



Міністерство освіти і науки України  
**ДЕРЖАВНИЙ  
БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки,  
біомедичної інженерії та електротехніки**

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ  
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ  
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

для студентів першого рівня вищої освіти «БАКАЛАВР»,  
спеціальності 163 «Біомедична інженерія» та 141  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітньо-професійної програми «Біомедична інженерія»  
денної або заочної форми навчання та освітньо-професійної  
програми «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка» денної або заочної форми навчання

Харків 2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та  
електротехніки**

**ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ  
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ  
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» та  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітньо-професійної програми «Біомедична інженерія» та  
освітньо-професійної програми «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка» денної або заочної  
форми навчання

**ЗАТВЕРДЖЕНО**  
рішенням Науково-методичної  
ради ФЕРКТ ДБТУ  
Протокол №1 від 31.09.2022 р.

Харків, 2023

УДК  
538.8(075.8)

Схвалено на засіданні кафедри ЕРБМІЕ  
Протокол №1 від 20.10.2022 р.

Теорія електромагнітного поля: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Біомедична інженерія» та освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної або заочної форми навчання / уклад. уклад. Косуліна Н. Г., Коршунов К. С., Чорна М. О., Сухін В. В. – Харків: ДБТУ, 2023. – 52 с.

Методичні вказівки підготовлено згідно з робочою програмою дисципліни «Теорія електромагнітного поля». Систематизовано матеріал для лабораторних робіт з теорії електромагнітного поля.

Рецензенти:

Піротті О. Є. – кандидат технічних наук, доцент національного технічних університет «ХПІ», доцент кафедри передачі електричної енергії.

Аврунін О. Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки.

© ДБТУ 2023 рік  
© Косуліна Н. Г., 2023 рік  
© Коршунов К. С.,  
© Чорна М. О.,  
© Сухін В. В.

**ЗМІСТ**

Лабораторна робота №1. Вимірювальна лінія.....	4
Лабораторна робота №2. Феритовий вентиль.....	17
Лабораторна робота №3. Відбивальний клістрон.....	29
Лабораторна робота №4. Об'ємний резонатор.....	41



## Лабораторна робота №1

### ВИМІРЮВАЛЬНА ЛІНІЯ

Мета роботи - вивчити конструкцію і принцип роботи вимірювальної лінії, а також засвоїти практичні прийоми вимірювань повних опорів із використанням вимірювальної лінії і кругової діаграми.

Студент повинен знати:

- побудова, призначення й основні параметри вимірювальної лінії;
- принцип побудови кругової діаграми повних опорів;
- методи виміру малих і великих (більш 10) значень коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ);
- джерела основних помилок при роботі з вимірювальною лінією.

Студент повинен уміти:

- вимірювати довжину хвилі в лінії і КСХ навантаження за допомогою вимірювальної лінії;
- визначати вхідний опір лінії, навантаженої на заданий опір навантаження, із використанням вимірювальної і кругової діаграми повних опорів;
- визначати опір навантаження з використанням вимірювальної лінії і кругової діаграми повних опорів.

#### 1.1 Загальні відомості

Вимірювальна лінія має важливе значення в техніці виміру в НВЧ діапазоні. З її допомогою вимірюють параметри НВЧ пристроїв.

Вимірювальною лінією називається така лінія, розподіл електромагнітного поля уздовж якої можна вимірювати, користуючись пересувним зондом. На основі цього розподілу можна визначити КСХ, коефіцієнт бігучої хвилі (КБХ) у лінії, повний опір навантаження, втрати в лінії, довжину хвилі й інші параметри. По конструктивному виконанню вимірювальні лінії підрозділяються на коаксіальні, хвилеводні, смужкові і двухпровідні.

Звичайно вимірювальна лінія виконується у вигляді окремого відрізка хвилеводу або жорсткої коаксіальної лінії з двома фланцями

(роз'єднувачами), що дозволяють включати лінію в тракт між генератором і навантаженням. У лінії існує подовжня щілина, уздовж якої пересувається вимірювальна голівка. Довжина відрізка лінії вибирається з умови:

$$l > \frac{\lambda_{\max}}{2}$$

де  $\lambda_{\max}$  - максимальна довжина хвилі, на якій розраховується лінія.

Вибір поперечних розмірів вимірювальної лінії визначається стандартами хвильових опорів передаючих ліній. Коаксіальні вимірювальні лінії виготовляються на хвильові опори 50 і 75 Ом.

Наявність щілини може помітно впливати на хвильовий опір лінії. Звичайно ширина щілини підбирається експериментально, прорізується вона дуже старанно і з малими допусками. Особлива увага звертається на прямолінійність і симетричність щілини щодо осі. Звичайно щілина має ширину 1-3 мм.

Вимірювальна голівка складається з елемента зв'язку, коливального контуру і детектора. До вимірювальної голівки підключається через кабель індикаторний прилад (мікроамперметр або вимірювальний підсилювач).

У вимірювальних лініях у якості елемента зв'язку в більшості випадків застосовується зонд штиркового типу. Цей зонд реагує тільки на електричне поле в лінії. Зонд петлевого типу, що реагує на магнітне поле, застосовується рідше через наявність індуктивності. Коливальний контур вимірювальної голівки використовується для підсилення коливань, що надходять із лінії на індикаторний прилад і являє собою об'ємний резонатор.

У якості детектора використовують кристалічні напівпровідникові діоди з лінійною або квадратичною характеристикою, що полегшує опрацювання результатів виміру.

Механізм для переміщення вимірювальної голівки повинен забезпечувати сталість занурення і положення зонда, що переміщається щодо осі симетрії і високої точності відліку положення зонда щодо кінця лінії.

При пропусканні через лінію потужності НВЧ коливань у ній буде створюватися електромагнітне поле, що наводить у зонді електрорушійну силу (ЕРС), пропорційну напруженості поля в місці

розташування зонда. Ця ЭРС збуджує резонатор, створюючи в ньому електромагнітні коливання. Для зменшення спотворення на електромагнітне поле від дії зонда, в лінії резонатор настраюється в резонанс із частотою електромагнітних коливань. З об'ємним резонатором зв'язаний кристалічний детектор.

Випрямлений струм у колі детектора є мірою інтенсивності коливань у резонаторі, а отже, значення ЭРС у зонді і напруженості поля в місці розташування зонда. При переміщенні вимірювальної голівки уздовж лінії ЭРС у зонді і випрямлений струм у колі детектора будуть змінюватися відповідно до розподілу поля в лінії. Випрямлена напруга від детектора подається через кабель на індикаторний прилад. Основними характеристиками вимірювальної лінії є: діапазон частот, межі вимірів, точність вимірів, хвильовий опір, маса і габарити. Устрій вимірювальної лінії показана на рис. 1.1.

## 1.2 Основні застосування кругової діаграми

### 1.2.1 Кругова діаграма повних опорів і провідностей передаючих ліній

При розрахунках передаючих ліній НВЧ часто припадає визначати вхідний опір лінії  $Z_{вх}$  навантаженої на відомий опір, або робити інші подібні обчислення. Розрахунки можуть бути надзвичайно спрощені, якщо скористатися спеціальним типом кругових діаграм (номограм).

Розглянемо основні приклади застосування кругових діаграм для вирішення найпростіших задач, що виникають при роботі з передаючими лініями НВЧ. Будемо розглядати розрахунок за допомогою кругових діаграм у полярній системі координат.

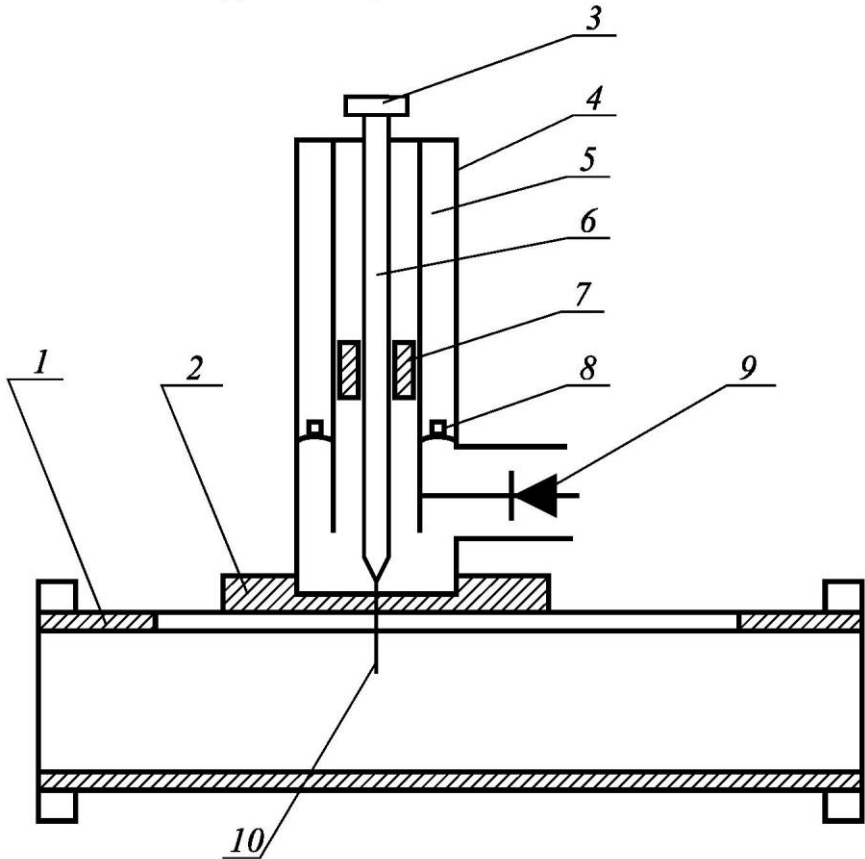
### 1.2.2 Відображення заданого опору на площині кругової діаграми і визначення КСХ

Нехай відомо опір навантаження  $Z_n = 50 + j30$  Ом. Оскільки діаграма побудована у відносних одиницях, ділимо опір навантаження на хвильовий опір лінії (хвильовий опір лінії  $Z_c = 75$  Ом).

$$Z_n = \frac{50}{75} + j\frac{30}{75} = 0,67 - j0,47$$

відн. од.

Знайдемо на полярній діаграмі окружність активного опору позначену цифрою 0,67 (при необхідності варто скористатися інтерполяцією). Далі знайдемо окружність реактивного опору, позначений цифрою 0,40 що лежить в позитивній півплощині діаграми, як показано на рис.1.2. Точка перетинання знайдених окружностей  $R=\text{const}$ ,  $X=\text{const}$  відповідає відображенню даного навантаження на круговій діаграмі



1 - хвилевід, 2 - вимірювальна голівка; 3 - гайка; 4 - зовнішня трубка; 5 - внутрішня трубка; 6 - стержень; 7 - безконтактний поршень; 8 - контактний поршень; 9 - детектор; 10 - зонд.

Рисунок 1.1 — Побудова хвилеводної вимірювальної лінії.

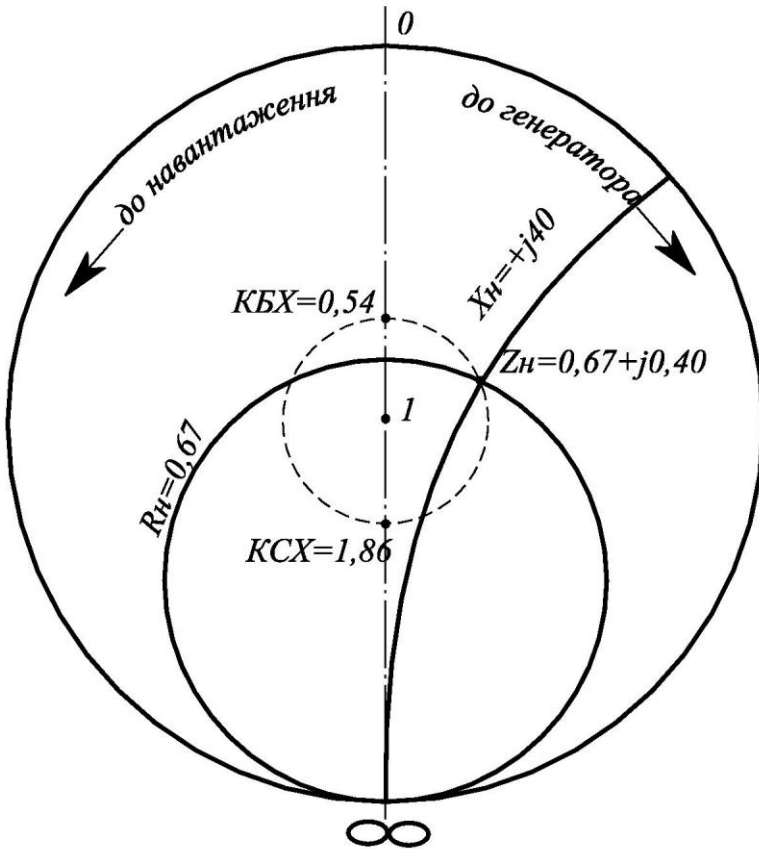


Рисунок 1.2 — Відображення опору навантаження на круговій діаграмі

Одночасно визначають  $KСХ$  і  $KБХ$  у лінії при розглянутому навантаженні. Для знаходження  $KСХ$  достатньо провести з центру діаграми через отриману точку окружність до перетинання з прямою  $X=0$ . Активний опір у двох точках перетинання дорівнює значенню  $KСХ$  і  $KБХ$ . У даному випадку  $KСХ = 1,86$   $KБХ = 0,54$ .

Точність, забезпечувана круговою діаграмою, цілком достатня для більшості випадків, що практично зустрічаються.

### 1.2.3 Визначення вхідного опору лінії без втрат, навантаженої на заданий опір

Нехай задана довжина лінії  $l$ , навантажена на опір  $Z_n$ , частота коливань (або довжина хвилі) і характеристичний опір лінії. Визначення вхідного опору зводиться до знаходження окружності постійного КСХ, що проходить через точку, що відповідає даному навантаженню, і до повороту по годинниковій стрілці по окружності постійного КСХ (у бік генератора) на кут  $l/\lambda_e$  або  $l/\lambda$ .

Одержувана точка відображає вхідний опір лінії. Значення його можна відрахувати, як показано на рис. 1.3, находячи окружності  $R$  і  $X$ , що проходять через знайдену точку. Вхідний опір в омах, якщо це необхідно, одержують множенням результату на значення характеристичного (хвильового) опору лінії.

Як приклад знайдемо вхідний опір коаксіальної лінії з характеристичним опором  $Z_c = 75$  Ом, що має довжину  $l = 6$  см при робочій довжині хвилі  $\lambda = 30$  см. Опір навантаження  $Z_n = 50 + j 30$  Ом або в нормованих значеннях  $Z_n = 0,67 + j0,40$ . Відповідна графічна побудова наведена на рис. 1.3.

Відзначимо на діаграмі точку  $Z_n = 0,67 + j0,40$  і проведемо через неї окружність постійного КСХ (КСХ = 1,86). Кут повороту по окружності постійного КСХ у даному випадку дорівнює  $l/\lambda = 0,2$ . Отримана точка на круговій діаграмі буде відповідати  $Z_{вх}$ . Визначимо активну і реактивну складову вхідного опору  $R_{вх} = 1,63$ ,  $X_{вх} = -0,54$ . Вхідний опір у нормованих значеннях виявляється рівним  $Z_{вх} = 1,63 - j0,54$  (відн.од.).

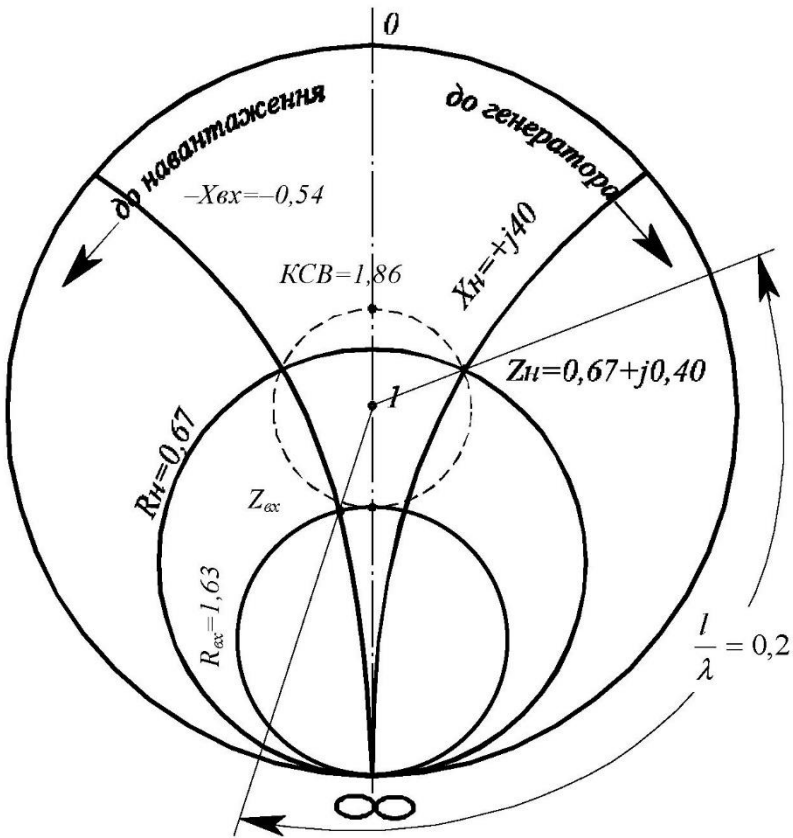


Рисунок 1.3 — Визначення вхідного опору відрізка лінії, навантаженого на відомий опір.

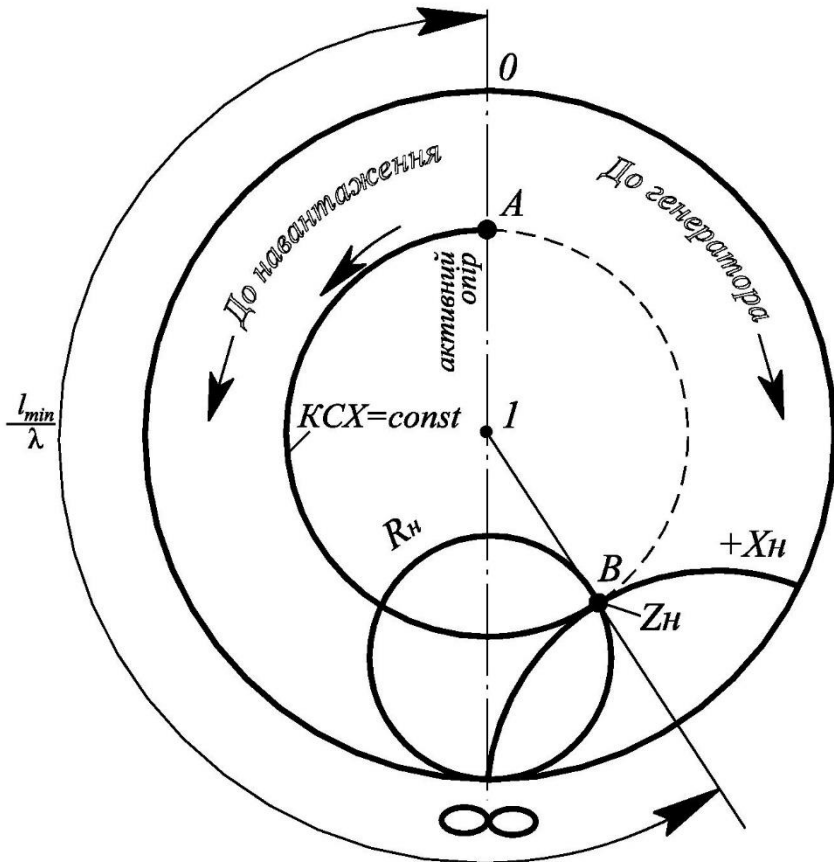


Рисунок 1.4 - Визначення опору навантаження по обмірюваним  $K_{СХ}$ ,  $\lambda$  x и  $l_{min}$

Після множення на характеристичний опір лінії одержуємо, що вхідний опір  $Z_{вх} = 122,5 - j40,5 \text{ Ом}$ .



#### 1.2.4 Застосування кругової діаграми для виміру опору навантаження

Розглянемо, яким способом можна визначити опір навантаження, знаючи значення  $\lambda_x$ ,  $K_{CX}$  і відстань від мінімуму стоячої хвилі напруги до навантаження  $l_{\min}$ .

Значення  $K_{CX}$ ,  $\lambda_x$  і  $l_{\min}$  визначають у ході виконання роботи.  $K_{CX}$  визначає окружність, що перетинає лінію вхідних активних опорів у точці А (рис.1.4). Таким чином, точка А відображає вхідний опір передаючої лінії у мінімумі напруги, що у нормованих значеннях чисельно дорівнює КБХ. Подальше рішення зводиться до знаходження опору навантаження по відомому вхідному опоруі.

Тепер достатньо зробити поворот проти годинникової стрілки (до навантаження) по окружності  $K_{CX} = \text{const}$  із точки А на кут  $l_{\min}/\lambda$  щоб у точці В відрахувати опір навантаження  $R_n, X_n$ .

### 1.3 Лабораторне завдання

1.3.1 Вивчити конструкцію і принцип роботи вимірювальної лінії.

1.3.2 Вивчити основні застосування кругової діаграми.

1.3.3 Виміряти робочу довжину хвилі,  $K_{CX}$ ,  $l_{\min}$ .

1.3.4 Визначити повний опір навантаження, використовуючи вимірювальну лінію і кругову діаграму.

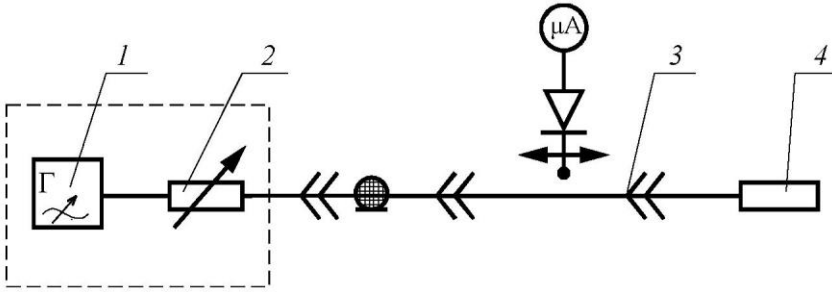
### 1.4 Опис лабораторної установки

Лабораторну роботу виконують на експериментальній установці, схема якої зображена на рис.1.5.

### 1.5 Порядок виконання роботи

З'єднати генератор НВЧ з вимірювальною лінією за допомогою ВЧ-кабелю і підключити індикаторний прилад до вимірювальної лінії. Індикатором може служити мікроамперметр (цифровий) або підсилювач.

Ввімкнути генератор і дати йому прогрітися протягом 15 хв. Встановити на генераторі задану частоту.



1 - генератор НВЧ; 2 - атенуаатор; 3 - вимірювальна лінія; 4 - досліджуване навантаження.

Рисунок 1.5 — Схема експериментальної установки для визначення повних опорів.

### 1.5.1 Вимір довжини хвилі в лінії

1.5.1.1 Закоротить вимірювальну лінію на кінці короткозамикачем. Користуючись ручкою "Вихід", розташованій на передній панелі генератора, і органами настроювання об'ємного резонатора вимірювальної лінії, домогтися відхилення стрілки індикатора на 70-90 ділень шкали в пучності (максимумі) напруги вимірювальної лінії. Переміщуючи вимірювальну голівку уздовж лінії, спостерігати стоячі хвилі.

1.5.1.2 Виміряти довжину хвилі  $\lambda_x$  при закороченій лінії, для чого визначити відстань між двома сусідніми вузлами (мінімумами). Положення вузлів визначити методом двох відліків (вилки), тобто визначити положення двох однакових показань  $\alpha 1$  індикатора зліва і справа від вузла (рис. 1.6):

$$l_{y1} = \frac{l'_1 + l'_2}{2}$$

Таким же чином визначити положення сусіднього вузла. Довжина хвилі при короткому замиканні лінії дорівнює подвоєній відстані між пучностями або вузлами:  $\lambda_x = 2(l_{y2} - l_{y1})$ .

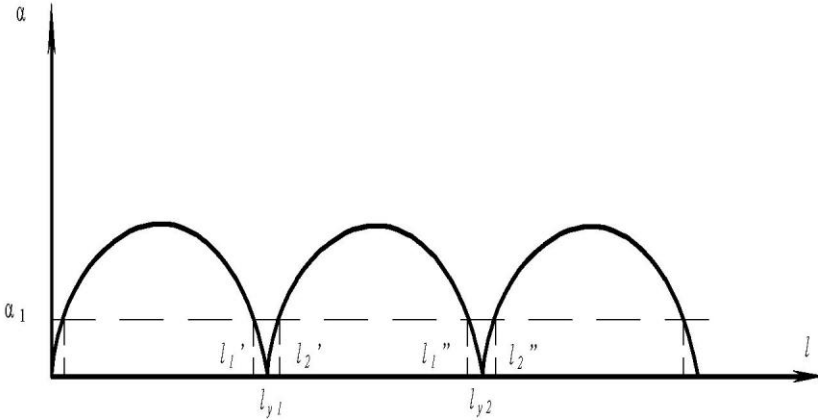


Рисунок 1.6 — Визначення довжини хвилі методом двох відліків

### 1.5.2 Вимір КСХ напруги

1.5.2.1 До виходу вимірювальної лінії приєднати навантаження, КСХ якої необхідно визначити.

1.5.2.2 Переміщуючи вимірювальну голівку уздовж лінії, установлюють зонд у пучність (максимум) стоячої хвилі і фіксують показання індикатора  $\alpha_{\max}$ . Потім установлюють зонд у вузол (мінімум) стоячої хвилі і знову фіксують показання індикатора. Користуючись калібровочною характеристикою, переводять показання індикатора в значення напруги в лінії.

1.5.2.3 Обчислити КСХ по формулі

$$\text{КСХ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad (1.1)$$

При токах детектора, що не перевищують 10 мкА, характеристику детектора можна вважати квадратичною. У цьому випадку КСХ може бути обчислений по формулі

$$\text{КСХ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}} \quad (1.2)$$

При вимірі КСХ порядку 10 і більш описаним методом відліків індикатора в мінімумі стають дуже малими, унаслідок чого точність

виміру КСХ виходить дуже низькою. Тому КСХ порядку 10 і більш рекомендується визначати по ширині вузла. Для цього встановити зонд вимірювальної лінії у вузол стоячої хвилі і відзначити відліки індикатора  $\alpha_{\min}$  після чого, переміщуючи зонд по черзі вправо і уліво від вузла на відстань, що відповідає подвоєному значенню показання індикатора у вузлі  $2\alpha_{\min}$  визначити ширину вузла  $2l$  (рис.1.7). Приймаючи режим роботи детектора квадратичним, визначити значення КСХ по формулі

$$КСХ = \frac{\lambda_g}{2\pi l} \quad (1.3)$$

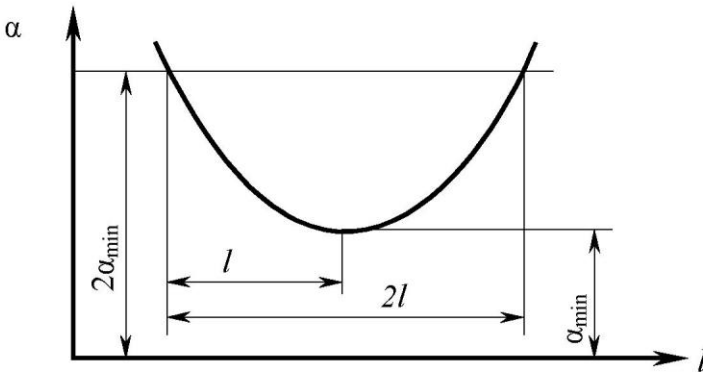


Рисунок 1.7 — Вимір великих значень КСХ

### 1.5.3 Вимір повних опорів

1.5.3.1 Визначити умовний кінець лінії. З цією метою закорочують вимірювальну лінію на кінці короткозамикачем. Потім переміщують вимірювальну голівку від вихідного кінця лінії в напрямку до генератора до першого вузла (мінімуму) напруги. Ця точка і буде умовним кінцем лінії. Положення вузла визначити методом двох відліків.

1.5.3.2 Приєднати випробуване навантаження до вихідного кінця вимірювальної лінії. Переміщуючи вимірювальну голівку убік генератора, визначити відстань  $l_{\min}$  від визначеного вище умовного кінця лінії до першого вузла. Положення вузла визначити методом двох відліків.

1.5.3.3 Обчислити значення  $\beta = 2\pi \frac{l_{\min}}{\lambda_x}$

1.5.3.4 Обчислити значення  $Z_n$  по формулі

$$Z_n = Z_c \frac{KCX - 0,5j(KCX^2 - 1) \cdot \sin 2\beta}{\sin^2 \beta + KCX^2 \cos^2 \beta}$$

де  $Z_c$  – хвильовий опір вимірювальної лінії, дорівнює 50 Ом.

1.5.3.5 Визначити значення повного опору випробуваного навантаження  $Z_n$  по круговій діаграмі ( $I_{min}$ ,  $KCX$  і  $\lambda x$  узяти з досвіду) і порівняти отримані результати.

## 1.6 Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву і мету роботи; опис методики виміру  $\lambda x$ ,  $KCB$ ,  $Z_n$ ; схему виміру; результати вимірів і розрахунків; висновки по виконаній роботі.

## 1.7 Контрольні запитання

1.7.1 Призначення, конструкція і принцип роботи вимірювальної

лінії. Основні параметри вимірювальної лінії.

1.7.2 Зазначити джерела основних погрешностей у визначенні  $KCX$  і положення мінімумів при роботі з вимірювальною лінією.

1.7.3 Дати визначення  $KCX$ . Які значення він може приймати?

1.7.4 Методи виміру малих і великих (більш 10) значень  $KCX$ .

1.7.5 На чому засновується принцип визначення повних опорів за допомогою вимірювальної лінії і кругової діаграми?

1.7.6 Відображення заданого опору на площині кругової діаграми і знаходження  $KCX$ .

1.7.7 Визначення вхідного опору лінії без втрат, навантаженої на заданий опір.

1.7.8 Визначення по круговій діаграмі опору навантаження.

1.7.9 Принцип побудови кругової діаграми повних опорів.

## Література:

[1] с.181 – 200; [3] с.360 – 364; [4] с.87 – 104; [5] с.35 – 45; 59 – 67.

## Лабораторна робота №2

**ФЕРИТОВИЙ ВЕНТИЛЬ**

Мета роботи: вивчити принцип роботи, конструкцію і дослідити основні характеристики резонансного феритового вентиля.

Студент повинен знати:

- призначення і принцип роботи феритового вентиля в хвилевидному, коаксіальному й смужковому виконанні;
- експлуатаційні характеристики й електромагнітні параметри феритових вентилів;
- умова виникнення феромагнітного резонансу;
- залежність втрат у фериті від напруженості зовнішнього постійного магнітного поля;
- конструкції резонансного вентиля;
- шляхи одержання колової поляризації в коаксіальному вентилі.

Студент повинен уміти:

- підготувати апаратуру, що входить до складу лабораторної установки, для проведення досліджень;
- визначити основні електромагнітні параметри (прямі втрати, зворотні втрати) феритового вентиля.

**2.1 Феромагнітний резонанс**

Феритовий вентиль призначений для захисту джерела НВЧ- коливань від хвиль, відбитих від навантаження, тобто для усунення впливу вимірюваного об'єкта на потужність і частоту генерованих коливань. При цьому енергія відбитої хвилі поглинається безпосередньо в вентилі. Основною галуззю застосування вентиля НВЧ є вимірювальна і радіолокаційна техніка. За принципом дії вентиля поділяються на резонансні і вентиля, які використовують ефект зміщення електромагнітного поля у хвилеводі з намагніченим феритом.

За принципом дії і конструкцією резонансний вентиль є одним з найпростіших феритових пристроїв. У ньому використовується явище не взаємного поглинання феритом НВЧ-енергії при феромагнітному резонансі.

У цій лабораторній роботі вивчається феритовий вентиль в коаксіальному виконанні.

Найважливіші властивості феритів, що дозволяють використовувати їх в діапазоні НВЧ для створення вентилів, циркуляторів, фазообертальників та інших пристроїв, пов'язані з гіроскріпчними властивостями магнітних моментів електронів.

При накладанні зовнішнього магнітного поля, що не співпадає з напрямком магнітного моменту електрона, останній здійснює вільну прецесію подібно до гіроскопу з кутовою частотою:

$$\omega_0 = \frac{g e \mu_0 H_0}{2m} \quad (2.1)$$

$g$  – фактор спектроскопічного розщеплення рівней 2 для електричного спину;

$e$  – заряд електрону;

$H_0$  – напруженість діючого магнітного поля;

$m$  – маса електрона.

Якщо виразити частоту  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$  в мегагерцах, а напругу поля  $H_0$  в ерстедах, то після підставлення у вираження (2.1) значення заряду і маси електрона можна одержати:  $f_0 \approx 2,8 H_0$ .

Напрямок прецесії залежить лише від напрямку постійного магнітного поля і відбувається за годинниковою стрілкою, якщо дивитись з напрямку  $H_0$  (рис. 2.1.). При відсутності втрат прецесія продовжувалася би безмежно довго при незмінному куті.

Проте в феритах завжди наявні деякі втрати. Для наочності їх простіше всього уявити у вигляді “сил тертя”, що перешкоджають прецесії вектору намагніченості  $M$  навколо напрямку постійного магнітного поля  $H_0$ .

У результаті “тертя” кут  $\psi$  починає зменшуватись, вектори магнітних моментів електронів розміщені в напрямку постійного магнітного поля  $H_0$ . Ферит виявляється намагніченим. Час намагнічування (затухання прецесії) складає біля 10–8 с.

Інакше стоїть справа, коли на ферит, крім постійного магнітного поля, накладене високочастотне магнітне поле з коловою частотою  $\omega$ , близькою до частоти прецесії  $\omega_0$ .

Хай високочастотне магнітне поле  $\overline{H} \sim$  має колову поляризацію (тобто вектор  $\overline{H} \sim$  обертається з частотою НВЧ сигналу, не змінюючи свого значення, і описує своїм кінцем коло) і орієнтовано перпендикулярно до постійного магнітного поля  $H_0$ , як показано на рис. 2.1. Припустимо, що напрям обертання  $\overline{H} \sim$  співпадає з напрямом прецесії магнітного моменту  $\overline{M}$ .

Від способу одержання колової поляризації поки що відволікаємося.

При  $\omega = \omega_0$  обертальний вектор  $\overline{H} \sim$  залишається нерухомим відносно прецесуючого магнітного моменту  $\overline{M}$ . Для підтримання прецесії при наявності втрат вимагається енергія. Ця енергія відбирається від змінного електромагнітного поля, витрачається на подолання “сил тертя” і виділяється в фериті у вигляді тепла. Якщо частоти  $\omega$  і  $\omega_0$  не співпадають, ефективність взаємодії зменшується, втрати в фериті знижуються.

Таким чином, при співпаданні напрямків обертання векторів  $\overline{H} \sim$  і  $\overline{M}$  ферит веде себе як резонансний контур з власною частотою. Оскільки величина  $\omega_0$  лінійно залежить від напруги постійного магнітного поля  $\overline{H}_0$ , втрати в фериті проходять через резонансний максимум, як показано на рис. 2.2., крива 1.

При взаємно протилежних напрямках обертання векторів  $\overline{H} \sim$  і  $\overline{M}$  втрати не мають максимуму на резонансній частоті (пунктирна крива 2) і поглинання енергії в фериті не відбувається.

Якщо поглинання енергії електромагнітного поля феритом при співпаданні частоти і напрямку обертання векторів  $\overline{H} \sim$  і  $\overline{M}$  називається феромагнітним (гіромагнітним) резонансом.

Якість фериту можна оцінити по ширині резонансної кривої  $2_{\Delta}H_0$ , що відраховується на рівні 0,5 від максимального значення поглинальної потужності.



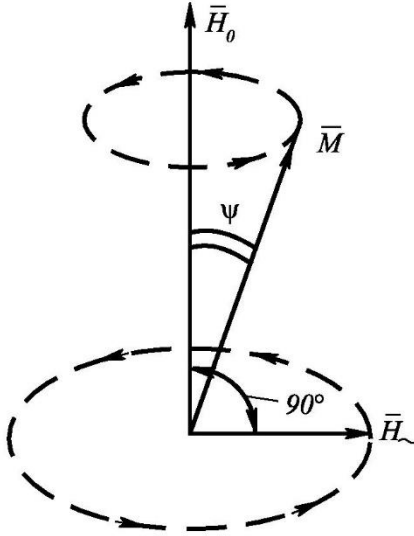
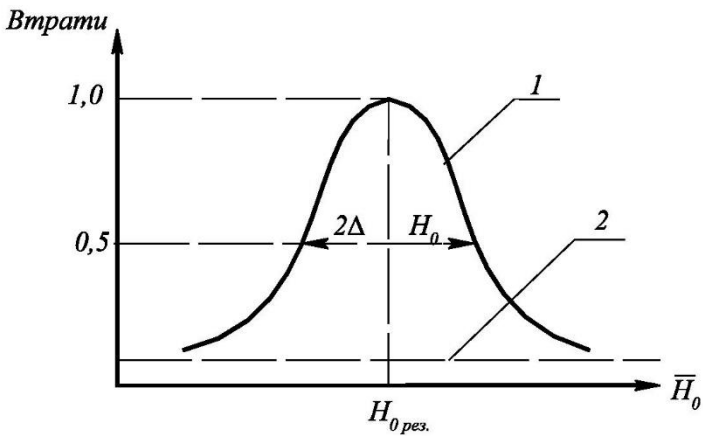


Рисунок 2.1 - Прицесія магнітного моменту електрона в постійному магнітному полі



- 1- праворучна поляризація;
- 2- ліворучна поляризація.

Рисунок 2.2 – Залежність втрат в фериті при поляризації

## 2.2 Конструкція резонансного вентиля

Конструктивне резонансний вентиль являє собою відрізок лінії передачі, в якому розміщений феритовий елемент, що знаходиться в полі постійного магніту. В залежності від робочої частоти і призначення вентиля, а також припустимих умов експлуатації резонансний вентиль може бути виконаний на хвилеводній, коаксіальній або смужковій лінії передачі. Всі різновиди резонансних вентилів мають спільну рису — поглинання енергії електромагнітної хвилі, що розповсюджується в зворотному напрямі, відбувається в феритовому елементі.

Як правило, коаксіальні і смужкові резонансні вентиля застосовуються в дециметровому діапазоні хвиль і на низькому рівні потужності, а хвилеводні — головним чином в сантиметровому діапазоні хвиль при високому рівні потужності.

### 2.2.1 Хвилеводний резонансний вентиль

Хвилевідний резонансний вентиль являє собою відрізок хвилеводу з феритовою пластиною, намагніченою постійним магнітним полем, напрям якого спрямоване перпендикулярно широким стінкам хвилеводу. Для одержання односпрямованого ослаблення необхідно розташувати (розмістити) ферит у тих площинах хвилеводу, де високочастотне магнітне поле має колову поляризацію.

Для хвилі Н10 ці площини знаходяться на відстані приблизно рівній  $a/4$  від вузьких стінок хвилеводу ( $a$  – розмір широкої стінки хвилеводу). Напрямок обертання вектору  $\vec{H} \sim$  в кожному із вказаних поздовжніх перетинів взаємно протилежне і залежить від напрямку руху хвилі по хвилеводу (рис. 2.3). Стрілками в кільцях показано напрям обертання вектору  $\vec{H} \sim$ .

Отже, щоб одержати односпрямоване ослаблення, феритова пластина повинна бути розміщена в одній з двох площин, як показано на рис. 2.3. Якщо напруженість постійного магнітного поля вибрати рівною  $\vec{H}_0$  (рис. 2.4), то ферит поглинає потужність хвилі, що створює праворучполяризоване магнітне поле (вектор  $\vec{H} \sim$

обертається за годинниковою стрілкою, якщо дивитися за напрямом вектору  $\vec{H}_{0\text{рез}}$ .

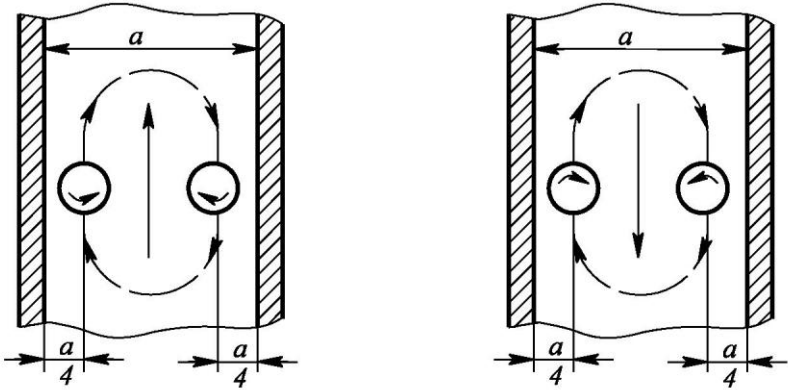


Рисунок 2.3 - До розгляду поляризації високочастотного магнітного поля в хвилеводі пр хвилі  $H_{10}$

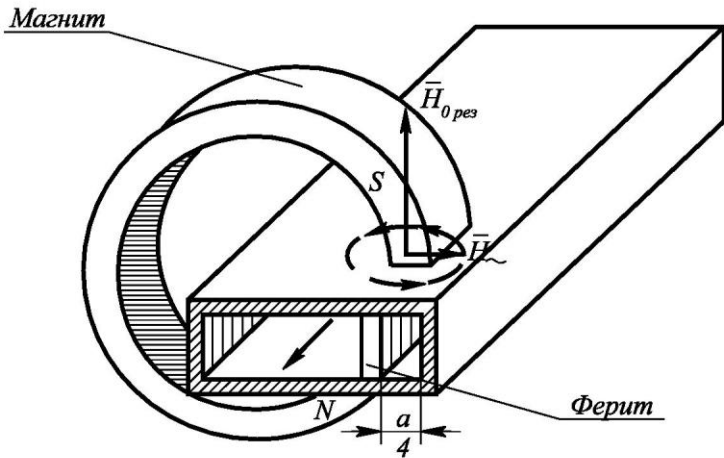


Рисунок 2.4 - Конструкція хвилеводного феритового вентиля

Поглинання хвилі, що йде по тому ж хвилеводі в протилежному напрямку, практично не відбувається.

На практиці вдається забезпечити втрати в зворотному напрямку близько 20 – 30 dB при прямих втратах менших 0,5 dB. Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) при цьому не перевищує 1,1.

### 2.2.2 Коаксіальні і смужкові резонансні вентиля

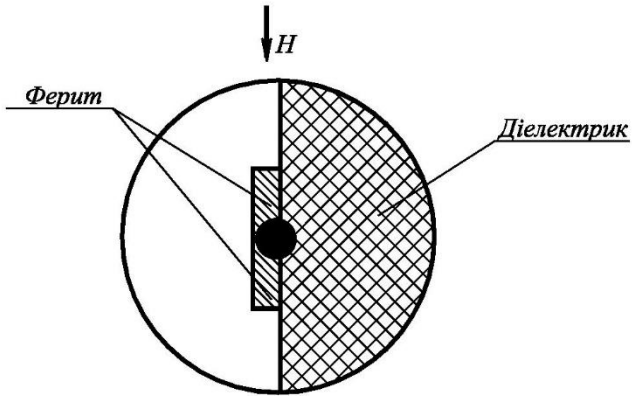
Основний тип хвилі в коаксіальній і смужковій лініях — ТЕМ (поперечно електромагнітна) не має поздовжньої складової змінного магнітного поля. У зв'язку з цим у таких лініях відсутня колова поляризація магнітного поля.

Основним засобом створення колової поляризації є застосування вкладників із діелектрика з великою діелектричною проникністю. У результаті викривлення хвилі основного типу на межі розділу діелектрик-повітря виникає поздовжня складова змінного магнітного поля. Внаслідок цього на межі розділу магнітне поле буде мати колову поляризацію.

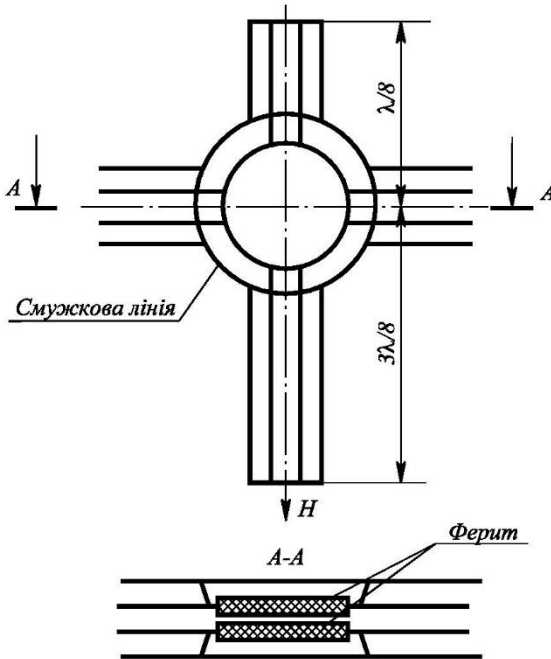
Підібравши ступінь заповнення лінії діелектриком, його форму і значення діелектричної проникності, можна одержати колову поляризацію змінного магнітного поля. Через відсутність дисперсії робоча смуга частот коаксіального й смужкового вентилів значно більша, ніж хвилеводного.

До числа недоліків такої конструкції слід віднести: громіздкість, великі втрати в діелектриці, неможливість розрахунку феритно-діелектричного вкладиша. Конструкція коаксіального феритового вентиля показана на рис. 2.5.

Другий спосіб створення колової поляризації змінного магнітного поля, особливо зручний для смужкової лінії, побудований (заснований) на використанні короткозамикаючих шлейфів. Два короткозамикаючих шлейфа довжиною  $\lambda/8$  і  $3\lambda/8$  розміщуються перпендикулярно до основної лінії. Електромагнітна хвиля, відбита від шлейфів, має фазові зрушення  $+90^\circ$  і  $-90^\circ$  відносно хвилі в основній смужковій лінії. Крім того, самі шлейфи мають просторове зрушення відносно основної лінії також  $+90^\circ$  і  $-90^\circ$ . Тому в місці перетину основної смужкової лінії і короткозамкнутих шлейфів змінне магнітне поле буде мати колову поляризацію. Конструкція вентиля такого типу показана на рис. 2.6.



**Рисунок 2.5 - Конструкція коаксильного феритового вентиля**



**Рисунок 2.6 - Схематичне зображення смужкового феритового вентиля з короткозамикаючими шлейфами**

Феритовий елемент, поміщений у місце колової поляризації змінного магнітного поля, має форму диска і намагнічується магнітним полем, створеним постійним магнітом.

Оскільки зазор постійного магніту невеликий, магнітна система виявляється простою і компактною. Розробка вентиля істотно спрощується, а смужкова конструкція допускає застосування друкованого способу виготовлення.

Параметри і характеристики феритових вентилів, що дозволяють оцінити можливість їх застосування в конкретній схемі при певних режимах експлуатації, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Експлуатаційні характеристики та електромагнітні параметри феритових вентилів.

Електромагнітні параметри		Експлуатаційні характеристики	
основні	допоміжні	основні	допоміжні
Центральна робоча частота, МГц Смуга робочих частот, МГц Втрати в прямому напрямі, дВ Втрати в зворотному напрямі, дВ КСХН входу	Вентильне відношення	Допустима імпульсна потужність, Вт Допустима середня потужність, Вт Допустимий КСХН навантаження Інтервал робочих температур Перетин хвильоводу або коаксіального з'єднувача, мм Допустимі механічні впливи (дії)	Габаритні розміри, мм Маса, г

## 2.3 Лабораторне завдання

2.3.1 Ознайомитися з апаратурою, що входить до складу лабораторної установки.

2.3.2 Дослідити залежність втрат у прямому й зворотному напрямках від частоти коаксіального резонансного вентиля.

2.3.3 Порівняти експериментальні результати зі значеннями параметрів, наведених в технічних умовах на досліджуваний тип феритового вентиля.

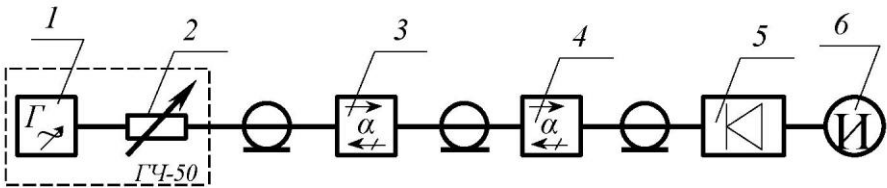
## 2.4 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується на експериментальній установці, до складу якої входять: генератор НВЧ, розв'язуючий вентиль, досліджуваний вентиль, вимірювальний атенюатор, детекторна головка, мікроамперметр.

## 2.5 Порядок виконання роботи

2.5.1. Зібрати лабораторну установку для дослідження залежності прямих втрат від частоти згідно зі схемою (рис. 2.7). Включити апаратуру в мережу і дати їй прогрітися протягом 15 хвилин.

2.5.2. Підготувати генератор НВЧ до роботи.



1–генератор; 2–вимірювальний атенюатор; 3–розв'язуючий вентиль; 4–досліджувальний вентиль; 5–детекторна головка; 6–індикатор.

Рисунок 2.7 – Схема установки для дослідження втрат в прямому та зворотному напрямку.

2.5.3. Встановити відліковий лімб вимірювального атенюатора на мінімальне затухання  $n_1$ . Вимірювальний атенюатор може входити до складу генератора НВЧ.

2.5.4. Відмітити показ індикатора 6. Індикатором може служити цифровий або стрілковий мікроамперметр.

2.5.5. Виключити досліджуваний вентиль із схеми вимірювання. При цьому показ індикатора 6 збільшиться. Збільшуючи затухання вимірювального атенюатора, досягти попередніх показів індикатора.

2.5.6. Втрати в прямому напрямі будуть рівними, дБ:

$$\alpha_{np} = n_2 - n_1$$

$n_2$  — показ відлікового лімба вимірювального атенюатора при відсутності досліджуваного вентиля. Вимірювання провести в діапазоні частот 1200 – 2300 МГц з інтервалом в 200 МГц.

Дані вимірювань занести в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 — Втрати в прямому напрямі

$f$ , МГц	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2300
$\alpha_{np}$ , дБ							

2.5.7. Провести дослідження залежності зворотних втрат від частоти. Для цього досліджуваний вентиль 4 (рис. 2.7) включити в зворотньому напрямі. Зворотні втрати вимірюють за методикою, викладеною в п.п. 2.5.3 – 2.5.6. Втрати в зворотному напрямі рівні, дБ:

$$\alpha_{обр} = n_2 - n_1$$

Дані вимірювань занести в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 — Втрати в зворотному напрямі

$f$ , МГц	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2300
$\alpha_{обр}$ , дБ							



## 2.6 Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву і мету роботи; короткі теоретичні відомості; схему установки; результати вимірів, зведені в таблиці; графіки, побудовані за експериментальними даними; висновки про виконану роботу.

## 2.7 Контрольні запитання

2.7.1. Призначення феритового вентиля і його електричні й експлуатаційні характеристики.

2.7.2. Що таке феромагнітний резонанс і при яких умовах він виникає?

2.7.3. Як залежать втрати у фериті від напруги постійного магнітного поля?

2.7.4. Конструкція хвилевідного феритового вентиля.

2.7.5. Конструкція коаксіального феритового вентиля.

2.7.6. Конструкція смужкового феритового вентиля.

## Література:

[1] с.254 – 262.

## Лабораторна робота № 3 ВІДБИВАЛЬНИЙ КЛІСТРОН

Мета роботи - вивчити конструкцію, принцип роботи і дослідити основні характеристики типового відбивального клістрона з зовнішнім резонатором.

Студент повинен знати:

- призначення, конструкцію і принцип роботи відбивального клістрона;
- принцип модуляції по швидкості і щільності електронного потоку;
- причини існування зон генерації;
- засоби перестроювання частоти генерації відбивального клістрона;
- основні характеристики відбивального клістрона.

Студент повинен уміти:

- підготувати апаратуру, що входить до складу лабораторної установки, для проведення дослідження;
- експериментально визначати основні характеристики відбивального клістрона (діапазон електронного настроювання, крутизну електронного настроювання).

### 3.1 Загальні відомості

Відбивальні клістриони широко використовуються в діапазоні НВЧ як генератори малої і середньої потужності.

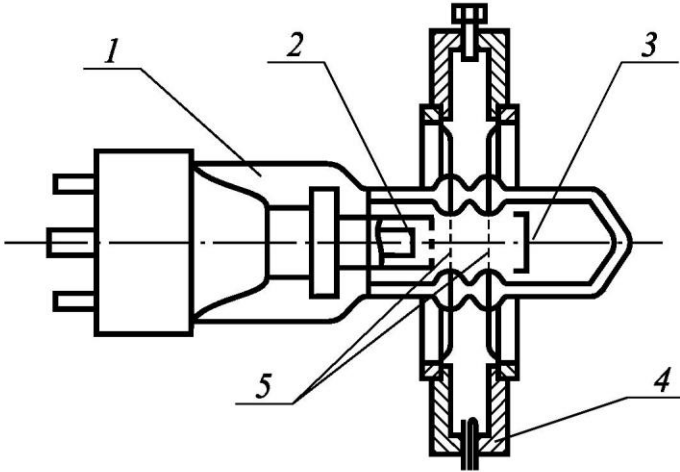
Є два види відбивальних клістронів: із змінним зовнішнім і внутрішнім резонаторами.

Конструкція відбивального клістрона з зовнішнім резонатором показана на рис.3.1. У середині скляного корпусу 1 змонтована електронна гармата 2, відбивач 3, сітки 5, що є анодом і центральною частиною зовнішнього резонатора 4. Вся конструкція відбивального клістрона вакуумована.

Потік електронів, що вилетіли з катода під дією анодної напруги, пронизає сітки резонатора. При цьому в міжсітковому зазорі під дією ВЧ-поля відбувається модуляція електронів по швидкості. Швидкісна модуляція перетворюється в модуляцію по густині в просторі групування між вихідною сіткою резонатора і відбивачем.

Електронний потік повертається до сіток резонатора у вигляді послідовності згустків.

Генерація ВЧ-коливань відбувається за умови проходження резонатора згустками електронів у гальмуючу фазу ВЧ-поля. При цьому кінетична енергія електронів, одержувана ними від поля джерела анодної напруги, перетвориться в енергію ВЧ-коливань. Схема включення відбивального клістрона показана на рис.3.2.



1 - скляний корпус; 2 - електронна гармата; 3 - відбивач; 4 - зовнішній резонатор; 5 - сітки.

Рисунок 3.1 — Конструкція відбивального клістрона.

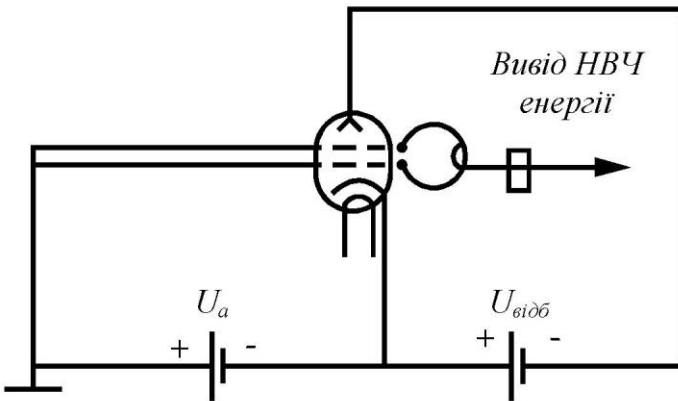


Рисунок 3.2 Схема включення відбивального клістрона

Принцип роботи відбивального клістрона можна усвідомити при розгляді діаграми руху електронів у просторі групування, зображеної на рис.3.3.

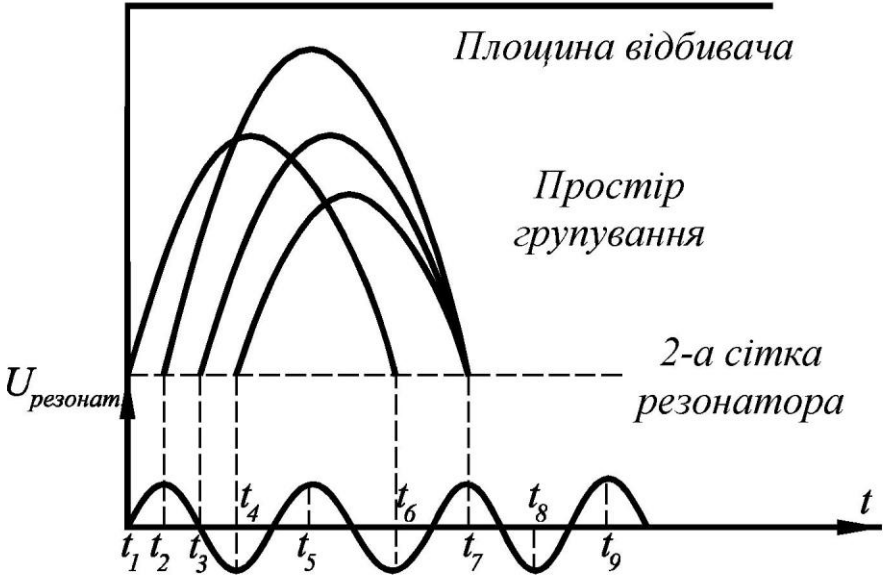


Рисунок 3.3 — Діаграма руху електронів у просторі групування відбивального клістрона

Розглянемо рух електронів, що вилетіли з об'ємного резонатора в простір групування в різні моменти часу. Електрони, що вилетіли в момент часу  $t_2$ , одержують додаткове прискорення за рахунок ВЧ-поля, що діє між сітками об'ємного резонатора. Тому вони мають найбільшу швидкість і підлітають ближче до відбивача в порівнянні з іншими електронами. В міру руху електронів у гальмуючому полі, що діє між об'ємним резонатором і відбивачем, їхня швидкість зменшується, і вони повертаються до резонатора в момент часу  $t_7$ . Електрони, що вилетіли з об'ємного резонатора в момент часу  $t_3$ , не відчують додаткового прискорення за рахунок ВЧ-поля. Ці електрони віддаляються від об'ємного резонатора на меншу відстань і знаходяться у просторі угруповання менший час, а потім також повертаються до об'ємного резонатора в момент часу  $t_7$ .

Електрони, що вилетіли з об'ємного резонатора в момент часу  $t_4$ , мають мінімальну швидкість. Отже, вони будуть у просторі групування найменший час (в порівнянні з іншими електронами) і також повернуться до об'ємного резонатора в момент часу  $t_7$ .

Проте не всі електрони, що пролетіли через резонатор, беруть участь у процесі угруповання. Наприклад, електрони, що вилітають у момент часу  $t_1$ , не групуються з електронами, що вилітають в інші моменти часу.

Незатухаючі коливання в об'ємному резонаторі будуть існувати тільки в тих випадках, коли згустки електронів, що повертаються з простору групування, віддають свою енергію полю резонатора. Інакше кажучи, поле об'ємного резонатора повинно бути для них гальмуєчим (на рис. 3.3 такими моментами часу є  $t_5$ ,  $t_7$ ,  $t_9$ .)

Час перебування електронів у просторі групування, а отже, у момент часу, у який сформовані згустки електронів пролітають через резонатор, залежать від розміру негативної напруги на відбивачі. В розглянутому випадку напруга на відбивачі вибрана так, що згустки повертаються до об'ємного резонатора в момент часу  $t_7$ . При збільшенні негативної напруги на відбивачі можна домогтися того, що згустки електронів будуть повертатися до об'ємного резонатора в момент часу  $t_5$ . При зменшенні напруги на відбивачі електронні згустки можуть повернутися до об'ємного резонатора в момент часу  $t_9$  і при цьому також будуть виконуватися умови самозбудження клістронів. Отже, ВЧ-коливання у відбивальному клістріні виникають не при одній напрузі на відбивачі, а при декількох.

Аналіз умови генерації клістрона показує, що ВЧ-коливання можливі в порівняно вузьких діапазонах зміни напруги відбивача. Ці діапазони одержали назву зон або областей генерації. Положення максимумів зон генерації визначається з такого співвідношення:

$$2\pi(n + \frac{3}{4}) = \omega D \frac{\sqrt{8 \frac{m}{e} U_a}}{U_a + |U_{відб}|} \quad (3.1)$$

де  $2\pi(n+3/4)$  – кут прольоту в просторі групування;

$n = 0,1,3\dots$  – кількість періодів ВЧ-напруги, протягом якого згусток електронів проходить від резонатора до відбивача й обернено ;

$\omega$  – частота коливань;  
 $D$  – відстань від центру резонатора до відбивача;  
 $m, e$  – відповідно маса і заряд електрона;  
 $U_a$  – анодна напруга;  
 $U_{відб}$  – напруга відбивача.

Залежність частоти і потужності ВЧ-коливань від параметрів живлення можна знайти з наступних рівнянь:

$\Sigma G = 0$  – рівняння потужності;  $\Sigma B = 0$  – рівняння частоти,  
 де  $G$  й  $B$  активні і реактивні складові провідності еквівалентної схеми.

Вважаючи параметри резонансної системи і приєднуваного до неї навантаження відомими, одержуємо:

$$P = -U_a I_a \left[ \frac{\text{sh}\varphi}{\varphi} \cdot 2XI_1(X) \right]; \quad (3.2)$$

$$f = f_0 \left( 1 + \frac{\text{ctg}\varphi}{2Q_H} \right), \quad (3.3)$$

де  $I_a$  – анодний струм;  
 $\varphi$  – кут прольоту в просторі групування, рівний  $2\pi(n+3/4)$ ;  
 $X$  – параметр групування;  
 $I_1$  – функція Бесселя I роду;  
 $f_0$  – власна частота резонатора;  
 $Q_H$  – навантажена добротність резонатора.

З урахуванням залежності кута прольоту  $\varphi$  від напруги відбивача  $U_{відб}$ , вираження (3.2) і (3.3) можна навести в наступному вигляді:

$$P = I_a U_a \frac{\cos \left[ \frac{2\pi(n + 3/4)\delta U_{відб}}{(U_a + |U_{відб}|)} \right]}{\pi(n + 3/4)} XI_1(X) \quad (3.4)$$

$$f = f_0 \left\{ 1 - \left( \frac{1}{2Q_H} \right) \operatorname{tg} \left[ \frac{2\pi(n + 3/4)}{U_a + |U_{\text{відб}}|} \delta U_{\text{відб}} \right] \right\} \quad (3.5)$$

де  $\delta U_{\text{відб}}$  відхилення напруги відбивача від  $U_{\text{відб.п}}$ .

Залежність генеруємої потужності і частоти від напруги відбивача при незмінній нарузі на резонаторі і постійному навантаженні показана на рис.3.4.

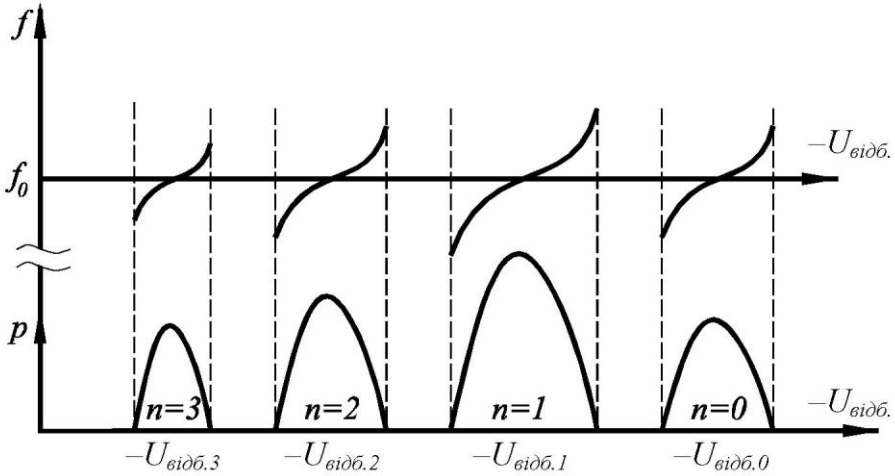


Рисунок 3.4 — Залежність потужності і частоти від напруги відбивача в різних зонах генерації клістрона

Потужність, що виділяється в навантаженні клістрона, не для всіх зон генерації однакова. Це пояснюється наступними причинами. При великій негативній нарузі на відбивачі час перебування електронів у просторі групування настільки малий, що вони не встигають сформуватися в густі згустки, унаслідок чого зменшуються генеруєма потужність і ККД. При малій негативній нарузі відбивача частина електронів, що мали великий запас кінетичної енергії, долітає до відбивача і, вдаряючись об нього, втрачають енергію, внаслідок чого потужність генерованих коливань також зменшується.

Слід зазначити, що при зміні напруги на відбивачі потужність, що виділяється в навантаженні клістрона, не залишається постійною, а зменшується. Пояснюється це тим, що електронні згустки проходять у цьому випадку через сітки об'ємного резонатора в ті моменти часу, коли гальмуюче ВЧ-поле в ньому відрізняється від максимального значення. Електрони відчують менше гальмування при взаємодії з ВЧ-полем резонатора і віддають меншу частину своєї кінетичної енергії.

Частота генерованих коливань відповідно до вираження (3.5) визначається власною частотою резонатора  $f_0$  і напругою відбивача  $U_{\text{відб}}$ .

Власна частота резонатора  $f_0$  може змінюватися механічним засобом.

Зміна частоти в межах зони генерації від напруги відбивача називається електронним настроюванням. Діапазон електронного настроювання  $\delta f_{\text{эл}}$  – зміна частоти генерованих коливань у межах половинної потужності (рис.3.5). Крутизна електронного настроювання  $K_{\text{эл}}$  пов'язана з параметрами резонатора наступним співвідношенням, МГц/В:

$$K_{\text{эл}} = \frac{\partial f}{\partial U_{\text{отр}}} = - \frac{f_0 \pi (n + \frac{3}{4})}{Q_H (U_a + |U_{\text{отр}}|)} \quad (3.6)$$

де  $Q_H$  – добротність резонатора клістрона;  
 $f_0$  – власна частота резонатора.

Вихідна потужність клістрона залежить від навантаження. Існує визначене для даного клістрона значення навантаження, при якому вихідна потужність досягає максимуму. Це навантаження називають оптимальним.



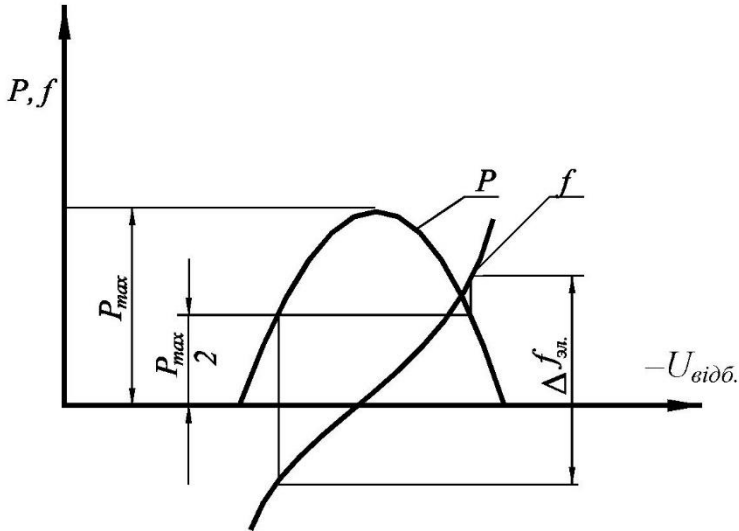


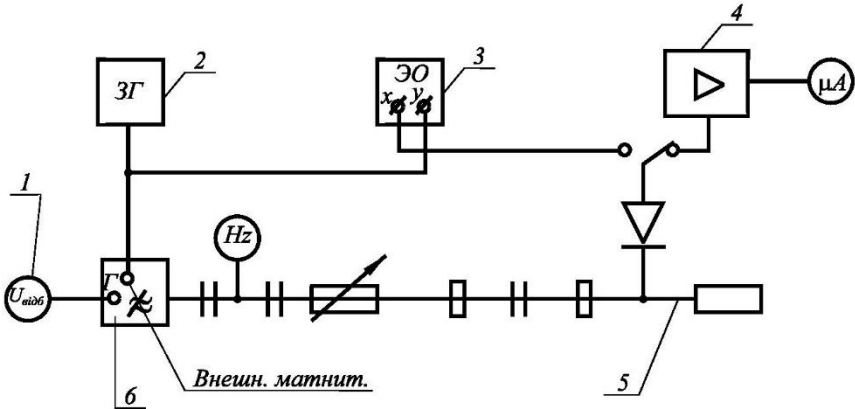
Рисунок 3.5 — Визначення діапазону електронного настроювання

### 3.2 Лабораторне завдання

- 3.2.1. Вивчити конструкцію і принцип роботи відбивального клістрона.
- 3.2.2. Провести дослідження залежності генерованої потужності і частоти від напруги відбивача.
- 3.2.3. Визначити межі електронного настроювання.
- 3.2.4. Розрахувати крутизну електронного настроювання.

### 3.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується на експериментальній установці, схема якої показана на рис.3.6.



1 – вольтметр для виміру напруги відбивача; 2 – генератор звукової частоти; 3 – осцилограф; 4 – вимірювальний підсилювач; 5 – детекторна голівка; 6 – генератор НВЧ.

Рисунок 3.6 — Схема лабораторної установки для дослідження характеристик відбивального кілістрона:

Об'єктом дослідження є кілістрон 3-см діапазону, що входить до складу стандартного генератора (ГЗ-14 А).

### 3.4 Порядок виконання роботи

3.4.1. Ознайомитися з апаратурою, що служить для виконання роботи. Включити апаратуру в мережу і дати їй прогрітися протягом 15 хв.

3.4.2. Налаштувати генератор НВЧ на частоту, задану викладачем. Для цього перемикач «Род работы» встановити в положення «Непрер.» (безупинна генерація). Ручкою «Частота» установити необхідне значення частоти. При цьому скористатися таблицею «Частоти генератора», поміщеної на панелі приладу (груба установка частоти). Налаштувати генератор на максимум вихідної потужності. Для цього поставити тумблер "Волномер-Термистор" у положення "Термистор". Ручками "Установка нуля" встановити стрілку приладу-індикатора, розташованого на передній панелі, на середину шкали. Ручками "Отражатель" і "Корекция" домогтися максимальних показань приладу індикатора. При зашкалюванні приладу-індикатора зменшити його чутливість ручками "Установка нуля". Встановити лимб хвилеміра на необхідний ділення відповідно до заданої частоти і градуировочному графіка хвилеміра. Ручку "Чувствительность волномера" повернути вправо до відмови. Ручками "Частота" і "Отражатель" підстроїти частоту генератора по максимуму показання приладу-індикатора (точна установка частота), не допускаючи при цьому його зашкалювання (ручкою "Чувствительность волномера").

3.4.3. Виміряти осцилографічним методом діапазон електронного настроювання. Для цього перемикач "Род работы" поставити в положення "Внешн. манип.". Подати на вхід "Внешн. манип." напругу від генератора низької частоти амплітудою порядку 30 В та частотою порядку 4000 Гц. Цю ж напругу подати на вхід "х", осцилографа. Приєднати вихід детекторної голівки до входу "У" осцилографа. Одержати зображення зон генерації на екрані осцилографа, а також мітку частоти в центрі зони. Ручками "Аттенуаторы вихода" установити зручний для спостереження розмір зон генерації (100 мм). Переміщуючи мітку хвилеміра по зоні генерації обертанням ручки "Волномер" визначити діапазон електронного настроювання, міряючи частоту генерації клістрона на рівні половинної потужності. При визначенні частоти користуватися градуировочним графіком хвилеміра.

3.4.4. Зняти залежність генеруємої потужності і частоти від напруги відбивача. Для цього перемикач "Род работы" поставити в положення "Непрер.". Приєднати вихід детекторної голівки до входу вимірювального підсилювача. Ручками "Аттенюаторы выхода" установити такий рівень потужності, щоб показання індикатора вимірювального підсилювача залишалися в межах шкали в центрі зони генерації з найбільшою генеруємою потужністю. Змінюючи напругу відбивача ручкою "Отражатель", зняти залежність генеруємої потужності і частоти, від напруги відбивача. Вимір частоти робити хвилеміром з використанням градуїровочного графіка. Відлік потужності вести у відносних одиницях по індикатору вимірювального підсилювача. Результати вимірів звести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 — Експериментальні результати

N	20	40	60	80	max	80	60	40	20
U <sub>відб.</sub> , В									
$\alpha$									
f, МГц									

N – показання індикатора вимірювального підсилювача;

$\alpha$  – показання хвилеміра.

3.4.5. Побудувати графік залежності  $\frac{N}{N_{\max}} = f(U_{\text{відб}})$  и  $f = f(U_{\text{відб}})$ . Визначити за графіком діапазон електронного настроювання і порівняти його з результатом, отриманим осцилографічним методом. Розрахувати крутизну електронного

настроювання, МГц/В:  $K_{\text{эл}} = \frac{\Delta f}{\Delta U_{\text{відб}}}$ .

### 3.5 Зміст звіту

Звіт повинний містити: назву і мету роботи; стислі теоретичні відомості; схему установки; результати вимірів, зведені в таблицю,

графіки залежностей  $\frac{N}{N_{\max}} = f(U_{\text{omp}})$ ,  $f = f(U_{\text{omp}})$  побудовані за даними експерименту; висновки по проробленій роботі.

### 3.6 Контрольні запитання

3.6.1. Призначення відбивального клістрона.

3.6.2. Конструкція відбивального клістрона.

3.6.3. Пояснити процес модуляції електронів, по швидкості і щільності. 3.6.4. Пояснити існування зон генерації.

3.6.5. Пояснити залежність потужності генерації від напруги відбивача.

3.6.6. Що таке електронне настроювання?

3.6.7. Дати визначення діапазону електронного настроювання.

3.6.8. Дати визначення крутизни електронного настроювання.

3.6.9. Яким засобом можливо перестроювати частоту коливань клістронного генератора?

3.6.10. Пояснити залежність частоти коливань від напруги відбивача.

3.6.11. Які резонатори використовуються у відбивальних клістронах?

### Література:

[2] с. 254 – 261; [6] с. 45 – 61; [7] с.37 – 44.

## Лабораторна робота № 4

**ОБ'ЄМНИЙ РЕЗОНАТОР**

Мета роботи — вивчити конструкції та засвоїти методику вимірювань параметрів об'ємних резонаторів.

Студент повинен знати:

- призначення та головні параметри об'ємних резонаторів;
- особливості конструкцій резонаторів на коаксіальних, хвилевідних та смужкових лініях передач;
- вплив покриття та чистоти обробки поверхні резонатора на його добротність;
- способи зменшення впливу температури навколишнього середовища на резонансну частоту резонатора
- конструкції елементів зв'язку резонаторів із зовнішніми мережами.

Студент повинен вміти:

- розрахувати резонансну частоту (довжину хвилі) на заданому типі коливань за відомими геометричними розмірами резонатора;
- визначити особисту добротність резонатора;
- оцінити погрішності результатів вимірів.

**4.1 Загальні відомості**

Електромагнітна коливальна система, що являє собою замкнутий об'єм з провідними стінками, носить назву об'ємного резонатора.

У техніці НВЧ об'ємні резонатори є аналогами коливальних контурів у низькочастотній радіотехніці і використовуються як коливальні системи електронних пристроїв (клістронів, магнетронів), хвилемірів, генераторів НВЧ, у фільтрах різноманітного призначення.

Конструктору, що проектує резонатори, слід враховувати, що у діапазоні НВЧ неможливо створити коливальні системи на зосереджених елементах, які мали б необхідні резонансні якості й малі втрати, тому в цьому діапазоні використовуються системи на розподілених параметрах. У якості резонатора можуть використовуватися відрізки довгих ліній (коаксіальні, хвилевідні, смужкові) довжиною, яка дорівнює цілому числу напівхвиль.

Основною перевагою резонаторів у порівнянні з контурами на зосереджених елементах є відсутність втрат на випромінювання, завдяки повному екрануванню електромагнітного поля стінками резонатора. Теплові втрати у металевих стінках також значно менші, ніж у провідниках звичайних контурів, завдяки великій внутрішній поверхні, якою протікають високочастотні струми.

Для характеристики резонатора доцільно вибирати такі параметри, які могли б безпосередньо вимірюватися. Такими параметрами є:

- резонансна частота  $f_{рез}$  - частота, на якій амплітуда коливань досягає найбільшого значення;
- активна провідність  $G$  (є мірою активних втрат);
- особиста або ненавантажена добротність резонатора  $Q_0$ .

Особиста добротність резонатора визначається:

$$Q_0 = 2\pi \frac{W_3}{(W_{ВТРАТ})_T}, \quad (4.1)$$

де  $W_3$  - енергія, запасена у резонаторі;  
 $(W_{ВТРАТ})_T$  - енергія, яка втрачається в резонаторі за один період.

Особисту добротність резонатора можна приблизно розрахувати за формулою:

$$Q_0 = \frac{2V}{dS}, \quad (4.2)$$

де  $V$  - об'єм резонатора, м<sup>3</sup>;  
 $S$  - площа резонатора, м<sup>2</sup>;  
 $d$  - глибина скін-шару, м.

Оскільки лінійні розміри резонатора пропорційні робочій довжині хвилі  $\lambda$ , то можна вважати  $V \sim \lambda^3$ ,  $S \sim \lambda^2$  і з точністю до постійного множника вважати:

$$Q_0 \cong \frac{\lambda}{d}. \quad (4.3)$$

Якщо як матеріал стінок резонатора використовується метал, який є гарним провідником, наприклад срібло, неважко визначити, що в НВЧ діапазоні глибина скін-шару складає доли мікрон, а значення особистої добротності  $104 \div 105$ . Високе значення  $Q_0$  є важливою перевагою об'ємних резонаторів.

На практиці об'ємні резонатори використовуються у поєднанні з навантаженням. Добротність резонаторів з урахуванням усіх навантажень називається навантаженою добротністю  $Q_H$ :

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ZH}} \quad (4.4)$$

де  $Q_{ZH}$  зовнішня добротність - характеризує втрати енергії у приєднаних навантажень.

Конструкції резонаторів можна розділити на основні типи:

- резонатори на відрізках коаксіальних ліній;
- резонатори на відрізках хвилеводів;
- резонатори на відрізках смужкових ліній;
- діелектричні резонатори.

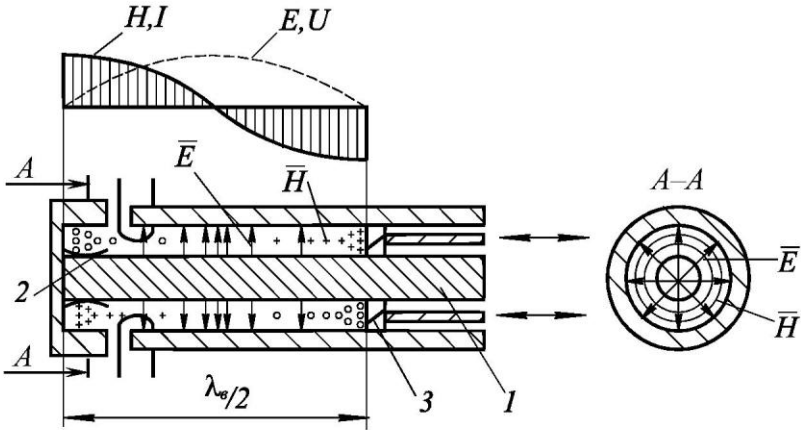
#### **4.1.1 Конструкція резонаторів на відрізках коаксіальних ліній**

Резонатори на відрізках коаксіальних ліній можуть бути як напівхвильові, так і чвертьхвильові.

Конструкція напівхвильового коаксіального резонатора наведена на рис.4.1. Настроювання напівхвильового коаксіального резонатора відбувається переміщенням короткозамкненого поршня.

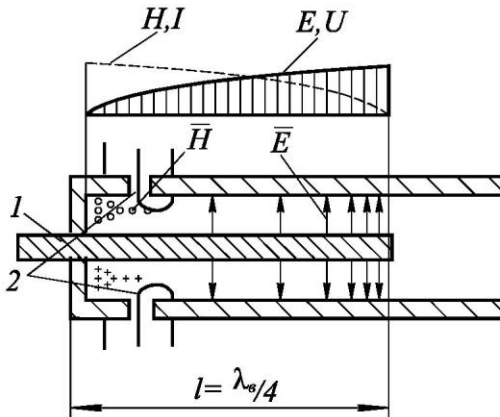
Конструкція чвертьхвильового коаксіального резонатора наведена на рис.4.2. Для усунення випромінювання енергії з відкритого кінця резонатора зовнішня труба виконується довшою внутрішнього стержня. Механічне настроювання частоти здійснюється зміною довжини внутрішнього стержня. Як видно з епюр поля у резонаторі, на короткозамкненому кінці резонатора знаходиться пучність (максимум), подовжнього ВЧ струму. Тому для забезпечення гарного електричного контакту між корпусом і внутрішнім стержнем використовуються пружисті контакти.





1- внутрішній провід; 2- петля зв'язку; 3- настроювальний поршень

Рисунок 4.1 — Напівхвильовий коаксіальний резонатор



1- внутрішній провід; 2- пружисті контакти

Рисунок 4.2 — Чвертьхвильовий коаксіальний резонатор

Напівхвильові і чвертьхвильові коаксіальні резонатори використовуються у резонансних хвилемірах у дециметровому і сантиметровому діапазонах.

З метою послаблення впливу температури на резонансну частоту резонатора, що використовується у хвилемірах, для їх

виготовлення використовують матеріал з низьким ТКЛР, наприклад інвар.

#### 4.1.2 Конструкції резонаторів на відрізках прямокутних і круглих хвилеводів

Ця група резонаторів являє собою відрізки прямокутних і круглих хвилеводів, замкнених з двох боків металевими стінками. У прямокутному резонаторі можуть існувати коливання  $H_{mnp}$  и  $E_{mnp}$  типів. Резонансна довжина хвилі вказаних типів для повітряного заповнення визначається:

$$(\lambda_{PE3})_{mnp} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}} \quad (4.5)$$

де  $a, b, l$  - розміри резонатора;  $m, n, p$  - число напівхвиль, які вкладаються вдовж стінок  $a, b, l$  відповідно.

Основним типом коливань у прямокутному резонаторі є коливання типу  $H_{101}$ . Цей тип коливань має найбільше значення резонансної довжини хвилі при заданих розмірах резонатора. На практиці одержали широке розповсюдження більш прості у конструктивно-технологічному виконанні циліндричні резонатори.

Конструктору важливо знати, як будуть змінюватись параметри резонатори при наявності щілин та отворів у його стінках. У випадку, якщо вони спрямовані вздовж ліній струму, який протікає по стінках резонатора то випромінювання енергії НВЧ коливань будуть незначними і добротність практично не зменшиться.

Стан робочої поверхні резонатора значною мірою визначає його добротність.

Якщо висота мікронерівностей більш глибини скін-шару, то це приводить до підвищення поверхневого опору за рахунок подовження шляху протікання НВЧ струмів і, таким чином, до зниження добротності. Тому при виготовленні високодобротних резонаторів робочу поверхню покривають матеріалом з високою провідністю, а потім проводять електроіскрову або електрохімічну поліровку, при цьому висота мікронерівностей повинна бути меншою за глибину скін-шару ( $R_{MAX} < d/2$ ).

### 4.1.3 Конструкції смужкових резонаторів

Смужкові резонатори являють собою відрізки смужкової мережі передачі довжиною  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  або  $\lambda$ , розімкнені або короткозамкнені на кінцях.

Короткозамкнений резонатор має більш високу добротність і значно меншим кінцевим випроміненням у порівнянні з розімкненим, однак необхідність заземлення ускладнює технологічний процес його виготовлення.

### 4.1.4. Конструкції діелектричних резонаторів

Діелектричні резонатори мають форму паралелепіпеда, стержня або сфери з діелектрика чи фериту з високим значенням діелектричної проникливості. Принцип дії діелектричного резонатора заснований на явищі повного внутрішнього відбиття від межі розділу діелектрик – повітря. При цьому електричне поле концентрується в межах резонатора і втрати на випромінювання незначні.

У порівнянні з коаксіальними і хвилевидними діелектричні резонатори мають значно менші габарити при однакових значеннях добротності.

Широке використання знаходять об'ємні резонатори з монокристалів залізо-ітрійового ферит-граната (ЗІГ), що мають форму сфери. Резонатори на ЗІГ кристалах мають вузьку резонансну характеристику і високу добротність при малих геометричних розмірах. Особиста частота коливаль у фериті зв'язана лінійною залежністю з напруженістю поля підмагнічування, що дозволяє здійснити електричне настроювання частоти резонатора.

Смужкові і діелектричні резонатори використовуються в інтегральних мікросхемах НВЧ фільтрів, підсилювачів, генераторів.

### 4.1.5 Конструкції елементів зв'язку резонаторів із зовнішніми колами

Для введення електромагнітної енергії в резонатор і для виведення її з резонатора служать елементи зв'язку. Розрізняють наступні види зв'язку:

- електричний (штирком або зондом);
- магнітний (витком або петлею);
- дифракційний (через отвір).

При електричному зв'язку (рис.4.3) зонд вводиться у пучність електричного поля так, щоб його вісь співпадала з напрямком електричних силових ліній.

При магнітному зв'язку (рис.4.4) виток вводиться в пучність магнітного поля так, щоб його плоскість була перпендикулярна до магнітних силових ліній.

Дифракційний зв'язок використовується в короткохвильовій частині НВЧ діапазону, коли зовнішнім колом є хвильовод. Хвильовод повинен бути так орієнтований відносно резонатора, щоб напрямлення полів в галузі отвору зв'язку й резонатора співпадали.

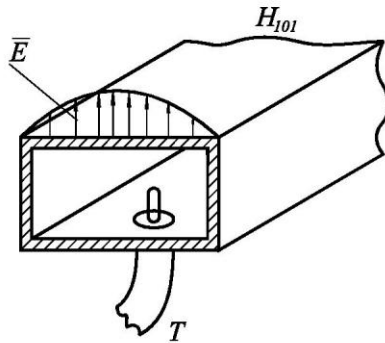


Рисунок 4.3 – Електричний зв'язок резонатора з зовнішнім колом

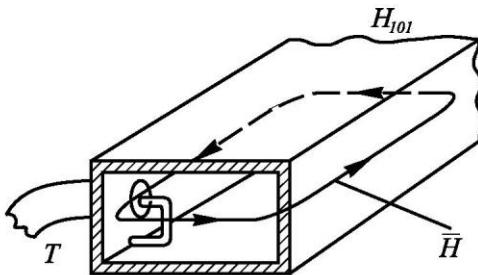


Рисунок 4.4 – Магнітний зв'язок резонатора з зовнішнім колом

## 4.2 Лабораторне завдання

4.2.1 Вивчити конструкції резонаторів на відрізках ліній передачі.

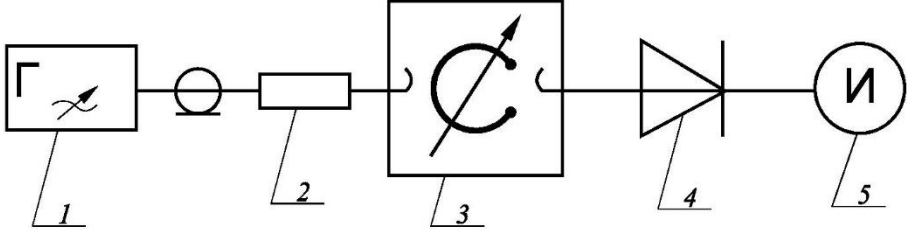
4.2.2 Ознайомитися з апаратурою, що входить у склад лабораторної установки.

4.2.3. Визначити навантажену добротність резонатора, що досліджується, для трьох значень резонансної частоти

4.2.4. Оцінити погрішності результатів вимірів.

### 4.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконується на експериментальній установці, схема якої наведена на рис.4.5.



1 - генератор НВЧ; 2 - розв'язуючий атенуатор; 3 - резонатор, що досліджується; 4 - детекторна голівка; 5 - індикатор.

Рисунок 4.5 – Схема установки для вимірювання навантаженої добротності

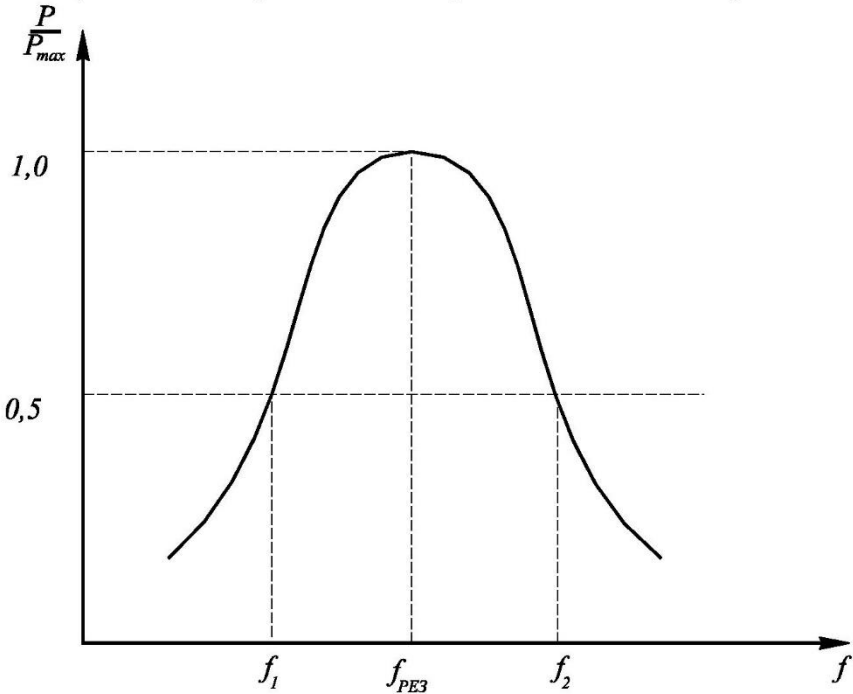


Рисунок 4.6 – Визначення навантаженої добротності резонатора

До складу установки входять: генератор НВЧ, роз'язуючий атенуатор, резонатор, що досліджується, детекторна голівка, індикатор. Резонатор, що досліджується, включений за схемою чотирьохполосника, тобто має два елемента зв'язку із зовнішніми мережами.

#### 4.4 Порядок виконання роботи

4.4.1 Зібрати лабораторну установку для вимірювання навантаженої добротності резонатора, що досліджується відповідно схеми, і рис.4.5.

4.4.2 Включити генератор у мережу 220 В, 50 Гц і дати йому прогрітися протягом 5 хвилин.

4.4.3 Встановити на шкалі генератора 1 задане значення резонансної частоти й, налагоджуючи резонатор 3, що досліджується, досягти максимальних показників індикатора 5. Змінюючи рівень вихідної потужності з допомогою атенуатора, встановити такий рівень сигналу, при якому показник індикатора 5 відповідав би граничному значенню.

4.4.4. Визначити погрішність вимірів резонансної частоти за виразом

$$\Delta f_{PEZ} = \delta f_{PEZ} \cdot f_{PEZ}$$

де  $\delta f_{PEZ} = \delta f_{ГЕН}$

$\delta f_{ГЕН} = +0,5\%$  — основна погрішність установки частоти за шкалою приладу (визначається з технічного опису на даний тип генератора).

4.4.5 Змінюючи частоту генератора, визначити значення частот  $f_1$  і  $f_2$  (рис.4.6) при яких показники індикатора 5 зменшуються у два рази у порівнянні зі значенням на резонансній частоті. Визначити смужку полоси пропускання резонатора, що досліджується за виразом:

$$2\Delta f = f_2 - f_1$$

4.4.6 Оцінити погрішність вимірів смужки пропускання резонатора, що досліджується в уявленні, що коефіцієнт кореляції між погрішностями  $\delta f_1$  та  $\delta f_2$  дорівнює одиниці за виразом:

$$\Delta(\Delta f_1) = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} \Delta f_1\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \Delta f_2\right)^2} - \frac{1}{2} \Delta f_1 \Delta f_2$$

де  $\delta f_i = \delta f_i \cdot f_i$ ;  $\delta f_i = \delta f_{i\text{ГЕН}}$

$\delta f_{i\text{ГЕН}} = +0,5\%$  — основна погрішність установки частоти за шкалою генератора,

4.4.7. Розрахувати навантажену добротність резонатора, що досліджується за виразом:

$$Q_H = \frac{f_{PE3}}{2\Delta f}$$

4.4.8. Оцінити погрішність непрямого вимірювання навантаженої добротності за виразом:

$$\Delta Q_H = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q_H}{\partial f_{PE3}} \cdot \Delta f_{PE3}\right)^2 + \left[\frac{\partial Q_H}{\partial (\Delta f)} \cdot \Delta(\Delta f)\right]^2} + 2\rho \frac{\partial Q_H}{\partial f_{PE3}} \cdot \frac{\partial Q_H}{\partial (\Delta f)} \cdot \Delta f_{PE3} \cdot \Delta(\Delta f)$$

де  $\rho=1$

## 4.5 Зміст звіту

Звіт повинен мати: назву й мету роботи; короткі теоретичні відомості;

- схему установки; результати вимірів; результати вимірів у вигляді:

$$P = ZP \pm PB, \text{ де}$$

P - умовне позначення параметру;

ZP - значення параметру;

PB - погрішність вимірювання.

- висновки про виконану роботу.



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та  
електротехніки**

**ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ  
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ  
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» та  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

освітньо-професійної програми «Біомедична інженерія»  
денної або заочної форми навчання та освітньо-професійної  
програми «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка» денної або заочної форми навчання

Укладачі:

Косуліна Н. Г., Коршунов К. С., Чорна М. О., Сухін В. В.

План 2021 р.

Підп. до друку 02.02.2022 р. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Папір офсет.

Друк. цифровий. Гарнитура Bookman Old Style. Ум. друк. лист.  
3.

Наклад 50 прим. Зам. № 11/02/2023.