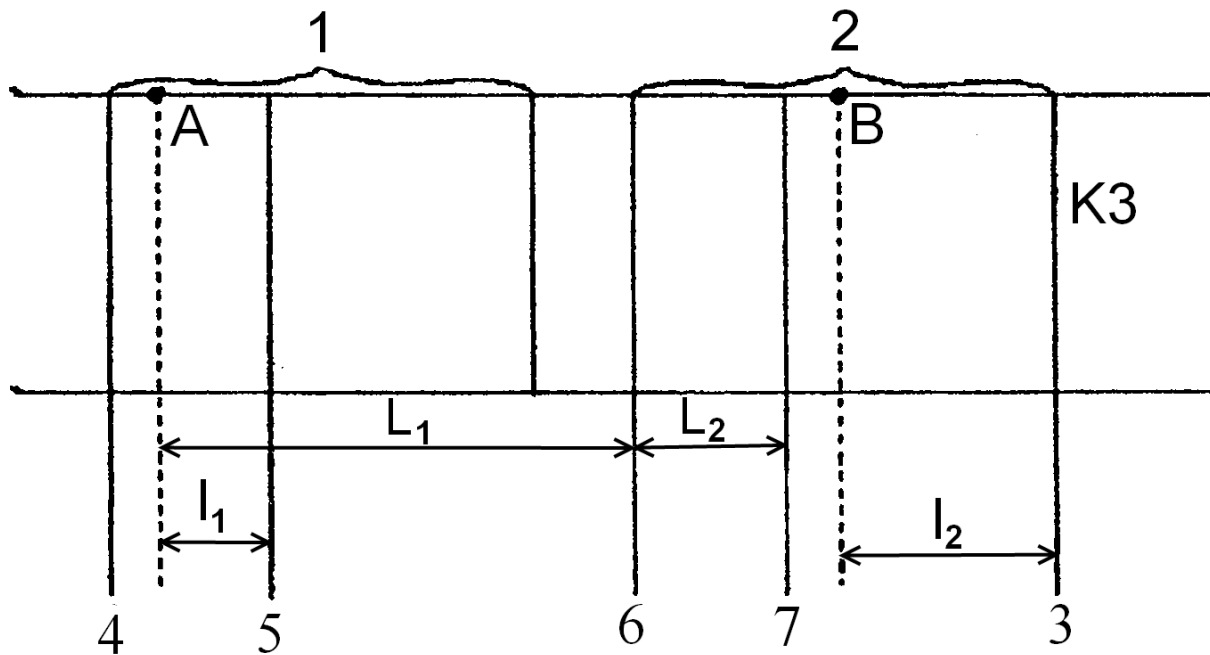


Рисунок 20 – Схема вимірювання методом зміщення вузлів:

- 1 – вимірювальна лінія;
- 2 – хвилевід з КЗ-поршнем;
- 3 – КЗ поршень;
- 4 – початок відліку шкали лінії;
- 5 – місце знаходження вузла напруги;
- 6 – місце включення неоднорідності;
- 7 – початок відліку шкали поршня.

5. ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ І МЕТА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

У даній роботі вивчаються елементи хвиле водного тракту, і їх схеми заміщення і методи вимірювання параметрів цих схем. Робота виконується у трьох сантиметровому діапазоні. Блок-схема вимірювальної установки дана на рис. 19. До програми досліджень входять:

Вимірювання провідностей неоднорідностей у хвилеводі (індуктивна і ємнісна діафрагма, індуктивний і ємнісний штир) двома методами: методом Татарінова та методом зміщення вузлів (S – кривих). Метод Татарінова використовується для дослідження неоднорідностей, які вносять значні відбиття, а метод зміщення вузлів призначений для дослідження малих неоднорідностей. Вимірювання матриці розсіювання чотирьох полюсників НВЧ методом 3-х коефіцієнтів відбиття.

6. РОЗРАХУНКОВЕ ЗАВДАННЯ

1. Розрахувати довжину хвилі у прямокутному хвилеводі з перерізом 23×10 мм на середній і двох крайніх частотах ($f_0 \pm 5\%$).
2. Розрахувати значення нормованих провідностей по формулах (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) для двох неоднорідностей (діафрагма і штир), які задаються для кожної бригади окремо.
3. Визначити значення КСХ і Γ , використовуючи вирази (7.11), (2.4).
4. Отримані результати занести в табл., куди потім записати отримані результати.

Таблиця 1

Розмір, мм	Діафрагми				штирі		
	1	2	3	4	5	6	7
d_L	16	20	-	-	-	-	-
d_c	-	-	6	8	-	-	-
L_H	-	-	-	-	3	5	7

7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

А. Підготовка установки.

1. Зібрати схему вимірювань (рис. 19)
2. Налаштувати генератор ГЧ-109А на необхідну частоту.
3. Підготувати до роботи вимірювальний мілівольтметр ВЗ-38.
4. Налаштувати вимірювальну лінію.

Б. Завдання до експериментальної частини.

1. Визначити реактивну провідність неоднорідностей методами Татарінова та методом заміщення вузлів (S – кривих). Виміряти методом 3-х коефіцієнтів відбиття матрицю розсіювання чотирьох полюсів.

7.1 МЕТОД ТАТАРІНОВА

а) Вимірювальна лінія навантажується короткозамкненою секцією хвильовода фіксованої довжини. Помічається місце знаходження вузла l_1 у лінії.

б) Замість короткозамкненої секції включається секція з неоднорідністю, яка досліджується (діафрагма, штир). До другого кінця секції хвильовода приєднується узгоджене навантаження (необхідно послідувати за тим, щоб місце включення неоднорідності збігалось з місцем знаходження короткозамикача. Помічається місце знаходження вузла l_2 у лінії та вимірюється величина КСХ.

в) Зробити розрахунок величини вимірювальної провідності з допомогою кволої діаграми по виміряним величинам зміщення вузла $\Delta l / \lambda_{\text{хв}} = (l_2 - l_1) / \lambda_{\text{хв}}$ і КБХ. модуль реактивної провідності може бути визначеним по величині КБХ у тракту з необхідністю по формулі:

$$|B'| = (1 - KBX) / (KBX^{1/2}). \quad (7.1.1)$$

де $KBX = [U_{\min} / U_{\max}]^{1/2}$.

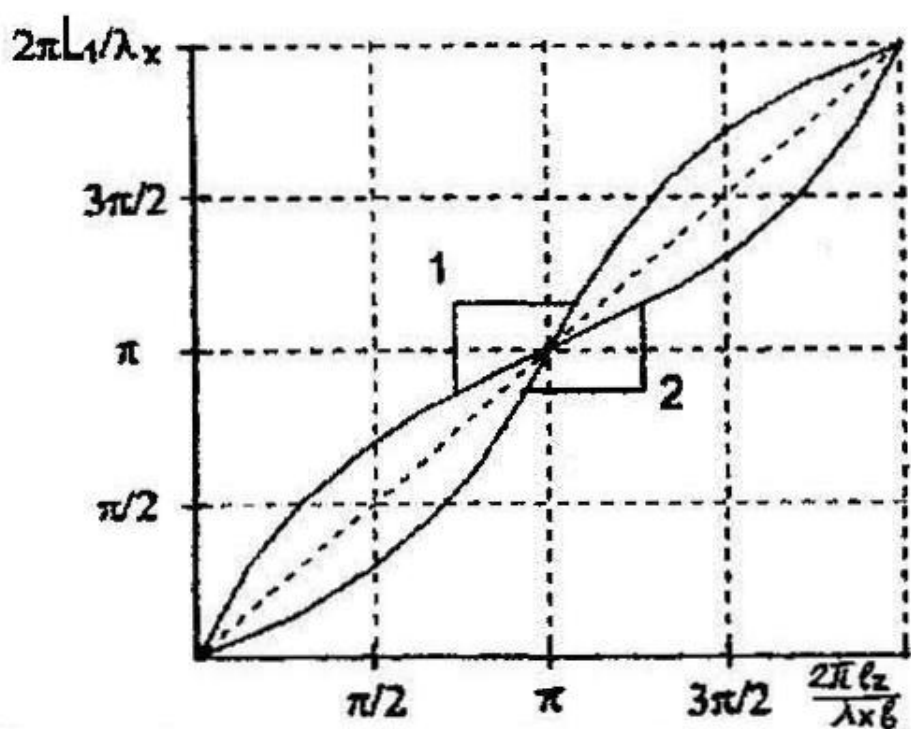


Рисунок 21 – Місцезнаходження вузла напруги у вимірювальній лінії при наявності неоднорідності:

- 1 – ємнісна провідність;
- 2 – індуктивна провідність.

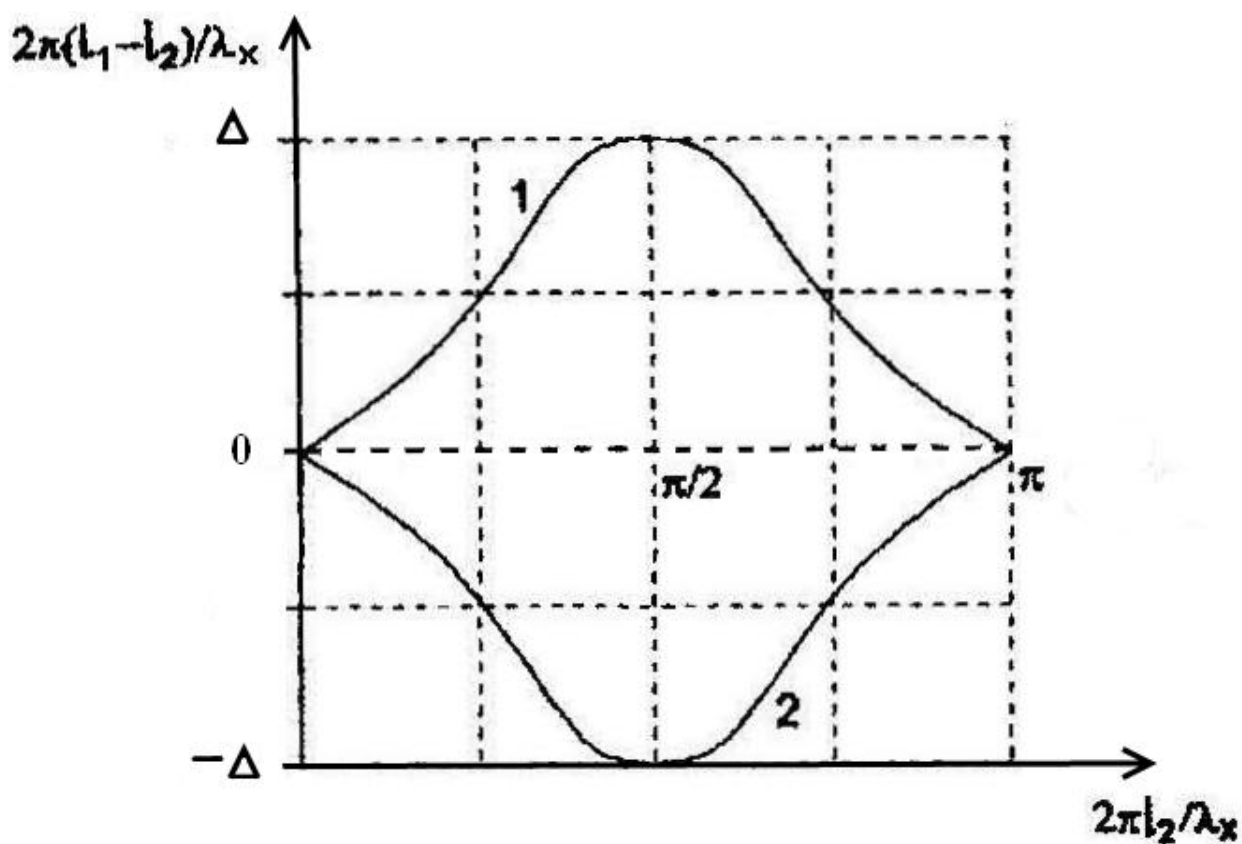


Рисунок 22 – Допоміжні графіки для розрахунку значення вимірюваної неоднорідності:

- 1 – ємнісна провідність;
- 2 – індуктивна провідність.

7.2 МЕТОД ЗМІЩЕННЯ ВУЗЛІВ (S – КРИВІ)

а) Хвильоводний тракт закорочується у місці включення неоднорідності з допомогою короткозамкненої секції фіксованої довжини. Помічається місцезнаходження вузла в лінії (точка А на рис. 20).

б) Короткозамкнена секція заміщається відрізком хвильовода з неоднорідністю, що досліджується. К цьому відрізку хвильовода приєднується пересувний короткозамкнений поршень. Положення поршня змінюється до тих пір, поки вузол напруги у лінії не переміститься у точку А. Помітити положення поршня (точки В на рис. 20).

в) Змінюється положення поршня l_2 праворуч через 2 мм в границях 25 мм. Знімається графік зміщення вузла у вимірювальній лінії l_1 (рис. 21). Якщо неоднорідності у тракті нема, то зміщення вузла у вимірювальній лінії відбувається синхрно з переміщенням поршня (пунктирна пряма на рис. 21). При наявності неоднорідностей місцезнаходження вузлів у вимірювальній лінії відбуватиметься по кривим, які залежать від характеру неоднорідності. Для зручності розрахунків ці залежності треба подати у виді, що показаний на рис. 21. Знайти величину і знак провідності неоднорідності можна по формулі:

$$B = 2tg(\Delta/2), \quad (7.2.1)$$

Де Δ – величина розмаху S – кривої, яку можна знайти на рис. 22.

7.3 МЕТОД 3-х КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ

Вимірити методом 3-х коефіцієнтів відбиття матриці розсіювання чотириполосника відповідно до схеми на рис. 10.

Методика вимірювання вхідних коефіцієнтів є такою: для знаходження потрібних положень короткозамикача на виході чотириполосника необхідно розрахувати, або вимірити довжину хвилі.

Модуль вхідного коефіцієнта відбиття визначається відношенням у вимірювальній лінії:

$$|\Gamma_{ex}| = [1 - (U_{min}/U_{max})]/[1 + (U_{min}/U_{max})].$$

Фаза коефіцієнта відбиття визначається взаємним розташуванням вузлів (мінімумів) напруги у вимірювальній лінії у двох режимах: при вимірюванні вхідного коефіцієнта відбиття (відповідне положення вузла позначимо через l_1) і при КЗ у вхідній відрахунковій площині (l_2). При КЗ фаза коефіцієнта відбиття дорівнює $\pm 180^\circ$.

При змінюванні фази коефіцієнта відбиття на величину $\Delta\varphi$ вузол напруги зміщується у бік генератора на відстань:

$$\Delta l = (\lambda_g/4\pi)\Delta\varphi.$$

Через те що фаза коефіцієнта відбиття розраховується:

$$\varphi_{ex} = \pm 180^\circ \pm (4\pi/\lambda_g)(l_1 - l_2).$$

Верхній знак у цій формулі береться у випадку, коли шкала велечин l нанесена у бік генератора, а нижній – від генератора. Для здійснення режиму ХХ на виході чотириполосника короткозамкнений поршень необхідно встановити на відстані $\lambda_{xg}/4$ від вхідної, відрухової площини.

8. ЗМІСТ ЗВІТУ

У звіті повинні бути наведені:

- 1) матеріали попередніх розрахунків;
- 2) еквівалентні схеми досліджуваних неоднорідностей хвильового тракту;
- 3) знайдені експериментально величини і графіки;
- 4) стислі висновки з проробленої роботи. Роз'яснення причин незбігу даних розрахунку з результатами дослідів, пояснення результатів еквівалентними схемами.

9. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке коефіцієнт відбиття, коефіцієнт біжучої, стоячої хвилі? Від чого вони залежать?
2. Від чого залежить довжина хвилі у хвильоводі?
3. Режим узгодження, його характеристики.
4. Режим короткого замикання, його характеристики.
5. Режим холостого ходу, його характеристики.
6. Режим мішаних хвиль: а) $R \succ Z_{xв}$; б) $R \prec Z_{xв}$.
7. Лінія, яка навантажена на чисто реактивний опір (ємність, індуктивність).
8. Лінія, яка навантажена на комплексний опір.
9. В чому полягає метод вимірювання опору навантаження?
10. В чому полягає метод узгодження з допомогою $\lambda/4$ хвильової уставки?
11. В чому полягає метод узгодження з допомогою реактивного штиря?
12. В чому полягає метод узгодження з допомогою ємнісної і індуктивної діафрагм?
13. Вузькосмктове і широкосмктове узгодження.
14. Як визначити з допомогою колової діафрагми величину провідності ємнісної та індуктивної діафрагми, знаючи тільки величину КСХ у тракті з неоднорідністю?
15. Як визначити з допомогою колової діафрагми значення провідності неоднорідності, знаючи тільки величину зміщення вузла (при застосуванні метода Татарінова).
16. Яким співвідношенням зв'язані амплітуди падаючих і відбитих хвиль на взоді чотириполюсника НВЧ?
17. Як вимірюються елементи матриці розсіювання чотириполюсника 3-х коефіцієнтів відбиття?
18. Як з допомогою вимірювальної лінії можна визначити модуль і фазу коефіцієнтів відбиття на вході будь-якого пристрою НВЧ?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. т.1. – М.: Высшая школа, 1970 с. 163-175, 181-234, 273-289.
2. Вольман В. И. Пименов Ю. В. Техническая электродинамика – М.: связь, 1971 с. 354-359, 393-400, 426-450, 430-434, 476-478.
3. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматическое проектирование. Под редакцией Вольмана В. И. – М.: Радио и связь, 1990. с. 8-37, 130-184.
4. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. – М.: Высшая школа. 1990. с. 240-255.