

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 1</i>

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»

протокол від 09 грудня 2021 р.  
№ 7

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

для проведення практичних занять  
з навчальної дисципліни

### **«Методи і засоби обробки НВЧ сигналів в радіотехнічних системах»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «магістр»  
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
освітньо-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»  
факультет інформаційно-комп'ютерних технологій  
кафедра біомедичної інженерії та телекомунікацій

Рекомендовано на засіданні  
кафедри біомедичної інженерії та  
телекомунікацій  
26 серпня 2021 р., протокол №10

Розробник: к.т.н., доцент кафедри біомедичної інженерії та  
телекомунікацій ЦИПОРЕНКО Віталій

Житомир  
2021

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 2</i>

## Зміст

<b>Практична робота №1.</b> Дослідження НВЧ пристрою прийому та обробки радіосигналу	3
<b>Практична робота №2.</b> Дослідження НВЧ перетворювачів частоти	11
<b>Практична робота №3.</b> Дослідження НВЧ фільтрів	26
<b>Практична робота №4.</b> Дослідження основних властивостей перетворення Фур'є при обробці радіосигналів	34
<b>Практична робота №5.</b> Дослідження НВЧ підсилювачів на польових транзисторах	47
<b>Практична робота №6.</b> Дослідження НВЧ підсилювачів на біполярних транзисторах	61
<b>Література</b>	79

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 3

## Лабораторна робота №1

### Дослідження НВЧ пристрою прийому та обробки радіосигналу

#### 1.1. Навчальні питання

1. Дослідження нерівномірності АЧХ ширококутового підсилювача.
2. Дослідження залежності коефіцієнта підсилення антени від виду поляризації сигналу на приймальному блоці.

#### 1.2. Навчальна мета

1. Експериментальне дослідження частотних та поляризаційних характеристик ширококутового підсилювача з перетворенням сигналу

#### 1.3. Теоретичні відомості

**Поляризація електромагнітних хвиль.** Поляризацією електромагнітної хвилі називають орієнтування вектора електричного поля щодо площини поширення. Поляризація визначає закон зміни напрямку й величини вектора напруженості електричного поля в даній точці за період коливань.

Площина, що містить вектори  $E$  і  $P$ , називається площиною поляризації. Кут  $\alpha$  між площиною поляризації й площиною поширення називається кутом поляризації.

Розрізняють кілька видів поляризації електромагнітних хвиль. Якщо вектор  $E$  лежить у площині поширення (тобто  $\alpha = 0$ ), а вектор  $H$  перпендикулярний до цієї площини, то незалежно від того, чи є нахил фронту хвилі чи немає, прийнято вважати поляризацію вертикальною (рис. 1.1,  $a$  та 1.1,  $b$ ). При цьому площина поляризації збігається із площиною поширення. Якщо вектор  $H$  лежить у площині поширення, а вектор  $E$  перпендикулярний до цієї площини, поляризація хвилі називається горизонтальною.

У тому випадку, коли вектор  $E$  займає довільне положення, він може бути представлений у вигляді двох складових: вертикальної  $E_v$  і горизонтальної  $E_h$  (рис. 1.2).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 4

Вертикальна складова  $E_v$  лежить у площині поширення  $S$ , а горизонтальна  $E_g$  – перпендикулярна площині  $S$  і паралельна до поверхні землі (горизонту). Випадок одночасного нахилу фронту хвилі й повороту площини поляризації представлений на рис. 1.3.

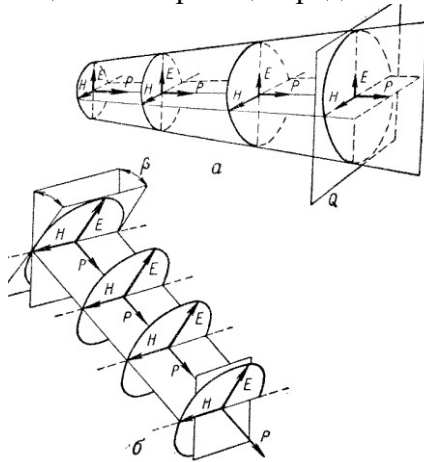


Рис. 1.1. Поляризація й нахил фронту електромагнітної хвилі: *a* – поляризація вертикальна, нахил фронту хвилі відсутній; *б* – поляризація вертикальна, фронт хвилі нахилений

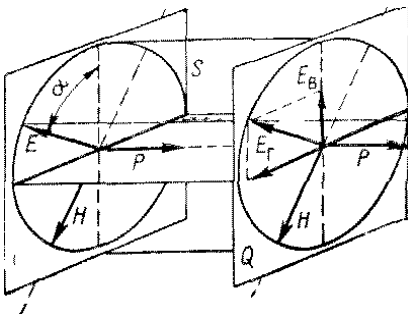


Рис. 1.2. – Поворот площини поляризації при відсутності нахилу фронту хвилі

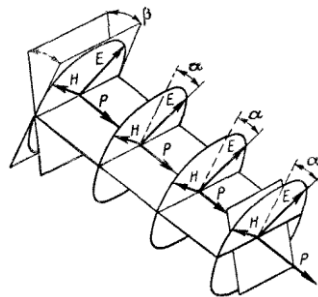


Рис. 1.3. – Поворот площини поляризації при нахилі фронту хвилі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 5

Характер поляризації радіохвилі визначається співвідношенням амплітуд і фаз  $E_1$  та  $E_2$ . На рис. 1.4 показано п'ять (через  $1/8$  періоду) миттєвих значень вектора  $E$  та його складових  $E_1$  і  $E_2$  протягом одного напівперіоду радіочастоти для різних випадків поляризації. Площина креслення збігається із фронтом хвилі. Рис. 4, *a* відповідає вертикальній поляризації вектора  $E$ , рис. 1.4, *б* – горизонтальній.

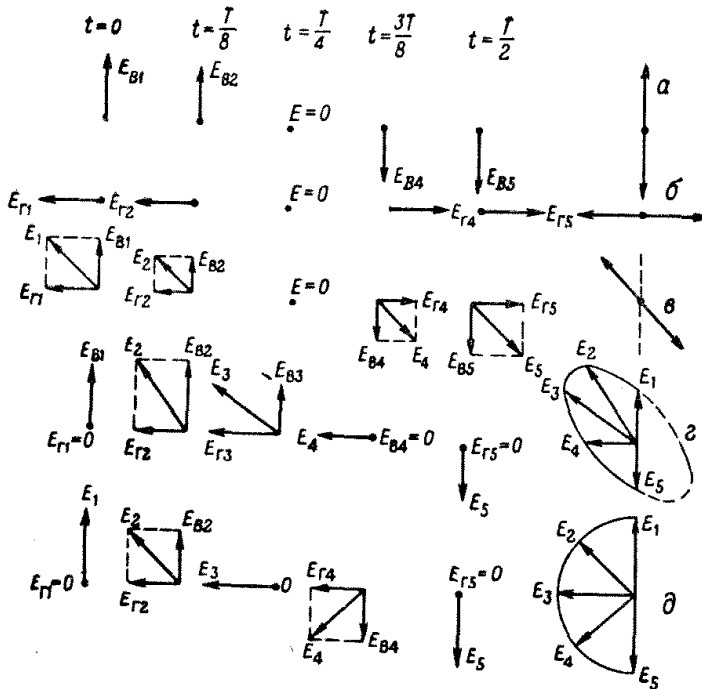


Рис. 1.4. Характер поляризації при різних амплітудних і фазових значеннях вертикальної й горизонтальної складових електромагнітної хвилі: *a* – вертикальна поляризація; *б* – горизонтальна поляризація; *в* – загальний випадок плоско-плоско-поляризованої хвилі; *г* – еліптична поляризація; *д* – кругова поляризація

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 6

Якщо вертикальна й горизонтальна складові вектора  $E$  перебувають у фазі, то вектор  $E$  змінює тільки свою величину, пульсуючи вздовж осі, що лежить у площині поляризації (рис. 1.4, в). Така радіохвиля називається лінійною або плоско-поляризованою.

Якщо ж між складовими  $E_e$  та  $E_z$  є зсув фаз, то хвиля стає еліптично поляризованою і вектор  $E$ , що дорівнює геометричній сумі взаємно перпендикулярних векторів  $E_e$  та  $E_z$ , змінює не тільки свою величину, але й напрямок. Кінець вектора  $E$  протягом періоду описує еліпс (рис. 1.4, г). Так як вектор  $P$  при цьому зберігає свій напрямок (перпендикулярно до фронту хвилі), то площина поляризації, що містить вектори  $P$  та  $E$ , безперервно обертається.

Якщо вертикальна й горизонтальна складові вектора  $E$  рівні по амплітуді й відрізняються по фазі на  $90^\circ$ , то в цьому випадку поляризація має круговий характер (рис. 1.4, д).

**Основні типи ППЧ.** У теперішній час в радіоприймачах НВЧ переважно застосовуються наступні типи підсилювачів проміжної частоти:

- ППЧ з одноконтурними каскадами, настроєними на одну частоту – ППЧ I типу;
- ППЧ з одноконтурними взаємно розстроєними каскадами – ППЧ II типу;
- ППЧ зі зв'язаними контурами в кожному каскаді – ППЧ III типу.

Блок-схема ППЧ I типу наведена на рис. 1.5. На цій схемі лампи зображені кружками, а коливальні контури – квадратами.

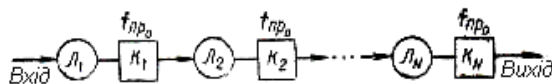


Рис. 1.5. – Блок-схема ППЧ I типу

Над квадратами позначені резонансні частоти коливальних контурів. Кожен каскад ППЧ I типу містить одну лампу та один

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 7

коливальний контур, причому контури всіх каскадів настроєні на номінальну проміжну частоту  $f_{np0}$ .

ППЧ II типу складаються з однієї або декількох однакових груп каскадів. Кожна група може містити два, три, чотири й більше одноконтурних каскадів, причому контури всіх каскадів у групі взаємно розстроєні.

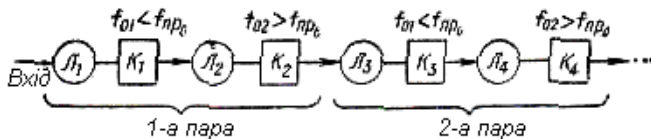


Рис. 1.6. – Блок-схема ППЧ II типу

ППЧ II типу при тому ж самому числі каскадів дозволяють одержати більшу ефективність, ніж ППЧ I типу, причому, чим більше каскадів у групі, тим вища ефективність. Однак збільшення числа каскадів у групі значно ускладнює настроювання й регулювання ППЧ, а також знижує його стійкість (стабільність характеристик). Тому практично застосовують ППЧ II типу з двома (рідше з трьома) взаємно розстроєними каскадами в групі.

Блок-схема ППЧ II типу з парами взаємно розстроєних каскадів наведена на рис. 1.6. Тут, як і в ППЧ I типу, кожен каскад містить одну лампу та один коливальний контур, але в кожній парі контур першого каскаду настроєний на частоту, меншу (більшу) за  $f_{np0}$ , а контур другого каскаду – на частоту, більшу (меншу) за  $f_{np0}$ .

ППЧ III типу (рис. 1.7) складається з однакових каскадів. Кожен каскад містить одну лампу й два зв'язаних контури, що настроєні на номінальну проміжну частоту.

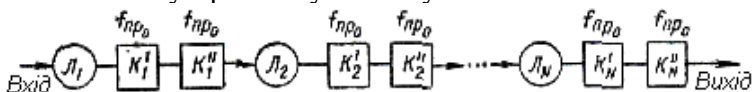


Рис. 1.7. – Блок-схема ППЧ III типу

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 8

#### 1.4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з передавального блоку, який включає генератор НВЧ – сигналів (10-12,5) ГГц і рупорну антену та приймального блоку, який включає дзеркальну антену, перетворювач частоти, що перетворює частоту сигналу на проміжну (0,95 – 2,05) ГГц, та панорамного аналізатора спектра.

Структурна схема приймального блоку зображена на рис. 1.8.

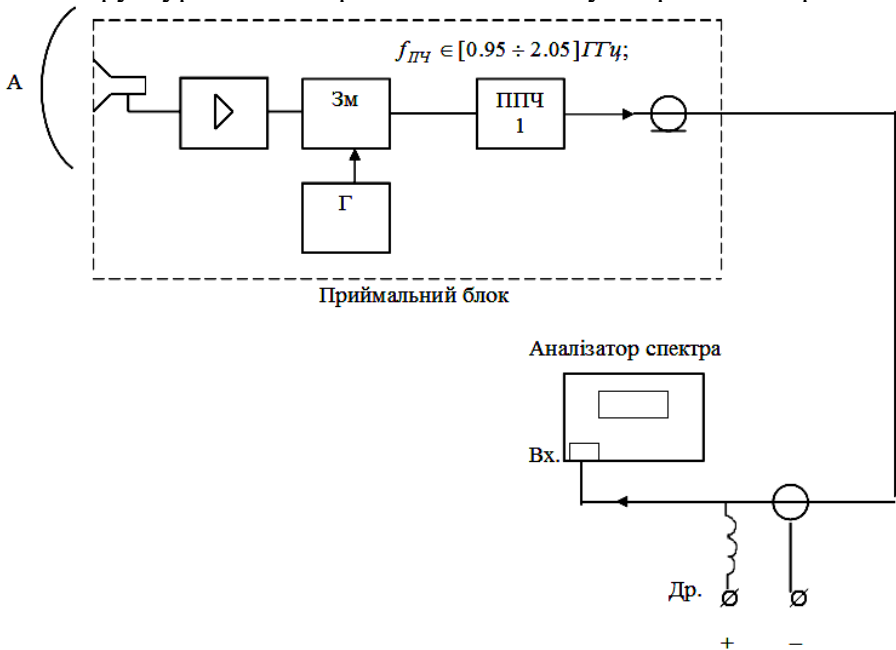


Рис. 1.8. – Структурна схема приймального блоку

#### 1.5. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з правилами експлуатації ВЧ генератора Г4-109 та аналізатора спектра. Вивчити теоретичні відомості.

2. Зібрати лабораторну установку. Для цього підключити передавальну рупорну антену до генератора Г4-109; підключити



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 9

вузол прийому дзеркальної антени до аналізатора спектра; підключити живлення та виставити напругу живлення  $U_{ж} = 18 \text{ В}$ .

3. Визначити нерівномірність АЧХ широкосмугового підсилювача. Вихідні умови: діапазон досліджуваних частот  $f \in [10,3 \div 12] \text{ ГГц}$ ; крок зняття даних  $h = 100 \text{ МГц}$ . Для цього виконати наступні дії.

3.1. Направити передавальну рупорну антену в сторону приймальної дзеркальної та добитися максимуму амплітуди сигналу.

3.2. На генераторі Г4-109 виставити ручку зміни діапазону робочих частот в положення II. Виставити початкову частоту генератора 10,3 ГГц.

3.3. АЧХ пропонується знімати за наступною методикою: для кожного значення частоти ручкою зміни послаблення потужності сигналу генератора  $P_c (\text{db} / \text{mW})$  добиватися сталого значення амплітуди після приймального блоку, та знімати значення послаблення. Виміри амплітуди проводити в логарифмічному режимі.

3.4. Побудувати графік нерівномірності АЧХ.

4. Зняти залежність коефіцієнта підсилення антени від виду поляризації сигналу на приймальному блоці.

Зміна поляризації сигналу проводиться за допомогою зміни напруги живлення приймального блоку: при  $U_{ж} = 12-14 \text{ В}$  – приймаються сигнали з вертикальною поляризацією; при  $U_{ж} = 16-18 \text{ В}$  – приймаються сигнали з горизонтальною поляризацією;

5. Зробити висновки по отриманим даним та написати звіт.

### 1.6. Обробка результатів

1. За побудованою АЧХ та результатами п. 4 визначити основні параметри НВЧ пристрою прийому та обробки радіосигналу.

2. За результатами досліджень і розрахунків зробити висновки.

3. Результати досліджень і розрахунків оформити у вигляді звіту, який підлягає індивідуальному захисту.

1.7. **Зміст звіту.** Звіт повинен містити:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 10</i>

1. Схема лабораторної установки та результати досліджень.
2. Результати розрахунків та відповідні графіки.
3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

### **1.8. Контрольні тестові питання**

1. Що таке поляризація електромагнітних хвиль?
2. Які є види поляризації електромагнітних хвиль в залежності від фігури, яку описує кінець вектора  $E$  протягом періоду?
3. Які типи підсилювачів проміжної частоти застосовуються в радіоприймачах НВЧ?
4. З яких елементів складається перетворювач частоти?
5. Як змінюється комплексний спектр широкосмугового сигналу при перенесенні сигналу на проміжну частоту?
6. Які основні параметри має АЧХ широкосмугового підсилювача?
7. Як визначається коефіцієнт прямокутності АЧХ?
8. Чому виникає нерівномірність АЧХ в широкосмуговому підсилювачі?
9. Який тип хвилі випромінюється в пірамідальному рупорі?
10. Що таке діаграма спрямованості антени?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 11

## Лабораторна робота №2 Дослідження НВЧ перетворювачів частоти

### 1.1. Навчальні питання

1. Дослідити амплітудно-частотні характеристики перетворювачів частоти.

2. Дослідити часові характеристики перетворювачів частоти.

### 1.2. Навчальна мета

1. Експериментальне дослідження частотних характеристик НВЧ перетворювачів частоти.

### 1.3. Теоретичні відомості

**Смужкові і мікросмужкові лінії передачі. Основні типи ліній.**

Смужковою лінією передачі називають таку лінію, в якій провідник стрічкового, круглого або квадратного перетинів розташований на деякій відстані від металевої площини (основи) або поміщений між двома металевими основами. Простір між провідником і основами може бути заповнений повітрям або діелектриком. Лінії з діелектричним заповненням, що виконуються друкарським способом, називаються друкарськими смужковими лініями. Розрізняють два основні типи смужкових ліній: (рис. 2.1) і симетричні (рис. 2.2)

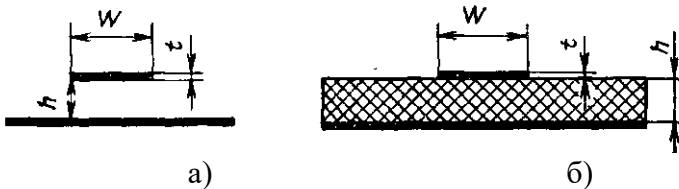


Рис. 2.1. Несиметричні смужкові лінії: а – з повітряним заповненням; б – з діелектричним заповненням

Несиметрична друкована смужкова лінія є пластиною діелектрика, на одній стороні якої нанесені провідники (провідні

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 12

смужки) схеми, а на іншій – металізоване покриття, що створює площину, що проводить (заземлену). Така лінія являється простою в налаштуванні, виготовленні і експлуатації.

Недоліками несиметричної смужкової лінії є відсутність екранування і підвищені втрати (у порівнянні з симетричною лінією). Проте якщо діелектрична проникність підкладки лінії висока, то електричне поле концентрується в області між провідником і заземленою пластиною, а тому втрати на випромінювання невеликі. Ця обставина дозволяє успішно використовувати несиметричні лінії в інтегральних НВЧ схемах (їх називають мікросмужковими лініями передачі). Скорочення габаритів в мікросмужкових інтегральних НВЧ схемах забезпечується за рахунок вибору діелектрика з високою відносною діелектричною проникністю ( $\epsilon$  – порядку 10).

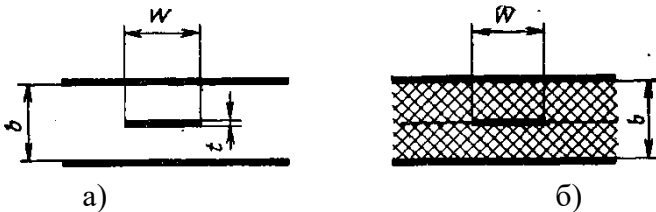


Рис. 2.2. Симетричні смужкові лінії: а – з повітряним заповненням, б – з діелектричним заповненням

У симетричній друкарській смужковій лінії (рис. 2.2,б) центральний провідник поміщений між двома діелектричними пластинами з металізованими зовнішніми поверхнями. Такі лінії володіють хорошим екрануванням, проте вони складні у виготовленні і налаштуванні, вимагають дотримання механічної симетрії для забезпечення малих втрат на випромінювання. Центральний провідник симетричної смужкової лінії в зібраному вигляді абсолютно недоступний для регулювання, що створює певні незручності при налаштуванні схем. Високодобротні смужкові лінії (таблиця. 2.1) застосовуються у тому випадку, коли необхідно, щоб

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 13




добротність ненавантаженої передавальної лінії була досить високою (порядку 2000). Високодобротна лінія передачі має об'єм, більший, ніж симетрична друкарська смужкова лінія, але менший, ніж коаксіальна лінія або хвилевід. Така лінія забезпечує хороше екранування і менш чутлива до технологічних змін діелектричної сталої і товщини підкладки. Вибір типу смужкової лінії повинен проводитися з врахуванням виконання ряду вимог: малі втрати, можливість серійного виробництва, простоти налаштування, малий об'єм і вага, стабільність параметрів, низька вартість.

У таблиці. 2.1 приводяться характеристики основних типів смужкових ліній, наголошуються їх основні переваги і недоліки.

Таблиця 2.1

Тип смужкової лінії	Переріз лінії	Переваги	Недоліки
Несиметрична смужкова лінія з повітряним заповненням		Невелика вага	Відсутність екранування, великі втрати, потрібне кріплення
Несиметрична друкарська смужкова лінія (з малим $\epsilon \approx 2 \div 3$ підкладки)		Малі габарити, мала вага, низька вартість, не потрібне кріплення	Великі втрати в несиметричній лінії, відсутність екранування
Мікросмужкова лінія (з високим $\epsilon \approx 10$ )			
Симетрична смужкова лінія з повітряним заповненням		Малі втрати, мала вага	Великі габарити, потрібне кріплення

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 14

Симетрична смужкова лінія високої граничної потужності		Велика гранична потужність, Мвт	Великі габарити, висока вартість, потрібне кріплення
Симетрична друкована смужкова лінія		Малі габарити, не потрібне кріплення	Порівняно великі втрати, велика вага
Високодобротна смужкова лінія		Малі втрати	Потрібне кріплення, порівняно великі габарити

Мікросмужкові лінії передачі застосовуються в гібридних і монолітних інтегральних схемах (ІС) НВЧ діапазону. У гібридних ІС різні дискретні компоненти (транзистори, діоди і т. д.) поміщені у невеликому корпусі (або модулі) мікросмужкової конструкції. В монолітних ІС всі елементи схеми реалізуються усередині загальної напівпровідникової пластини і частково на її поверхні. Гібридні схеми в порівнянні з монолітними володіють: кращими електричними характеристиками, широкою смугою пропускання, малими шумами, високою добротністю і стабільністю. Монолітні схеми мають нижчу вартість, менші габарити і більшою мірою пристосовані для автоматизованого виробництва.

### **Робоча смуга частот. Довжини хвиль.**

Теоретичних обмежень для вживання смужкових ліній в області низьких частот не існує. У деяких пристроях смужкові лінії служать для передачі постійного струму (наприклад, в детекторних секціях). Практично, оскільки розміри смужкових резонансних елементів на дуже низьких частотах стають значними, рекомендується застосовувати смужкові лінії, на частотах вище 100 МГц.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 15

На високих частотах вживання смужкових систем обмежене вимогами високих допусків на виготовлення, а також наявністю втрат в лінії передачі. На хвилях коротше за 1 см габаритно-вагові переваги смужкових ліній в порівнянні з хвилеводами практично відсутні, тому в короткохвильовій частині міліметрового діапазону хвиль в основному використовують хвилеводні лінії передачі.

Діапазон частот мікросмужкових ліній значно ширше, ніж у стандартних прямокутних хвилеводів і становить 100-30000 МГц. При проектуванні інтегральних схем слід враховувати, що робоча частота мікросмужкової схеми повинна бути нижче критичної частоти  $f_c$  (частоти зрізу) поперечної електричної поверхневої хвилі найнижчого порядку, що визначається за формулою:

$$f_c = \frac{75}{h(\varepsilon - 1)^{1/2}} \text{ [ГГц]}, \quad (2.1)$$

де  $h$  – товщина підкладки, мм.

Так, наприклад, для мікросмужкової лінії з керамічною підкладкою ( $\varepsilon \approx 10$ ) завтовшки  $h = 0,5$  мм критична частота  $f_c$  50 ГГц.

На високих частотах  $f > 14$  ГГц (міліметровий діапазон хвиль) перевага віддається ІС у монолітному виконанні, що має менші габарити і вартість в порівнянні з гібридним ІС. У більш довгохвильовому діапазоні використовуються гібридні схеми.

Довжина хвилі в симетричній смужковій лінії, що працює з коливаннями типу TEM, рівна:

$$\Lambda_{TEM} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі;

$\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність матеріалу підкладки.

Довжина хвилі в несиметричній смужковій лінії визначається таким чином [2.2]:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 16

$$\Lambda \approx \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}} K = \Lambda_{ТЕМ} K = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon'_{эфф}}}, \quad (2.3)$$

де  $K = \frac{\Lambda}{\Lambda_{ТЕМ}}$  – коефіцієнт подовження хвилі;  
 $\varepsilon'_{эфф} = \varepsilon / K^2$  – ефективна діелектрична проникність.

При  $W/h \geq 0,6$  маємо:

$$K = \left[ \frac{\varepsilon}{1 + 0,63(\varepsilon - 1)(W/h)^{0,1255}} \right]^{1/2}, \quad (2.3, а)$$

а при  $W/h \leq 0,6$

$$K = \left[ \frac{\varepsilon}{1 + 0,6(\varepsilon - 1)(W/h)^{0,0297}} \right]^{1/2}, \quad (2.3, б)$$

Величина  $K = 1,1 \div 1,3$  залежить від відношення  $W/h$  до  $\varepsilon$  і може бути визначена за графіком рис. 2.3, а.

Ефективна діелектрична проникність обчислюється за формулою:

$$\varepsilon'_{эфф} = 1 + q(\varepsilon - 1) = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left( 1 + \frac{10h}{W} \right)^{-1/2}, \quad (2.4)$$

де  $q = 0,55 \div 0,85$  – коефіцієнт заповнення діелектрика, що залежить від  $W/h$ , відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  і геометричних контурів кордону між повітряним і діелектричним середовищем (рис. 2.3, б).

Надалі довжину хвилі в будь-якому типі смужкової лінії позначатимемо через  $\Lambda$ .



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 17

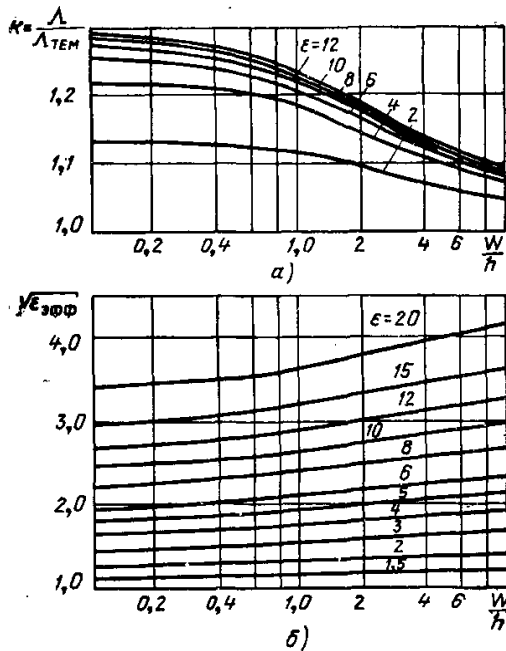


Рис. 2.3. Графік залежності коефіцієнта подовження хвилі (а) і ефективної діелектричної проникності (б) несиметричної друкарської полоскової лінії від  $W/h$  для різних  $\epsilon$ .

**Гранична потужність.** Потужність, при якій виникає височастотний пробій смужкової лінії, називається граничною або розрядною потужністю. При роботі на високому рівні потужності смужкові системи не можуть конкурувати з хвилеводами. Найменшу граничну потужність мають несиметричні смужкові лінії, в яких із збільшенням передаваної потужності відбувається перегрів вузького провідника лінії і збільшення втрат потужності.

Для передачі дуже великих потужностей (мегаватний піковий рівень) використовується симетрична лінія високої граничної

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 18

потужності (див. табл. 2.1). Ефект корони в такій лінії усувається за рахунок потовщення смужки (до 3 мм) і її закруглення на краях.

У мікросмужкових лініях передачі гібридних інтегральних схем гранична потужність при роботі в режимі безперервних коливань складає декілька десятків ватів, а при роботі в імпульсному режимі – одиниці кіловат. Ще нижчий рівень граничної потужності (одиниці ватів в безперервному режимі) мають напівпровідникові монолітні інтегральні схеми. Одним із способів підвищення рівня граничної потужності, що пропускається, є використання як підкладки в мікросмужковій лінії матеріалів з великою теплопровідністю (типа нітриду бору, окислу берилію).

Інший спосіб полягає в тому, що прилади з великою тепловіддачею вмонтовуються на окремих керамічних пластинах, наприклад з берилієвої кераміки (з коефіцієнтом теплопровідності

$k = 0,4 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$ , які включаються в мікросмужкову ІС з підкладкою з

високоглиноземистої кераміки  $\left( k = 0,05 \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ .

**Загасання і добротність.** Загальне загасання смужкової лінії рівне:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d + \alpha_i, \quad (2.5)$$

де  $\alpha_c$  – загасання, визначуване втратами в провіднику;

$\alpha_d$  – загасання, обумовлене втратами в діелектрику;

$\alpha_i$  – загасання унаслідок випромінювання.

У техніці НВЧ важливим параметром є загасання на одиницю довжини хвилі (дБ/λ), оскільки при розрахунку фільтрів і направлених відгалужувачів необхідна довжина відрізків лінії передачі є функцією робочої частоти.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 19

## Несиметрична смужкова і мікросмужкова лінії.

В несиметричній смужковій лінії загасання в провідниках дорівнює:

$$\alpha_c \approx \frac{8,7R_s}{\rho W} \left[ \frac{\partial B}{\text{од. довжини}} \right], \quad (2.6)$$

де  $R_s$  – опір поверхневого шару на НВЧ в Ом/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – хвилевий опір смужкової лінії.

Затухання в діелектрику становить:

$$\alpha_c \approx 27,3 \frac{\sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta}{\lambda} \left[ \frac{\partial B}{\text{од. довжини}} \right], \quad (2.7)$$

а загасання унаслідок випромінювання:

$$\alpha_i = \frac{P_i}{P_0} = \frac{320}{\rho} \left( \frac{\pi h}{\lambda^2} \right) \left[ \frac{\partial B}{\text{од. довжини}} \right], \quad (2.8)$$

де  $P_0$  – потужність сигналу, що пропускається через лінію;

$P_i$  – випромінювана потужність.

Для мікросмужкових ліній, що мають підкладку з високою відносною діелектричною проникністю, загасанням унаслідок випромінювання  $\alpha_i$  зазвичай нехтують, при цьому  $\alpha = \alpha_c + \alpha_d$ , де затухання в діелектрику:

$$\alpha_c \approx 27,3 \frac{q\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ефф}}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{\Lambda} \left[ \frac{\partial B}{\text{од. довжини}} \right], \quad (2.9)$$

або

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 20

$$\alpha_c \approx \frac{\pi q \varepsilon}{\varepsilon_{\text{eff}}} \cdot \frac{\text{tg } \delta}{\Lambda} \left[ \frac{Hn}{\text{од. довжини}} \right]. \quad (2.10)$$

У мікросмужкових лініях, виконаних на діелектрику з малим загасанням (типу кераміки), основне джерело втрат обумовлене кінцевою провідністю металу. Струм в провідниках лінії концентрується в шарі, товщина якого рівна приблизно товщині скін-шару  $\delta_c$  (на глибині скін-шару щільність струму на  $1 Hn$ , тобто в 2,7 рази менше, ніж щільність струму на поверхні провідника). В більшості випадків досить, щоб товщина провідника і заземленої пластини складала 3-5 скін-шарів. У таблиці. 2.2 приведені значення товщини скін-шару плівок різних металів, поділені на квадратний корінь з частоти  $\frac{\delta_c}{\sqrt{f(IT\mu)}}$ , а також значення об'ємних провідностей

$\sigma$ . У мікросмужкових лініях передачі загасання, обумовлене втратами в провіднику (омічні втрати), визначається в децибелах таким чином: при  $\frac{W}{h} \leq \frac{1}{2\pi}$

$$\frac{a_c \rho_0 h}{R_s} = \frac{8,68}{2\pi} \left[ 1 - \left( \frac{W_{\text{ef}}}{4h} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \frac{h}{W_{\text{ef}}} + \frac{h}{\pi W_{\text{ef}}} \left( \ln \frac{4\pi W}{t} + \frac{t}{W} \right) \right]; \quad (2.11)$$

при  $\frac{1}{2\pi} < \frac{W}{h} \leq 2$

$$\frac{a_c \rho_0 h}{R_s} = \frac{8,68}{2\pi} \left[ 1 - \left( \frac{W_{\text{ef}}}{4h} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \frac{h}{W_{\text{ef}}} + \frac{h}{\pi W_{\text{ef}}} \left( \ln \frac{2h}{t} + \frac{t}{h} \right) \right]. \quad (2.12)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 21

Таблиця 2.2

Метал	Ag	Cu	Au	Al	W	Mo	P1	Cr	Ta
Об'ємна провідність $\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} \cdot 10^{-7}$	6,17	5,8	4,1	3,72	1,78	1,76	0,94	0,77	0,64
Нормована товщина скін-шару $\sigma_c / \sqrt{f[\Gamma\Gamma\Gamma]}$ , МКМ	2,03	2,09	2,49	2,61	3,76	3,8	5,2	5,75	6,26

На рис. 2.4 приведені залежності втрат мікросмужкової лінії від відношення  $\frac{W}{h}$ . У монолітних ІС загасання в напівпровідниковій підкладці істотне:

$$\alpha_d = \frac{188}{\sqrt{\varepsilon \cdot \rho_i}} \cdot \frac{1}{1 + 1,735 \varepsilon^{-0,0724} \left(\frac{W}{h}\right)^{-0,836}} \left[ \frac{Hn}{m} \right], \quad (2.13)$$

звідки витікає, що чим менше питомий опір підкладки  $\rho_i$  (в Ом·см), тим більше затухання.

На рис. 2.5 показана залежність затухання (визначуваного, в основному, затуханням напівпровідникової підкладки) на одиницю довжини хвилі в мікросмужковій лінії від частоти для трьох значень питомого опору кремнію при товщині кремнієвої підкладки  $h = 250$  мкм.

При розрахунку затухання і добротності часто користуються поняттям повного загасання лінії  $\alpha l$  для резонансного чвертьхвильового відрізка лінії:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 22

$$\alpha l = \frac{\pi}{4Q} = \frac{0,785}{Q} [Hn] \quad (2.14)$$

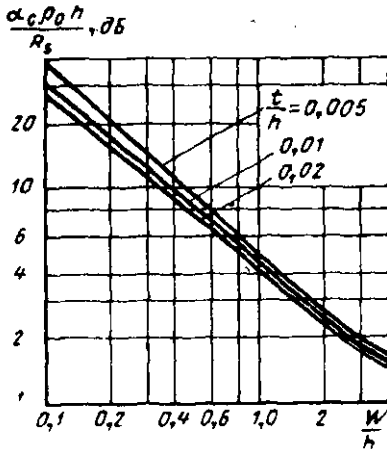


Рис. 2.4. Графік залежності втрат мікросмушкової лінії

$$\text{від } \frac{W}{h}$$

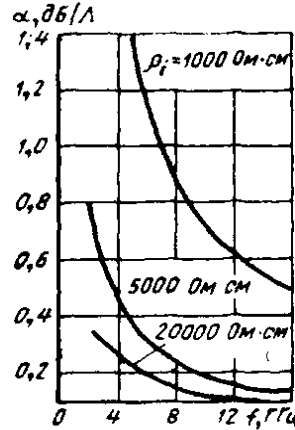


Рис. 2.5. Частотна характеристика затухання на одиницю довжини хвилі в мікросмушкової лінії з кремнієвою підкладкою різного питомого опору

Добротність чвертьхвильового резонатора на мікросмушкової лінії дорівнює:

$$Q = \frac{Q_d \cdot Q_c}{Q_d + Q_c}, \quad (2.15)$$

де  $Q_c = \frac{1}{6} \cdot \frac{\Lambda_{TEM}}{\Lambda} W \rho \sqrt{f} [\Gamma T_u]$  – добротність мікросмушкової лінії, що визначається втратами в провідниках;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 23

$$Q_d = \frac{\varepsilon_{\text{эф}}}{q\varepsilon} \cdot \frac{1}{\text{tg}\delta} - \text{добротність мікросмужкової лінії, що}$$

визначається втратами в діелектрику. Добротність мікросмужкової лінії, що визначається втратами в напівпровідниковій підкладці,

$$Q_d \approx \omega \rho_i \varepsilon.$$

Мікросмужкова лінія не дозволяє реалізувати схеми з високою добротністю; величина добротності такої лінії завтовшки 0,25–1,0 мм залежно від матеріалу підкладки, властивостей провідника і робочої частоти змінюється в межах від 20 до 400.

#### 1.4. Опис лабораторної установки

В лабораторній роботі використовуються моделі НВЧ перетворювачів частоти (Balanced\_Diode\_Mixer.emp; Diode\_Mixer.emp; FET\_Multiplier.emp; RatRace.emp). Дані моделі створені у середовищі моделювання Microwave Office 2001.

#### 1.5. Порядок виконання роботи

1. Запустити середовище Microwave Office 2001, відкрити папку з моделями фільтрів: File/Open project/диск с/папка MWO 2001/Examples/Mixers відкрити модель **Balanced\_Diode\_Mixer.emp**.

1.1. Зняти наступні характеристики для початкових умов: Conversion loss (дБ/мВт), Current output (time graph), АЧХ ФНЧ (IF (на проміжній частоті) Low pass filter), Spectrum analyzer, Isolation RF to LO (перехідне послаблення при перетворенні з високої на низьку частоту, дБ/мВт), LO to RF (перехідне послаблення при перетворенні з низької на високу частоту, дБ/мВт), визначити призначення фільтру.

1.2 Зняти залежність характеристик фільтру в залежності від параметрів матеріалу провідника (Schematics\EM Structures\Conductor materials+натиснути правою клавішею миші і вибрати Create New Material).

а) Perfect conductor – стоїть по замовчанню.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 24</i>

a) Material name – 01; Compute properties from physical parameters; conductor thickness: (5; 100 mil); material conductivity: (50; 1000).

2. Відкрити модель **Diode\_Mixer.emp**, повторити досліди п. 1.

3. Відкрити модель **FET\_Multiplier.emp**, повторити досліди п. 1.

4. Відкрити модель **RatRace.emp**, повторити досліди п. 1.

4.1. Зняти залежність характеристик фільтру в залежності від типу матеріалу для нижнього та верхнього шарів – 8 залежностей (Schematics\EM Structures\Enclosure\Boundaries).

4.2. Зняти залежність характеристик фільтру в залежності від кількості та товщини шарів провідника. (Schematics\EM Structures\Rat Race\Enclosure\Dielectric layers). Змінити почергово початкову товщину шарів Layer 1 та Layer 2, на значення, отримані помноживши початкове значення на коефіцієнти (0,2; 0,6; 1,25; 2, 5). Додати один шар матеріалу Add Above, Add Below. Убрати верхній шар.

### 1.6. Обробка результатів

1. За отриманими характеристиками НВЧ перетворювачів частоти визначити їх призначення та основні параметри.

2. За результатами досліджень і розрахунків зробити висновки.

3. Результати досліджень і розрахунків оформити у вигляді звіту, який підлягає індивідуальному захисту.

### 1.7. Зміст звіту. Звіт повинен містити:

1. Схеми досліджуваних пристроїв та результати досліджень.

2. Результати розрахунків та відповідні графіки.

3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

### 1.8. Контрольні тестові питання

1. Що називають смужковою лінією передачі?

2. Які є типи смужкових ліній?



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 25</i>

3. В якому діапазоні хвиль використовують мікросмужкові лінії?

4. Як залежить критична частота поперечної електричної поверхневої хвилі найнижчого порядку від товщини підкладки?

5. Що таке TEM хвиля?

6. Як визначається довжина хвилі в симетричній смужковій лінії, що працює з коливаннями типу TEM?

7. Як співвідноситься довжина хвилі в симетричній та не симетричній смужковій лінії?

8. Що таке гранична потужність смужкової лінії?

9. Які складові загального загасання смужкової лінії?

10. Що таке скін-шар провідника?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 26

## Лабораторна робота №3 Дослідження НВЧ фільтрів

### 1.1. Навчальні питання

1. Дослідити амплітудно-частотні характеристики фільтрів.
2. Дослідити часові характеристики фільтрів.

### 1.2. Навчальна мета

1. Експериментальне дослідження частотних характеристик НВЧ фільтрів.

### 1.3. Теоретичні відомості

**Симетрична смужкова лінія.** Затухання в симетричній смужковій лінії дорівнює  $\alpha = \alpha_c + \alpha_d$ .

Затухання в діелектрику  $\alpha_d$  знаходиться по формулі (2.6), а чисельне значення загасання в провіднику  $\alpha_c$  (наприклад, в мідному) можна визначити по кривих рис. 3.1 [2,4]. У симетричній друкарській смужковій лінії із-за можливого нещільного прилягання діелектричних пластин виникає повітряний зазор, який у свою чергу приводить до збільшення втрат в лінії. Для того, щоб виключити це явище, застосовують двосторонній друк. Рисунок схеми наноситься на внутрішні поверхні обох діелектричних плат, звернених один до одного еквіпотенціальними смужковими провідниками; при цьому поле в зазорі практично відсутнє.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 27

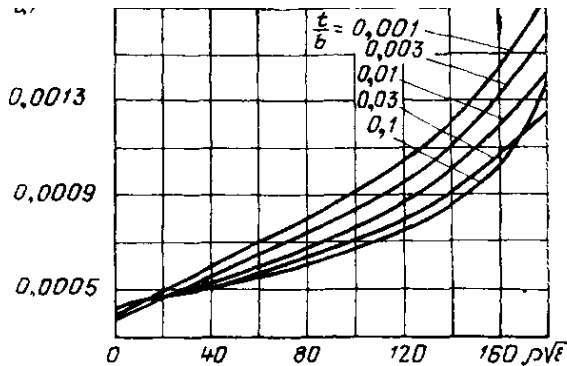


Рис. 3.1. Теоретичні криві затухання в симетричній смужковій лінії з діелектричним заповненням (смужка – мідна).

Вимоги до точного поєднання вказаних малюнків схеми можуть бути дещо знижені, якщо ширина смужок на одній з плат дещо менше, ніж на іншій. Добротність симетричної смужкової лінії дорівнює:

$$Q = \frac{Q_c}{1 + Q_c \cdot \operatorname{tg} \delta}, \quad (3.1)$$

де  $Q_c = \frac{\beta}{2\alpha_c}$ ;  $\beta = \frac{2\pi}{\Lambda}$  – фазова стала.

**Матеріал підкладок і провідників. Матеріал підкладок.** Від матеріалу підкладок полоськових і мікросмужкових ліній передачі залежать втрати і довжина хвилі в тракті. Діелектрик, використовуваний як підкладка, повинен мати малі втрати, однорідну діелектричну проникність  $\varepsilon$ . Характеристики деяких матеріалів, використовуваних в друкарських смужкових лініях передачі, приведені в таблиці. 3.1.

Для мікросмужкових ліній передачі потрібний матеріал, що володіє високим  $\varepsilon$  (порядка 10), малими втратами, постійністю  $\varepsilon$  в

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 28

широкому діапазоні частот і температур, високою мірою чистоти (тобто малою кількістю домішок), малою пористістю, високою теплопровідністю, низькою вартістю.

Таблиця 3.1

Назва діелектрику	$\varepsilon$ на $f = 10^6$ Гц при $t = 20$ °С	$tg\delta$ на $f = 10^6$ Гц при 20 °С	Робочий інтервал температур, °С
<i>Сополімер САМ</i>	2,6	$4,5 \cdot 10^{-4}$	-60– +80
<i>ПТ-3</i>	2,84	$(7-9) \cdot 10^{-4}$	-60– +85
<i>ПТ-5</i>	5	$(7,5-9) \cdot 10^{-4}$	-60– +85
<i>ПТ-7</i>	7	$9 \cdot 10^{-4}$	-60– +85
<i>ПТ-10</i>	10	$12 \cdot 10^{-4}$	-60– +85
<i>ПТ-16</i>	16		-60– +90
<i>Фторопласт-4</i>	2,0–2, 1	$2,5 \cdot 10^{-4}$	-60–+250
<i>Склотекстоліт СКМ-1</i>	4, 16–4,83	$(3-6) \cdot 10^{-3}$	-60– +200
<i>Поліетилен високого тиску</i>	2,3	$3 \cdot 10^{-4}$	-70– +120

У мікросмужних лініях, використовуваних в гібридних ІС, знаходять вживання такі матеріали, як кераміка, сапфір, ситал (таблиця 3.1). Основою кераміки є окисел алюмінію  $Al_2O_3$ . Високоглиноземиста кераміка є порівняно недорогим матеріалом, має низькі втрати, високу діелектричну проникність, малі температурні зміни електричних параметрів. Сапфір добре обробляється до 14 класу чистоти, у зв'язку з чим його застосування забезпечує хороші електричні характеристики НВЧ приладів.

Меншу діелектричну проникність мають такі матеріали, як окисел берилія, кварц (див. таблиці. 3.2), що обмежує їх вживання в ІС. Крім того, підкладки з кварцу і глазуrowаного окислу берилія

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 29

володіють гіршою адгезією (зчепленням з провідним шаром) і меншою стійкістю до теплового удару. Берилієву кераміку, що володіє високою теплопровідністю, застосовують в тих випадках, коли необхідно забезпечити хороший тепловідвід (наприклад, в ІС з використанням генераторів Ганна). Кварц, що має високу стабільність діелектричної проникності, використовується у високодобротних пристроях (наприклад, фільтрах).

Таблиця 3.2

Матеріал підложки	$\varepsilon$ на $f = 10^6$ Гц при $t = 20$ °С	$tg\delta$ на $f = 10^{10}$ Гц при $t = 20$ °С	Теплопровідність $k, \frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{°С}}$
Сапфір	9,9	$1 \cdot 10^{-4}$	0,06
Полікор 99,8% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$	0,06–0,09
Сапфірит 98% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,3-9,6	$1 \cdot 10^{-4}$	0,05–0,06
ГМ 99,6% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$	0,04–0,06
22ХС 94,4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,5	$5 \cdot 10^{-4}$	0,032
А-995 99,8% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$	—
Мікроліт 99,4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,8	$4 \cdot 10^{-4}$	0,042
Брокерит- 9 97% BeO	6,8	$6 \cdot 10^{-4}$	0,4
Кварц	3,78	$1 \cdot 10^{-4}$	—
Ситал КП- 10	10	$5 \cdot 10^{-4}$	0,007
Ситал КП-	15	$5 \cdot 10^{-4}$	0,007

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 30

15			
Кремній	11,7	0,015	0,37
Арсенід галію	13,3	-	0,1
Ферити	9–14	0,01– 0,001	—

У монолітних ІС як напівпровідникова підложка використовується кремній, арсенід галію, таких, що є напівізолюючими матеріалами, на які облягають епітаксціальний шар напівпровідникового матеріалу для активних елементів, а пасивні елементи створюють методом тонкоплівкової технології. На поверхні кремнію за допомогою окислення можна отримувати двоокис кремнію  $SiO_2$ , яка використовується для створення захисних масок при методі фотолітографії виготовлення ІС.

Діелектрична проникність кремнію ( $\varepsilon = 11,7$ ) не залежить від частоти аж до оптичного діапазону хвиль і не змінюється в широкому інтервалі температур. Перевагою кремнію є його висока теплопровідність, що дозволяє працювати з високими рівнями потужностей. Слід зауважити, що кремній є напівізолятором, що має значні втрати, і, отже, добротність мікросмужкових ліній на кремнії нижча, ніж на діелектриках.

Арсенід галію забезпечує необхідну електричну ізоляцію між компонентами і має малі втрати. Діелектрична проникність арсеніду галію ( $\varepsilon = 13,3 \pm 0,4$ ) постійна в діапазоні від 4 до 40 ГГц.

Окрім вказаних вище матеріалів, в монолітних ІС застосовуються комбіновані матеріали, що поєднують в собі властивості ідеального діелектрика і напівпровідника, такі, як кремній на сапфірі, кремній на ситалі. При цьому діелектрик служить, в основному, для реалізації мікросмужкових ліній НВЧ. При проектуванні мікросмужкових систем, що містять феритові пристрої (переналаштовувальні фільтри, обмежувачі, фазообертачі, циркулятори, вентилі), як матеріал підкладки можуть бути

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 31</i>

використані феритові пластини. Пристрої на феритових підкладках в деяких випадках можуть працювати без зовнішнього магніту.

**Матеріал провідників.** Матеріал провідників смужкових і мікросмужкових ліній передачі повинен мати високу електропровідність, малу величину температурного коефіцієнта опору, хорошу адгезію до підкладки, хорошу розчинність в хімічному травильнику, легко осідати при вакуумному напиленні або нанесенні гальванічним методом. У таблиці. 3.2 приведені характеристики матеріалів, використовуваних як центральний провідник і заземлені пластини смужкових ліній.

Вказані матеріали наносяться на підкладку методами «тонкоплівкової» або «товстоплівкової» технології. Слід відмітити що ці поняття не відносяться до дійсної товщини нанесеної плівки, а характеризують спосіб її нанесення. Тонкоплівковою називають схему, отриману вакуумним напиленням чистого металу і сплавів. При виготовленні ІС методом тонкоплівкової технології для здобуття необхідної адгезії з підкладкою використовуються тонкі плівки хрому, ванадію або титану завтовшки 100-200 А, на яких потім напилюються плівки міді, срібла або золота.

При товстоплівковій технології суміші на основі золота і срібла вжігаються в керамічну підкладку при високій температурі. І в тому, і іншому випадку доведення товщини шаруючи провідника до необхідної величини виробляється гальванічним нарощуванням відповідного металу.

#### **1.4. Опис лабораторної установки**

В лабораторній роботі використовуються моделі НВЧ фільтрів (3D\_Comb\_Filter.emp; 5Ghz\_Interdigital\_Filter.emp; 8GHz\_LPF.emp; 18Ghz\_LPF.emp;). Всі моделі створені у середовищі математичного моделювання Microwave Office 2001.

#### **1.5. Порядок виконання роботи**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 32</i>

1. Запустити середовище Microwave Office 2001, відкрити папку з моделями фільтрів: File/Open project/диск с/ папка MWO 2001/Examples/Filters відкрити модель 5Ghz\_Interdigital\_Filter.emp.

1.1 Зняти АЧХ (Stopband, Passband, Return loss), визначити напрямки протікання струму в режимі 2D, 3D View, Animate play, визначити призначення фільтру.

1.2 Зняти залежність характеристик фільтру в залежності від типу матеріалу для нижнього та верхнього шарів – 8 залежностей (Schematics\EM Simulations\Enclosure\Boundaries).

Зняти АЧХ (Stopband, Passband, Return loss), визначити напрямки протікання струму в режимі 2D, 3D View, Animate play, визначити призначення фільтру.

1.3 Зняти залежність характеристик фільтру в залежності від кількості та товщини шарів провідника. (Schematics\EM Simulations\Enclosure\Dielectric layers). Змінити товщину шарів (1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 6/5, 7/5, 8/5, 9/5, 2) від поточних значень. Додати шар матеріалу Add Above, Add Below. Убрати верхній шар.

Зняти АЧХ (Stopband, Passband, Return loss), визначити напрямки протікання струму в режимі 2D, 3D View, Animate play, визначити призначення фільтру.

2. Відкрити модель 3D\_Comb\_Filter.emp. Виконати дослід п.1 для Schematics\EM Sight\_Iris, \_No Iris\Enclosure. Зняти АЧХ, годограф імпедансу, визначити призначення фільтру.

3. Відкрити модель 18Ghz\_LPF.emp. Виконати дослід п.1 для Schematics\EM LPF2 \Enclosure.

4. Відкрити модель 8GHz\_LPF.emp. Виконати дослід п.1 для Schematics\LPF EMSight\Enclosure.

Зняти АЧХ (Stopband, Passband, Group delay, ...), визначити напрямки протікання струму в режимі 2D, 3D View, Animate play, визначити призначення фільтру.

5. Зробити висновки по отриманим даним та написати звіт.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 33</i>

## 1.6. Обробка результатів

1. За отриманими характеристиками НВЧ фільтрів визначити їх призначення та основні параметри.

2. За результатами досліджень і розрахунків зробити висновки.

3. Результати досліджень і розрахунків оформити у вигляді звіту, який підлягає індивідуальному захисту.

## 1.7. Зміст звіту. Звіт повинен містити:

1. Схеми досліджуваних пристроїв та результати досліджень.

2. Результати розрахунків та відповідні графіки.

3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

## 1.8. Контрольні тестові питання

1. Як залежить критична частота поперечної електричної поверхневої хвилі найнижчого порядку від товщини підкладки?

2. Що таке TEM хвиля?

3. Як визначається довжина хвилі в симетричній смужковій лінії, що працює з коливаннями типу TEM?

4. Як співвідноситься довжина хвилі в симетричній та не симетричній смужковій лінії?

5. Що таке гранична потужність смужкової лінії?

6. Які складові загального загасання смужкової лінії?

7. Що таке скін-шар провідника?

8. Що таке добротність?

9. Яка ширина смужки запобігає появі вищих типів хвиль?

10. Що означають індекси  $x, y$  біля позначення хвилі  $H_{x,y}$ ?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 34

## Лабораторна робота №4

### Дослідження основних властивостей перетворення Фур'є при обробці радіосигналів

#### 1.1. Навчальні питання

1. Дослідити основні властивості ДПФ дійсних та комплексних радіосигналів.

2. Дослідити основні властивості ШПФ дійсних та комплексних радіосигналів.

#### 1.2. Навчальна мета

1. Експериментальне дослідження основних властивостей дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) та швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), що використовуються при цифровій обробці радіосигналів.

#### 1.3. Теоретичні відомості

Нагадаємо загальні відомості про трансформацію Фур'є неперервного в часі сигналу. Із теорії систем відомо, що за допомогою трансформації Фур'є обмеженої в часі функції  $f(t)$  можна визначити спектр  $F(j\omega)$  і навпаки через обернену трансформацію Фур'є можна з спектральної функції  $F(j\omega)$  визначити функцію залежності від часу  $f(t)$

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

$$f(t) = 3e^{-t/T} \sin 2\pi ft \quad (3.3)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 35

С

Спектральна функція  $F(j\omega)$  є комплексною з дійсною та уявною частинами, інакше кажучи, з модулем та фазою. Часто обчислюється лише модуль  $F(j\omega)$  залежно від  $\omega$  або  $f$  та зображується як амплітудний спектр. Якщо, наприклад, функція залежності від часу є характеристикою напруги у вольтах, то розмірність спектральної функції  $F(j\omega)$  при інтегруванні за часом (секунди) буде  $B * C = B / (1/C) = B / \text{Гц}$ . Для прикладу на рис. 3.1 зображено залежність  $f(t)$  для струму в резонансному контурі від стадії збудження до згасаючого коливання (в амперах)

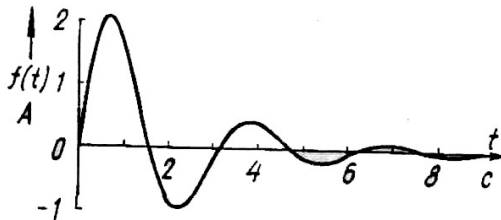


Рис.3.1. Досліджувана функція  $f(t) = 3e^{-t/T} \sin 2\pi ft$  зі сталою згасання  $T = 2с$  та частотою  $f = 1/\piс^{-1}$

Відповідний амплітудний спектр  $|F(j\omega)|$  обчислений із (3.1) (в амперах на герц), з максимумом при  $\omega = 2с^{-1}$  зображений на рис.3.4, а.

$$F(j\omega) = \frac{6}{\sqrt{\omega^4 - 7,5\omega^2 + (17/4)^2}} \quad (3.4)$$

Дискретна трансформація Фур'є дискретизованого, обмеженого в часі сигналу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 36

Перейдемо до обчислення дискретної трансформації  $F_d = (j\omega)$  на базі послідовності вибірок спочатку обмеженого в часі сигналу. За основу візьмемо згасаючу функцію  $f(t)$  (див. рис.3.1). Вона була виміряна в точках часу  $t_n = nT_a$ , причому індекс  $n$  пробігає від 0 до  $N - 1$ . Через  $T_a$  позначимо період дискретизації (рис.3.2).

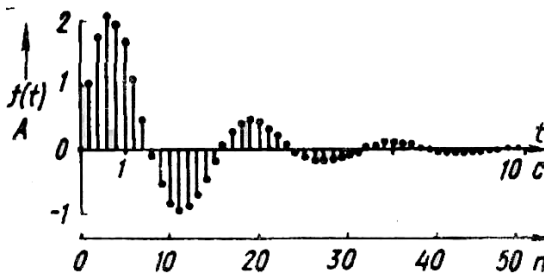


Рис.3.2. Дискретизовані функції з Періодом дискретизації  $T_a = 0.2c$  кількістю вибірок  $N = 50$  сумарним часом вимірювання  $NT_a = 10c$

У цьому випадку загальний час спостереження (об'єм вибірок) становитиме  $N$  - кратне від періоду дискретизації

$$T = NT_a \quad (3.5)$$

Добуті вибіркові значення функції  $f(t)$  відомі тільки для дискретних точок часу  $nT_a$ , тобто з неперервної змінної  $t$  виникла дискретна  $nT_a$ . Постає завдання: із дискретних значень амплітуди  $f(nT_a)$  визначити відповідну спектральну функцію. Це обчислення називають *дискретною трансформацією Фур'є*  $F_d(j\omega)$  (ДТФ) (на відміну від трансформації Фур'є неперервного сигналу). Для отримання алгоритму обчислення дискретної трансформації Фур'є необхідно замінити у (3.1)  $t$  на  $nT_a$ :

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 37

$$f(t) \text{ через } f(nT_a) \quad (3.6)$$

$$e^{-j\omega t} \text{ через } e^{-j\omega nT_a}$$

для обчислення з дискретними величинами.

Апроксимуємо інтеграл у (3.1) відповідно до (7.33) як суму прямокутників з висотою  $f(nT_a)$  та шириною  $T_a$

$$\int f(t)dt \approx T_a \sum f(nT_a) \quad (3.7)$$

Множення на величину інтервалу дискретизації не входить в означення ДТФ. Враховуючи кругову функцію, дістанемо алгоритм

$$F_d(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a)e^{-j\omega nT_a} = \quad (3.8)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) \cos \omega T_a - j \sum_{n=0}^{N-1} (nT_a) \sin \omega nT_a$$

Вираз (3.8) не є завершеною формою запису ДТФ, але його все ж можна порівняти з рівнянням (3.1) трансформації Фур'є для неперервних сигналів. Обидва види трансформації мають такі спільні властивості:

а) якщо залежна від часу функція парна, тобто  $f_{n=+} + f_{n=-}$  то спектральна функція також парна та дійсна;

б) якщо залежна від часу функція непарна, тобто  $f_{n=+} - f_{n=-}$  то спектральна функція непарна та уявна;

в)  $F(j\omega)$  та  $F(-j\omega)$  (або відповідно  $F_d(j\omega)$  та  $F_d(-j\omega)$ ) комплексно-спряжені.

Крім того, ДТФ має ще особливості, які будуть розглянуті далі:

г) періодична відносно аргументу  $\omega$  з періодом  $2\pi/T_a$  та періодична відносно

аргументу  $f$  з періодом  $1/T_a = f_a$ ;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 38

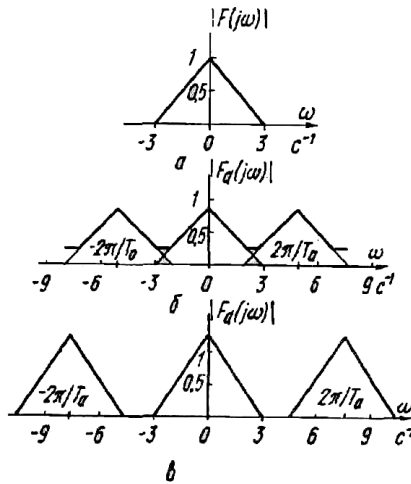
д) дорівнює за значенням трансформації Фур'є лише після перемноження з інтервалом дискретизації  $T_a$ ;

е) обчислюється лише для дискретних значень  $\omega_k$ .

Експоненціальна функція, що описана виразом (3.8), має період  $2\pi$ : Відповідно до цього:

$$F_d(j\omega) = F_d\left(j\left[\omega + 2\frac{\pi}{T_a}\right]\right). \quad (3.9)$$

Тобто спектр повторюється періодично, відповідно  $\omega = z2\pi/T_a$  чи відповідно з  $f = zf_a$ , де  $f$  – довільне ціле число,  $f = 1, 2, \dots$ . У той час, як періодична залежна від часу функція (ряд Фур'є) має дискретний спектр, спектр дискретної функції, одержаної вимірюванням вибірок, періодичний. З періодичності ДТФ можна встановити вимоги щодо частоти вибірок (дискретизації)  $f_a$ .



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 39

Рис. 3.3. Залежність між звичайною та дискретною трансформаціями Фур'є обмеженого по частоті сигналу: а-звичайна трансформація Фур'є; б-обвідна ДТФ з  $T_a = 1,25c$ ; в-обвідна ДТФ з  $T_a = 0,8c$

Спектри ДТФ, які повторюються, не повинні перекриватися, щоб не зашкодити один одному (рис.3.3). Це має місце у разі, коли найбільша частота сигналу  $f_{\max}$  не перевищує половини частоти дискретизації  $f_a$ :

$$f_{\max} < \frac{1}{2} f_a, \quad \omega_{\max} < \frac{1}{2} \frac{2\pi}{T_a} \quad (3.10)$$

Ця вимога має назву *теорема про вибірки* (дискретизації), тобто частота дискретизації повинна бути більшою, ніж подвійне значення максимальної частоти.

Розглянемо пункт д). Якщо, наприклад,  $f(t)$  описує графік напруги, то звичайна трансформація Фур'є згідно з (3.1) внаслідок інтегрування по часу вимірюється у вольтгах на герц. У рівнянні (3.8) ДТФ інтеграл замінено сумою, а множення на час відсутнє. Тому амплітуда ДТФ має розмірність вимірюючого значення. Отже, ДТФ (3.7) необхідно домножувати на інтервал дискретизації  $T_a$  для того, щоб вона відповідала за значенням звичайній трансформації Фур'є (3.1)

$$F(j\omega) = T_a \cdot F_d(j\omega) \quad (3.11)$$

У пункті е) неперервним аргументом є колова частота  $\omega$ , яка може набувати будь-якого значення. Звідси випливає, що  $F_d(j\omega)$  можна обчислювати для будь-якого значення, проте це не відповідає дійсності, оскільки в правій частині рівняння (3.8) маємо лише обмежене число дискретних даних  $f(nT_a)$ ; тому амплітуди можна обчислити лише для обмеженого числа дискретних частот.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 40

Кожна спектральна лінія складається з однієї дійсної та однієї уявної частини. Отже, із  $N$  наявних вибірок можна визначити амплітуди та фази для  $N/2$  дискретних частот, які знаходяться в інтервалі від  $f = 0$  до  $f = f_a/2$ . Відповідні спектральні лінії повторюються в інтервалі від  $f_a/2$  до  $f_a$ . В області між  $f = 0$  та  $f = f_a$  можна побудувати  $N$  ліній для частот

$$\omega_k = \frac{2\pi}{NT_a} k \quad (3.12, a)$$

$$f_k = \frac{1}{NT_a} k \quad (3.12, б)$$

Де  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ . Якщо в рівнянні (3.8) замінити  $\omega$  на  $\omega_k$ , то дістанемо звичайну форму запису ДТФ

$$F_d(j\omega_k) = F_d\left(\frac{2\pi}{NT_a} k\right) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) e^{-j\omega_k nT_a} \quad (3.13)$$

$$F_d(j\omega k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) e^{-j2\pi kn / N}$$

Де  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ .

Дискретні значення частоти розташовані на відстані  $\Delta\omega$ , або відповідно  $\Delta f$  одне від одного:

$$\Delta\omega = \omega_{k+1} - \omega_k = \frac{2\pi}{NT_a} (k+1 - k) = \frac{2\pi}{NT_a} \quad (3.14)$$

$$\Delta f = f_{k+1} - f_k = \frac{1}{NT_a}$$

Звідси виходить, що селективність, тобто спектральне розв'язання вимірювання, обернено пропорційне часу спостереження  $NT_a$ . На практиці максимальна частота сигналу визначається



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 41

граничною частотою антиелізінгового фільтра. Амплітудна характеристика цього фільтра за граничною частотою спадає до нуля не перпендикулярно, а з деяким нахилом. Тому частота дискретизації та гранична частота повинні різнитися більш, ніж вдвоє. Частоту дискретизації вибирають в 5...20 разів більшою, ніж гранична частота сигналу.

Якщо умова теореми щодо вибірки виконується, то спектральна функція внаслідок перекривання не деформується. Ця теорема свідчить про відмінність окремих спектральних ліній. Для такого «спектрального розділення» мірилом служить не частота дискретизації  $f_a$ , а сумарний час спостереження  $NT_a$ .

**Приклад 3.1.** З функції згідно з рис.3.1 протягом 10 с зроблено вибірки через проміжок часу в 0,2 с: період дискретизації  $T_a = 0,2c$ ; частота дискретизації  $f_a = 5Гц$ ; сумарний час спостереження  $NT_a = 10c$ ; кількість вибірок  $N = 50$ .

Спектральна функція, що обчислюється згідно з (3.10), періодична з  $\omega = 2\pi/T_a = 2\pi/0,2 = 10\pi c^{-1}$ . Амплітуди можна обчислити для всіх  $N = 50$  дискретних частот  $\omega_k$ . Згідно з (3.14) вони знаходяться одна від одної на відстані  $2\pi/NT_a = 0,2\pi c^{-1}$ . Послідовність вибірок складається з таких значень:

$n$	$nT_a, c$	$f(nT_a)$
0	0	0
1	0.2	1.0 576
2	0.4	1.7 620
3	0.6	2.0

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 42

		714
...	...	...
47	9.4	0.0 014
48	9.6	0.0 085
49	9.8	0.0 152

Перемноженням ДТФ Фур'є з  $T$  із (3.13) отримаємо:

$$T_a \cdot F_d(j\omega T_k) = T_a \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) e^{-\omega k n T_a}$$

Модуль  $T_a |F_d(j\omega T_k)|$ :

$$T \sqrt{\left[ \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) \sin \omega_k n T_a \right]^2 + \left[ \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_a) \cos \omega_k n T_a \right]^2} \quad (3.15)$$

Для  $\omega_k = \pi c^{-1}$  останнє рівняння має такі числові значення:

$$0,2 |F_d(j\omega_k = j\pi) = 0,2 \{ [0 \cos \pi 0 + 1,0571 \cos \pi 0,2 + \\ + 1,762 \cos \pi 0,4 + \dots + 0,0085 \cos \pi 9,6 + 0,0152 \cos \pi 9,8]^2 + \\ + [0 \sin 0 + 1,0571 \sin \pi 0,2 + \dots + 0,0085 \sin \pi 9,6 + 0,0152 \sin \pi 9,8]^2 \}^{1/2} = 0,9476$$

Отже, можна визначити амплітуди й для всіх інших значень частоти. Амплітудний спектр, обчислений згідно з (3.15), зображено на рис. 3.4, б. Взагалі із  $N$  значень амплітуди незалежними є тільки  $N/2$ . Спектри, які повторюються, перекриваються. Очевидно, що частота вибірок занадто низька.

**Приклад 3.2.** У другому досліді частоту дискретизації було збільшено тільки в два рази: період дискретизації  $T_a = 0,1c$ ; частота

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 43

дискретизації  $f_a = 10 \text{ Гц}$ ; сумарний час спостереження  $NT_a = 10 \text{ с}$ ; кількість вибірок  $N = 100$ .

Спектральна функція має колову частоту  $\omega = 2\pi/T_a = 2\pi/0,1 = 20\pi \text{ с}^{-1}$ . Всього можна обчислити амплітуди для  $N = 100$  дискретних частот  $\omega_k$ , які знову знаходяться на відстані  $2n/NT_a = 0,6 \text{ с}^{-1}$  одна від одної. Амплітудний спектр, який при цьому отримуємо, зображено на рис. 3.4, в. Очевидно, що частота дискретизації достатньо висока, тому перекриття зникають.

#### 1.4. Опис лабораторної установки

Для досліджень ДПФ та ШПФ, що використовуються при цифровій обробці радіосигналів використовується п'ятий розділ програми Numeri.

#### 1.5 Підготовка до виконання роботи

1. Опрацювати необхідний теоретичний матеріал в рекомендованому переліку літератури.

2. Опрацювати методичні вказівки до проведення лабораторної роботи, уявити мету роботи та принцип її виконання.

3. Вивчити технічні описи приладів, що входять до складу лабораторного робочого місця, а також спеціалізованого пакету прикладних програм ПЕОМ.

4. Виконати необхідні попередні розрахунки.

5. Відповісти на питання само тестування, готовності до виконання роботи.

6. Для кожного пункту третього розділу проробити та запропонувати свій варіант методики досліджень в загальному вигляді із обґрунтуванням використання конкретної моделюючої програми із пакету прикладних програм. Варіант методики досліджень узгодити із викладачем.

7. Вибрати тип і структуру моделюючих сигналів та розрахувати конкретні їх параметри і діапазони їх можливих значень.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 44

Підготувати програму модель із урахуванням проведених розрахунків та узгодити її з викладачем.

8. Проаналізувати і запропонувати можливість розширення і поглиблення досліджень стосовно особливостей процедури ДПФ при обробці радіосигналів. Запропонувати варіанти додаткових досліджень в доповнення програми розділу 3.

### 1.6. Порядок виконання роботи

3.1. Дослідити основні властивості ДПФ дійсних радіосигналів для парної та непарної кількості відліків  $N_S$  реалізації  $S(t_k)$ . Дослідити ефекти комплексно-спряженої відповідності відліків та їх симетричність в межах смуги аналізу. Дослідження провести для різних форм сигналів та типів «вікон».

3.2. Дослідити основні властивості ДПФ дійсних радіосигналів, реалізація яких симетрична відносно початку і середини реалізації.

3.3. Дослідити основні властивості ДПФ дійсних сигналів в залежності від кількості відліків реалізації  $N_S$ , що обробляються.

3.4. Дослідити основні властивості ДПФ комплексних радіосигналів.

3.5. Дослідити лінійність ДПФ дійсних та комплексних радіосигналів.

3.6. Дослідити вплив на ДПФ радіосигналу його затримки у часі  $S_H(t_k) = S(t_k \pm n_3)$

3.7. Дослідити властивості ДПФ добутку радіосигналів  $S(t_k) = S_1(t_k) \cdot S_2(t_k)$  (дійсних, комплексних). В якості одного з варіантів другого сигналу  $S_2(t_k)$  вибрати сигнали  $S_1(t_k) = \sin(\omega t_k)$ ;  $S_1(t_k) = \cos(\omega t_k)$ ;  $S_1(t_k) = e^{\pm j\omega t_k}$ .

3.8. Дослідити властивості ДПФ радіосигналів зі зворотнім порядком часових відліків у реалізації  $S_H(t_k) = S(t_{N_S} - k)$ .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 45</i>

3.9. Дослідити властивості ДПФ сигналів при додаванні до сигнальної реалізації відліків  $N_S$  нульових відліків  $N_0$ .

3.10. Дослідити властивості ДПФ сигналів, що формуються шляхом вводу у масив сигнальних відліків  $N_S$  нульових відліків між кожними сумісними сигнальними відліками.

3.11. Дослідити властивості швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) для умов пунктів 3.1 – 3.3.

3.12. Дослідити властивості зворотного ДПФ (ЗДПФ) сигналів після їх зсуву в частотній області визначення  $Y(f_k) = X(f_k \pm \Delta f)$ , а також при операції інверсії спектра при  $y(k) = (-1)^k x(k)$ .

### **1.7. Обробка результатів досліджень.**

4.1. По кожному пункту досліджень розділу 3 виконати якісний аналіз отриманих результатів і виявити основні залежності та властивості ДПФ, ШПФ, зворотного ДПФ. Обробку виконати шляхом аналізу часових та спектральних діаграм радіосигналу.

4.2. По кожному пункту досліджень зняти кількісні характеристики параметрів ДПФ, ШПФ, ЗДПФ в залежності від трансформації вихідного масиву відліків та побудувати відповідні графіки, гістограми, тощо.

4.3. Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів досліджень і виявити основні залежності результатів ДПФ, ШПФ, ЗДПФ від їх параметрів та попередніх перетворень.

4.4. По кожному пункту виконати теоретичний розрахунок і порівняти їх результати із отриманими експериментальними результатами.

4.5. По результатам виконаних досліджень та розрахунків зробити обґрунтовані аналіз і висновки.

4.6. Результатів досліджень оформити у вигляді звіту, що підлягає індивідуальному захисту.

### **1.8. Зміст звіту.** Звіт повинен містити:

1. Аналітичне представлення ДПФ, ШПФ.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 46</i>

2. Результати досліджень та розрахунків і відповідні графіки.
3. Зробити висновки: про об'єм виконаної роботи, чи досягнена мета роботи, чи практичні результати співпали з теоретичними.

### **1.9. Контрольні тестові питання**

1. Дати визначення ДПФ, ШПФ, ЗДПФ.
2. Дати порівняльний аналіз властивостей ДПФ і ШПФ.
3. Які основні властивості ДПФ?
4. Який вплив на ДПФ радіосигналу має попереднє перемноження на вагову функцію «вікна»?
5. Як впливають на ДПФ радіосигналу додавання до масиву сигнальних відліків  $N_s$  нульових відліків  $N_0$ ?
6. Як впливає на ДПФ радіосигналу довжина його реалізації у часовій області визначення?
7. Навести основні варіанти використання ДПФ, ШПФ, ЗДПФ в радіотехнічних системах.
8. Які основні властивості ДПФ дійсних радіосигналів?
9. Які основні властивості ДПФ комплексних радіосигналів?
10. Як впливає на ДПФ зсув радіосигналу у часі?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 47

## Лабораторна робота №5

### Дослідження НВЧ підсилювачів на польових транзисторах

#### 1. Мета роботи

Метою роботи є навчитися виконувати розробку та дослідження мікросмушкового НВЧ підсилювача на польових транзисторах та конструювання його друкованої плати.

#### 2. Короткі теоретичні відомості

Оскільки робоча частота вище 7 ГГц, використаємо схему підсилювача на польовому транзисторі, рис. 5.1 [1].

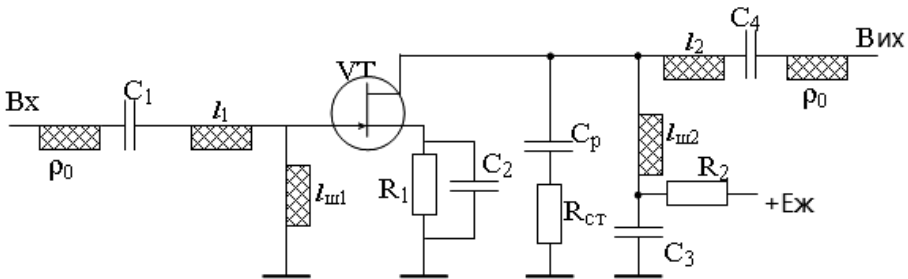


Рис. 5.1. Схема підсилювача СВЧ на польовому транзисторі

У приведеній схемі ланцюги, що узгоджують,  $У1$  і  $У2$  виконані на відрізках мікросмужних ліній (МСЛ) завдовжки  $l_1$ ,  $l_{ш1}$ ,  $l_2$ ,  $l_{ш2}$ . Чвертьхвильовий відрізок МСЛ  $l_1$  є трансформатором опорів. Він трансформує активну складову вхідного опору транзистора  $R_{ВХ}$  в стандартний хвильовий опір 50 Ом. Шлейф  $l_{ш1}$  компенсує реактивну складову вхідного опору транзистора. Для цього вхідний опір шлейфу повинен мати реактивність протилежну реактивності вхідного опору транзистора.

Аналогічно шлейф  $l_{ш2}$  компенсує реактивну складову вихідного опору транзистора, а чвертьхвильовий відрізок МСЛ  $l_2$  трансформує

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 48

активну складову вихідного опору транзистора в стандартний хвилевий опір тракту СВЧ 50 Ом.

У діапазоні частот вище 0,3 ГГц аналізу і розрахунок транзисторних підсилювачів ведеться через параметри матриці розсіяння (S-параметри) [2].

### Приклад розрахунку параметрів та конфігурації підсилювача

Задано в ТЗ діапазон робочих частот:  $f = 12,5 - 13,25$  ГГц.

Згідно розрахунків супутникової лінії загальне підсилення ретранслятора повинно бути 94 дБ. Задамо рівень підсилення приймача 50 дБ.

Необхідно визначити кількість каскадів підсилювача ПВЧ та ППЧ1.

Виходячи з необхідності забезпечення мінімального рівня шуму приймача, усі каскади виконаємо на транзисторах з високою рухливістю електронів (ТВРЕ). У ТВРЕ менший коефіцієнт шуму, але й менший коефіцієнт підсилення порівняно з польовим транзистором із затвором Шотки.

ТВРЕ, (анг. *HEMT - High Electron Mobility Transistor*) – польовий транзистор, в якому для створення каналу замість легованої області, на відміну від звичайних МОП - транзисторів, використовується контакт двох напівпровідникових матеріалів з різною шириною забороненої зони (гетероперехід). Унаслідок більшої висоти бар'єру Шотки, для ТВРЕ можливо більша (до 0,8 В) пряма напруга  $U_{gs}$ , що особливо важливо для нормально закритих транзисторів, робочі напруги на затворах яких можуть змінюватися лише у вузькому діапазоні, обмеженому зверху напругою переходу, що керує.

Виберемо за основу 1-каскадну схему на рис. 5.1, побудовану на польовому транзисторі.

**Розрахуємо параметри одного каскаду підсилювача з ТВРЕ.**

Виберемо польовий транзистор з високою рухливістю електронів CFH 120, у якого коефіцієнт шуму  $K_{ш\max} = 1\text{дБ} = 1,26$ .



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 49

Параметри транзистора CFH 120-06 на  $f=13\text{ГГц}$ , при значенні струму стоку  $I_D = 10\text{мА}$ , опір лінії  $W = 50\text{Ом}$ , наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Параметр	Амплітуда	Фаза, град / рад
$\underline{S}_{11}$	0,634	87,5 / 1,527
$\underline{S}_{12}$	0,102	-66,7 / -1,164
$\underline{S}_{21}$	2,782	-39,0 / -0,68
$\underline{S}_{22}$	0,340	91,7 / 1,6
$\underline{\Gamma}_{\text{Шонм}}$	0,45	-120,8 / 2,108

$$\underline{\Gamma}_{\text{Шонм}} = 0.45 \cdot e^{2.108i} = -0.23 + 0.387i$$

Згідно відомою методикою розрахунку підсилювачів НВЧ [1], скориставшись для розрахунків програмою Mathcad знайдемо:

1. Визначник матриці розсіювання:

$$\Delta S := S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}$$

Запишемо S – параметри у вигляді:

$$S_{11} := 0.634 \cdot e^{1.527i}$$

$$S_{21} := 2.782 \cdot e^{-0.68i}$$

$$S_{12} := 0.102 \cdot e^{-1.164i}$$

$$S_{22} := 0.34 \cdot e^{1.6i} \quad \text{Тоді} \quad \Delta S = -0.139 + 0.276i$$

2. Інваріантний коефіцієнт стійкості:

$$K_u := \frac{1 - (|S_{11}|)^2 - (|S_{22}|)^2 + (|\Delta S|)^2}{2 \cdot |S_{12} \cdot S_{21}|}$$

$$K_u = 1.019$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 50

Оскільки  $K_y > 1$ , то транзистор знаходиться в області безумовної стійкості і стабілізуючий резистор  $R_{CT}$  не потрібний.

3. Для мінімізації кількості каскадів і враховуючи невелику зміну рівня шуму транзистора СФН 120-06:  $K_{ш} \in (0,6 - 1)$ , встановимо режим екстремального підсилення для усіх каскадів ПВЧ.

Розрахуємо коефіцієнт підсилення потужності в режимі екстремального підсилення:

$$K_{pe} := \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \cdot (K_y - \sqrt{K_y^2 - 1})$$

$$K_{pe} = 22.484 \quad \text{В децибелах } K_{pe} = 10 \lg K_{pe} = 13,5 \text{ дБ}.$$

4. Визначимо допоміжні величини:

$$C1 := S_{11} - C_{22} \cdot \Delta S \qquad C1 = -0.068 + 0.589i$$

$$C2 := S_{22} - C_{11} \cdot \Delta S \qquad C2 = -0.181 + 0.244i$$

$$B1 := 1 + (|S_{11}|)^2 - (|S_{22}|)^2 - (|\Delta S|)^2 \qquad B1 = 1.191$$

$$B2 := 1 + (|S_{22}|)^2 - (|S_{11}|)^2 - (|\Delta S|)^2 \qquad B2 = 0.618$$

де  $C_{22} = S_{22}^*$  – комплексно спряжений параметр  $S_{22}$  ;

$C_{11} = S_{11}^*$  – комплексно спряжений параметр  $S_{11}$  .

5. Знайдемо оптимальні коефіцієнти відбиття. Знак "мінус" перед коренем береться при  $B_{1(2)} > 0$ , а "плюс" при  $B_{1(2)} < 0$ . Отже буде знак "мінус".

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 51

$$\Gamma_1 := \frac{B1 - \sqrt{B1^2 - 4 \cdot (|C1|)^2}}{2 \cdot C1}$$

$$\Gamma_1 = -0.104 - 0.905i$$

$$\Gamma_2 := \frac{B2 - \sqrt{B2^2 - 4 \cdot (|C2|)^2}}{2 \cdot C2}$$

$$\Gamma_2 = -0.497 - 0.671i$$

де  $\Gamma_1 - \Gamma_{\text{Opt}}$ ,  $\Gamma_2 - \Gamma_{\text{Hopt}}$ , – оптимальні коефіцієнти відбиття від джерела сигналу (Генератора) та від навантаження в стандартному тракті НВЧ.

6. Визначимо вхідні та вихідні опори активного елемента (АЕ), необхідні для узгодження транзистора із зовнішніми колами, тобто мікросмужковою лінією з опором  $W = 50 \text{ Ом}$  :

$$Z_{\text{вх\_АЕ}} = W \cdot \frac{1 + \Gamma_{\text{Opt}}^*}{1 - \Gamma_{\text{Opt}}^*}; \quad Z_{\text{вих\_АЕ}} = W \cdot \frac{1 + \Gamma_{\text{Hopt}}^*}{1 - \Gamma_{\text{Hopt}}^*}.$$

В маткаді позначимо:  $Z_{\text{вх\_АЕ}} = Z_1$ ,  $Z_{\text{вих\_АЕ}} = Z_2$ ,  $\Gamma_1 - \Gamma_{\text{Opt}}$ ,  $\Gamma_2 - \Gamma_{\text{Hopt}}$ . Зірочка – операція комплексного спряження.

$$W := 50$$

$$Z1 := W \cdot \frac{1 + \text{Re}(\Gamma_1) - i \cdot \text{Im}(\Gamma_1)}{1 - \Gamma_1}$$

$$Z2 := W \cdot \frac{1 + \text{Re}(\Gamma_2) - i \cdot \text{Im}(\Gamma_2)}{1 - \Gamma_2}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 52

$$Z_1 = 44.375 + 4.613i \quad \frac{1}{Z_1} = 0.022 - 2.318i \times 10^{-3}$$

$$Z_2 = 22.329 + 12.391i \quad \frac{1}{Z_2} = 0.034 - 0.019i$$

де  $1/Z_1, 1/Z_2$  – вхідна та вихідна провідність відповідно.

Коефіцієнт шум  $a$  в режимі екстремального підсилення не більший за:  $K_{Ш \max} = 1\text{дБ} = 1,26$ .

### Розрахунок параметрів кіл узгодження ПВЧ

#### Вихідні дані

Діапазон частот  $f \in (12,5 - 13,25)\text{ГГц}$ .

Средня частота смуги пропускання  $f_0 = 12,875\text{ГГц}$ .

Характеристичний опір тракту  $W = 50\text{Ом}$ ;

Вхідний комплексний опір АЕ  $Z_{\text{ex\_AE}} = 44,4 + 4,6j\text{Ом}$ ;

Вихідний комплексний опір АЕ  $Z_{\text{вих\_AE}} = 22,3 + 12,4j\text{Ом}$ ;

Режим екстремального підсилення досягається при узгодженні активного опору та компенсації реактивної провідності на вході та на виході активного елемента (АЕ).

На вході: активний опір  $R_{\text{вих\_СЦ}} = R_{\text{ex\_AE}}$ ,  $Y_{\text{вих\_СЦ}} = -Y_{\text{ex\_AE}}$ .

На виході:  $R_{\text{вих\_AE}} = R_{\text{ex\_СЦ}}$ ,  $Y_{\text{вих\_AE}} = -Y_{\text{ex\_СЦ}}$ .

Вхідний та вихідний активні опори АЕ дорівнюють:  $R_{\text{ex\_AE}} = 9,3\text{Ом}$ ,  
 $R_{\text{вих\_AE}} = 4,1\text{Ом}$ .

Провідності:

$$Y_{\text{ex\_AE}} = 1/Z_{\text{ex\_AE}} = \frac{1}{44,4 + 4,6j} = 22 \cdot 10^{-3} - 2,32 \cdot 10^{-3} j \text{См.}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 53

$$Y_{вих\_AE} = 1/Z_{вих\_AE} = \frac{1}{22,3 + j12,4} = 34 \cdot 10^{-3} - j19 \cdot 10^{-3} \text{ СМ.}$$

Розрахуємо ширину узгоджуючи шлейфів, задавши їх довжину  $l = \lambda_1 / 4$ .

### Підложка має наступні параметри:

$\lambda_0 = 23,3 \text{ мм}$  – робоча довжина хвилі у вільному просторі на середній робочій частоті  $f_0 = 12,875 \text{ ГГц}$  ;

$\varepsilon_r = 9,6$  – діелектрична проникність підложки з полікору;

$h = 0,5 \text{ мм}$  – товщина підложки;

$t = 20 \text{ мкм}$  – товщина мужки;

$W = 50 \text{ Ом}$  – хвильовий опір мікросмужкової лінії (МСЛ).

Ширина  $b$  МСЛ:

$$b = \left( \frac{314}{W \sqrt{\varepsilon_r}} - 1 \right) \cdot h = \left( \frac{314}{50 \sqrt{9,6}} - 1 \right) \cdot 0,5 = 0,51 \text{ мм} \approx 0,5 \text{ мм} = h.$$

$$\text{Довжина хвилі в МСЛ: } \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} = \frac{23,3}{\sqrt{6,6}} = 9,07 \text{ мм}.$$

1) Згідно схеми на рис. 6.1, чвертьхвильовий шлейф  $l_1$  – трансформатор активного опору. Його опір  $R_{TP1}$  визначимо згідно рівняння [1]:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 54

$$R_{ТП1} = \sqrt{R_{вих\_лінії} \cdot R_{ex\_AE}} = \sqrt{50 \cdot 44,4} = 47,12 \text{ Ом}$$

Ширину прямокутної смужки  $b_1$  шлейфа  $l_1$  визначимо з рівняння [Сивер, Фельдштейн]:

$$b_1 = \left( \frac{314}{R_{ТП1} \sqrt{\varepsilon_r}} - 1 \right) \cdot h = \left( \frac{314}{47,12 \cdot \sqrt{9,6}} - 1 \right) \cdot 0,5 = 0,58 \text{ мм}.$$

Визначимо геометрично довжину  $l_1$  смужки-трансформатора опору:

$$l_1 = \lambda_1 / 4 = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef1}}} = \frac{23,3}{4 \cdot \sqrt{6,69}} = 2,25 \text{ мм},$$

де

$$\varepsilon_{ef1} = 0,5 \cdot \left( \varepsilon_r + 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 10h/b_1}} \right) = 0,5 \cdot \left( 9,6 + 1 + \frac{9,6 - 1}{\sqrt{1 + 10 \cdot 0,5/0,58}} \right) = 6,69 \quad -$$

ефективна діелектрична проникність підложки трансформатора  $l_1$ ;

$l_1$  – довжина хвилі у чвертьхвильовому відрізку лінії  $l_1$  на підложці.

2) Чвертьхвильовий шлейф  $l_2$  – трансформатор активного опору. Його опір  $R_{ТП2}$  визначимо згідно рівняння:

$$R_{ТП2} = \sqrt{22,3 \cdot 50} = 33,4 \text{ Ом}.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 55

$$\text{Ширина смужки: } b_2 = \left( \frac{314}{33,4 \cdot \sqrt{9,6}} - 1 \right) \cdot 0,5 = 1,02 \approx 1 \text{ мм}.$$

Визначимо геометрично довжину  $l_2$  смужки:

$$l_2 = \lambda_2 / 4 = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef2}}} = \frac{23,3}{4 \cdot \sqrt{7,06}} = 2,19 \text{ мм},$$

де

$$\varepsilon_{ef2} = 0,5 \cdot \left( \varepsilon_r + 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 10h/b_2}} \right) = 0,5 \cdot \left( 9,6 + 1 + \frac{9,6 - 1}{\sqrt{1 + 10 \cdot 0,5/1}} \right) = 7,06.$$

3) Для компенсації додатного (індуктивного) реактивного опору використовують шлейфи. Індуктивну реактивність можна реалізувати за допомогою короткозамкненого (КЗ) шлейфа, а ємнісну – за допомогою розімкненого шлейфа. Реактивні провідності КЗ та розімкненого шлейфів визначаються згідно рівняння [25, с. 322]:

$$Y_{L\_K3} = \frac{1}{W} \cdot ctg(2\pi \cdot l_{шл\_K3} / \lambda), \quad Y_{C\_роз} = -\frac{1}{W} \cdot tg(2\pi \cdot l_{шл} / \lambda),$$

де –  $\lambda$  довжина хвилі в МСЛ.

Звідси довжина шлейфів:

$$l_{шл\_K3} = arcctg(Y_{L\_K3} \cdot W) \cdot \lambda / 2\pi, \quad l_{шл\_роз} = arctg(-Y_{C\_роз} \cdot W) \cdot \lambda / 2\pi.$$

Для компенсації від'ємної (ємнісної) реактивної провідності застосуємо вхідний та вихідний КЗ шлейфи  $l_{шл\_K31}$  та  $l_{шл\_K32}$  відповідно, з провідностями:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 56

$$Y_{L\_K31} = |\operatorname{Im}(Y_{\text{вх}\_AE})| = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

$$Y_{L\_K32} = |\operatorname{Im}(Y_{\text{вих}\_AE})| = 19 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

$$\text{Тоді } l_{\text{шл}\_K31} = \operatorname{arcctg}(2,32 \cdot 10^{-3} \cdot 50) \cdot 9,07 / 2\pi = 2,24 \text{ мм},$$

$$l_{\text{шл}\_K32} = \operatorname{arcctg}(19 \cdot 10^{-3} \cdot 50) \cdot 9,07 / 2\pi = 1,11 \text{ мм}.$$

**Розрахунок елементів схеми ПВЧ, що забезпечують його режим роботи.**

Параметри транзистора СФН 120-06 візьмемо з додатку А.

1) Виберемо стандартні значення розділюючих конденсаторів:

$$C_1 = C_4 = (20 \div 50) \cdot C_{\text{вх}\_AE} = 22 \cdot 1\text{nФ} = 22\text{nФ} \text{ (ряд Е3)}.$$

$$R_2 = \frac{E_{\text{жс}} - U_{ci}}{I_c} = \frac{12 - 3}{10 \cdot 10^{-3}} = 900 \text{ Ом},$$

2)                                  Резистор                                  фільтра                                  живлення:

де  $E_{\text{жс}}$  – напруга живлення;  $U_{ci}$  – напруга сток-істок;  
 $I_c$  – струм стоку.

Згідно ряду Е192 візьмемо  $R_2 = 910 \text{ Ом}$ .



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 57

3) Конденсатор фільтра живлення:

$$C_2 = \frac{50}{\omega_0 \cdot R_2} = \frac{50}{2\pi \cdot 12,875 \cdot 10^9 \cdot 910} = 0,69 \text{ нФ}, \text{ візьмето } C_2 = 1 \text{ нФ}.$$

4) Визначимо номінали елементів істоку -  $R_1$  та  $C_3$ .

$$R_1 = \frac{|U_{з0}|}{I_{c0}} = \frac{2}{10 \cdot 10^{-3}} = 200 \text{ Ом},$$

$$C_3 = \frac{10 \div 20}{\omega_H \cdot R_1} = \frac{15,75}{2\pi \cdot 12,5 \cdot 10^9 \cdot 200} = 1 \text{ нФ},$$

де  $U_{з0}$ ,  $I_{c0}$  – параметри робочої точки транзистора, яка для режиму А підсилювача знаходиться на середині лінійної ділянки ВАХ;

$\omega_H = 2\pi \cdot 12,5 \cdot 10^9 \text{ рад/с}$  – значення нижньої робочої частоти.

**Визначимо загальний коефіцієнт шуму  $K_{ш\Sigma}$  підсилювача та його шумову температуру  $T_{ш}$ .**

Коефіцієнт шуму  $K_{ш\Sigma}$  багатокаскадного підсилювача визначається згідно рівняння [2]:

$$K_{ш\Sigma} = K_{ш1} + (K_{ш2} - 1) / K_{P1} + (K_{ш3} - 1) / K_{P1} \cdot K_{P2} + \dots$$

$$K_{ш1-2} = 1,26 + (1,26 - 1) / 22,4 = 1,26 + 0,012 = 1,272 = 1,04 \text{ дБ}.$$

**Оцінимо шумову температуру  $T_{ш}$  ПВЧ.**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 58

$T_{ш}$  можна оцінити згідно рівняння [2]:

$$T_{ш\Omega} = (K_{ш\Omega} - 1) \cdot T_0 = (1,272 - 1) \cdot 300 K \approx 90 K .$$

Результуюча схема одного каскаду підсилювача ПВЧ має вигляд:

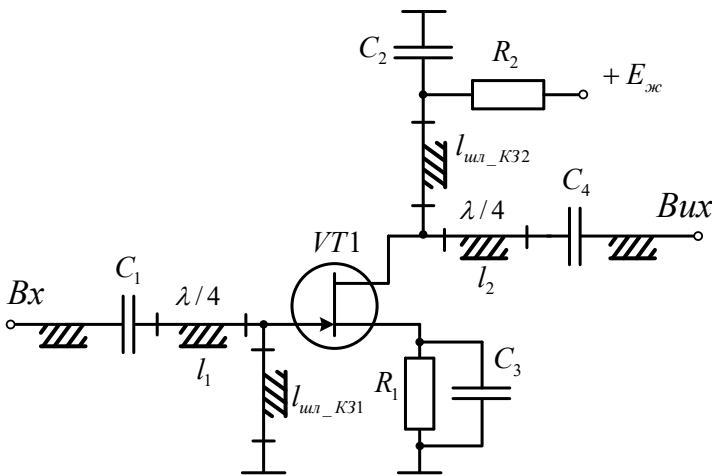


Рис. 5.2. ПВЧ на польовому GaAs НЕМТ транзисторі CFH 120-06.

Таким чином, розроблено та розраховано параметри та номінали елементів схеми ПВЧ, та параметри ППЧ1, що реалізовано на аналогічному підсилювальному каскаді.

В розробленій схемі кола узгодження виконані на відрізках МСЛ:  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_{шл\_КЗ1}$ , та  $l_{шл\_КЗ2}$ . Чвертьхвильові відрізки МСЛ  $l_1$ ,  $l_2$  є трансформаторами активної складової опору.  $l_1$  трансформує  $R_{вх}$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 59

транзистора в хвильовий опір МСЛ 50Ом,  $l_2$  – трансформує  $R_{вих}$  транзистора в хвильовий опір МСЛ 50Ом.

Індуктивну реактивність можна реалізувати за допомогою короткозамкненого (КЗ) шлейфа, а ємнісну – за допомогою розімкненого шлейфа. Коротко замкнені шлейфи  $l_{шл\_КЗ1}$ , та  $l_{шл\_КЗ2}$  мають індуктивний характер реактивності та компенсують від’ємну реактивну складові вхідної та вихідної провідності транзистора. Ємнісну реактивність можна реалізувати за допомогою розімкненого шлейфа.

### 3. Завдання до роботи

1. За допомогою наведеної методики та MathCad виконати розрахунок параметрів та номіналів усіх елементів схеми рис. 5.2 підсилювача на середню частоту 11 ГГц.

2. Розрахувати дві ланки та розробити друковану плату дволанкового підсилювача на польових транзисторах в середовищі Microsoft Visio з рамкою 55мм.

3. Оформити отримані результати у вигляді звіту.

### 4. Вміст звіту

1. Мета роботи.
2. Розрахована схема та друкована плата три ланкового підсилювача.
3. Висновки по роботі.

### 5. Контрольні запитання

1. Як реалізується мікросмужковий ємнісний шлейф?
2. Як реалізується мікросмужковий індуктивний шлейф?
3. Навіщо потрібні кола узгодження?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 60</i>

4. Які переваги та недоліки схем НВЧ підсилювачів з використанням біполярних транзисторів?
5. Які переваги та недоліки схем НВЧ підсилювачів з використанням польових транзисторів?
6. Що таке матриця S-параметрів?
7. Фізичний зміст кожного S-параметра.
8. Які є режими роботи підсилювачів на коефіцієнтом шуму та підсилення?
9. Як використовується ВАХ та АЧХ транзистора при проектуванні схеми?
10. Яке призначення чвертьхвильового трансформатора активного опору?
11. Конструкція та параметри чвертьхвильового трансформатора активного опору.
12. Конструкція мікросмужкової НВЧ плати.
13. Як зробити НВЧ трансформатор активного опору та фільтри більш компактними (кути згинання доріжки)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 61

## Лабораторна робота №6

### Дослідження НВЧ підсилювачів на біполярних транзисторах

#### 1. Мета роботи

Метою роботи є навчитися виконувати розробку та дослідження мікросмушкового НВЧ підсилювача на польових транзисторах та конструювання його друкованої плати.

#### 2. Короткі теоретичні відомості

Структурна схема однокаскадного підсилювача НВЧ приведена на рис 6.1. Підсилювач складається з активного елементу АЕ (НВЧ транзистора) і кіл, що узгоджують (УК), на вході УК1 і виході УК2 [1].

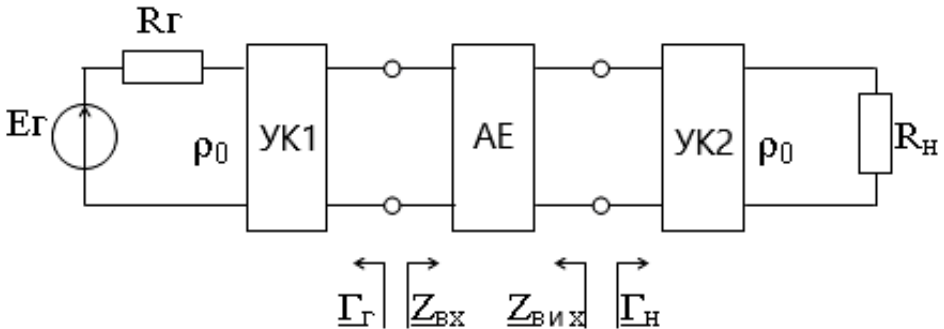


Рисунок 6.1 – Структурна схема підсилювача НВЧ

Узгодження в підсилювачах НВЧ можливо в двох варіантах [1]. У першому варіанті вхідний і вихідний опори транзистора погоджують із стандартним хвилевим (характеристичним) опором СВЧ тракту  $\rho_0$ . Зазвичай  $\rho_0=50$  Ом. На рис. 5.1 ланцюги УК1 і УК2 погоджують вхідний і вихідний опори транзистора з лініями, що підводять, мають хвилевий опір  $s_0$ . Лінії, що підводять, вважаються

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 62</i>

узгодженими з джерелом сигналу ( $R_{Г}=\rho_0$ ) і навантаженням ( $R_{Н}=\rho_0$ ) підсилювача. Переваги такого підходу в тому, що узгодження комплексного опору з навантаженням, що не містить реактивних складових, легше проконтролювати і, отже, реалізувати. При побудові багатокаскадних підсилювачів у вигляді конструктивно закінчених каскадів на окремих підкладках ця перевага стає особливо очевидною. Недоліком даного підходу є надмірність елементів, потрібних для роздільного узгодження входу і виходу. Застосовується він переважно в професійній апаратурі.

Інший підхід зводиться до взаємного узгодження двох комплексних навантажень - вихідного попереднього ланцюга і вхідний подальшого каскаду. Реалізація цих ланцюгів актуальна в багатокаскадних підсилювачах, виконаних конструктивно як одне ціле (на одній підкладці). Контроль посилення кожного каскаду в таких підсилювачах здійснювати технічно важко, тому одна з важливих переваг першого способу відпадає. Головне достоїнство ланцюгів, що таких погоджують, - удвічі менше число реактивних елементів.

Кола узгодження в діапазоні 0,3-3 ГГц можна виконати як на зосереджених, так і на розподілених елементах. На частотах вище за 3 ГГц вони виконуються, як правило, на елементах з розподіленими параметрами.

На рис. 6.2 [1] наведено принципову схему одного каскаду малошумлячого підсилювача на біполярному транзисторі. На частотах нижче за 7 ГГц підсилювачі можна виконувати на біполярних та польових транзисторах.

У приведених схемах ланцюги узгодження УК1 і УК2 виконані на відрізках мікросмужних ліній (МСЛ) завдовжки  $l_1$ ,  $l_{ш1}$ ,  $l_2$ ,  $l_{ш2}$ . Чвертьхвильовий відрізок МСЛ  $l_1$  є трансформатором опорів. Він трансформує активну складову вхідного опору транзистора  $R_{ВХ}$  в стандартний хвильовий опір  $\rho_0=50$  Ом. Шлейф  $l_{ш1}$  компенсує реактивну складову вхідного опору транзистора. Для цього вхідний опір шлейфу повинен мати реактивність протилежну реактивності вхідного опору

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 63

транзистора. Аналогічно шлейф  $l_{ш2}$  компенсує реактивну складову вихідного опору транзистора, а чвертьхвильовий відрізок МСЛ  $l_2$  трансформує активну складову вихідного опору транзистора в стандартний хвильовий опір тракту СВЧ  $\rho_0$ .

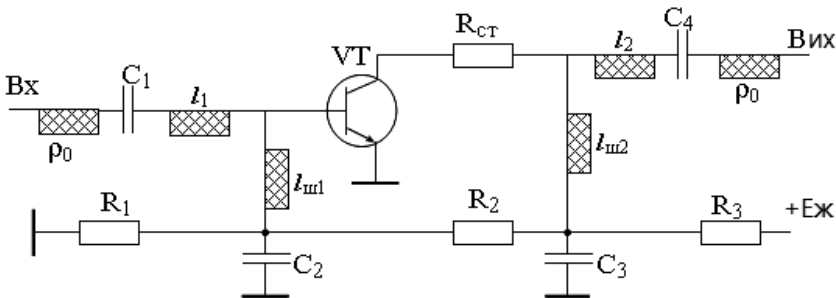


Рисунок 6.2 – Схема підсилювача НВЧ на біполярному транзисторі

У діапазоні частот вище 0,3ГГц аналізу і розрахунок транзисторних підсилювачів ведеться через S-параметри [1].

Важливою умовою нормальної роботи транзисторного підсилювача НВЧ є його стійкість в сенсі відсутності самозбудження. Залежно від значень S-параметрів транзистор знаходиться або у області безумовної стійкості (ОБС), або у області потенційної стійкості (ОПС). Транзистор знаходиться у області безумовної стійкості, якщо виконуються умови:

$$\begin{aligned}
 & |\underline{S}_{12}\underline{S}_{21}| < 1 - |\underline{S}_{11}|^2; \quad |\underline{S}_{12}\underline{S}_{21}| < 1 - |\underline{S}_{22}|^2; \\
 & k_y = \frac{1 - |\underline{S}_{11}|^2 - |\underline{S}_{22}|^2 + |\underline{\Delta S}|^2}{2|\underline{S}_{12}\underline{S}_{21}|} \geq 1; \\
 & \underline{\Delta S} = \underline{S}_{11}\underline{S}_{22} - \underline{S}_{12}\underline{S}_{21},
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

де  $k_y$  – інваріантний коефіцієнт стійкості;  
 $\underline{\Delta S}$  – визначник матриці розсіювання.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 64

Перші дві умови в (6.1) для більшості транзисторів НВЧ звичайно завжди виконуються, тому про стійкість транзистора можна судити по величині  $k_y$ . Якщо  $k_y > 1$ , то можливо двостороннє комплексне узгодження транзистора на вході і виході (режим екстремального посилення).

Якщо транзистор знаходиться в ОПС, то його слід перевести в ОБС, включивши стабілізуючий резистор  $R_{CT}$ . Резистор  $R_{CT}$  включається послідовно, якщо стійкість втрачається в режимі, близькому до короткого замикання, рис. 6.2, та паралельно, якщо стійкість порушується в режимі, близькому до холостого ходу.

Вибором параметрів ланцюгів УК1 і УК2, що погоджують, можна забезпечити різні режими роботи підсилювача. Найчастіше використовуються режими екстремального посилення і мінімального шуму. У багатокаскадних підсилювачах першим включається підсилювач в режимі мінімального коефіцієнта шуму, подальші - в режимі максимального підсилення потужності.

### ***Режим максимального підсилення***

В ОБС максимальний коефіцієнт підсилення визначається згідно рівняння:

$$K_{Рекстр} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| \left( k_y - \sqrt{k_y^2 - 1} \right) \quad (6.2)$$

– буде при одночасному двосторонньому комплексно-спряженому узгодженні транзистора:

$$\underline{Z}_{вихСЦ1} = \underline{Z}_{вхАЭ}^*; \quad \underline{Z}_{вихАЭ} = \underline{Z}_{вхСЦ2}^*. \quad (6.3)$$

При цьому вхідний та вихідний опори АЕ дорівнюють:



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 65

$$Z_{\text{вх}_{-}AE} = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma_{\text{Гopt}}^*}{1 - \Gamma_{\text{Гopt}}^*}; \quad Z_{\text{вих}_{-}AE} = Z_0 \cdot \frac{1 + \Gamma_{\text{Hopt}}^*}{1 - \Gamma_{\text{Hopt}}^*}, \quad (6.4)$$

$$\text{де } \underline{\Gamma}_{\text{Гopt}} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|\underline{C}_1|^2}}{2\underline{C}_1}; \quad \underline{\Gamma}_{\text{Hopt}} = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|\underline{C}_2|^2}}{2\underline{C}_2} \quad (6.5)$$

– оптимальні коефіцієнти відбиття від джерела сигналу (генератора) та від навантаження в стандартному тракці НВЧ. У рівнянні (6.5) позначено:

$$\begin{aligned} \underline{C}_1 &= \underline{S}_{11} - \underline{S}_{22}^* \underline{\Delta S}, & \underline{C}_2 &= \underline{S}_{22} - \underline{S}_{11}^* \underline{\Delta S}; \\ B_1 &= 1 + |\underline{S}_{11}|^2 - |\underline{S}_{22}|^2 - |\underline{\Delta S}|^2; \\ B_2 &= 1 + |\underline{S}_{22}|^2 - |\underline{S}_{11}|^2 - |\underline{\Delta S}|^2. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Знак "мінус" в чисельнику (5.5) беруть при  $B_{1(2)} > 0$ , а знак "плюс" при  $B_{1(2)} < 0$ .

### Приклад розрахунку параметрів та конфігурації підсилювача

Оскільки робоча частота нижче за 7 ГГц, використаємо схему підсилювача на біполярному транзисторі, рис. 6.2 [1].

Задано в ТЗ діапазон робочих частот:  $f = 3,5 - 3,7$  ГГц.

Розрахуємо параметри одного каскаду підсилювача.

Розглянемо біполярні транзистори сучасних провідних виробників:

- Avago technologies;
- Infineon;
- Amcom;
- M-pulse Microwave.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 66

Вибір транзистора зробимо за критерієм максимуму відношення коефіцієнт підсилення на робочій частоті 3,6ГГц / оптимальний коефіцієнт відбиття:

$$\max \left( \frac{K_p(S^2_{21}) | f = 3,6ГГц}{\Gamma_{opt}} \right).$$

Виберемо малощумлячий біполярний транзистор АТ-41435 фірми Avago technologies, у якого коефіцієнт підсилення  $K_p \approx 10дБ(f = 3,6ГГц)$ , оптимальний коефіцієнт відбиття  $\Gamma_{opt} = 0,4$ .

Для мінімізації коефіцієнта шуму  $K_{ш}$  з додатку А (Fig. 3) виберемо робоче значення струму колектора  $I_C = 10mA$ , при якому  $K_{ш} = 1,8дБ$ .

S-параметри транзистора АТ-41435 на  $f = 3,6ГГц$ , при значенні струму колектора  $I_C = 10mA$ , опорі лінії  $Z_0 = 50Ом$ , напрузі колектор-емітер  $V_{CE} = 8В$  наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1.

Параметр	Амплітуда	Фаза, рад
$\underline{S}_{11}$	0,46	2,39
$\underline{S}_{12}$	0,133	1,012
$\underline{S}_{21}$	2,15	0,576
$\underline{S}_{22}$	0,43	-1,6
$\Gamma_{opt}$	0,45	-2,22

Згідно наведеної методики розрахунку підсилювачів НВЧ [1], виконаємо розрахунки. Для автоматизації обчислень скористаємось програмою Mathcad. Лістинг програми наведено в додатку В.

1. Оцінимо визначник  $\Delta S$  матриці розсіювання:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 67

$$\Delta S = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21} =$$

$$= 0,46 \cdot e^{j2.39} \cdot 0,43 \cdot e^{-j1.6} - 0,133 \cdot e^{j1.012} \cdot 2,15 \cdot e^{j0.576} = 0,144 - 0,145j$$

2. Визначимо згідно (6.1) інваріантний коефіцієнт стійкості  $k_y$  :

$$k_y = \frac{1 - (0,46 \cdot e^{j2.39})^2 - (0,43 \cdot e^{-j1.6})^2 + (0,144 - 0,145j)^2}{2 \cdot |0,133 \cdot e^{j1.012} \cdot 2,15 \cdot e^{j0.576}|} = 1,129.$$

Оскільки  $K_y > 1$ , то транзистор знаходиться в області безумовної стійкості і стабілізуючий резистор  $R_{CT}$  не потрібний.

3. Оцінимо згідно рівняння (6.2) коефіцієнт підсилення потужності в режимі екстремального підсилення:

$$K_P = \frac{2,15 \cdot e^{j0.576}}{0,133 \cdot e^{j1.012}} \cdot (1,129 - \sqrt{1,129^2 - 1}) = 9,787.$$

В децибелах  $K_P = 10 \lg(9,787) = 9,91 \text{ дБ}$ .

4. Визначимо допоміжні величини згідно (6.6):

$$C1 := S11 - (\text{Re}(S22) - i \cdot \text{Im}(S22)) \cdot \Delta S \quad C1 = -0.397 + 0.25i$$

$$C2 := S22 - (\text{Re}(S11) - i \cdot \text{Im}(S11)) \cdot \Delta S \quad C2 = 0.082 - 0.433i$$

$$B1 := 1 + (|S11|)^2 - (|S22|)^2 - (|\Delta S|)^2 \quad B1 = 0.985$$

$$B2 := 1 + (|S22|)^2 - (|S11|)^2 - (|\Delta S|)^2 \quad B2 = 0.931$$

5. Знайдемо оптимальні коефіцієнти відбиття згідно (6.5):

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 68

$$\Gamma_1 := \frac{B1 - \sqrt{B1^2 - 4 \cdot (|C1|)^2}}{2 \cdot C1}$$

$$\Gamma_1 = -0.618 - 0.39i$$

$$\Gamma_2 := \frac{B2 - \sqrt{B2^2 - 4 \cdot (|C2|)^2}}{2 \cdot C2}$$

$$\Gamma_2 = 0.133 + 0.704i$$

де  $\Gamma_1 - \Gamma_{\text{Opt}}$ ,  $\Gamma_2 - \Gamma_{\text{Норт}}$ , – оптимальні коефіцієнти відбиття від джерела сигналу (генератора) та від навантаження в стандартному тракті НВЧ.

6. Визначимо згідно (6.4) вхідні та вихідні опори активного елемента (АЕ) - транзистора, необхідні для узгодження транзистора із зовнішніми колами, тобто мікросмужковою лінією з опором  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ :

В Mathcad позначимо:  $Z_1 = Z_{\text{вх\_АЕ}}$ ,  $Z_2 = Z_{\text{вих\_АЕ}}$ ,  $\Gamma_{\text{Opt}} = \Gamma_1$ ,

$$\Gamma_{\text{Норт}} = \Gamma_2.$$

Операція комплексного спряження реалізована наступним чином:

$$\Gamma_{\text{Opt}}^* = \text{Re}(\Gamma_{\text{Opt}}) - j \text{Im}(\Gamma_{\text{Opt}}).$$

$$Z_0 := 50$$

$$Z_1 := Z_0 \cdot \frac{1 + \text{Re}(\Gamma_1) - i \cdot \text{Im}(\Gamma_1)}{1 - \Gamma_1}$$

$$Z_2 := Z_0 \cdot \frac{1 + \text{Re}(\Gamma_2) - i \cdot \text{Im}(\Gamma_2)}{1 - \Gamma_2}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 69

$$Z_1 = 13.9 + 8.699i \quad \frac{1}{Z_1} = 0.052 - 0.032i$$

$$Z_2 = 59.208 + 7.478i \quad \frac{1}{Z_2} = 0.017 - 2.1i \times 10^{-3}$$

де  $1/Z_1, 1/Z_2$  – вхідна та вихідна провідність відповідно.

### Розрахунок параметрів кіл узгодження

#### Задані параметри:

Діапазон частот  $f \in (3,5 - 3,7) ГГц$ .

Середня частота смуги пропускання  $f_0 = 3,6 ГГц$ ;

Робоча довжина хвилі у вільному просторі на середній робочій частоті  $f_0 = 3,6 ГГц$  –  $\lambda_0 = c / f_0 = 3 \cdot 10^8 / 3,6 \cdot 10^8 = 83,3 мм$ ;

Хвильовий опір мікросмушкової лінії (МСЛ)  $Z_0 = 50 Ом$ ;

Вхідний комплексний опір транзистора:  $Z_{ex\_AE} = 13,9 + 8,7 j Ом$ ;

Вихідний комплексний опір транзистора:

$$Z_{вих\_AE} = 59,21 + 7,478 j Ом;$$

Режим екстремального підсилення забезпечимо узгодженням шляхом трансформації активного опору та компенсації реактивної провідності на вході та на виході транзистора.

Вхідний та вихідний активні опори АЕ дорівнюють:

$$Z_{ex\_AE} = 13,9 Ом, \quad Z_{вих\_AE} = 59,21 Ом.$$

Вхідна та вихідна провідності:

$$Y_{ex\_AE} = 1/Z_{ex\_AE} = \frac{1}{13,9 + 8,7j} = 0,052 - 0,032 j См.$$

$$Y_{вих\_AE} = 1/Z_{вих\_AE} = \frac{1}{59,21 + 7,478j} = 0,017 - 0,021 j См.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 70

Реактивна вхідна провідність дорівнює:  $\text{Im}(Y_{вх\_AE}) = -0,032 \text{ См} .$

Реактивна вихідна провідність дорівнює:  
 $\text{Im}(Y_{вих\_AE}) = -0,021 \text{ См} .$

Розрахуємо ширину узгоджуючи шлейфів, задавши їх довжину  
 $l = \lambda_1 / 4 .$

**Підложка МСЛ має наступні параметри:**

–  $\varepsilon_r = 9,6$  – діелектрична проникність підложки з полікору;

–  $h = 1 \text{ мм}$  – товщина підложки (оскільки  $f_0 < 5 \text{ ГГц}$ );

–  $t = 20 \text{ мкм}$  – товщина МСЛ;

–  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$  – хвильовий опір МСЛ;

– ширина  $b$  МСЛ:

$$b = \left( \frac{314}{Z_0 \sqrt{\varepsilon_r}} - 1 \right) \cdot h = \left( \frac{314}{50 \sqrt{9.6}} - 1 \right) \cdot 1 = 1.02 \text{ мм} \approx 1 \text{ мм} = h ;$$

– ефективна діелектрична проникність підложки  $\varepsilon_{ef}$  :

$$\varepsilon_{ef} = 0,5 \cdot \left( \varepsilon_r + 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 10h/b}} \right) = 0,5 \cdot \left( 9,6 + 1 + \frac{9,6 - 1}{\sqrt{1 + 10}} \right) = 6,596 ;$$

– довжина хвилі в МСЛ:  $\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} = \frac{83,3}{\sqrt{6,596}} = 32,44 \text{ мм} .$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 71

1) Згідно схеми на рис. 6.2, позначено  $l_1$  – чвертьхвильовий трансформатор активного опору. Його опір  $Z_{TP1}$  визначимо згідно рівняння [1]:

$$Z_{TP1} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{вх\_AE}} = \sqrt{50 \cdot 13,9} = 26,36 \text{ Ом}.$$

Визначимо ширину прямокутної смужки  $b_1$  шлейфа  $l_1$ :

$$b_1 = \left( \frac{314}{Z_{TP1} \sqrt{\varepsilon_r}} - 1 \right) \cdot h = \left( \frac{314}{26,36 \cdot \sqrt{9,6}} - 1 \right) \cdot 1 = 2,84 \text{ мм}.$$

Визначимо геометрично довжину  $l_1$  смужки-трансформатора опору:

$$l_1 = \lambda_1 / 4 = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef1}}} = \frac{83,3}{4 \cdot \sqrt{7,32}} = 7,7 \text{ мм},$$

де

$$\varepsilon_{ef1} = 0,5 \cdot \left( \varepsilon_r + 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 10h/b_1}} \right) = 0,5 \cdot \left( 9,6 + 1 + \frac{9,6 - 1}{\sqrt{1 + 10 \cdot 1 / 2,84}} \right) = 7,32.$$

2) Визначимо опір  $Z_{TP2}$  чвертьхвильового трансформатора активного опору  $l_2$ :  $Z_{TP2} = \sqrt{Z_{вх\_AE} \cdot Z_0} = \sqrt{59,21 \cdot 50} = 54,40 \text{ Ом}.$

$$\text{Ширина смужки: } b_2 = \left( \frac{314}{54,4 \cdot \sqrt{9,6}} - 1 \right) \cdot 1 = 0,86 \text{ мм}.$$

Визначимо геометрично довжину  $l_2$  смужки:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 72

$$l_2 = \lambda_2 / 4 = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef2}}} = \frac{83,3}{4 \cdot \sqrt{6,5}} = 8,17 \text{ мм},$$

де

$$\varepsilon_{ef2} = 0,5 \cdot (\varepsilon_r + 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{\sqrt{1 + 10h/b_2}}) = 0,5 \cdot (9,6 + 1 + \frac{9,6 - 1}{\sqrt{1 + 10 \cdot 1/0,86}}) = 6,5.$$

3) Для компенсації від'ємної реактивної провідності використовують короткозамкнені шлейфи, що мають індуктивну додатну провідність. Довжину короткозамкненого шлейфу можна визначити згідно рівняння [1]:

$$l_{шл\_КЗ} = \text{arctg}(Y_{L\_КЗ} \cdot Z_0) \cdot \lambda / 2\pi.$$

Оцінимо довжину вхідного короткозамкненого шлейфу  $l_{ш1}$ ,  
рис. 5.2, при  $Y_{L\_КЗ} = |\text{Im}(Y_{ex\_AE})| = 0,032 \text{ См}$  :

$$l_{ш1} = \text{arctg}(0,032 \cdot 50) \cdot 32,44 / 2\pi = 2,7 \text{ мм}.$$

Оцінимо довжину вихідного короткозамкненого шлейфу  $l_{ш2}$ ,  
рис. 6.2, при  $Y_{L\_КЗ} = |\text{Im}(Y_{вих\_AE})| = 0,021 \text{ См}$  :

$$l_{ш2} = \text{arctg}(0,021 \cdot 50) \cdot 32,44 / 2\pi = 4,05 \text{ мм}.$$

Для того, щоб ПВЧ не втратив стійкості роботи обмежимо кількість його каскадів двома. Тоді загальний коефіцієнт підсилення ПВЧ буде дорівнювати:

$$K_{P\Sigma} = 9,91 \cdot 2 = 19,82 \text{ дБ}.$$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 73

## Розрахунок номіналів елементів схеми та параметрів підсилювача високих частот (ПВЧ)

Потрібні параметри транзистора АТ-41435 на  $f = 3,6 ГГц$ , в режимі мінімального шуму наведено в таблиці 6.2, з додатку.

Таблиця 6.2.

Параметр	Значення
Струм колектора	$I_C = 10 mA$
Напруга колектор-емітер	$V_{CE} = 8 B$
Напруга живлення	$U_{ж} = 12 B$
Напруга емітер-база	$V_{EB} = 1 B$
Початкове значення струму колектор- база	$I_{CB0} = 0,2 мкА$
Початкове значення струму емітер-база	$I_{EB0} = 1 mA$
Значення ємності Колектор-база	$C_{CB} = 0,2 нФ$

1) Оцінимо вхідну провідність АЕ:

$$Y_{11} = \frac{(1 - S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}}{\Delta S \cdot Z_0} =$$

$$= \frac{(1 - 0,46 \cdot e^{j2.39}) \cdot (1 + 0,43 \cdot e^{-j1.6}) + 0,133 \cdot e^{j1.012} \cdot 2,15 \cdot e^{j0.576}}{(0,144 - 0,145j) \cdot 50} = 0,123 + 0,041j$$

2) Номінал резистора в колі емітера [1]:

$$R_E = \frac{V_{EB} + 10 \cdot I_{CB0} / \text{Re}(Y_{11})}{I_C} = \frac{1 + 10 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} / 0,123}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \Omega$$

(ряд Е48).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 74

3) Номінал резистора фільтра живлення:

$$R_3 = \frac{E_{жс} - V_{CE}}{I_C} - R_E = \frac{12 - 8}{10 \cdot 10^{-3}} - 100 = 300 \text{ Ом (ряд E24)},$$

4) Визначимо номінали резисторів діляника напруги –  $R_1$ ,  $R_2$ .

$$R_1 = \frac{10 \cdot E_{жс}}{\text{Re}(Y_{11}) \cdot (E_{жс} - R_E \cdot I_C)} = \frac{10 \cdot 12}{0,123 \cdot (12 - 100 \cdot 0,01)} = 88,7 \text{ Ом}$$

(E96, E192).

$$R_2 = \frac{10 \cdot E_{жс}}{\text{Re}(Y_{11}) \cdot (R_E \cdot I_C)} = \frac{10 \cdot 12}{0,123 \cdot (100 \cdot 0,01)} = 975,61 \text{ Ом, візьмемо}$$

976 Ом (E96, E192).

5) Визначимо номінал ємності  $C_3$  – фільтра кіл живлення:

$$C_3 = \frac{50}{\omega_0 \cdot R_3} = \frac{50}{2\pi \cdot 3,6 \cdot 10^9 \cdot 300} = 7,37 \text{ нФ, візьмемо } 7,41 \text{ нФ}$$

(E192).

6) Визначимо номінал ємності  $C_2$  – бази транзистора:

$$C_2 = \frac{50}{\omega_0 \cdot R_E} = \frac{50}{2\pi \cdot 3,6 \cdot 10^9 \cdot 100} = 22,1 \text{ нФ, візьмемо } 22,1 \text{ нФ (E96,}$$

E192).

7) Визначимо номінали ємностей розділюючі конденсаторів:

$$C_1 = C_4 = (20 \div 50) \cdot C_{CB} = 50 \cdot 0,2 \text{ нФ} = 10 \text{ нФ (E3–E192)}.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 75

8) Визначимо загальний коефіцієнт шуму  $K_{ш\sigma}$  підсилювача та його шумову температуру  $T_{ш}$ .

Коефіцієнт шуму  $K_{ш\sigma}$  багатокаскадного підсилювача визначається згідно рівняння:

$$K_{ш\sigma} = K_{ш1} + (K_{ш2} - 1) / K_{p1} + (K_{ш3} - 1) / K_{p1} \cdot K_{p2} + \dots,$$

Коефіцієнт шуму одного каскаду дорівнює  $K_{ш1} = 1,8\text{дБ} = 10^{1,8/10} = 1,51$  – за потужністю. Коефіцієнт підсилення за потужністю одного каскаду  $K_{p1} = 9,787$ .

Тоді для двокаскадного ПВЧ:

$$K_{ш12} = 1,51 + (1,51 - 1) / 9,787 = 1,51 + 0,052 = 1,562 = 1,937\text{дБ}.$$

Шумову температуру  $T_{ш}$  ПВЧ можна оцінити згідно рівняння:

$$T_{ш} = (K_{ш\sigma} - 1) \cdot T_0 = (1,562 - 1) \cdot 290 = 163\text{К}.$$

Шуми наступних вузлів, приведені до входу приймача будуть вносити несуттєвий вклад у загальну шумову температуру приймача, тому ними можна знехтувати. Таким чином власна шумова температура приймача  $T_{np}$  буде визначатись шумовою температурою вхідного ПВЧ і дорівнювати  $T_{np} = 163\text{К}$ .

**Результуюча схема** одного каскаду підсилювача ПВЧ має вигляд:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	Екземпляр № 1	Арк 79 / 76

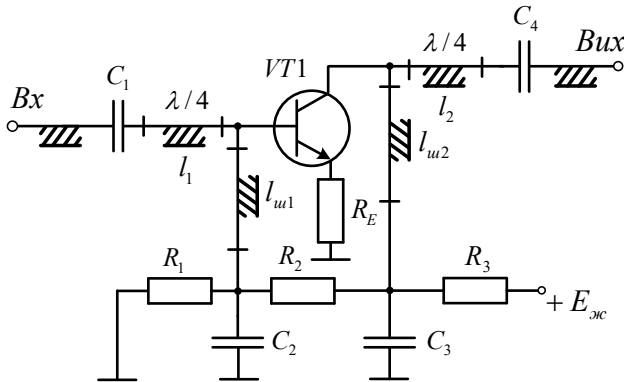


Рисунок 6.3 – Один каскад ПВЧ на біполярному транзисторі AT-41435 фірми Avago technologies

Приклад друкованої плати НВЧ тюнера (3 каскада ПВЧ, змішувач та 3 каскада ППЧ), розробленої в середовищі Microsoft Visio наведено на рис. 6.4.

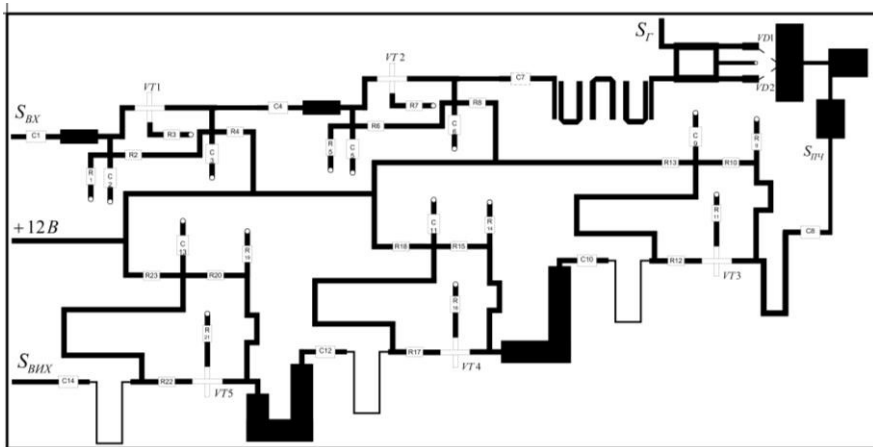


Рисунок 6.4 – друкована плата НВЧ тюнера

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 77</i>

### 3. Завдання до роботи

1. За допомогою наведеної методики та MathCad виконати розрахунок параметрів та номіналів усіх елементів схеми рис. 6.3 підсилювача на середню частоту 2,4ГГц.

2. Розрахувати три ланки та розробити друковану плату триланкового НВЧ підсилювача на біполярних транзисторах в середовищі Microsoft Visio з рамкою 55мм.

3. Оформити отримані результати у вигляді звіту.

#### 4. Вміст звіту

4. Мета роботи.

5. Розрахована схема та друкована плата триланкового підсилювача.

6. Висновки по роботі.

#### 5. Контрольні запитання

6. Як реалізується мікросмужковий ємнісний шлейф?

7. Як реалізується мікросмужковий індуктивний шлейф?

8. Навіщо потрібні кола узгодження?

9. Які переваги та недоліки схем НВЧ підсилювачів з використанням біполярних транзисторів?

10. Які переваги та недоліки схем НВЧ підсилювачів з використанням польових транзисторів?

11. Що таке матриця S-параметрів?

12. Фізичний зміст кожного S-параметра.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 78</i>

13. Які є режими роботи підсилювачів на коефіцієнтом шуму та підсилення?
14. Як використовується ВАХ та АЧХ транзистора при проектуванні схеми?
15. Яке призначення чвертьхвильового трансформатора активного опору?
16. Конструкція та параметри чвертьхвильового трансформатора активного опору.
17. Конструкція мікросмужкової НВЧ плати.
18. Як зробити НВЧ трансформатор активного опору та фільтри більш компактними (кути згинання доріжки)?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-22.06- 05.02/2/172.00.1/М /ВК2.3-2021
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 79 / 79</i>

## Література

1. Ципоренко В.В. Методи і засоби обробки НВЧ сигналів у радіотехнічних системах: Навчальний посібник. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. 141 с. ISBN 978-966-683-570-6
2. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: навчальний посіб. / За ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В.І. Правди – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.: іл.
3. Салабай О. В. Ескізне проектування радіоприймальних пристроїв / Салабай О. В. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2012 – с. 76.
4. Proakis J.G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications. 4-th Edition. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006. – 1077р.
5. Richtmyer R.D. Dielectric Resonators. Journal of Applied Physics. 2004. – Vol. 10, Issue 6. pp. 391–410.
6. Сосков А. Г., Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка: Підручник / За ред. А. Г. Соскова. – К.: Каравела, 2015. – 536 с.