

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія



Є.Я. Швець

О.П. Головка

Ю.В. Головка

О.П. Посунько

МІКРОХВИЛЬОВА ТЕХНІКА

Методичні вказівки

**до виконання лабораторних робіт,
самостійної роботи і контролю знань студентів**

для студентів ЗДІА

спеціальності 6.05.08.01 “Мікро- та наноелектроніка”



**Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія**

МІКРОХВИЛЬОВА ТЕХНІКА

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт,
самостійної роботи і контролю знань студентів**

*для студентів ЗДІА
спеціальності 6.05.08.01 “Мікро- та наноелектроніка”*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ФБМЕ
протокол № 8 від 26.11.2010*

Запоріжжя

ЗДІА

2011

Мікрохвильова техніка. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, самостійної роботи і контролю знань студентів для студентів спеціальності 6.05.08.01 “Мікро- та наноелектроніка” / Укл.: Є.Я. Швець, О.П. Головка, Ю.В. Головка, Посунько О.П. – Запоріжжя: ЗДІА, 2011. – 51 с.

Зміст

Лабораторна робота № 1. Дослідження розповсюдження електромагнітної хвилі мікрохвильового діапазону по хвилеводу.....	4
Лабораторна робота № 2. Дослідження ослаблення електромагнітного випромінювання мікрохвильового діапазону атенюаторами.....	10
Лабораторна робота № 3. Вивчення конструкції елементів хвилеводних трактів.....	14
Лабораторна робота № 4. Дослідження діода мікрохвильового діапазону.....	19
Лабораторна робота № 5. Дослідження малошумлячого підсилювача мікрохвильового діапазону.....	24
Лабораторна робота № 6. Дослідження мікросмужкових ліній для мікросхем мікрохвильового діапазону	33
Лабораторна робота № 7. Моделювання та оптимізація фільтра для мікросхеми мікрохвильового діапазону за допомогою програми Microwave Office.....	36
Лабораторна робота № 8. Дослідження впливу пасивних елементів на характеристики мікросхем мікрохвильового діапазону	45
Список літератури, що рекомендується.....	51

Лабораторна робота № 1

Дослідження розповсюдження електромагнітної хвилі мікрохвильового діапазону по хвилеводу

Мета роботи: вивчення процесів передачі потужності мікрохвильового діапазону по хвилеводу.

1.1 Короткі теоретичні відомості

Відомо, що характер передачі енергії електромагнітних коливань змінюється зі зменшенням довжини хвилі. У мікрохвильовому діапазоні енергія передається, в основному, в вигляді не електричного струму, а електромагнітної хвилі, що поширюється поза провідниками. Провідник або обмежує простір, де поширюється енергія (хвилевід, мікросмужкова або коаксіальна лінія), або задає напрямок поширення енергії (двохдротова або однодротова лінія передачі).

При передачі потужності по мікросмужковим лініям (МСЛ), коаксіальним кабелям і хвилеводам необхідно узгоджувати хвилевод з навантаженням (рис. 1.1), щоб мінімізувати відбиту від навантаження потужність і виключити режим стоячих хвиль.



Рисунок 1.1 - Підключення навантаження до генератора електричної напруги мікрохвильового діапазону

Хвилевод, кабель або МСЛ, фізична довжина l якого близька до довжини хвилі $\lambda_{ХВ}$, називається довгою лінією. В мікрохвильовій техніці, де довжини хвиль сигналів складають десятки і одиниці сантиметрів практично будь-яка лінія передачі є довгою лінією. Довжина і частота хвилі пов'язані між собою:

$$\lambda_{ХВ} = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

де c - швидкість світла у вакуумі, $m \cdot s^{-1}$; f - частота сигналу, Гц.

Для забезпечення максимальної ефективності передачі потужності генератора до навантаження необхідне виконання наступної умови:

$$Z_{Н} = Z_0, \quad (1.2)$$

де $Z_{Н}$ - комплексний опір навантаження;

Z_0 - комплексний хвильовий опір хвилеводу.

При невиконанні цієї умови відбувається відбиття потужності від навантаження, і відбита потужність повертається назад до генератора. Амплітуда хвилі в кожній точці хвилеводу в такому режимі дорівнює сумі амплітуд прямої або падаючої хвилі $U_{П}$ і відбитої хвилі $U_{Від}$. При цьому сума амплітуд цих хвиль залишається постійною для кожної точки хвилеводу – відбувається утворення стоячої хвилі (рис. 1.2).

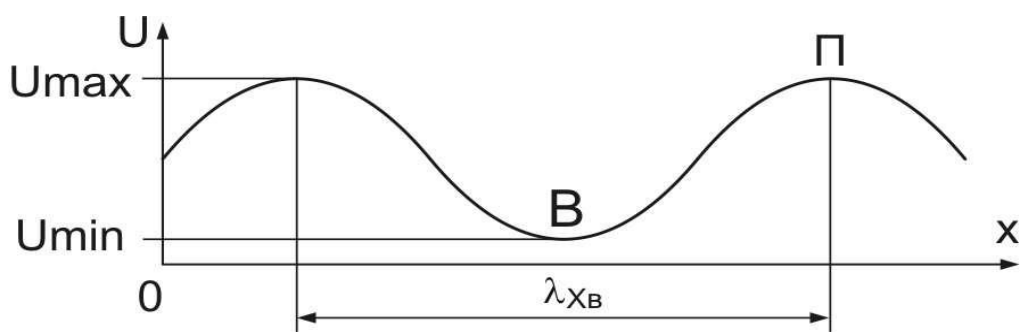


Рисунок 1.2 - Розподіл амплітуди хвилі в хвилеводі у режимі стоячої хвилі

Стояча хвиля характеризується постійним у часі розподілом амплітуди по довжині передаючої лінії, тобто вона не рухається уздовж лінії. Утворюються вузли (В), в яких напруга мінімальна U_{min} , і пучності (П), в яких напруга максимальна U_{max} .

Відомо, що за відсутності узгодження хвилеводу з навантаженням миттєві значення напруги $u(t,x)$ і струму $i(t,x)$ можна знайти, використовуючи вирази:

$$\begin{aligned} u(t,x) &= U_m \cos\left(\frac{\omega}{v_0}x\right) \cdot \cos(\omega t) \\ i(t,x) &= I_m \sin\left(\frac{\omega}{v_0}x\right) \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

де ω - кругова частота переміщення напруги генератора; U_m, I_m - амплітудні значення напруги і струму; v_0 - швидкість руху хвилі в хвилеводі; x - координата, відлічувана від навантаження до генератора.

Формули (1.3) одержані для випадку поганого узгодження з навантаженням. З виразів (1.3) виходить, що існують такі ділянки лінії, на яких не залежно від часу напруга дорівнює нулю або досягає максимуму. Наприклад, величина аргументу φ

$$\varphi = \frac{\omega}{v_0}x = \frac{2\pi f}{v_0}x \quad (1.4)$$

не залежить від часу, тому у точках, де $\varphi=90^\circ \pm 2\pi$, $u(t,x)=0$.

При поліпшенні узгодження хвилеводу з навантаженням різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди хвилі зменшується - режим роботи хвилеводу наближається до оптимального - режиму хвилі, що біжить. Режим хвилі, що біжить, досяжний тільки при виконанні умови (1.2).

Ступінь узгодженості хвилеводу або смужкової лінії з навантаженням характеризується коефіцієнтом хвилі $K_{БХ}$, що біжить

$$K_{БХ} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}. \quad (1.5)$$

При $K_{БХ}=1$ напруга уздовж лінії передачі не змінюється і стояча хвиля відсутня.

Довжина хвилі в середовищі розповсюдження $\lambda_{ХВ}$ залежить від електромагнітних властивостей цього середовища: Довжина хвилі λ пов'язана з довжиною хвилі у вакуумі λ_0 наступним співвідношенням:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1.6)$$

де $\lambda_{ХВ}$ - довжина хвилі в середовищі розповсюдження; λ_0 – довжина тієї ж хвилі у вакуумі; ϵ - відносна діелектрична проникність матеріалу; μ - відносна магнітна проникність матеріалу.

Таким чином, в середовищах, що мають високі значення ϵ і μ , відбувається укорочення довжини хвилі. Довжина хвилі v пов'язана із швидкістю її розповсюдження співвідношенням

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}, \quad (1.7)$$

де f - частота електромагнітної хвилі; T - її період.
Аналогічно формулі (1.4):

$$v = \frac{2\pi f x}{\phi}, \quad (1.8)$$

де x - зміна координати уздовж хвилеводу, м; ϕ - фазовий зсув хвилі, рад.

Крім того, використовуючи режим стоячих хвиль, можна здійснити вимірювання швидкості розповсюдження хвилі в хвилеводі іншим способом. Замірявши довжину хвилі в хвилеводі по відстані між вузлами або пучностями в режимі стоячих хвиль і знаючи частоту генератора можна обчислити швидкість:

$$v = \frac{\lambda_B}{T} = \lambda_B \cdot f. \quad (1.9)$$

На точність вимірювання швидкості розповсюдження хвилі в хвилеводі істотно впливає точність установки частоти генератора.

1.2 Опис лабораторної установки

Вимірювальна установка (рис. 1.3) складається з генератора сигналу мікрохвильового діапазону, аттенюатора або ослаблювача потужності, вимірювального хвилеводу, навантаження, вольтметра, що вимірює величину електромагнітного поля в хвилеводі.

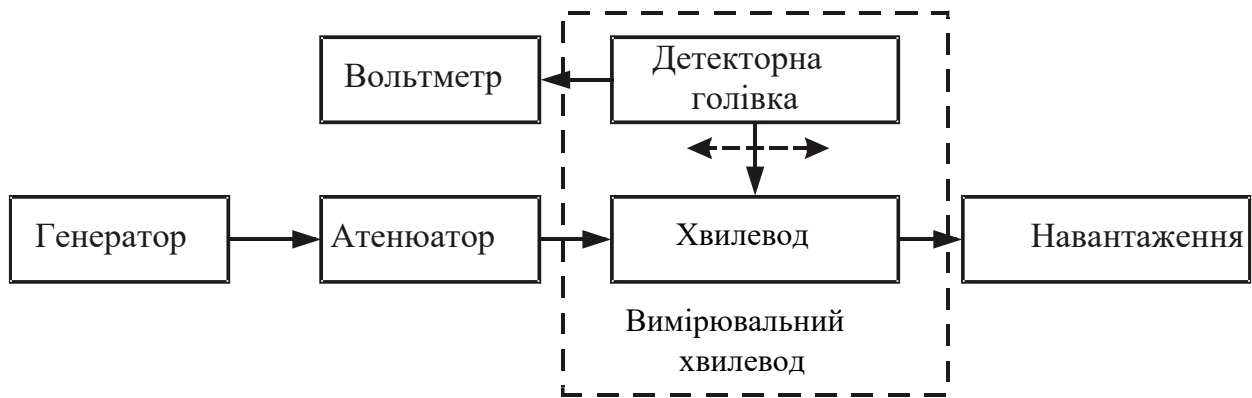


Рисунок 1.3 - Блок-схема вимірювальної установки

Вимірювальний хвилевод (рис. 1.4), має подовжній проріз, в який введена детекторна голівка, закріплена знизу детекторного блоку. На детекторному блоці є регулятори висоти розташування детекторної голівки і її узгодження з хвилею в хвилеводі. Детекторна голівка сприймає напруженість електромагнітного поля в хвилеводі і перетворює її в напругу. Є можливість переміщення детекторного блоку з детекторною голівкою уздовж вимірювального хвилеводу з фіксацією поточної координати x за допомогою покажчика положення.

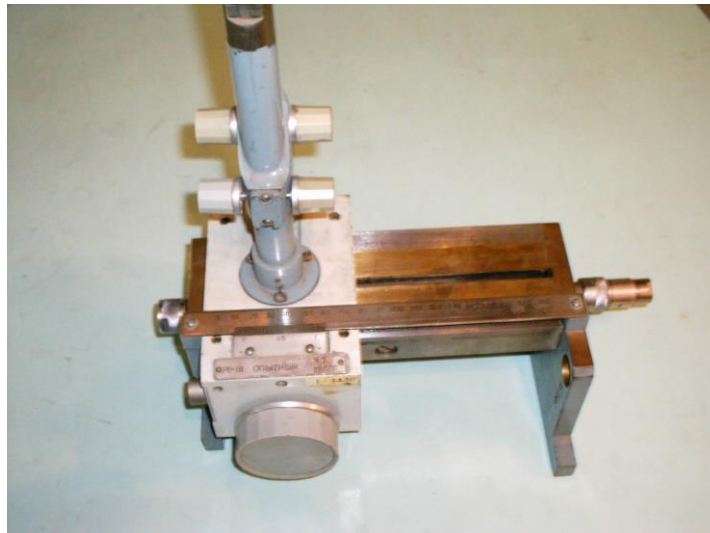


Рисунок 1.4 - Зовнішній вигляд вимірювального хвилеводу

1.3 Порядок виконання роботи

1. Розглянути теоретичні відомості приведені в роботі, ознайомитися з блок-схемою лабораторної вимірювальної установки.
2. Включити вольтметр, натискаючи кнопку "U-" і прогріти його протягом однієї-двох хвилин.

3. Включити генератор сигналу мікрохвильового діапазону.
4. Переконатися в працездатності вимірювальної установки, для чого, поступово переміщаючи детекторний блок уздовж хвилеводної лінії, спостерігати зміну показів вольтметра.
5. Встановити значення частоти генератора в діапазоні від 700 до 800 МГц.
6. Провести дослідження розподілу інтенсивності електромагнітного поля уздовж вимірювальної лінії, для чого:
 - встановити детекторний блок в початок вимірювальної лінії; занести в таблицю 1.1 дані про положення детекторного блоку і показ вольтметра;
 - переміщаючи детекторний блок управо з кроком в 15 мм повторювати вимірювання до кінця вимірювальної лінії.

Таблиця 1.1 - Результати вимірювань і розрахунків

№	f, МГц	x, мм	U, В	λ , см	v, м/с
1					
2					
...					

7. Повторити вимірювання п. 6 для трьох різних значень частоти генератора сигналу мікрохвильового діапазону.
8. Використовуючи одержані дані, побудувати графік розподілу інтенсивності електромагнітного поля уздовж вимірювальної лінії для різних значень частоти сигналу генератора.
9. Виділити положення максимумів і мінімумів в одержаних розподілах. Визначити відстані між найближчими максимальним і мінімальним значеннями інтенсивності електромагнітного поля одержаних розподілів.
10. Виміряти на графіках довжини хвиль в хвилеводі для різних значень частоти генератора та розрахувати відповідні їм швидкості розповсюдження хвилі в хвилеводі, використовуючи вираз (1.9).
11. Розрахувати для кожної з досліджених частот довжину хвилі у вакуумі за формулою (1.1).
12. Зробити висновки за результатами роботи.

1.4 Зміст звіту

1. Номер і тема, мета роботи.

2. Короткі теоретичні відомості по темі роботи, блок-схема і опис вимірювальної установки.
3. Таблиця з результатами вимірювань і розрахунків.
4. Графічне представлення розподілу інтенсивності електромагнітної хвилі у вимірювальній лінії.
5. Розрахунок довжини хвилі для трьох різних значень частоти генератора мікрохвильового діапазону.
6. Розрахунок швидкості розповсюдження хвилі в хвилеводі для трьох різних значень частоти генератора мікрохвильового діапазону.
7. Висновки.

1.5 Контрольні питання

1. Які умови потрібно виконати для узгодження хвилеводу і навантаження?
2. У якому режимі працює вимірювальний хвилевід, що використовується в роботі?
3. Що таке "режим хвилі, що біжить", і "режим стоячої хвилі"?
4. Що таке "вузол" і "пучність" в розподілі інтенсивності хвилі в хвилеводі?
5. Що таке "довга лінія"?
6. Що таке коефіцієнт укорочення довжини хвилі?
7. Які чинники впливають на довжину хвилі в хвилеводі?
8. Чи впливає величина вихідної потужності генератора на точність вимірювання швидкості розповсюдження хвилі в хвилеводі?
9. Як змінюється довжина хвилі із збільшенням таких характеристик середовища розповсюдження як відносна діелектрична проникність ϵ і відносна магнітна проникність μ ?

Лабораторна робота № 2

Дослідження ослаблення електромагнітного випромінювання мікрохвильового діапазону атенюаторами

Мета роботи: вивчення побудови і застосування атенюаторів в хвилеводних пристроях.

2.1 Короткі теоретичні відомості

При побудові пристроїв мікрохвильового діапазону виникає необхідність плавного регулювання або фіксованого ослаблення величини проходимої енергії. З цією метою застосовуються ослаблювачі потужності хвилі - атенюатори (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Структурна схема атенюатора

Атенюатори бувають керовані і некеровані (рис.2.2).

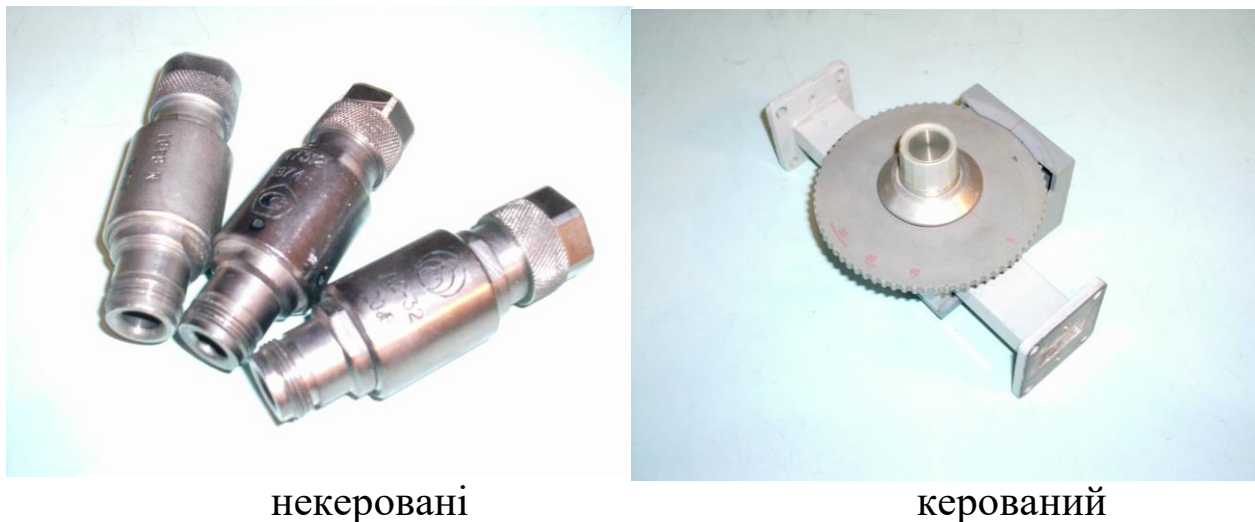


Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд атенюаторів

Некеровані атенюатори мають постійний коефіцієнт ослаблення, який не можна змінити в процесі експлуатації. Керовані атенюатори змінюють коефіцієнт ослаблення, тобто мають можливість налаштування.

За конструктивним виконанням атенюатори бувають у вигляді прямокутних хвилеводів або коаксіальні.

Принцип роботи атенюаторів полягає в тому, що в хвилевод вводиться графітна або металева деталь, яка поглинає енергію електромагнітного поля. Ця енергія витрачається на розігрівання цієї

деталі. Також існують атенюатори, які здійснюють регулювання проходячої через них потужності за рахунок зміни геометричних параметрів хвилеводів.

Основною характеристикою атенюатора є коефіцієнт послаблення K , який обчислюється за формулою:

$$K = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}} \text{ дБ}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{вх}}$ – потужність на вході атенюатора; $P_{\text{вих}}$ – потужність на виході атенюатора.

Крім того, оскільки потужність пропорційна квадрату напруги, можна використовувати співвідношення напруг:

$$K = 20 \cdot \lg \frac{U_0}{U_A} \text{ дБ}, \quad (2.2)$$

де U_0 – напруга, що характеризує інтенсивність поля у відсутності атенюатора; U_A – напруга, що характеризує інтенсивність поля з включеним в ланцюг атенюатором.

2.2 Опис лабораторної установки

Для виконання роботи використовується та ж сама вимірювальна установка, що і в роботі №1 (дивись п. 1.2, рисунки 1.3 та 1.4).

2.3 Порядок виконання роботи

1. Розглянути теоретичні відомості, приведені в роботі, ознайомитися з блок-схемою лабораторної вимірювальної установки.

2. Включити вольтметр, натискаючи кнопку "U-" і прогріти його протягом однієї-двох хвилин. Включити генератор високих частот. Переконатися в працездатності вимірювальної установки, для чого, поступово переміщаючи детекторний блок уздовж хвилеводної лінії, спостерігати зміну показів вольтметра.

3. Встановити значення частоти генератора в діапазоні від 700 до 800 МГц.

4. Переміщаючи детекторний блок вимірювального хвилеводу уздовж лінії, знайти таке положення детекторного блоку, де покази вольтметра максимальні. Записати в таблицю 2.1 значення напруги U , частоти генератора f_r .

Таблиця 2.1 - Результати вимірювань і розрахунків

№	f , МГц	Тип атенюатора	U_{\max} , В	K , дБ
1				
2				
3				
4		Без атенюатора		-

5. Вимкнути генератор. Між коаксиальним кабелем генератора і хвилеводом вставити перший з досліджуваних атенюаторів. Увімкнути генератор. Повторити вимірювання за п. 3, 4 і записати в таблицю 2.1 значення напруги U , частоти генератора f_r і тип атенюатора.

6. Вимкнути генератор. Між коаксиальним кабелем генератора і хвилеводом замінити вже досліджений атенюатор на іншій із запропонованих і повторити п. 3, 4, 5. Повторити вимірювання для трьох типів атенюаторів.

7. Використовуючи одержані дані, розрахувати коефіцієнт послаблення всіх типів атенюаторів за формулою (2.2).

8. Зіставити марку кожного атенюатора з отриманими для них значеннями коефіцієнтів послаблення.

9. Зробити висновки за результатами роботи.

2.4 Зміст звіту

1. Номер і тема, мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості по темі роботи, блок-схема і опис вимірювальної установки.
3. Таблиця з результатами вимірювань і розрахунків.
4. Розрахунок коефіцієнтів послаблення атенюаторів.
5. Висновки.

2.5 Контрольні питання

1. Який хвильовий опір повинен мати атенюатор?

2. Як оцінити коефіцієнт послаблення аттенюатора?
3. Чи залежить коефіцієнт послаблення аттенюатора від частоти?
4. Які елементи застосовуються для ослаблення електромагнітних полів мікрохвильового діапазону?
5. Для чого застосовують нерегульовані аттенюатори?

Лабораторна робота № 3

Вивчення конструкції елементів хвилеводних трактів

Мета роботи: вивчення конструкції, параметрів і способів використання хвилеводів, кутів і відгалужувачів трактів мікрохвильового діапазону.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Хвилеводний тракт є одним з видів ліній передачі електромагнітної енергії. Цей вид ліній передачі широко застосовується в мікрохвильовій техніці. При конструюванні будь-якої лінії передачі, у тому числі і хвилеводної, враховуються умови, в яких вона використовуватиметься. Практично рідкісні випадки, коли хвилеводна система складається тільки з прямолінійного безперервного і однорідного по перетину хвилеводного тракту.

Хвилеводні системи є досить складними комплексами різних елементів, кожний з яких має своє призначення. При розгляді прикладів конструкції і роботи кожного з елементів передбачається, що по хвилеводному тракту, в який включений даний елемент, розповсюджується хвиля H_{10} , оскільки її поле має досить просту конфігурацію і найчастіше використовується на практиці.

Розглянемо конструкцію і принцип дії деяких хвилеводних елементів і простих пристроїв, які використовуються в хвилеводній системі.

Хвилеводи служать лініями для передачі надвисокочастотної енергії по лінії (рис. 3.1). Розмір перетину хвилеводу визначається довжиною хвилі λ . При цьому розміри перетину хвилеводу вибираються із співвідношення (рис. 3.1)

$$a = k \frac{\lambda}{2} \quad b = k \frac{\lambda}{4}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

У області сантиметрового діапазону множники k вибираються рівними одиниці. В області міліметрових хвиль можна вибрати $k = 2, 3 \dots$ і більше.

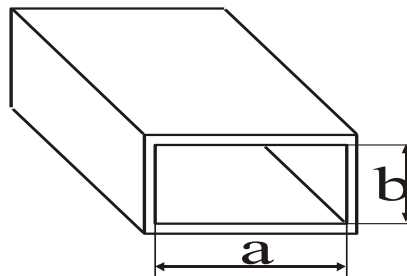
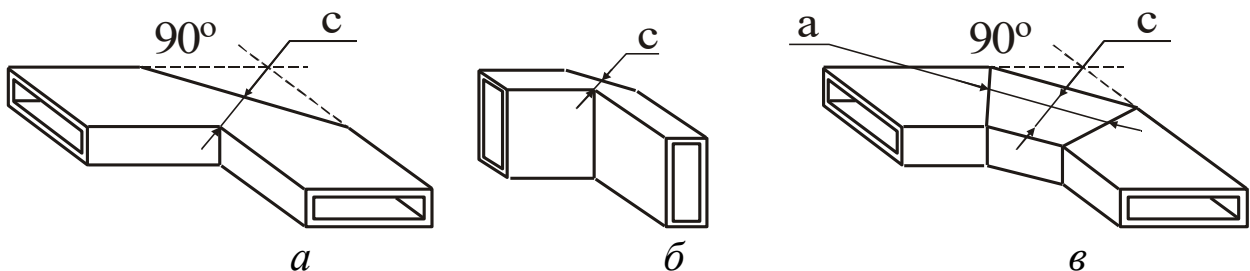


Рисунок 3.1 - Прямокутний хвилевод

Хвилеводні вигини і кути служать для зміни напрямку розповсюдження електромагнітної енергії. Якщо напрямок розповсюдження змінюється в площині електричного вектора, вигини і кути називаються Е-площинними і, відповідно, Н-площинними, якщо напрямок розповсюдження змінюється в площині магнітного вектора Н.

Вигини і кути, як і інші неоднорідності в хвилеводі, викликають появу відбитих хвиль, чим погіршуються умови узгодження хвилеводу. Для отримання малих віддзеркалень від вигинів в широкій смузі частот радіус вигину повинен бути не менше 2...3-х довжин хвилі в хвилеводі. При виконанні цієї умови вигин матиме таку ж смугу пропускання, як і основний хвилевод. На відміну від вигинів, кути мають менші габарити і є більш технологічними. Проте їх смуга пропускання не перевищує величину 10%. На рисунку 3.2 показані скомпенсовані Е-, і подвійний Н-площинний кути. Відбиті від кута хвилі компенсуються підбором відстані c або довжини вигину, рівній ширині хвилеводу a при необхідному куті Q загибу хвилеводу в подвійному куті.



a - скомпенсований Н-куток; *б* скомпенсований Е-куток;
в - подвійний Н-куток

Рисунок 3.2 – Різновиди кутів хвилеводів

Направлені відгалужувачі служать для відведення з основного хвилеводу деякої частини енергії, що проходить, величина якої визначається коефіцієнтом зв'язку відгалужувача. Найпростіша конструкція відгалужувача є двома хвилеводами з однією спільною стінкою, електромагнітний зв'язок між якими здійснюється за допомогою двох отворів, розташованих на відстані $\lambda/4$. Хвилеводи можуть мати загальною як широку, так і вузьку стінку. Частіше застосовуються відгалужувачі із загальною вузькою стінкою (рис. 3.3).

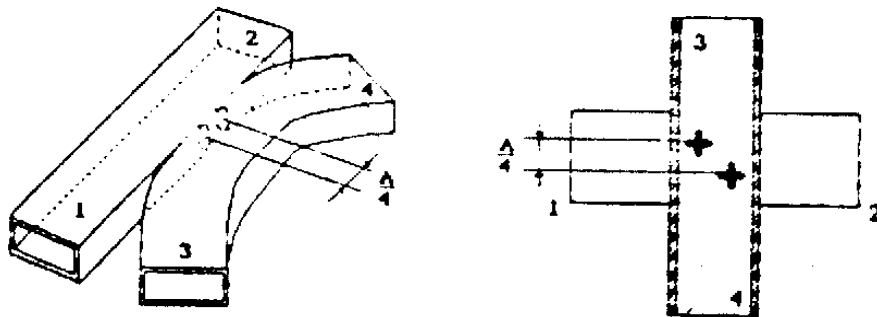


Рисунок 3.3 - Направлені відгалужувачі з двохдірчастим переходом і хрестоподібними щілинами

Принцип роботи відгалужувача полягає в наступному: падаюча хвиля з боку входу 1 послідовно порушує отвори зв'язку, причому другий отвір збуджується із запізнюванням по фазі на 90° щодо першого за рахунок різниці ходу на $\lambda/4$. Хвилі, збуджені отворами в допоміжному хвилеводі, розповсюджуються в ньому до виходів 3 і 4, при цьому хвилі, що розповсюджуються до виходу 3 взаємно знищуються, оскільки при однакових отворах їх амплітуди рівні, а результуюча різниця фаз дорівнює 180° . Хвилі, що розповсюджуються у напрямі виходу 4, складаються. Величина, форма і розташування отворів щодо осі хвилеводу визначають частку енергії, відбирану з основного хвилеводу, тобто визначають коефіцієнт зв'язку.

Зв'язок за допомогою двох отворів відрізняється малим впливом відгалужувача на розповсюдження хвиль в основному хвилеводі. Тому в практичних конструкціях, зв'язок між хвилеводами відгалужувача часто виконується у вигляді декількох отворів, розташованих на відстанях, менших $\lambda/4$ або за допомогою щілин: довгих або хрестоподібних. Такі зв'язки забезпечують більш

постійний коефіцієнт передачі по потужності в достатньо широкій смузі частот.

Два пересічні хвилеводи із зв'язком по широкій стінці у вигляді двох хрестоподібних щілин утворюють направлений відгалужувач (рис. 3.3).

Розглянуті прості хвилеводні елементи дозволяють скласти злагоджені відрізки ліній передачі, які при різному поєднанні можуть утворювати багатоканальні хвилеводні тракти. В цьому випадку виникає необхідність вирівнювання амплітуд і фаз сигналів, що розповсюджуються в окремих каналах таких систем обробки. Для цього можуть бути використані такі прості хвилеводні пристрої як хвилеводний атенюатор і підлаштовувачий фазообертач, загальний вид яких представлений на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 - Атенюатор і фазообертач

У конструкції атенюатора використовується пластина з полікору, поміщена в порожнині хвилеводу. Залежно від глибини занурення змінюється величина поглинання електромагнітного поля, що розповсюджується в хвилеводі. Кінематичний вузол і стопорний механізм забезпечує фіксацію занурення при заданому послабленні сигналу.

У фазообертачі фторопластова пластина розташована уздовж вузької стінки хвилеводу і може бути зафіксована в будь-якому місці напівширини широкої стінки хвилеводу. Найбільша взаємодія такої неоднорідності з хвилею, що розповсюджується, буде в центрі хвилеводу і фазовий зсув, що вноситься, тоді буде максимальним. Діапазон фазових зсувів, що вводяться, звичайно не перевищує однієї довжини хвилі в хвилеводі.

Розглянуті елементи і прості пристрої хвилеводного тракту дають загальне уявлення про передачу сигналу по фідерному тракту від антени до приймача або від передавача до антени.

Зовнішній вигляд деяких елементів хвилеводних трактів показаний на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 - Зовнішній вигляд деяких елементів хвилеводних трактів мікрохвильового діапазону

3.2 Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію, паспортні дані, виміряти геометричні розміри перетинів хвилеводів і інших елементів хвилеводних трактів.
2. Використовуючи формулу 3.1 розрахувати довжину хвилі, на якій працюють запропоновані елементи хвилеводних трактів.
3. Зібрати хвилеводний тракт із запропонованих елементів для передачі енергії хвилі мікрохвильового діапазону з генератора в навантаження.

3.3 Зміст звіту

1. Номер і тема, мета роботи.
2. Опис конструкції елементів хвилеводних трактів.
3. Розрахунки довжини хвилі для кожного з елементів.
4. Блок-схема мікрохвильового пристрою, який зібрано з елементів.

3.4 Контрольні питання

1. Дайте короткий опис конструктивного виконання хвилеводних вигинів і кутів.

2. Дайте короткий опис принципу дії направленою відгалужувача.
3. Навіщо застосовують посріблені хвилеводи?
4. Який принцип дії фазообертача?
5. Який діапазон фазових зсувів, що вводяться фазообертачем?

Лабораторна робота № 4

Дослідження діода мікрохвильового діапазону

Мета роботи - вивчити переваги, недоліки та області використання діода Гана, виконати математичне моделювання його вольт – амперної характеристики та визначити на основі розробленої моделі робочі параметри діода.

4.1 Короткі теоретичні відомості

До діодів мікрохвильового діапазону належать діоди з бар'єром Шоткі, лавінопробитні, тунельні діоди та діоди Гана.

Діодом Гана називають пристрій з напівпровідникового матеріалу, що має складну структуру зони провідності (арсеніду галію, фосфіду індію) із двома омичними контактами (анодом і катодом). Діод Гана є пристроєм твердотільної електроніки, дія якого заснована на створенні в активному середовищі динамічних неоднорідностей під впливом зовнішніх фізичних факторів у процесі експлуатації пристрою. Дія діода Ганна ґрунтується на появі негативного диференціального опору приладу під впливом сильного електричного поля, тобто так названої N – образної ВАХ (рис.4.1).

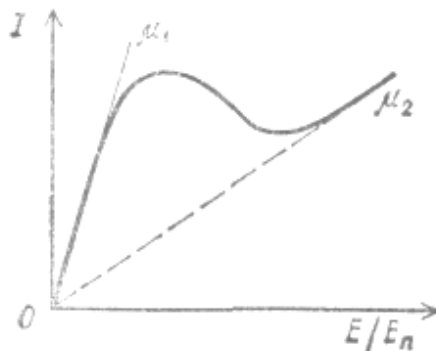


Рисунок 4.1 - Вольт-амперна характеристика діода Гана

Поява ділянки з негативним диференціальним опором на ВАХ приладу обумовлена існуванням двох “долин” в зоні провідності кристала арсеніду галія. В слабких електричних полях електрони у стані рівноваги знаходяться в нижній долині і характеризуються ефективною масою m^*_1 та рухливістю μ_1 . Зі зростанням напруженості прикладеного до діода електричного поля E енергія електронів зростає. Коли напруженість досягає визначеної величини E_n (порогове поле), енергія електронів стає достатньою для їх інтенсивного переходу з нижньої долини в верхню, де їх ефективна маса більше ($m^*_2 > m^*_1$), а рухливість – менше ($\mu_2 < \mu_1$). Внаслідок цього процесу при слабких електричних полях ($E \ll E_n$) густина струму описується співвідношенням

$$J_1 = en_0 \mu_1 E, \quad (4.1)$$

де: e – заряд електрона, n_0 – густина електронів провідності, а при сильних електричних полях ($E \gg E_n$) швидкість і щільність струму визначаються рухливістю μ_2 :

$$J_2 = en_0 \mu_2 E. \quad (4.2)$$

Поблизу граничного поля ($E = E_n$) у залежності дрейфової швидкості електронів від поля повинен відбуватися перехід від прямої, що відповідає рухливості μ_1 , до прямої, що відповідає рухливості μ_2 . Густина струму на цій ділянці:

$$J = e(n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2) E, \quad (4.3)$$

де n_1 і μ_1 - відповідно концентрація й рухливість електронів у нижній долині зони провідності; n_2 і μ_2 - відповідно концентрація й рухливість електронів у верхній долині зони провідності.

Перехід електронів з нижньої долини у верхню залежить від співвідношення між напруженостями прикладеного електричного поля E и граничного поля переходу E_n :

$$n_1 = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{E}{E_n}\right)^4}, \quad (4.4)$$

$$n_2 = \frac{n_0 \left(\frac{E}{E_n}\right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_n}\right)^4}. \quad (4.5)$$

Легко переконатися, що повна концентрація електронів провідності залишається постійною при будь-якій напруженості електричного поля:

$$n_1 + n_2 = \frac{n_0 \left[1 + \left(\frac{E}{E_n} \right)^4 \right]}{1 + \left(\frac{E}{E_n} \right)^4} = n_0.$$

Струм діода: $I = S \cdot J$ (4.6)

Підставляючи (4.3), (4.4), (4.5) в (4.6) і виразивши напруженість поля E через напругу U і відстань між анодом і катодом діода l

$$(E = U/l),$$

одержуємо вираз для вольт-амперної характеристики діода Гана:

$$I = S e n_0 \frac{\frac{\mu_1}{l} + \frac{\mu_2}{l} \left(\frac{U}{l E_n} \right)^4}{1 + \left(\frac{U}{l E_n} \right)^4} U, \quad (4.7)$$

де S - площа перетину кристала; E_n - порогове поле.

Для арсеніду галія: $E_n \approx 3$ кВ/см); $\mu_1 = 8000$ см²/(В • с); $\mu_2 = 180$ см²/(В • с).

Потрібна довжина кристала l (відстань між електродами) визначається робочою частотою діода f :

$$l = v_l / f,$$

де v_l - величина дрейфової швидкості електронів в слабких полях (в арсеніді галію $v_l = 2 \cdot 10^7$ см/с).

Перевіримо межі застосовності отриманого виразу для ВАХ. При дуже малих напругах $U \rightarrow 0$ четвертий ступінь відношення в

дужках дає зневажливо малу величину $\left(\frac{U}{l E_n} \right)^4 \rightarrow 0$,

тому

$$I = Sen_0 \mu_1 \frac{U}{l} = Sen_0 \mu_1 E .$$

Розділивши струм на перетин кристала, одержимо вираз для густини струму (4.1).

При високих напругах $U \rightarrow \infty$ четвертий ступінь відношення в дужках дає дуже велику величину, тому одиницею в знаменнику й виразом μ_1/l у чисельнику можна зневажити, тому одержуємо:

$$I = Sen_0 \mu_2 \frac{U}{l} = Sen_0 \mu_2 E ,$$

що аналогічно виразу для густини струму (4.2).

Таким чином, вираз (4.7) адекватно описує не тільки падаючу ділянку ВАХ, але й всі ділянки вольт-амперної характеристики, тобто є адекватною математичною моделлю вольт – амперної характеристики діода Гана.

Підставивши в (4.7) задані параметри напівпровідникової структури діода S, l, n_0 , значення величини заряду електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а також параметри монокристала арсеніда галію $\mu_1 = 8000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_2 = 180 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $E_n = 3\ 000 \text{ В/см}$, можемо виконати чисельний розрахунок ВАХ діода Гана.

По розрахованій ВАХ можна визначити робочі параметри діода:

1. Піковий струм – значення струму в максимумі ВАХ $I_{\text{п}}$.
2. Струм западини - значення струму в мінімумі ВАХ I_3 .
3. Відношення струмів - $I_{\text{п}} / I_3$.
4. Напругу піка - значення напруги в максимумі ВАХ $U_{\text{п}}$.
5. Напругу западини - значення напруги в мінімумі ВАХ U_3 .
6. Негативну провідність - диференціальну провідність на падаючій ділянці ВАХ $g = \Delta I / \Delta U$.

4.2 Порядок виконання роботи

1. Довести математичну модель ВАХ до вигляду, прийнятного для числового розрахунку, для чого підставити в (4.7) числові величини за своїм варіантом завдання (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Завдання для моделювання ВАХ діода Гана

Номер варіанта	Частота, f , ГГц	Площа перетину S , cm^2	Густина електронів n_0 , cm^{-3}
1	30	0,03	$3 \cdot 10^{15}$
2	35	0,025	$4 \cdot 10^{15}$
3	40	0,02	$5 \cdot 10^{15}$
4	45	0,015	$6 \cdot 10^{15}$
5	50	0,01	$7 \cdot 10^{15}$

2. Використовуючи програму Microsoft Excel виконати розрахунок і побудувати графік ВАХ діода.

3. За побудованим графіком ВАХ визначити робочі параметри діода Гана.

4.3 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Побудова математичної моделі ВАХ діода Гана.
3. Числова форма математичної моделі ВАХ для заданого варіанта.
4. Розрахована ВАХ у графічному вигляді.
5. Розраховані робочі параметри діода Гана.

4.4 Контрольні питання

1. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування діода Шоткі.
2. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування лавино-пробитного діода.
3. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування тунельного діода.
4. Фізичний принцип роботи, переваги та недоліки, область застосування діода Гана.
5. Принцип математичного моделювання ВАХ діода Гана.
6. Визначення робочих параметрів діода Гана.

Лабораторна робота № 5

Дослідження малoshумлячого підсилювача мікрохвильового діапазону

Мета роботи: змоделювати малoshумлячий підсилювач на польовому транзисторі із затвором Шоткі та дослідити його характеристики.

5.1 Короткі теоретичні відомості

5.1.1 Польові транзистори мікрохвильового діапазону

Серед польових транзисторів мікрохвильового діапазону (надшвидкодiючих) найбільш поширені транзистори із затвором в вигляді бар'єра Шоткі, виготовлені з арсеніда галію з електронною електропровiдністю (ПТШ, або MESFET - metal - semiconductor field - effect transistor).

ПТШ складається з високоомної підкладки ($\rho > 10^7$ Ом·см), буферного шару з концентрацією донорів $n_d \approx 10^{13}$ см⁻³, активного шару арсеніда галію n-типа електропровiдності ($n \approx 10^{17}$ см⁻³) та контактів метал – напiвпровiдник. Виток та сток виконані як омiчні контакти, а затвор – як бар'єр Шоткі.

Польові транзистори із затвором Шоткі використовуються для створення малoshумлячих підсилювачів в надшвидкодiючих мікросхемах.

В підсилювачі транзистор вмикають за схемою зі спільним витком (рис. 5.1).

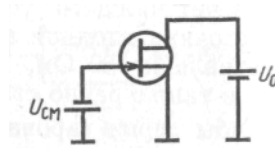


Рисунок 5.1 - Структура комірки польового транзистора з бар'єром Шоткі

5.1.2 Робота з програмою моделювання пристроїв мікрохвильового діапазону **Microwave Office 2001**

Пакет програм Microwave Office 2001 дозволяє моделювати як лінійні, так і нелінійні мікрохвильові (високочастотні і надвисокочастотні) ланцюги, проектувати мікросмужкові об'ємні конструкції і містить:

- одночастотний, двохчастотний і багаточастотний методи гармонійного балансу;
- ряди Вольтерра;
- конверсійно-матричний аналіз змішувачів;
- високошвидкісний метод лінійного аналізу;
- високошвидкісний метод аналізу шуму;
- підтримку файлів формату Spice і MMICAD.

Дане програмне забезпечення може бути встановлено на IBM PC - сумісний комп'ютер, задовільняючий наступним вимогам: 200 МГц Pentium або еквівалентний мікропроцесор, 32 Мб RAM, Microsoft Windows 95, 98 або NT/2000, 50 Мб вільного простору на жорсткому диску.

Запуск програми Microwave Office 2001

Для того, щоб почати роботу з Microwave Office 2001, натисніть кнопку Пуск на панелі задач Windows. Виберіть команду Програми Microwave Office. Натисніть назву програми Microwave Office. З'явиться головне вікно програми «Microwave Office 2001», яке містить лінійку всіх необхідних компонентів даного середовища проектування:

File – Файл. Project – Проект. Simulate – Моделювання. Options – Параметри. Windows - Управління вікнами. Help – Допомога.

Нижче розташовані кнопки; призначення активних кнопок можна визначити, підвівши курсор миші і затримавшись на декілька секунд.

Закладка Proj. Project View - вікно проглядання проекту; розташовано в лівій частині Головного вікна і має повну закінчену ієрархічну структуру проекту.

Design Notes - простий текстовий редактор, дозволяє створювати записку пояснення до Проекту. Викликається подвійним кліком миші на Design Notes.

Project Frequency - Установка діапазону робочих частот.

Global Equations - Глобальні рівняння. Може містити будь-які рівняння або функції.

Data Files - Файли даних. Містить список файлів даних, доданих до цього проекту.

Schematics - Схеми і параметри до них.

EM Structures - EM структури і відповідні параметри.

Conductor Materials - Властивості матеріалу провідника.

Output Equations - Вихідні рівняння.

Graphs - Графіки. Можливі 5 типів графіків: антенні креслення, прямокутна система координат; діаграма Сміта, полярна система координат, таблична форма.

Optimization Goals - Цілі оптимізації.

Yield Goals -Цілі виходу.

Output Files - Файли з вихідними значеннями величин.

Закладка Elem

Element Browser - Проглядання елементів.

Закладка Var

Variable Browser - Проглядання величин елементів.

Закладка Layout

Layout Browser - Топологія.

5.2 Порядок виконання роботи

Завдання: змоделювати з використанням програми моделювання пристроїв мікрохвильового діапазону **Microwave Office 2001** схему малошумлячого підсилювача на польовому транзисторі із затвором Шоткі та дослідити його характеристики.

1 Моделювання малошумлячого підсилювача

Крок 1: Запустити програму Microwave Office 2001.

Почати новий Проект: з меню File (Файл) вибрати New Project (Новий Проект). Далі виберіть Save Project As і задайте ім'я Проекту, наприклад, MyProject і натискуйте кнопку Зберегти.

Крок 2: Установка одиниць вимірювання.

З меню Options виберіть команду Units..., В меню Global Units, що з'явилося, приберіть галочку у Metric units. У вікні Length Type встановите mil (одна тисячна дюйма). Натискуйте ОК.

Крок 3: Створити нову схему.

Відкрити меню Project (Проект), Add Schematic (Додати схему), вибрати команду New Schematic... (Нову схему)

У формі Create New Schematic, введіть назву для нової схеми, друкуючи поверх Untitled 1. Наприклад, Stable Amp (Твердотільний підсилювач) для цієї схеми. Далі натискуйте ОК.

Крок 4: Імпортування даних.

Наведіть курсор мишки на Data Files і клікніть правою клавішею. В меню, що з'явилося, виберіть Import Data File. У вікні відкриття файлу знайдіть папку c:\Program Files\Microwave Office\Quick start files, а в ній виберіть файл N76038a.s2p.

Натискуйте клавішу Відкрити. Назва цього файлу з'явиться у вікні перегляду Проекту.

Крок 5: Активізація вікна перегляду елементів.

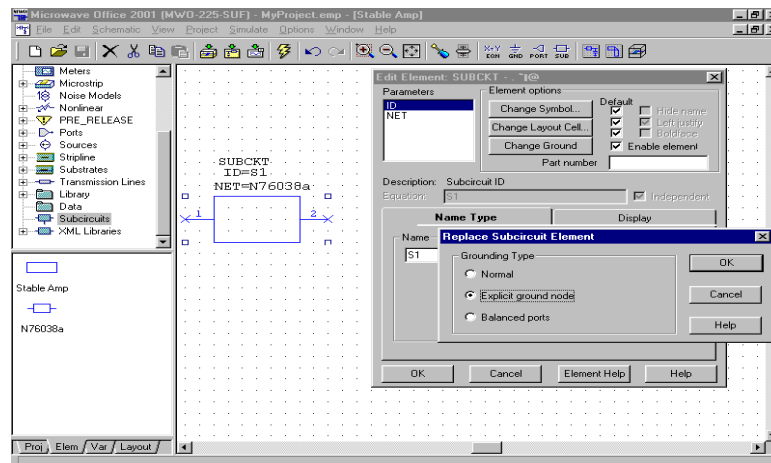
Клікніть за закладці Elem.

Крок 6: Розміщення елементів схеми.

Клікніть на Subcircuits (Частини схем). Схопіть і тягніть елемент N76038a на вікно схеми Stable Amp.

Крок 7: Вибір вузла «землі» для елемента даних.

Файл даних двополюсника N76038a містить S параметрів польового транзистора із затвором Шотки. Необхідно вказати земляний вузол даного елемента. Наведіть курсор мишки на зображення N76038a у вікні Stable Amp і клікніть двічі. З'явиться вікно Edit Element:



Клікніть на кнопки Change Ground. У вікні, що з'явилося, виберіть Explicit ground node і натискуйте ОК. Вікно Edit Element залиште активним.

Крок 8: Вибір графічного позначення елемента.

Файл даних представляє Польовий транзистор як двополюсник. Для заміни двополюсника графічним символом, що позначає Польовий транзистор, у вікні Edit Element натискуйте кнопку Change Symbol. З'явиться діалогове вікно Replace Symbol.

Знайдіть у вікні Compatible symbols строчку FET@system.syf і клікніть на ній. Далі натискуйте ОК. В вікні Edit Element натискуйте ОК. Зображення транзистора і напис пояснення можна переміщати.

Крок 9: Додавання портів і землі

Як правило, першим кроком в проектуванні підсилювача є стабілізація пристрою. Для цього потрібно додати до польового транзистора порт входу і землю. На основній панелі знайдіть кнопку Add Port і клікніть її. Приєднайте зображення порту до виводу 1. Знайдіть кнопку Add Ground і клікніть її. Приєднайте зображення

землі до виводу 3.

Крок 10: Переміщення пояснюючого тексту в схемі.

Для кращого сприйняття схеми потрібно клікнути на тексті і перетягнути його в потрібне місце схеми.

Крок 11: Поворот елементів

Для завершення схеми потрібно до виводу 2 транзистора додати PORT 2 (Порт 2). На основній панелі знайдіть кнопку Add Port і клікніть її. Приєднайте зображення порту до виводу. Натискуйте праву клавішу миші, щоб повернути елемент на кут в 90-градусів.

Крок 12: Завдання діапазону частот.

Для завдання робочого діапазону частот, спочатку перейдіть назад в Проект, натискуючи на закладку Proj, розташовану внизу основного вікна. Наведіть курсор мишки на Project Frequency (Частота Проекту) у верху вікна і двічі клікніть. З'явиться форма Frequency Range. Введіть початкову частоту Start 0.1 GHz (ГГц), кінцеву частоту Stop 18 GHz і крок 0.1 GHz. Клікніть на кнопці Apply (Застосувати). У вікні Current Range з'явиться заданий діапазон. Натискуйте ОК.

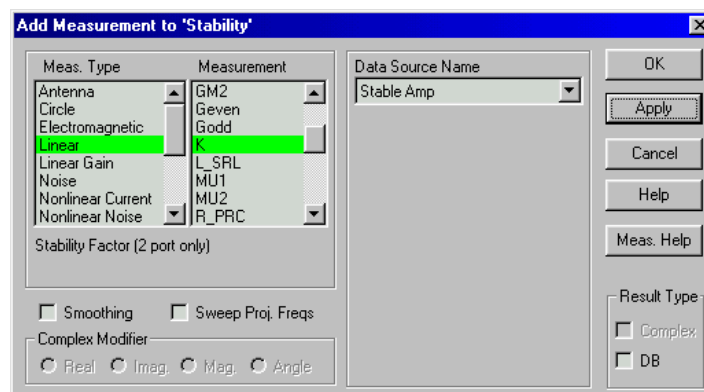
Крок 13: Додавання графіка

Для дослідження коефіцієнта стабільності K підсилювача в частотному діапазоні 0,1...18 ГГц в Проект потрібно додати графік. На основній панелі знайдіть кнопку Add Graph (Додати графік) і клікніть її. З'явиться вікно Create Graph (Створення графіка).

Встановіть Rectangular (Прямокутна) система координат і введіть заголовок графіка Stability. Натискуйте ОК.

Крок 14: Вибір розрахункових величин

Задайте розрахункові величини для першого графіка, клікніть правою клавішею на рядку Stability і виберіть Add Measurement (Додати вимірювані величини). З'явиться форма:



У вікні Meas. Type (Тип обчислень) виберіть Linear. У вікні Measurement (Розрахунок) виберіть K (коефіцієнт стійкості) У вікні Data Source Name виберіть Stable Amp. Натискуйте Apply (Застосувати). Натискуйте ОК.

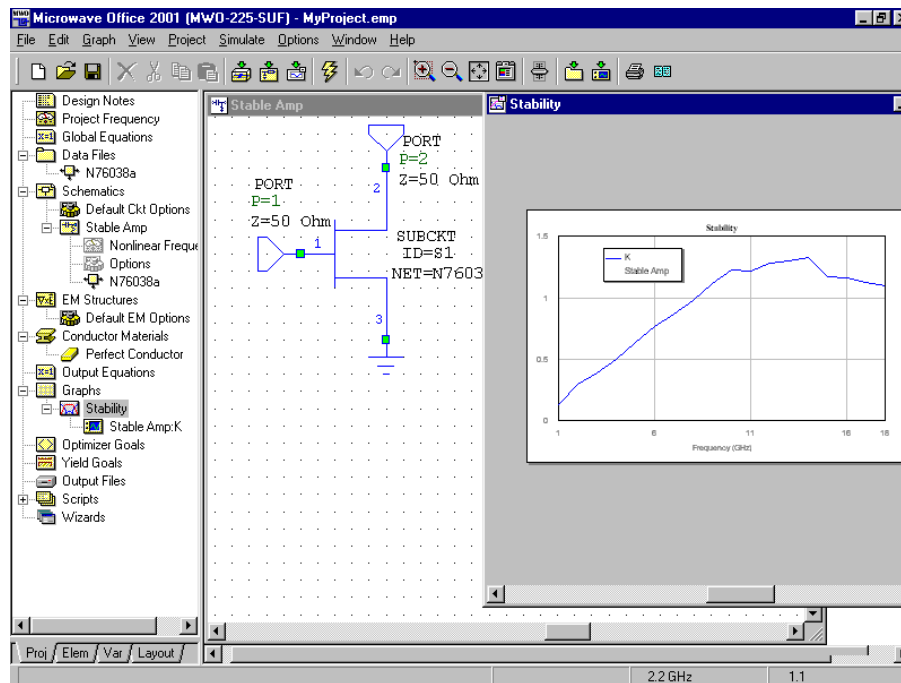


Рисунок 5.2 - Залежність коефіцієнта стабільності K від частоти підсилювача

Крок 15: Аналіз ланцюга.

Почніть розрахунок, натискуючи на кнопку, яка виглядає як блискавка. З'явиться графік, подібний зображеному на рис. .2. Збережіть схему для подальшого використання.

2 Стабілізація підсилювача.

Крок 16: Редагування схеми.

Графік Stability (рис. 5.2) показує, що на ділянці приблизно до 8 ГГц K менше 1. Щоб добитися стабільності у всьому діапазоні, як правило, вимагається додати стабілізуючі ланцюги. Додамо стабілізуючі ланцюги на виході приладу для стабілізації в низькочастотній області. Для видалення Port 2 (Порт 2) на схемі Stable Amp виділіть Port 2, клікнувши на ньому. Натискуйте клавішу Delete на клавіатурі.

Додавання мікросмушкової лінії передачі (MLIN) до вузла 2 польового транзистора: клікніть на закладці Elem. Розверніть рядок Microstrip, клікнувши на значку + праворуч від неї; в списку, що

розвернувся, виберіть Lines. В нижньому вікні прогляду елементів знайдіть MLIN, перетягніть цей елемент на схему і під'єднайте до вузла 2.

Додавання мікросмушкового трійника: розкрийте папку Microstrip, двічі клікнувши на ній; клікніть на Junctions. В нижньому вікні прогляду елементів знайдіть MTEES\$, перетягніть його на схему і підключіть полюсом 2 до виходу MLIN. Для повороту цього трійника клікніть правою клавішею миші.

Копіювання і вставка мікросмушкової лінії до вузла 1 трійника: виділіть MLIN, клікнувши на ній. На клавіатурі натискуйте клавіші Ctrl+C, потім натискуйте Ctrl+V. Підключіть нову MLIN до 1 вузла трійника.

Крок 17: Редагування параметрів елементів.

Відредагуємо геометрію мікросмушкової лінії передачі MLIN. Встановимо MLIN ID=TL1 ширину центрального провідника $W=30$ mil і довжину $L=60$ mil. Двічі клікніть на елементі MLIN ID=TL1. З'явиться вікно Edit Element. Клікніть у вікні Parameters на W і у вікні Value введіть 30. Клікніть у вікні Parameters на L і у вікні Value введіть 60. Натискуйте ОК. Аналогічно змініть параметри у MLIN ID=TL3 ширину центрального провідника $W=10$ mil і довжину $L=50$ mil. Змінювати параметри можна і безпосередньо на схемі, двічі клікнувши на цьому параметрі.

Крок 18: Показ підкладки і даних мікросмушкової лінії

Кожний мікросмушковий елемент має свою геометричну конструкцію і фізичні параметри. Для їх введення в схему потрібно: клікнути на закладці Elem, розташованій внизу вікна прогляду елементів. Виділити папку Substrates, клікнувши на ній. Знайти елемент MSUB (несиметрична мікросмушкова лінія) і перетягнути його на схему Stable Amp. Встановити наступні параметри: $\epsilon_r=9,9$ - відносна діелектрична проникність діелектрика; $H=10$ mil - товщина діелектрика; $T=0,1$ mil - товщина провідника; $\rho=1$ - об'ємний опір металу, нормований до золота; $\tan\delta=0$ - тангенс кута діелектричних втрат. $\epsilon_r\text{Nom}=2,2$ – номінальна відносна діелектрична проникність. Це можна зробити прямо на схемі, двічі клікнувши на відповідному параметрі. Далі введемо четвертий MLIN - елемент з параметрами $W=5$ mil і $L=150$ mil. Для цього виділіть папку Microstrip і перетягніть MLIN на схему. Відредагуйте параметри прямо на схемі. Додамо Port 2 (Порт 2), як це показано на рис. 5.3.

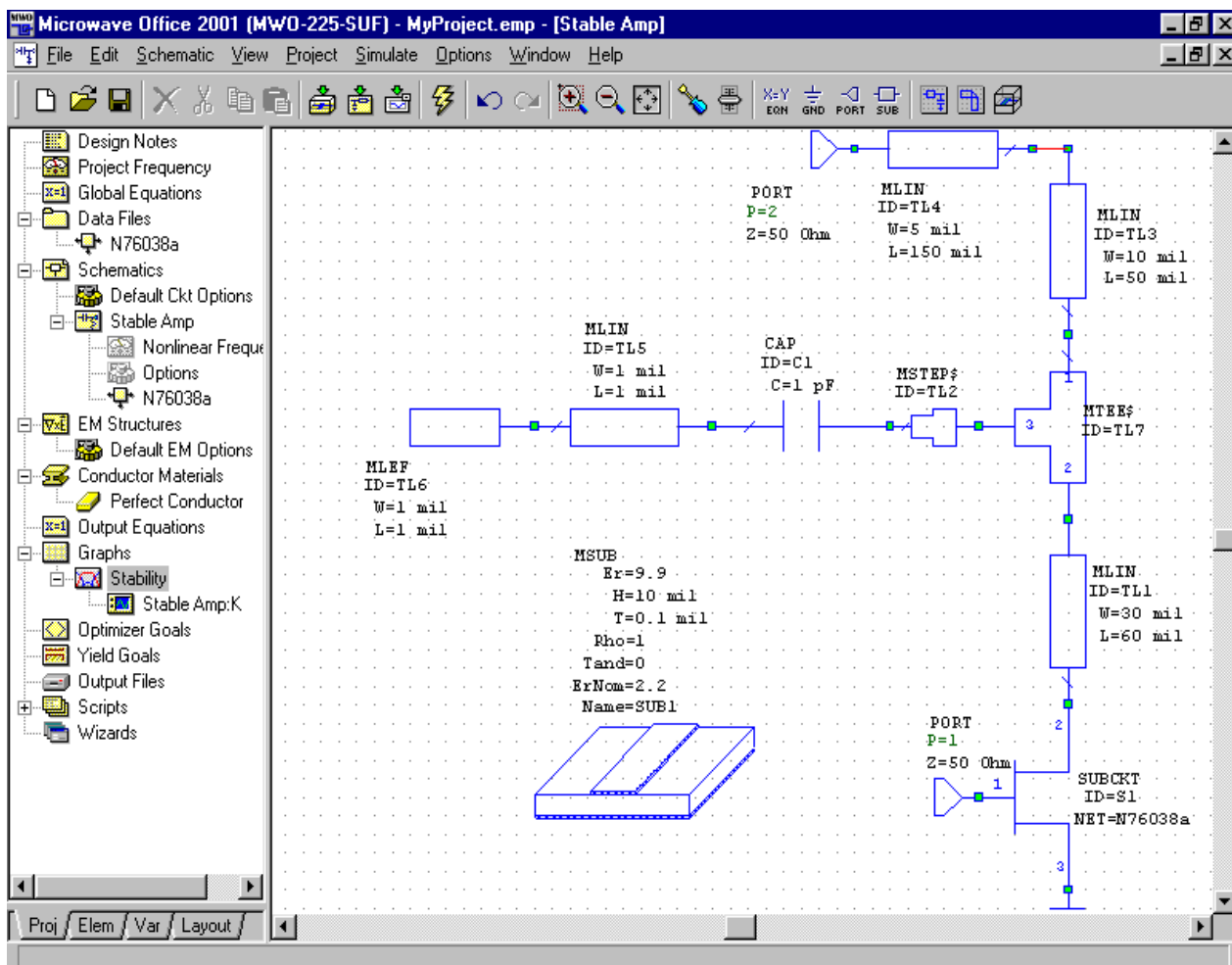


Рисунок 5.3 – Стабілізована схема підсилювача

Крок 19: З'єднання елементів провідником.

Використайте засіб трасування, щоб з'єднати TL4 з TL2.

Підведіть курсор миші на зображення "X" TL4. Чекайте, поки курсор перетвориться на спіральку. Клікніть лівою клавішею миші і тягніть пунктирну лінію до "X" TL2. Клікніть ще раз і знаки "X" перетворяться на зелені квадратики, з'явиться червона лінія, що з'єднує ці елементи.

Крок 20: Розміщення і редагування параметрів елементів.

Наступний крок приведе до розміщення на схемі вихідного стабілізуючого ланцюга, що складається з:

TFR (тонкошарий резистор) з папки Microstrip; MSTEP\$ (W1=1mil, W2=1mil) з папки Junctions; CAP (конденсатор) з папки Lumped Element; MLIN (W=1mil, L=1mil) (мікросмужкові лінії передачі) з папки Microstrip, MLEF (W=1mil, L=1mil) (мікросмужкові лінії, розімкнені на виході) з папки Microstrip.

Крок 21: Форматування графіка

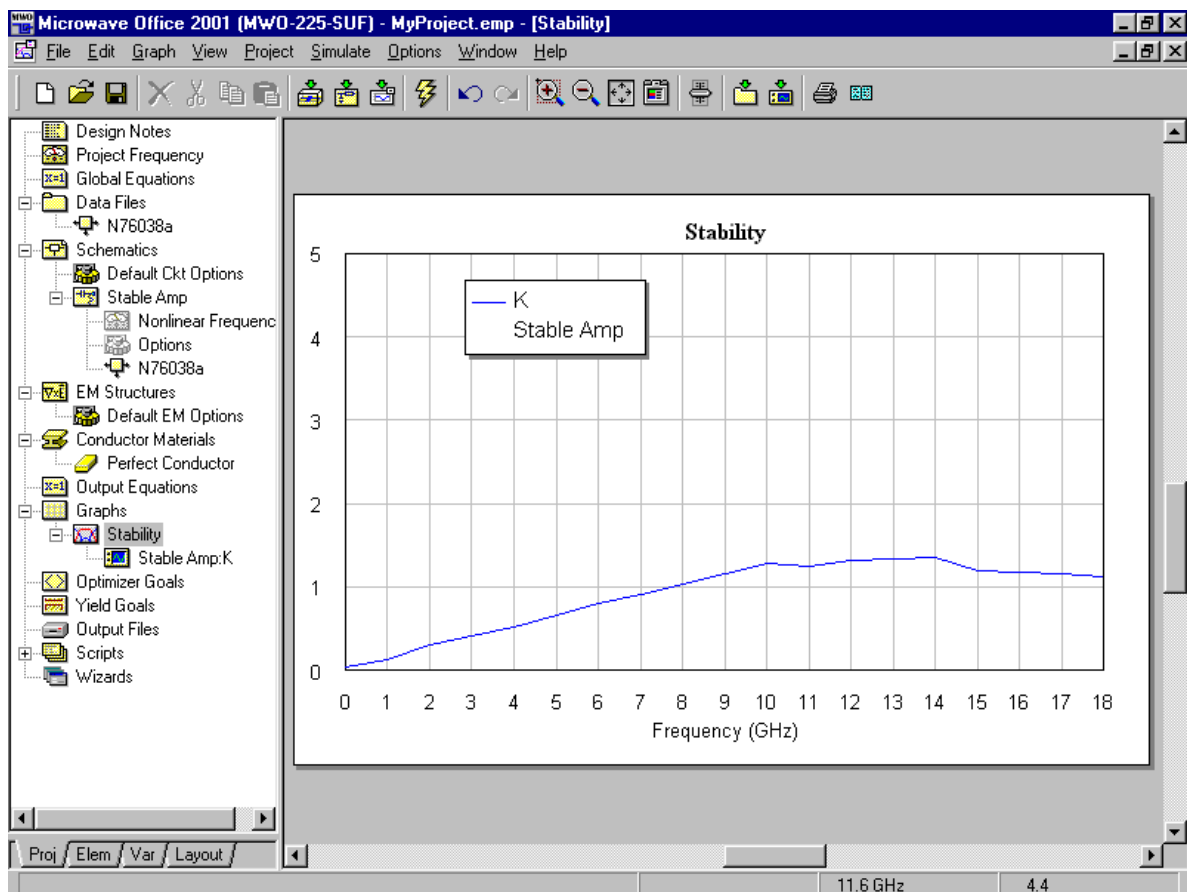


Рисунок 5.4 – Частотна залежність коефіцієнта стабільності для побудованої схеми малошумлячого мікрохвильового підсилювача на польовому транзисторі із затвором Шоткі

Для побудови графіка коефіцієнта стійкості K для стабілізованої схеми клікніть кнопку Analyze. Змінимо формат попереднього графіка. По осі Frequency (частоти) задаємо інтервал від 0 до 18 ГГц з кроком 1 ГГц, а по осі K змінимо максимальне значення на 5. Для цього двічі клікнемо на легенді цього графіка. З'явиться вікно Grid Format Options. Знімемо галочки з Auto limits осі X-Axis і Auto limits осі Left Y-Axis. Введіть значення 0,18 і 0,5. Клікніть на закладці Divisions. Приберіть галочки у Auto divs. вісей X і Left Y. Введіть крок Step, рівний 1, натисніть Apply. Натисніть OK. З'явиться графік, схожий на графік на рис. 5.4.

Збережіть побудовану схему для подальшого використання.

5.3 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.

2. Створена схема підсилювача на польовому транзисторі із затвором Шоткі до її стабілізації.

3. Графік залежності коефіцієнта стабільності K підсилювача від частоти до стабілізації схеми.

4. Схема підсилювача на польовому транзисторі із затвором Шоткі після її стабілізації.

5. Графік залежності коефіцієнта стабільності K підсилювача від частоти після стабілізації схеми.

5.4 Контрольні питання

1. Процедури в програмі моделювання пристроїв мікрохвильового діапазону **Microwave Office 2001**:

- розміщення елементів схеми;
- переміщення пояснюючого тексту в схемі;
- поворот елементів;
- завдання частот проекту;
- побудова графіка;
- редагування елементів схеми.

2. Як стабілізувати підсилювач в низькочастотній області?

3. Як стабілізувати підсилювач в високочастотній області?

4. Як форматується графік?

5. Чим відрізняються графіки залежності коефіцієнта стабільності K підсилювача від частоти до і після стабілізації схеми?

Лабораторна робота № 6

Дослідження мікросмужкових ліній для мікросхем мікрохвильового діапазону

Мета роботи - за допомогою програми Microwave Office дослідити вплив геометрії мікросмужкових ліній на параметри вузла мікросхеми мікрохвильового діапазону.

6.1 Короткі теоретичні відомості

Характер передачі енергії електромагнітних коливань змінюється зі зростанням їх частоти. В мікрохвильовому (НВЧ)

діапазоні енергія розповсюджується головним чином зовні провідника в вигляді електромагнітної хвилі. Тому для передачі сигналу в надшвидкодійних пристроях використовують хвильоводи. Єдиним видом хвильоводу, що є прийнятним для мікросхем мікрохвильового діапазону, є мікросмужкова лінія передачі.

Мікросмужкова лінія передачі – це провідник стрічкового типу прямокутного перерізу, розташований на підкладці з великою діелектричною проникністю, на зворотньому боці якої розташований заземлений металевий екран.

Вони характеризуються параметрами: хвильовим опором, коефіцієнтом втрат, граничною передаваною потужністю, довжиною хвилі та її дисперсією.

Мікросмужкові лінії широко використовуються не тільки для з'єднання елементів мікросхеми, а і як відгалужувачі, поділювачі потужності, фільтри, фазообертувачі.

6.2 Порядок виконання

1. Відновити схему, побудовану в роботі № 5 (дивись рис. 5.3).

Таблиця 6.1 – Варіанти завдання на роботу

Варіант	№ завдання	Мікросмужкова лінія 1		Мікросмужкова лінія 2	
		H, mil	W, mil	H, mil	W, mil
1	1	5	50	15	60
	2	10	20	30	15
2	1	10	70	20	60
	2	30	50	50	80
3	1	1	5	10	20
	2	5	25	40	70
4	1	15	50	10	20
	2	3	20	15	40
5	1	30	60	10	50
	2	10	5	5	30
6	1	20	50	60	30
	2	10	10	20	30
7	1	10	20	20	40
	2	50	50	30	20

2. Замініть розміри мікросмужкових ліній в схемі (як описано в роботі № 5, п. 5.2.2, крок 17) на величини, наведені в таблиці 6.1 у першому рядку вашого варіанту. Побудуйте графік частотної залежності коефіцієнта стабільності для побудованої схеми і порівняйте його з графіком рисунка 5.4.

3. Зробіть висновки що до впливу геометрії мікросмужкових ліній на характеристики вузла підсилювача мікросхеми.

6.3 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.

2. Створена схема підсилювача на польовому транзисторі із затвором Шоткі.

3. Графіки залежності коефіцієнта стабільності K від частоти для підсилювача з мікросмужковими лініями різних розмірів: 1-й – з попередньої лабораторної роботи №5, 2-й і 3-й - за даними завдання табл. 6.1.

4. Висновок про вплив мікросмужкових ліній на характеристики вузла підсилювача мікросхеми.

6.4 Контрольні питання

1. Чому в мікросхемах мікрохвильового діапазону для з'єднання вузлів замість провідникових доріжок використовують мікросмужкову лінію?

2. Яку будову має мікросмужкова лінія?

3. Як змінюється графік частотної залежності коефіцієнта стабільності підсилювача при зменшенні розмірів мікросмужкової лінії?

4. Як змінюється графік частотної залежності коефіцієнта стабільності підсилювача при збільшенні розмірів мікросмужкової лінії?

Лабораторна робота № 7

Моделювання та оптимізація фільтра для мікросхеми мікрохвильового діапазону за допомогою програми Microwave Office

Мета роботи - за допомогою програми Microwave Office побудувати та оптимізувати модель фільтра вищих частот для мікросхеми мікрохвильового діапазону.

7.1 Короткі теоретичні відомості

В пристроях перетворення радіосигналів мікрохвильового діапазону широко використовуються фільтри смугові, нижніх та верхніх частот, режекторні фільтри. При проектуванні таких мікросхем доцільно застосування методів математичного моделювання. Значні можливості такого моделювання надає комп'ютерна програма **Microwave Office**.

7.2 Порядок виконання

7.2.1. Моделювання вузла фільтра для мікросхеми мікрохвильового діапазону за допомогою програми Microwave Office

Крок 1. Почати новий Проект, створити нову схему.

З меню File (Файл) вибрати New Project (Новий Проект). Відкрити меню File (Файл) з Add Schematic (Додати схему), вибрати New Schematic... (Нову схему). У формі Create New Schematic введіть назву для нової схеми, друкуючи поверх Untitled 1. Наприклад, High-Pass Filter (Фільтр вищих частот), для цієї схеми. Далі натискуйте ОК.

Крок 2: Активізуйте проглядання та вибір елементів схеми.

Виберіть закладку Elements (Елементи) внизу вікна Проекту.

Виберіть із списку у верхньому вікні Lumped Elements (Елементи із зосередженими параметрами). Далі виберіть CAP (конденсатор) і не відпускаючи ліву клавішу миші, перетягніть цей елемент на вікно схеми з ім'ям Low Pass Filter (Фільтр нижніх частот). Встановіть елемент, клікнувши лівою клавішею миші.

Крок 3: Виберіть елемент IND (катушка індуктивності) і перетягніть його у вікно схеми. Встановіть елемент, відпустивши ліву клавішу миші. Натискуйте праву клавішу миші, щоб повернути

елемент на кут в 90 градусів (рис. 7.1).

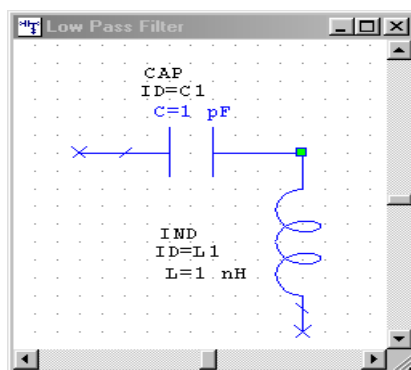


Рисунок 7.1 – Схема елемента вузла фільтра мікрохвильового діапазону

Майте на увазі, що з'єднання відбудеться автоматично, якщо два полюси звернені один до одного.

7.2.2. Оптимізація параметрів елементів схеми фільтра

Побудовану схему необхідно оптимізувати так, щоб добитися вказаних в табл. 7.1 завдання значень S-параметрів фільтра.

Таблиця 7.1 – Умови оптимізації схеми фільтра мікрохвильового діапазону

№	S_{11} , дБ	Діапазон частот для S_{11} , МГц	S_{21} , дБ	Діапазон частот для S_{21} , МГц	Помилка
1	<-10	3,4...5	<-30	1...2,6	
2	<-14	3...5	<-25	1...2,5	
3	<-10	2...5	<-10	1...1,8	
4	<-30	4...5	<-30	1...2	
5	<-40	4...5	<-40	1...3	
6	<-33	3...5	>-10	1...4	

Крок 4: Копіювання і вставка елементів схеми.

Виділіть два елементи, CAP і IND, малюючи пунктирний прямокутник навкруги них, притримайте ліву клавішу миші і перетягуйте виділення навкруги елементів. З меню Edit (Правка) виберіть Copy (Копіювати). Потім з меню Edit (Правка) виберіть команду Paste (Вставка), щоб одержати друге зображення. Встановіть елементи, як показано на рис. 7.2.

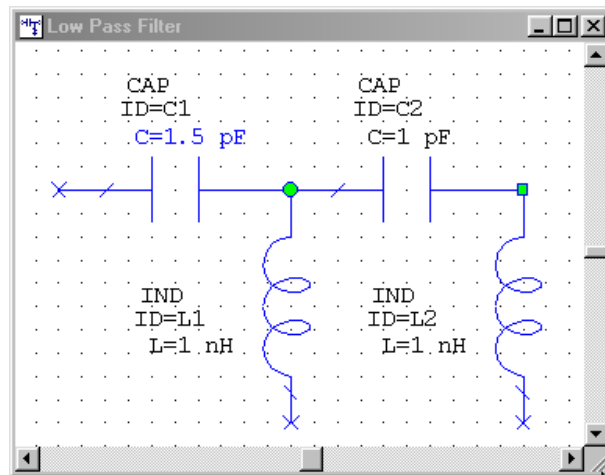


Рисунок 7.2 – Симетрична схема фільтра мікрохвильового діапазону

(Ви можете так само використовувати клавіші Ctrl+C для копіювання і Ctrl+V для вставки). Далі слід додати додатковий конденсатор, щоб зробити цю схему симетричною.

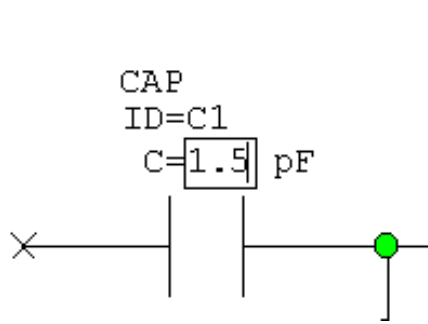
Крок 5: З'єднання елементів.

Тепер використовуйте засіб трасування, щоб з'єднати обидва вільні полюси в індуктивностях: підведіть курсор миші на зображення "зелене X" до полюса однієї з котушок. Коли курсор перетвориться на спіральку, клікніть лівою клавішею миші і тягніть пунктирну лінію до іншого полюса. Потім слід клікнути, і знаки "X" перетворяться на зелені круги, з'явиться лінія, що з'єднує ці полюси - з'єднання встановлено.

Крок 6: Редагування параметрів елементів.


Кількісні параметри елементів можна редагувати, викликавши меню подвійним кліканням на зображенні цього елементу, яке показане справа. Параметри вказуються у верхньому лівому кутку діалогового вікна. Виберіть C1 і встановіть Value (Величина) рівну 1.5 pF (пФ). Ви можете також відредагувати параметр ID (C1, C2, C3, і т.д.), який використовується для ідентифікації елементів. Потім, виберіть Constrained (Обмеження), встановіть нижню межу 0 pF і верхню межу 3 pF. Нарешті, встановіть галочки у Tune (Тюнер) і Optimize (Оптимізація). Натискуйте ОК.


Інший шлях для редагування величин параметрів елементів - встановити курсор на тексті параметра і клікнути двічі. Після цього з'явиться вікно, в якому можна редагувати параметр:



Крок 7: Додавання «землі».

Для завершення схеми фільтра потрібно додати порт входу і землю.

Додайте пару полюсів на вхід і вихід клікнувши лівою клавішею на кнопці Port , яка розташована вгорі на правій стороні лінійки елементів. Подібно іншим елементам ланцюга, їх можна обернути натисненням правої кнопки миші.

Додайте елемент «земля» натисненням на кнопці GND , розташованій вгорі на правій стороні лінійки елементів. Завершіть створення схеми так, щоб вона була схожою на схему, наведену на рис. 7.3.

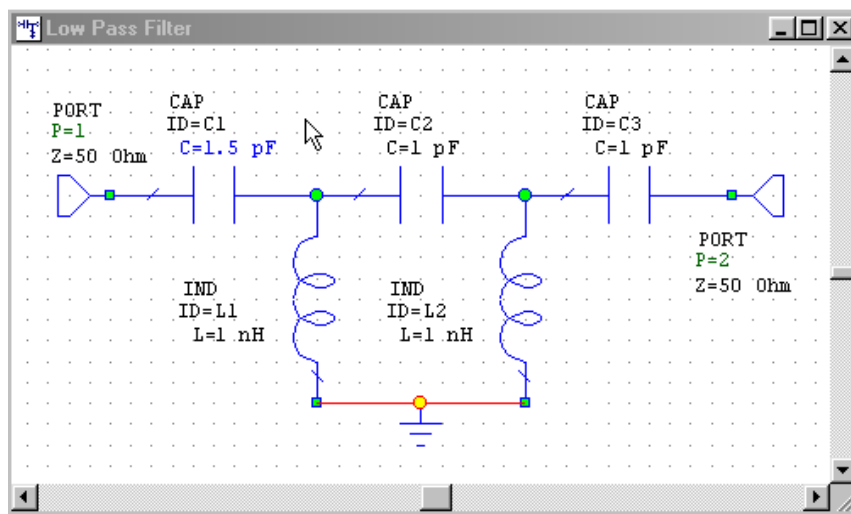


Рисунок 7.3 – Схема фільтра мікрохвильового діапазону

Крок 8: Завдання діапазону частот

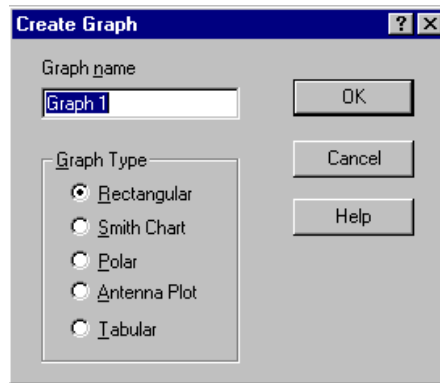
Для завдання робочого діапазону частот, спочатку перейдіть назад в Проект натискаючи на закладку Project (Проект) розташовану внизу основного вікна. Наведіть на Project Frequency (Частота Проекту) вверху вікна і двічі клацніть. З'явиться форма Frequency Range.

Введіть початкову частоту Start 1 GHz (ГГц), кінцеву частоту

Stop 5 GHz і крок 0.05 GHz. Натискуйте кнопку Apply (Застосувати). Нарешті, натискуйте OK.

Крок 9: Додавання графіка

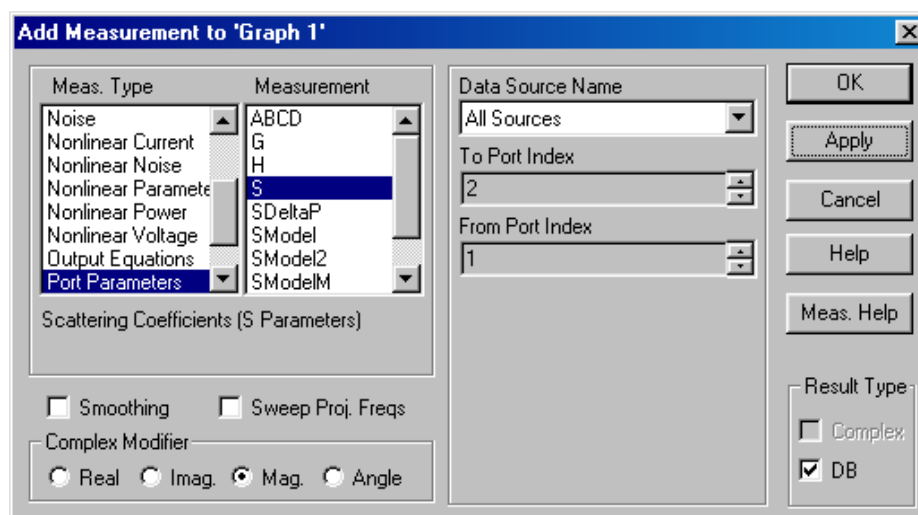
Для додавання в Проект графіка, з меню Project (Проект) виберіть Add Graph (Додати графік). Встановіть Rectangular (Прямокутна) система координат і натискуйте OK. З'явиться така форма:



Крок 10: Вибір розрахункових величин.

Задайте розрахункові величини для першого графіка, клікніть правою клавішею на рядку Graph 1 і виберіть Add Measurement (Додати обчислення).


Альтернативний метод: з меню Project (Проект) виберіть Add Measurement (Додати обчислення). З'явиться наступна форма:





З Meas. Type (Тип обчислень), виберіть Port Parameters (Параметри входу, виходу Для Measurement (Розрахунок)), виберіть S-параметри. З Data Source Name, виберіть Low Pass Filter або All Sources. Для установки першого індексу в S To Port Index, виберіть 1. Для установки другого індексу в S From Port Index виберіть 1. В

Result Type (Тип результату) встановите DB (дБ). Натискуйте Apply (Застосувати), щоб додати обчислення S11 в дБ. Далі змініть перший індекс To Port Index на число 2. Натискуйте Apply (Застосувати) для додавання обчислення S21 в дБ. Натискуйте ОК.

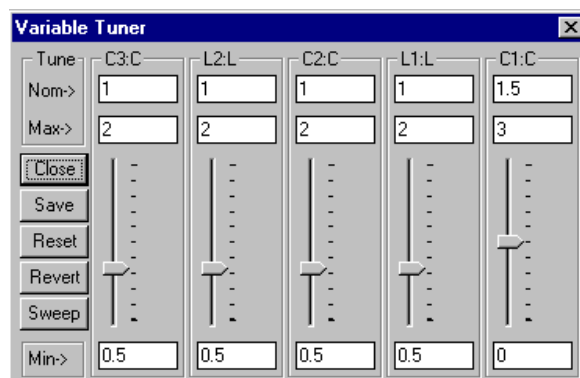
Крок 11: Аналіз ланцюга.

Почніть розрахунок, натискуючи на кнопку, яка виглядає як слід блискавки . З'явиться графік. Подвійне натиснення на легенді дозволяє перенести її в потрібне місце і змінити форму точок на кривих. Для цього потрібно у формі Grid Format Options вибрати закладку Traces (Слід), де можна вибрати форми маркерів, змінити стиль лінії і кольору, або зробити інші модифікації.

Крок 12: Налаштування ланцюга.

Натисніть на кнопку підстроювання . Це викличе вікно Variable Tuner (Тюнер змінних). Тюнер змінних в режимі реального часу може бути використаний як механізм підстроювання раніше введених параметрів так, що всі зміни будуть негайно видно на графіку. Потім з основного меню Window (Вікно) виберіть 1 High Pass Filter. Для того, щоб вибрати конкретні елементи для підстроювання, натискуйте на кнопку, яка схожа на викрутку . Потім, використовуйте її, щоб включити потрібний елемент в Тюнер, наприклад L або C.

Примітка: Кожний параметр елемента, вибраний для регулювання, стає синім і створюється движок у вікні Variable Tuner (Тюнер змінних). Виберіть всі 5 параметрів елементів для регулювання. Тюнер змінних повинен виглядати схожим на цей:



Спробуйте відрегулювати параметри так, щоб одержати: [S11] - не більше 14 dB вище 3 GHz [S21]- не менше 20 dB від 2 GHz.

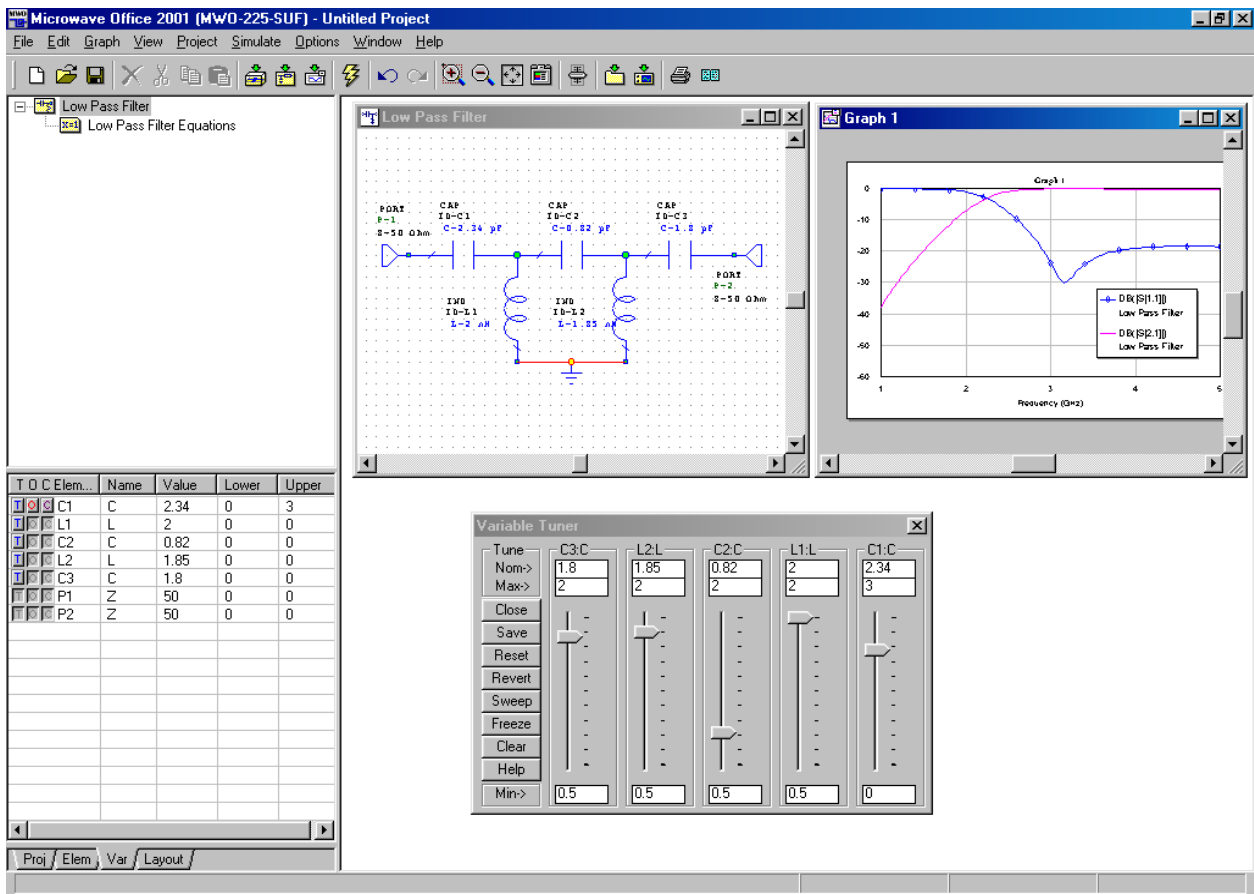


Рисунок 7.4 – Виведення на екран інформації

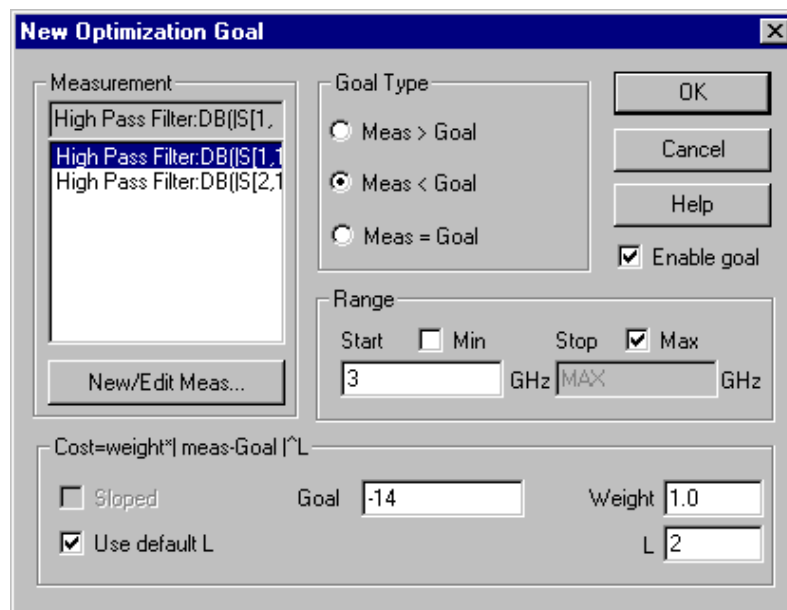
Крок 13: Використовування вікна перегляду.

Перш, ніж оптимізувати ланцюг, необхідно встановити параметри і ввести обмеження на величини, натискуючи на схемі символ елемента, як вказано вище, в кроці 6. Альтернативний і швидший шлях - використовувати вікно перегляду. Клікніть на закладці Variables (Величина). Внизу вікна Проекту з'являться введені величини. Можна змінити ширину вікон, щоб вивести всю інформацію на екран. Виділіть пункт High Pass Filter у верхній половині вікна перегляду. Екран повинен виглядати схожим на рис. 7.4.

У нижній половині вікна Проекту знаходяться стовпці даних. Кнопки "Т", "О" і "С" використовуються для того, щоб вмикнути або вимикнути Tuning (Налаштування), Optimization (Оптимізацію) і Constraints (Обмеження) параметрів введених елементів. Колонка Element (Елемент) включає імена ID для кожного з введених елементів. Введіть верхнє обмеження 3 nH (нГн) і 3 pF (пФ) для кожного L і C елементів, відповідно. Закрийте Тюнер змінних.

T	O	C	Element	Name	Value	Lower	Upper
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	C1	C	0.98	0	3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	L1	L	1.55	0	3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	C2	C	0.57	0	3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	L2	L	1.53	0	3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	C3	C	1.09	0	3
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	P1	Z	50	0	0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	P2	Z	50	0	0

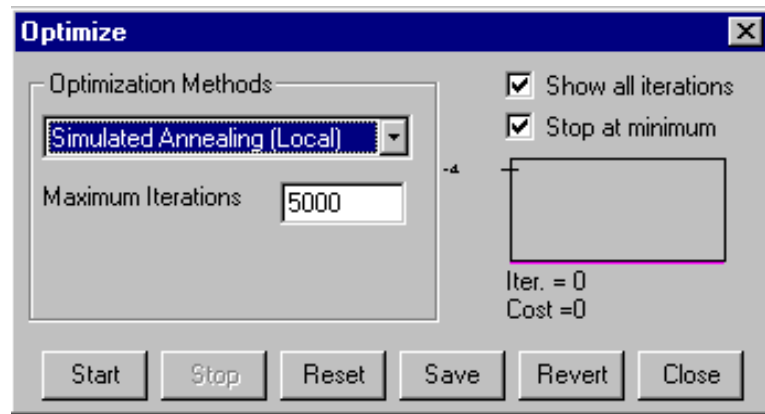
Крок 14: Оптимізація ланцюга.



Проведіть оптимізацію параметрів елементів схеми фільтру так, щоб добитися вказаних в таблиці завдання значень S-параметрів фільтра.

Спочатку з меню Project (Проект) виберіть Add Opt. Goal (Додати умови оптимізації): Встановіть першу мету оптимізації, обираючи: Measurement: DB[S[1,1]], Goal Type: Meas < Goal, Інтервал (Range): від 3 до 5, Goal (Мета): -14 дБ. Натискуйте ОК. Повторіть процес, щоб S[21] < 25 дБ в діапазоні 1...2 МГц.

З головного меню Project (Проект) виберіть Optimize:



Встановіть галочку Show All Iterations (Показати всі ітерації). Виберіть будь-який з Optimization Methods (Методи оптимізації) із списку, що з'явився. Натискуйте Start (Старт). Форма викреслить функцію помилки (або Cost). Коли Cost = 0, натискуйте кнопку Stop (Стоп). Оптимізацію завершено.

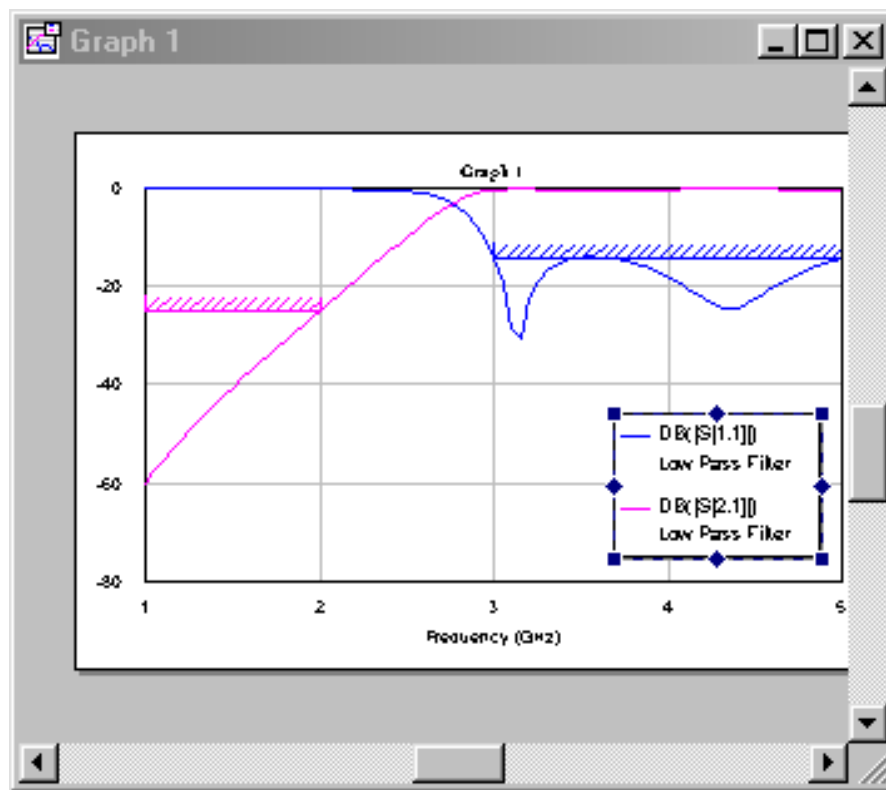


Рисунок 7.5 – Частотна характеристика оптимізованого фільтра високих частот мікрохвильового діапазону

На Graph 1 (Графік 1), можна переміщати смуги оптимізації для зміни умов оптимізації.3. Запишіть в таблицю значення помилок, одержаних при оптимізації.

Збережіть побудовану схему для подальшого використання.

7.3 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Створена схема фільтра вищих частот мікрохвильового діапазону.
3. Графік частотної характеристики змодельованого фільтра.
4. Таблиця умов виконаної оптимізації разом зі значенням помилок, одержаних при оптимізації.
5. Висновки за результатами роботи.

7.4 Контрольні питання

1. Як проводиться налаштування параметрів елементів схем?
2. Як додати параметр в тюнер змінних?
3. Як виконується оптимізація схеми?
4. Для чого потрібна вкладка (Var) Variables?
5. Як задати діапазон можливої зміни параметра елемента при використуванні тюнера змінних?

Лабораторна робота № 8

Дослідження впливу пасивних елементів на характеристики мікросхем мікрохвильового діапазону

Мета роботи – ознайомитися зі структурою резисторів, конденсаторів та індуктивностей для мікросхем мікрохвильового діапазону; дослідити їх вплив на параметри фільтра мікрохвильового діапазону.

8.1 Короткі теоретичні відомості

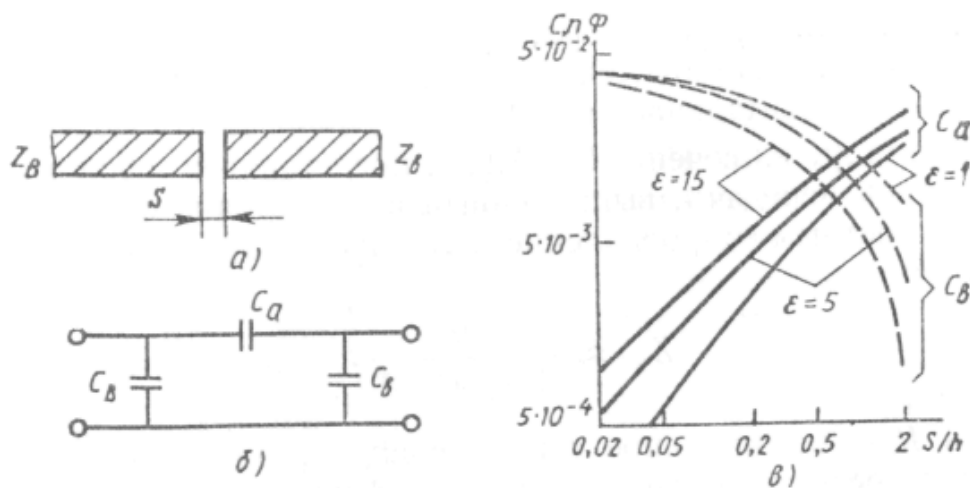
Конструктивно та технологічно більша частина пасивних елементів інтегральних схем мікрохвильового діапазону пов'язана з мікросмужковими лініями.

Резистор, включений в мікросмужкову лінію, є віттинком цієї лінії передачі, що виконаний із матеріалу з високим поверхневим опором.

Тонкоплівкові резистори із зосередженими параметрами малої довжини (менше 1 мм) можна використовувати на частотах до 18 ГГц.

Конденсатори. В мікросхемах мікрохвильового діапазону конденсатори із зосередженими параметрами використовуються як блокувальні, перехідні, а також входять до складу ряду пристроїв, наприклад фільтрів.

Залежно від призначення та ємності конденсатори виконуються в вигляді планарної або багат шарової конструкції. Найпростішим видом планарної конструкції конденсатора для мікрохвильового діапазону є розрив мікросмушкової лінії (рис.8.1).



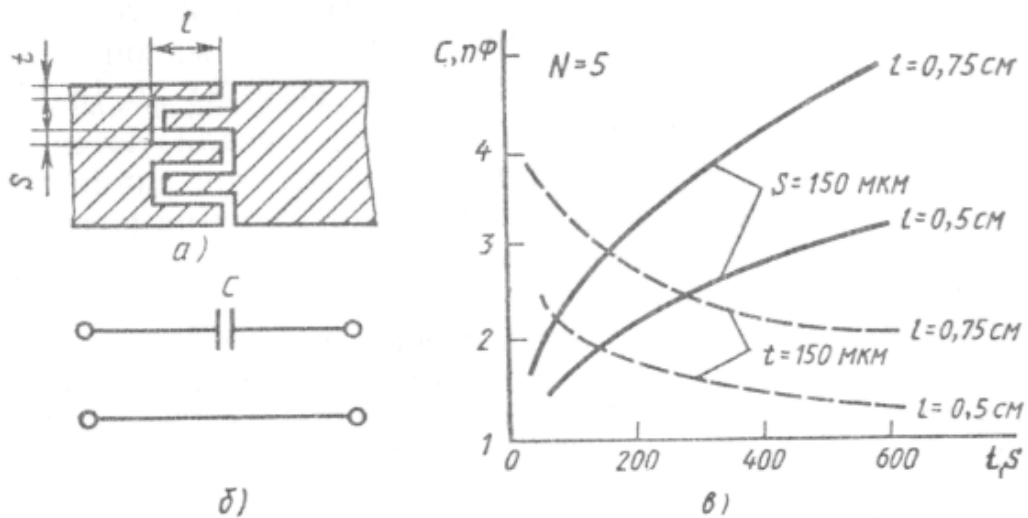
a — конструктивне виконання; *б* — еквівалентна схема;
в — залежність ємності від конструктивних параметрів

Рисунок 8.1 – Конденсатор в вигляді розриву мікросмушкової лінії

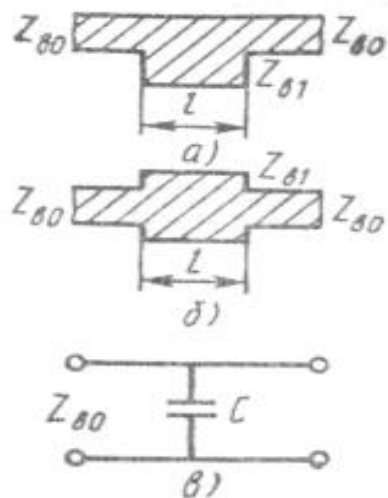
Ємність такого конденсатора є малою і становить частку пікофаради. Ємність 1...10 пФ мають гребінчасті конденсатори (рис. 8.2). Їх ємність залежить від ширини та довжини штиря, зазору між штирями, числа секцій.

Конденсатори з ємністю більше за 10 пФ виготовляють в вигляді багат шарових структур.

Специфічними для мікросхем мікрохвильового діапазону є ємності в вигляді шлейфа з низьким хвильовим опором на діелектричній підкладці (рис.8.3).



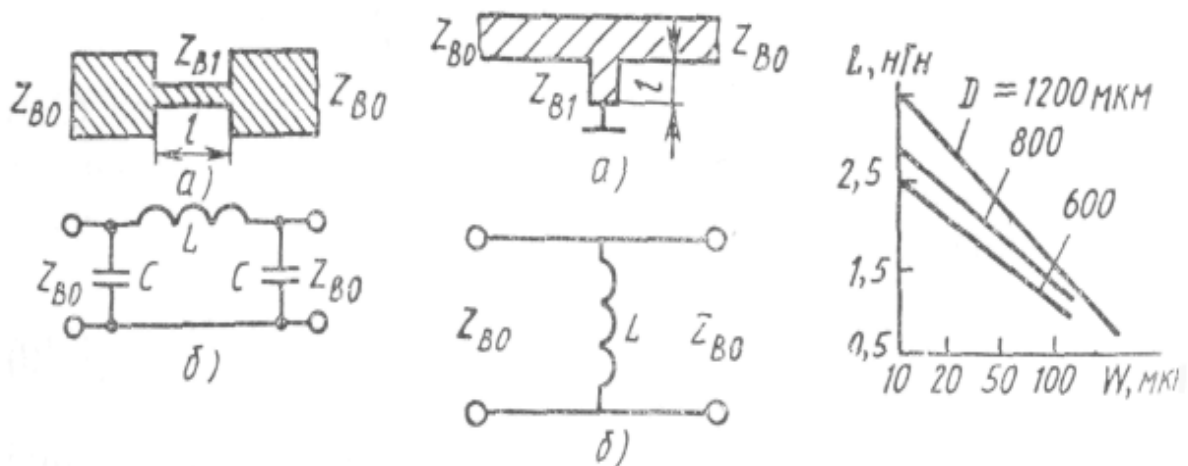
а – геометрія; б - електрична еквівалентна схема;
 в - залежність ємності від конструктивних параметрів
 Рисунок 8.2 - Гребінчастий конденсатор



а – одинарний шлейф; подвійний шлейф;
 в - електрична еквівалентна схема

Рисунок 8.3 - Паралельно увімкнені ємності в вигляді шлейфів з низьким хвильовим опором

Найпростішим індуктивним елементом в мікросхемах мікрохвильового діапазону є прямокутній віттинок мікросмужкової лінії. Його індуктивність - від 0,5 до декількох наногенрі. Послідовно увімкнену індуктивність можна сконструювати в вигляді стрибка ширини мікросмужкової лінії або як показано на рис. 8.4.



a — конструктивне виконання; *б* — еквівалентна схема

Рисунок 8.4 – Послідовна і паралельна індуктивності в вигляді віттинка мікросмушкової лінії довжиною $l = \lambda/8$

Паралельно увімкнена в ланцюг індуктивність має конструкцію короткозамненого шлейфа довжиною $l < \lambda/8$. Індуктивність порядку одиниць наногенрі має виток круглої або прямокутної форми.

Індуктивність в мікросхемах мікрохвильового діапазону використовують як елемент резонансного контура, високочастотних дроселей, елементів налаштування, компенсуючих елементів.

8.2 Порядок виконання

8.2.1. Відновити схему, побудовану в роботі № 7 (дивись рис. 7.4).

8.2.2. Змінійте величину ємності C_1 в схемі (як описано в роботі № 7) по чергово в стільки разів, як наведено в таблиці 8.1 для вашого варіанту. Для обох випадків побудуйте графік частотної залежності коефіцієнта стабільності для зміненої схеми і порівняйте його з графіком рисунка 7.5.

Зробіть висновки щодо впливу конденсатора C_1 на частотну залежність коефіцієнта стабільності фільтра.

Відновіть величину ємності C_1 до вихідного значення рис. 7.5.

8.2.3. Змінійте величину ємності C_2 в схемі (як описано в роботі № 7) по чергово в стільки разів, як наведено в таблиці 8.1 для вашого варіанту.

Для обох випадків побудуйте графік частотної залежності коефіцієнта стабільності для зміненої схеми і порівняйте його з графіком рисунка 7.5.

Відновіть величину ємності C_2 до вихідного значення рис. 7.5.

Зробіть висновки щодо впливу конденсатора C_2 на частотну залежність коефіцієнта стабільності фільтра.

Таблиця 8.1 – Варіанти завдання на роботу

Варіант	Конденсатори			Індуктивності	
	C_1	C_2	C_3	L_1	L_2
1	0	0,7	0,8	1,55	1,55
	1,0	0	0,5	1,25	2,5
2	0	1,0	0,9	1,55	1,55
	1,6	0	0,8	1,25	0,9
3	0	0,8	2,0	1,55	1,25
	2,2	0	1,2	1,25	2,0
4	0	1,3	1,8	1,55	1,25
	1,5	0	2,5	1,25	0,7
5	0	1,2	0,7	1,55	2,0
	1,0	0	1,8	1,25	2,5
6	0	0,9	0,6	1,55	0,7
	0,5	0	2,0	1,25	2,0
7	0	0,6	0,7	1,55	2,0
	1,2	0	2,5	1,25	2,5

8.2.4. Змінійте величину ємності C_3 в схемі (як описано в роботі № 7) по чергово в стільки разів, як наведено в таблиці 8.1 для вашого варіанту. Для обох випадків побудуйте графік частотної залежності коефіцієнта стабільності для зміненої схеми і порівняйте його з графіком рисунка 7.5.

Зробіть висновки щодо впливу конденсатора C_3 на частотну залежність коефіцієнта стабільності фільтра.

Відновіть величину ємності C_3 до вихідного значення рис. 7.5.

8.2.5. Змінійте величину індуктивності L_1 в схемі (як описано в роботі № 7) по чергово в стільки разів, як наведено в таблиці 8.1 для вашого варіанту. Для обох випадків побудуйте графік частотної залежності коефіцієнта стабільності для зміненої схеми і порівняйте його з графіком рисунка 7.5.

Зробіть висновки щодо впливу індуктивності L_1 на частотну залежність коефіцієнта стабільності фільтра.

Відновіть величину індуктивності L_1 до вихідного значення рис. 7.5.

8.2.6. Змінюйте величину індуктивності L_2 в схемі (як описано в роботі № 7) по чергово в стільки разів, як наведено в таблиці 8.1 для вашого варіанту. Для обох випадків побудуйте графік частотної залежності коефіцієнта стабільності для зміненої схеми і порівняйте його з графіком рисунка 7.5.

Зробіть висновки щодо впливу індуктивності L_2 на частотну залежність коефіцієнта стабільності фільтра.

8.3 Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Створена схема фільтра вищих частот мікрохвильового діапазону.
3. Графіки частотної характеристики фільтра при різних значеннях ємностей та індуктивностей.
4. Висновки щодо впливу величини ємностей C_1 , C_2 , C_3 та індуктивностей L_1 , L_2 на частотну залежність коефіцієнта стабільності фільтра.

8.4 Контрольні питання

1. Конструктивні особливості резисторів, конденсаторів, індуктивностей для мікросхем мікрохвильового діапазону.
2. Як позначається відсутність в схемі конденсаторів C_1 , C_2 , C_3 на полюсу пропускання фільтра?
3. Як впливає величина ємності конденсаторів C_1 , C_2 , C_3 на полюсу пропускання фільтра?
4. Як позначається відсутність в схемі індуктивностей L_1 , L_2 на полюсу пропускання фільтра?
5. Як впливає величина індуктивностей L_1 , L_2 на полюсу пропускання фільтра?

Список літератури, що рекомендується

1. Згуровский М.З., Ильченко М.Е., Кравчук С.А., Нарытник Т.Н., Якименко Ю.И. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем. – К.: Політехніка, 2003. – Т.2: Устройства приемного и передающего трактов. Проектирование устройств и реализация систем. – 616 с.
2. Филатов И.Н., Бакрунов О.А., Панасенко П.В. Микроэлектроника: Учеб. пособ. для втуз. в 9 кн. Кн. 7. Микроэлектронные СВЧ устройства. – М.: Высш. шк., 1987.–94с.
3. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алёхин и др. – М.: Высш.шк., 1990. – 280 с.
4. Гассанов Л.Г., Лаурс Е.П., Груша С.А. Современный уровень и перспективы развития арсенидгаллиевых приборов СВЧ / Обзоры по электр. тех. Серия: Электроника СВЧ. Вып.8 (1110). - 50 с.
5. Пчельников Ю.Н. Электроника сверхвысоких частот. – М.: Радио и связь, 1981. – 95 с.
6. Кукарин С.В. Электронные СВЧ приборы. - М.: Радио и связь, 1981. – 271 с.
7. Хитров Ю.А., Шестиперов В.А. СВЧ в медицине/ Обзоры по электрон. Тех. Сер.1. Электроника СВЧ. Вып.16 (998). – 1989. – 79 с.
8. Перегонов С.А. Перспективы применения маломощной СВЧ-техники в народном хозяйстве/ Обзоры по электр. тех. Сер.1 Электроника СВЧ. Вып.19 (1501). – 1993. –69 с.
9. Карсон Р. Высокочастотные усилители. - М.: Радио и связь, 1981. - 182 с.
10. Бова Н. Т., Єфремов Ю. Г., Конин В. В. Микроэлектронные устройства СВЧ. – Киев: Выща школа, 1984. –232 с.