

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПРОЕКТУВАННЯ ПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ НВЧ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Укладач: С. М. Перегудов

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент

*Шевченко, К.Л., д-р техн. наук, доц., професор кафедри
інформаційно-вимірювальних технологій, КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний
редактор

Степанов, М.М., д-р техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 01/2023 від 30.01.2023 р.)*

У посібнику викладено методичні рекомендації щодо проведення лабораторних занять з дисципліни «Проектування приймальних пристроїв НВЧ». Він містить опис лабораторних робіт і список рекомендованої літератури. Основна увага надана дослідженню елементів вхідного тракту приймальних пристроїв НВЧ діапазону та аналізу їх основних характеристик. У посібнику наведено теоретичні відомості за темами робіт та порядок їх виконання. Наприкінці кожної теми запропоновані контрольні запитання.

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка». Він буде також корисним для студентів інших технічних спеціальностей у галузі знань «Електроніка та телекомунікації».

Проектування приймальних пристроїв НВЧ : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С. М. Перегудов. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,17 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 65 с.

ЗМІСТ

Вступ	4
Лабораторна робота 1	
ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЙМАЛЬНОГО	
ПРИСТРОЮ З ПОДВІЙНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЧАСТОТИ	6
Контрольні запитання.....	15
Лабораторна робота 2	
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРЕГУЛЯРНОСТЕЙ ВХІДНОГО НВЧ	
ТРАКТУ РАДІОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ	16
Контрольні запитання.....	24
Лабораторна робота 3	
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФЕРИТОВИХ ПРИСТРОЇВ	
НВЧ ТРАКТУ	25
Контрольні запитання.....	38
Лабораторна робота 4	
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РІН АТЕНЮАТОРА	39
Контрольні запитання.....	47
Лабораторна робота 5	
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО	
ДЕТЕКТОРА	48
Контрольні запитання.....	54
Лабораторна робота 6	
АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕКТИВНОГО	
ПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ	55
Контрольні запитання.....	64
Список рекомендованої літератури	65

ВСТУП

Дисципліна «Проектування приймальних пристроїв НВЧ» є нормативною і відноситься до циклу професійної підготовки студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» за освітньо-професійною програмою бакалаврського рівня «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія». Вона передує дисциплінам «Автоматизоване проектування антен та пристроїв НВЧ» і «Мобільні телекомунікаційні системи», в яких розглядаються питання розробки складної апаратури надвисокочастотного діапазону. У зв'язку зі стійкою тенденцією мініатюризації та інтеграції радіосистем визначаються два аспекти НВЧ пристроїв.

По-перше, принципова різниця між ними та більш низькочастотними пристроями спостерігається лише для вхідних трактів та антен. По-друге, зростають вимоги до мікрохвильових приймальних пристроїв, а також до компонентів тракту, що визначають їх основні характеристики. Тому підвищується роль експериментальних досліджень зазначених об'єктів на стадії проектування. Враховуючи вище зазначене, саме на цих аспектах і робився акцент у процесі розробки лабораторного практикуму.

Три роботи присвячені експериментальним дослідженням елементів та пристроїв, що широко використовуються в конструкціях вхідних трактів НВЧ приймачів для узгодження окремих вузлів (вентилі та нерегулярності ліній передачі) і для модуляції сигналів (електрично керовані атенюатори). Серед пристроїв низькочастотного тракту вибрано синхронний детектор як об'єкт досліджень, оскільки його використання дозволяє підвищувати чутливість приймачів та вимірювальних приладів. І в двох роботах визначаються основні характеристики приймальних пристроїв двох класів: радіометричного типу з подвійним перетворенням частоти і селективного приймача.

Проведення лабораторних занять сприяє кращому за матеріалів лекції та практичних занять. В результаті виконання лабораторних робіт студенти:

- закріплюють теоретичні знання;
- набувають практичних навичок;
- вивчають сучасні методи вимірювань тощо.

Під час лабораторного практикуму студенти повинні:

- обов'язкова підготуватися до лабораторної роботи;
- вивчити основні теоретичні відомості та відповіді на контрольні запитання, що приведені наприкінці кожної роботи;
- дотримуватися правил та інструкцій з проведення роботи;
- відповідним чином оформлювати звіт про виконання роботи;
- точно і беззаперечно виконувати вимоги техніки безпеки.

Кожна лабораторна робота закінчується захистом її результатів і одержанням оцінки відповідно до РСО з дисципліни.

Лабораторна робота 1

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЙМАЛЬНОГО ПРИБОРУ З ПОДВІЙНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ЧАСТОТИ

Мета та основні завдання роботи

Ознайомитися з принципом роботи НВЧ приймача радіометричного типу з подвійним перетворенням частоти та методами вимірювання основних його характеристик.

Визначити основні характеристики: діапазон робочих частот, передаточну характеристику та поріг чутливості радіометричного приймача.

Основні теоретичні відомості

Радіометричні приймачі НВЧ діапазону широко використовуються в радіоастрономії, радіонавігації, метеорології, засобах зв'язку та інших галузях науки і техніки для вимірювання вкрай слабких сигналів, рівень яких може бути нижчим за рівень власних шумів цим систем. Вони мають поріг чутливості у залежності від діапазону частот 10^{-16} - 10^{-13} Вт і використовуються для вимірювання мікрохвильових сигналів об'єктів, розташованих на значних відстанях від приймальних пристроїв [2]. Порогова чутливість такого приймача визначається за формулою

$$P_{\Pi} = kT_0\Delta fK_N, \quad (1)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T_0 – абсолютна температура навколишнього середовища; Δf – смуга пропускання приймача (визначається смугою робочих частот каналу проміжної частоти); K_N – коефіцієнт шуму тракту приймача.

Отже, гранична чутливість пропорційна коефіцієнту шуму та смузі робочих частот приймача, від значення яких також залежить точність вимірювання і потужності, і частоти сигналу. Проектування приймачів радіометричного проводиться, як правило, в залежності від його базового метода вимірювання: *компенсаційного, кореляційного або модуляційного*. Більш високу чутливість

забезпечують компенсаційні та кореляційні радіометри, проте, вони менш поширені через великий рівень низькочастотних флуктуацій коефіцієнта підсилення, складність структурних схем тощо.

Теоретично найбільшу чутливість можуть забезпечити компенсаційні методи, у яких власні шуми апаратури врівноважуються сигналам допоміжного джерела напруги об'єкта. Пристрої, побудовані за таким принципом називаються компенсаційними радіометрами. Компенсаційний радіометр (рис. 1.1) містить у собі вхідний підсилювач (*A1*), квадратичний детектор (*U1*), фільтр нижніх частот (*Z1*), джерело опорної напруги (*ДОН*), пристрій порівняння (*A2*) та індикатор (*P1*). Схема реалізує пряме перетворення вхідного сигналу.

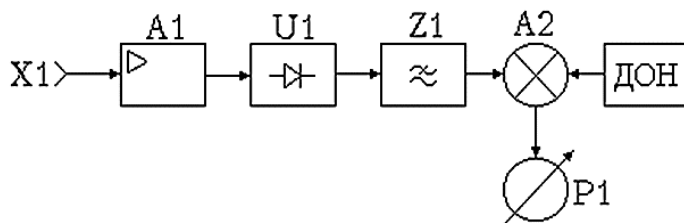


Рисунок 1.1 — Структурна схема компенсаційного радіометра

Чутливість компенсаційного радіометра визначається за формулою

$$\Delta P_{\text{кмп}} = 1,41 \cdot P_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}},$$

де: P_N – потужність шуму приймального каналу радіометра; ΔF – смуга пропускання фільтра на виході квадратичного детектора; Δf – смуга пропускання підсилювача високої частоти *A1*.

Перспективним для вимірювання потужності шумоподібних сигналів є використання кореляційних методів. Метод реалізується за допомогою кореляційного радіометра, спрощена схема якого наведена на рис. 1.2. Радіометр складається з двох ідентичних каналів, у кожному із яких включені приймальні антени (*X1*, *X2*), підсилювач надвисокої частоти (*A1*, *A2*), гетеродин (*G1*), перетворювач частоти (*U1*, *U2*) та буферний підсилювач (*A3*, *A4*). Виходи каналів через підсилювачі проміжної частоти (*A5*) та (*A6*) з'єднані з помножува-

чем ($U3$) і через фільтр нижніх частот ($Z1$) — з індикатором ($P1$). Кореляційний радіометр (корелометр) реалізує вимірювання функції кореляції двох сигналів або автокореляційної функції одного й того ж сигналу.

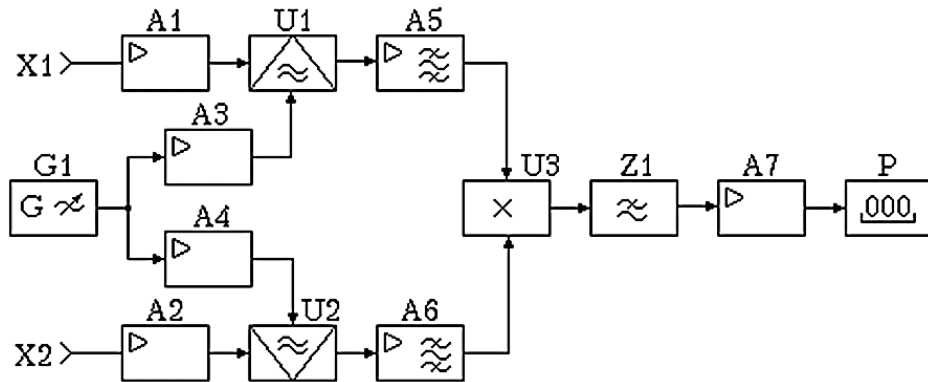


Рисунок 1.2— Структурна схема кореляційного радіометра

За відсутності сигналу на виході кореляційного радіометра (рис. 1.2) виділяється потужність власних шумів, яка має знаковмінний характер:

$$\Delta P_{\text{крл } 1} = \int \mathfrak{S}_{N1}(f) \cdot \mathfrak{S}_{N2}(f) df,$$

де: $\mathfrak{S}_{N1}(f)$, $\mathfrak{S}_{N2}(f)$ – інтенсивність шумів відповідних каналів корелометра.

Наявність на входах корелометра зовнішніх сигналів $X_1(t) = X_2(t) = X(t)$ обумовлює появу на виході помножувача $U3$ сигналу, пропорційного потужності шумів та досліджуваного сигналу

$$P_{\text{крл } 1} = \int \mathfrak{S}_{N1}(f) \cdot \mathfrak{S}_{N2}(f) df + P_{\text{крл } 2} = \int X^2(f) df.$$

Друга складова зміщує результуючий сигнал в зону додаткових значень, що фіксується пристроєм реєстрації корелометра. Чутливість кореляційного радіометра визначається з виразу

$$\Delta P_{\text{крл}} = 2 \cdot P_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}},$$

Кореляційні радіометри мають чутливість у 1,41 рази меншу, ніж компенсаційні. Проте, вони більш перспективними з погляду схемної реалізації та забезпечення необхідної чутливості є комутаційно-модуляційні радіометри, структурна схема яких наведена на рис. 1.3.

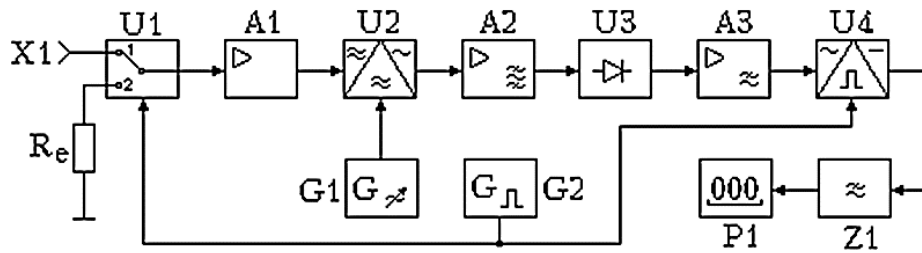


Рисунок 1.3— Структурна схема модуляційного радіометра

Модуляційний радіометр побудовано за одноканальною послідовною схемою, що складається з: вхідної антени ($X1$), еквівалента антени (R_e), комутатора ($U1$), підсилювача ($A1$), перетворювача частоти ($U2$), гетеродина ($G1$), підсилювача проміжної частоти ($A2$), квадратичного детектора ($U3$), низькочастотного підсилювача ($A3$), синхронного детектора ($U4$), генератора комутуючих імпульсів ($G2$), фільтра нижніх частот ($Z1$) та індикатора ($P1$). Сигнал на виході антени ($X1$) надходить до комутатора ($U1$), який перемикається з низькою частотою $\Omega < \omega$. Тому на виході формується модульована напруга

$$U_m(t) = K_1[U_N^2(t) + U_c^2(t)],$$

$$U_m(t) = U_c(1 + m \cdot \text{sign}\Omega t) \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

де m – коефіцієнт глибини амплітудної модуляції.

Враховуючи, що приймач має власні шуми, за кожний півперіод комутації на виході квадратичного детектора отримаємо:

$$i'_{\text{кв д}} = K_1[U_N^2(t) + U_c^2(t)], \quad 0 < t < \pi/\Omega$$

$$i''_{\text{кв д}} = K_1[U_N^2(t) + U_c^2(t)], \quad \pi/\Omega < t < 2\pi/\Omega$$

де: K_1 – коефіцієнт перетворення квадратичного детектора; U_N – інтенсивність спектральної щільності напруги власних шумів приймача.

Отриманий сигнал демодулюється в синхронному детекторі методом перемноження на опорну модульовану напругу, а фільтр нижніх частот виділяє постійну складову, яка пропорційна потужності вхідного сигналу

$$P_c = \frac{K_2 K_1 U_c^2}{4},$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення синхронного детектора.

Чутливість модуляційного радіометра визначається відомим виразом

$$\Delta P_{\text{мдл}} = 2\sqrt{2} \cdot P_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}},$$

що в 2 рази менше, ніж у компенсаційного і в 1,41 рази — ніж у кореляційного. Однак простота реалізації модуляційних схем, надійність у роботі забезпечують широке їх використання для вимірювання потужності низькоінтенсивного випромінювання НВЧ діапазону.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з радіометричного приймача, побудованого за модуляційною схемою (рис. 1.4), на вході якого встановлено поляризаційний атенюатор та генератора еталонних шумоподібних сигналів (рис. 1.5). Робочий діапазон вказаних пристроїв складає 37,5...54,0 ГГц.



Рисунок 1.4 — Радіометричний приймач модуляційного типу



Рисунок 1.5 — Генератор еталонних сигналів

Вхід радіоприймача та вихід генератора — хвилеводні. Вони можуть безпосереднь з'єднатися між собою через фланці. Можливе також приєднання до них рупорних антент. В даній роботі реалізується перший варіант.

На рис. 1.6 показана структурна схема лабораторної установки.

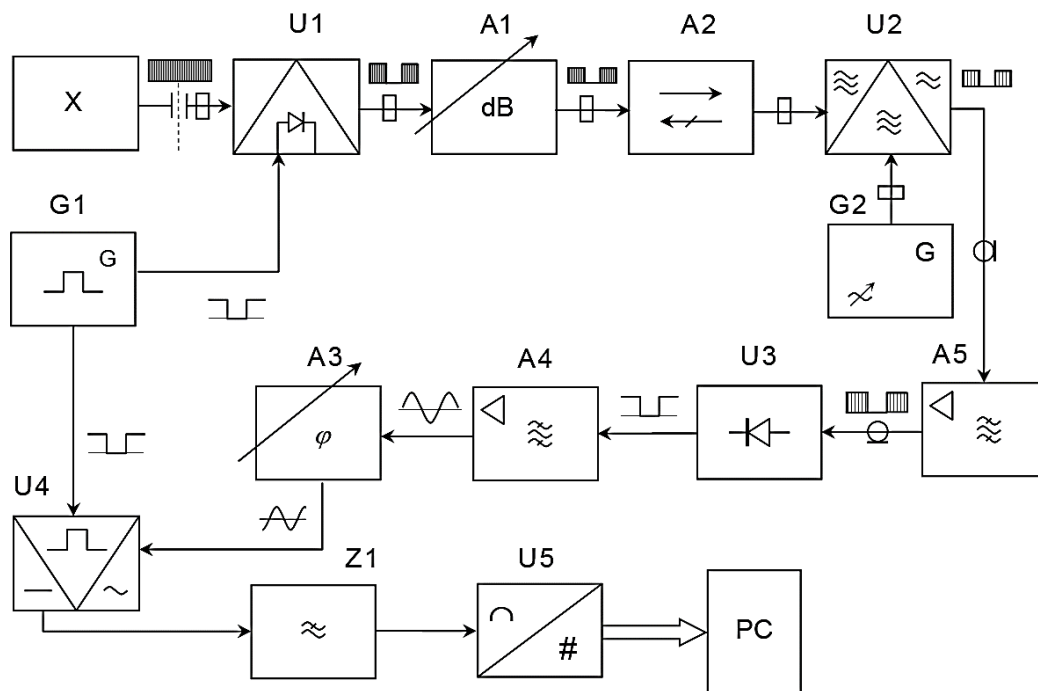


Рисунок 1.6 — Схема лабораторної установки:

- | | |
|---|------------------------------------|
| X – джерело сигналу; | A3 – підсилювач проміжної частоти; |
| U1 – електрично-керований НВЧ модулятор; | U3 – квадратичний детектор |
| A1 – прецизійний атенюатор; | A4 – біквдратний смуговий фільтр; |
| A2 – феритовий вентиль; | A5 – підсилювач проміжної частоти; |
| U2 – перетворювач частоти; | U5 – синхронний детектор; |
| G1 – генератор прямокутних імпульсів | Z1 – фільтр низьких частот |
| G2 – генератор синусоїдальних НВЧ сигналів (гетеродин); | U5 – аналого-цифровий перетворювач |
| | PC – пристрій реєстрації сигналів |

НВЧ блок радіометричного приймача складається з хвильового НВЧ тракту, до якого входять генератор синусоїдальних сигналів, електрично керований модулятор, змінний атенюатор та перетворювач частоти.

На вхід приймача поступає шумоподібний сигнал від генератора еталонних сигналів нормованої потужності, який модулюється за допомогою електрично-керованого модулятора *U1*. Керування *U1* здійснюється генератором прямокутних імпульсів *G1*. Атенюатор *A1* послаблює сигнал до потрібної величини (у разі перевищення вхідним сигналом рівня потужності 10^{-9} Вт). Після чого сигнал надходить на один з входів перетворювача *U2*, на другий поступає сигнал гетеродина *G2*. Вентиль *A2* забезпечує електромагнітну

розв'язку перетворювача з вхідним трактом системи. З виходу $U2$ сигнал проміжної частоти надходить на вхід підсилювача $A5$ і після підсилення детектується квадратичним детектором $U3$. Продетектований сигнал частоти 1 кГц в вигляді прямокутних імпульсів перетворюється активним бікватратним фільтром $A4$ в синусоїдальний сигнал тієї ж частоти. Цей сигнал через фазообертач $A3$ поступає на один з входів синхронного детектора $U4$, а на його другий вхід поступає сигнал від генератора $G1$. Спектр вихідного сигналу синхронного детектора $U4$ має постійну складову, яка пропорційна потужності вхідного сигналу X , та сигнали гармонік частот, кратних 1 кГц. Фільтр $Z1$ виділяє постійну складову, яка після аналого-цифрового перетворення поступає на пристрій реєстрації для подальшої обробки.

2. Метод вимірювань

Вимірювання вхідних низькоінтенсивних сигналів в діапазоні частот 37,5-54 ГГц та визначення характеристик радіометричного приймача базується на методі заміщення з використанням та генератора еталонних сигналів та зразкового атенюатора. Потужність вимірювального сигналу P_c замінюється каліброваним значенням потужності стандартного генератора P_k , ослабленим до необхідного значення зразковим атенюатором.

Порівняння потужностей вимірюваного P_c та каліброваного P_k сигналів виконується за допомогою індикатора (пристрою реєстрації) після послідовного модуляційного та гетеродинного перетворення сигналів НВЧ діапазону і переносу енергетичних співвідношень в область низьких частот.

В процесі роботи вимірюють спектральну щільність потужності шумоподібних сигналів (СЩПШ) на окремих частотах діапазону 37,5-54 ГГц. Інтегральну потужність визначають розрахунковим методом:

$$P_{N \text{ інт}} = \frac{\sum_{i=1}^M \text{СЩПШ}(f)}{M} \Delta f, \quad (1)$$

де $\text{СЩПШ}(f)$ – спектральна щільність потужності шуму на i -й частоті діапазону джерела сигналу; $\Delta f = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$ – смуга частот, для якої вимірюється інтегральна потужність; M – кількість точок виміру у смузі частот.

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Вивчити принцип роботи апарату генератора еталонних сигналів, користуючись інструкцією з експлуатації.

3.2. Вивчити принцип роботи приймача радіометричного типу та процедуру вимірювання низькоінтенсивних сигналів за його допомогою.

3.3. Підключити стенд до мережі живлення.

3.4. Включити прилади, що входять до складу приймача: вимірювач відношення напруг В8-7, генератор Г4-141 та атенюатор ДЗ-37, почекати 15 хвилин і перейти до виконання наступних пунктів.

3.5. Провести підготовку до роботи вимірювача відношення напруг В8-7, для цього встановити:

– кнопки «Усереднення» та «x 1» – в положення «Увімкнено»;

– тумблер «Синхронізація» – в положення «Зовнішня».

3.6. Провести підготовку до роботи генератора синусоїдальних сигналів Г4-141 (гетеродин):

– встановити режим роботи «НГ» та «Ручний»;

– встановити початкову частоту генератора 52 ГГц;

– ручкою «Рівень виходу» встановити рівень вихідної потужності генератора 70 поділок за шкалою мікроамперметра.

3.7. Встановити показання атенюатора ДЗ-37 – на відмітку «30 дБ».

3.8. Підключити вихід генератора еталонних сигналів до входу приймача за допомогою перехідного хвилеводу. Ввімкнути генератор еталонних сигналів.

3.9. Увести ослаблення $A = 0, 1, 2 \dots 12$ дБ за допомогою атенюатора ДЗ-37 і записати показники атенюатора і вольтметра В7-26 у таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 — Передаточна характеристика приймача

A, дБ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, В										
СЦПШ										

3.10. Провести розрахунок СЦПШ за формулою

$$СЩПШ = \frac{(СЩПШ^* - СЩПШ_0)}{10^{A/10}}, \quad (2)$$

де $СЩПШ^* = 4,73 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц – спектральна щільність потужності шумових сигналів еталонного генератора;

$СЩПШ_0 = kT_0$ – $СЩПШ$ вхідного тракту радіоприймача;

A – показник атенюатора ДЗ-37.

Результати розрахунків занести в табл. 1.1.

3.11. Розрахувати за формулою (1) інтегральну потужність для ослаблення $A = 0$ дБ.

3.12. Побудувати залежність показника вольтметра В7-26 від $СЩПШ$ та визначити поріг чутливості радіоприймача.

3.13. Встановити ослаблення $A = 5$ дБ і повторити пп. 3.9 і 3.10 для різних частот. Результати вимірювань занести в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 — Частотна залежність вихідного сигналу приймача

f, ГГц									
СЩПШ, Вт/Гц · 10 ⁻²²									

3.14. Побудувати графік отриманої частотної залежності та визначити її нерівномірність.

3.15. Визначити смугу робочих частот приймача за рівнем мінус 1 дБ.

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань;
- 5) графіки отриманих передаточної та частотної залежностей вихідного сигналу приймача (див. табл. 1.1 і 1.2);
- 6) визначені величини чутливості та робочого діапазону;
- 6) висновки.

Контрольні запитання

1. Назвати основні типи приймальних пристроїв. Які з них більш поширені для мікрохвильового діапазону?
2. Пояснити структурну схему та принцип роботи радіометричного приймача, що досліджувався. Скільки перетворень частоти реалізовано?
3. Пояснити принцип роботи синхронного детектора. Які його переваги та недоліки у порівнянні детекторами іншого типу.
4. Пояснити термін «поріг чутливості» приймального пристрою. Як він визначається на практиці?
5. В чому особливість вимірювання шумових сигналів низької інтенсивності? Які схеми приймачів радіометричного типу існують?
6. Як визначається передаточна характеристика приймального пристрою?
7. Пояснити схему вимірювання ослаблення та КСХН за допомогою панорамного аналізатора.
8. Що входить до складу лабораторної установки?
9. Чому для визначення чутливості приймача слід враховувати власні шуми його вхідного тракту? Як вони залежать від температури навколишнього середовища?
10. Як вимірюються спектральна щільність потужності та інтегральна потужність сигналів НВЧ діапазону?

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРЕГУЛЯРНОСТЕЙ ВХІДНОГО НВЧ ТРАКТУ РАДІОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Мета та основні завдання роботи

Аналіз впливу нерегулярностей хвилеводного тракту на характеристики приймального пристрою мікрохвильового діапазону.

Визначення параметрів нерегулярності НВЧ тракту в заданому частотному діапазоні.

Основні теоретичні відомості

Під час експлуатації приймальних пристроїв НВЧ діапазону часто приходиться мати справу різноманітними нерегулярностями тракту, які спричинені стрибкоподібною зміною параметрів відрізків лінії передачі. Наприклад, у середині хвилеводів з метою узгодження пристроїв розміщують стрижні, діафрагми та інші елементи. Нерегулярність спотворює первинне поле хвилі, що поширюється в лінії передачі і виникають коливання вищого типу [1].

Через перерозподіл енергії між вищими типами коливань нерегулярність характеризується величиною реактивного опору. Вона може мати ємнісний характер, якщо енергія, що запасена у електричному полі, перебільшує енергію магнітного поля. У протилежному випадку нерегулярність еквівалентна індуктивності. Якщо величини енергії електричного і магнітного поля однакові, то має місце резонанс, і сигнал безперешкодно поширюється через лінію передачі. Еквівалентність будь-якої нерегулярності зосередженим елементам можлива лише в обмеженому діапазоні частот, смуга якого зростає зі зменшенням геометричних розмірів цієї нерегулярності у порівнянні з довжиною хвилі.

У випадку наближення розмірів до довжини хвилі змінюється співвідношення між накопиченими електричною та магнітною енергіями, що спричиняє зміну величини і навіть характеру еквівалентного опору.

Розглянемо нерегулярність прямокутного хвилеводу, який переважно використовується як елемент вхідного тракту приймачів високої чутливості.

Її основними параметрами є:

- а) повний опір $-Z_{\text{н}}$ (або провідність $Y_{\text{н}}$), який визначається геометрією хвилеводу та нерегулярного елемента;
- б) комплексний коефіцієнт відбиття входу елемента $-\Gamma$;
- в) комплексний коефіцієнт передачі $-\dot{T}$.

Повний опір вказаного елемента визначається як

$$Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}} = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}, \quad (1)$$

де Z_0 – хвильовий опір хвилеводу, $R_{\text{н}}$ и $X_{\text{н}}$ – активна и реактивна складова повного опору неоднорідності відповідно.

Якщо у неоднорідності та стінках хвилеводу відсутні втрати, то $Z_{\text{н}}$ має чисто реактивний характер. На практиці нерегулярності часто використовують для вузькосмугового узгодження. До таких елементів перш за все слід віднести діафрагми та штирі.

Діафрагми у хвилеводі

Діафрагмами називаються тонкі металеві перегородки, які частково перекривають поперечний переріз хвилеводу. У прямокутному хвилеводі переважно використовуються такі типи діафрагм: симетрична ємнісна та індуктивна, а також резонансна (резонансне вікно) – рис. 2.1а-в.

Ємнісна діафрагма зменшує висоту хвилеводу і спричиняє концентрацію силових ліній електричного поля, зосереджуючи певний запас реактивної енергії. Подовжні струми, що течуть через широкі стінки хвилеводу, частково відгалужуються на пластини діафрагми та замикаються у вигляді струмів зміщення у її зазорі. Тому еквівалентною схемою є зосереджена ємність, що увімкнена паралельно між провідниками двопровідної лінії (рис. 2.1а). Нормована реактивність ємнісної діафрагми визначається геометрією і дорівнює

$$b_{\text{с}} = \frac{4b}{\Lambda} \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi b'}{2b} \right) \right]. \quad (2)$$

У випадку індуктивної діафрагми (рис. 2.1б) подовжні струми течуть через протилежні широкі стінки хвилеводу і частково замикаються через пластини діафрагми, що з'єднані з цими стінками. Струми, що течуть через них

створюють додаткове магнітне поле. Тому еквівалентною схемою буде зосереджена паралельна індуктивність.

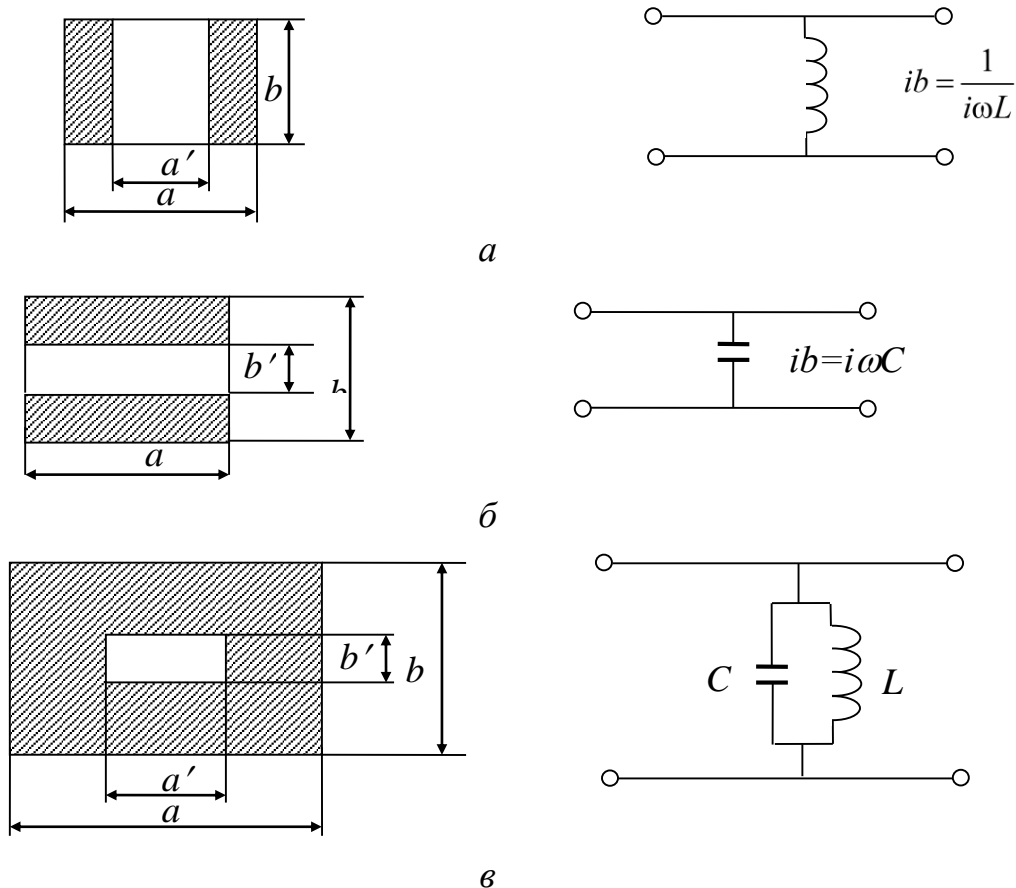


Рисунок 2.1 — Діафрагми у прямокутному хвилеводі

Нормована провідність індуктивної діафрагми залежить від геометричних розмірів і дорівнює

$$b_L = -\frac{\Lambda}{a} \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi a'}{2a} \right). \quad (3)$$

Ємнісна та індуктивна діафрагми застосовуються в основному як узгоджувальні пристрої, а також як елементи хвилеводних фільтрів і деяких співільнювальних систем.

Крім того, у мікрохвильовій техніці широко використовуються резонансні вікна (рис. 2.1в) — металеві перегородки з отворами, які мають малий коефіцієнт відбиття на резонансній частоті f_0 (резонансній довжині хвилі λ_0). Вікно може закриватись тонкою діелектричною пластиною. Такі діафрагми дозволяють розділити хвилевід на дві ділянки — вакуумну та невакуумну, не

порушуючи процес поширення хвиль. Резонансну довжину хвилі для заданих a , b , a' і b' можна розрахувати за допомогою формули

$$\lambda_0 = 2a' \frac{\sqrt{1-(b'a/a'b)^2}}{\sqrt{1-(b'/b)^2}}. \quad (4)$$

Мінімально можливий розмір a' , що задовольняє умові узгодження, дорівнює половині довжини хвилі у вільному просторі, а значення b' може бути практично нульовим. Це означає, що у принципі відбиття хвилі має бути відсутнім, якщо вікно має нехтовно малу висоту b' , а ширину a' , близьку до $\Lambda/2$.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Експериментальне дослідження нерегулярностей хвилеводного тракту приймача здійснюється за допомогою лабораторної установки, блок-схема якої показана на рис. 2.2. Основними елементами її є: генератор гармонічних НВЧ сигналів, частота яких змінюється в діапазоні від 25,86 до 37,5 ГГц; вимірювальна лінія з індикатором напруженості електричного поля; штучна нерегулярність, що досліджується та коротко замкнений шлейф змінної довжини (короткозамикач).

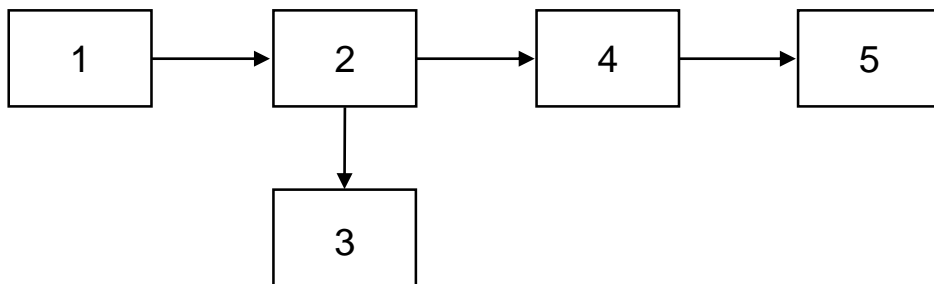


Рисунок 2.2 — Структурна схема лабораторної установки:

- 1) генератор НВЧ сигналів Г4-156; 2) вимірювальна лінія Р1-31;
- 3) індикатор (цифровий вольтметр В7-27А або іншого типу);
- 4) досліджувана нерегулярність; 5) короткозамикач

Через прямокутний хвилевід коливання поступають до вимірювальної лінії 2, за допомогою якої визначається розподіл електромагнітного поля вздовж

осі хвилеводу та повна провідність неоднорідності. Сигнал зонда вимірювальної лінії подається до індикатора 3.

У роботі досліджуються нерегулярності у вигляді тонких діафрагм, розміщених у хвилеводному тракті. Довжина хвилі Λ визначається за допомогою вимірювальної лінії як подвійна відстань між двома сусідніми мінімумами. Хвильовий опір хвилеводу Z_0 потрібно розраховувати для кожної частоти, на якій проводиться вимірювання.

Для основної моди H_{10} прямокутного хвилеводу

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}}, \quad (5)$$

де λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі; a – ширина хвилеводу; μ , ε – відносні магнітна та діелектрична проникності середовища усередині хвилеводу. Для хвилеводу з повітряним заповненням μ і ε дорівнюють 1.

2. Метод вимірювань

Реактивна провідність нерегулярності (діафрагми) визначається за допомогою метода зміщення вузлів. Слід зазначити, що цей метод використовується *тільки реактивних* нерегулярностей тракту (діафрагми, штирі, шлейфи тощо). Для проведення вимірювань до виходу відрізка хвилеводу з певною нерегулярністю приєднується коротко замкнений шлейф, довжину якого можна змінювати. Оскільки таке навантаження не має втрат, у тракті встановлюється режим стоячої хвилі. Змінюючи довжину шлейфа і спостерігаючи за зміщенням вузлів у вимірювальній лінії, можна визначити провідність неоднорідності, увімкненої між входом вимірювальної лінії та шлейфом.

Нехай вихід вимірювальної лінії (переріз 1 на рис. 2.3) навантажений коротко замкненим відрізком хвилеводу (короткозамкнений шлейф) довжиною $\Delta l_{\text{шл}}$. Якщо $\Delta l_{\text{шл}} = 0$, то розподіл напруженості електричного поля вздовж лінії передачі (суцільна крива на рис. 2.3) від перерізу короткого замикання у напрямку до генератора буде визначатись законом $\sin\beta l$, де l відлічується від перерізу 1 у бік генератора.

Встановимо довжину шлейфа рівною $\Delta l_{\text{шл}}$. При цьому розподіл напруженості електричного поля у лінії буде описуватись тим же законом, проте уся

картина стоячих хвиль зміститься у бік навантаження на відстань $\Delta l_y = \Delta l_{шл}$. Якщо шлейф у перерізі l замінити реактивним навантаженням з провідністю, $y_{шл} = -ictg(\beta\Delta l_{шл})$, то розподіл напруженості у лінії залишиться точно таким же, як при підключеному шлейфі, при цьому зсув вузла напруженості залишиться рівним Δl_y . Тому, якщо до лінії у перерізі l приєднати замість шлейфа невідому реактивність та виміряти зсув вузла Δl_y відносно положення вузлів при режимі КЗ в перерізі l , то її величину можна розрахувати за формулою

$$y_n = -ictg(\beta\Delta l_y).$$

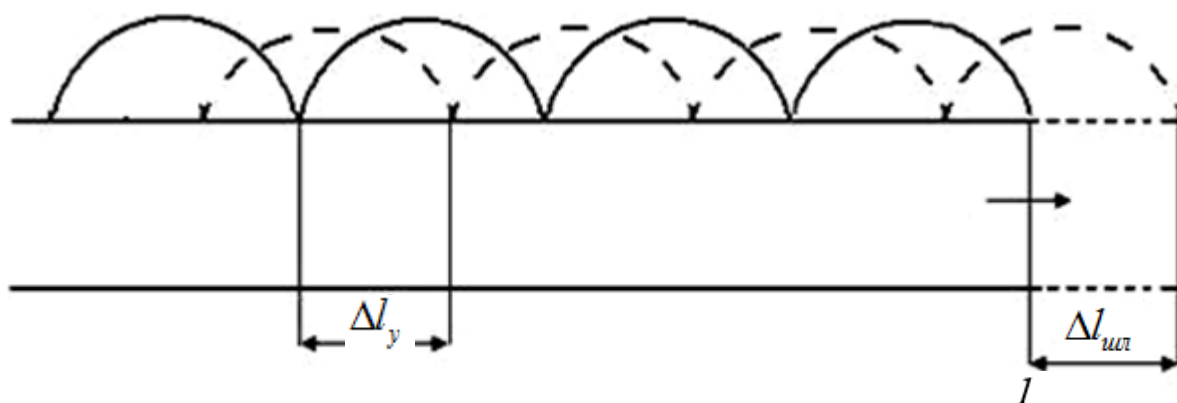


Рисунок 2.3 — Розподіл напруженості електричного поля вздовж лінії з реактивним навантаженням

Враховуючи вище викладене, для вимірювання провідності нерегулярності у хвилеводному тракті може бути використана така процедура.

Крок 1. Приєднаємо до виходу вимірювальної лінії у перерізі l (рис. 2.4) короткозамкнену секцію хвилеводу такої довжини $l_{кз}$, щоб її переріз короткого замикання точно відповідав площині, де (у кроці 2) буде увімкнена досліджувана нерегулярність (діафрагма). Досліджуючи розподіл напруженості електричного поля вздовж вимірювальної лінії, (суцільна крива на рис. 2.4), знаходимо положення його вузлів вздовж хвилеводного тракту.

Крок 2. Приєднуємо до виходу вимірювальної лінії прохідну хвилеводну секцію з досліджуваною нерегулярністю довжиною $l_{секц}$, яка у свою чергу навантажена короткозамкненим шлейфом змінної довжини. Підбираємо довжину шлейфа такою, щоб положення вузлів у вимірювальній лінії збігалось з

їх положенням для короткозамкненої секції. Це означає, що поршень короткозамикача знаходиться від неоднорідності на відстані, рівній цілому числу півхвиль $n\lambda/2$ (на рисунку $n = 1$), в результаті чого положення вузла напруженості E збігається з перерізом, у якому знаходиться неоднорідність, забезпечуючи у цьому перерізі режим КЗ. Отже еквівалентна провідність у перерізі неоднорідності стає нескінченною і не впливає на положення вузлів у лінії.

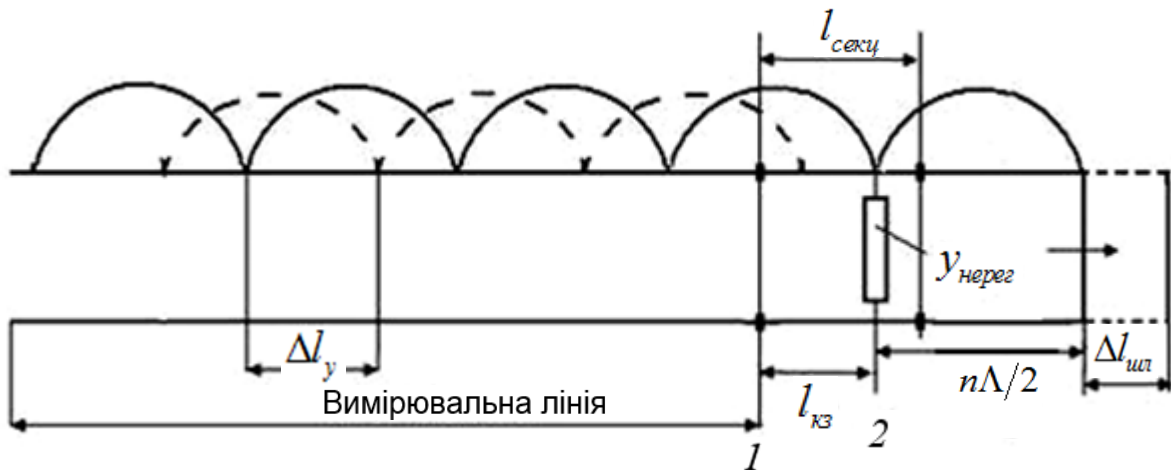


Рисунок 2.4 — Пояснення методу зміщення вузлів

Крок 3. Якщо збільшити довжину шлейфа на $\Delta l_{шл}$, то отримаємо новий розподіл напруженості (нанесено пунктиром), вузли якого будуть зміщені на відстань Δl_y відносно вузлів на кроці 2. Якби у перерізі 2 нерегулярність була відсутня, то Δl_y і $\Delta l_{шл}$ були б однакові. Проте, якщо в цьому перерізі вона присутня, то її провідність y_n додається до провідності шлейфа. Тому зсув вузла буде таким, якщо б ми увімкнули у перерізі 2 замість неоднорідності та реального шлейфа еквівалентний шлейф довжиною $\Delta l_{ше} = \Delta l_y$. Таким чином провідність еквівалентного шлейфа дорівнює сумі провідностей реального шлейфа і досліджуваної нерегулярності (в нашому випадку діафрагми)

$$y_{ше} = -ictg(\beta\Delta l_y) = y_{нерег} - ictg(\beta\Delta l_{шл}). \quad (6)$$

Звідси

$$y_{нерег} = ictg(\beta\Delta l_{шл}) - ictg(\beta\Delta l_y). \quad (7)$$

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Встановити частоту генератора f , задану викладачем і, підключаючи короткозамкнену секцію до виходу вимірювальної лінії виконати крок 1 п. 3.2. Результати вимірювання занести в таблицю, відмічаючи положення мінімумів напруженості поля.

3.2. Від'єднати короткозамкнену секцію і замість неї приєднати до виходу вимірювальної лінії досліджувану діафрагму та короткозамикач змінної довжини. Обертаючи мікрометричний гвинт, добитись, щоб мінімуми електричного поля у лінії опинились у тому ж положенні, як у п. 1. Показання мікрометричного гвинта короткозамикача записати.

3.3. Задати довжину короткозамкненого шлейфа $\Delta l_{\text{шл}}$, зміщуючи поршень короткозамикача на відстань 1 мм (або іншу, вказану викладачем) у бік генератора.

3.4. Визначити за допомогою вимірювальної лінії нове положення мінімумів напруженості електричного поля у хвилеводі та знайти зміщення їх відносно положення мінімумів у п. 1 (тобто визначити Δl_y).

3.5. Визначити за формулою (7) приведену провідність досліджуваної нерегулярності.

3.6. Повторити п. 1-5 для всіх нерегулярностей, виданих викладачем.

3.7. Порівняти результати вимірювань і розрахунку за формулами (2-4).

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) результати розрахунку приведеної провідності неоднорідності та висновки з порівняння їх з результатами вимірювань;
- 6) висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке нерегулярність мікрохвильового тракту і чим вона відрізняється від неоднородності? Як нерегулярності вхідного тракту приймача впливають на його чутливість?
2. Які види нерегулярностей Ви можете привести як приклад? Що називається паразитної нерегулярністю?
3. Як трансформуються напруженості електричного та магнітного полів поблизу нерегулярності?
4. Що таке ємнісна, індуктивна та резонансна діафрагма? Чому дорівнює ширина резонансної діафрагми в прямокутному хвилеводі?
5. Фільтр якого типу можна побудувати, використовуючи резонансні діафрагми?
6. Чи можна стверджувати, що вхідний опір відрізка хвилеводу з індуктивною діафрагмою завжди буде мати індуктивний характер?
7. Поясніть метод вимірювань провідності нерегулярності, який використовується в лабораторній роботі.
8. Чи можна застосовувати цей метод для вимірювання активних провідностей?
9. Чому дорівнює модуль коефіцієнта відбиття від двополюсника з чисто реактивною провідністю?
10. Чому довжину хвилі варто визначати як подвійну відстань між мінімумами, а не максимумами стоячої хвилі?
11. Чим можна пояснити розбіжність між значеннями виміряної та розрахованої провідності нерегулярності?
12. Які фактори впливають на точність визначення довжини хвилі за допомогою вимірювальної лінії?

Лабораторна робота 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФЕРИТОВИХ ПРИСТРОЇВ НВЧ ТРАКТУ

Мета та основні завдання роботи

Ознайомитись з принципом дії феритових пристроїв: вентилів і циркуляторів, а також їх застосуванням.

Визначити основні параметри і характеристик феритового вентиля і циркулятора.

Основні теоретичні відомості

1. Застосування та основні параметри феритових пристроїв

Феритовий вентиль (ФВ) — це невзаємний чотирьополіусник, що не створює суттєвого згасання для хвилі, що поширюється уздовж лінії передачі в одному (прямому) напрямку, проте вносить велике згасання для іншого (зворотного) напрямку передачі енергії.

ФВ знайшли широке практичне застосування для розв'язки різних частин НВЧ тракту між собою, а також усунування шкідливого впливу відбитих сигналів на передавальні та приймальні пристрої систем бездротового зв'язку.

Застосування ФВ значно покращує роботу НВЧ генераторів, сприяє зменшенню затягування частоти та спотворення спектра сигналів, усуває ефект довгої лінії тощо. Вентиль включається між генератором і навантаженням (рис. 3.1) таким чином, щоб енергія падаючої хвилі, яка поширюється від генератора до навантаження, проходила ФВ у прямому напрямку (воно вказується стрілкою на корпусі ФВ) з малими втратами, а відбита від навантаження хвиля, яка поширюється в зворотному напрямку, поглиналася у вентилі.

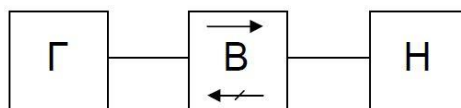


Рисунок 3.1 — Феритовий вентиль як розв'язуючий елемент

Основними характеристиками ФВ є:

- втрати, що вносяться в прямому напрямку (прямі втрати) $C_{\text{пр}}$;
- загасання у зворотному напрямку $C_{\text{зв}}$;
- діапазон і смуга робочих частот;
- коефіцієнт стоячих хвиль з напруги (КСХН) входу в смузі робочих.

1. Прямі втрати $C_{\text{пр}}$ визначаються як відношення в децибелах потужності на вході вентиля к потужності на його виході в прямому напрямку

$$C_{\text{пр}} = 10\lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вих}}) \text{ (дБ)}. \quad (1)$$

2. Прямі втрати $C_{\text{пр}}$ визначаються як відношення в децибелах потужності на вході вентиля к потужності на його виході в зворотному напрямку

$$C_{\text{пр}} = 10\lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вих}}) \text{ (дБ)}. \quad (2)$$

3. Ефективність вентиля (якість розв'язки) можна характеризувати вентильним числом (добротністю) — відношенням ослаблень зворотної та прямої хвиль, вираженим у децибелах

$$V = C_{\text{зв}}/C_{\text{пр}}. \quad (3)$$

У реальних конструкціях ФВ $C_{\text{пр}}$ зазвичай складає величину від 0,1 до 1,5 дБ, а $C_{\text{зв}}$ — від 10 до 70 дБ. КСХН при цьому не перевищує 1,2. Залежно від застосування та умов експлуатації ФВ вибирають із такими характеристиками, щоб вони повною мірою задовольняли певним вимогам, тобто. Необов'язково мати одночасно високі показники за всіма характеристиками.

Феритовий циркулятор — багатополісний пристрій для спрямованої передачі енергії електромагнітних коливань між його плечима згідно з порядком їх чергування. Це обумовлено властивістю намагнічених феритів.

Розрізняють такі феритові циркулятори:

Y-циркулятор із зосередженими параметрами (в діапазоні 0,1-1 ГГц), не-взаємний фазовий зсув у якому реалізується за допомогою намагніченого феритового зразка та системою індуктивно зв'язаних витків;

Y-, T- и X-циркулятор з розподіленими параметрами на основі ліній, що використовуються в діапазоні 1-100 ГГц.

Хвилеводний Y-циркулятор виконується на базі Y-трийника в *H*-площині (рис. 3.2). У середині діелектричної втулки розміщено феритовий циліндр, намагніченій поперечно за допомогою зовнішніх дискових магнітів. Хвиля, що

поступає у плече 1 циркулятора поділяється на дві, що огинають ферит з двох боків. Области існування вектора магнітного поля з круговою поляризацією для цих хвиль знаходяться у фериті, а напрями обертання векторів відносно поля підмагнічування у них протилежні.

Через нерівність значень магнітної проникності μ_+ і μ_- хвилі, що огинають феритовий зразок, мають різні фазові швидкості. Розміри та параметри феритового циліндра підбрані таким чином, щоб до виходу 2 хвилі приходили у фазі, а до виходу 3 — протифазно.

Відповідно, через осеву симетрію порядок передачі потужності для плечей такий: 1-2-3-1.

Діелектрична втулка у конструкції Y-циркулятора підвищує стабільність його характеристик при зміні температури та поля підмагнічування.

Циркулятор аналогічно вентилю характеризується прямими втратами $S_{пр}$ і розв'язкою $S_{зв}$, які визначаються за формулою (2).

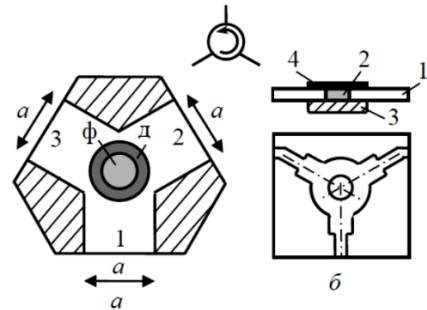
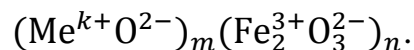


Рисунок 3.2 — Феритовий циркулятор хвилеводної (а) і мікросмужкової (б) конструкції

2. Властивості феритів у надвисокочастотному полі

Структура феритів

Основним «робочим тілом» ФВ є феритова пластина або феритовий стрижень. Ферит — магніто-діелектричний матеріал з кристалічною структурою. До його складу входить окис заліза Fe_2O_3 , а також оксиди інших матеріалів. Склад фериту можна описати формулою



Ферити — це тверді тіла, які створюються спіканням порошку окису заліза з оксидами нікелю, цинку, марганцю, хрому, міді та ін. Особливістю феритів є поєднання властивостей хорошого діелектрика ($\sigma = 0,0005-0,002$) і ферромагнетика ($\mu = 10-70$). Початкова відносна магнітна проникність НВЧ феритів у слабких низькочастотних полях $\mu = 10-3000$. На НВЧ за відсутності постійного магнітного поля вона лише незначно відрізняється від одиниці.

Феромагнітний резонанс

Якщо електрон розглядати як електрично заряджений об'єкт, що обертається навколо власної осі, то у багатьох відношеннях він нагадує механічний гіроскоп (джигу), що має власний механічний момент кількості руху \mathbf{s} і магнітний спіновий момент \mathbf{m} , які виникають завдяки обертанню електрона і спрямованими в протилежні сторони. У присутності зовнішнього постійного магнітного поля напруженістю \mathbf{H}_0 , яке збігається з напрямком \mathbf{m} (рис. 3.3а), на електрон почне діяти пара сил, тобто момент обертання. Під дією цього моменту спини електрона прагнуть орієнтуватися у напрямку прикладеного поля, прецесуючи подібно гіроскопу навколо осі, яка збігається за напрямком з \mathbf{H}_0 , утворюючи з ним правовинтову систему.

Частота вільної прецесії, яка називається частотою феромагнітного резонансу, може бути визначена з формули

$$\omega = \gamma H_0. \quad (4)$$

де H_0 – напруженість діючого постійного магнітного поля в ерстедах; $1\text{E}=1000/\pi \approx 80$ (А/м);

$\gamma = 2,8$ МГц/Е – гіромагнітне відношення електрона, тобто відношення модуля його магнітного моменту m до модуля механічного моменту s .

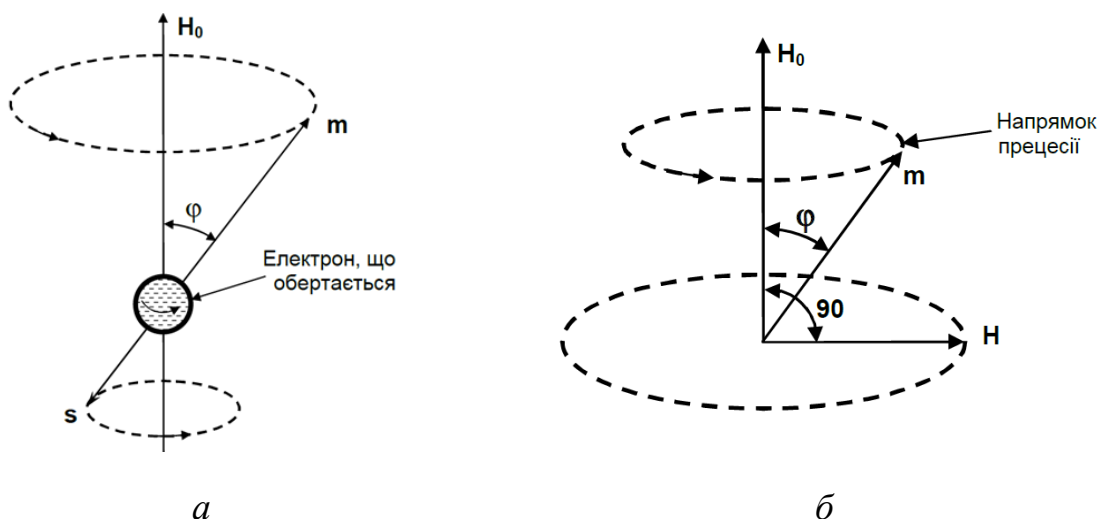


Рисунок 3.3 — Прецесія магнітного моменту електрона у постійному (а) та змінному (б) магнітному полі

За відсутності втрат вільна прецесія тривала б з постійним кутом φ . У реальних же ферромагнітних середовищах завжди мають місце втрати, тому кут φ починає швидко зменшуватися (кінець вектора \mathbf{m} рухається по спіралі, що згортається). Через час порядку 10^{-8} с вільна прецесія практично повністю зникає, вектори магнітних спінових моментів всіх електронів встановлюється паралельно \mathbf{H}_0 , і ферит намагнічується до насичення. Якщо присутнє високочастотне магнітне поле \mathbf{H} , з круговою поляризацією та частотою в напрямку, перпендикулярному \mathbf{H}_0 (рис. 3.3б), то при збігу напрямків обертання \mathbf{m} і \mathbf{H} у ферриті спостерігається так звана вимушена прецесія, зростання амплітуди якої (тобто збільшення φ) обмежене магнітними втратами. В результаті настає такий режим ($\varphi = \text{const}$), при якому енергія високочастотного магнітного поля розсіюється у вигляді тепла в кристалічній решітці фериту.

При $\omega \neq \omega_0$ ефект взаємодії зменшується, і втрати у фериті знижуються. У разі протилежних напрямків обертання \mathbf{m} і \mathbf{H} поле НВЧ та речовина фериту практично не взаємодіють. Ферит для такого поля є діелектриком і поглинання енергії практично не відбувається. Описане явище називається явищем *ферромагнітного резонансу* і відіграє важливу роль у теорії та практиці застосування феритів в мікрохвильовому діапазоні. Розглянуте явище невзаємного резонансного поглинання електромагнітних хвиль при ферромагнітному резонансі в поперечно намагніченому ферит використовується в резонансних хвилеводних і коаксіальних феритових вентилях.

Отже у присутності постійного магнітного поля в залежності від поляризації хвилі (правої чи лівої) змінюватиметься її взаємодія магнітним моментом фериту. У свою чергу магнітна проникність для вказаних хвиль буде різною. Залежність дійсної частини μ'_+ комплексної магнітної проникності від H_0 для хвилі з правою поляризацією має резонансний характер, а уявна складова μ''_+ , яка характеризує втрати у фериті, максимальна для резонансу. Для лівополяризованої хвилі напрямок обертання поля та прецесії електронів протилежні, і резонанс неможливий, тому магнітна проникність μ'_- — дійсна і змінюється повільно. Типовий графік залежності вказаних величин від напруженості магнітного поля приведений на рис. 3.4.

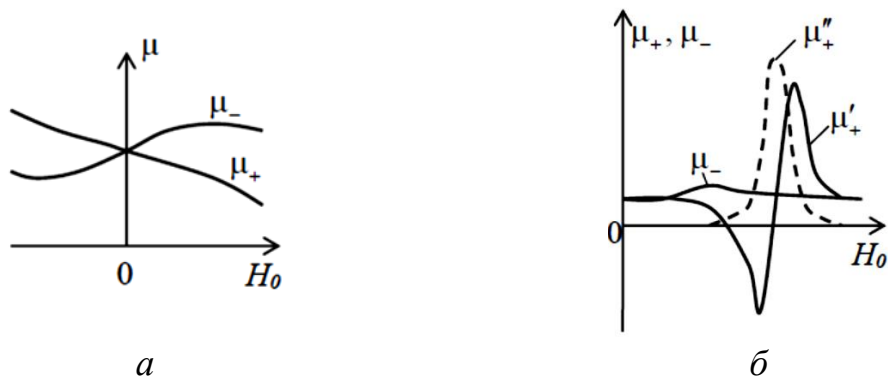


Рисунок 3.4 — Залежність магнітної проникності фериту від напруженості постійного магнітного поля поблизу 0 (а) та резонансу (б)

Ефект Фарадея

Ефект Фарадея полягає у в повороті площини поляризації електромагнітної хвилі під час її поширення вздовж вектора поля підмагнічення \mathbf{H}_0 . Якщо хвиля поширюється у гіротропному середовищі від т. А до т. В (рис. 3.5а) у напрямку вектора \mathbf{H}_0 електричний вектор повертається за годинниковою стрілкою на кут Δ , а для зворотного поширення хвилі (рис. 3.5б) — проти годинникової стрілки на той же самий кут Δ , якщо дивиться вздовж напрямку поширення. Цей факт пояснюється тим, що величина ефективною магнітної проникності для хвиль кругової поляризації має різні значення: μ_+ — для правої та μ_- — для лівої поляризації (рис. 3.5).

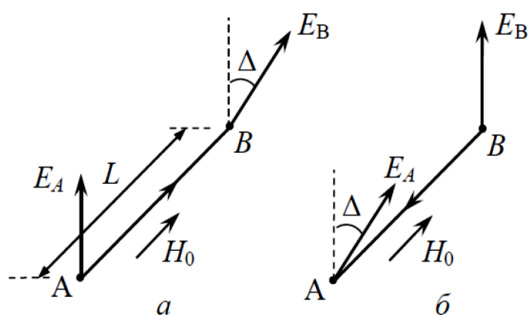


Рисунок 3.5 — Поворот площини поляризації електромагнітної хвилі, що поширюється в напрямку магнітного поля (а) та назустріч йому (б)

Поле лінійно поляризованої хвилі можна представити як суперпозицію полів двох хвиль з круговою поляризацією E^+ і E^- . Для прямого поширення

хвилі ($H_0 > 0$), оскільки $\mu_+ < \mu_-$, фазовий кут вектора \mathbf{E}^+ в т. В менш, ніж вектора \mathbf{E}^- . Підсумковий вектор \mathbf{E}_B повертається на кут

$$\Delta = (\varphi^- - \varphi^+)/2.$$

Аналогічно для зворотного напрямку поширення хвилі. Для слабких полів кут повороту прямо пропорційний напруженості поля H_0 та відстані L . Для великих значень H_0 настає насичення. Ефект Фарадея невзаємний: кут повороту площини поляризації не залежить від напрямку поширення хвилі.

Ефект зміщення поля

Зазначене явище спостерігається в прямокутному хвилеводі, в якому розміщені відносно товсті феритові пластини, намагнічені сильним поперечним полем \mathbf{H}_0 . Суть явища полягає у тому, що для падаючої хвилі (рис. 3.6а) ферит має негативну магнітну проникність. У такому разі стала поширення у фериті — уявна величина (див. рис. 3,4б). Хвиля усередині феритового зразка поширюватися не може і «витискується» з нього.

При зворотному напрямі поширення хвилі (рис. 3.6б) магнітна проникність фериту близька до одиниці. У цьому випадку феритова пластина веде себе як діелектричний хвилевід ($\epsilon=5\dots 20$), у якому поширюється поверхнева HE -хвиля. Її поле концентрується біля пластини (більш детально див. [2]). При подальшому збільшенні напруженості поля підмагнічування H_0 до значень, близьких до резонансних, загасання правополяризованої хвилі суттєво зростає, що спричиняє ще більшу різницю у загасанні хвиль, що поширюються у протилежних напрямках.

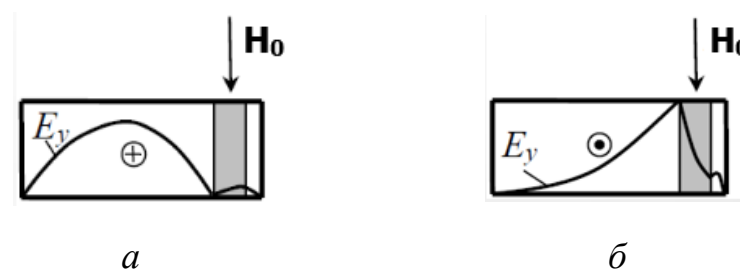


Рисунок 3.6 — Поле падаючої (а) та відбитої (б) хвилі типу H_{10} в прямокутному хвилеводі з підмагніченою феритовою пластинною

3. Основні типи феритових вентилів

Резонансний вентиль (англ.: *resonance isolator*) містить підмагнічену феритову пластину, що розташована у площині прямокутного хвилеводу, де магнітне поле має кругову поляризацію (рис. 3.7а). Поле підмагнічування створюється постійним магнітом і відповідає полю гіромагнітного резонансу. Для отримання невзаємного ефекту відповідно до викладеної вище теорії при конструюванні резонансного ФВ на базі прямокутного хвилеводу, що працює на хвилі H_{10} , бажано розташувати ферит у тій ділянці хвилеводу, де високочастотне магнітне поле має кругову поляризацію [2]. Падаюча хвиля, що має ліву поляризацію у фериті, незначно послаблюється, а відбита з правою поляризацією сильно загасає через втрати у фериті внаслідок феромагнітного резонансу.

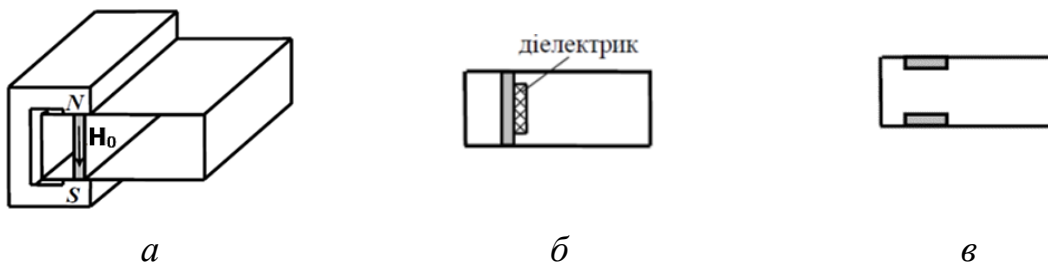


Рисунок 3.7 — Конструкція резонансного вентиля (а) і можливе розташування феритових пластин уздовж вузької (б) та широкої (в) стінки

Параметри поля підмагнічування і положення пластини у хвилеводі залежать від частоти, що зменшує смугу робочих частот. Для її розширення використовують діелектричні вставки (рис. 3.7б), які сприяють концентрації електромагнітного поля поблизу фериту. Для покращення тепловідводу феритові пластини розміщують на широких стінках хвилеводу (рис. 3.7в), проте така конструкція потребує значно більшої напруженості поля підмагнічення у порівнянні з попередньою конструкцією.

Фарадеївський вентиль (англ.: *Faraday isolator*) містить відрізок круглого хвилеводу з феритовим стрижнем, що розміщено на осі хвилеводу, зовнішнє джерело поля повздовжнього підмагнічування. З обох сторін круглий хви-

левід з'єднується через плавні переходи з прямокутним хвилеводом. Посередині переходу паралельно широкій стінці встановлено поглинаючу пластину. Довжину круглого хвилеводу з феритовим стрижнем і поле підмагнічування вибрано таким чином, що поворот площини поляризації складає 45° .

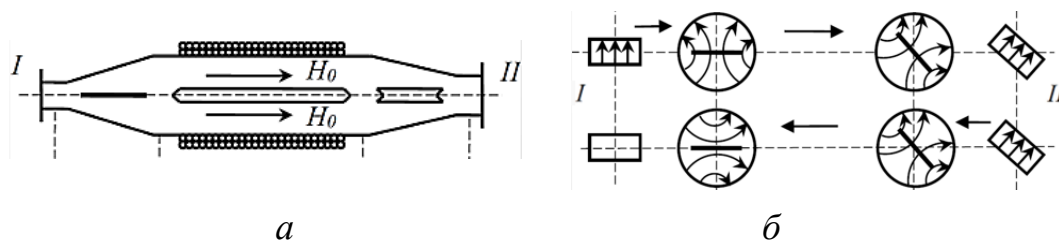


Рисунок 3.8 — Конструкція (а) і пояснення принципу роботи (б) фарадеївського вентиля

Вихідний прямокутний хвилевід також повернуто на кут 45° відносно вхідного. Тому у напрямі $II-I$ буде поглинатися, а у напрямі $I-II$ – ні.

Найчастіше фарадеївські вентиля, через простоту конструкції, використовуються в мм-діапазоні. Їх втрати складають близько 1 дБ, розв'язка — не менш 20 дБ, а КСХН — не більш 1,2. Напруженість поля підмагнічування H_0 лежить в межах 10-15 Е.

Вентиль зі зміщенням поля на прямокутному хвилеводі містить феритову пластину з поглинаючою металевою плівкою на поверхні (рис. 3.9). Тому відбита хвиля, яка концентрується біля фериту, поглинається. На падаючу хвилю плівка практично не діє. Вентилі зі зміщенням поля у порівнянні з резонансними мають суттєво меншою за масою магнітну систему, більший робочий діапазон частот, проте вони можуть застосовуватися при відносно невеликих рівнях НВЧ потужності.

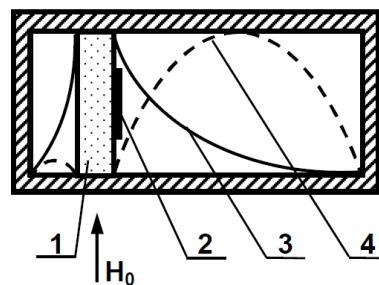


Рисунок 3.9 — Вентиль на основі ефекту зміщення поля: 1 – феритова пластина; 2 – поглинаюча плівка; 3 – розподіл поля зворотної хвилі; 4 – розподіл поля прямої хвилі

Вентиль на основі циркулятора. *Циркулятором* називається багатоплюсний пристрій для спрямованої передачі енергії електромагнітних коливань між його плечима відповідно до порядку їх чергування. У феритовому циркуляторі цей порядок визначається напрямком постійного магнітного поля, що прикладене до нього. У багатьох випадках циркулятори використовуються як вентилі для усунення хвилі, відбитої від навантаження. Схема триплечого циркулятора у ролі узгоджувального вентиля зображено на рис. 3.10а.

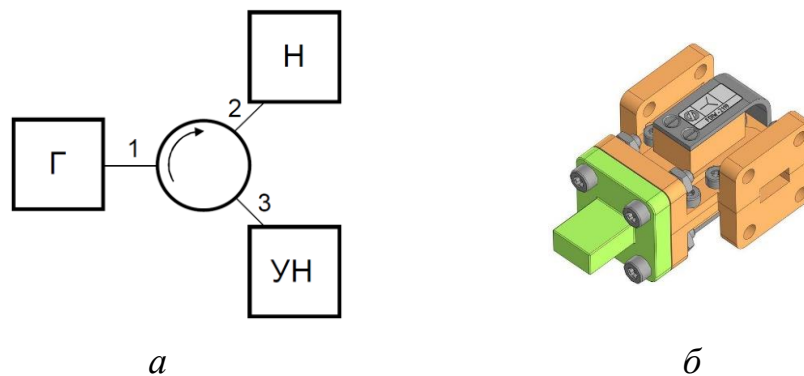


Рисунок 3.10 — Структура (а) та зовнішній вигляд (б) вентиля на основі феритового циркулятора

Потужність від НВЧ генератора G надходить у плече 1 циркулятора і проходить у плече 2, до якого підключено робоче навантаження (наприклад антена). Відбита від навантаження H хвиля повертається до плеча 2 циркулятора і проходить у плече 3, яке з'єднане з узгодженим навантаженням $УН$. Якщо його коефіцієнт відбиття дуже малий, то зворотна хвиля, що повертається до генератора НВЧ, буде значно ослабленою.

Перевагою використання циркулятора у порівнянні з вентилями, розглянути вище є можливість зменшення ваги та габаритів. Крім того, енергія відбитої хвилі у такій конструкції поглинається не феритом, а зовнішнім узгодженим навантаженням, що дозволяє працювати з мікрохвильовими сигналами великої потужності та спрощує систему охолодження.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з лабораторного стенда з джерелом живлення змінної напруги, панорамного аналізатора Р2-69 та двох феритових пристроїв міліметрового діапазону (ДП), що досліджуються (рис. 3.11).



a



б

Рисунок 3.11 — Зовнішній вигляд лабораторної установки (*a*) та феритових пристроїв (*б*), що досліджуються

Панорамний аналізатор складається з блоків генератора хитної частоти (ГКЧ 69) та індикатора Я2Р-67, комплекту спрямованих відгалужувачів (СВ) і детекторних голівок.

2. Метод вимірювань

Вимірювання параметрів досліджуваних пристроїв проводиться стандартними методами. Порядок вимірювання вказано в технічному опису приладу Р2-69.

3. Завдання на лабораторну роботу

В заданому викладачем діапазоні визначити частотну залежність основних параметрів вентиля на ефекті Фарадея та циркулятора:

- втрат, що вносяться в прямому напрямку (прямі втрати) $S_{пр}$;
- загасання у зворотному напрямку $S_{зв}$;
- КСХН входу в смузі робочих.

3.1. Підготувати до роботи панорамний аналізатор Р2-69 згідно з технічним описом. Для цього необхідно з'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі і хвилі в одному напрямку і проведіть калібрування панорамного аналізатора. В даному випадку прилад повинен показувати власну АЧХ.

3.2. Встановити у хвилеводний тракт вентиль, причому позначка стрілки на ньому збігалася з напрямком поширення хвилі у вимірювальному НВЧ тракті. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти внесене ним ослаблення.

3.3. Виміряти амплітудно-частотну характеристику прямих втрат ($C_{пр}$) вентилля в зазначеному викладачем діапазоні. Результати вимірювань занести в таблицю 3.1, вказуючи в комірках відповідне значення параметра.

3.4. Встановити у хвилеводний тракт циркулятор, щоб позначка стрілки на ньому була протилежна напрямку поширення хвилі у вимірювальному НВЧ тракті. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти внесене ним ослаблення.

3.5. Виміряти амплітудно-частотну характеристику прямих втрат ($C_{зв}$) вентилля в зазначеному викладачем діапазоні. Результати вимірювань занести в таблицю 3.1, вказуючи в комірках відповідне значення параметра.

3.6. Спрямовані відгалужувачі підключити до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти КСВН його входу. Виміряти частотну залежність КСХН вентилля в заданому діапазоні. Результати вимірювань занести в таблицю 3.1.

3.7. З'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі та прохідної хвилі в одному напрямку, і перевірити калібрування Р2-69 згідно з технічним описом. При цьому прилад Р2-69 має показувати власну АЧХ.

Таблиця 3.1 — Частотна залежність параметрів вентилля

F, ГГц										
$C_{пр}$										
$C_{зв}$										
КСХН										

3.8. Повторити пп. 3.2-3.7 для циркулятора і занести результати вимірювань в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 — Частотна залежність параметрів феритового циркулятора

F, ГГц										
$C_{пр}$										
$C_{зв}$										
КСХН										

3.9 Визначити смугу робочих частот вентилів, у якій: $C_{пр} \leq 1,5$ дБ; $C_{зв} \geq 20$ дБ і $КСХН \leq 1,3$.

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань та графіки частотної залежності параметрів вентилів;
- 5) визначений діапазон робочих частот за вказаними в п. 3.9 критеріями;
- 6) висновки (у висновках має бути пункт щодо порівняння робочих діапазонів досліджених феритових вентилів).

Контрольні запитання

1. Що таке феритовий вентиль і де він використовується?
2. Які основні параметри феритового вентиля та циркулятора? Пояснити, чому їх називають невзаємними пристроями.
3. Які властивості феритів Ви можете назвати? До якого класу їх можна віднести за електричними та магнітними характеристиками?
4. Поясніть природу феромагнітного резонансу.
5. Як змінюється характеристики феритових матеріалів в залежності від поляризації електромагнітних хвиль, що у них поширюються, і зовнішнього постійного магнітного поля?
6. Поясніть природу ефекту Фарадея. Наведіть приклади його використання.
7. У чому полягає ефект зміщення поля? Чи залежить його існування від типу мікрохвильової лінії передачі?
8. Які типи феритових вентилів Ви можете назвати?
9. Для якого типу вентиля потрібна більша напруженість поля намагнічування? А для якого — менша?
10. Як потрібно розташовувати феритові пластини в резонансному вентилі, щоб збільшити його робочу потужність?
11. Вентиль якого типу має найбільшу смугу робочих частот?
12. Поясніть принцип роботи вентиля на ефекті Фарадея.
13. Що таке феритовий циркулятор?
14. Поясніть структуру та принцип роботи вентиля, побудованого на основі феритового циркулятора. В чому переваги такого вентиля у порівнянні з іншими?
15. Поясніть суть методу вимірювання основних параметрів феритових вентилів, який використовується в даній роботі.
16. Яким чином проводиться калібрування панорамного аналізатора?
17. Чим відрізняються схеми вимірювання прямих, зворотних втрат та КСХН?

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК PIN АТЕНЮАТОРА

Мета та основні завдання роботи

Ознайомлення з принципом дії електрично керованих атенюаторів мікрохвильового діапазону. Дослідження властивостей і характеристик атенюатора на розподіленому *pin*-діоді міліметрового діапазону.

Основні теоретичні відомості

Електрично керовані атенюатори (ЕКА) — один із ключових елементів мікрохвильової апаратури. Вони забезпечують ідеальний контроль амплітуди сигналів в широкому діапазоні частот із високою стабільністю та точністю без суттєвої зміни форми чи спектрального складу. Вони використовуються для каліброваного вимірювання рівня потужності сигналу, зниження чутливості характеристик вузла апаратури до змін імпедансу навантаження. В автоматизованій апаратурі НВЧ діапазону ЕКА певним чином змінюють коефіцієнт передачі, реалізують балансування каналів та узгодження міжкаскадних кіл, дозволяють реалізувати складні види модуляції сигналів.

1. Принцип роботи електрично керованих атенюаторів

Ключовим елементом ЕКА є *pin*-діод, структура яких містить сильно леговані *p*- та *n*- області, і високоомну *i*- область (базу), яка має товщину w від одиниць до сотень мікрометрів (рис. 4.1). Концентрація носіїв заряду в базі складає біля 10^{13} см^{-3} . Области *p* і *n*, як правило, сильно леговані (позначено p^+ , n^+), тому що часто використовуються безпосередньо для контакту з металевими виводами. Якщо джерело зовнішньої постійної напруги підключено плюсом до шару p^+ , а мінусом — до n^+ , то в *i*-області збільшується концентрація електронів та дірок до 10^{16} – 10^{17} см^{-3} . Через структуру тече постійний струм I_0 густиною I_0/S близько 10 А/см^2 . При зворотному зміщенні концентрація носіїв $Q_{\text{нак}}$ в *i*-шарі падає приблизно на порядок відносно початкового значення (10^{13} см^{-3}).

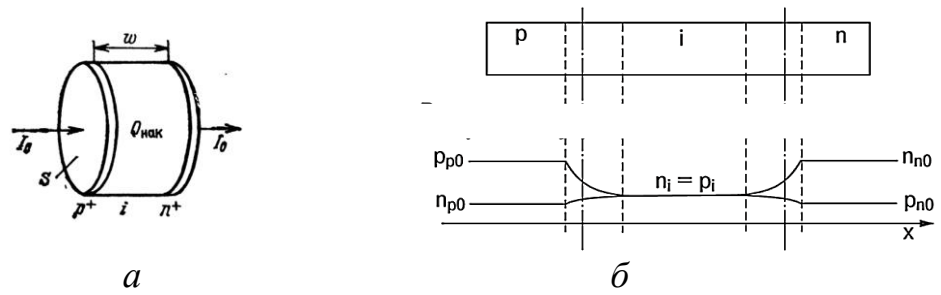


Рисунок 4.1 — Структура *pin*-діода (а) та її профіль легування (б)

Конструктивно *pin*-діоди можуть бути корпусними або безкорпусними. На рис. 4.2 представлені типові варіанти безкорпусних конструкцій діодів. Діоди найпростішої конструкції (рис. 4.2а) призначені для герметичних пристроїв (атенюаторів, модуляторів, перемикачів) і мають параметри товщина *i*-шару *w* — від 50 до 100 мкм, а діаметр структури *D* — від 0,5 до 3 мм. На рисунку позначено: 1 – омичний контакт, 2 – *p*-шар, 3 – *i*-шар, 4 – *n*-шар. Монтаж у виріб реалізується за допомогою паяння або механічного притиску.

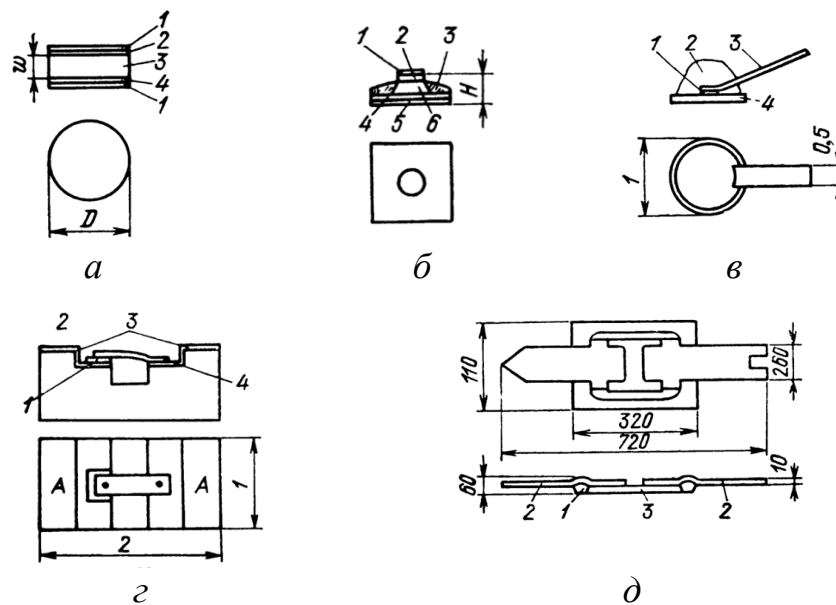


Рисунок 4.2 — Типові конструкції безкорпусних *pin*-діодів

Конструкція на рисунку 4.2б є мезаструктурою. Тут 1 і 5 – омичні контакти, 2 – *p*-шар, 3 – захисний шар зі скла, 4 – *n*-шар, 6 – *i*-шар. Діоди у вигляді мезаструктур використовуються у мікросмужкових пристроях мікрохвильового діапазону, а також як основний елемент корпусних діодів. Слід зазначити,

що мезаструктура є найбільш універсальним конструктивним елементом *pin*-діодів. Її ширина складає від 0,5 до 3 мм, а висота — від 0,15 до 0,3 мм. Покриття бокової поверхні шаром скла добре захищає діод від пробую та електричних витоків, що підвищує надійність роботи на великих рівнях сигналу.

Для включення в інтегральні лінії, зокрема мікросмужкової, передачі розроблені спеціальні форми діодів. На рис. 4.2в показано діод, що складається з напівпровідникової структури 1, металічної основи 4 і плоского виводу 3. Структура захищена від механічного впливу і частково від дії вологи пластмасовим покриттям 2. Конструкція діод, показаного на рис. 4.2г, має керамічну основу типу «ліжка». Тут 1 – напівпровідникова структура, 2 – керамічна основа, 3 – металізовані ділянки кераміки, 4 – з'єднувальна пласка перемичка. Металізованими площинками А діод припаюється до мікросмужкової лінії (МСЛ), яка має розрив верхньої смужки близько 0,5 мм, і встановлюється в лінію послідовно (рис. 4.3). Напівпровідникова структура покривається лаком, що захищає її від впливу механічних чинників та вологи.

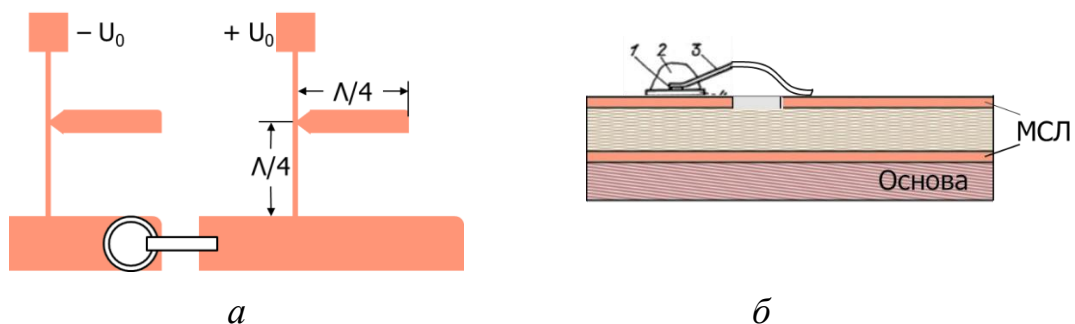


Рисунок 4.3 — Послідовне включення безкорпусного *pin*-діода в мікросмужкову лінію: а) вид зверху; б) вид збоку

Конструкція, яка наведена на рис. 4.2д (розміри вказано у мікрометрах), є мініатюрним поверхнево орієнтованим діодом з балочними виводами. Діод містить кристал кремнію 3, у якому є два кармани, що заповнені металом. Навколо карманів створені *p*-та *n*-області, між якими знаходиться *i*-область. Верхня поверхня кристала захищена окисом кремнію. Пластина кремнію закріплена на скляній основі (рамці) 1. Балочні виводи 2 призначені для монтажу діода у розрив мікросмужкової лінії. Малий об'єм *i*-області передбачає роботу

діода на малому рівні НВЧ потужності. Кращі зразки діодів даного типу мають невеликі значення ємності (0,01-0,02 пФ).

Корпусні діоди, як правило, призначені для використання в хвилеводних і коаксіальних пристроях НВЧ діапазону, в також в конструкціях, де поверхневий монтаж неможливо реалізувати. Крім того, в ряді випадків вони дозволяють підвищити швидкодію перемикачів та атенюаторів. На рис. 4.4 показана конструкція корпусного *pin*-діода, яка містить: мідний утримувач 1, керамічну втулку 2, кільце 3, кришку 4, вивід у вигляді смужки 5 і *pin*-структуру 6.

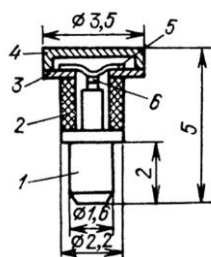


Рисунок 4.4 — Конструкція корпусного *pin*-діода

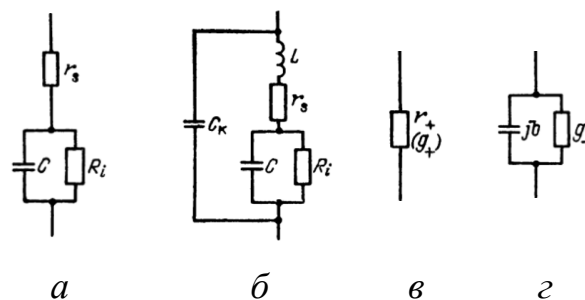


Рисунок 4.5 — Еквівалентна схема *pin*-діода

На рис. 4.5 представлені еквівалентні схеми *pin*-діодів: корпусного у відкритому (а) та закритому (б) стані та безкорпусного у відкритому (в) та закритому (г) стані. Закритий безкорпусний *pin*-діод представляють як паралельне з'єднання опору $R = 1-10$ кОм та загальної ємності діода $C = 0,3-1$ пФ.

У верхній частині сантиметрового діапазону і в міліметровому діапазоні використовують так звані розподілені *pin*-діодні структури, які мають довжину та ширину порівняно з довжиною хвилі. Проте висота, яка визначається в основному шириною бази w , залишається малою. Розподілені діоди встановлюються за допомогою паяння в діафрагму, яка розміщена в хвилеводі (рис. 4.6) і має бути узгоджена з ним. У разі подання на діод позитивного керувального зміщення, величиною 1-2 В опір бази падає через її наповнення вільними носіями струму — дірками з *p*-області та електронами з *n*-області.

Негативна півхвиля НВЧ коливання не встигає витягнути з бази діода просторовий заряд. Тому в ній залишаються вільні носії заряду, до яких передається енергія електромагнітної хвилі, що поширюється у хвилеводі.

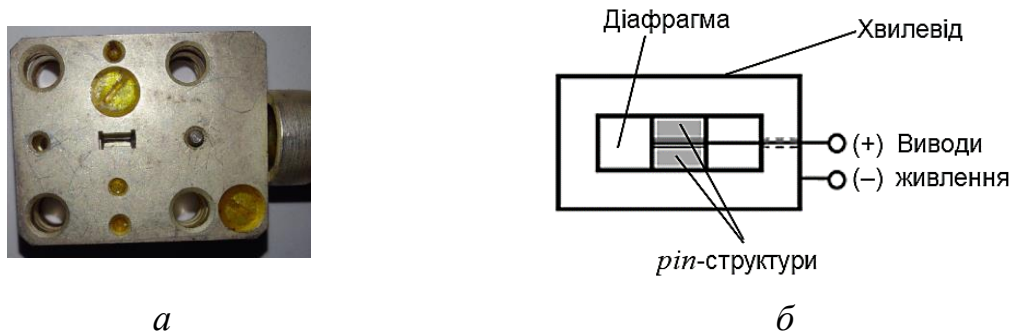


Рисунок 4.6 — Загальний вигляд (а) та пояснення конструкції (б) хвилеводного *pin*-атенюатора

Набута ними енергія розсіюється через взаємодію з атомами кристалічної решітки. Час увімкнення *pin*-діода складає 1 нс-10 мкс, вимикання — у декілька разів більше. Комутаційні *pin*-діоди дозволяють керувати НВЧ сигналами імпульсною потужністю до 100 кВт при середній потужності до 1 кВт.

2. Основні параметри і характеристики *pin*-атенюаторів

ЕКА, що побудовані на *pin*-діодах, часто називають *pin*-атенюаторами. Їхніми основними електричними характеристиками є:

- діапазон робочих частот;
- максимально допустимий струм керування $I_{\text{макс}}$ (мА)
- мінімальне (початкове) ослаблення (при $I = 0$), $A_{\text{мін}}$ (дБ);
- максимальне ослаблення (при $I = I_{\text{макс}}$), $A_{\text{макс}}$ (в дБ);
- КСХН входу (виходу);
- максимально допустима вхідна потужність, $P_{\text{макс}}$ (Вт).

Слід зазначити, що у закордонні виробники в документації на пристрій використовують два значення допустимої потужності $P_{\text{макс}}$ (*power handling*):

- 1) максимальна потужність, коли атенюатор ще функціонує без деградації своїх характеристик (*full performance*) і
- 2) максимальна потужність, при якій атенюатор не виходить з ладу, проте характеристики його деградують (*no damage*).

У другому випадку для оцінки лінійності пристроїв вводять такі показники як $P_{0,1 \text{ дБ}}$ і $P_{1 \text{ дБ}}$, що фіксують значення вхідної потужності, при яких внесені втрати збільшуються відносно номінальних (малосигнальних) паспортних значень відповідно на величину 0,1 та 1 дБ.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається зі стенда з джерелом живлення змінної напруги, панорамного аналізатора Р2-69 (рис. 3.11а), регульованого джерела постійного струму, міліамперметра та *pin*-атенюатора, що досліджується. Схема вимірювання ослаблення електрично керованого атенюатора (ЕКА) приведена на рис. 4.7а, а КСХН його входу (виходу) — на рис. 4.7б.

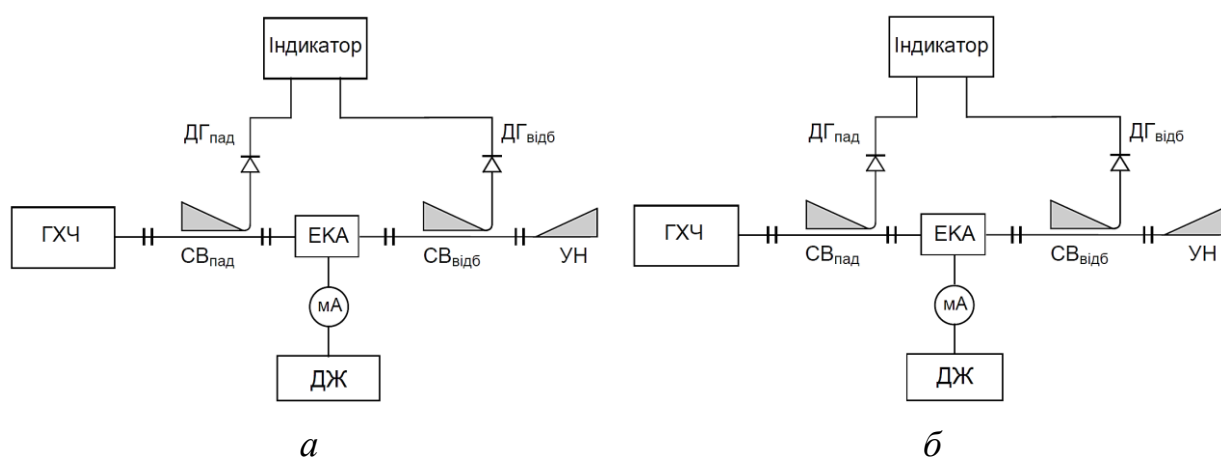


Рисунок 4.7 — Блок-схема лабораторної установки: а) в режимі вимірювання ослаблення атенюатора; б) в режимі вимірювання КСХН атенюатора

Установка містить панорамний аналізатор Р2-69, електрично керований атенюатор, джерело постійного струму для керування атенюатором, міліамперметр (мультиметр) для контролю струму керування. До складу панорамного аналізатора Р2-69 входять: генератор хитної частоти (ГХЧ), індикатор, два спрямованих відгалужувача падаючої (СВпад) та відбитої (СВвідб) хвиль з детекторними голівками (ДГпад, ДГвідб) та узгоджене навантаження (УН). Загальний вигляд панорамного вимірювального приладу Р2-69 (рис. 3.11) та принцип його роботи приведено в рекомендаціях до лабораторної роботи 3.

2. Метод вимірювань

Вимірювання характеристик електрично керованого *pin*-атенюатора проводиться стандартними методами. Вимірювання загасання проводиться відповідно до схеми рис. 4.7а, а КСХН — згідно зі схемою рис. 4.7б. Порядок вимірювання вказано в технічному опису панорамного аналізатора Р2-69.

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Підготувати до роботи панорамний аналізатор Р2-69 згідно з технічним описом. Для цього необхідно з'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі і хвилі в одному напрямку і проведіть калібрування панорамного аналізатора. В даному випадку прилад повинен показувати власну АЧХ.

3.2. Встановити в хвилеводний тракт панорамного вимірювача атенюатор, що електрично керується, і з'єднати його з джерелом постійного струму. Спрямовані відгалужувачі підключаються до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти послаблення, що вноситься ним (рис. 4.7а).

3.3. Виміряти амплітудно-частотну характеристику електрично керованого атенюатора в зазначеному викладачем діапазоні частот для трьох значень струму управління: 0, 10 і 20 мА. Результати вимірювань занести в таблицю 4.1, вказуючи в комірках відповідне ослаблення атенюатора.

Таблиця 4.1 — Ослаблення електрично керованого атенюатора

$F, \text{ГГц}$ $I, \text{мА}$										
0										
10										
20										

3.4. Виміряти залежність ослаблення атенюатора (у дБ) від струму керування для вказаної викладачем частоти. Результати занести в таблицю 4.2.

Визначити $A_{\text{макс}}$ (дБ) і $A_{\text{мін}}$ (дБ) та динамічний діапазон атенюатора як різницю $A_{\text{макс}} - A_{\text{мін}}$.

Таблиця 4.2 — Залежність ослаблення атенюатора від струму керування

$I, \text{мА}$										
$A, \text{дБ}$										

3.5. Спрямовані відгалужувачі підключити до досліджуваного пристрою таким чином, щоб можна було виміряти КСВН його входу. Виміряти частотну

залежність КСВН атенюатора в зазначеному викладачем частотному діапазоні для трьох значень струму керування: 0, 10 і 20 мА.

Результати вимірювань занести в таблицю 4.3, вказуючи в комірках відповідне КСХН атенюатора.

Таблиця 4.3 — КСХН електрично керованого атенюатора

F, ГГц										
0										
10										
20										

3.6. З'єднати спрямовані відгалужувачі падаючої хвилі та прохідної хвилі одному напрямку, і перевірити калібрування Р2-69 згідно з технічним описом. При цьому прилад Р2-69 має показувати власну АЧХ. У разі виявлення відхилення лінії нульових втрат більше, ніж допустима похибка вимірювань повторити калібрування приладу, а також попередні вимірювання.

3.7. Визначити смугу робочих частот атенюатора, у якій: $A \leq 1,2$ дБ (при $I = 0$); $A \geq 20$ дБ (при $I = 20$) і $КСХН \leq 2,0$.

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) графіки частотної залежності параметрів атенюатора та залежність ослаблення від струму керування;
- 6) визначений діапазон робочих частот за вказаними в п. 3.7 критеріями;
- 7) висновки.

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип роботи електрично керованого атенюатора? Де використовуються електрично керовані атенюатори, які в них переваги?
2. Чим відрізняється структура *pin*-діода від детекторного діода?
3. Пояснити ефект поглинання електромагнітної хвилі в *pin*-діоді?
4. Які типи безкорпусних *pin*-діодів для інтегральних ліній передачі Ви знаєте, поясніть особливості їх конструкції.
5. Які переваги та недоліки у корпусних і безкорпусних *pin*-діодів?
6. Привести і пояснити еквівалентну схему корпусного діода.
7. Що таке розподілений *pin*-діод, яким чином він встановлюється в хвиловодну лінію?
8. Які основні параметри електрично керованих атенюаторів?
9. Як визначається допустима вхідна потужність електрично керованого атенюатора?
10. Чим відрізняються схема вимірювання ослаблення атенюатора від схеми вимірювання КСХН його входу?
11. Що входить до складу лабораторної установки? Пояснити методи вимірювань основних параметрів електрично керованого атенюатора.
12. Як визначити смугу робочих частот атенюатора та його динамічний діапазон?

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА

Мета та основні завдання роботи

Ознайомлення з принципом роботи синхронного детектора та особливостями його застосування. Визначити передаточну характеристику синхронного детектора та оцінити її лінійність.

Основні теоретичні відомості

Синхронний детектор (СД) є важливою складовою багатьох приймальних пристроїв будь-якого діапазону частот. Він дозволяє значно підвищити їх чутливість. Крім того такі пристрої використовуються у вимірювальних приладах і системах за структурою схожих на приймачі електромагнітних хвиль. Наприклад, СД входить до складу індикаторного блоку панорамного аналізатора Р2-69 та йому подібних. В основу синхронного детектування покладено перемноження сигналів. Принцип роботи СД, на відміну від звичайного детектора на напівпровідникових діодах, не спричинює придушення слабкого сигналу. Тому його слід використовувати як детектор сигналів, рівень потужності яких менше, ніж у власного шуму вхідного тракту приймача.

Синхронний детектор (рис. 5.1) по суті є перетворювачем частоти, різницева частота вихідного сигналу якого дорівнює нулю. Тому в синхронному детекторі можна використати любую схему перетворювача, підбираючи частоту гетеродина рівною несучій частоті корисного сигналу, а на виході замість смугового фільтру проміжної частоти включити фільтр нижніх частот.

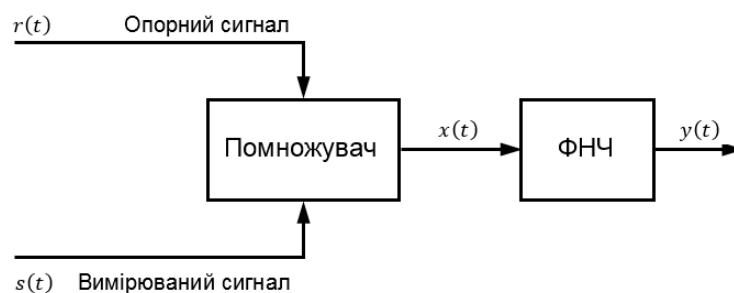


Рисунок 5.1 — Узагальнена структурна схема синхронного детектора

Нехай на входи помножувача подаються два гармонічних сигнали: опорний сигнал із постійною частотою і амплітудою $r(t) = R \cdot \sin(\omega_R t)$ та сигнал $S(t) = S \cdot \sin(\omega t + \varphi)$. Тоді вихідний сигнал матиме вигляд

$$x(t) = r(t) \cdot s(t) = R \cdot S \cdot [\cos(\omega - \omega_R) t + \varphi] - [\cos(\omega + \omega_R) t + \varphi]$$

В результаті такого перетворення перемноження виникають гармонічні складові на сумарній $(\omega + \omega_R)$ та різницевій $(\omega - \omega_R)$ частотах.

В синхронному детекторі використовується складова на різницевій частоті. Її виділяє фільтр нижніх частот (ФНЧ), який включений на виході помножувача. Він пропускає сигнали з частотами, нижчими за частоту зрізу фільтра ω_C і придушує більш високочастотні сигнали. Частота зрізу встановлюється набагато меншою ніж опорна частота ω_R . Тому ненульовий відгук на виході фільтра дадуть лише ті сигнали, частота яких близька до опорної.

У випадку, коли частота сигналу рівна опорній частоті (сигнали на входах помножувача синхронні – звідки і назва), в результаті з'явиться складова з нульовою різницевою частотою, тобто постійна складова. На вихід фільтра пройде лише ця постійна складова сигналу. Для фільтра з коефіцієнтом передачі $K_{\text{ФНЧ}} = 1$ у смузі пропускання вихідний сигнал дорівнює

$$y_s(t) = \text{const} = \frac{R}{S} \cos \varphi.$$

Маємо, що вихідна напруга синхронного детектора пропорційна амплітуді напруги вхідного сигналу і залежить від фазового зсуву відносно опорного сигналу.

Частотна вибірковість синхронного детектора визначається смугою пропускання фільтра нижніх частот і може бути зроблена дуже високою. Таким чином, синхронний детектор має важливі для обробки сигналів властивості:

- чутливість до фази та амплітуди вимірюваного сигналу;
- висока частотна вибірковість.

Основна задача синхронного детектування – реєстрація слабкого сигналу на фоні досить великих шумів та завад (рис. 5.2).

На систему подається імпульсний сигнал генератора. Після обробки у трактах високої (надвисокої) і проміжної частот і квадратичного детектування

слабкий сигнал з високим рівнем шумів підсилюється і надходить до СД. Опорним сигналом слугує вихід генератора. Якщо є потреба в компенсації фазового зсуву, який виникає у тракті приймального пристрою, то коло опорного сигналу містить фазообертач, який регулює фазу сигналу. Виділення сигналу з шуму виконується завдяки високій вибірковості синхронного детектора. Можлива реєстрація як амплітуди відгуку вхідного сигналу, так і зсуву його фази.

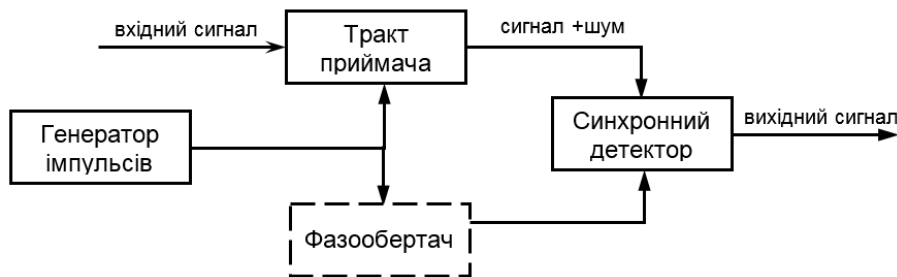


Рисунок 5.2 — Схема реєстрації низькоінтенсивного сигналу

Основним елементом синхронного детектора (рис. 5.3) є помножувач (демодулятор), зібраний на операційному підсилювачі $OU2$ та електронному ключі. Під дією керувального сигналу ключ замикає / розмикає неінвертуючий вхід $OU2$ на землю. При замкненому ключі $OU2$ працює як інвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення $K = -1$, а при розімкненому ключі — як неінвертуючий підсилювач з $K = 1$.

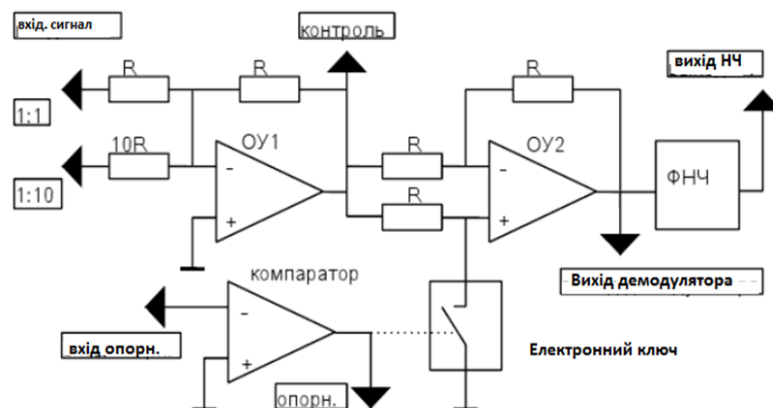


Рисунок 5.3 — Функціональна схема синхронного детектора

В результаті вихідний сигнал демодулятора є комбінацією знака опорного сигналу та амплітуди сигналу, що подається на вхід 1:1 (або 1:10).

Синхронний детектор має лінійну характеристику в межах змін вхідної напруги до 3-5 мВ. Чутливість власне схеми СД сягає одиниці мікрвольт.

Динамічний діапазон досліджуваного екземпляру схеми СД знаходиться в межах 31–33 дБ. Суттєвим є також те, що схема синхронного детектора дозволяє встановлювати нульове значення вихідної напруги при закритому вході НВЧ тракту приймального пристрою.

Більш детально процеси перетворення сигналу в каналі приймальних пристроїв НВЧ діапазону розглянуті в посібнику [2].

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з лабораторного стенда з джерелом живлення змінної напруги, макетів синхронного детектора та фазообертача, осцилографа OWON PDS5022S і мультиметра UT70A.

Макет синхронного детектора (рис. 5.4) містить власне детектор (СД), генератор прямокутних імпульсів (ОК), а також вхідне і вихідне кола обробки сигналу.

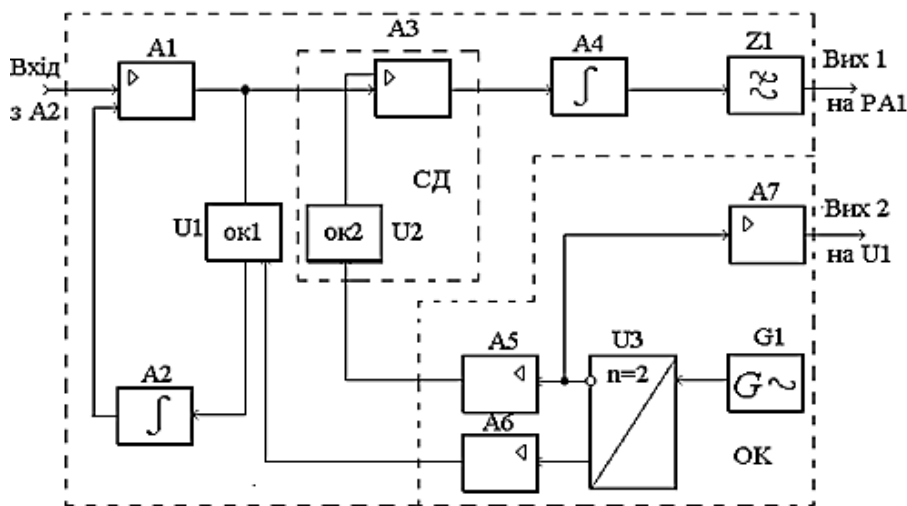


Рисунок 5.4 — Функціональна схема макета синхронного детектора

Конструктивно макет виконано в окремому корпусі (рис. 5.5), який має коаксіальні вхід «Вхід з А1» і виходи «Вих.1 на РА1» і «Вих. 2 на U1», а також роз'єм подачі живлення.



Рисунок 5.5 — Зовнішній вигляд макета синхронного детектора

2. Метод вимірювань

В процесі виконання лабораторної роботи вихід «Вих. 2 на U1» через фазообертач з'єднується зі входом «Вхід з А1». Фазообертач конструктивно, виконаний в окремому корпусі, має коаксіальні вхід, вихід та роз'єм живлення. Його зовнішній вигляд такий же, як у синхронного детектора.

Вимірювання постійної напруги на виході «Вих.1 на РА1» синхронного детектора проводиться стандартним методом за допомогою мультиметра UT70A відповідно до керівництва з експлуатації.

Форма імпульсів керування на виході «Вих. 2 на U1» реєструється за допомогою осцилографа OWON PDS5022S.

3. Завдання на лабораторну роботу

В заданому викладачем діапазоні вхідної імпульсної напруги провести вимірювання параметрів вихідного сигналу синхронного детектора.

3.1. Підготувати до роботи лабораторний макет та вимірювальні прилади.

3.2. З'єднати вихід синхронного детектора «Вих. 2 на U1» з осцилографом і подати напругу живлення.

3.3. Встановити амплітуду імпульсів 2-5 мВ. Виміряти частоту імпульсів, після чого встановити на виході «Вих. 2 на U1» амплітуду імпульсів 10 мкВ. Регулювання амплітуди проводиться за допомогою обертання шліця змінного потенціометра лабораторного макету.

3.4 З'єднати вихід синхронного детектора «Вих.1 на РА1» з осцилографом, а його вихід «Вих. 2 на U1» зі входом фазообертача.

3.5. Вихід фазообертача приєднати до входу «Вхід з А1» синхронного детектора. Змінюючи амплітуду імпульсів $U_{\text{вх}}$, на вході «Вхід з А1» синхронного детектора виміряти величину постійної напруги $U_{\text{вих}}$ на виході «Вих.1 на РА1». Результати занести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 — Залежність вихідної напруги детектора від напруги на вході

$U_{\text{вх}}$, мВ	0,01	0,05	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
$U_{\text{вих}}$, мВ										

3.6. Встановити на виході «Вхід з А1» амплітуду імпульсів $U_{\text{вх}} = 2$ мВ

Послідовно встановлюючи зсув фази φ між опорним та вимірюваним сигналами згідно зі шкалою фазообертача, виміряти постійну напругу $U_{\text{вих}}$ на виході «Вих.1 на РА1». Результати занести в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 — Залежність вихідної напруги детектора від фазового зсуву

φ , град	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{\text{вих}}$, мВ										

3.7. За результатами вимірювань оцінити динамічний діапазон синхронного детектора та лінійність його передаточної характеристики.

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) графіки частотної залежності параметрів атенюатора та залежність ослаблення від струму керування;
- 6) визначений діапазон робочих частот за вказаними в п. 3.7 критеріями;
- 7) висновки.

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип роботи синхронного детектора? В яких пристроях використовуються синхронне детектування?
2. Які переваги синхронного детектора? Які недоліки, на Ваш погляд він має?
3. Яку роль відіграє фільтр нижніх частот у складі синхронного детектора? Як вибирається значення його частоти зрізу?
4. Чому дорівнює частота вихідного сигналу синхронного детектора, у випадку рівності частот вхідного та опорного сигналів?
5. Чому дорівнює коефіцієнт передачі синхронного детектора?
6. Яку функцію виконує фазообертач у колі синхронного детектування?
7. З яких частин складається структурна схема синхронного детектора?
8. Пояснити функціональну схему макету досліджуваного синхронного детектора.
9. Описати метод вимірювань, який використовувався під час досліджень характеристик СД.
10. Як оцінити динамічний діапазон вхідного сигналу синхронного детектора?
11. Вхідний сигнал може мати форму імпульсів або синусоїди. У якому випадку вихідний сигнал буде більшим і чому?
12. Якщо використовувати лабораторний макет у приймачі радіометричного типу, то на який пристрій потрібно подавати сигнал з виходу «Вих. 2 на U1»?

Лабораторна робота 6

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕКТИВНОГО ПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Мета та основні завдання роботи

Ознайомитись с принципом роботи селективного приймача. Експериментально визначити чутливість та вибірковість пристрою. Провести аналіз отриманих даних та надати рекомендації щодо проектування вхідних трактів радіоприймальних пристроїв зазначеного типу.

Основні теоретичні відомості

1. Основні характеристики селективного приймача

Головна особливість бездротової системи зв'язку полягає в тому, що енергія переданих сигналів не зосереджена в області лінії передачі, а розподіляється в необмеженому просторі. Тому до радіоприймального пристрою доходить лише дуже невелика частина потужності переданих сигналів. Це одна з головних проблем, що виникають під час проектування апаратури бездротового зв'язку, зокрема приймальних пристроїв. Особливо це є актуальним в НВЧ діапазоні, оскільки зі зростанням частоти збільшується загасання радіохвиль, а також зростає рівень відбитих сигналів, призначених іншим абонентам, що можна вважати завадами. Тому найбільш вагомими характеристиками приймача є чутливість та вибірковість. Підвищення чутливості вирішує питання передачі сигналів на більшу відстань, а вибірковість дозволяє зменшити вплив завад, зокрема таких що створюються іншими передавачами радіомережі. Якщо ці дві проблеми розв'язати, то забезпечується надійний бездротовий зв'язок, що у свою чергу сприяє збільшенню абонентів, тобто пар «приймач – передавач». Приблизно необхідну чутливість передавача можна оцінити за відомою формулою Фрііса

$$P_t = P_r G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2,$$

де G_r і G_t – коефіцієнти підсилення антени відповідно приймача та передавача; r – відстань між ними, а λ – довжина хвилі переданого сигналу.

Чутливість — здатність пристрою приймати слабкі сигнали. В низькочастотних діапазонах діапазонах чутливість приймача характеризується величиною мінімальної ЕРС сигналу в антені E_{Amin} або мінімальною напругою на вході U_{Vxmin} , за умови якої забезпечується номінальна (зазначена в паспорті) вихідна потужність для заданого перевищенні сигналу над рівнем власних шумів пристрою. Якщо приймач узгоджений з антеною, $R_A = R_{Vxpr}$ (рис. 6.1), то

$$U_{Vx} = E_{Amin}/2$$

і вихідна потужність є оптимальною (номінальною) $P_{opt (ном)}$.

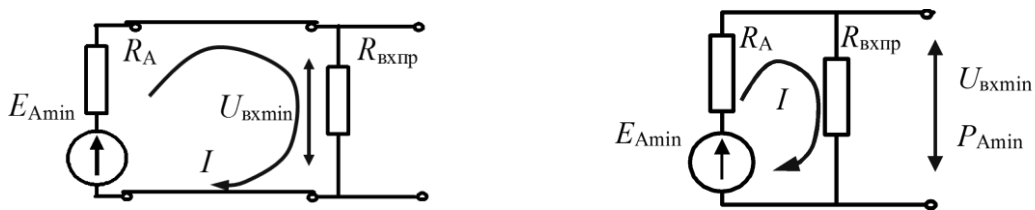


Рисунок 6.1 — Визначення параметрів чутливості приймача

На НВЧ чутливість оцінюють в одиницях потужності, що надходить на вхід приймача P_{Amin} .

Знаючи R_{Vxpr} і R_A , можна легко перерахувати E_{Amin} і P_{Amin} одне в інше. За умови узгодження ($R_A = R_{Vxpr}$):

$$P_{Amin} = IU_{Vx} (E_{Amin}/2R_{Vxpr})(E_{Amin}/2)$$

Отже

$$P_{Amin} = E_{Amin}^2/4R_{Vxpr}$$

Гранична чутливість приймача $P_{гран}$ — це потужність сигналу на його вході, за умови, що потужність корисного сигналу на виході лінійної частини приймача (на вході детектора) дорівнює потужності власних шумів системи антени і приймача, тобто відношенню сигнал/шум $\gamma = 1$.

Реальна чутливість приймача $P_{реал}$ — це потужність потужність на вході приймача, при якій потужність сигнал на виході перевищує потужність власних шумів у задану кількість разів:

$$P_{реал} = \gamma P_{гран}$$

Типові значення параметрів чутливості приймальних пристроїв НВЧ

$$P_{Amin} = 10^{-14} \dots 10^{-12} \text{ Вт,}$$

або

$$S(\text{дБ}) = 10\lg(P_{\text{Аmin}}/P_{\text{вих}}) = -140 \text{ дБ} \dots - 120 \text{ дБ};$$

$$S(\text{дБм}) = -110 \dots - 90 \text{ (дБм)} = [S(\text{дБ}) + 30] \text{ дБм}.$$

Розглянемо приклад. Нехай чутливість радіоприймача сягає -116 (дБм), що відповідає -146 (дБ) відносно 1 Вт. Таким чином

$$P_{\text{вх min}} = \frac{1}{10^{14,6}} \approx 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ (Вт)}.$$

Звідси знайдемо значення мінімальної напруги на вході

$$U = \sqrt{P_{\text{вх min}} \cdot R_{\text{вх пр}}} = \sqrt{2,5 \cdot 10^{-15} \cdot 50} \approx 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ (В)}.$$

Отже вхідна чутливість приймача дорівнює

$$U_{\text{вх пр}} \approx 0,35 \text{ мкВ}.$$

Частотна вибірковість оцінюється формою резонансної характеристики приймача (кривої вибірковості) або залежністю коефіцієнта підсилення $K(f)$ високочастотних каскадів приймача на несній частоті сигналу. Її прийнято характеризувати частотною залежністю нормованого коефіцієнта підсилення (передачі) приймального пристрою (рис. 6.2а)

$$\gamma = K(f)/K_0$$

де $K(f)$ – коефіцієнт підсилення на поточній частоті; K_0 – коефіцієнт підсилення на центральній частоті f_0 налаштування приймача. Прийнято дану характеристику будувати в логарифмічному масштабі (рис. 6.2б):

$$K_P(\text{дБ}) = 10\lg(P_{\text{вих}}/P_{\text{вх}}); K_U(\text{дБ}) = 20\lg(U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}).$$

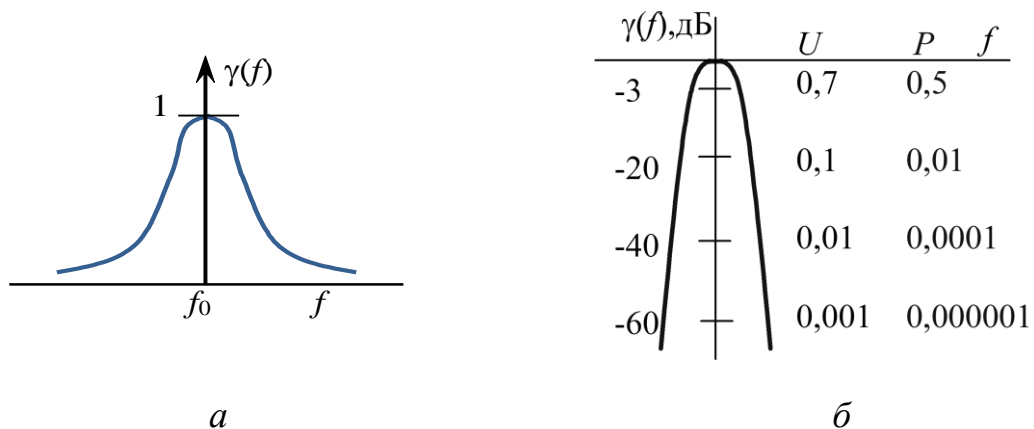


Рисунок 6.2 — Частотна залежність коефіцієнта передачі приймального пристрою в лінійному (а) та логарифмічному (б) масштабі

Смуга пропускання визначається за спадом підсилення на 3 дБ (рис. 6.3), або за зменшенням потужності в 2 рази, а напруги в 1,41

$$P_{0,707} = P_{0,7} = P.$$

Коефіцієнт прямокутності визначається таким чином.

Смуга P_γ розраховується для значень $\gamma = 0,1; 0,01; 0,001$ (раз) за напругою, що відповідає: $-20, -40, -60$ дБ.

Для більшості сигналів ідеальна частотна характеристика вибіркової приймача, має прямокутну форму і $K_{П\gamma} = 1$. (рис. 6.4а). Реальна характеристика прямокутності (рис. 6.4б) визначає ступінь придушення сусідніх паразитних каналів.

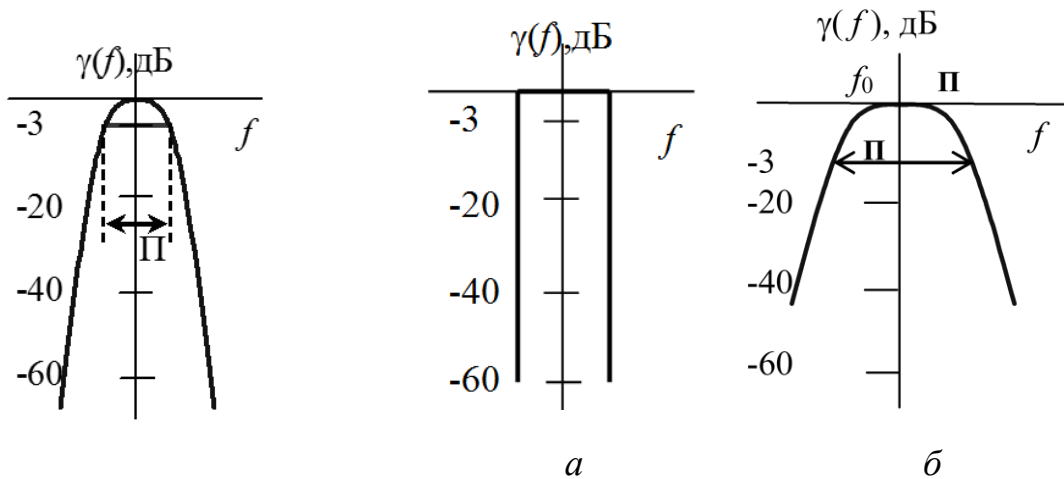


Рисунок 6.2 — Визначення смуги пропускання

Рисунок 6.3 — Форма частотної характеристики: ідеальна (а); реальна (б)

Придушення по сусідній станції (сусіднього каналу) σ_{cc} означає рівень ослаблення сигнал на частоті, що відрізняється від центральної частоти налаштування приймача на величину $\Delta f = \Pi$.

Діапазон частот визначає такої інтервал частотного діапазону, де приймач має забезпечувати нормальний прийом сигналів. Розрізняють приймачі з налаштуванням на фіксовану частоту і з плавною перебудовою частоти. Останні характеризуються коефіцієнтом перекриття діапазону частот

$$\alpha = f_{\max}/f_{\min},$$

де f_{\max} і f_{\min} – максимальна і мінімальна частоти робочого діапазону.

Динамічний діапазон (ДД)

Здатність приймача виявляти слабкий вхідний сигнал, і обробляти сигнали великого рівня без спотворення.

$$DD = 10\lg(P_{\max}/P_{\min}) \\ = 20\lg(U_{\max}/U_{\min})$$

Спотворення динамічного діапазону визначаються за амплітудною характеристикою приймача.

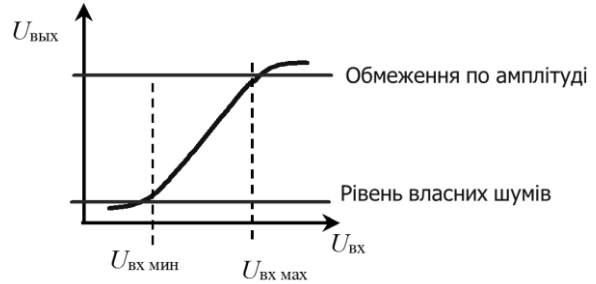


Рисунок 6.5 — Визначення динамічного діапазону приймача

2. Структура селективного приймача

Досліджуваний селективний радіоприймач належить до супергетеродинного типу, загальна структурна схема якого наведена на рис. 6.6.

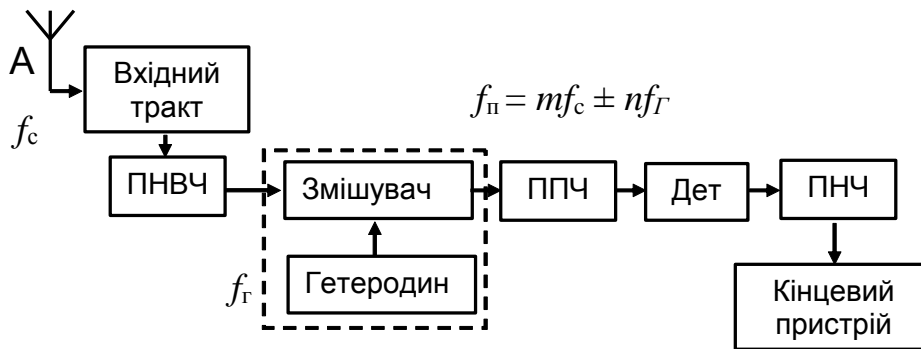


Рисунок 6.6 — Узагальнена структура приймального пристрою супергетеродинного типу

Основне підсилення до детектора здійснюється в даному пристрої здійснюється підсилювачами ППЧ на фіксованій частоті частоти $f_{\Pi} = |mf_c \pm nf_{\Gamma}|$, $n, m = 1, 2, 3 \dots$ (комбінаційне перетворення). Якщо $n = m = 1$ і відповідно, $|f_c - f_{\Gamma}|$, то маємо випадок простого перетворення.

Основні переваги супергетеродинного приймача:

1) можливість реалізації великого стабільного підсилення:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{ПНВЧ}} K_{\text{ППЧ}} K_{\text{ПНЧ}}$$

2) висока вибірковість, оскільки на f_{Π} можна реалізувати необхідну добротність: $\Pi = f/Q_e$, f_{Π} — фіксована і $f_{\Pi} \ll f_c$;

3) висока чутливість внаслідок пп. 1 і 2.

Основні недоліки супергетеродинного приймача:

- 1) відносна складність
- 2) наявність паразитних приймальних каналів.

Так для комбінаційного перетворення $f_{\Pi} = |mf_c \pm nf_r|$, $n, m = 1, 2, 3 \dots$ у припущенні, що $P_r \gg P_c$ маємо $f_{\Pi} = |f_c \pm nf_r|$ для $n = 1$ отримаємо:

$$f_{\Pi} = |f_c - f_r| \text{ і } f_{\Pi} = |f_s - f_r|.$$

При **виборі значення проміжної частоти** супергетеродинного приймача необхідно враховувати дві умови

1 умова. Частота f_{Π} має бути досить великою, щоб забезпечити задане ослаблення дзеркального каналу при реалізованій добротності контурів пресе-лктора ПНВЧ (рис. 6.6).

2 умова. Частота f_{Π} має бути достатньо малою, щоб забезпечити вузьку смугу приймача з метою реалізації великого коефіцієнта підсилення та приду-шення завад сусідньому каналу.

Порядок виконання роботи

1. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять прилад SMV 11 з комплектом вимірювальних антен FMA 11 як приймач НВЧ сигналів (рис. 6.7) та осцилограф (OWON PDS5022S або інший), який підключено до НЧ виходу SMV 11 для контролю обвідної сигналу, що приймається.



a



б

Рисунок 6.7 — Прилад SMV 11 (*a*) і антени FMA 11 (*б*)

Блок-схема лабораторної установки, що наведена на рис. 6.8 складається з двох частин: передавача і приймача з антеною. Передавач містить у своєму складі генератор Г4-143, амплітуда вихідного сигналу якого модулюється напругою низької частоти F_0 , що генератора M . Промодульований радіосигнал випромінюється передавальною антеною.

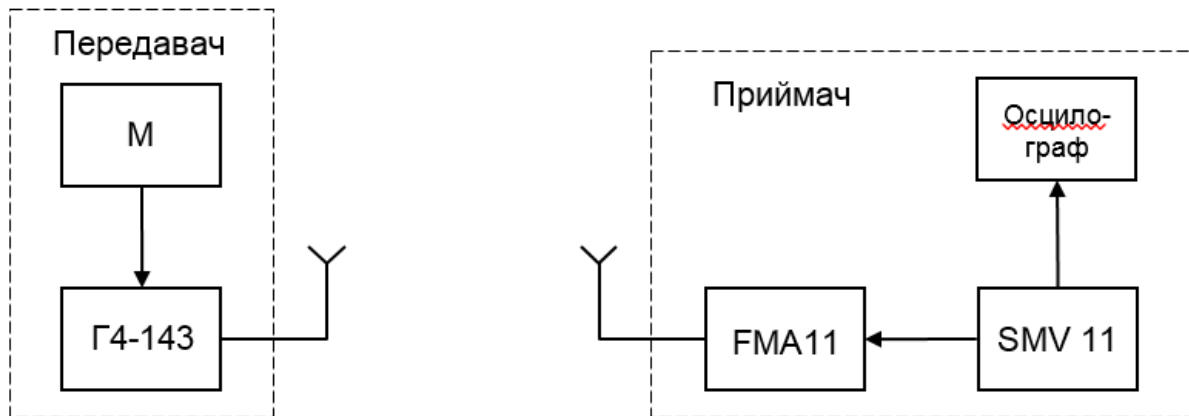


Рисунок 6.8 — Блок-схема лабораторної установки

Сигнал, що випромінюється, поступає на антену приймача (FMA 11) і далі на селективний вхід SMV11.

Сигнал обвідної частоти F_0 з низькочастотного входу SMV 11 подається на вхід осцилографа.

Рівень і форма реєстрованого сигналу залежить від орієнтації антени FMA 11. Оцінка амплітуди сигналу, що приймається, здійснюється за допомогою осцилографа, а точне визначення його напруги — за допомогою шкали індикатора SMV11 мікрровольтметра.

2. Метод вимірювань

Дослідження властивостей селективного приймача здійснюється за допомогою стандартних методів вимірювання параметрів електромагнітного випромінювання та електричних сигналів.

Визначення основних характеристик приймача проводиться згідно зі схемою, що представлена на рис. 6.8.

Порядок вимірювання напруженості електромагнітного поля описано у технічному паспорті прилада SMV11 та антени FMA 11.

3. Завдання на лабораторну роботу

3.1. Увімкнути прилади, що входять до складу лабораторної установки, та підготувати їх до роботи згідно з інструкціями з експлуатації.

3.2. Вибрати зручний режим його роботи осцилографа.

3.3. Перемикач внутрішнього атенюатора SMV11 встановити в положення 25-30 дБ.

3.4. Перемикач режиму вимірювань встановити в положення «AVlog», при цьому відлік рівнів сигналів, що аналізуються, слід вести за нижньою шкалою стрілочного індикаторного пристрою SMV 11 та цифрового індикатора атенюатора (показники сумуються).

3.5. Перемикач смуги пропускання приймача приладу встановити в положення «9 kHz».





3.6. Кнопки «▼» (калібровки), «▶» та «▶» потрібно відтиснути.

3.7. Ручку регулювання вихідного НЧ сигналу встановити в середнє положення.

3.8. За допомогою ручок настроювання частоти визначити параметри електричного поля у навколишньому середовищі:

- частоту (в МГц) та
- напругу (в дБмкВ).

При цьому треба слідкувати за зміною рівня сигналу за допомогою стрілочного пристрою приладу SMV 11 і своєчасно вводити додаткове ослаблення вхідного атенюатора за допомогою ручки «dBμV», щоб не перевантажити вхідний тракт приладу.

Максимальний рівень сигналу буде відповідати частоті знайденого сигналу. Щоб добитися точної настройки, треба користуватися ручкою « f » та слідкувати за індикатором « f ». Момент, коли починають блимати нижні риски індикатора, відповідає точному налаштуванню приладу на частоту вхідного сигналу.

Відлік значення частоти здійснюється за цифровим індикатором.

3.9. Визначити величину напруги (U) на вході селективного мікровольтметра, а також значення частоти (F_0) та амплітуди сигналу модуляції (U_0) за допомогою осцилографа.

3.10. Визначити рівень напруженості електричного поля за формулою

$$E_{\text{дБ}} = U + K,$$

де E визначається в дБ відносно 1 мкВ/м; напруга U визначалася за логарифмічною шкалою «AVlog» SMV 11 (п. 3.4) і виміряна в дБ відносно 1 мкВ; а коефіцієнт K для антени FMA 11 дорівнює $29,8 \pm 1$ (дБ) відносно 1 м^{-1} (згідно з технічним паспортом). Таким чином,

$$E = 10^{0,1E_{\text{дБ}}} \text{ (мкВ/м)}.$$

3.11. Змінюючи частоту генератора Г4-143, повторити пп. 3.8-3.10. Результати занести в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 — Залежність напруженості вхідного сигналу від частоти

f , МГц	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	28,5	29	30
E , мкВ/м										

3.12. Встановити фіксовану частоту генератора Г4-143.

3.13. Змінюючи частоту модуляції F_0 , провести вимірювання амплітуди НЧ сигналу за допомогою осцилографа. Результати занести в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 — Залежність напруженості вхідного сигналу від відстані

F_0 , кГц	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
E , мкВ/м										

3.14. Побудувати графіки виміряних залежностей.

3.15. Визначити смугу робочих частот селективного приймача

4. Зміст звіту

Звіт про виконання роботи має містити:

- 1) титульний аркуш;
- 2) формулювання мети роботи;
- 3) опис лабораторної установки;
- 4) результати вимірювань (з похибками вимірювань);
- 5) графіки залежності напруженості E від частот f і F_0 .
- 6) висновки.

Контрольні запитання

1. Який приймальний пристрій називається селективним?
2. Як змінюється потужність сигналу на вході приймального пристрою, якщо відстань від передавача змінюється?
3. Чим відрізняються гранична та реальна чутливість?
4. Що називається частотною вибірковістю приймача? Яким чином вона визначається на практиці?
5. Як визначається смуга робочих частот і динамічний діапазон приймального пристрою?
6. Пояснити поняття «коефіцієнт прямокутності». Як його визначити і яке його практичне значення?
7. Що називається коефіцієнтом перекриття діапазону частот?
8. До якого типу приймачів відноситься досліджуваний прилад SMV 11? Пояснити його узагальнену структурну схему.
9. Які основні вимоги висуваються в процесі вибору значення проміжної частоти супергетеродинного приймача?
10. З яких блоків складається лабораторна установка? Поясніть принцип їх роботи.
11. Як визначається напруга на вході селективного приймача з врахуванням коефіцієнта перетворення антени?
12. Як експериментально оцінити частотну вибірковість приймального пристрою? Які його блоки більш суттєво впливають на цю характеристику?

Список рекомендованої літератури

Основна

1. Ільницький Л.Я. Пристрої надвисоких частот та антени : Навч. посібн./ Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Щербина О.А. – К: НАУ, 2013. – 188 с.
2. Скрипник Ю. О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону: Навч. посібн./ Скрипник Ю.О., Манойлов В.П., Яненко О.П. – Житомир: Вид-во ЖІТІ, 2010. – 374с.

Додаткова

3. Pozar, D.M. Microwave Engineering / David M. Pozar – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.
4. Laverghetta T. S. Microwaves and wireless simplified / Thomas S. Laverghetta. – 2nd ed. – Boston-London: Artech House, Inc., 2005. – 300 p.