

## Лабораторна робота №3

### Хвилеводні реактивні елементи

Мета роботи:

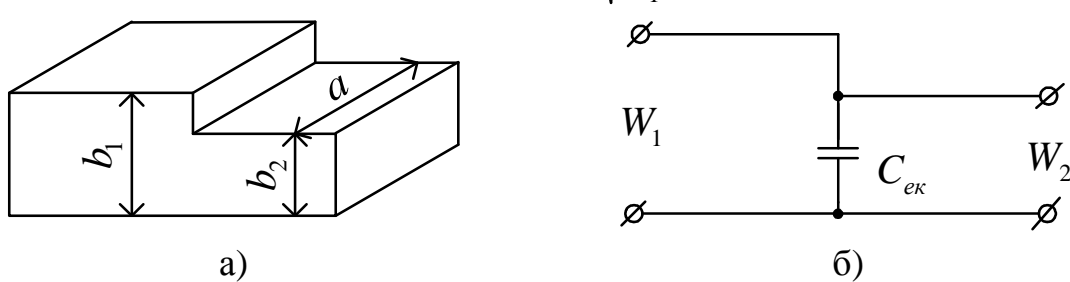
1. Вимірювання залежностей КСХ від частоти  $K_{\text{нд}}(f)$  та геометричних розмірів типових хвилеводних реактивних елементів.

2. Ознайомлення з принципом роботи та будовою вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) панорамного та отримання навичок практичної роботи з ним.

#### 1 Короткі теоретичні відомості

Типовими реактивними елементами у прямокутному хвилеводі, що працює на хвилі  $H_{10}$ , є:

– **зчленування хвилеводів** з різними розмірами вузької стінки (рисунок 3.1, а) має еквівалентну схему, показану на рисунку 3.1, б, де шунтуюча ємність  $C_{\text{ек}}$  відображає наявність вищих непоширюваних типів хвиль у місці зчленування:

$$C_{\text{ек}} = \frac{2b_1 a}{b_2^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{m\pi b_2}{b_1}}{m^2 \pi^2 \sqrt{\frac{m\pi}{b_1^2} - k^2}}.$$


а) б)

Рисунок 3.1 – Зчленування хвилеводів різної висоти та його еквівалентна схема

– **хвилеводні діафрагми**. Діафрагмою називають тонку металеву пластинку, розташовану у поперечній площині хвилеводу, і яка частково перекриває його поперечний переріз. Діафрагми є реактивними елементами, оскільки практично не вносять додаткових активних втрат, проте створюють значне місцеве поле за рахунку не поширюваних хвиль. Тому їх використовують в якості відбиваючих елементів для узгодження хвилеводів та хвилеводних пристроїв, у фільтрах НВЧ тощо.

У більшості прикладних задач допустимо вважати товщину діафрагми нескінченно малою, та без врахування теплових втрат у ній, хвилевід працює в одномодовому режимі. Якщо діафрагма концентрує поблизу себе енергію електричного поля  $W_e$ , то вона близька до конденсатора, внаслідок чого її можна представити як реактивність ємнісного характеру; якщо ж діафрагма концентрує поблизу себе енергію магнітного поля  $W_m$ , то її можна еквівалентно представити як реактивність індуктивного характеру, а якщо ж поблизу діафрагми концентрується і та і інша енергії, то при  $W_e > W_m$  діафрагму можна еквівалентно зобразити як реактивність ємнісного характеру, а при  $W_e < W_m$  – індуктивного характеру.

*Ємнісна діафрагма* (рисунок 3.2, а) має кромки, що паралельні до широкої стінки хвилеводу. Дифракція набігаючої хвилі на діафрагмі призводить до появи реактивного поля, у якому переважає електрична складова. Це пояснюється тим, що у перерізі діафрагми висота хвилеводу менша, ніж у його регулярній частині, і тому напруженість електричного поля більша, ніж магнітного. Тут порушується баланс між електричною та магнітною енергіями, який існує у біжучій хвилі; частина електромагнітного поля хвилі перетворюється у реактивне електричне поле діафрагми. Тому на еквівалентній схемі така діафрагма зображається ємнісною реактивною провідністю. Шунтуюча ємність

$$C_{ек} = \frac{a \beta^2}{\pi k^2} \ln \left( \operatorname{cosec} \frac{\pi s}{2b} \cdot \operatorname{cosec} \frac{\pi y_0}{b} \right),$$

та нормоване значення провідності

$$Y'_C = \frac{4b}{\Lambda} \ln \left( \operatorname{cosec} \frac{\pi s}{2b} \cdot \operatorname{cosec} \frac{\pi y_0}{b} \right), \quad (3.1)$$

де  $y_0$  – відстань вісі діафрагми до нижньої стінки. Для симетричної діафрагми  $y_0 = b/2$  і  $\operatorname{cosec}(\pi y_0/b) = 1$ .

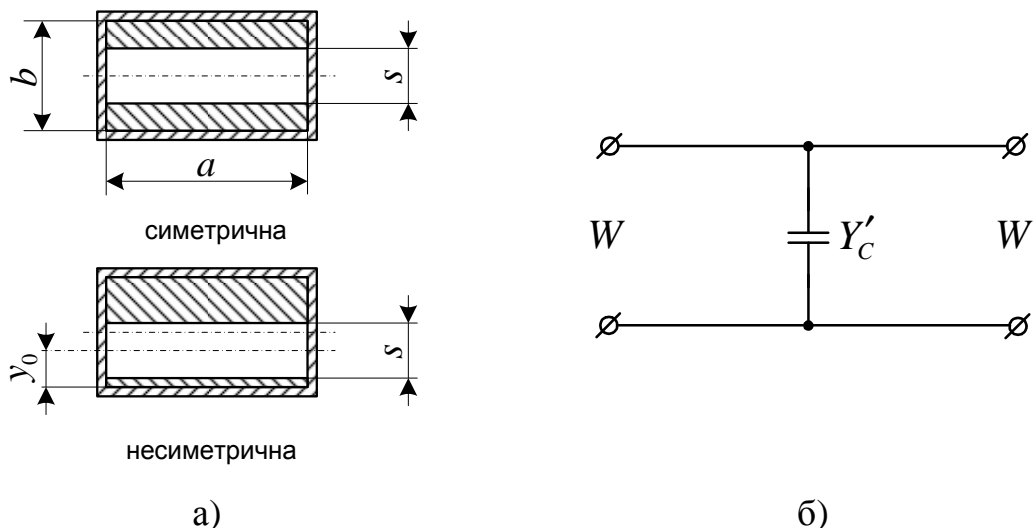


Рисунок 3.2 – Ємнісна діафрагма (а) та її еквівалентна схема (б)

Між діафрагмою та широкими стінками хвилеводу має бути хороший електричний контакт, оскільки поздовжні струми з цих стінок переходять на діафрагму. За поганого контакту вносяться додаткові втрати. Ємнісні діафрагми використовуються порівняно рідко, оскільки вони зменшують допустиму потужність, що передається по хвилеводу, створюючи умови для виникнення пробую у перерізі діафрагми.

Індуктивна діафрагма (рисунок 3.3, а) має щілину, паралельну до вузьких стінок хвилеводу. Падаюче на діафрагму електромагнітне поле створює у ній значні струми, паралельні до її крамок. Внаслідок цього у реактивному полі переважає магнітна складова, що еквівалентно включенню шунтуючої індуктивності (рисунок 3.3, б).

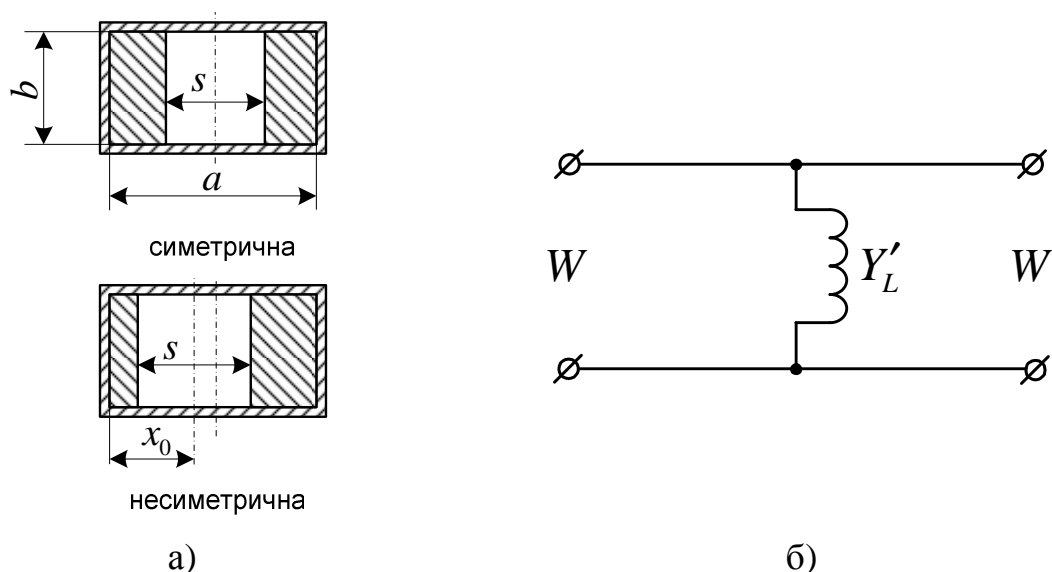


Рисунок 3.3 – Індуктивна діафрагма (а) та її еквівалентна схема (б)

Якість контакту з бічними стінками несуттєва і зменшення потужності пробою несуттєве. Тому такі діафрагми отримали ширше поширення, причому часто використовуються несиметричні діафрагми у вигляді пластини з однієї сторони хвилеводу. Еквівалентна індуктивність

$$L_{ек} = \frac{b}{\pi} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi s}{2a} \left( 1 + \sec^2 \frac{\pi s}{2a} \cdot \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi x_0}{a} \right),$$

та нормоване значення провідності

$$Y'_L = -\frac{\Lambda}{a} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi s}{2a} \left( 1 + \sec^2 \frac{\pi s}{2a} \cdot \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi x_0}{a} \right), \quad (3.2)$$

де  $x_0$  – відстань вісі діафрагми від вузької стінки хвилеводу. Для симетричної діафрагми  $x_0 = a/2$  і вираз у дужках (3.2) дорівнює одиниці.

Формули (3.1) та (3.2) отримано для тонких діафрагм ( $d \ll \Lambda$ ) у припущенні матеріалу діафрагм нескінченної провідності. Зі збільшенням товщини діафрагми збільшується її реактивність. У першому наближенні товщину  $d$  діафрагми враховують заміною у розрахункових формулах  $s$  на різницю  $s - d$ .

– **резонансне вікно** (рисунок 3.4, а) створюється при накладанні ємнісної та індуктивної діафрагм, тому його еквівалентна схема є паралельним коливальним контуром. Оскільки містить ємнісний та індуктивний елементи, включені у лінію передачі паралельно (рисунок 3.4, б). На резонансній частоті еквівалентний опір контуру дорівнює нескінченності, внаслідок чого електромагнітна хвиля безперешкодно проходить крізь вікно. Тому резонансні вікна часто використовують для розділення вакуумної та не вакуумної частин НВЧ тракту. У цьому випадку в отвір вікна впаюється діелектрична пластина.

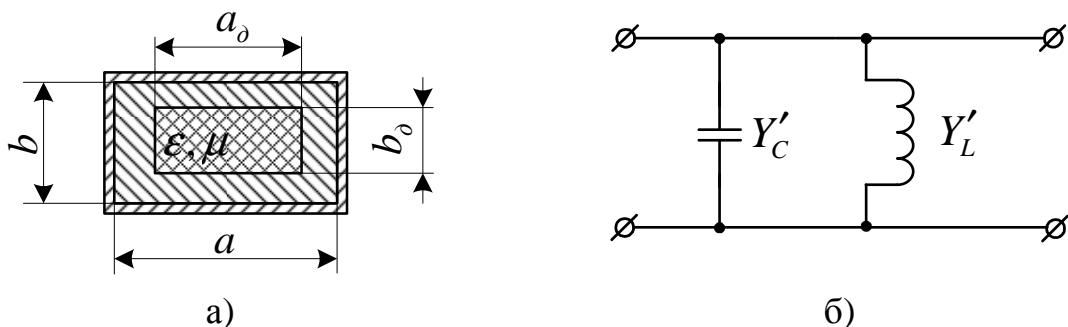


Рисунок 3.4 – Резонансне вікно у прямокутному хвилеводі (а) та його еквівалентна схема (б)

Резонансну довжину хвилі вікна можна приблизно визначити, прирівнявши хвилеві опори основного хвилеводу та отвору у діафрагмі, що розглядається як відрізок хвилеводу:

$$\frac{b}{a} \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} = \frac{b_\delta}{a_\delta} \frac{\sqrt{\mu/\varepsilon}}{\sqrt{1 - \lambda/(2a_\delta\varepsilon\mu)}},$$

де  $a_\delta, b_\delta$  – розміри отвору,  $\varepsilon, \mu$  – відносні діелектрична та магнітна проникності пластини. Це рівняння дозволяє для заданого розміру  $a_\delta$  знайти розмір  $b_\delta$ . При цьому мінімальному значенню  $a_{\min} = \lambda/(2\varepsilon\mu)$  відповідає  $b_\delta = 0$ , а максимальному значенню  $a_{\delta\max} = a$  – значення  $b_{\delta\max} = b$ .

– **індуктивний штир** у хвилеводі розташовано паралельно до вузької стінки (рисунок 3.5, а).

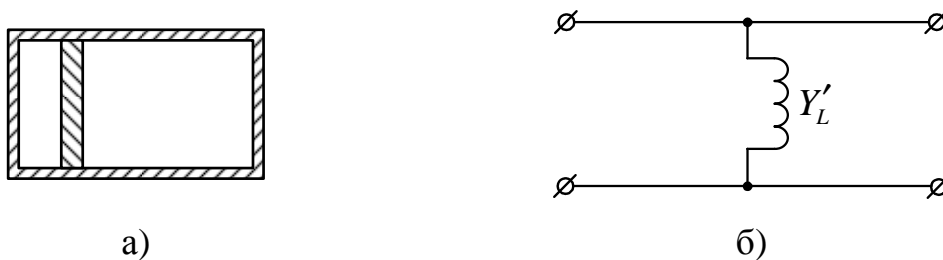


Рисунок 3.5 – Індуктивний штир у прямокутному хвилеводі (а) та його еквівалентна схема (б)

Падаюча хвиля збуджує у штирі струм, що протікає уздовж його вісі. Якщо штир з'єднує широкі стінки, то розподіл струму по його довжині можна вважати рівномірним. Струм збуджує магнітне поле, в якому запасється енергія. Тому еквівалентна провідність штиря має індуктивний характер (рисунок 3.5, б).

Еквівалентною схемою розглянутих реактивних елементів є чотирьополіусник з шунтуючою провідністю (рисунок 3.6). Матриця

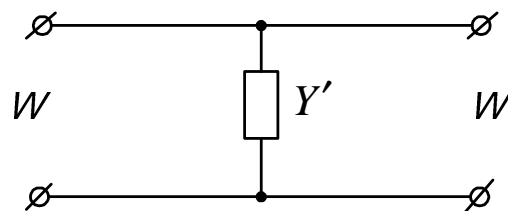


Рисунок 3.6 – Схема паралельного включення реактивності у лінію передачі

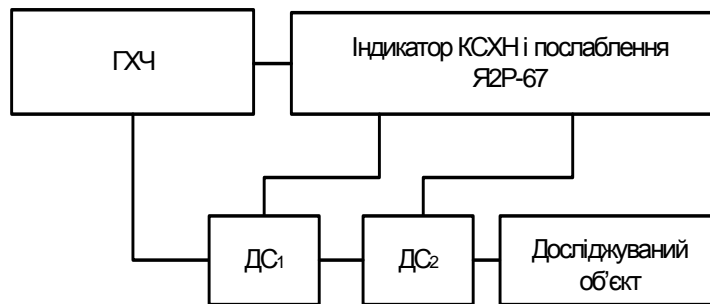
розсіяння для такого чотирьополіусника має вигляд:

$$(\dot{S}) = \begin{pmatrix} -\frac{Y'}{2+Y'} & \frac{2}{2+Y'} \\ \frac{2}{2+Y'} & -\frac{Y'}{2+Y'} \end{pmatrix}, \quad (3.3)$$

де  $Y'$  – нормована (до провідності лінії передачі) провідність.

## 2 Лабораторна установка

Структурну схему лабораторної установки зображено на рисунку 3.7.



ГХЧ – генератор хитної частоти; ДС<sub>1</sub> – детектор спрямований падаючої хвилі; ДС<sub>2</sub> – детектор спрямований відбитої хвилі

Рисунок 3.7 – Структурна схема лабораторної установки

Лабораторна установка складається з панорамного вимірювача КСХН та набору досліджуваних хвилеводних реактивних елементів – хвилеводних діафрагм.

## 3 Хід виконання роботи

3.1 Ознайомтесь з лабораторною установкою та підготуйте її до роботи.

3.2 У роботі досліджується залежність КСХ від частоти та геометричних розмірів індуктивної та ємнісної діафрагм у смузї частот прямокутного хвилеводу. Вимірювання здійснюють у такій послідовності:

3.2.1 Виконайте панорамне вимірювання КСХ індуктивної діафрагми (діапазон частот задає викладач, крок ви вибираєте самостійно, враховуючи стрімкість залежності  $K_{cm}(f)$ ) при глибині занурення її пластинок 2 мм. Результати вимірювань занесіть до таблиці.

3.2.2 Повторіть п. 3.2.1 при кількох більших глибинах занурення пластинок. Отримані результати також занесіть до таблиці.

3.2.3 Виконайте панорамне вимірювання КСХ ємнісної діафрагми у тому ж самому діапазоні частот, що і у п. 3.2.1, при глибині занурення її пластинок 2 мм. Результати вимірювань занесіть до таблиці.

3.2.4 Повторіть п.3.2.3 при кількох більших глибинах занурення пластинок. Отримані результати також занесіть до таблиці.

#### **4 Розрахункове завдання**

Розрахуйте теоретичні частотні залежності КСХ індуктивної та ємнісної діафрагм, що досліджуються у п. 3.2.1, 3.2.3, використовуючи вирази (3.1) – (3.3).

#### **5 Вимоги до звіту**

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву, мету та коротке описання ходу виконання роботи.
2. Перелік використаних приладів.
3. Таблиці результатів вимірювань, графічне оформлення табличних даних по п. 3.2.
4. Оцінку похибок вимірювань КСХ по п. 3.2.1, 3.2.3. (у табличній та графічній формах).
5. Розрахункове завдання.
6. Висновки.

#### **6 Контрольні питання**

1. Назвіть основні види неоднорідностей, які штучно вводять у хвилеводні тракти.
2. Наведіть приклади використання таких неоднорідностей.
3. Чому наявність неоднорідності спричиняє появу хвиль вищих типів поблизу неї?
4. Чому неоднорідність, що не містить поглинаючих елементів, еквівалентна реактивному чотириполюснику (багатополюснику)?
5. Які властивості  $S$  – матриці реактивного чотириполюсника (багатополюсника)?
6. Яка з діафрагм (ємнісна чи індуктивна) зменшує електричну міцність хвилеводного тракту? Чому?
7. Чи буде накладання ємнісної та індуктивної діафрагм еквівалентом паралельного резонансного контуру? Чому?

8. Як можна використати реактивні елементи для узгодження навантаження з лінією передачі?

9. Як впливають геометричні розміри хвилеводних діафрагм на їхні характеристики?

10. Поясніть принцип роботи панорамного вимірювача КСХН.