

(повне найменування факультету)

(повне найменування кафедри)

(СТУПІНЬ ВИЩОЇ ОСВІТИ)

АТЕНЮАТОРА З ПЛАВНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

(код і найменування спеціальності)

(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

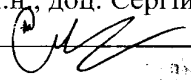
2022 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
 Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Інформаційні мережі зв'язку
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Т.в.о. завідувача кафедри РТТ
 к.ф.-м.н., доц. Сергій САМОЙЛИК

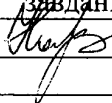
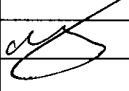

 « 16 » грудня 2022 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ПЛЮХІНУ Олександр Вікторовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

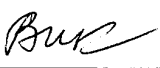
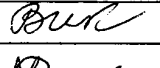
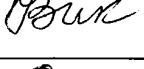
- Тема проєкту (роботи) Дослідження характеристик НВЧ атенюатора з плавним регулюванням
 керівник проєкту (роботи) КОСТЕНКО Валер'ян Остапович, к.т.н., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2022 року №377
- Строк подання студентом проєкту (роботи) 20 листопада 2022 року
- Вихідні дані до проєкту (роботи) Провести дослідження НВЧ атенюаторів у діапазоні 1 ГГц-5 ГГц з застосуванням перемикаючих р-і-п діодів та настроєчних діодів для побудови атенюаторів з плавним регулюванням на мікросмужкових лініях
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Обрати схему атенюатора з двома діодами і лінією між ними та зроблені розрахунки матриці розсіювання атенюатора за допомогою програмного комплексу SAMIS2 у діапазоні 1 – 5 ГГц
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація роботи в Microsoft PowerPoint

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	КОСТЕНКО В.О., доцент каф. РТТ	10.09.2022	
		—	
		10.11.2022	
Нормоконтроль	МОРОЗ Г.В., ст. викладач каф. РТТ	05.12.2022	

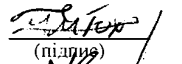
7. Дата видачі завдання «10» вересня 2022 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд існуючих схем НВЧ атенюаторів з застосуванням МСЛ	10.09.2022	
2	Фільтри живлення для р-і-п діодів	18.09.2022	
3	Конструкції атенюаторів з три розрядним ступіньчатим ослабленням сигналу	29.09.2022	
4	Моделювання схеми атенюатора	25.10.2022	
5	Знімання вольт-амперних характеристик різноманітних діодів	20.11.2022	
6	Математичне моделювання діодного атенюатора	02.12.2022	

Студент

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

(підпис)

Олександр ПЛЮХІН
(прізвище та ініціали)

Валер'ян КОСТЕНКО
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 60 сторінок, 47 рисунків, 10 таблиць, 23 джерела

Метою роботи є дослідження характеристик НВЧ атенюаторів, в яких застосовуються у якості ланки затухання НВЧ діоди різноманітного призначення.

Атенюатор дозволяє робити плавне регулювання затухання сигналу у робочій смузі частот.

Основою атенюаторів є різноманітні схеми включення перемикаючих р-і-п діодів різних типів.

В роботі вибрана схема атенюатора з двома діодами і лінією між ними та зроблені розрахунки матриці розсіювання атенюатора за допомогою програмного комплексу SAMIS2 у діапазоні 1-5 ГГц.

КСХ, АТЕНЮАТОР, ДІОД, ВАХ, ЛІНІЙНА ДІЛЯНКА, МАТРИЦЯ, РОЗСІЮВАННЯ, СМУГА, ЧАСТОТА, ПРОГРАМА SAMIS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	8
2 ОГЛЯД СХЕМ НВЧ АТЕНЮАТОРІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ МСЛ	11
2.1 Найпростіші схеми атенюаторів.....	12
2.2 Результати розрахунку атенюаторів та експериментальні дані	15
2.3 Фільтри живлення для р-і-п діодів	19
2.4 Атенюатор із однорозрядним ступінчастим ослабленням сигналу	21
2.5 Конструкції атенюаторів із трирозрядним ступінчастим ослабленням сигналу.....	23
3 МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМИ АТЕНЮАТОРА.....	31
3.1 Описання програми SAMIS2	31
3.2 Знімання вольт-амперних характеристик різноманітних діодів	45
3.3 Машинне моделювання діодних атенюаторів	49
ВИСНОВКИ.....	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	59

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АФАР	—	активна фазована антенна решітка
ВАХ	—	вольт-амперна характеристика
ВЧ	—	висока частота
ЕОМ	—	електронно-обчислювальна машина
ГКЧ	—	генератор коливальних частот
ГІС	—	гібридна інтегральна схема
ІС	—	інтегральна схема
КСХ	—	коефіцієнт стоячої хвилі
МК	—	мікроконтролер
МСЛ	—	мікро-смугова лінія
НВЧ	—	надвисока частота
НВ	—	направлений відгалужувач
НСЛ	—	несиметрична смугова лінія
ПЗУ	—	постійний запам'ятовуючий пристрій
САПР	—	система автоматизованого проектування
ФЗС	—	фільтр зосередженої селекції
ЦАП	—	цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Надвисокими (НВЧ) називають частоти, довжина хвилі яких коротша 1 м ($f \geq 300$ МГц), тобто дециметрові ($f \leq 3000$ МГц), сантиметрові ($f \leq 30$ ГГц) і міліметрові ($f \leq 100$ ГГц). У цьому діапазоні частот електромагнітна енергія передається електромагнітним полем у хвилеводах або у вільному просторі. Геометричні розміри ліній передачі й пристроїв у НВЧ діапазоні сумірні з довжиною хвилі. Тому питання конструкції цих пристроїв, проблеми їх дослідження, питання вибору вимірювальних величин і завдання практичного застосування вирішують іншими методами, ніж у діапазоні радіочастот. Це привело до виникнення техніки надвисоких частот, що бурхливо розвивається у зв'язку з широким застосуванням у радіолокації, радіонавігаційних системах, радіорелейному і хвилеводному зв'язку, радіоастрономії, медицині, а також при наукових дослідженнях, вимірюванні неелектричних величин тощо.

У 70-х роках введено в техніку надвисоких частот смужкові лінії передачі, за допомогою яких можна побудувати майже усі вузли, розроблені на базі хвилеводів і коаксіальних ліній, а також виконати мікромініатюризацію усіх НВЧ вузлів.

Дана робота присвячена дослідженню НВЧ атенюаторів у діапазоні 1 ГГц-5 ГГц з застосуванням перемикаючих р-і-п діодів та настроюваних діодів для побудови атенюаторів з плавним регулюванням на мікросмужкових лініях.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою цієї роботи є дослідження характеристик різних схем атенюаторів з плавним регулюванням, які побудовані на діодах з застосуванням мікросмушкової технології.

В літературі опубліковано багато матеріалів, присвячених побудуванню атенюаторів з дискретними змінами вносимого затухання, в основному побудованих на резисторних ланцюгах, Т-подібних та П-подібних, які не змінюють фази пропускаючого струму. Діодні атенюатори вносять фазові зміни у сигнал, який проходить через ланцюги загасання, з наявності у еквівалентної схеми діодів реактивних L та C елементів.

Основною задачею роботи є досягнення мінімального значення зміни фази вихідного сигналу відносно вхідного з застосуванням машинних методів оптимізації параметрів та режимів роботи для застосованих діодів.

В процесі роботи над магістерською роботою необхідно вирішити наступні завдання:

- розглянути типові рішення подання живлячої напруги для діодів;
- розглянути характеристики і параметри діодів при роботі на різних ділянках ВАХ;
- необхідність знімання ВАХ у реальних промислових зразках діодів;
- визначити значення параметрів елементів загальної еквівалентної схеми напівпровідникових НВЧ діодів, в першу чергу перемикаючих р-і-п діодів;
- визначити кордони застосування значень елементів та межі їхньої фізичної реалізації;
- провести розрахунки різних схем атенюаторів у діапазоні частот 1 ГГц-5 ГГц;
- уявити діапазонні властивості діодних атенюаторів;
- уявити можливість побудування діодних атенюаторів у надширокому частотному діапазоні;

- розглянути методи побудови атенюаторів на мікро-смугових лініях;
- розглянути вплив ланцюгів живлення діодів на загальні характеристики атенюатора ;
- розглянути схеми та методи розрахунку настроєчних діодів;
- розробити структурну схему універсального атенюатора, з застосуванням цифро-аналогового перетворювача для побудування прецизійного атенюатора, що забезпечує, необхідну точність подання вносимого затухання при проведенні вимірювальних робіт;
- розробити рекомендації по застосуванню новітньої елементної бази для побудування діодних атенюаторів у надширокому частотному діапазоні.

При проведенні розрахунків слід використати узагальнену еквівалентну схему діода, яка приведена на рисунку 1.1.

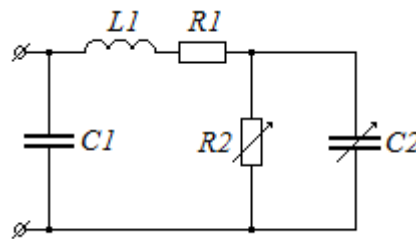


Рисунок 1.1 – Узагальнена еквівалентна схема ВЧ діода

У схемі прийняти наступні елементи:

- C1 – ємність корпусу діода;
- C2 – бар'єрна ємність р-п переходу;
- L1 – індуктивність виводів діода;
- R1 – опір виводів діода;
- R2 – динамічний опір р-п переходу, який змінюється під дією напруги управління.

На НВЧ дуже часто застосовують дискретні атенюатори, побудовані на НВЧ резисторах у виді Т-подібних та П-подібних схем. Такі атенюатори не

можуть бути з плавним регулюванням, а тому застосування їх у вимірювальній техніці дуже обмежене. У таких випадках будуються багатоланкові атенюатори з малим значенням ступеню, що ускладнює вимірювальну апаратуру. На рисунках 1.2 та 1.3 показані такі ланки атенюаторних секцій.

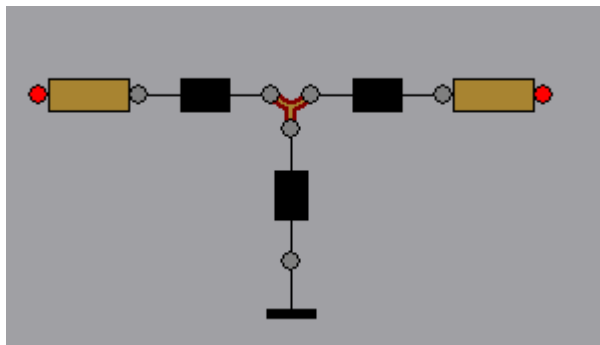


Рисунок 1.2 – Т-подібна схема ланцюга атенюатора

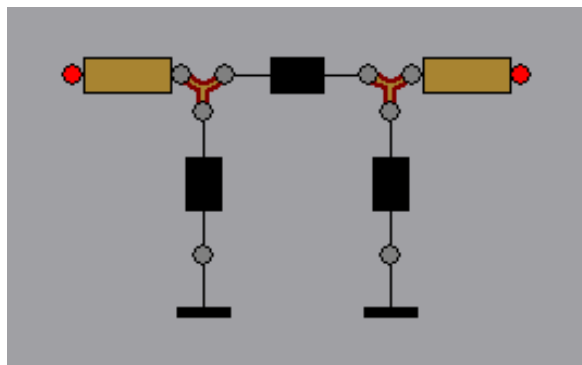


Рисунок 1.3 – П-подібна схема ланцюга атенюатора

2 ОГЛЯД СХЕМ НВЧ АТЕНЮАТОРІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ МСЛ

Конструктивне виконання атенюаторів відрізняється великою різноманітністю. Атенюатори на р-і-п діодах можна розділити на два типи: схеми з плавним регулюванням загасання і схеми зі ступінчастою (дискретною) змінною загасання. У ступінчастих атенюаторах обов'язково є резистор, який перемикається р-і-п діодом. У схемах з плавним регулюванням загасання роль резистора виконує сам діод, що працює при малих струмах на нелінійній ділянці вольт-амперної характеристики.

До основних параметрів, що описують роботу атенюаторів, належать:

- втрати замикання A_z ;
- втрати пропускання A_n ;
- коефіцієнт стоячої хвилі напруги на вході атенюатора КСХ.

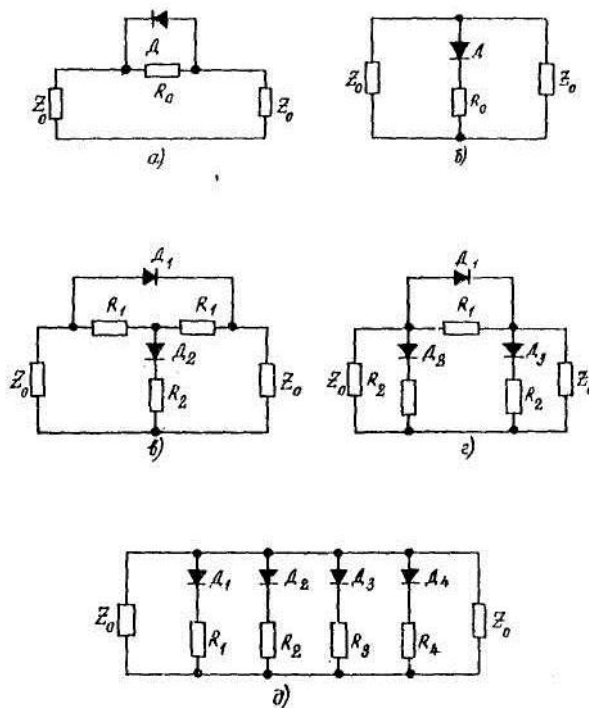
У списку літератури [4-12] дано далеко не вичерпний перелік оригінальних статей, присвячених питанням проектування та розробки різних схем діодних атенюаторів. У роботі [1] наведено результати проектування широкодіапазонних атенюаторів. Спосіб поліпшення фазоамплітудних характеристик атенюаторів на двох р-і-п діодах розглядається в статті [5]. Конструкція багатодіодного атенюатора сходового типу з узгодженими входом та виходом наведена в роботі [6]. Питання вплив нагрівання діода на характеристики ступінчастого атенюатора за високого рівня потужності обговорюється у статті [8]. У роботі [9] досліджено балансну схему атенюатора на шести р-і-п діодах типу 2A5I7 і 2A522. Чотирьохдіодний атенюатор з термостабілізацією описаний у статті [11], де в схемі живлення використовуються резистори про однакові номінали. З іншого боку, у роботі [3] стверджується, що для досягнення гарного узгодження щодо входу значення струмів живлення окремих діодів повинні збільшуватися у напрямку від входу до виходу атенюатора. Ще один протилежний цим двом результат проектування багатодіодної схеми

наведено у роботі [10].

Наведений короткий аналіз робіт показує, що окремі питання проектування та конструювання атенюаторів на р-і-п діодах вимагають подальших досліджень. Цьому присвячено цей розділ огляду.

2.1 Найпростіші схеми атенюаторів

Найпростіші схеми атенюаторів (рис. 2.1) мають всього один резистор, включений послідовно або паралельно до лінії передачі і комутований р-і-п діод. У більш складних схемах використовується мостове включення резисторів (Т- або П-мости), а також сходове включення резисторів паралельно лінії передачі, відділених один від одного чвертьхвильовими відрізками ліній. Відмінною особливістю сходової схеми є низький $K_{\text{СТУ}}$ при малих величинах робочого згасання A .



а) послідовна, б) паралельна, в) Т-подібна, г) П-подібна, д) сходова

Рисунок 2.1 – Схеми атенюаторів

Для оцінки рівня згасання в Т- і П-схемах припустимо, що діод D_1 є ідеальним розімкненим ключем, а діоди D_2 і D_3 – ідеальними замкнутими ключами. І тут схеми на рис. 2.1 в) г) істотно спрощуються і для них можуть бути отримані аналітичні вирази, що пов'язують величини робочого згасання A (дБ) та опору резисторів.

Для схем рисунку 2.1 а), б) ці вирази легко виходять з даних таблиці 2.1. Для симетричної Т-подібної схеми (рис. 2.1 в)) опору R_1 і R_2 можуть бути розраховані з виразу для робочого згасання та умови повного узгодження по входу атенюатора ($K_{\text{СТУ}} = 1$):

$$A = 20 \cdot \lg \left[\frac{(R_1 + Z_0) \cdot (Z_0 + R_1 + 2 \cdot R_2)}{2 \cdot Z_0 \cdot R_2} \right]. \quad (2.1)$$

$$R_1(R_1 + 2R_2) = Z_0^2. \quad (2.2)$$

Аналогічно можуть бути отримані вирази для опорів у П-подібній схемі атенюатора з ідеальними ключами.

Вирішуючи цю систему рівнянь, знаходимо:

$$R_2 = \frac{Z_0}{shQ}, \quad (2.3)$$

$$R_1 = \frac{Z_0}{thQ} - R_2, \quad (2.4)$$

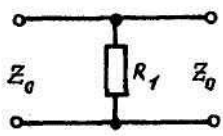
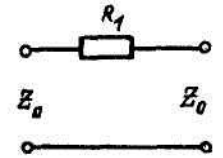
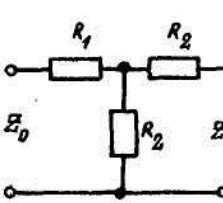
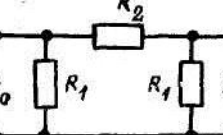
$$Q = \frac{A}{20} \ln 10. \quad (2.5)$$

Аналогічно можуть бути отримані вирази для опорів у П-подібній схемі атенюатора з ідеальними ключами.

Розрахункові формули визначення опорів наведені в таблиці 2.1. Там

же дані числові приклади для кількох характерних значень А.

Таблиця 2.1 – Розрахункові формули визначення опорів різних схем атенюаторів

Схема атенюатора	Формули для обчислення опорів	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	A, дБ
	$R_1 = \frac{Z_0}{2(e^Q - 1)}$ $Q = \frac{A}{20} \ln 10$	2 10 50 5 800	- - - - -	22,6 10,9 3,5 0,4 0,14
	$R_1 = 2Z_0(e^Q - 1)$	15 50 200 400 800	- - - - -	1,2 3,5 9,5 14 19
	$R_2 = \frac{Z_0}{shQ}$ $R_1 = \frac{Z_0}{thQ} - R_2$ $Q = \frac{A}{20} \ln 10$	8,5 14 26 33 39	142 82 35 21 13	3 5 10 14 18
	$R_2 = Z_0 \sqrt{shQ}$ $R_1 = \frac{R_2 Z_0 thQ}{R_2 - 50 thQ}$ $Q = \frac{A}{20} \ln 10$	120 110 87 67	59 82 110 195	10 15 20 30

Розрахунок атенюаторів сходового типу, а також розрахунок схем рисунку 2.1 а)-г) із реальними діодами, значно складніше і може бути виконаний на ЕОМ за допомогою комплексу програм FAGOT [12].

Комплекс програм FAGOT призначений для оперативного розрахунку в квазістатичному наближенні електродинамічних та імпульсних характеристик пристроїв НВЧ, що містять смужкові лінії, активні та пасивні зосереджені елементи. Такими пристроями є гібридні та монолітні інтегральні схеми та інші пристрої.

Вхідною інформацією для комплексу є опис аналізованої схеми за допомогою проблемно орієнтованих мов, розроблених на основі підпрограм безформатного введення інформації, які характеризуються близькістю описів до природної мови, що складаються.

Вихідна інформація виводиться як таблиці.

При частотному аналізі пристроїв розраховуються наступні параметри:

- компоненти матриць розсіювання $[S]$ та провідності $[Y]$;
- коефіцієнти стоячої хвилі та повні опори на вході та виході чотиріполюсника;
- фактичний, реалізований та номінальний коефіцієнти передачі;
- інваріантний коефіцієнт стійкості та інше.

Загальна кількість смужових ліній в аналізованому пристрої може досягати 100, а навісних RLC-елементів – 200. Похибка розрахунку вибирається у $10^{-4} \dots 10^{-6}$. Час аналізу мікросмужової схеми атенюатора становить десятки секунд.

2.2 Результати розрахунку атенюаторів та експериментальні дані

На рисунках 2.2-2.5 представлені залежності робочого згасання від частоти для схем з послідовно і паралельно включеними резисторами в розрив і паралельно мікросмужової лінії, комутовані діодами 2A547B-3 і 2A533A-3.

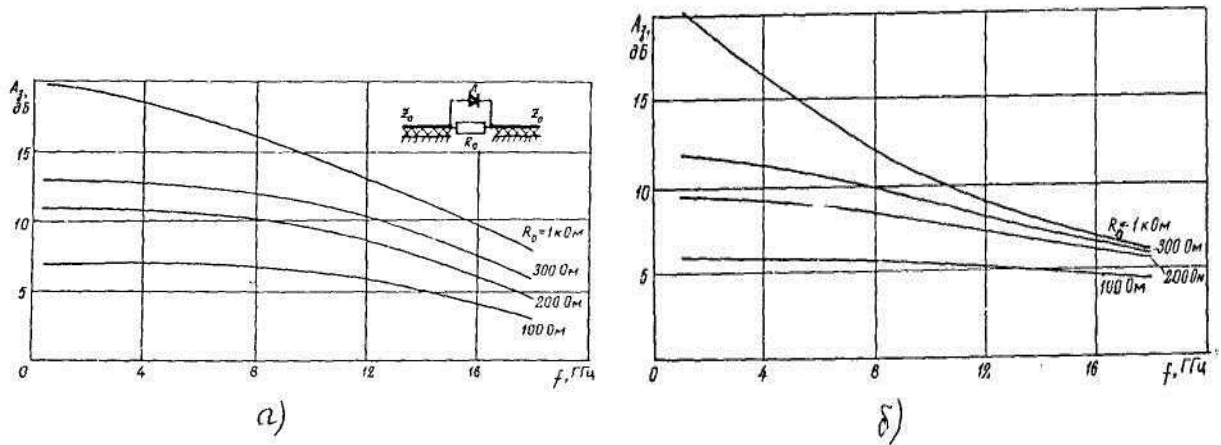


Рисунок 2.2 – Експериментальні та розрахункові характеристики залежно від частоти загасання в атенюаторі на діоді 2А533 при різних опорах R_0

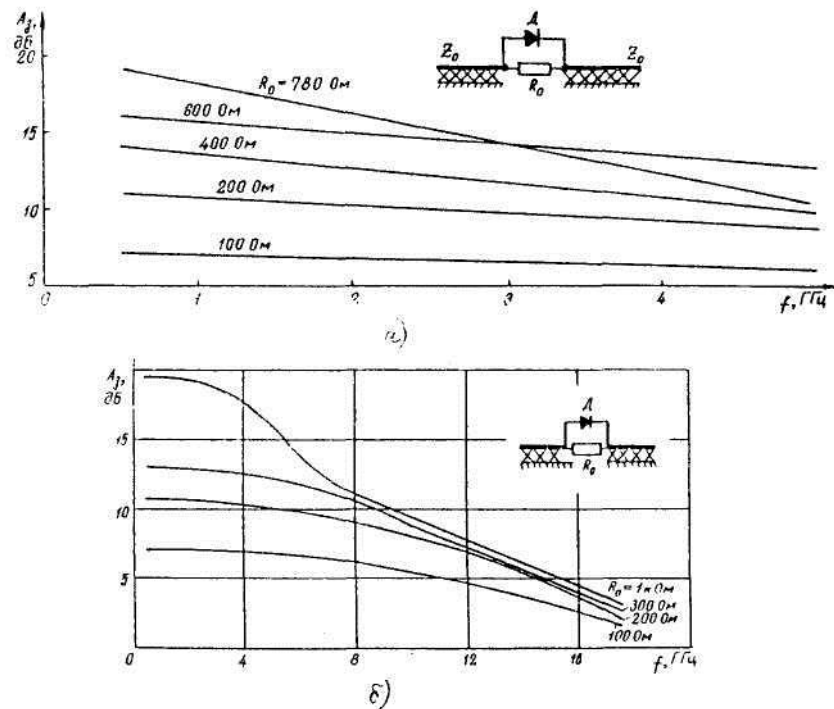


Рисунок 2.3 – Експериментальні та розрахункові залежності загасання A від частоти в атенюаторі на діоді 2А547В-3 ($C \leq 0,12$ пФ) при різних опорах R_0

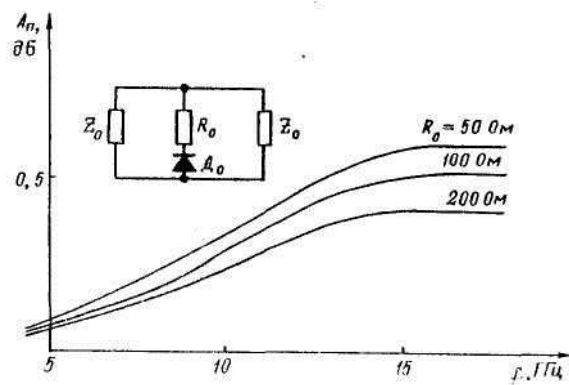


Рисунок 2.4 – Залежність втрат пропускання від частоти в атенюаторі на діоді 2A533A-3 за різних опорів R_0

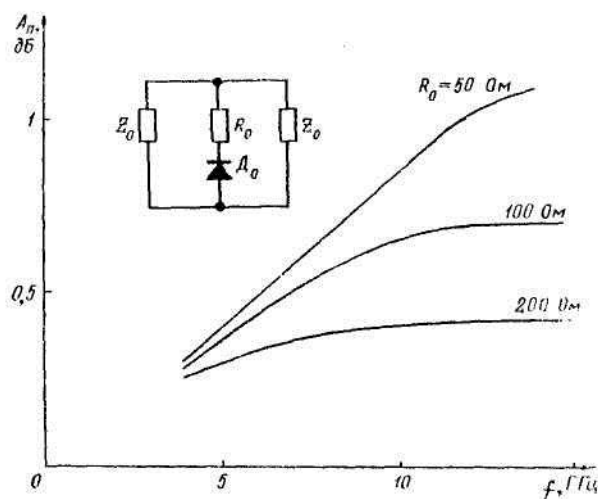
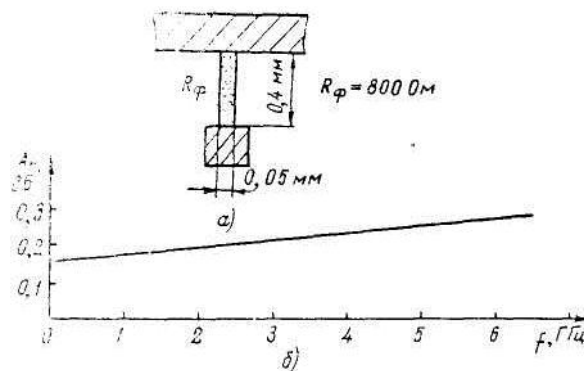


Рисунок 2.5 – Залежність втрат пропускання від частоти атенюатора на діоді 2A547B-3 за різних опорів R_0

З рисунків видно, що застосування діода 2A547B-3 в атенюаторах доцільно лише до частоти ~ 4 ГГц, де спостерігається відносно низький перепад згасання для послідовного включення та мінімальні втрати – для паралельного включення. Тому для досягнення малих перепадів у широкосмугових атенюаторах слід використовувати діоди з мінімальною

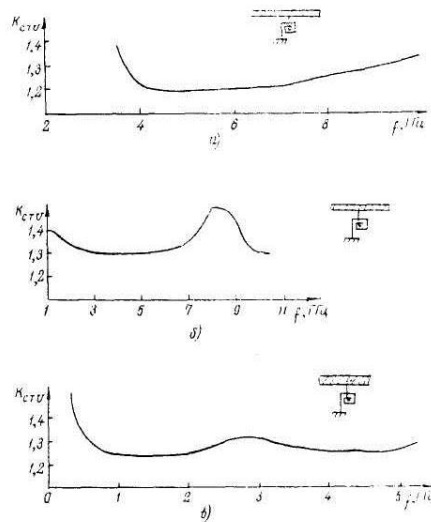
ємністю, наприклад, діод 2A5БЗА-3, у якого $\leq 0,02$ пФ.

Важливе значення таких схемах грає індуктивність виводів діода. Для багатьох типів діодів, мають балкові виводи, величина індуктивності постійна. Так, довжина діодів типів 2A533, 2A547 та 2A553, що застосовуються в атенюаторах, дорівнює 0,9 мм. Причому вільна довжина балкових виводів діода становить 0,4...0,5 мм. Це відповідає індуктивності 0,3...0,4 нГн. Результати розрахунку загасання для найпростішої схеми атенюатора з урахуванням індуктивності виводів та ємності діодів наведено на рисунках 2.6, 2.7. Зазначимо, що для зниження індуктивності виводів і збільшення широкосмугової атенюаторів включають паралельно кілька діодів або застосовують фільтри, що компенсують індуктивність виводів.



а) резистивний фільтр живлення, б) частотна характеристика

Рисунок 2.6 – Резистивний фільтр живлення та його частотна характеристика



а) число витків 2,5, б) число витків 4,5, в) число витків 6,5

Рисунок 2.7 – Частотні характеристики індуктивних фільтрів живлення
(ширина смужки та відстань між смужками 30 мкм)

Такі значення індуктивності виводів діодів дозволяють проектувати НВЧ діодні атенюатори до високих частот порядку 10 ГГц-14 ГГц. Електронна промисловість намагається виготовляти якісні діоди з дуже малими значеннями індуктивності виводів діода, порядку 0,07-0,11 нГн та малими значеннями паразитної ємності копусів діодів, порядку 0,01-0,02 пФ. Усе частіше виконуються безкорпусні діоди та конденсатори. При чому застосовуючи для цього новітні технології і новітні матеріали.

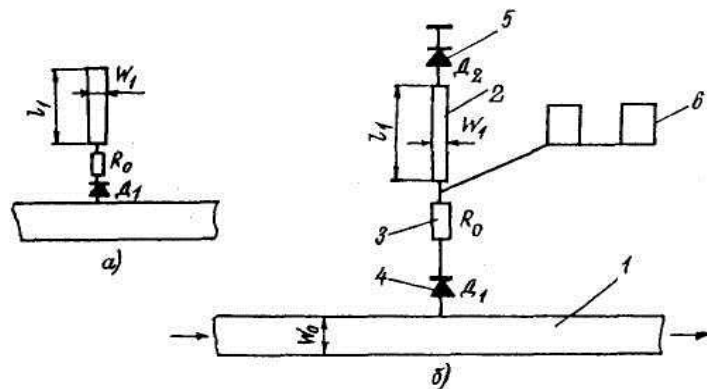
2.3 Фільтри живлення для р-і-п діодів

Особливе місце при конструюванні широкосмугових атенюаторів займають фільтри живлення діодів, які можуть обмежувати робочу смугу частот атенюаторів більшою мірою, ніж реактивні елементи діодів. На низьких частотах (~ до 3 ГГц) в якості широкосмугового фільтра живлення можна застосувати багатоомний резистор з опором R_{ϕ} не менше 500 Ом, втрати яких вносяться не перевищують 0,2 дБ. Приклад конструкції такого

фільтра та результати вимірювання прямих втрат наведено на рисунку 2.6. Оцінне значення опору R_{ϕ} становить 800 Ом.

Фільтри живлення, що містять індуктивність (рис. 2.7), мають обмеження діапазону частот через міжвиткову ємність, яка утворює послідовний резонанс з індуктивністю котушки в точках частотного діапазону. Найбільш широкосмуговими є спіральні котушки з повітряним діелектриком, що мають мінімальну величину міжвиткової ємності.

З рисунку 2.8 видно, що плоскі індуктивності на полікор працездатні тільки з малим кроком намотування. Однак технологія виготовлення ГІС не дозволяє здійснити занадто вузький зазор катушок (менше 20 мкм), що обмежує можливість конструювання широкосмугових атенюаторів з такими фільтрами живлення.



1 – центральна полоскова лінія; 2 – відрізок лінії; 3 – резистор;
4,5 – основний та додатковий p-i-n діоди відповідно; 6 – фільтр живлення
а) загальна схема атенюатора, б) схема з додатковим діодом

Рисунок 2.8 – Загальна схема атенюатора та схема з додатковим діодом

2.4 Атенюатор із однорозрядним ступінчастим ослабленням сигналу

У техніці НВЧ широко застосовуються ступінчасті атенюатори НВЧ, характеристики яких визначаються двома станами р-і-п діода: "відкрито" та "закрито".

Одна з конструкцій такого атенюатора містить Т-подібну мікросмугову схему, плівковий резистор і р-і-п діод, включені між центральним провідником і чвертьхвильовим шлейфом (рис. 2.8 а).

Вирази для втрат замикання та пропускання у такій схемі мають вигляд ($L_p = 0$):

$$A_z = 10 \lg \left| 1 + \frac{Z_0}{2(R_0 + r)} \right|^2, \quad (2.6)$$

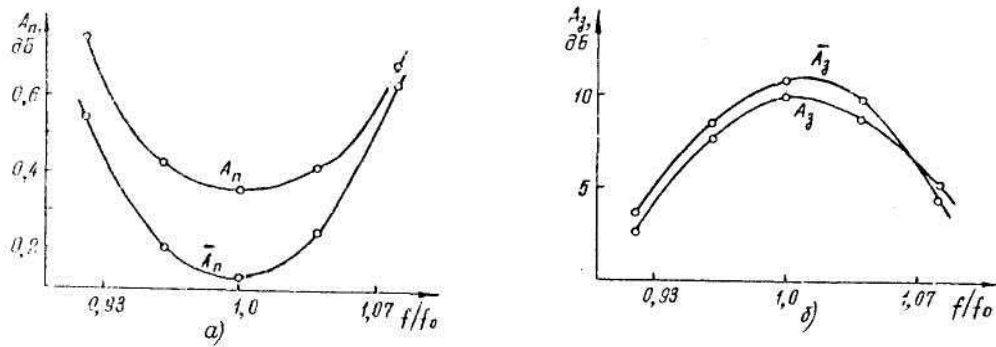
$$A_n = 10 \lg \left| 1 + \frac{Z_0}{2(R_0 + R - \frac{j}{\omega C})} \right|^2, \quad (2.7)$$

де R_0 – опір плівкового резистора;

r , R , C – параметри р-і-п діода при прямому та зворотному включенні.

Резистор R вносить додаткові втрати під час роботи р-і-п діода у режимі "закрито", що зумовлює збільшення A_n . На частоті $f_0 = 14$ ГГц в атенюаторі на діоді 2A547 утворюються втрати $A_n \approx 0,45$ дБ (рис. 2.9 а).

Втрати пропускання можуть бути помітно знижені, якщо в цій конструкції атенюатора використовувати додатково р-і-п діод D_2 з малою ємністю, включений на іншому кінці відрізка лінії в напрямку, уніполярному основному діоду (рис. 2.9 б).



а) частотні залежності втрат пропускання, б) замикання атенюатора

Рисунок 2.9 – Частотні залежності втрат пропускання і замикання атенюатора, з одним (А) і двома (А) діодами

При позитивному зміщенні на р-і-п діоді D_2 діод D_1 зміщений у протилежному напрямку. Його великий опір, рівний $(\omega \cdot C)^{-1}$ (C – ємність діода), перерахований через чвертьхвильовий відрізок лінії в площині діода D_1 має малу величину, і втрати замикання визначаються з виразу:

$$\bar{A}_g \approx 10 \lg \left| 1 + \frac{Z_0}{2(R_0 + r + j\omega C Z_0^2)} \right|^2. \quad (2.8)$$

При негативному зміщенні на діоді D_2 , діод D_1 стає прямозміщеним. Втрати пропускання у разі визначаються з виразом:

$$\bar{A}_I = 10 \lg \left| 1 + \frac{Z_0}{2(R_0 + \frac{Z_0^2}{r_q} + R - \frac{j}{\omega C})} \right|^2, \quad (2.9)$$

де r_q – опір додаткового р-і-п діода D_2 .

На частоті $f_0 = 14$ ГГц із формули (2.9) отримуємо $\bar{A}_f \approx 0,25$ дБ, що більш ніж удвічі менше за величину, отриману з виразу (2.8). Частотні характеристики атенюатора наведено на рисунку 2.10.

2.5 Конструкції атенюаторів із трирозрядним ступінчастим ослабленням сигналу

Принципові схеми атенюаторів, що працюють в діапазоні частот 0,5...2,5; 2,5...6,5; 6,5...10,5 і 10,5...18 ГГц та їх характеристики загасання наведені на рисунках 2.10 та 2.11, а також в таблиці 2.2.

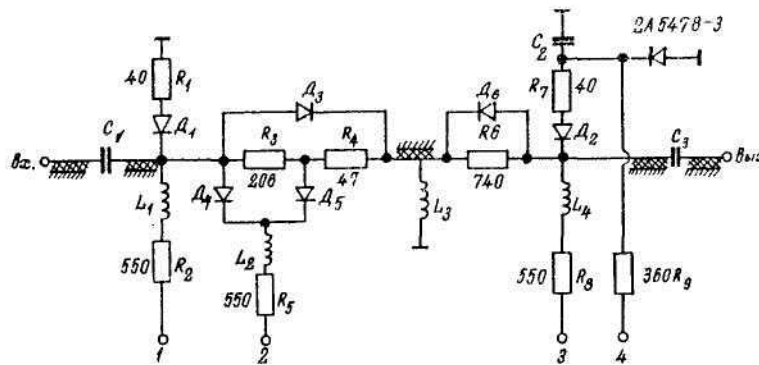
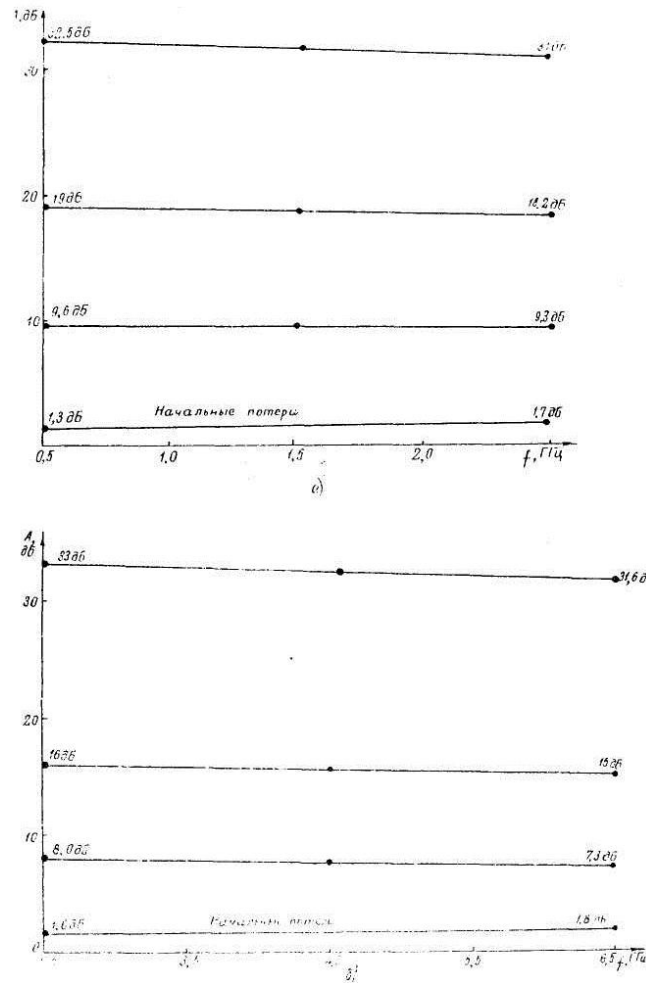
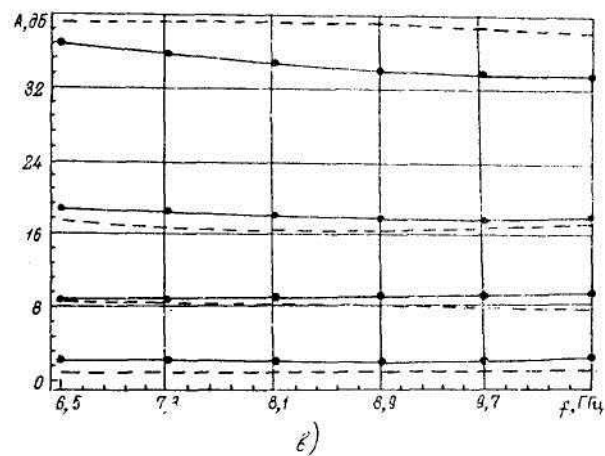


Рисунок 2.10 – Еквівалентна схема атенюатора з трьохрозрядним ступінчастим ослабленням сигналу

Всі три варіанти схеми виконані у вигляді П-моста, паралельні плечі якого складаються з резисторів R_1 , R_7 комутованих діодами D_1 і D_2 . Послідовна ланка складається з трьох резисторів R_3 , R_4 , R_6 , які шунтуються включенням діодів D_{3-6} , утворюючи ступінчасте згасання атенюатора 8, 16 і 32 дБ.



а) діапазон частот 0,5...2,5 ГГц, б) діапазон частот 2,5...6,5 ГГц



в) діапазон частот 6,5,..10,5 ГГц,

--- розрахунок; -●-●-●- експеримент

Рисунок 2.11 – Залежності робочого згасання від частоти діапазону частот

В атенюаторі (0,5...2,5 ГГц) як фільтри живлення використовуються резистори R_2 , R_5 , R_8 , R_9 і індуктивності L_3 . У більш високочастотних атенюаторах у фільтрі живлення використовуються індуктивності L_{1-4} і блокувальні ємності C_{1-3} . Атенюатори включаються від джерел напруги +5 В і -5 В їх комбінаціях, представлених в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми атенюатора

Діапа- зон, ГГц	Z_{1-3} , пФ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	L_1	L_2	L_3	L_4	Діоди D_{1-6}	I_d , мА
0,5... 2,5	100	67	700	147	47	700	640	67	70	65	0	0	16	0	2A547B -3	<10
2,5... 6,5	80	68	800	147	50	720	655	68	74	66	0	0	20	0	2A553A -3	<10
6,5... 10,5	30	40	550	206	47	550	740	40	55	36	10	10	10	10	2A553A -3	<10

Якщо на контакти 1 і 3 подавати напругу +5 В, початкові втрати не перевищують 2 дБ.

Одним із недоліків конструкцій атенюаторів є застосування "чіпів" – розподільчих конденсаторів, встановлених на вході та виході мікросмугової лінії, які можуть вносити додаткові втрати через витоки струмів в цих конденсаторах. Заміна навісних конденсаторів напиленими могла вирішити цю проблему за умови високого відсотка виходу придатних плат. Нині можна розраховувати у разі на 20% придатних плат атенюаторів з п'ятьма напиленими конденсаторами.

Ступінчастий атенюатор на р-і-п діодах, що працює в діапазоні частот 10,5...18 ГГц (рис. 2.12), проектувався на сумарне ослаблення 32 дБ з дискретністю перемикавання 8 дБ і включає 2 ступені по 8 та одну 16 дБ. Схема кожної ступі є П-подібне з'єднання резисторів, які підключаються до

основного НВЧ тракту за допомогою діодів типу 2A553.

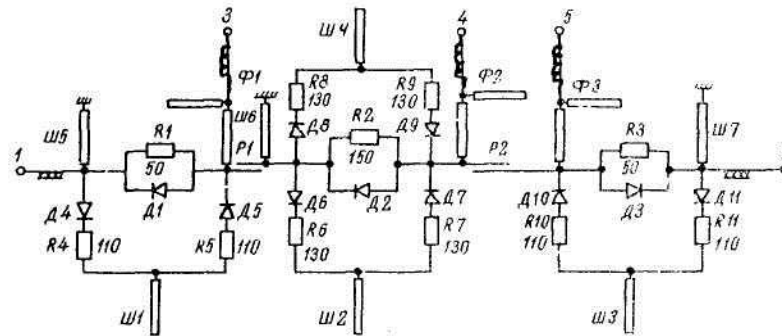


Рисунок 2.12 – Еквівалентна схема широкосмугового триступеневого атенюатора для діапазону частот 10,5...18 ГГц

Параметри діодів: $r = 3 \text{ Ом}$; $C = 0,03 \text{ пФ}$. Коротке замикання резисторів $R_4 - R_2$ на землю на високій частоті здійснюється за допомогою розімкнених чверть хвильових шлейфів Ш1-Ш4. Для розв'язки атенюатора по постійному струму між його щаблями розміщені розмикачі на зв'язаних лініях P1, P2, а на вході та виході схеми – закорочені шлейфи Ш5 та Ш7.

З метою отримання мінімальних втрат точки включення до основного тракту фільтрів живлення р-і-п діодів Ф1-Ф3, розмикачів P1, P2 і шлейфів Ш5, Ш6 оптимізувалися на ЕОМ. В результаті міри мінімальні втрати атенюатора не перевищують 2,5 дБ в діапазоні частот 10,5...18 ГГц і 2 дБ в діапазоні частот 11,5...18 ГГц. Виміряні значення ослаблення склали $8,3 \pm 0,6$; $15,4 \pm 0,9$; $21,5 \pm 1,5$ та $27,5 \pm 2,5$ дБ. КСХ атенюатора вбирається у 1,5.

Примітка. Значення R дані в Ом, L – в нГн.

В таблиці 2.3 наведено комбінації напруги, що реалізують необхідне згасання атенюатора.

Таблиця 2.3 – Комбінації напруги, що реалізують необхідне згасання атенюатора

Номер контакту	Напруга, В	Отримане згасання дБ
1; 3	–5	32
1	–5	16
4	+5	16
2	–5	8
4	+5	8

На рисунку 2.13 наведена схема двохдіодного атенюатора, у якій діоди розділені коректуючою лінією. Елементи L1, C1 утворюють фільтр живлення діодів. Резистори R1, R2 введені для корекції коефіцієнта відбиття. Z1 та Z3 – узгоджувальні відрізки мікросмугових ліній, Z2 розподільча лінія для корекції коефіцієнта відбиття.

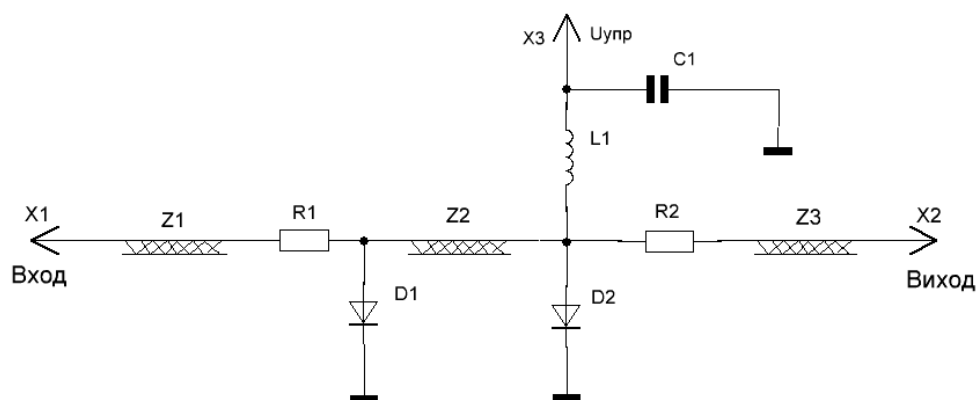


Рисунок 2.13 – Схема електрична 2-х діодного атенюатора з МСЛ

Для забезпечення роботи атенюатора у більш широкому діапазоні частот необхідно застосовувати діоди високої якості з мінімальною ємністю.

Ємність діода повинна задовольняти наступному порівнянню:

$$C_d \leq \frac{1}{\omega_0 \cdot 2 \cdot R_{o,}}, \quad (2.10)$$

де ω_0 – центральна частота діапазону;

$R_{o,}$ – хвильовий опір з'єднуючих ліній.

При різних напругах зміщення від $U_{обр}$ до $U_{пр}$ еквівалентна схема діода суттєво відрізняється. При нульовому зміщенні маємо схему (рис. 2.14).

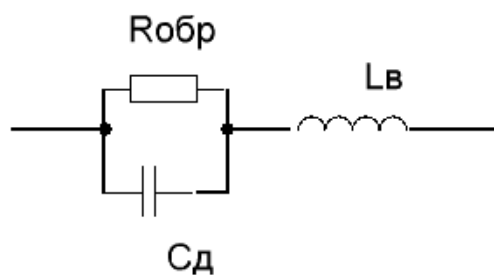


Рисунок 2.14 – Еквівалентна схема р-і-п діода при зворотному зміщенні

При прямому зміщенні маємо наступну схему (рис. 2.15).

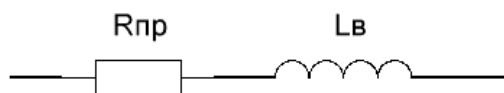


Рисунок 2.15 – Еквівалентна схема р-і-п діода при прямому зміщенні

У першому випадку зсув фази створюваний діодом від'ємний, а у другому – додатний. Очевидно, що при збільшенні прямого струму діє зменшення електричної довжини атенюатора, ефект «скорочування». Він найбільш позначається при значних прямих струмах. У даній схемі атенюатора скорочення компенсується мікросмуговою лінією з високим

опором та довжиною $\lambda_k < \lambda_0$ включену між діодами. Для зниження КСХ у режимі великих затухань у схему введені коректуючі резистори $R_1 = R_2$.

$$R_1 = R_k - R_0, \quad (2.11)$$

де R_k – хвильовий опір відрізка компенсуючої лінії;

R_0 – хвильовий опір відрізків з'єднуючих ліній.

Відрізки вхідних ліній з стандартним хвильовим опором 50 Ом та довжиною $\lambda / 4$, з за їхніх трансформованих властивостей.

Розглянемо коефіцієнт передачі схеми для двох режимів, у режимі великих затухань:

$$K = \frac{\rho_0 \cdot (j\omega L_B + R_d)^2}{R_k^2 \cdot (j\omega L_{екв} + 2 \cdot j\omega L_B + 2 \cdot R_d)} = \frac{\rho_0 \cdot R_d \cdot (1 + (\frac{\omega \cdot L_B}{R_d})^2)}{2 \cdot R_k^2 [1 + (\frac{\omega \cdot (2 \cdot L_B + L_{екв})}{2 \cdot R_d})^2]} \cdot \exp\{2 \cdot \arctg \frac{\omega \cdot L_B}{R_d} - \arctg \frac{\omega (L_{екв} + 2 \cdot L_B)}{2 \cdot R_d}\}. \quad (2.12)$$

Отже зсув фази у режимі великих затухань буде:

$$\varphi_1 = \exp\{2 \cdot \arctg \frac{\omega \cdot L_B}{R_d} - \arctg \frac{\omega (L_{екв} + 2 \cdot L_B)}{2 \cdot R_d}\}, \quad (2.13)$$

де $L_{екв} = (R_r \cdot \sqrt{\epsilon_{эф}} \cdot l_k) / c$, еквівалентна індуктивність компенсуючого відрізка лінії;

$\epsilon_{эф}$ – діелектрична константа МСЛ;

l_k – довжина відрізка;

c – швидкість світла.

У режимі малих затухань коли $R_d \gg R_k$ та при $(\omega \cdot C_d \cdot R_k / 2)^2 \ll 1$ коефіцієнт передачі схеми буде:

$$K = \exp(-j\omega \cdot C_d R_k + \Theta), \quad (2.14)$$

де $\Theta = (\omega \cdot l_k \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}) / c$ – електрична довжина відрізка компенсуючої лінії.

Отже зсув фази у режимі малих затухань буде:

$$\varphi_2 = -\omega \cdot (C_d \cdot R_k + (\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \cdot l_k) / c). \quad (2.15)$$

Порівняння $\varphi_1 = \varphi_2$ є умовою повної компенсації скорочення. Для верхньої робочої частоти маємо:

$$-\omega \cdot (C_d \cdot R_k + (\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \cdot l_k) / c) = 2 \cdot \left\{ 2 \cdot \arctg \frac{\omega \cdot L_B}{R_{\text{дмін}}} - \arctg \frac{\omega_B \cdot (2 \cdot R_k \cdot (\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \cdot l_k) / c + 2 \cdot L_B)}{2 \cdot R_{\text{дмін}}} \right\}, \quad (2.16)$$

де $R_{\text{дмін}}$ – мінімальне значення опору діода відповідно малим значенням коефіцієнту затухань. Коефіцієнт передачі атенюатора при максимальному затуханні визначається наступною формулою:

$$K_{\text{зат макс}} = \frac{\rho_0 \cdot R_d \cdot (1 + (\frac{\omega \cdot L_B}{R_d})^2)}{2 \cdot R_k^2 [1 + (\frac{\omega \cdot (2 \cdot L_B + L_{\text{екв}})}{2 \cdot R_d})^2]^{-2}}. \quad (2.18)$$

Підставляючи значення параметрів діода, з підрозділу 3.3, $L_B = 0,12$ нГн, значення опору коректуючого ланцюга $R_k = 15$ Ом і та значення опору діода у режимі максимального загасання $R_d = 2$ Ома отримуємо результат $K_{\text{заг макс}} = 28$ дБ.

3 МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМИ АТЕНЮАТОРА

3.1 Описання програми SAMIS2

Система SAMIS призначена для розрахунку та ручної оптимізації схем НВЧ, виконаних на мікросмужкових (МСЛ) та щілинних (ЩЛ) лініях передачі, а також на комбінаціях цих ліній. Моделювання НВЧ – схем у системі проводиться на рівні електричних параметрів: хвильових опорів, електричних довжин ліній, ємності, індуктивності тощо. Топологія пристрою, що відображається на екрані в процесі її побудови, не відповідає реальній топології на платі, але візуально близька до неї. Система дозволяє моделювати пристрої на будь-яких інших лініях передачі (хвильоводи, коаксіальні лінії тощо), хоча візуально вони відображатимуться у вигляді МСЛ або ЩЛ.

Система побудована з урахуванням принципу декомпозиції – розбиття схеми на найпростіші складові, звані базовими елементами (БЕ). Опис БЕ здійснюється за допомогою матриць розсіювання. У процесі розрахунку матриці окремих БЕ поєднуються в єдину матрицю розсіювання пристрою. Набір БЕ, що використовується в системі, дозволяє моделювати широкий клас як пасивних, так і активних пристроїв НВЧ.

Матриці розсіювання БЕ.

Усі БЕ системи, залежно від призначення та способу отримання їх матриць розсіювання, можна умовно розбити на 3 групи:

- БЕ призначені для моделювання схем НВЧ; їх матриці розсіювання розраховуються у системі;
- БЕ – "чорні ящики", також призначені для моделювання схем НВЧ. Їхні матриці розсіювання можуть бути отримані або розрахунковим шляхом поза системою (а також і в системі), або шляхом вимірювань.
- БЕ призначені для моделювання багат шарових структур, що складаються з речовин із довільними параметрами.

До складу першої групи входять такі БЕ:

– відрізок регулярної лінії (відрізок МСЛ або ЩЛ). Схема відрізка показано рисунку 3.1. Для зручності розрахунку при оптимізації схеми, основний відрізок довжиною l зліва та справа доповнений стрибками хвильового опору, довжини яких дорівнюють нулю.

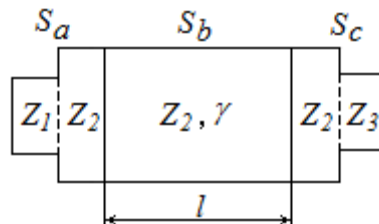


Рисунок 3.1 – Відрізок регулярної лінії

Елементи матриці розсіювання цього БЕ розраховуються за формулами:

$$S_{11} = \frac{S_{a11} + S_{c11}(S_{a12})^2 e^{-2\gamma l}}{1 + S_{a11}S_{c11}e^{-2\gamma l}}; \quad S_{22} = \frac{S_{c22} + S_{a22}(S_{c12})^2 e^{-2\gamma l}}{1 + S_{a11}S_{c11}e^{-2\gamma l}};$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{S_{a12} + S_{c12}e^{-2\gamma l}}{1 + S_{a11}S_{c11}e^{-2\gamma l}};$$

$$S_{a22} = -S_{a11} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad S_{a12} = S_{a21} = \sqrt{1 - S_{a11}^2} = \frac{2\sqrt{Z_1 Z_2}}{Z_1 + Z_2}; \quad (3.1)$$

$$S_{c22} = -S_{c11} = \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}; \quad S_{c12} = S_{c21} = \sqrt{1 - S_{c11}^2} = \frac{2\sqrt{Z_2 Z_3}}{Z_2 + Z_3}.$$

Тут S_a і S_c матриці розсіювання лівого та правого стиків відповідно. Постійне поширення $\gamma = \alpha + j\beta$, де α – Коефіцієнт втрат, β – Коефіцієнт фази.

Відрізок двох зв'язаних ліній (МПЛ та ЩЛ). Схема відрізка довжиною l показано рисунку 3.2. Там же показано нумерацію плечей БЕ.

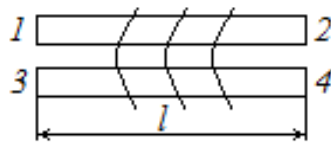


Рисунок 3.2 – Відрізок зв'язаних ліній

Елементи матриці розсіювання цього БЕ розраховуються за формулами:

$$S_{11} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma_{oo}(1 - e^{-j2\beta_{oo}l})}{1 - \Gamma_{oo}^2 e^{-j2\beta_{oo}l}} + \frac{\Gamma_{oe}(1 - e^{-j2\beta_{oe}l})}{1 - \Gamma_{oe}^2 e^{-j2\beta_{oe}l}} \right]; \quad (3.2)$$

$$S_{21} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Gamma_{oo}(1 - e^{-j2\beta_{oo}l})}{1 - \Gamma_{oo}^2 e^{-j2\beta_{oo}l}} - \frac{\Gamma_{oe}(1 - e^{-j2\beta_{oe}l})}{1 - \Gamma_{oe}^2 e^{-j2\beta_{oe}l}} \right];$$

$$S_{31} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1 - \Gamma_{oo}^2)e^{-j\beta_{oo}l}}{1 - \Gamma_{oo}^2 e^{-j2\beta_{oo}l}} + \frac{(1 - \Gamma_{oe}^2)e^{-j\beta_{oe}l}}{1 - \Gamma_{oe}^2 e^{-j2\beta_{oe}l}} \right];$$

$$S_{41} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1 - \Gamma_{oo}^2)e^{-j\beta_{oo}l}}{1 - \Gamma_{oo}^2 e^{-j2\beta_{oo}l}} - \frac{(1 - \Gamma_{oe}^2)e^{-j\beta_{oe}l}}{1 - \Gamma_{oe}^2 e^{-j2\beta_{oe}l}} \right];$$

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44}; \quad S_{12} = S_{21}; \quad S_{13} = S_{31}; \quad S_{14} = S_{41};$$

$$S_{24} = S_{42} = S_{31}; \quad S_{34} = S_{43} = S_{21}.$$

У цих формулах:

$$\Gamma_{oo} = \frac{Z_{oo} - Z}{Z_{oo} + Z}; \quad \Gamma_{oe} = \frac{Z_{oe} - Z}{Z_{oe} + Z}, \quad (3.3)$$

де Γ_{oo} – коефіцієнт відображення при парному збудженні;

Γ_{oe} – коефіцієнт відображення при непарному збудженні;

Z_{oo} – хвильовий опір при парному збудженні;

Z_{oe} – хвильовий опір при непарному збудженні;

Z – хвильовий опір ліній, що підводять.

Фазові коефіцієнти β_{oo} і β_{oe} обчислюються за формулами:

$$\beta_{oo} = \frac{2\pi}{\lambda_{oo}}; \quad \beta_{oe} = \frac{2\pi}{\lambda_{oe}}; \quad (3.4)$$

де λ_{oo} – довжина хвилі при парному збудженні;

λ_{oe} – довжина хвилі при непарному збудженні.

Симетричне паралельне Y-розгалуження.

Матриця розсіювання даного БЕ має вигляд:

$$S = \begin{bmatrix} -1/3 & 2/3 & 2/3 \\ 2/3 & -1/3 & 2/3 \\ 2/3 & 2/3 & -1/3 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Симетричне послідовне Y-розгалуження.

Матриця розсіювання даного БЕ має вигляд:

$$S = \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 & 2/3 \\ 2/3 & 1/3 & -2/3 \\ 2/3 & -2/3 & 1/3 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Паралельне відгалуження від ЩЛ. Вихідна нумерація плечей даного БЕ показано рисунку 3.3.

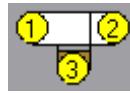


Рисунок 3.11 – Топологія Y-розгалуження

Матриця розсіювання БЕ аналогічна матриці розсіювання паралельного Y-розгалуження.

$$S = \begin{bmatrix} -1/3 & 2/3 & 2/3 \\ 2/3 & -1/3 & 2/3 \\ 2/3 & 2/3 & -1/3 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Перехід від МСЛ на ЩЛ . Вихідна нумерація плечей даного БЕ показана на рисунку 3.4.

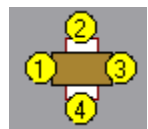


Рисунок 3.4 – Топологія переходу від МСЛ на ЩЛ

Матриця розсіювання БЕ має вигляд:

$$S = \begin{bmatrix} 1/5 & 2/5 & -4/5 & 2/5 \\ 2/5 & -1/5 & 2/5 & 4/5 \\ -4/5 & 2/5 & 1/5 & 2/5 \\ 2/5 & 4/5 & 2/5 & -1/5 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Послідовний опір у лінії. Схема БЕ показано рисунку 3.5.

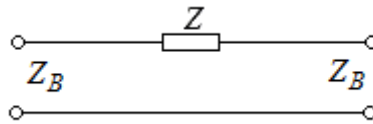


Рисунок 3.5 – Схема включення послідовного опору у лінію

Матриця розсіювання даного БЕ має вигляд:

$$S = \frac{1}{Z + 2Z_B} \cdot \begin{bmatrix} Z & 2Z_B \\ 2Z_B & Z \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Послідовна індуктивність L у лінії. Схема БЕ показано рисунку 3.6.

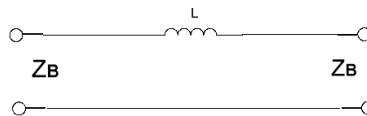


Рисунок 3.6 – Схема включення послідовної індуктивності у лінію

Матриця розсіювання цього БЕ обчислюється аналогічно до матриці розсіювання послідовного опору, де величина $Z = j\omega L$.

Послідовна ємність в лінії. Схема БЕ показано рисунку 3.7.

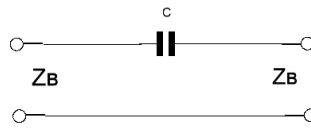


Рисунок 3.7 – Схема включення послідовної ємності у лінію

Матриця розсіювання цього БЕ також обчислюється аналогічно матриці розсіювання послідовного опору де величина:

$$Z = \frac{1}{j\omega C}.$$

Узгоджене навантаження.

Матриця розсіювання цього БЕ має вигляд $S = s_{11} = 0$.

Коротке замикання (К.З.).

Матриця розсіювання цього БЕ має вигляд $S = s_{11} = -1$.

Холостий хід (Х.Х.).

Матриця розсіювання цього БЕ має вигляд $S = s_{11} = 1$.

Послідовно включений р-і-п діод.

Матриця розсіювання даного БЕ обчислюється з малосигнальною еквівалентною схемою, показаною на рисунку 3.8.

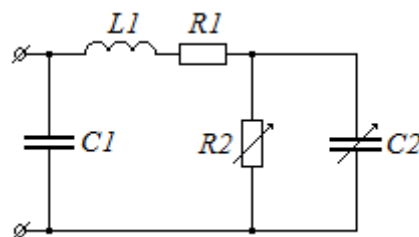


Рисунок 3.8 – Еквівалентна схема діода

Спочатку обчислюється вхідний опір Z_{BX} наведеної схеми. Потім формулою для послідовного опору знаходиться матриця розсіювання. При цьому належить $Z = Z_{BX}$.

Послідовно включений лавино-прогоновий діод.

Матриця розсіювання БЕ також обчислюється за малосигнальною еквівалентною схемою, показаною на рисунку 3.9.

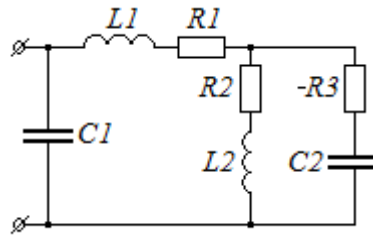


Рисунок 3.9 – Еквівалентна схема діода

Спочатку обчислюється вхідний опір Z_{BX} наведеної схеми. Потім формулою для послідовного опору знаходиться матриця розсіювання. При цьому належить $Z = Z_{BX}$.

Польовий транзистор. Матриця розсіювання обчислюється за схемою, наведеною на рисунку 3.10.

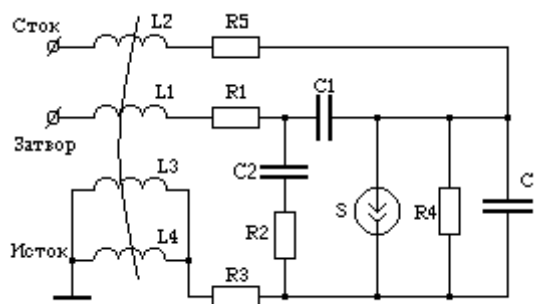


Рисунок 3.10 – Еквівалентна схема польового транзистора

Для розрахунку використовується співвідношення:

$$S = (E - Y)(E + Y)^{-1}, \quad (3.10)$$

де Y – матриця повних провідностей еквівалентної схеми,

E – поодинокі матриця відповідної розмірності.

Допоміжний переріз лінії. Даний БЕ призначений для перегляду значень поля в будь-якому перерізі НВЧ-тракту. Він може використовуватися для підключення інших БЕ без спотворення структури поля в тракту. Його матриця розсіювання має вигляд:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

До складу другої групи входять БЕ:

«Чорна скринька» 2-, 4-, 6-, 8-полюсник. Вихідна нумерація плечей 6- та 8-полюсників показано на рисунку 3.11.

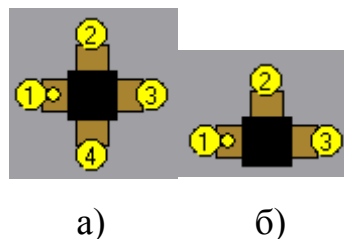


Рисунок 3.11 – Топологія 6- та 8-полюсників

Матриця розсіювання «чорної скриньки» може бути отримана шляхом розрахунку або безпосередніх вимірів і повинна бути задана в діапазоні частот, в якому розраховується схема, що проектується. Якщо в процесі

розрахунку частоти не збігаються з частотами, на яких відомі (ураховані або виміряні) елементи матриці розсіювання "чорної скриньки", то в цьому випадку при обчисленні значень елементів матриці використовується лінійна інтерполяція.

В аналітичній формі формули перерахунку мають вигляд :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(S_{ij}) &= \frac{\operatorname{Re}(S_{ij,k+1})(f - f_k) + \operatorname{Re}(S_{ij,k})(f_{k+1} - f)}{f_{k+1} - f_k}, \\ \operatorname{Im}(S_{ij}) &= \frac{\operatorname{Im}(S_{ij,k+1})(f - f_k) + \operatorname{Im}(S_{ij,k})(f_{k+1} - f)}{f_{k+1} - f_k}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

Де S_{ij} – значення елемента матриці розсіювання на частоті f ;

$S_{ij,k+1}$ – відоме значення елемента матриці розсіювання "чорної скриньки" на частоті f_{k+1} найближчої і більшої, ніж f ;

$S_{ij,k}$ – відоме значення елемента матриці розсіювання "чорного ящика" на частоті f_k , найближчою і меншою, ніж F .

Якщо робоча частота f не потрапляє в частотний діапазон матриці розсіювання "чорної скриньки", то обчислюваним елементам присвоюються значення, рівні найближчим крайнім частотою елементам матриці розсіювання "чорної скриньки".

До складу третьої групи входять БЕ.

Шар речовини. БЕ призначений для моделювання шару речовини, у якої відносні діелектрична та магнітна проникності можуть набувати довільних значень.

Для розрахунку матриці розсіювання використовуються позначення:

– $(\dot{\epsilon}_r = \epsilon_1 - j\epsilon_2)$ – комплексна відносна діелектрична проникність речовини шару;

– $(\dot{\mu}_r = \mu_1 - j\mu_2)$ – комплексна відносна магнітна проникність речовини шару;

– $(\dot{\gamma} = \alpha + j\beta)$ – комплексне постійне поширення в речовині шару;

– $\left(\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} k_0 \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \cdot \sqrt{\sqrt{p^2 + q^2} - p}\right)$ – коефіцієнт втрат;

– $\left(\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} k_0 \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \cdot \sqrt{\sqrt{p^2 + q^2} + p}\right)$ – коефіцієнт поширення;

– $k_0 = \frac{2\pi f}{c_0}$ – хвильове число вільного простору;

$$p = 1 - \frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}; \quad q = \frac{\mu_2}{\mu_1} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

Матриця розсіювання шару речовини має вигляд:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\alpha - j\beta} \\ e^{-\alpha - j\beta} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Кордон розділу серед. БЕ призначений для моделювання межі розділу двох середовищ, у яких відносні діелектрична та магнітна проникності можуть набувати довільних значень.

Для розрахунку матриці розсіювання використовуються позначення:

– $\dot{Z}_1 = 120\pi \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r1}}{\dot{\varepsilon}_{r1}}}$ – комплексний характеристичний опір 1-го середовища;

– $\dot{Z}_2 = 120\pi \sqrt{\frac{\dot{\mu}_{r2}}{\dot{\varepsilon}_{r2}}}$ – комплексний характеристичний опір 2-го середовища.

Матриця розсіювання кордону розділу має вигляд:

$$S = \frac{1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \begin{bmatrix} \dot{Z}_2 - \dot{Z}_1 & 2\sqrt{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2} \\ 2\sqrt{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2} & \dot{Z}_1 - \dot{Z}_2 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Інтерфейс системи. Система SAMIS являє собою Widows – орієнтовану програму з дружнім інтерфейсом, що забезпечує користувача необхідним набором функцій для побудови та аналізу в частотній області широкого класу як активних, так і пасивних схем НВЧ з використанням різних типів ліній передачі.

Інтерфейс організований за стандартами Widows-додатків і містить:

- робоче поле побудови схеми;
- графічний меню базових елементів;
- меню функцій системи, дублювання кнопками швидкого доступу.

Робоче поле системи забезпечене горизонтальною та вертикальною смугами прокручування, що дозволяє будувати схеми будь-яких розмірів та будь-якої функціональної складності.

Всі кнопки меню БЕ та кнопки швидкого доступу забезпечені підказками з коротким описом функції кожної кнопки. Крім того, опис дублюється в нижньому рядку під робочим полем системи.

Побудова схеми у робочому полі провадиться наступним чином.

Здійснюється вибір необхідного БЕ шляхом підведення покажчика та натискання кнопки «миші» на вибраному елементі. Далі покажчик миші перекладається будь-яку точку робочого поля, з якою користувач хоче почати побудова схеми. Натискання миші у вибраній точці призводить до появи вікна, в якому користувач визначає параметри обраного БЕ. Після натискання кнопки ОК вибраний БЕ буде збудований у робочому полі. Потім вибирається наступний БЕ. Покажчик миші підводиться до одного з вузлів (кухоль червоного кольору) побудованого в робочому полі БЕ. При цьому

вид покажчика змінюється – стрілка перетворюється на вказівний палець. Натискання миші викликає появу вікна зі списком параметрів вибраного БЕ. Введення (або редагування) параметрів та натискання кнопки ОК призводить до побудови БЕ. Продовжуючи аналогічні процедури (вибір БЕ, приєднання його до схеми тощо) користувач завершує побудову схеми.

У системі заборонено підключення до одного вузла більше двох БЕ. Тому, після з'єднання вузол між БЕ змінює колір – він стає темно-сірим, тобто, неактивним. Для виконання розгалуження у якомусь вузлі схеми слід використовувати БЕ «Паралельне Y-розгалуження мікросмужкових ліній», або «Послідовне Y-розгалуження щілинних ліній» залежно від типу лінії передачі, що використовується.

Включення нового БЕ у схему можливе також між будь-якими двома вільними вузлами. Для цього необхідно підвести покажчик миші до одного з вузлів і, натиснувши клавішу миші і не відпускаючи її, протягнути покажчик до наступного вузла. При цьому з першого вузла до другого промальовуватиметься лінія. Після відпускання кнопки миші новий БЕ буде підключений між вибраними вузлами. У цьому режимі дозволено підключення лише БЕ з двома плечима.

У системі дозволено встановлення БЕ у будь-якому місці робочого поля, а не лише шляхом його підключення до вільного плеча побудованої частини схеми. При цьому слід пам'ятати, що результуюча схема повинна мати роздільних, несполучених фрагментів. В іншому випадку буде видано повідомлення про помилку.

Редагування схеми можливе будь-якому етапі моделювання. Для цього



необхідно натиснути кнопку «Змінити параметри» у верхній частині меню БЕ. Потім слід підвести мишу до БЕ, параметри якого треба коригувати. При цьому вказівник миші зміниться – стрілка перетворюється на вказівний палець. Натискання миші викликає появу вікна з параметрами вибраного БЕ, які може змінювати користувач. Натискання ОК завершує

процес редагування.

Видалення БЕ із схеми також можливе на будь-якому етапі моделювання. Для цього необхідно натиснути кнопку  "Видалити" у верхній частині панелі меню БЕ. Потім слід підвести мишу до БЕ, яку треба видалити. При цьому вказівник миші зміниться – стрілка перетворюється на вказівний палець. Натискання миші викликає появу вікна з підтвердженням видалення. Натискання ОК викликає видалення БЕ.

Інший варіант видалення – кнопка  "Видалити останній (Ctrl + D)", натискання якої викликає видалення останнього підключеного до схеми БЕ. Комбінація клавіш Ctrl + D дублює цю функцію. Ця ж дія викликає вибір функції "Правка" опція "Видалити останній Ctrl + D".

Перед виконанням розрахунку необхідно також задати ряд загальних параметрів, які вводяться у спливаючому вікні після натискання кнопки  «Параметри пристрою...» або після вибору функції «Правка» опція «Параметри пристрою...».

Розрахунок схеми здійснюється або шляхом натискання кнопки  «Розрахунок ... (Ctrl + R)», або комбінацією клавіш Ctrl + R, що дублює цю функцію, або натисканням функції «Розрахунок». Результатом розрахунку є матриця розсіювання схеми, обчислена у певних точках заданого частотного діапазону. За замовчуванням матриця розсіювання зберігається у файлі з ім'ям NONAME 01. SMX у тому ж каталозі, що й основна програма. Користувач може змінити ім'я файлу з матрицею розсіювання та зберегти його у будь-якому іншому каталозі. Після завершення розрахунку на екрані з'являється панель плоттера, у якому можуть відображатися як графіків різні характеристики схеми.

Аналіз результатів розрахунку може здійснюватися або за допомогою вбудованого плоттера, або шляхом безпосереднього перегляду та інтерпретації числових значень елементів розсіювання матриці. Можливий

також експорт файлу з матрицею розсіювання до інших програм з подальшим аналізом числових даних за допомогою засобів цих додатків.

Єдиним обмеженням системи є кількість вільних плечей побудованої схеми, яка не може бути більшою за 8. При порушенні цієї умови видається повідомлення про помилку

3.2 Знімання вольт-амперних характеристик різноманітних діодів

Для точного знання опору діодів необхідно експериментальне знімання ВАХ. З цього приводу змонтовано лабораторний пристрій, за допомогою якого проводилось знімання ВАХ різних діодів. Для експерименту вибрані наступні типи перемикаючих та настроювальних НВЧ діодів: Д603А, 3А117А, КД528В, 3А516А, КА602Е, КА611А, 2А541А, 2А547А, 2А555А.

На рисунку 3.12 показана електрична схема пристрою для знімання ВАХ діодів. Е1 високо стабільне джерело живлення схеми, С1 ємність фільтра джерела живлення, R1 резистор, що обмежує струм через діод. Резистори R2, R3 дозволяють встановлювати точне значення напруги діода, $R1 = 470 \text{ Ом}$, $R3 = 47 \text{ Ом}$.

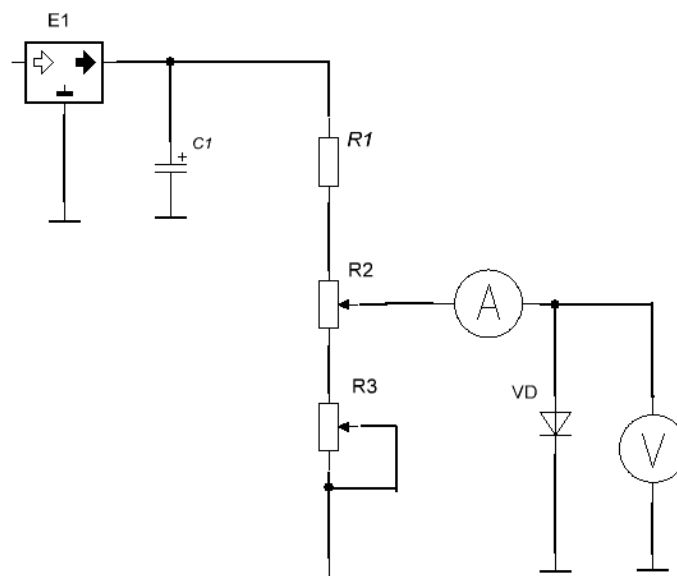


Рисунок 3.12 – Схема пристрою для знімання ВАХ діодів

Результати проведеного знімання ВАХ наведені у таблицях 3.1-3.5.

У таблиці 3.1 наведені експериментальні дані перемикаючого арсенід галлієвого р-і-п діода 3A516A з різким переходом. Зміна опору діода при зміні прямого струму від 1 мА до $I_{\text{пр макс}} = 100$ мА робиться у межах від 1000 Ом до 5 Ом.

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані діода 3A516A

$U_{\text{пр}}, \text{В}$	0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$	0	0	0,01	0,07	0,11	5	30	70
$R_{\text{д}}, \text{Ом}$	–	–	–	8500	7000	160	30	12

У таблиці 3.2 наведені експериментальні дані перемикаючого арсенід галлієвого р-і-п діода 3A528A з ще більш різким переходом. Зміна опору діода при зміні прямого струму від 1 мА до $I_{\text{пр макс}} = 500$ мА робиться у межах від 850 Ом до 2 Ом.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані діода 3A528A

$U_{\text{пр}}, \text{В}$	0	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$	0	0	0,02	0,9	15	96	500
$R_{\text{д}}, \text{Ом}$	–	–	3500	880	61	11	2

У таблиці 3.3 наведені експериментальні дані налагоджувального арсенід галлієвого р-і-п діода 3A117A. Зміна опору діода при зміні прямого струму від 0,1 мА до $I_{\text{пр макс}} = 50$ мА робиться у межах від 410 Ом до 22 Ом.

Таблиця 3.3 – Експериментальні дані діода 3A117A

$U_{\text{пр}}, \text{В}$	0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$	0	0,1	1,7	5,6	10,6	17,3	25,4	35	43	52
$R_{\text{д}}, \text{Ом}$	–	410	294	108	66	46	36	29	25	22

У таблиці 3.4 наведені експериментальні дані налагоджувального арсенід галлієвого р-і-п діода 3A117A (другий зразок). Зміна опору діода при зміні прямого струму від 1 мА до $I_{\text{пр макс}} = 50$ мА робиться у межах від 500 Ом до 24 Ом.

Таблиця 3.4 – Експериментальні дані діода 3A117A

$U_{\text{пр}}, \text{В}$	0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$	0	0	1	5	10,2	16,5	24,7	32,1	39	50
$R_{\text{д}}, \text{Ом}$	–	–	500	120	68	48	36	31	28	24

У таблиці 3.5 наведені експериментальні дані налагоджуваного кремнієвого діода Д603. Зміна опору діода при зміні прямого струму від 1 мА до $I_{\text{пр макс}} = 25$ мА робиться у межах від 500 Ом до 60 Ом.

Таблиця 3.5 – Експериментальні дані діода Д603

$U_{\text{пр}}, \text{В}$	0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$	0	0,08	2,6	4,1	5,7	8	10	11,9	14	20
$R_{\text{д}}, \text{Ом}$	–	5000	190	145	122	100	90	84	78	60

Усі зазначені НВЧ діоди мають критичну частоту $f_{\text{кр}} = 20 - 100$ ГГц і по своїм частотним властивостям забезпечують гідну роботу діодів у діапазоні 1-12 ГГц. За даними таблиць 3.1-3.5 побудовані графіки ВАХ вищезазначених діодів які наведені на рисунках 3.13-3.15.

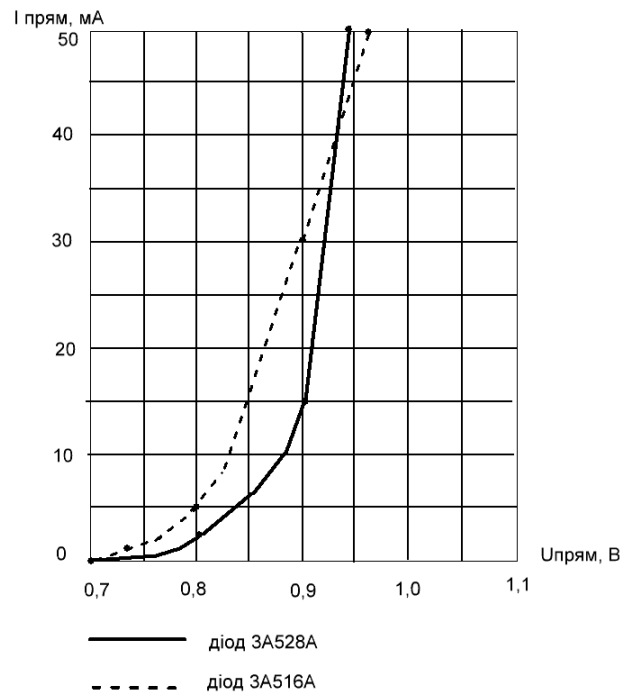


Рисунок 3.13 – Графіки ВАХ діодів 3A516A та 3A528A

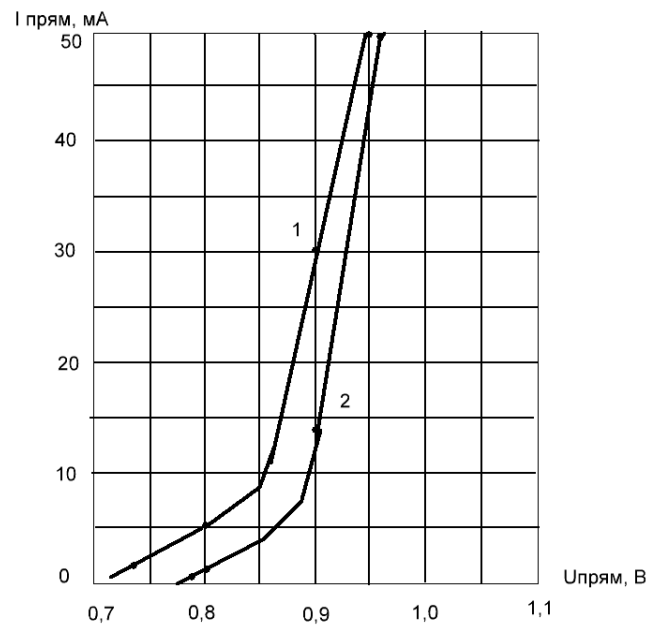


Рисунок 3.13 – Графіки ВАХ діодів 3A117A (зразки 1 та 2)

Графіки з рисунку 3.13 демонструють технологічний розкид параметрів діодів одного типу. Також наведені графіки дозволяють визначити опір діодів у режимі живлення по постійному струму. Статичний опір діода R_d визначається як частка ділення напруги на струм.

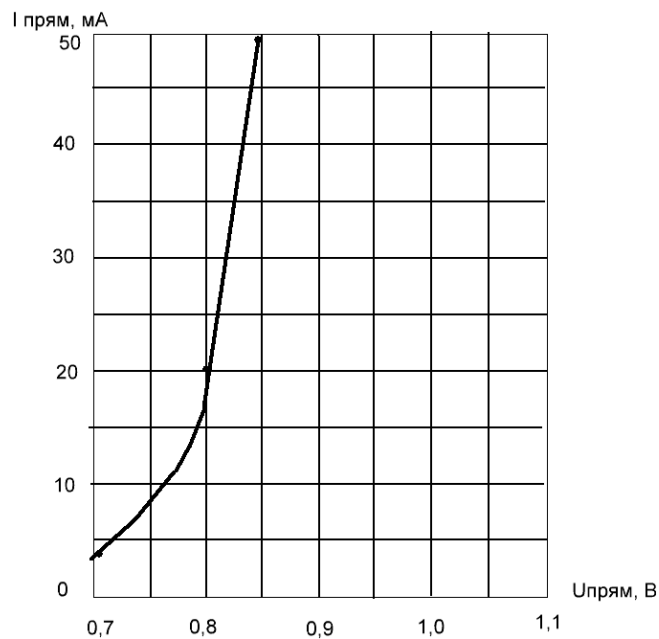


Рисунок 3.14 – Графік ВАХ налагоджуваного діода 2A602A

3.3 Машинне моделювання діодних атенюаторів

На рисунку 3.15 показана топологічна схема 2-х діодного атенюатора з МСЛ на ВЧ, побудована згідно вимог програми SAMIS2, які приведені у розділі 3.2 і згідно електричної схеми, приведений на рисунку 2.13.

Результати оптимізації: значення параметрів $R_k = 15 \text{ Ом}$, $l_k = 0,058 \cdot \lambda$, $\rho_k = 75 \text{ Ом}$, параметри діодів $R1 = 5 \text{ Ом}$, $R2 = 2 - 850 \text{ Ом}$, $C1 = 0,16 \text{ пФ}$, $C2 = 0,058 \text{ пФ}$, $L1 = 0,12 \text{ нГн}$.

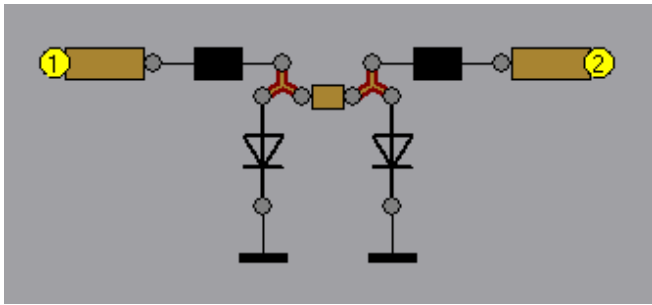


Рисунок 3.15 – Топологія 2-х діодного атенюатора по високій частоті

У таблиці 3.6 наведено розрахункові дані зовнішніх характеристик схеми рисунку 3.15.

Таблица 3.6 – Розрахункові дані зовнішніх характеристик схеми

$R_d, \text{ Ом}$	2	10	20	40	50	70	100	200	300	500
$\varphi_{21}, ^\circ$	142,1	138,5	141,2	144,2	144,8	145,3	145,4	144,7	144,2	143,6
$\alpha, \text{ дБ}$	-28,7	-19,5	-14,7	-10,4	-9,2	-7,7	-6,4	-4,7	-4	-3,4
КСХ	2,43	2,01	1,85	1,47	1,37	1,24	1,11	1,09	1,18	1,27

На рисунках 3.16-3.25 зображено графіки коефіцієнтів розсіювання атенюаторів.

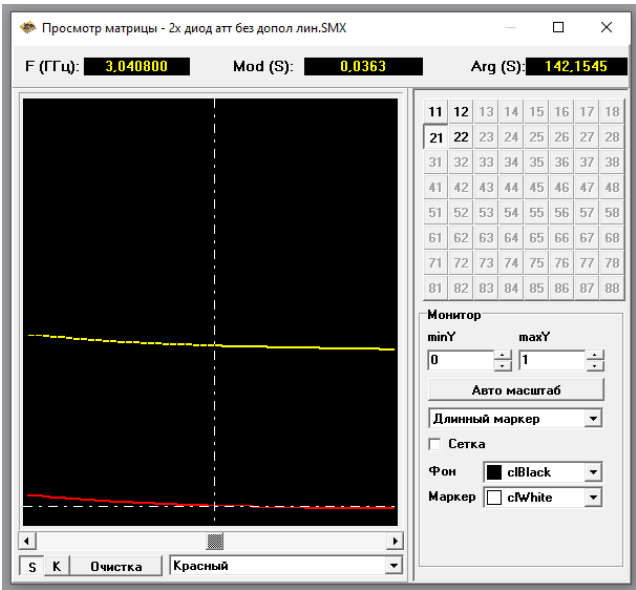


Рисунок 3.16 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 2 \text{ Ом}$

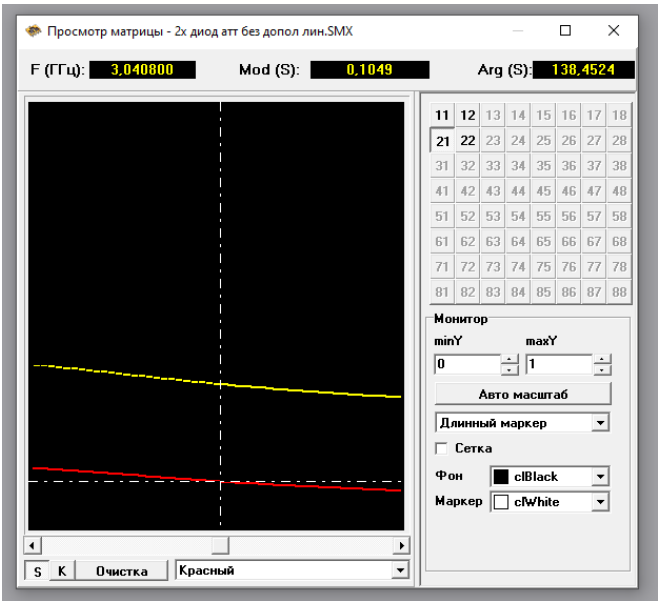


Рисунок 3.17 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 10 \text{ Ом}$

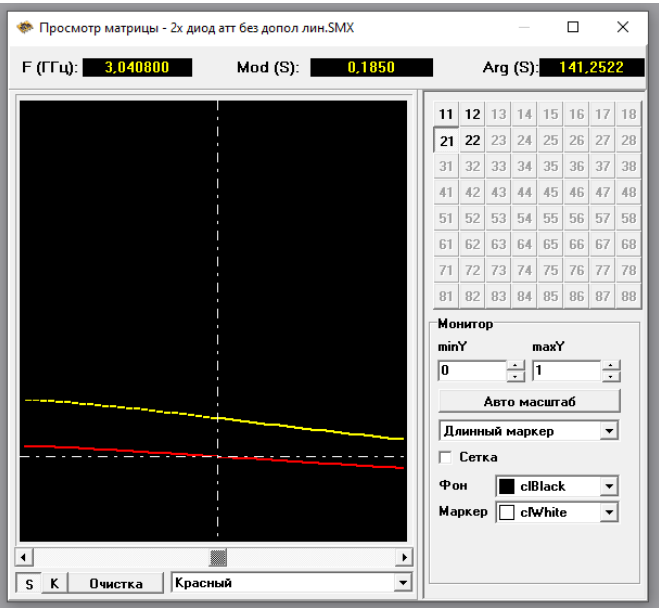


Рисунок 3.18 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 20 \text{ Ом}$

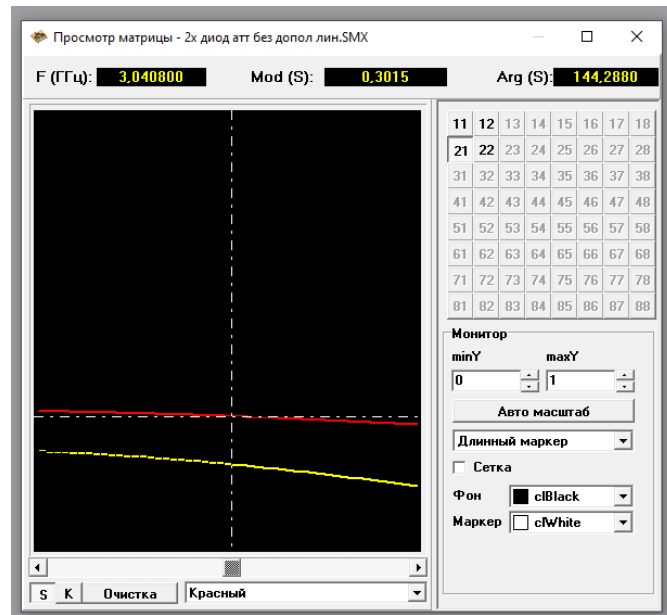


Рисунок 3.19 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 40 \text{ Ом}$

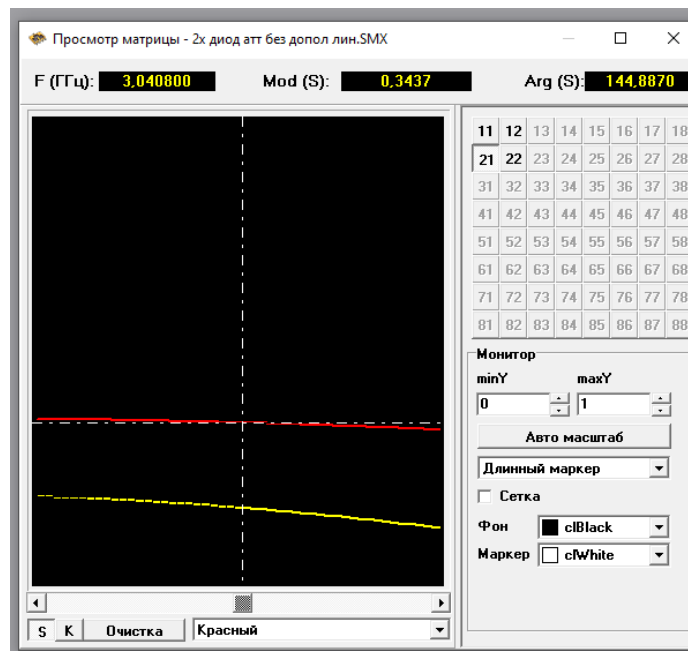


Рисунок 3.20 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 50 \text{ Ом}$

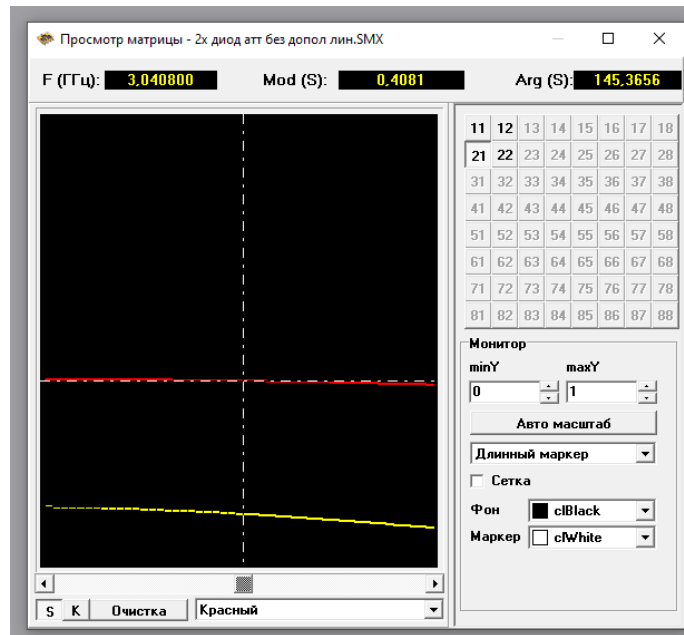


Рисунок 3.21 – График коэффициентов рассеивания аттенюатора $R_d = 70 \text{ Ом}$

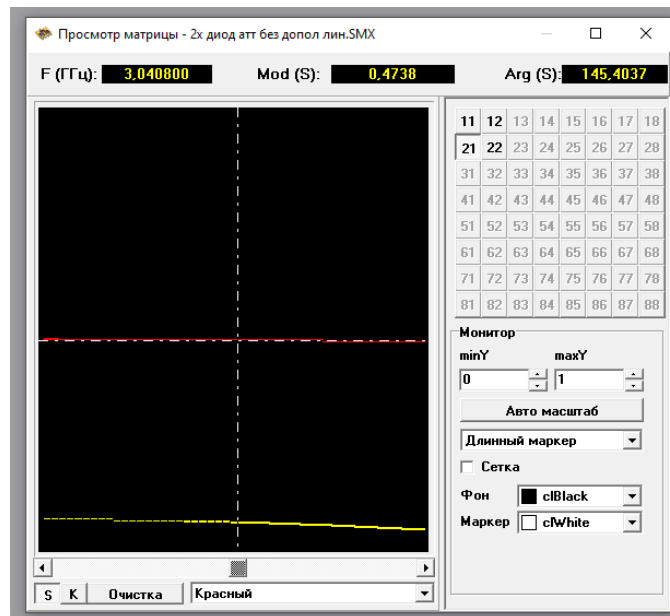


Рисунок 3.22 – График коэффициентов рассеивания аттенюатора $R_d = 100 \text{ Ом}$

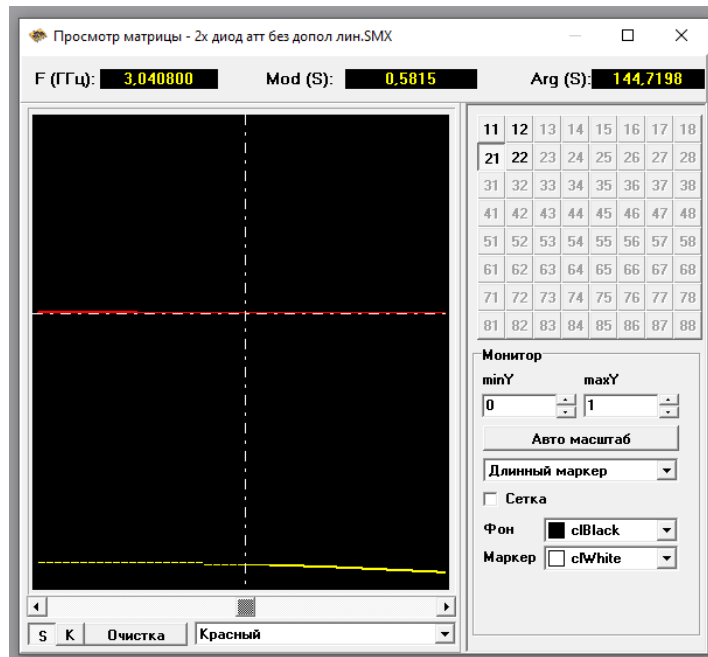


Рисунок 3.23 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 200 \text{ Ом}$

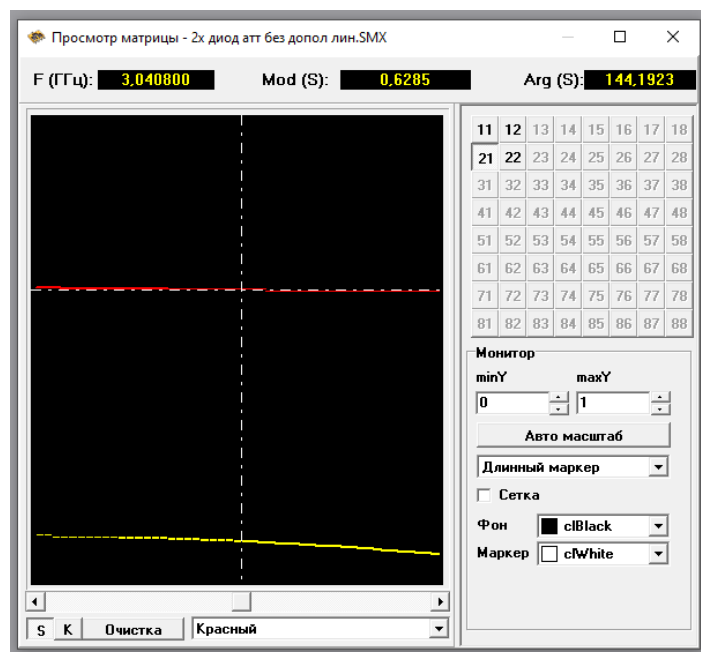


Рисунок 3.24 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 300 \text{ Ом}$

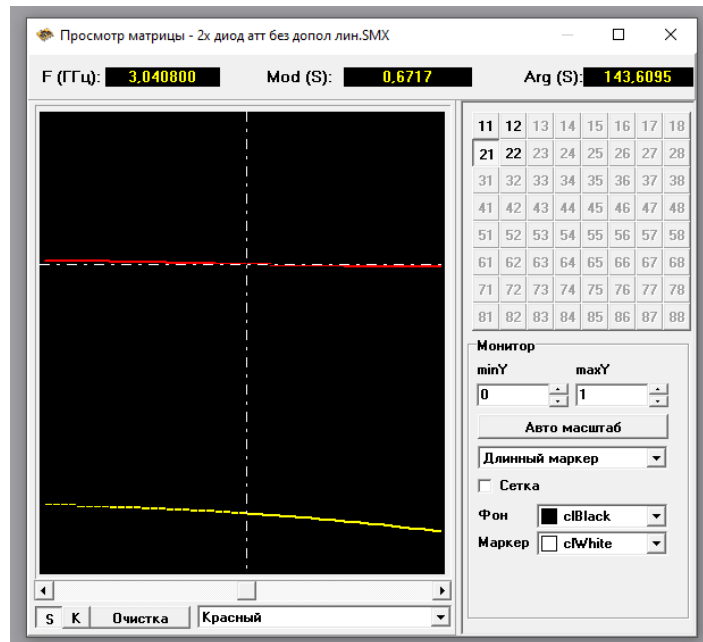


Рисунок 3.25 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 500 \text{ Ом}$

На рисунку 3.26 показана топологічна схема 2-х діодного атенюатора з додатковими дроселями для подачі напруги управління

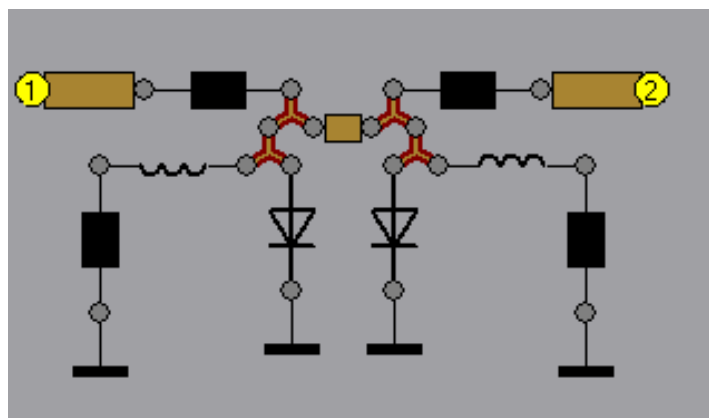


Рисунок 3.26 – Топологічна схема 2-х діодного атенюатора з додатковими дроселями для подачі напруги управління

У таблиці 3.7 наведено роозрахункові дані зовнішніх характеристик схеми рисунку 3.26.

Таблиця 3.7 – Розрахункові дані зовнішніх характеристик схеми

R_d , Ом	2	10	20	40	50	70	100	200	300	500
φ_{21} , °	142,1	138,5	141,2	144,2	144,8	145,3	145,4	144,7	144,2	143,6
α , дБ	-28,7	-19,5	-14,7	-10,4	-9,2	-7,7	-64	-4,7	-4	-3,4
КСХ	2,43	2,01	1,85	1,47	1,37	1,24	1,11	1,09	1,18	1,27

На рисунках 3.27-3.29 зображено графіки коефіцієнтів розсіювання атенюаторів.

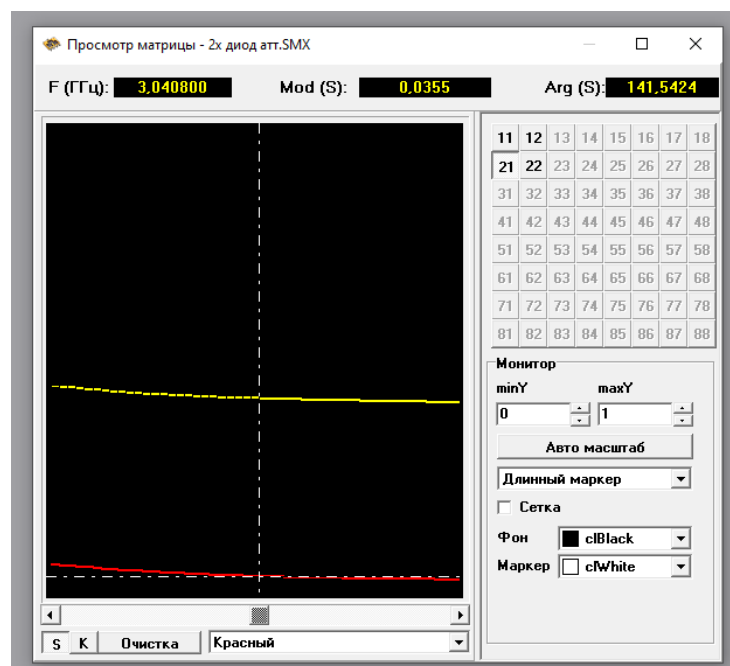


Рисунок 3.27 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 2$ Ом

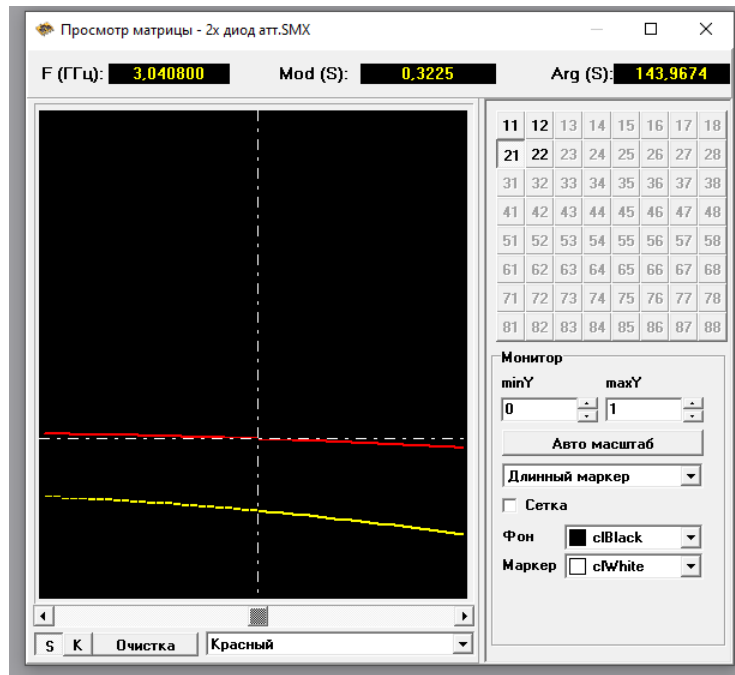


Рисунок 3.28 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 45 \text{ Ом}$

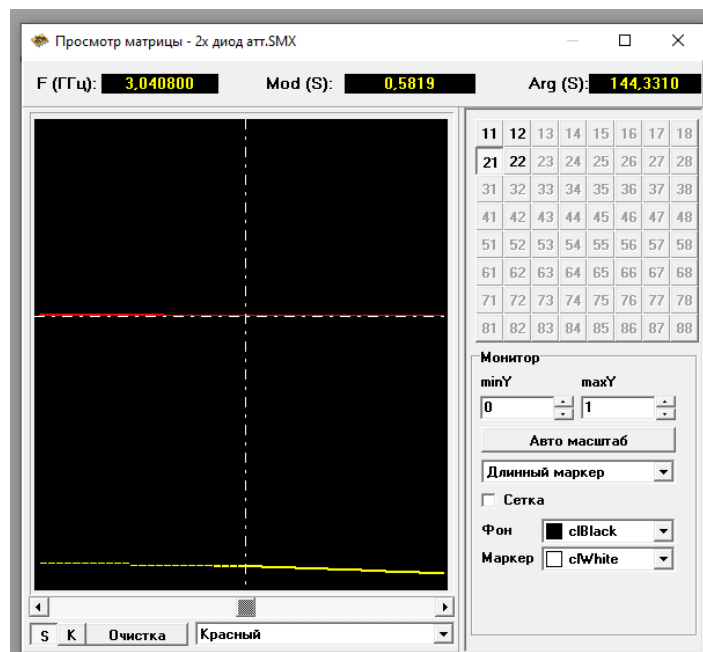


Рисунок 3.29 – Графік коефіцієнтів розсіювання атенюатора $R_d = 200 \text{ Ом}$

ВИСНОВКИ

В результаті роботи виконано дослідження 2-х діодного атенюатора на мікросмуговій лінії з метою досягнення мінімального значення зміни фази вихідного сигналу відносно вхідного з застосуванням машинних методів оптимізації параметрів та режимів роботи для застосованих діодів.

Машинне моделювання проведене за допомогою програмного комплексу SAMIS2, розробленого співробітниками кафедри радіотехніки та телекомунікацій.

В процесі роботи над магістерською роботою були вирішені наступні задачі:

- було розглянуто типові рішення діодних НВЧ атенюаторів і схеми подання живлячої напруги для діодів;
- було розглянуто характеристики і параметри НВЧ діодів: 3A516A, 3A117A, KA603E при роботі на різних ділянках ВАХ;
- знімались ВАХ у реальних промислових зразках діодів 3A516A, 3A117A, KA603E, побудовані графіки ВАХ, що показують технологічний розкид параметрів діода 3A117A;
- визначено значення параметрів елементів загальної еквівалентної схеми НВЧ діодів, таких, як R_d статичний опір перемикаючих р-і-п діодів;
- визначено кордони застосування значень елементів з урахуванням їхньої фізичної реалізації;
- проведено розрахунки 2-х діодної схеми атенюатор у діапазоні частот 1 ГГц-5 ГГц, з центральною частотою 3,04 ГГц.

У всіх розрахунках коефіцієнт стоячої хвилі не перевищував значення 2,5.

Продовженням даної роботи слід вважати дослідження НВЧ атенюатора, у якому замість перемикаючих діодів застосовуються НВЧ польові транзистори з затвором Шоттки або MOSFET а також застосувати для формування сигналів управління діодами ЦАП з достатньою розрядною.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование [Текст] / В. Фуско. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
2. Абубакиров Б.А. Измерение параметров СВЧ устройств [Текст] / Б.А. Абубакиров, К.Г. Гудков, Э.В. Нечаев. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
3. Гупта К. Машинное проектирование СВЧ устройств [Текст] / К. Гупта, Р. Гардис, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.
4. Staudinger J. MMIC test improved with standards on chip [Text] / J. Staudinger // Microwares Feb. 1987. – 107-114 p.p.
5. Вендик И.Б. Эквивалентные СВЧ параметры диодов с $p^+-n-n-(p-n-p^+)$ структурой при обратном смещении [Текст] / И.Б. Вендик, С.Ш. Геворкян, Г.С. Хижа // Электронная техника. Сер.1 Электроника СВЧ – 1980.– Вып. 10. – С. 24-27.
6. Вендик И.Б. Исследование эквивалентных параметров ионнолегированного $p-i-n$ диода при нулевом смещении [Текст] / И.Б. Вендик, Б.А. Реш // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т 18, № 8 – С. 1638-1693.
7. Шелудько Н.А. Паразитная модуляция СВЧ сигнала устройствами на $p-i-n$ диодах [Текст] / Н.А. Шелудько, Л.М. Якубень // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. – 1977. – Вып. 6. – С. 82-86.
8. Ananasso F. Get phase shift step attenuator design [Text] / F. Ananasso // Microwaves. – 1979. – № 2. – 66 p.
9. Ananasso F. Low phase shift step attenuator using $p-i-n$ diodes switch [Text] / F. Ananasso // IEEE Tran. – 1980. – Vol. MMT. – 28. – № 7. – P. 774-776.
10. Бова Н.Т. Управляющие устройства СВЧ [Текст] / Н.Т. Бова, П.А. Стукало, В.А. Храмов. – К.: Тэхніка, 1973. – 104 с.
12. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах [Текст] / А.В. Вайсблат. – М.: Радио и связь,

1987. – 120 с.

13. Дзехцер Г.Б. р-і-п диоды в широкополосных устройствах СВЧ [Текст] / Г.Б. Дзехцер, О.С. Орлов. – М.: Сов. Радио, 1970.– 200 с.

14. Захарія Й.А. Основи надвисокочастотних радіовимірювань [Текст] / Й.А. Захарія. – К.: «Вища школа», 1972.– 344 с.

15. Григорьев О.П. Диоды: Справочник [Текст] / О.П. Григорьев и др. – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.

16. Бова Н.Т. Микроэлектронные устройства СВЧ [Текст] / Н.Т. Бова, Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин, Б.Д. Солганик. – К.: Техника, 1984.– 184 с.

17. Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ: учебн. пособие [Текст] / Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алехин. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.

18. Ефремов Ю.Г. Проектирование интегральных устройств СВЧ: Справочник [Текст] / Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин и др. – К.: Техника, 1990.– 159 с.

19. Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств [Текст] / С.И. Бахарев и др.; под ред. В.И. Вольмана.– М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.

20. Изьюрова Г.И. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Учебное пособие для вузов [Текст] / Г.И. Изьюрова, Г.В. Королев и др. – М.: Высшая школа, 1987. – 335 с.

21. Ровдо А.А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами [Текст] / А.А. Ровдо. – М.: Лайт Лтд, 2000. – 288 с.

22. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника [Текст] / Э. Ред. – М.: Мир, 1990. – 256 с.

23. Маев К.А. К определению реактивных параметров корпусов полупроводниковых диодов СВЧ [Текст] / К.А. Маев, А.Т. Фиалковский // Электронная техника. Сер.1 Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 1. – С. 20-22.