

**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**  
**Навчально-науковий інститут високих технологій**  
**Кафедра фізики високих технологій та електроніки**



## **НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**до лабораторної роботи**

**«Вимірювальна лінія»**

**з курсу**

**«Мікрохвильові телекомунікаційні технології»,**

**практикум**

**«Техніка та електроніка НВЧ»**

Київ – 2025

УДК 537.8; 621.37/.39  
ББК 31.22, 32

Рецензент

доцент, канд.фіз.-мат.наук. А.Г. Шкавро

*Рекомендовано до друку вченою радою  
навчально-наукового інституту високих технологій  
(протокол № 12 від 29 травня 2025 року)*

**Малишев В.Ю.**

Навчально-методичні матеріали до лабораторної роботи «Вимірювальна лінія» з курсу «Мікрохвильові телекомунікаційні технології», практикум «Техніка та електроніка НВЧ». – К.: Навчально-науковий інститут високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2025. – 34 с.

Навчально-методичні матеріали містять опис лабораторної роботи «Вимірювальна лінія» з лабораторного практикуму «Фізика та техніка низьких температур», який входить до навчального курсу «Техніка та електроніка НВЧ». Наведено теоретичні відомості за тематикою лабораторної роботи, поради щодо виконання роботи, перелік рекомендованої літератури та список контрольних питань.

Для студентів та викладачів радіофізичних, фізичних та фізико-технічних факультетів/інститутів закладів вищої освіти.

УДК 537.8; 621.37/.39  
ББК 31.22, 32

© Малишев В.Ю., 2025  
© Навчально-науковий інститут високих технологій  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка, 2025

## **Лабораторна робота.**

### ***ВИМІРЮВАЛЬНА ЛІНІЯ***

#### **Мета роботи:**

1. Вивчити роботу вимірювальної лінії.
2. Вимірювання імпедансів НВЧ елементів за допомогою генератора та вимірювальної лінії.

#### **Методика роботи:**

1. Ознайомитися з конструкцією вимірювальної лінії.
2. Вивчити фізичні основи роботи вимірювальної лінії.
3. Ознайомитися з особливостями використання вимірювальної лінії.
4. Оволодіти методами вимірювання фізичних величин за допомогою вимірювальної лінії.
5. Ознайомитися з методикою вимірювання КСХ та повних опорів НВЧ елементів за допомогою вимірювальної лінії.
6. Скласти блок-схему експериментальної установки та ознайомитися з описами приладів.
7. Виміряти КСХ та повний опір НВЧ тракту з хвилеводно-коаксialьним переходом при різних положеннях ручки НВЧ атенюатора.

#### **Поради:**

1. Вивчити технічні описи наявних реєстраційних та регулювальних приладів (вольтметри, амперметри, мультиметри, атенюатори, ватметри), ввімкнути їх. Проаналізувати та оцінити абсолютні та відносні похибки цих приладів з метою визначення їх придатності для отримання експериментальних даних.
2. Опанувати методи та методики вимірювання фізичних величин мікрохвильової техніки.

## **Примітка:**

Вимірювальна лінія оснащена мікрогвинтами з розміткою для прецизійних переміщень зонда. Його значне занурення в середину призводить до спотворення конфігурації електромагнітного поля в середині.

## **Необхідне обладнання лабораторної роботи:**

1. генератор;
2. феритовий вентиль;
3. вимірювальна лінія Р1-28;
4. досліджуване навантаження;
5. узгоджувальне навантаження;
6. рухлива короткозамкнена нагрузка НКП-7;
7. Ватметр МЗ-10А;
8. Термісторна головка М5-42;
9. вимірювальний прибор (міліамперметр).

## **Форма звітності:**

Протокол лабораторної роботи оформлюється в установленому порядку особисто кожним студентом. В ньому потрібно привести:

1. Стислий конспект теоретичної частини роботи з відповідями на контрольні питання та схему експериментальної установки із зазначенням використаного обладнання.
2. Основні експериментальні результати лабораторної роботи як у вигляді таблиць, так і у вигляді графіків. Мають бути визначені похибки вимірів (абсолютна, відносна, за методом найменших квадратів). Остаточну величину записати у вигляді  $A = A \pm \Delta A$  [одиниці вимірювання]. Отримані результати порівняти з даними, наведеними в літературі.
3. Висновок про проведену роботу.

## **Основна література:**

1. Мелков Г.А., Прокопенко О.В. Вибрані розділи з курсу «Мікрохвильова електродинаміка та електроніка». – К.: Радіофізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2013. – 226 с.
2. Чернишов П.М., Самсонов В.П., Чернишов М.П. Технічна електродинаміка. – Х.: Прапор, 2006. – 428 с.
3. Шокало В.М., Правда В.І., Усін В.А., Вунтесмері В.С., Грецьких Д.В. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Основи теорії електромагнітного поля. під ред. Шокало В.М. та Правди В.І. – Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2009. – 286 с.
4. Москалюк В.О., Саурова Т. А. Теорія поля – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с.
5. Тимофеев В.І. Мікрохвильова техніка. Електронні кола надвисоких частот. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 231 с.
6. Соколов С.В., Писаренко Л.Д., Журба В.О. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ, за заг. ред. Воробйова Г.С. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 393 с. ISBN 978-966-657-339-4
7. Татарчук Д.Д., Діденко Ю.В., Поплавко Ю.М. Мікрохвильова електроніка. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 216 с.

## **Додаткова література:**

1. Tamer Becherrawy Electromagnetism: Maxwell Equations, Wave Propagation and Emission. – John Wiley & Sons, Inc, 2012. – 562 p.
2. Masud Chaichian, Ioan Merches, Daniel Radu, Anca Tureanu Electrodynamics: An Intensive Course. – Springer, 2016. – 675 p.
3. Bahl I. J. Lumped elements for RF and microwave circuits – Artech house, 2003. – 505 p.
4. Michael Steer Microwave and RF Design: transmission lines. Volume 2 – Third edition. – NC State University, 2019. – 304 p.
5. Захарія Й. А. Методи прикладної електродинаміки. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 352 с.
6. John David Jackson Classical Electrodynamics. – John Wiley & Sons, Inc, 1992. – 656 p.

## Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. [www.iec.ch](http://www.iec.ch) – Міжнародна електротехнічна комісія.
2. [www.itu.int](http://www.itu.int) – Міжнародний союз з телекомунікацій.
3. [www.cenelec.org](http://www.cenelec.org) – Європейський комітет стандартизації в області електротехніки.
4. [www.nbuv.gov.ua](http://www.nbuv.gov.ua) – Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського
5. [library.knu.ua/](http://library.knu.ua/) – Наукова бібліотека ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка
6. [www.library.kpi.ua/](http://www.library.kpi.ua/) – Науково-технічна бібліотека ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
7. [www.ied.org.ua](http://www.ied.org.ua) – Інститут електродинаміки Національної академії наук України.
8. [www.ire.kharkov.ua](http://www.ire.kharkov.ua) – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Ускова.
9. [www.nbuv.gov.ua/](http://www.nbuv.gov.ua/) – Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського.
10. [www.lib.zt.ua/](http://www.lib.zt.ua/) – Житомирська обласна універсальна наукова бібліотека ім. Олега Ольжича.
11. [www.lib.ztu.edu.ua/](http://www.lib.ztu.edu.ua/) – бібліотека Житомирського державного технологічного університету.
12. [www.akoninc.com](http://www.akoninc.com) – AKON, Inc, електронні пристрої з цифровим керуванням для діапазону частот 0,5...40 ГГц.
13. [www.minicircuits.com](http://www.minicircuits.com) – компанія Mini-Circuits, ВЧ та НВЧ пристрої.
14. [www.flann.com](http://www.flann.com) – Flann Microwave, антени, НВЧ пристрої, тестове та вимірювальне обладнання для діапазону частот 2...170 ГГц.
15. [www.etiworld.com](http://www.etiworld.com) – Electromagnetic Technologies Industries (ET Industries), компоненти та системи ВЧ та НВЧ діапазонів.
16. [www.eclipsemicrowave.com](http://www.eclipsemicrowave.com) – Eclipse Microwave, Inc , НВЧ компоненти.
17. [www.ditom.com](http://www.ditom.com) – DiTom Microwave, феритові пристрої для діапазону частот 250 МГц... 40 ГГц.
18. [www.aml-microtec.com](http://www.aml-microtec.com) – AML Microtechnique Lorraine, НВЧ пристрої та вироби для бортової авіаційної та космічної апаратури.
19. [www.barryind.com](http://www.barryind.com) – Barry Industries, пасивні електронні компоненти.
20. [www.datadelay.com](http://www.datadelay.com) – Data Delay Devices, Inc. (DDD), лінії затримки, генератори, помножувачі частоти, фільтри.
21. [www.emifiltercompany.com](http://www.emifiltercompany.com) – EMI Filter Company, фільтри.
22. [www.ionbeam milling.com](http://www.ionbeam milling.com) – Ion Beam Milling, прецизійні радіочастотні елементи.
23. [www.ums-gaas.com](http://www.ums-gaas.com) – United Monolithic Semiconductors, ВЧ та НВЧ мікросхеми.
24. [www.rogerscorp.com](http://www.rogerscorp.com) – Rogers Corporation, радіоматеріали.
25. [www.semiconductorenclosures.com](http://www.semiconductorenclosures.com) – Semiconductor Enclosures, Inc. (SEI), корпуси для НВЧ та оптоелектронних пристроїв, керамічні підложки, кристали на підложці.
26. [www.precidip.com](http://www.precidip.com) – PRECI-DIP, контакти та з'єднувачі.
27. [www.passiveplus.com](http://www.passiveplus.com) – Passive Plus Inc, НВЧ компоненти.
28. [www.coaxicom.com](http://www.coaxicom.com) – Coaxial Components Corporation (COAXICOM,

коаксіальні радіочастотні компоненти.

29. [www.diamondantenna.com](http://www.diamondantenna.com) – Diamond Antenna & Microwave Corporation, обертові зчленування.
30. [www.megaphase.com](http://www.megaphase.com) – MegaPhase, НВЧ та оптичні кабелі і роз'єми
31. [www.microtech-inc.com](http://www.microtech-inc.com) – Microtech, Inc., хвилеводи, хвилеводні пристрої.
32. [www.ni-microwavecomponents.com](http://www.ni-microwavecomponents.com) – National Instruments, вимірювальна апаратура, радіочастотні компоненти та пристрої.
33. [www.signalhound.com](http://www.signalhound.com) – Test Equipment Plus, тестове обладнання.

## Теоретичні відомості.

Розглянемо будову, принципи роботи вимірювальної лінії, і її складових частин. Крім того, порядок проведення вимірювань різних мікрохвильових характеристик із застосуванням різних необхідних методів та необхідних структурних схем.

У випадку однорідної довгої лінії еквівалентні струм  $I$  і напругу  $U$  в кожній точці лінії можна виразити у вигляді суми хвиль, які падають і відбиваються.

Відношення напруги відбитої хвилі до напруги хвилі, що падає, називають коефіцієнтом відбиття  $\Gamma$ , який в загальному випадку є величиною комплексною

$$\Gamma = \Gamma' + j\Gamma''$$

При цьому виконуються такі співвідношення:

$$Z_H = Z_{XB} \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (1.1)$$

$$\Gamma = \frac{Z_H - Z_{XB}}{Z_H + Z_{XB}}, \quad (1.2)$$

де  $Z_{XB}$  – хвильовий опір лінії передавання, який визначається як відношення амплітуд напруги й струму для суцільно біжучої хвилі;

$Z_H$  – опір навантаження, який у загальному випадку є величиною комплексною.

У випадку короткого замикання лінії ( $Z_H = 0$ ) коефіцієнт

відбиття дорівнює  $-1$ , а у випадку холостого ходу лінії ( $Z_H = \infty$ ) коефіцієнт відбиття дорівнює  $+1$ , при узгодженні відбита хвиля відсутня й коефіцієнт відбиття дорівнює нулю. Під режимом стоячої хвилі розуміють загальний випадок, для якого модуль коефіцієнта відбиття не рівний нулю. Слід наголосити, що коефіцієнт відбиття на вході ідеального чотириполюсника без втрат такого, що навантажений на навантаження з коефіцієнтом відбиття  $1$ , дорівнює теж одиниці.

Для напруги в кожному перерізі лінії передачі без втрат виконується таке співвідношення

$$|U| = |U_{\text{пад}}| \sqrt{1 + 2|\Gamma| \cos(\varphi - 2\beta z) + |\Gamma|^2}, \quad (1.3)$$

де  $\varphi$  – фаза коефіцієнта відбиття;

$\beta = 2\pi/\Lambda$  – фазова стала;

$\Lambda$  – довжина хвилі в хвилеводі.

Цей вираз визначає розподіл амплітуди напруги вздовж лінії передачі в загальному випадку стоячої хвилі. Останній вираз дозволяє зробити декілька висновків щодо властивостей стоячої хвилі в лінії без втрат.

1. Відстань між сусідніми максимумами стоячої хвилі складає  $\Lambda/2$ . Цей висновок істинний також щодо сусідніх мінімумів.

2. У точці максимуму стоячої хвилі напруги розташований мінімум стоячої хвилі струму, і навпаки.

3. В екстремумах стоячої хвилі напруга і струм синфазні, це означає, що опір у цих точках має суто дійсний характер.

4. Залежність для випадку  $|\Gamma| = 1$  носить характер модуля синусоїдальної функції. У загальному випадку розподіл напруги вздовж лінії передачі має несинусоїдальний характер.

5. Мінімуми стоячої хвилі гостріші за максимумами.

Перша властивість дозволяє вимірювати довжину хвилі в лінії передачі, яка дорівнює подвоєній відстані між сусідніми максимумами чи мінімумами. Четверта та п'ята властивості обумовлюють доцільність вимірів відстані між мінімумами в режимі короткого замикання. Четверта властивість

використовується при градуванні вимірювальної лінії.

Безпосереднє вимірювання коефіцієнту відбиття і навіть його модуля викликає певні труднощі. Значно легше виміряти величину КСХН, яка визначається як відношення високочастотної напруги в максимумі до напруги в мінімумі стоячої хвилі:

$$K_{стU} = \frac{|U_{\text{макс}}|}{|U_{\text{мін}}|} \quad (1.4)$$

Величина КСХН має простий зв'язок з коефіцієнтом відбиття

$$K_{стU} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad \text{та} \quad |\Gamma| = \frac{K_{стU} - 1}{K_{стU} + 1} \quad (1.5)$$

КСХН змінюється в межах від 1 до нескінченності. Повному відбиттю від навантаження відповідає нескінченно великий КСХН. Значення КСХН одиниця відповідає ідеальному узгодженню з навантаженням, коли хвильовий опір дорівнює опору навантаження.

У практиці знаходить використання величина, обернена до КСХН. Ця величина має назву коефіцієнта біжучої хвилі (КБХ).

### **1. Фізичні основи конструкції вимірювальної лінії**

Вимірювання КСХН може бути здійснено безпосередньо шляхом переміщення вздовж лінії передачі ідеального високочастотного вольтметра або іншого вимірювального приладу, відліки якого пов'язані з високочастотною напругою в певному перерізі лінії. Суттєво, щоб цей прилад не впливав на розподіл поля вздовж лінії передачі.

Відрізок лінії передачі, по якому переміщується індикаторний прилад, має назву вимірювальної лінії. Зонд розміщується вздовж електричних силових ліній і відгалужує незначну частину високочастотної потужності (приблизно 1 – 2 % від потужності, що передається в режимі біжучої хвилі).

Для вимірювання хвилі типу  $H_{10}$  в прямокутному хвилеводі поздовжня щілина повинна бути розташована вздовж середини широкої стінки хвилеводу, де поперечні струми дорівнюють нулю.

Схема вимірювальної лінії надана на рис. 1.1. Основою вимірювальної лінії є відрізок хвилеводу, який має вузьку щілину (для діапазону три-сантиметрових хвиль ширина щілини дорівнює 1,5 мм) посередині широкої стінки хвилеводу. Щілина зроблена таким чином, що вона проходить паралельно лініям поверхневого струму, унаслідок цього наявність щілини в незначній мірою змінює конфігурацію поля у хвилеводі. Товщина верхньої стінки обирається великою з метою запобігання процесу випромінювання крізь щілину.

Наскрізь щілини у внутрішню порожнину хвилеводу проходить тонкий металевий зонд, закріплений на каретці, що пересувається вздовж лінії. Зонд має зв'язок з вимірювальною головкою, яка може бути налагоджена. У вимірювальну головку включений кристалічний детектор.

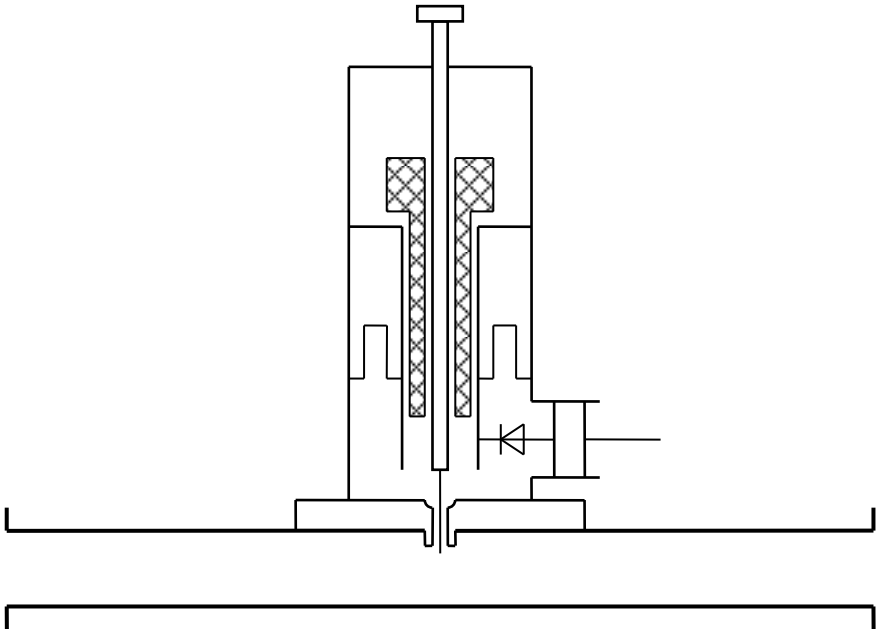


Рис. 1.1. Схема вимірювальної лінії

Електрорушійна сила, наведена в зонді, пропорційна напруженості електричного поля в точці, де розміщений зонд. Після випрямлення детектором вона контролюється гальванометром або вимірювальним підсилювачем.

Переміщення зонда вздовж щілини дозволяє визначити положення максимумів і мінімумів напруги в лінії і їх відносні значення. Відлік положення зонда проводять за допомогою лінійки і ноніуса, це забезпечує точність відліку 0,05 мм. Для одного і того ж значення КСХН місця розташування мінімумів і максимумів може бути різним залежно від фази відбитої хвилі.

Глибина занурення зонда регулюється за допомогою гайки, яка розташована у верхній частині головки. Для лінії типу Р1-28 ця глибина змінюється в межах від 0 до 5 мм і відмічається за поділками на верхній частині головки. При максимальному зануренні похибка зростає, тому такий режим необхідно застосовувати тільки при малій потужності генератора або недостатній чутливості детектора. Занурення зонда проводять шляхом повороту мікрометричного гвинта у верхній частині вимірювальної головки й відліку за поділками, які поданими в міліметрах. Зміна глибини занурення зонда змінює ступень зв'язку вимірювальної головки з хвилеводом і внаслідок цього чутливість приладу. Крім занурення зонда на чутливість впливає добір довжини хвилі, у короткохвильовій частині діапазону чутливість у 2 – 3 рази більша, ніж у протилежній частині діапазону. Налагодження головки в резонанс здійснюється за допомогою двох виступів на зовнішніх стінках головки, налагодження детекторного контуру в резонанс – за допомогою шестерні поблизу основи головки. Налагодження вимірювальної головки не тільки підвищує чутливість вимірювального приладу, але й зменшує вплив реактивних кіл зонда на структуру поля.

Поблизу основи вимірювальної головки є спеціальний відвід для підключення напівпровідникового детектора.

Загальна похибка вимірювання КСХН, який дорівнює 2, згідно з методом „максимум-мінімум” не перевищує 7 %. Непостійність зв'язку зонду з полем лінії не перевищує 2 %. Відносна шунтувальна провідність зонда не перевищує 0,05. Власний КСХН лінії не перевищує 1,03. Такі характеристики гарантуються для хвилеводу перерізом  $23 \times 10$  мм при глибині занурення зонду до 1 мм. КСХН каліброваного реактивного опору РСВ не менший за 30. Люфт поршня РСВ не перевищує 0,04 мм.

Вимірювальна лінія забезпечує відповідну точність тільки за умови підключення між генератором і вимірювальною лінією розв'язувального високочастотного атенюатора з незначним власним КСХН. Досліджуване навантаження підключають до другого фланця вимірювальної лінії.

Настройка лінії складається з двох операцій: встановлення глибини занурення зонда і налагодження вимірювальної головки в резонанс. Встановив деяку глибину занурення зонда, за максимумом показання індикаторного приладу настроюють в резонанс контур зонда. Після цього домагаються максимуму показань індикаторного пристрою шляхом настройки детекторного контуру. Якщо зонд випадково встановлено в мінімум стоячої хвилі, то сигнал не буде спостерігатися. У цьому випадку слід перемістити зонд і повторити знаходження резонансів.

Розв'язувальним атенюатором встановлюють таке згасання, щоб виконувались умови квадратичності характеристики детектора.

При переміщенні зонда з напівпровідниковим детектором вздовж вимірювальної лінії безпосередньо вимірюється не високочастотна напруга або напруженість високочастотного поля, а струм детектора, який випрямлений. У загальному випадку залежність між відповідним струмом і напругою описується виразом

$$I = k|U|^m, \quad (1.6)$$

де  $k$  та  $m$  – параметри, які залежать від властивостей детектора та режиму його роботи, перш за все – від значення  $|U|$ .

У зв'язку з цим при проведенні прецизійних вимірів необхідно перш за все провести градуювання всього приладу в одиницях високочастотної напруги. Ситуація може бути спрощена внаслідок використання тільки відношення напруг.

#### Проведення вимірів

Визначення положення вузла стоячої хвилі. Точне положення вузла (мінімуму) стоячої хвилі напруги визначають методом двох

відліків (метод „вилки”). За значення положення мінімуму обирають середнє між двома положеннями головки по різні боки від вузла, для яких показання індикатора помітно відрізняються від нуля і однакові за значенням.

Вимір довжини хвилі у хвилеводі. Довжину хвилі  $\Lambda$  в хвилеводі визначають як подвоєне значення відстані між двома сусідніми мінімумами (вузлами). Такі виміри проводять при реактивному навантаженні, для якого мінімуми мають найбільш яскраво виражений характер.

Градування детектора. Для градування характеристики детектора використовують ту обставину, коли стояча хвиля вдовж лінії передачі в режимі короткого замикання має вигляд модуля синусоїдальної функції. При проведенні градування вихід вимірювальної лінії закорочують за допомогою металевої пластини. Перш за все зонд встановлюють у вузол стоячої хвилі. Потім відраховують відстань  $l$  від положення вузла і фіксують значення показань індикатора. Така операція повторюється для інших положень зонда, тобто значень  $l$ . Унаслідок четвертої властивості стоячих хвиль нормована відповідна залежність має вигляд

$$|U(l)| = \left| \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) \right| \quad (1.7)$$

Таким чином, значення нормованої напруги  $U$  можуть бути розраховані для певних значень  $l$ , для яких було проведено виміри. Користуючись такими даними, будують графік, у якому на осі ординат відкладають розраховані значення нормованої напруги, а на осі абсцис – значення вимірів індикаторного пристрою, які були виміряні у відповідних точках положення зонда. За допомогою такого графіка можна знайти максимальне і мінімальне значення напруги в нормованих одиницях і розрахувати значення КСХН.

З метою зменшення похибок не слід установлювати глибину занурення зонда більше, ніж 10 – 15 % від значення висоти перерізу прямокутного хвилеводу, що складає 3 мм для хвилеводу трисантиметрового діапазону. Бажано провести виміри поблизу декількох вузлів стоячої хвилі та взяти середню

залежність. Характеристика детектора залежить від опору кола вимірювального приладу, тому для вимірювань використовують той же прилад, що і для вимірювань.

Визначення умовного кінця лінії. Вимірювальну лінію закорочують на кінці з боку навантаження металевою пластиною. Вимірювальну головку переміщують від вихідного кінця вимірювальної лінії в бік генератора до першого мінімуму – вузла напруги. Цю точку і вважають умовним кінцем лінії. При кожній зміні частоти необхідно знову визначати умовний кінець лінії.

Вимір значення КСХН. При вимірюванні КСХН найбільш простим методом „максимуму-мінімуму” шляхом переміщення вимірювальної головки встановлюють зонд у пучність стоячої хвилі і фіксують значення максимуму  $A_{\text{макс}}$  показань індикатора. Потім встановлюють зонд у вузол стоячої хвилі та фіксують значення мінімуму  $A_{\text{мін}}$  показань індикатора. У припущенні квадратичності характеристики детектора значення КСХН визначають згідно з

$$K_{\text{ст}U} = \sqrt{\frac{A_{\text{макс}}}{A_{\text{мін}}}} \quad (1.8)$$

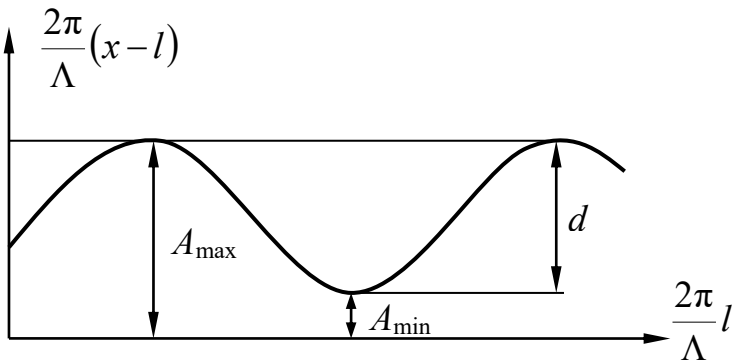


Рис. 1.2. Вимірювання КСХН

Задовільна квадратичність детектора забезпечується зазвичай для струмів детектора, які не перевищують 10 мкА. Таким чином, якщо в максимумі струм не перевищує цього значення, можна калібрування вимірювальної лінії не проводити і користуватися спрощеним виразом. Застосування спрощеного виразу приводить до заниження значення КСХН (рис. 1.2).

При струмах, більших за 20 – 40 мкА, про всяк випадок не можна говорити про квадратичність характеристики детектора. У цьому випадку значення КСХН отримують таким чином: визначають показання індикаторного приладу в пучності й вузлі стоячої хвилі; користуючись графіком градування детектора, для відповідних показань індикатора, визначають значення напруженості поля у відносних одиницях; розраховують значення КСХН як відношення відповідних значень напруженості поля.

Наведений вище спосіб вимірювання КСХН можна застосовувати для значень, менших за 10. При більших значеннях КСХН зонд більш суттєво впливає на відлік поля в максимумі стоячої хвилі внаслідок значного відбору зондом потужності високочастотного поля. Значення КСХН може суттєво бути меншим за точне навіть при умові правильно проведеного калібрування детектора. При вимірюванні КСХН, який перевищує 10, слід користуватися методом „подвійного мінімуму”. Визначають відстань  $d$  між двома положеннями зонда по обидва боки мінімуму таких, що в них потужність у два рази (тобто на 3 дБ) більша за значення потужності в мінімумі стоячої хвилі. Значення КСХН обчислюють згідно з формулою:

$$K_{ст}U = \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi d}{\Lambda}}} \quad (1.9)$$

$$\frac{\pi d}{\Lambda} < 0,12$$

Для  $\Lambda$  останню формулу з похибкою, меншою за 1 %, можна замінити більш простою формулою

$$K_{\text{ст}U} = \frac{\Lambda}{\pi d} \quad (1.10)$$

Цей метод потребує ретельного вимірювання значення величини  $d$  (рис. 1.3).

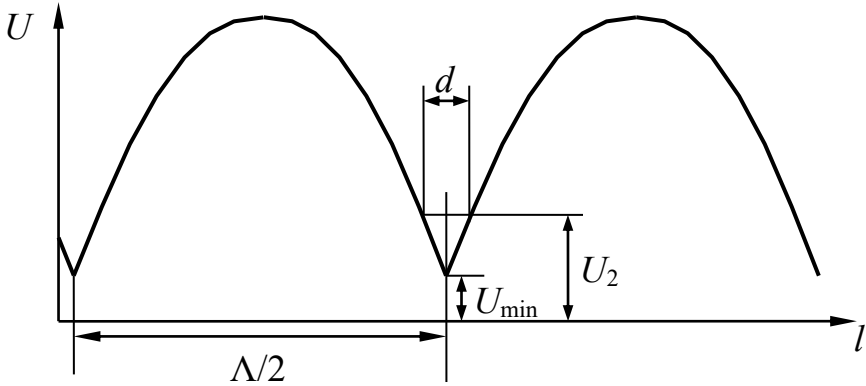


Рис. 1.3. Метод подвійного мінімуму

Більш повний метод полягає в такій послідовності дій. Регулюванням рівня потужності в лінії (або підсилення індикаторного приладу) добиваються, щоб у вузлі напруги показання індикаторного приладу були дещо меншими за половину шкали приладу. Визначають показання приладу  $i$ , користуючись градуванням детектора, знаходять значення напруги  $U_{\min}$  у вузлі стоячої хвилі. Зміщують вимірювальну голівку в бік таким чином, щоб значення  $A_2$  на індикаторному приладі займали майже всю шкалу. Після вимірювання цього значення за даними градування визначають значення напруги  $U_2$ . Потім виміряють відстань  $d$  між точками, де показання складають  $A_2$ . Значення КСХН розраховують відповідно до формули

$$K_{\text{CTU}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_2}{U_{\text{МІН}}}\right)^2 - \cos^2 \frac{2\pi d}{\Lambda}}}{\sin \frac{2\pi d}{\Lambda}} \quad (1.11)$$

Вимірювання КСХН слабо відбиваючих чотириполюсників. Найпростішим методом вимірювання КСХН чотириполюсника є вимірювання при умові підключення до його виходу узгодженого навантаження. Такий метод потребує наявності високоякісного узгодженого навантаження і викликає значні помилки при дослідженні чотириполюсників з малим власним КСХН.

Альтернативою є вимірювання згідно з методом S-кривих (метод Вайсфлоха). Між вимірювальним генератором і чотириполюсником включають вимірювальну лінію. Чотириполюсник навантажують рухомим короткозамкненим поршнем. При підключенні короткозамкненого поршня в лінії встановлюється суто стояча хвиля з нескінченим значенням КСХН.

Фіксують дві довільні референсні площини AA і BB (див. рис.1.2). Від цих площин відраховують відстань до поршня  $x$  і відстань до вузла стоячої хвилі напруги  $y$  у вимірювальній лінії. Для загальності на осях відкладають величини  $x/\Lambda$  та  $y/\Lambda$ . Крива має вигляд букви S з періодом, який дорівнює 0,5, на обох осях. У випадку, коли неоднорідність між площинами AA та BB відсутня, S-крива перетворюється в пряму, яка утворює кут  $45^\circ$  з віссю абсцис, тобто переміщення поршня на певну відстань викликає переміщення вузлів напруги у вимірювальній лінії на таку ж відстань. Зсув цієї прямої з початку координат обумовлений вибором положення референсних площин.

Простіше розрахункові результати можна отримати з графіка  $y - x = f(x)$ , який будують за даними експерименту. За даними графіка визначають максимальне й мінімальне значення різниці  $(y - x)$  і величину  $D = (y - x)_{\text{макс}} - (y - x)_{\text{мін}}$ . Значення модуля коефіцієнту відбиття розраховують, виходячи з формули

$$|\Gamma| = \frac{\pi D}{\Lambda} \quad (1.12)$$

Відповідне значення КСХН при цьому дорівнює  $K_{\text{CTU}} = 1 + 2|\Gamma|$ .

Особливо точні результати метод дає при вимірюванні малих значень КСХН, таких, що близькі до значень КСХН узгодженого навантаження.

Вимірювання модуля комплексного коефіцієнта відбиття базується на вимірах КСХН. Вимірювання аргументу (фази) комплексного коефіцієнта відбиття проводять згідно з наступною методикою.

Після визначення умовного кінця лінії до виходу вимірювальної лінії приєднується навантаження, коефіцієнт відбиття від якого необхідно визначити.

Переміщенням зонда визначають відстань  $L$  від умовного кінця лінії до першого мінімуму в бік генератора. Значення різниці фаз визначають згідно з

$$\theta = 2\pi \frac{L}{\Lambda} \quad (1.13)$$

Фазу безпосередньо коефіцієнта відбиття визначають як

$$\psi = \theta - \pi \quad (1.14)$$

Надійні результати з вимірювання фази можуть бути отримані для не дуже малих значень КСХН (більших за 1,3). При малих значеннях КСХН визначення фази є неточним.

Визначення повного опору навантаження. Дані отримані при вимірюванні комплексного коефіцієнта відбиття дозволяють визначити повний нормований опір навантаження згідно з формулою

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{K_{\text{CTU}} - j(K_{\text{CTU}}^2 - 1) \sin \theta \cos \theta}{K_{\text{CTU}}^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}, \quad (1.15)$$

де  $Z$  – повний опір навантаження;  $Z_0$  – хвильовий опір хвильоводу вимірювальної лінії.

Хвильовий опір для основної хвилі  $H_{10}$  прямокутного хвильоводу дорівнює

$$Z_0 = 120 \pi \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (1.16)$$

де  $a$  – ширина перерізу хвильоводу;  
 $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі.

Нормована повна провідність визначається згідно з виразом

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{K_{\text{CTU}} + j(K_{\text{CTU}}^2 - 1) \sin \theta \cos \theta}{\cos^2 \theta + K_{\text{CTU}}^2 \sin^2 \theta}, \quad (1.17)$$

де  $Y$  – повна провідність навантаження;

$Y_0$  – хвильова провідність хвильоводу.

Для отримання значення нормованого повного опору за даними вимірювань застосовують також кругову діаграму опорів (діаграму Вольперта – Сміта).

Після побудови на діаграмі точки, яка відповідає вимірюваному значенню комплексного коефіцієнта відбиття, значення опору отримують на відповідних колах дійсної і уявної частин нормованого опору. Комплексний коефіцієнт відбиття будують, використовуючи прозору лінійку, на якій нанесено значення модуля коефіцієнта відбиття, фазу відраховують від позитивного напрямку осі абсцис.

Вимірювання загасання. Якщо відрізок НВЧ тракту, який має загасання, у достатньому ступені однорідний і коефіцієнтами

відбиття на вході й виході можна знехтувати, то для коефіцієнта передавання цього відрізка довжиною  $l$  справедливий такий вираз

$$T = \exp(-\alpha l), \quad (1.18)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт загасання.

Вимірювання КСХН  $K_{стU}$  проводять при навантаженні відрізка лінії короткозамкненим навантаженням з власним КСХН  $K_2$ . Загасання розраховують згідно з

$$\alpha l = 10 \lg \frac{(K_{стU} + 1)(K_2 - 1)}{(K_{стU} - 1)(K_2 + 1)}. \quad (1.19)$$

Дані методи вимірювання загасання дозволяють виміряти малі значення загасання порядку 0,05-0,5 дБ. Для більших значень загасання дані методи можуть дати тільки приблизне значення внаслідок зростання похибки вимірювань за рахунок власного відбиття в лінії, яку вимірюють.

## 2. Методика вимірювання повного опору навантаження

Повний (комплексний) опір навантаження вимірювальної лінії пов'язаний з комплексним коефіцієнтом відображення відомим співвідношенням

$$Z_n = \rho_\Lambda \frac{1 - \dot{\Gamma}_n}{1 + \dot{\Gamma}_n} \quad (1.20)$$

де  $\rho_\Lambda$  - хвильовий опір вимірювальної лінії. Як правило визначають нормований опір навантаження

$$Z'_n = R'_n + jX'_n \quad (1.21)$$

$R'_n = R_n / \rho_\Lambda$  та  $X'_n = X_n / \rho_\Lambda$  - нормовані активна і реактивна складові повного опору. Коефіцієнт відображення є комплексною величиною і його можна записати у вигляді

$$\dot{\Gamma}_n = \Gamma_n e^{j\varphi_n}, \quad (1.22)$$

де  $\Gamma_n$  - модуль;  $\varphi$  - фазовий кут коефіцієнта відображення. В НВЧ-тракті без втрат амплітуди падаючої і відображеної хвиль постійні. При цьому модуль коефіцієнта відображення

$$\Gamma_n = V_{від}/V_{над} = E_{від}/E_{над} \quad (1.23)$$

З коефіцієнтом стоячої хвилі в НВЧ-тракті ця величина зв'язана співвідношенням

$$\Gamma_n = \frac{k_c - 1}{k_c + 1} \quad (1.24)$$

Отримаємо вирази, які зв'язують значення  $R'_n$  і  $X'_n$  з КСХ у лінії і фазовим кутом коефіцієнта відбиття

$$R'_n = \frac{2k_c}{k_c^2 + 1 - (k_c^2 - 1)\cos\varphi_n}, X'_n = \frac{(k_c^2 - 1)\sin\varphi_n}{k_c^2 + 1 - (k_c^2 - 1)\cos\varphi_n} \quad (1.25)$$

Фазовий кут коефіцієнта відбиття визначається виразами

$$\varphi_n = 4\pi \frac{x_{y1}}{\Lambda} - \pi \quad (1.26)$$

$$\varphi_n = 4\pi \frac{x_{n1}}{\Lambda} \quad (1.27)$$

В цих виразах  $x_{y1}$ - відстань від навантаження до першого мінімуму (вузла) стоячої хвилі;  $x_{n1}$ - відстань від навантаження до першого максимуму (пучності) стоячої хвилі.

Для визначення фазового кута коефіцієнта відбиття звичайно користуються виразом (1.29). Оскільки мінімуми стоячої хвилі в лінії гостріше, ніж максимуми, величину  $x_{y1}$  можна виміряти з більшою точністю, ніж  $x_{n1}$ .

Якщо безпосередньо виміряти  $x_{y1}$  чи  $x_{n1}$ , неможливо, визначають зміщення вузлів стоячої хвилі у вимірювальній лінії (див. рис.1.4а та 1.4б). Для цього вмикають на виході лінії спочатку короткозамикач, а потім навантаження, яке досліджується, і визначають координати вузлів. Можна показати, що

$$x_{y1} = l_{zm} = x_y - x_{y\text{кз}} \quad (1.28)$$

де  $x_y$  та  $x_{y\text{кз}}$  - координати вузлів стоячої хвилі у лінії, працюючої на навантаження яке досліджують, і короткозамкненої лінії. Далі за формулами (1.28) вираховують значення  $R'_n$  та  $X'_n$ .

Потрібних при цьому трудомістких розрахунків можна уникнути, якщо використати кругові діаграми. Найбільш поширена кругова діаграма повних опорів у полярній системі координат. Вона дозволяє визначити активну та реактивну складові нормованого опору навантаження безпосередньо по вимірним значенням  $k_c$  та  $l_{zm}/\Lambda$ .

На діаграмі нанесені дві сім'ї ортогональних кривих, які відповідають постійним значенням  $R'_n$  та  $X'_n$ . Криві  $R'_n = const$  уявляють собою кола з загальною точкою при  $R'_n \rightarrow \infty, X'_n \rightarrow \infty$ . Значенням  $X'_n = const$  відповідають відрізки дуг, які сходяться також у точці  $R'_n \rightarrow \infty, X'_n \rightarrow \infty$ . По периферії діаграми відкладені відносні відстані  $l/\Lambda$ . Для відрахунку значень КСХ на діаграму наносять сім'ю концентричних кіл  $k_c = const$ . Значення  $k_c$  визначають за нижньою частиною шкали  $R'_n$  при  $X'_n = 0$ . (Нагадаємо, що величина  $k_c$  може змінюватись від 1 до  $\infty$ ). Зручно користуватися діаграмою, до якої у центрі її

прикріплена прозора лінійка з шкалою КСХ чи КБХ, що може обертатися.

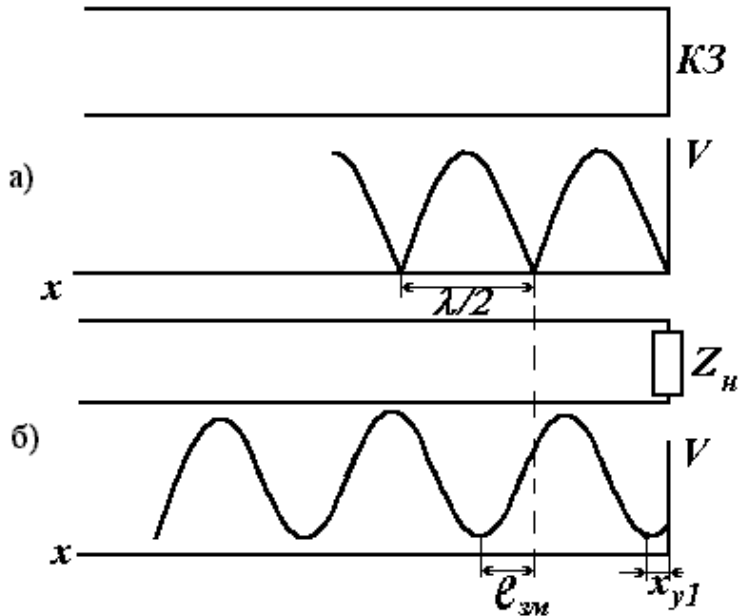


Рис.1.4. До визначення зміщення вузлів стоячої хвилі.

Методику визначення повного опору навантаження за допомогою кругової діаграми пояснимо на прикладі. Нехай виміряні значення  $k_c = 5$ ,  $l_{zm} / \lambda = 0.1$ . Встановивши лінійку, що обертається, у положення  $l_{zm} / \lambda = 0.1$ , знаходимо на діаграмі точку, яка відповідає  $k_c = 5$ , і визначаємо її координати  $R_n'$  та  $X_n'$ . Для випадку, який розглядається,  $R_n' \approx 0,30$  та  $X_n' \approx 0,68$ .

### Контрольні питання

1. Як виміряти дійсну та уявну складові хвильового опору хвилеводного тракту за допомогою вимірювальної лінії?

### 3. Вимірювання потужності НВЧ за допомогою термісторів.

Термістором називають терморезистор із спеціального напівпровідникового матеріалу з великим від'ємним температурним коефіцієнтом опору. Застосовують два типи термісторів: стержневий та бусинковий.

Термістори стержневого типу мають більш високу електричну міцність і відносно менший реактивний опір. Бусинковий термістор при інших рівних умовах, має меншу поверхню охолодження і тому має більшу чутливість.

Основними перевагами термісторів є висока чутливість і велика стійкість до перевантажень.

Хвилеводна термісторна камера вміщує термісторну вставку та хвилеводний перехід, який забезпечує узгодження опору термісторної вставки з хвилевим опором нормалізованого прямокутного хвилеводу, до якого підключають вимірювач потужності.

Суттєвим недоліком термісторних ватметрів є обмеження максимальної величини вимірювальної потужності. Практично стандартні термістори спроможні без руйнування витримувати потужність, що не перевищує декількох десятків міліват. Верхню границю вимірювальної потужності можна збільшити, якщо перед термісторною камерою розмістити калібрований атенюатор. У цьому випадку результат вимірювання визначається відліком по шкалі приладу, помноженим на величину затухання, що вноситься атенюатором. У вимірювачах малої потужності НВЧ застосовують атенюатори поглинаючого та граничного типів.

Важливою частиною вимірювача потужності НВЧ є мостова схема. Приріст опору термісторів можна виміряти за допомогою схем простих омметрів, але таке вимірювання не буде точним. Більш високу точність дають мостові вимірювальні схеми. Застосовуються два способи вимірювання опору термістору - за допомогою неврівноваженого та врівноваженого мостів.

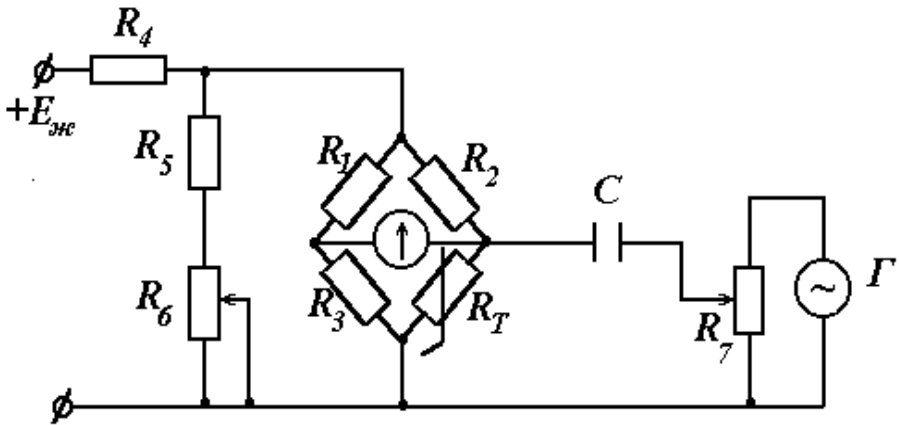


Рис.1.5 Схема зрівноваженого моста.

Високу точність вимірювання забезпечує зрівноважений міст, за допомогою якого досягається порівняння вимірювальної потужності НВЧ з каліброваною потужністю постійного струму. На рис.1.5 дана схема зрівноваженого моста з безпосереднім відліком результату вимірювання. Живлення моста постійним струмом здійснюється за допомогою резистору  $R_4$ . Паралельно мостовій схемі включений шунтуючий ланцюг, що створений резистором  $R_5$  та реостатом  $R_6$ , на движку якого закріплена відлікова шкала потужності. Струм живлення моста  $I_n$ , отже і потужність, що розсіюється на термістор і є функцією положення движка реостата  $R_6$ . Максимум струму є в приведеному реостаті. Цьому положенню движка відповідає нульовий відлік по шкалі потужності ( $P_{\text{НВЧ}}=0$ ).

Процес вимірювання потужності за допомогою зрівноваженого моста складається з двох етапів. Перший - вихідне балансування моста, що здійснюється при відсутності потужності НВЧ та при повністю введеному реостаті  $R_6$  ( $P_{\text{НВЧ}}=0$ ). Міст зрівноважують за допомогою потенціометру  $R_7$ , змінюючи змінну напругу, що підводиться до термістора. Початкове зрівноваження моста виключає із результату вимірювання помилки, що обумовлені коливаннями температури навколишнього середовища та старінням термістора.

На другому етапі здійснюють безпосереднє вимірювання потужності НВЧ, при цьому початковий режим рівноваги моста підтримується незмінним і після надходження вимірювальної потужності НВЧ. Це досягається зменшенням потужності постійного струму при  $P_{пт}$  так, що сума розсіюваних потужностей завжди лишається незмінною.

$$P_{НВЧ} + P_{пт} = P_0 \quad (1.29)$$

де  $P_0$ - потужність, що розсіюється на термісторі при попередньому врівноваженні.

Із співвідношення (1.29) слідує, що для встановлення рівноваги моста потужність постійного струму повинна бути зменшена на величину, що дорівнює

$$\Delta P_{пт} = - P_{НВЧ} \quad (1.30)$$

Останнє забезпечують пропорційним зменшенням опору  $R_6$ , яке стає мірою величини вимірювальної потужності НВЧ. Результат вимірювання можна прочитати за шкалою, що пов'язана з движком реостата  $R_6$  та проградуйованою в одиницях потужності. Для збільшення точності відліку у якості  $R_6$  використовують спеціальний реостат, забезпечений спіральною шкалою.

### ***Контрольні питання:***

1. Чим визначається точність вимірювання потужності за допомогою термістора?
2. Перерахуйте основні переваги та недоліки термісторних ватметрів.

### **4. Завдання до експериментальної частини та порядок виконання роботи**

1. Ознайомитись з порядком роботи з приладами, які складають вимірювальну установку (рис. 1.6).

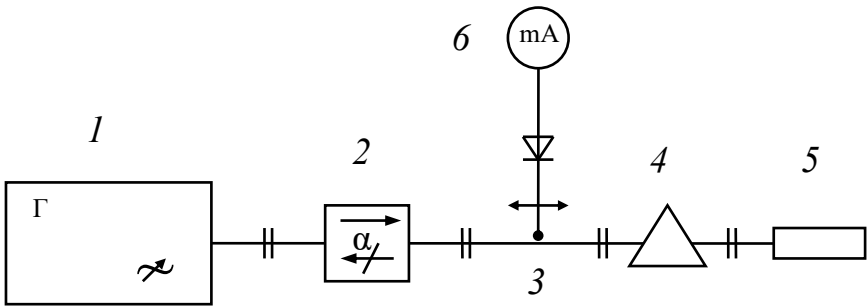


Рис. 1.6. Схема вимірювальної установки:

1 – генератор; 2 – феритовий вентиль; 3 – вимірювальна лінія; 4 – досліджуване навантаження; 5 – узгоджувальне навантаження; 6 – вимірювальний прибор (міліамперметр).

2. За допомогою вимірювальної лінії визначити довжину хвилі у хвилеводі. Замкнути вихідне плече узгоджувальної секції КЗ пластиною і, переміщаючи зонд вимірювальної лінії, знайти відстань між двома сусідніми мінімумами напруженості електричного поля. Ця відстань буде дорівнювати половині довжини хвилі у хвилеводі.

3. Провести калібрування детектора.

4. Розмістити у вимірювальній лінії твердий діелектрик. Провести виміри довжини хвилі. Розрахувати значення діелектричної проникності за формулою

$$\varepsilon = \left( \frac{\Lambda}{\Lambda_d} \right)^2,$$

де  $\Lambda$  – довжина хвилі у хвилеводі за відсутності діелектрика;

$\Lambda_d$  – довжина хвилі у хвилеводі за наявності діелектрика.

5. Розмістити у вимірювальній лінії сповільнюючу структуру. Виміряти довжину хвилі. Зіставити фазові швидкості за наявності й відсутності структури.

6. Визначити положення умовного кінця вимірювальної лінії.

7. Для короткозамкненого навантаження провести виміри КСХН всіма способами.

8. Для антенного еквіваленту провести виміри КСХН всіма способами.

9. Провести виміри КСХН всіма способами для відкритого кінця хвилеводу та рупорного випромінювача.

10. Визначити фазу коефіцієнта відбиття для останніх видів навантаження.

11. Розрахувати повний опір для цих видів навантаження за допомогою діаграми повних опорів і з застосуванням формули (1.1).

12. Провести виміри КСХН та коефіцієнта відбиття для скручення, згину хвилеводу, фазообертача, атенюатора.

13. Провести виміри втрат у цих чотиріполюсниках.

## **5. Зміст звіту**

1. Схема вимірювальної установки.

2. Величини, що були отримані експериментально.

3. Розрахунки, які були одержані при обробці експериментальних даних. Порівняти експериментальні й розрахункові результати.

4. Аналіз результатів вимірювань КСХН різними способами.

5. Аналіз можливості вимірювань навантажень з різним КСХН.

## ***Контрольні запитання***

1. Яка лінія називається довгою?

2. Яка лінія називається однорідною?

3. Яка величина має назву комплексного коефіцієнта відбиття? Який фізичний зміст його модуля та аргументу (фази)? У яких межах змінюються модуль і фаза? Яким фізичним ситуаціям відповідають граничні випадки?

4. Яка хвиля має назву біжучої? Що можна сказати про залежність її амплітуди, фази від повздовжньої координати лінії передачі?

5. Яка хвиля має назву стоячої? Що можна сказати про залежність її амплітуди, фази від повздовжньої координати лінії передачі?

6. Яким значенням дорівнюють опір навантаження, коефіцієнт відбиття, КСХН, КБХ у випадку короткого замикання?

7. Яким значенням дорівнюють опір навантаження, коефіцієнт відбиття, КСХН, КБХ у випадку холостого ходу?

8. Який знак має коефіцієнт відбиття для режимів холостого ходу й короткого замикання для хвиль напруги та струму? Яким фізичним ситуаціям ці знаки відповідають?

9. Якому значенню дорівнює коефіцієнт відбиття ідеального чотириполюсника без втрат при короткозамкненому навантаженні?

10. Якому значенню дорівнює відстань між сусідніми вузлами стоячої хвилі?

11. Який фізичний зміст комплексності опору?

12. Що таке КСХН, КБХ? У яких межах вони змінюються?

13. Який пристрій має назву вимірювальна лінія?

14. Які вимоги висуваються до зонда?

15. Які цілі переслідує налагодження контурів зонда вимірювальної лінії?

16. Яким чином обирається товщина верхньої широкої стінки хвилеводу вимірювальної лінії? Які цілі такого добору товщини? У хвилеводах якого перерізу використовується аналогічне фізичне явище?

17. Чим забезпечується малий вплив зонда на структуру поля?

18. Яка послідовність дій при налагодженні вимірювальної головки?

19. Які дії слід виконувати у випадку, коли відсутній сигнал?

20. Як проводиться вимірювання довжини хвилі у хвилеводі?

21. У чому полягає метод двох відліків для визначення положення вузла стоячої хвилі?

22. Які цілі включення між генератором і вимірювальною лінією атенюатора або вентиля?

23. Яка методика градування детектора, у чому її фізичні основи?

24. Що таке умовний кінець лінії? Як його можна визначити?

25. У чому полягають методики визначення КСХН?

26. Як обирають методику вимірювання КСХН?

27. Із чого складається метод Вайсфлоха?

28. З чого складається методика визначення фази коефіцієнта відбиття?
29. У чому особливості визначення загасання?
30. Як визначається повний опір навантаження?

## ЗМІСТ

Мета роботи: .....	3
Методика роботи: .....	3
Поради:.....	3
Примітка:.....	4
Необхідне обладнання лабораторної роботи:.....	4
Форма звітності: .....	4
Основна література:.....	5
Додаткова література:.....	5
Інформаційні ресурси в Інтернеті .....	6
Теоретичні відомості.....	7
1. Фізичні основи конструкції вимірювальної лінії .....	9
2. Методика вимірювання повного опору навантаження .....	20
<i>Контрольні питання</i> .....	23
3. Вимірювання потужності НВЧ за допомогою термісторів.....	24
<i>Контрольні питання:</i> .....	26
4. Завдання до експериментальної частини та порядок виконання роботи.....	26
5. Зміст звіту.....	28
<i>Контрольні запитання</i> .....	28
ЗМІСТ.....	31

## Примітки

## Нотатки

Навчально-науковий інститут високих технологій  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Навчально – методичне видання**

**МАЛИШЕВ** Володимир Юрійович

**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ**

до лабораторної роботи

**«ВИМІРЮВАЛЬНА ЛІНІЯ»**

з курсу

**«МІКРОХВИЛЬОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ»,**

практикум

**«ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА НВЧ»**

Підписано до друку \*\*.05.2025. Формат 60x84/16.  
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний.  
Ум.-друк. арк. 1,75. Електронне видання.