НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

кафедра РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

“На правах рукопису”
УДК 621.396_____

“До захисту допущено”
Завідувач кафедри РТС
_____ **Сергій ЖУК**

“___”_____202__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”
зі спеціальності *172 “Телекомунікації та радіотехніка”*

на тему: Модифікований подільник потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль

Виконав (-ла): студент (-ка) **2** курсу, групи _РС-з21 мп__

ГАВРИШ Карина Олександрівна _____
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник: *доцент каф. радіотехнічних систем*
ст.викл., Турєєва Ольга Василівна _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Рецензент: *доцент каф.радіоінженерії, доцент, к.т.н.*
Василенко Дмитро Олексійович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2024

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри РТС
_____ **Сергій ЖУК**

«13» листопада 2023 року

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці

ГАВРИШ Карині Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема дисертації** Модифікований подільник потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль

науковий керівник дисертації
Турєєва Ольга Василівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «09» листопада 2023 р. №5206-с

2. **Термін подання студентом дисертації** 05 січня 2023 року

3. Об'єкт дослідження: подільник потужності Вілкінсона, міліметрового діапазону довжин хвиль.

4. Вихідні дані:

Класичний подільник потужності Вілкінсона, який широко використовується в гібридно-інтегральних пристроях, має обмежений діапазон частот застосування. Це пов'язано з тим, що в мікросмужкових лініях (МСЛ) в точках підключення баластного резистора виникають крайові ефекти. Ці ефекти обмежують робочий діапазон подільника до короткохвильової частини сантиметрового діапазону.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1 Провести огляд та аналіз існуючих подільників та подільників Вілкінсона.
5.2 Виконати аналіз моделей класичного і модифікованого подільника Вілкінсона.
5.3 Розробити топологію модифікованого подільника потужності Вілкінсона і виконати моделювання пакеті програм CST Microwave Studio.
5.4 Виконати інженерно-конструкторську розробка модифікованого подільника Вілкінсона.

5.5 Провести експериментальні дослідження розробленого зразка модифікованого подільника Вілкінсона

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди для презентації результатів роботи над магістерською дисертацією, топологія розробленого пристрою, графіки частотних характеристик, креслення розробленого модифікованого подільника Вілкінсона

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 тези доповіді на науково-практичній конференції.

8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

9. Дата видачі завдання: 14 листопада 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розділ 1.Огляд літературних джерел по темі кваліфікаційної роботи	14 листопада по 18 листопада 2023р.	
2	Розділ 2. Теоретичні основи розробки	18 листопада 2023р. по 1 грудня 2023 р.	
3	Розділ 3. Моделювання подільника. Розрахунки характеристик.	1 грудня 2023 р. по 7 грудня 2023 р.	
4	Розділ 4.Інженерно-конструкторська розробка. Результати експериментальних досліджень	7 грудня 2023 р. по 14 грудня 2023 р.	
5	Розділ 5. Розробка стартап-проєкту	14 грудня 2023 р. по 25 грудня 2023р.	
6	Оформлення кваліфікаційної роботи у відповідності до вимог та методичних рекомендацій	25 грудня 2023 р. по 05 січня 2024 р.	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівнику на підготовку відгука	05 січня 2024 р.	
8	Підготовка матеріалів та результатів роботи до попереднього захисту	06 по 07 січня 2023 р.	
9	Попередній захист результатів дисертаційних досліджень	08 січня 2024р.	
10	Подання кваліфікаційної роботи на рецензію	09 січня 2024 р.	
11	Подання кваліфікаційної роботи для перевірки на дотримання академічної доброчесності	10 січня 2024 р.	

Студент _____ Карина ГАВРИШ
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник _____ Ольга ТУРЄЄВА
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Подільник потужності Вілкінсона використовується в багатьох пристроях, в радіолокаційних системах, системах зв'язку, тощо. Він є важливим елементом НВЧ систем.

Метою роботи є розробка модифікованого подільника потужності Вілкінсона, який би не мав обмежень традиційного подільника в НВ.

Завдання роботи:

1.Дослідити методи розробки подільників Вілкінсона.

2.Виконати аналіз моделей класичного і модифікованого подільника Вілкінсона.

3.Розробити топологію модифікованого подільника потужності Вілкінсона і виконати моделювання пакеті програм CST Microwave Studio.

4.Виконати інженерно-конструкторську розробка модифікованого подільника Вілкінсона.

5.Провести експериментальні дослідження розробленого зразка модифікованого подільника Вілкінсона

Об'єкт дослідження – поділ потужності в НВЧ системі.

Предмет дослідження – модифікований подільник потужності Вілкінсона при роботі в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Методи дослідження:

1. Огляд літературних джерел
2. Дослідження подільника потужності Вілкінсона в міліметровому діапазоні довжин хвиль.
3. Розробка топологічної моделі в програмі CST Studio.
4. Інженерно – конструкторська розробка МПВ в програмі Solid Work.

Апробація результатів роботи. Результати роботи були представлені у V всеукраїнській науково – технічній конференції студентів та аспірантів «Радіоелектроніка в XXI столітті»

Ключові слова: *подільник потужності Вілкінсона, НВЧ системи, мікросмужкова лінія (МСЛ), хвилеводно – щілинна лінія (ХЩЛ).*

ABSTRACT

Actuality of theme. The Wilkinson power divider is used in many devices, in radar systems, communication systems, etc. It is an element of the microwave system.

The method of operation is the development of a modified Wilkinson power divider, which does not have the limitations of a traditional divider in HB.

Job tasks:

1. Investigate methods of developing Wilkinson dividers.
2. Analyze models of the classic and modified Wilkinson divider.
3. Develop the topology of the modified Wilkinson power divider and perform simulations of the CST Microwave Studio program packages.
4. Perform engineering and design development of a modified Wilkinson divider.
5. To conduct experimental studies of a sample of a sample of a modified Wilkinson divider

The object of the research is power division in the microwave system.

The subject of research is a modified Wilkinson power divider when operating in the millimeter wavelength segment.

Research methods:

1. Review of literary sources
2. Study of the Wilkinson power divider in the millimeter wavelength range.
3. Development of a topological model in the CST Studio program.
4. Engineering and design development of MPV in the Solid Work program.

Approbation of work results. The results of the work were presented at the 5th All-Ukrainian scientific and technical conference of students and postgraduates "Radioelectronics of the 21st century"

Key words: *Wilkinson power divider, microwave systems, microstrip line (MSL), waveguide-slit line (SCL).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРЧЕНЬ 9

ВСТУП 8

Актуальність 10

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 11

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ 20

2.1 Модель КПВ в термінах теорії кіл 20

2.2 Модифікований подільник Вілкінсона (МПВ). Теоретичний аналіз МПВ. 31

3 РОЗРАХУНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДІЛЬНИКІВ В ПАКЕТІ ПРОГАМ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ 34

3.1 Дослідження КПВ в пакеті програм електродинамічного аналізу «CST Microwave Studio» 34

3.2 Дослідження МПВ в пакеті програм електродинамічного аналізу «CST Microwave Studio» 38

4 ІНЖЕНЕРНО – КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА МПВ.РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ 41

4.1 Розробка конструкції МПВ 41

4.2 Результати експериментальних досліджень 44

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ 47

a. Опис ідеї проєкту 47

b. Технологічний аудит стартапу 49

c. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту 49

d. Розроблення ринкової стратегії проекту 61

6 ВИСНОВКИ 64

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 65

Додаток А 66

Додаток Б 69

ПЕРЕЛІК СКОРЧЕНЬ

КПВ – класичний подільник Вілкінсона

МПВ – модифікований подільник Вілкінсона

НВЧ – надвисокі частоти

МСЛ – мікросмужкова лінія

ГІС – гібридна інтегральна система

МІС – монолітна інтегральна система

ЕС – електродинамічні системи

ХЩЛ – хвилеводно – щілинна лінія

ХКЛ – хвилеводно – копланарна лінія

АЧХ – амплітудно – частотна характеристика

ВСТУП

Подільник потужності – це пристрій, який розділяє один сигнал на два або більше сигналів. Також він може використовуватись для зменшення потужності сигналу, щоб запобігти пошкодженню обладнання або перешкоджанню інших сигналів. Подільник потужності може використовується в різних областях, таких як радіотехніка, електроніка, телебачення, зв'язок.

Дільники потужності потрібні з різних причин, зокрема:

– Для розподілу живлення або сигналів на кілька пристроїв. Це дозволяє живити або передавати сигнали декільком пристроям з одного джерела без необхідності встановлювати окремі джерела живлення або сигнали для кожного пристрою.

– Щоб ізолювати пристрої один від одного. Це важливо в електронних системах, де запобігання перешкодам із одного пристрою на інший є критично важливим для правильної роботи системи.

– Для узгодження опорів між пристроями. Використовується для забезпечення ефективного переходу сигналу від одного пристрою до іншого.

Названий на честь свого винахідника Ернеста Вілкінсона, подільник потужності Вілкінсона здатен розділити один вхідний сигнал на два вихідних сигнали рівної фази та амплітуди. Він працює за принципом розподілених схем, де розподіл потужності досягається за допомогою пасивних компонентів, таких як резистори та лінії передачі, що усуває потребу в активних схемах. Це не тільки спрощує конструкцію, але й підвищує надійність і ефективність, що зумовлює широке застосування у високочастотних пристроях.

Дана робота присвячена удосконаленню класичного подільника Вілкінсона, який має ряд недоліків, що обмежують область його використання сантиметровим діапазоном довжин хвиль.

Робота містить шість розділів.

В першому розділі зроблений огляд літературних джерел з теми роботи.

Другий розділ містить теоретичний аналіз моделей класичного і модифікованого подільника Вілкінсона в термінах теорії кіл.

Дослідження класичного і модифікованого подільників Вілкінсона в пакеті програм електродинамічного аналізу “CST Microwave Studio” виконані в третьому розділі роботи.

Четвертий розділ присвячений інженерно-конструкторській розробці модифікованого подільника Вілкінсона. Тут же викладені результати експериментального дослідження виготовленого зразка.

П’ятий розділ присвячений розробці стартап-проєкту.

В шостому розділі сформульовані основні висновки.

АКТУАЛЬНІСТЬ

Класичний подільник потужності Вілкінсона, який широко використовується в гібридно-інтегральних пристроях, має обмежений діапазон частот застосування. Це пов'язано з тим, що в мікросмужкових лініях (МСЛ) в точках підключення баластного резистора виникають крайові ефекти. Ці ефекти обмежують робочий діапазон подільника до короткохвильової частини сантиметрового діапазону. В роботі пропонується змінити вихідну топологію подільника Вілкінсона так, щоб виключити вплив паразитних параметрів резистора. Також розширити діапазон використання класичного подільника потужності Вілкінсона в область міліметрових довжин хвиль зберігаючи високу якість сигналу між виходами.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Швидке засвоєння міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль новітніми засобами телекомунікації, радіолокації, спостереження, медицини, керування виробничими процесами, тощо призвело до значних зсувів у методиці розробки, інженерно-конструкторських основ і технології виготовлення НВЧ вузлів і систем. Необхідність їх масового виробництва, при якому б гарантувалася повторюваність електричних характеристик і відтворюваність їх параметрів без будь-яких операцій стосовно налагоджування зразків, значно підвищили вимоги щодо точності моделювання, теоретичних розрахунків, адекватності конструювання, а також точності у виготовленні. Зазначені вимоги призвели до того, що майже всі вузли систем міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль сьогодні виготовляються методами інтегральної технології, яка, в свою чергу, зазнала значних змін порівняно з першими спробами її застосування при розробці і виготовленні НВЧ вузлів у середині минулого століття, коли деякі з них були виготовлені на основі мікросмужкової лінії (МСЛ) для використання на частотах до приблизно 3 ГГц [1], [2]. З того часу було запропоновано значну кількість електродинамічних систем (ЕС), як основи для побудови гібридних (ГІС) і монолітних (МІС) інтегральних схем НВЧ діапазону, характеристики яких значно кращі ніж у МСЛ - менші втрати, кращі технологічні властивості, включно з можливістю інтегрування з напівпровідниковими елементами. Топологія декількох з них зображена на рис.1.1

а) б) в) г)

Рисунок 1.1 - Приклад топології ЕС для інтегральних схем

На рис.1.1а зображено переріз хвилеводно-щілинної лінії (ХЩЛ), для якої характерні значна концентрація поля хвилі між гребенями в щілині і малі втрати до частот приблизно 200-300 ГГц порівняно з втратами у МСЛ.

На рис.1.1б,в зображено хвилеводно-копланарну лінію (ХКЛ), для якої, як і для ХЩЛ, характерні концентрація поля хвилі в щілині, малі втрати порівняно з втратами у МСЛ до частот приблизно 200-300 ГГц, а також наявність двох основних робочих типів хвиль - парного (рис.1.1б) з однаковою спрямованістю полів в щілинах і непарного (рис.1.1в) з протилежною спрямованістю полів. Зазначена властивість з успіхом використовується при розробці мостових схем в НВЧ діапазоні. Копланарна мікросмужкова лінія (рис.1.1г), що є різновидом мікросмужкової лінії зі зваженою смужкою (вона не зображена), має малі втрати на частотах міліметрового діапазону довжин хвиль порівняно з рівнем втрат у МСЛ і завдяки своїй топологічній особливості зручна для побудови ГІС фільтрів і балансних схем.

Особливості характеристик МСЛ зумовили превалювання її як основи для побудови ГІС і МІС НВЧ діапазону. До них відносяться низька дисперсія квазі-Т хвилі основного типу МСЛ в широкому діапазоні частот, легкість реалізації хвильового опору в значних межах (від одиниць до приблизно 150Ом), а також значна концентрація енергії електромагнітної хвилі під смужкою, що зумовлює слабкий зв'язок з сусідніми елементами топології і незначне випромінення. Разом з тим МСЛ має суттєві недоліки, найважливішими з яких є значні втрати, пов’язані з втратами в матеріалі діелектрика підкладинки МСЛ і втратами у металізації, а також значні реактивності, пов’язані зі зміною конфігурації сигнального провідника, зокрема при його розриві. Останнє виникає, зокрема, при підключенні напівпровідникових приладів, а також в пасивних елементах, коли функціональне призначення передбачає відповідну зміну топології сигнального провідника.

Перший недолік останнім часом поступово долається шляхом застосування досягнень у фізиці і технології виробництва діелектриків, тангенс кута втрат яких на сьогодні вже досягає величини порядку 10^{-4}, також поліпшення чистоти меді,

яка використовується для металізації поверхонь діелектричної підкладинки [3]. Викорінення зазначеного недоліку забезпечує просування МСЛ, як основи для побудови ГІС і МІС у міліметровий діапазон довжин хвиль. Що стосується другого недоліку, який зумовлений чисто електродинамічними властивостями МСЛ, то він невикорінний і вимагає розгляду його впливу окремо при кожній реалізації вузлів із застосуванням МСЛ.

Зазначені переваги МСЛ поряд з підвищенням якості МСЛ, як лінії передачі, зумовлюють використання її на частотах вище 18-20 ГГц, що досі було небажаним. Прикладом може бути використання цієї лінії як основи для побудови ГІС і МІС транзисторних підсилювачів, в яких висока ізоляція вхідного і вихідного кіл є критично важливою: при невиконанні цієї умови майже гарантовано підсилювач втрачає стійкість. Це призводить до того, що практично всі конструкції транзисторних підсилювачів, навіть у міліметровому діапазоні довжин хвиль, є мікросмужковими, а, отже, мікросмужковими є і всі допоміжні елементи зазначених підсилювачів - фільтри живлення, узгоджуючі кола, кола корекції АЧХ, кола розв’язки по постійному струму, кола контролю вихідної потужності, тощо. Вплив характеристик МСЛ, як хвилеведучої основи побудови ГІС і МІС, значно зростає в підсилювачах потужності високого і надвисокого рівня, які будуються по схемі складання потужностей. Схемою суматора в даному разі слугує деревовидна структура, схематично показана на рис. 1.2

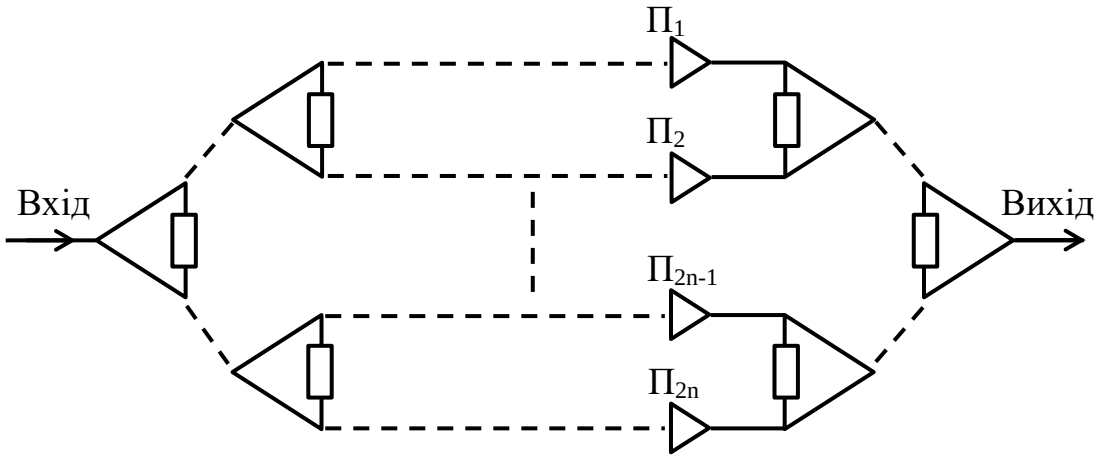


Рисунок 1.2 - Деревовидна схема суматора

Як видно з рисунка, вхідна потужність в n - каскадах ділення послідовно ділиться на 2^n каналів, в кожному з яких встановлено малопотужний підсилювач з граничною вихідною потужністю P_1. Застосовуючи схему сумування, ідентичну схемі ділення, на виході ідеального підсилювача з сумуванням потужності можемо отримати значну потужність, що дорівнює $2^n \cdot P_1$ [4]. Критичним елементом зазначеної конструкції є елементарний подільник, зображений на рис.1.3, який складається з вхідної лінії передачі 1, двох відрізків ідентичних ліній 2 і активного опору 3. На рисунку позначено: А - вхідний порт подільника, В і С - його вихідні порти.

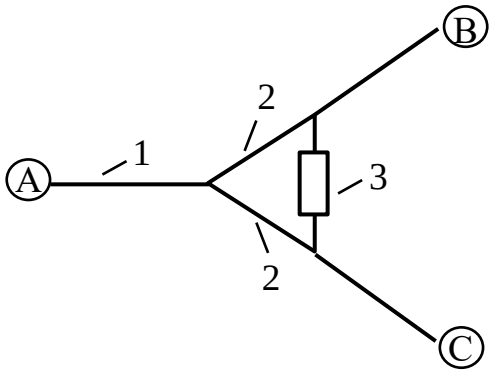


Рисунок 1.3 - Елементарний подільник

З елементарних міркувань ясно, що основними вимогами до подільника є узгодження зі сторонами кожного з портів за умови узгоджених навантаженнях в двох інших, а також значна розв’язка між портами В і С , що може забезпечити незалежну роботу підсилювачів, підключених до цих портів, а значить мінімізувати можливість втрати стійкості системи в цілому. Оскільки подільник включає значну кількість схем, зображених на рис.1.3, бажано також, щоб хвильові опори ліній у всіх портах були б однаковими. З розгляду схеми, зображеної на рис.1.3, також ясно, що активний баластний резистор R (позиція 3) не буде впливати на передачу з порту А до портів В і С, однак зможе впливати на

передачу між портами B і C, оскільки в цьому випадку може забезпечити втрати потужності між ними.

Подільник потужності, виконаний згідно зазначеної схеми у мікросмужковому виконанні носить назву класичного подільника Вілкінсона [5], далі скорочено КПВ, рисунок 1.4

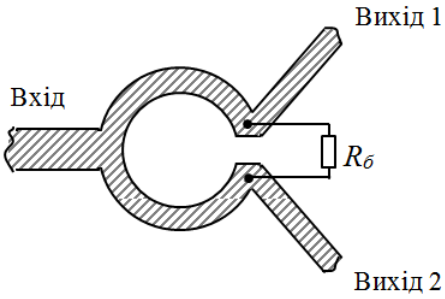


Рисунок 1.4 - Класичний подільник Вілкінсона (КПВ)

Розглянемо роботу КПВ якісно. Припустимо, що потужність подається на вхід. Тоді, очевидно, завдяки горизонтальній симетрії схеми впливом резистора можна знехтувати, а схема буде узгоджена зі сторони вхідного порту за умови, що відрізок ліній між входом і резистором становитиме чверть довжини хвилі і буде виконувати роль трансформатора опору, включеного між вихідними лініями з опором Z_0 і входом з двома опорами $2Z_0$, включеними паралельно. В цьому випадку хвильовий опір внутрішніх ліній подільника дорівнює

$$Z_{0T} = \sqrt{Z_0 \cdot 2Z_0} = \sqrt{2}Z_0$$

Розглянемо тепер збудження схеми зі сторони виходу 1 за умови узгоджених навантажень на виході 2 і на вході. Розгляд цієї ситуації зручно виконати у два етапи. А саме, припустимо, що потужність хвилі в порту 1 є наслідком дії двох хвиль з однаковою поляризацією, тоді як відсутність потужності на виході 2 є наслідком дії двох хвиль з протилежною поляризацією. Хвилі з протилежною поляризацією, що надходять до входу схеми, утворюють режим короткого замикання на вході, а оскільки довжина внутрішніх відрізків КПВ становить чверть довжини хвилі, в точках підключення резистора вхідний

опір зі сторони вхідного порту дорівнюватиме нескінченності. Одночасно при такому режимі збудження вихідні порти будуть узгоджені, очевидно, якщо $Z_0 = R/2$, або $R = 2Z_0$.

Хвилі з однаковою поляризацією обминають резистор R, який в цьому випадку не впливає на роботу схеми і розповсюджуються до вхідного порту, який завдяки дії розглянутого чвертьхвильового трансформатора виявляється узгодженим.

Підсумовуючи сказане, можемо стверджувати, що при подачі потужності у вихідний порт 1, вихідний порт 2 виявляється повністю розв'язаним за умови $R = 2Z_0$. При цьому у вхідний порт поступає половина потужності. Цього і варто було очікувати, оскільки вхідний порт є узгодженим, подільник потужності забезпечує втрати при передачі в кожний з вихідних портів, рівні 3 дБ, а весь КПВ є взаємним пристроєм, для якого передача не залежить від напрямку розповсюдження енергії.

Підкреслимо, що ідеальна розв'язка між портами КПВ можлива при виконанні умови $R = 2Z_0$. Крім того, вище зазначалося, що одним з недоліків МСЛ є значні реактивності, які виникають в разі розриву сигнального провідника лінії. Як видно з рис.1.4, саме цей ефект має проявлятися в місці підключення резистора, що порушує роботу КПВ на високих частотах міліметрового діапазону довжин хвиль, де зазначеними реактивностями знехтувати не можна. Ще одна причина порушення властивостей КПВ на цих частотах полягає в реактивних складових опору реальних резисторів, які навіть для малогабаритних SMD - резисторів мають суттєві значення.

Зазначені причини зумовили пошук нових конструкцій подільників потужності, позбавлених недоліків КПВ. Одна з них показана на рис.1.5; тут же наведена частотна залежність розв'язки вихідних портів (рис.1.6) [6]. Пристрій (на рис.1.5, зображена тільки підкладинка) містить вхідну регулярну ХЩЛ 1, відрізок ХКЛ 3, який збуджується з боку вхідної ХЩЛ за допомогою переходу 2, ідентичні ХЩЛ 4, 5 вихідних плечей подільника та відрізок МСЛ 6, що з'єднаний

з центральним провідником ХКЛ за допомогою металізованого отвору 7 і закінчується узгодженим навантаженням у вигляді клину з поглинаючого матеріалу 8.

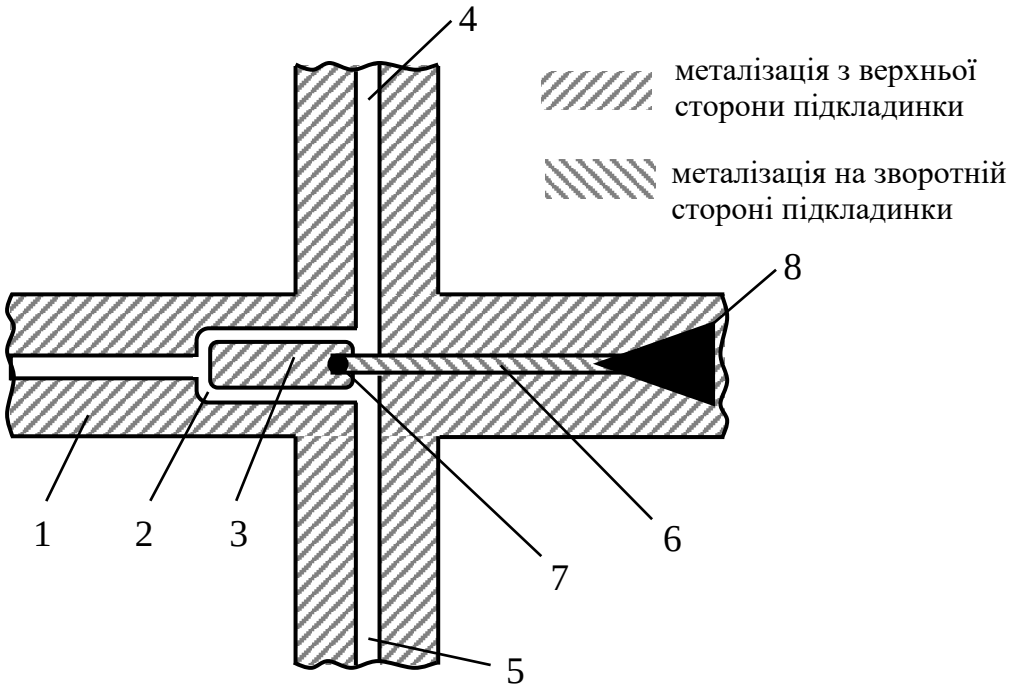


Рисунок 1.5– Конструкція подільника на основі ХЩЛ

З рис.1.5 видно, що електродинамічною основою подільника потужності в цьому разі є ХЩЛ разом з ХКЛ, з виходу секції якої потужність надходить у два вихідні порти, виконані на основі ХЩЛ. Узгоджена на кінці мікросмужкова лінія (порт 4) збуджується непарною хвилею у ХКЛ, яка, в свою чергу, збуджується тільки в разі збудження зі сторони одного з вихідних портів. Таким чином досягається значна розв’язка вихідних портів подільника, що і демонструють результати експериментального дослідження. Зазначимо, що в конструкції принципово відсутній баластний зосереджений резистор, а особливості ХЩЛ і ХКЛ і, відповідно, технології їх з’єднання значно зменшують реактивності, пов’язані зі стиком цих ліній.

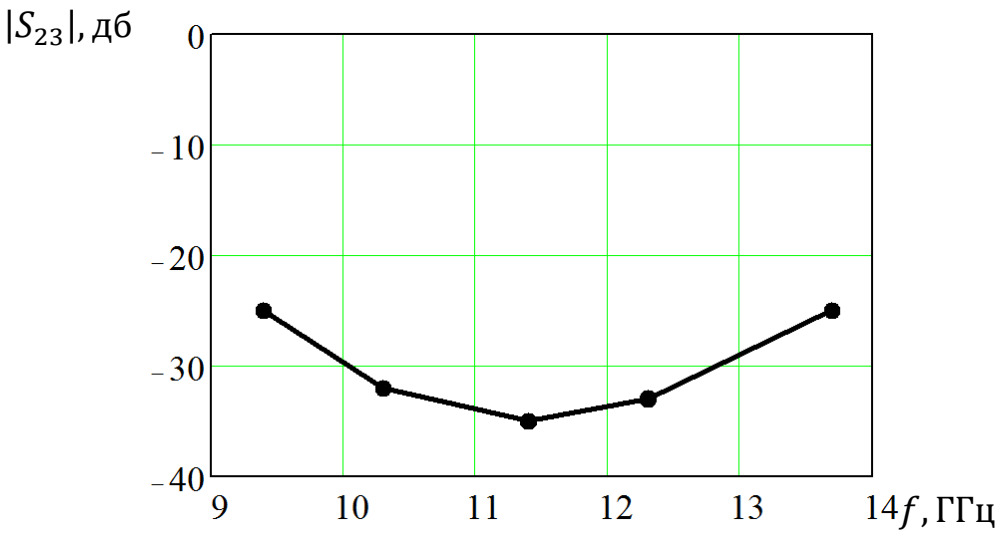


Рисунок 1.6– Частотна залежність розв’язки

Недоліком розглянутої конструкції слід вважати використання ліній, які, хоча і набагато добротніші на частотах міліметрового діапазону довжин хвиль, однак потребують екранування металевою камерою і забезпечують слабку концентрацію полів, що становить небезпеку для стійкої роботи активних напівпровідникових приладів.

Таким чином, зі зробленого огляду літературних джерел можна зробити наступні висновки:

а. Сучасні вимоги до елементної бази міліметрового діапазону довжин хвиль диктують необхідність розроблювати і виготовляти вузли виключно у вигляді гібридних і монолітних інтегральних схем. Це стосується, зокрема, і подільників потужності.

б. Подільники потужності, призначені для роботи у складі схем з активними напівпровідниковими елементами повинні виготовлятися на основі МСЛ.

в. Класичний подільник Вілкінсона має декілька вад, які є притаманними для нього і зумовлюють його погані характеристики у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

г. Зазначене є причиною розробки зміненої конструкції подільника Вілкінсона, в якій би недоліки КПВ були б подолані.

Саме дослідженню цієї мети в присвячена дана магістерська робота.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ

2.1 Модель КПВ в термінах теорії кіл

В розділі 1 зазначалося, що подільник потужності КПВ має недоліки, які обмежують його використання в міліметровому діапазоні довжин хвиль. Для з'ясування кількісного впливу факторів, які зумовлюють це, доцільно проаналізувати модель КПВ аналітично, використовуючи теорію кіл - теорію довгих ліній.

В термінах цієї теорії КПВ має вигляд, зображений на рис.2.1а

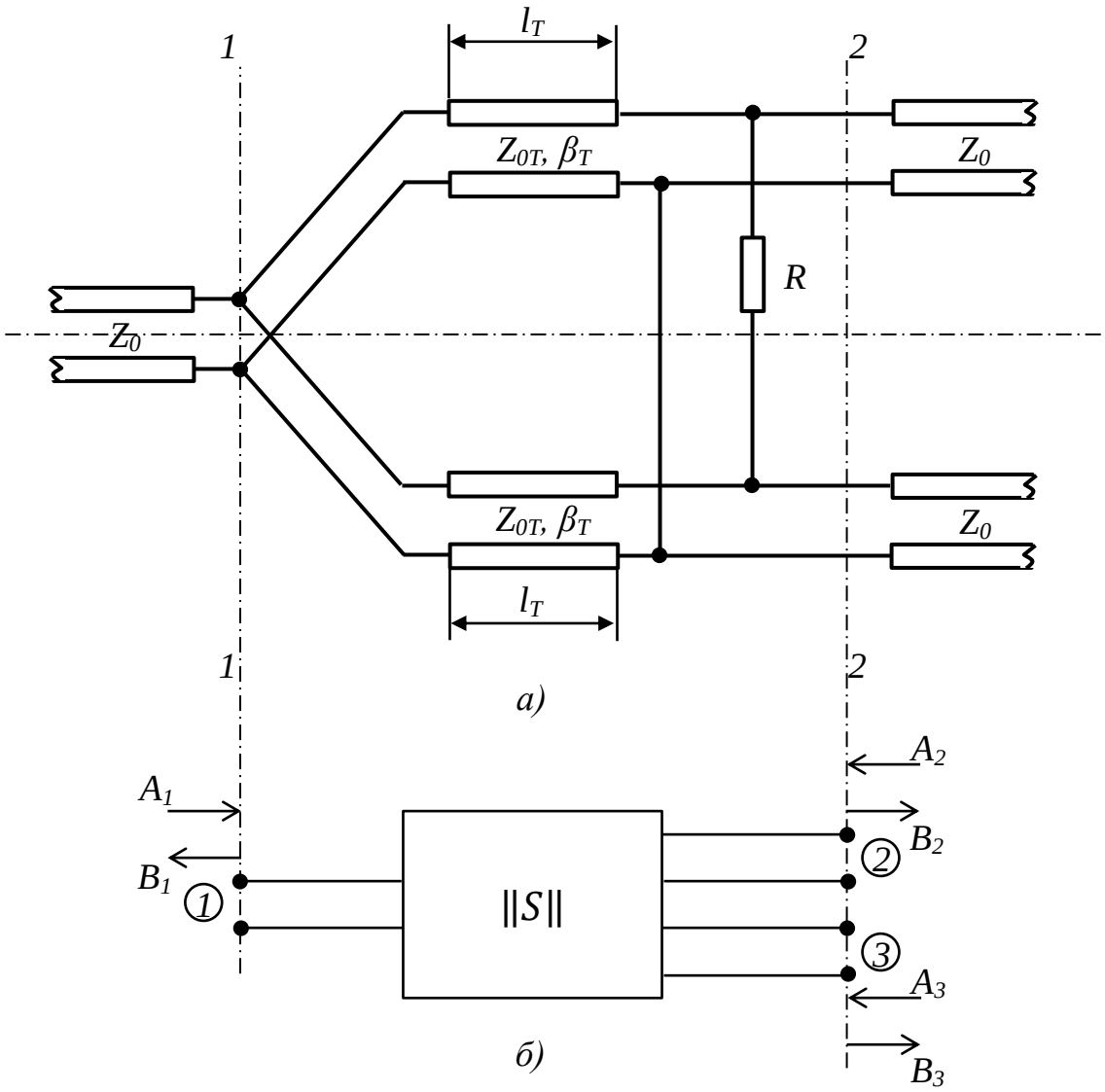


Рисунок 2.1– Модель КПВ

Відносно референсних площин 1-1 і 2-2 КПВ, який є шестиполюсником, може бути представлений у вигляді S-матриці (рис.2.1б), для якої, згідно з визначенням, маємо

$$B_1 = S_{11}A_1 + S_{12}A_2 + S_{13}A_3$$
$$B_2 = S_{21}A_1 + S_{22}A_2 + S_{23}A_3 \qquad (2.1)$$
$$B_3 = S_{31}A_1 + S_{32}A_2 + S_{33}A_3$$

Оскільки зазначений шестиполюсник є взаємним і горизонтально симетричним (вісь симетрії показана на рис.2.1а), для елементів S-матриці маємо наступні співвідношення:

$$S_{22} = S_{33}; \quad S_{12} = S_{21} = S_{13} = S_{31}; \quad S_{23} = S_{32},$$

а отже (2.1) набуває вигляду

$$B_1 = S_{11}A_1 + S_{12}A_2 + S_{12}A_3$$
$$B_2 = S_{12}A_1 + S_{22}A_2 + S_{23}A_3 \qquad (2.2)$$
$$B_3 = S_{12}A_1 + S_{23}A_2 + S_{22}A_3.$$

Припустимо, що ми здійснюємо наступний експеримент: подаємо однакові по амплітуді і фазі сигнали на входи 2,3, а вхід 1 навантажуємо на узгоджене навантаження. В цьому випадку $A_1 = 0$; $A_2 = A_3$. Для з'ясування реакції шестиполюсник еквівалентну схему (рис.2.1а) спершу перетворюємо до вигляду, зображеному на рис.2.2, а потім, для розглядуваного випадку симетричного збудження, до вигляду, зображеному на рис.2.3. В цьому випадку струми між симетрично розташованими частинами КПВ не протікають і КПВ може бути представлений у вигляді двох однакових незалежних схем, що і показано на рис.2.3

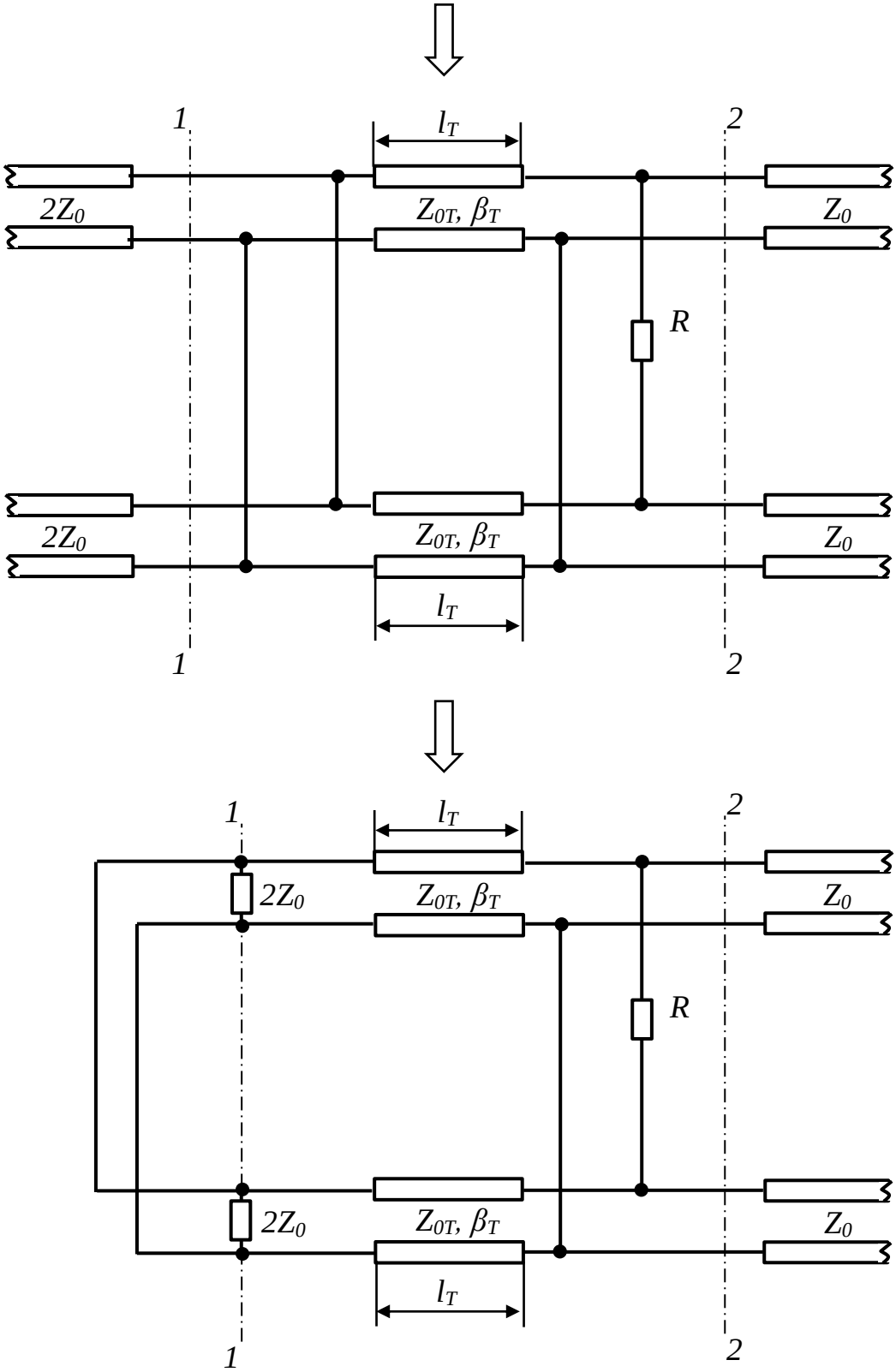


Рисунок 2.2– Еквівалентна схема КПВ

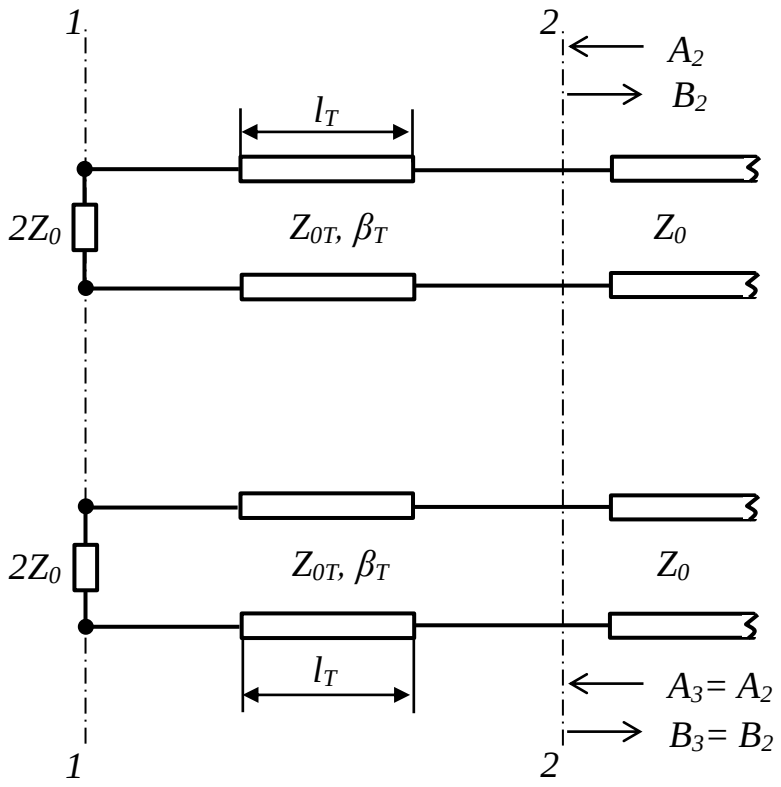


Рисунок 2.3– Еквівалентна схема КПВ, парне збудження

З (2.2) для розглядуваного симетричного збудження маємо

$$B_1 = 2S_{12}A_2$$

$$B_2 = (S_{22} + S_{23})A_2 \qquad (2.3)$$

$$B_3 = (S_{23} + S_{22})A_3.$$

Два останніх ствердження з (2.3) демонструють однаковість амплітуд відбитих хвиль від портів 2,3, отже може бути розглянуте лише одне з них. Маємо

$$\frac{B_2}{A_2} = S_{22} + S_{23} = \Gamma_{\text{М}}, \qquad (2.4)$$

де $\Gamma_{\text{М}}$- коефіцієнт відбиття від порту 2 при симетричному (парному) збудженні. Він просто розраховується, виходячи з еквівалентної схеми КПВ, зображеної для цього випадку (рис.2.3). Маємо для вхідного опору в площині 2-2

$$\text{Z}_{\text{вх}}|_{2-2} = \text{Z}_{0T}\frac{2\text{Z}_0 + j\text{Z}_{0T}tg\beta_T l_T}{\text{Z}_{0T} + j2\text{Z}_0 tg\beta_T l_T}, \qquad (2.5)$$

а отже

$$\Gamma_{\text{М}} = \frac{\text{Z}_{\text{вх}}|_{2-2} - \text{Z}_0}{\text{Z}_{\text{вх}}|_{2-2} + \text{Z}_0} \qquad (2.6)$$

В другому експерименті збудимо КПВ зі сторони портів 2,3 антисиметрично (непарно), тобто коли $A_3 = -A_2$. У такому випадку в площині симетрії встановлюється електрична стінка і КПВ виглядає так, як показано на рис.2.4

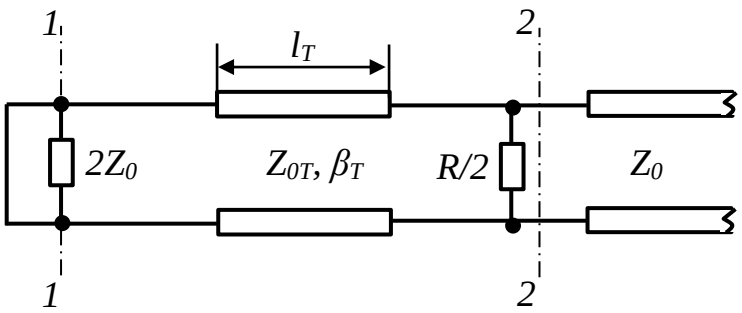


Рисунок 2.4–Еквівалентна схема КПВ, непарне збудження

Підставляючи зазначені умови в (2.2) маємо

$$B_1 = 0$$
$$B_2 = (S_{22} - S_{23})A_2 \qquad (2.7)$$
$$B_3 = (S_{23} - S_{22})A_3.$$

Отже

$$\frac{B_2}{A_2} = S_{22} - S_{23} = \Gamma_{\text{E}}, \qquad (2.8)$$

де Γ_{E}- коефіцієнт відбиття від порту 2 при антисиметричному (непарному) збудженні. Він також просто розраховується, виходячи з еквівалентної схеми КПВ, зображеної на рис.2.4). Маємо для вхідної провідності в площині 2-2

$$\text{Y}_{\text{вх}}|_{2-2} = -j\text{Y}_{0T} ctg\beta_T l_T + G, \qquad (2.9)$$

де

$$\text{Y}_{0T} = \frac{1}{\text{Z}_{0T}}; \qquad G = \frac{2}{R}.$$

Відповідно

$$\Gamma_{\text{E}} = \frac{\text{Y}_0 - \text{Y}_{\text{вх}}|_{2-2}}{\text{Y}_0 + \text{Y}_{\text{вх}}|_{2-2}} \qquad (2.10)$$

З співвідношень (2.4) і (2.8) маємо

$$\begin{aligned} S_{22} &= \frac{1}{2}(\Gamma_{\text{M}} + \Gamma_{\text{E}}) \\ S_{23} &= \frac{1}{2}(\Gamma_{\text{M}} - \Gamma_{\text{E}}). \end{aligned} \qquad (2.11)$$

Останні співвідношення показують, що елементи матриці S_{22} і S_{23} можуть бути тепер просто знайдені, використовуючи співвідношення (2.5), (2.6), (2.9), (2.10), (2.11). Зокрема, с огляду на те, що до величини Γ_{E}, яка входить до розрахунку параметра S_{22} згідно (2.11), входить величина провідності G, яка не входить до розрахунку величини Γ_{M}, можна зробити висновок, що для забезпечення узгодження КПВ необхідно забезпечити рівність нулю величин Γ_{E} і Γ_{M} окремо. Стосовно величини Γ_{E} це означає, що має бути $\beta_T l_T = \pi/2$ і $G = 2/R$. Отже $R = 2\text{Z}_0$, а $l_T = \lambda_{g\text{T}}/4$, де $\lambda_{g\text{T}}$ - довжина хвилі у внутрішній лінії КПВ на центральній частоті робочого діапазону.

Умова $\Gamma_{\text{M}} = 0$ виконується при $l_T = \lambda_{g\text{T}}/4$ і при $\text{Z}_{0T} = \sqrt{2\text{Z}_0}$.

З огляду на друге зі співвідношень (2.11) маємо, що при узгодженні зі сторони виходів КПВ (при $S_{22} = 0$) розв'язка КПВ нескінченна, оскільки $S_{23} = 0$.

Одночасно, отримані співвідношення дають змогу розрахувати всі параметри КПВ - частотну характеристику передачі, розв'язки, зворотних втрат, а також вплив на ці характеристики відхилення опору R від розрахованої величини і т.п.

Розрахунок зазначених характеристик був проведений у середовищі Mathcad. Програма розрахунку наведена нижче.

$z0 := 50 \qquad r := 100 \qquad eps := 2.2 \qquad f0 := 22\cdot 10^{9} \qquad y0 := \frac{1}{z0} \qquad d := 127$

$\lambda 00 := \frac{3\cdot 10^{10}}{f0} \qquad z0t := \sqrt{2}\cdot z0 \qquad y0t := \frac{1}{z0t}$

$w0 := \left(\frac{300}{\sqrt{eps}\cdot z0} - 1\right)\cdot d \qquad wt := \left(\frac{300}{\sqrt{eps}\cdot z0t} - 1\right)\cdot d$

$epsef0 := \frac{(eps+1)}{2} + \frac{(eps-1)}{2\cdot\sqrt{1+10\cdot\frac{d}{w0}}} \qquad epseft := \frac{(eps+1)}{2} + \frac{(eps-1)}{2\cdot\sqrt{1+10\cdot\frac{d}{wt}}}$

$w0 = 386.74$

$wt = 236.269$

$epseft = 1.838$

$epsef0 = 1.89$

$\lambda gt0 := \frac{\lambda 00}{\sqrt{epseft}} \qquad lt := \frac{\lambda gt0}{4}$

$cd1 := 0 \qquad cd2 := 0.02\cdot 10^{-12} \qquad cd3 := 0.05\cdot 10^{-12}$

$f := 16\cdot 10^{9}, 16.1\cdot 10^{9} .. 26\cdot 10^{9}$

$\lambda 0(f) := 3\cdot\frac{10^{10}}{f} \qquad \lambda gt(f) := \frac{\lambda 0(f)}{\sqrt{epseft}} \qquad bett(f) := 2\cdot\frac{\pi}{\lambda gt(f)}$

$zinm(f) := z0t\cdot\frac{(2\cdot z0 + i\cdot z0t\cdot\tan(bett(f)\cdot lt))}{z0t + i\cdot 2\cdot z0\cdot\tan(bett(f)\cdot lt)} \qquad gamm(f) := \frac{(zinm(f) - z0)}{zinm(f) + z0}$

$y(f,cd) := \frac{1}{r} + i\cdot 2\cdot\pi\cdot f\cdot cd$

$z(f,cd) := \frac{1}{y(f,cd)} \qquad g(f,cd) := \frac{2}{z(f,cd)}$

$yine(f,cd) := -1\frac{i\cdot y0t}{\tan(bett(f)\cdot lt)} + g(f,cd)$

$game(f,cd) := \frac{(y0 - yine(f,cd))}{y0 + yine(f,cd)}$

$s22(f,cd) := 0.5\cdot(gamm(f) + game(f,cd))$

$s23(f,cd) := 0.5\cdot(gamm(f) - game(f,cd))$

$s23mod(f,cd) := 10\cdot\log(|s23(f,cd)|) \qquad s22mod(f,cd) := 10\cdot\log(|s22(f,cd)|)$

Розрахунки виконані, враховуючи модель резистора у вигляді паралельного з'єднання активного опору величиною $R = 2Z_0$ і ємності C_d, яка відповідає SPICE - моделі резистора типорозміру 0402. При розрахунках не бралася до уваги ємнісна провідність, що відповідає розриву сигнального провідника МСЛ в лінії під'єднання баластного резистора. Згідно [7] ця ємність C_p приблизно дорівнює

$$C_p \approx \frac{Y_0 d}{2\pi c} ln\left[ctg\frac{\pi\Delta}{d}\right].$$

Тут d - товщина підкладинки МСЛ, с - швидкість світла, Δ - ширина зазору у сигнальному провіднику МСЛ. Вона підєднується паралельно до ємності резистора C_d і здатна, як виявляється, тільки погіршити отримані результати.

Результати розрахунків наведені на рис.2.5 (графік залежності розв'язки від частоти) і рис.2.6, графік частотної залежності зворотних втрат. На кожному графіку три наведених кривих відповідають трьом різним значенням величини ємності C_d. Видно, що, як і має бути, ідеальний КПВ (випадок $C_d = 0$) забезпечує нескінченну розв'язку на центральні частоті робочого діапазону частот $f_0 = 22$ ГГц.

Врахування вже дуже незначної ємності $C_d = 0.02$ пФ зменшує розв'язку до 20 дБ, змінює центральну частоту роботи і погіршує зворотні втрати до величини всього 12 дБ. При ємності $C_d = 0.05$ пФ подільник практично втрачає необхідні властивості.

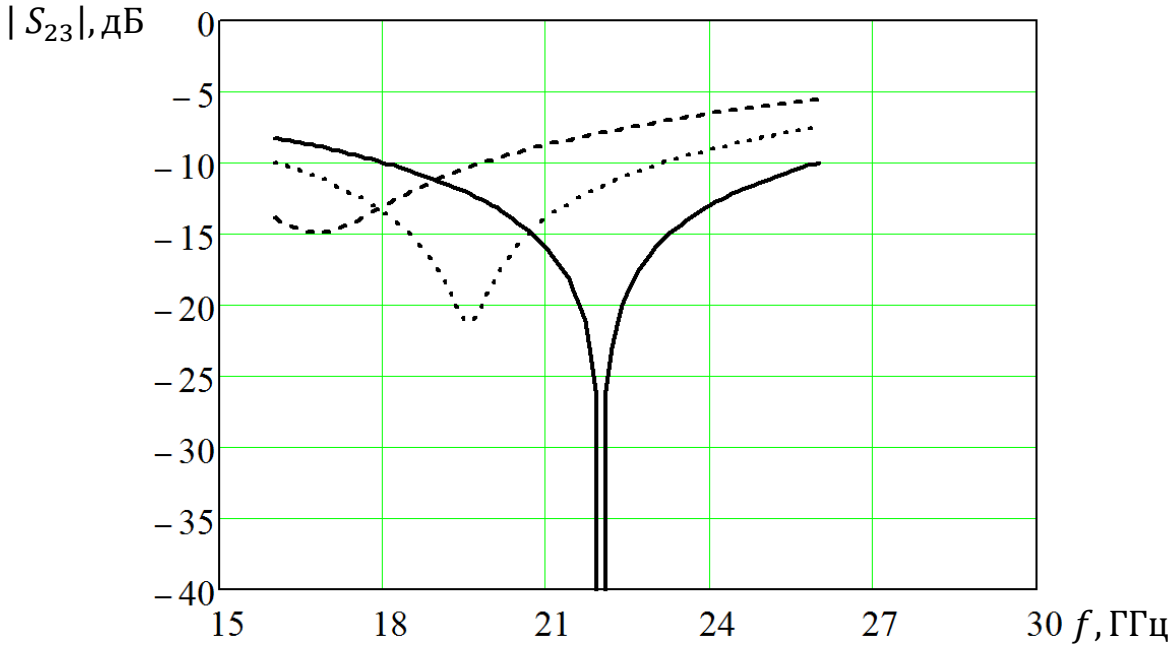


Рисунок 2.5 - Залежність розв’язки від частоти.
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.02$ – пунктирна; $C_d = 0.05$ – штрихова

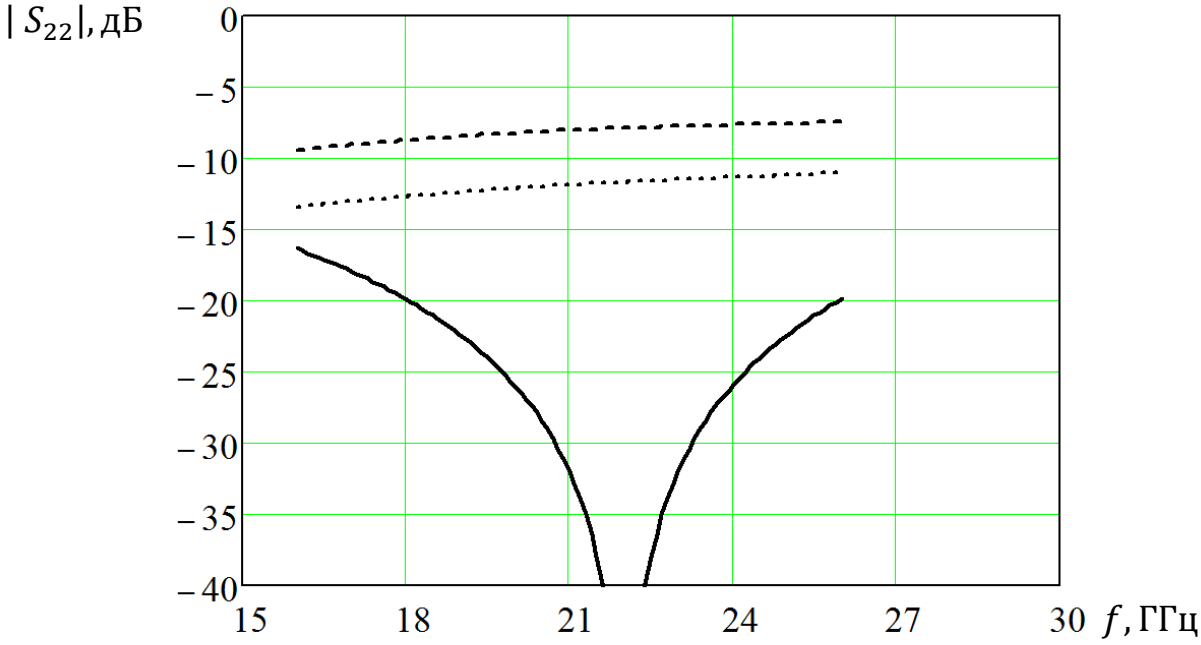


Рисунок 2.6 - Залежність зворотних втрат від частоти
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.02$ – пунктирна; $C_d = 0.05$ – штрихова

Зазначені негативні ефекти проявляються ще значніше на більш високих частотах, що демонструють результати, показані на рис.2.7, 2.8, отримані для КПВ на центральну частоту $f_0 = 36$ ГГц.

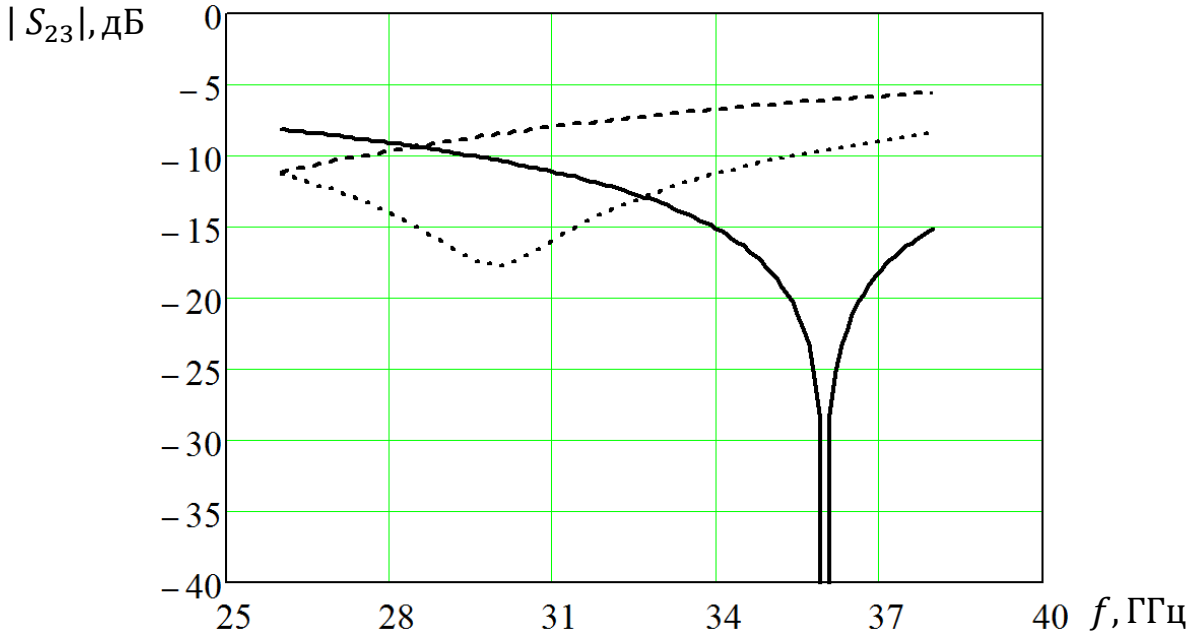


Рисунок 2.7 - Залежність розв'язки від частоти
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.02$ – пунктирна; $C_d = 0.05$ – штрихова

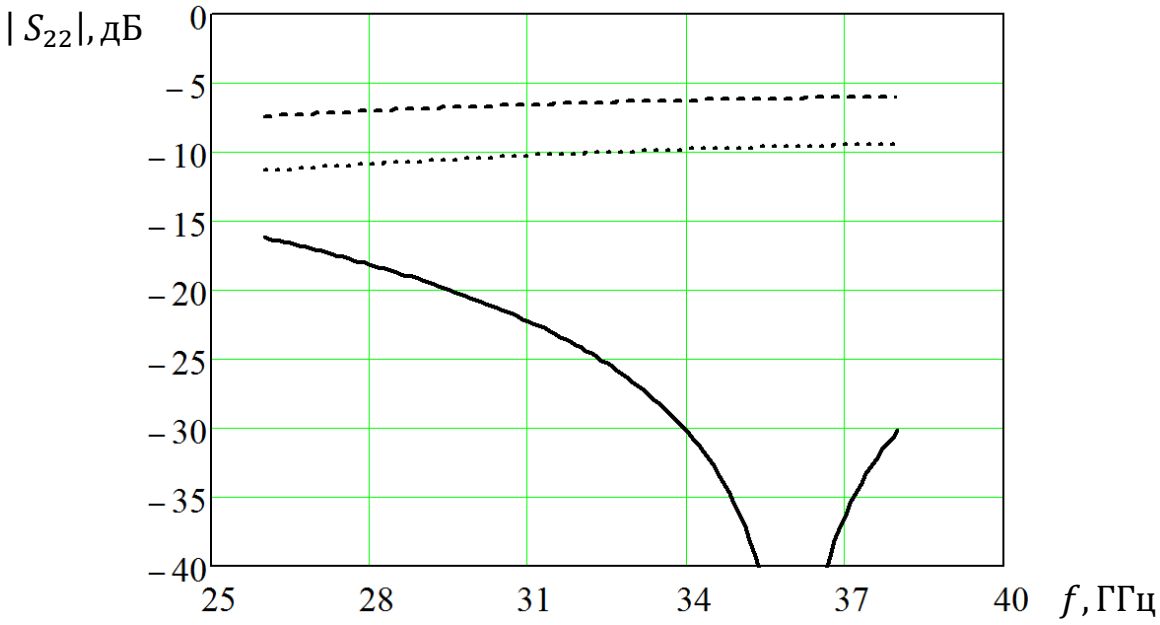


Рисунок 2.8 - Залежність зворотних втрат від частоти
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.02$ – пунктирна; $C_d = 0.05$ – штрихова

Виконані розрахунки показують, що КПВ є малопридатним вже на частотах довгохвильової частини міліметрового діапазону довжин хвиль і потребує модифікації топології з метою видалення з конструкції розривів МСЛ і баластного зосередженого резистора.

2.2 Модифікований подільник Вілкінсона (МПВ). Теоретичний аналіз МПВ.

В роботі пропонується змінити вихідну топологію подільника Вілкінсона так, щоб уникнути дії зазначених явищ, виключити неминучий вплив паразитних параметрів резистора, і, таким чином, зробити можливим використання подільника на частотах міліметрового діапазону довжин хвиль. Топологія нового запропонованого подільника потужності показана на рис.2.9.

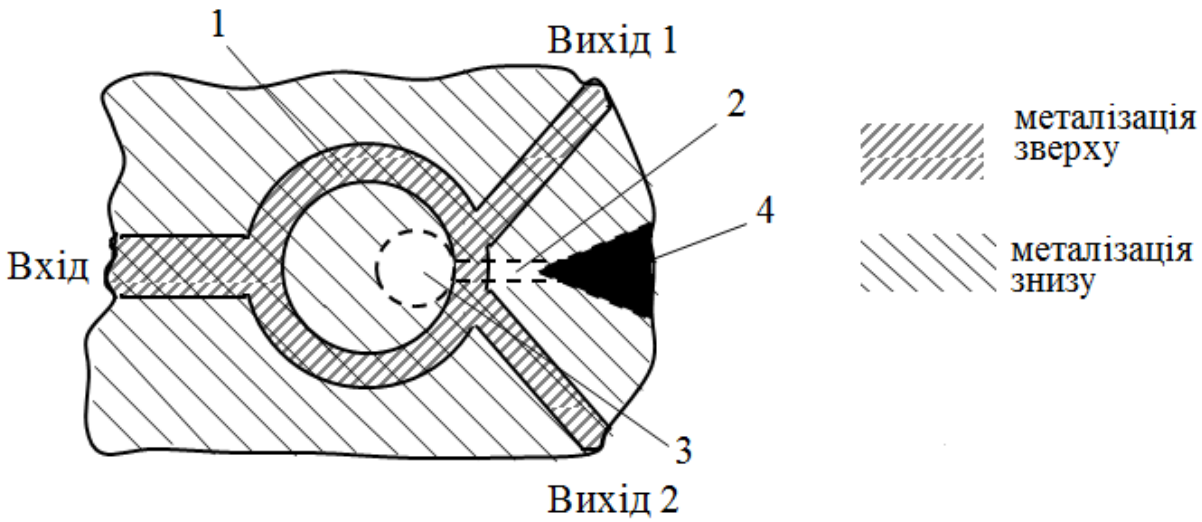


Рисунок 2.9 – Модифікована топологія подільника потужності на МСЛ

Видно,що подільник містить напівхвильове суцільне по всій довжині кільце сигнального провідника МСЛ з хвильовим опором $Z_0/\sqrt{2}$ і щілинну лінію 2, розташовану на зворотній стороні підкладинки МСЛ. Щілина лінії 2 перетинає проекцію сигнального провідника посередині довжини кільця. Щілинна лінія з боку області МСЛ закінчується круглим отвором 3 в металізації, а поза цієї

області - поглиначем 4. Відомо [8], що круглий отвір в металізації щілинної лінії ефективно імітує режим холостого ходу цієї лінії, що і необхідно для її оптимального збудження зі сторони МСЛ. З іншого боку очевидно, що збудження щілинної лінії відбувається лише зі сторони виходів подільника, що і забезпечує їх розв'язку, оскільки хвильовий опір щілинної лінії обирається рівним $2Z_0$, а її вихід навантажений на узгоджене навантаження (поглинач).

Сказане якісно обґрунтовує роботу МПВ. При цьому видно, що необхідні функції тут реалізуються без застосування зосередженого резистора, а сигнальний провідник МСЛ не потерпає від необхідного в топології КПВ розриву.

Еквівалентна схема МПВ, побудована в термінах теорії кіл, зображена на рис.2.8

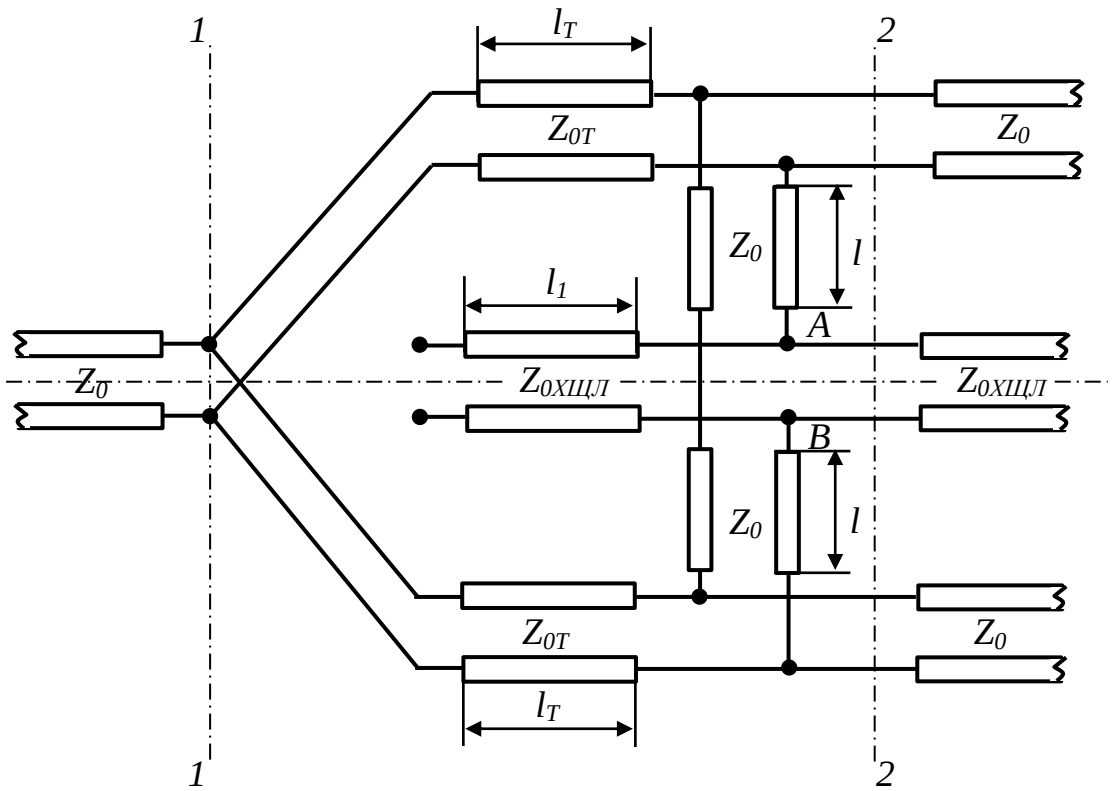


Рисунок 2.8– Еквівалентна схема МПВ

На цьому рисунку $Z_{0ХЩЛ}$ - хвильовий опір хвилеводно-щілинної лінії. Порівнюючи еквівалентну схему з топологією МПВ, бачимо, що:

– довжина ліній l, які з'єднують МСЛ з точками A,B перетину МСЛ з ХЩЛ дуже мала;
– довжина ліній l_1, які з'єднують ХЩЛ з колом в металізації, що імітує режим холостого ходу в ХЩЛ також дуже мала.

Таким чином, ХЩЛ, розімкнена на одному кінці, фактично безпосередньо під'єднана до плечей подільника і ідеально імітує роль баластного резистора R в КПВ. А отже хвильовий опір ХЩЛ має дорівнювати $2Z_0$: $Z_{0ХЩЛ} = 2Z_0$. Зазначимо, що цей випадок передбачає, що ХЩЛ навантажена на узгоджене навантаження - інакше опір в точці підключення ХЩЛ до МСЛ буде дорівнювати деякій величині Z_{BX1}, яка може суттєво відрізнятися від необхідної величини $2Z_0$. Виконати цю умову, однак, не важко, застосовуючи плавні переходи у ХЩЛ і якісні поглинаючі матеріали. Що стосується інших вимог до топології, то вони співпадають з аналогічними для КПВ: довжина секції МСЛ з опором $Z_{0\text{Т}}$ дорівнює чверть довжини хвилі у цій лінії, а сам опір $Z_{0\text{Т}}$ має дорівнювати $\sqrt{2}Z_0$.

Таким чином, єдиними причинами відхилення характеристик МПВ від очікуваних можуть бути дифракційні ефекти, які не враховуються в теорії довгих ліній, а також неоднозначне визначення хвильового опору в ХЩЛ. Справа в тому, що, на відміну МСЛ, в якій розповсюджується хвиля квазі-Т, в ХЩЛ основним типом хвилі є квазі-H_{10}, для якої є декілька визначень хвильового опору. Хвильовий опір ХЩЛ визначається перш за все шириною щілини ХЩЛ, яка забезпечить виконання умови оптимальної розв'язки. Отже остаточне визначення ширини щілини ХЩЛ має бути здійснене або експериментально, або на основі розрахунків в пакеті програм електродинамічного аналізу. Що стосується впливу дифракційних ефектів, то, скоріш за все, вони можуть призвести до зсуву центральної частот робочого діапазону МПВ.

З цих причин остаточне визначення топології МПВ доцільно здійснити саме, застосовуючи розрахунки в пакеті програм електродинамічного аналізу, що і виконана в наступному розділі.

3 РОЗРАХУНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДІЛЬНИКІВ В ПАКЕТІ ПРОГАМ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ

Розроблені і розповсюджені пакети програм електродинамічного аналізу дозволяють, виходячи з методів обчислювальної електродинаміки, розрахувати характеристики передачі, відбиття, розсіяння, тощо від структур з заданими топологічними властивостями. В даній роботі електродинамічні характеристики класичного і модифікованого подільників Вілкінсона розраховані в пакеті програм електродинамічного аналізу “CST Microwave Studio”.

3.1 Дослідження КПВ в пакеті програм електродинамічного аналізу «CST Microwave Studio»

Аналізована структура показана на рис.3.1. Розрахунок зроблений для структури з товщиною діелектричної підкладинки d=127мкм з діелектричною сталою ε=2.2. Товщина шару металізації підкладинки ξ=35 мкм; хвильовий опір вхідної і вихідних МСЛ становить 50 Ом, що відповідає ширині сигнального провідника МСЛ w=386 мкм.

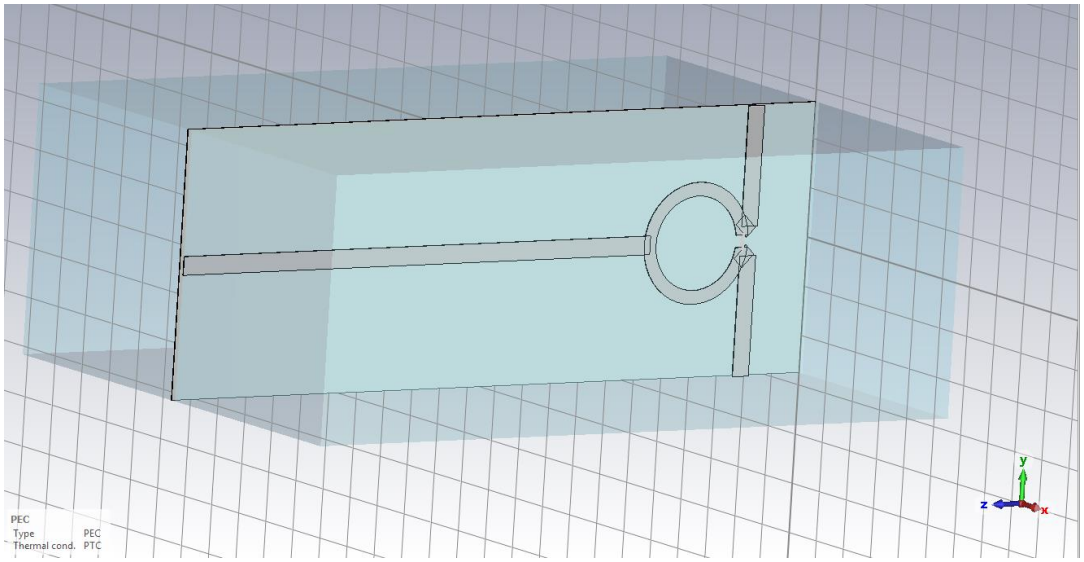


Рисунок 3.1 - Топологія аналізованої структури КПВ

Опір внутрішніх ліній подільника становить 70.71 Ом, що відповідає ширині сигнального провідника МСЛ w=236 мкм. Вся структура подільника розташована в екрануючій металевій камері висотою b=5.5 мм і шириною a=11 мм. При розрахунках використовувалась стандартна модель зосередженого елемента (баластного резистора подільника) у вигляді паралельного з'єднання резистора R=100Ом і його паразитної ємності C_d.

На рис.3.2 - 3.5 суцільними лініям представлені розраховані частотні залежності, відповідно, розв'язки (рис.3.2), зворотних втрат зі сторони виходів (рис.3.3), зворотних втрат зі входу (рис.3.4) і передачі зі входу до виходів (рис.3.5); розрахунки виконані для випадку C_d=0. Зазначимо також, що довжина внутрішніх відрізків МСЛ (трансформаторів опору) розраховувалась з того, щоб центральна частота робочого діапазону подільника f_0 була б рівною 22 ГГц (розраховувалась методом теорії кіл).

З наведених рисунків видно, що, навіть у відсутності ємності резистора розв'язка на центральній частоті не перевищує 25 дБ, хоча максимум розв'язки по частоті практично не зсунутий від розрахункового значення. Зменшення розв'язки в цьому випадку пов'язане з зазначеною вище дифракцією хвиль на розриві сигнального провідника МСЛ під резистором.

Врахування реальних значень ємності резистора C_{d1}=0.05пФ; C_{d2}=0.1пФ; (на рисунках характеристики відображені пунктирними і штриховими кривими, відповідно) призводить до зсуву максимумів розв'язки по частоті, зменшенню її рівня, а також погіршенню зворотних втрат по виходам і входам подільника потужності. Отже, як і передбачалось в попередніх розділах, класичний подільник потужності Вілкінсона не може бути використаний вже на частотах довгохвильової частини міліметрового діапазону довжин хвиль.

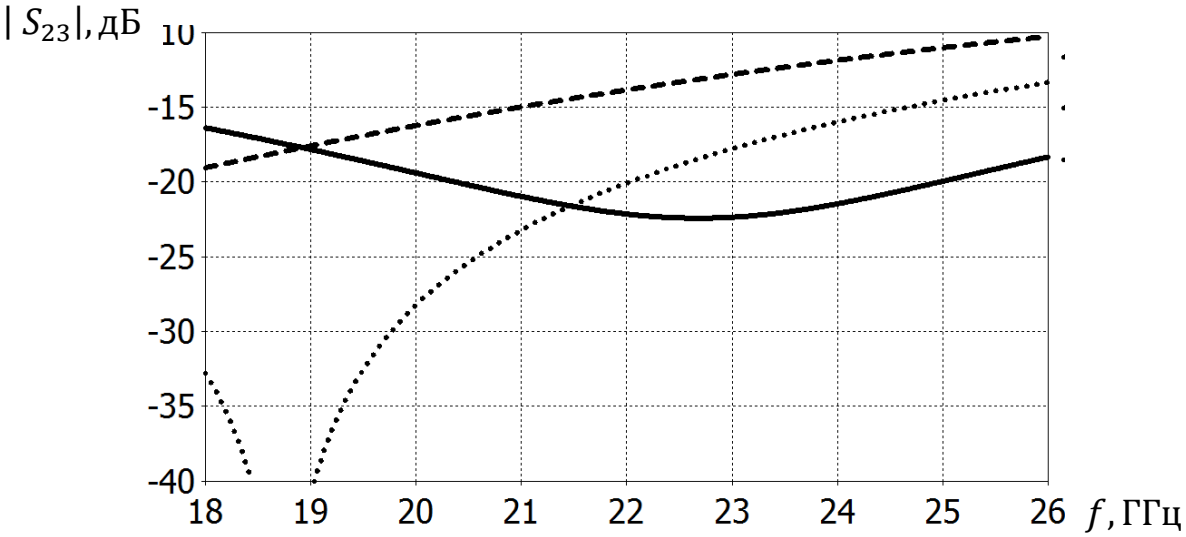


Рисунок 3.2 - Залежність розв'язки від частоти
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.01$ – пунктирна;
$C_d = 0.05$ – штрихова

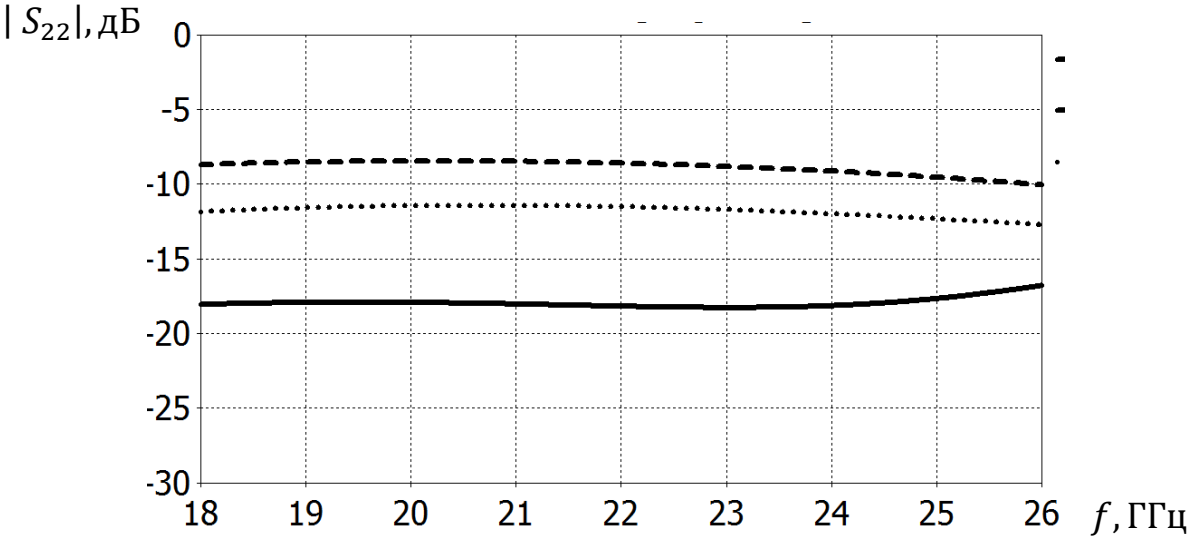


Рисунок 3.3 - Залежність зворотних втрат з виходів
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.01$ – пунктирна;
$C_d = 0.05$ – штрихова

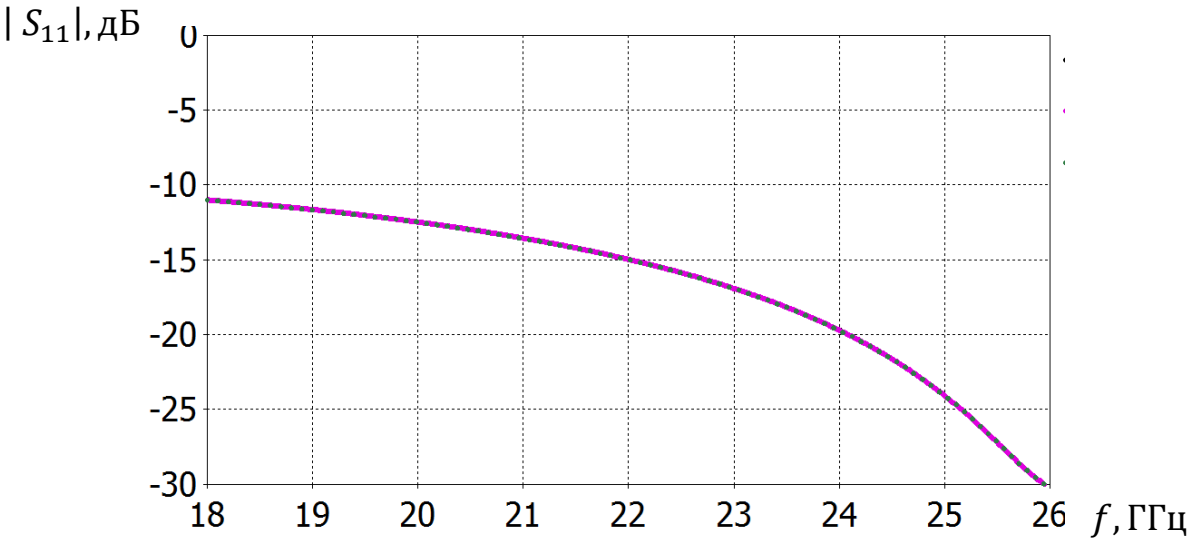


Рисунок 3.4 - Залежність зворотних втрат зі входу
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.01$ – пунктирна;
$C_d = 0.05$ – штрихова

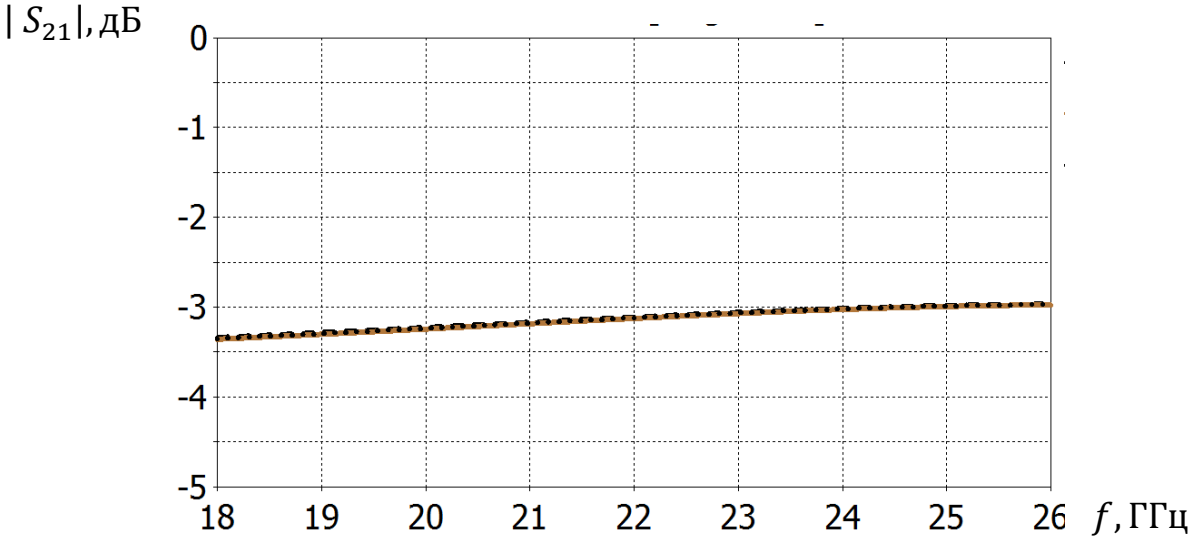


Рисунок 3.5 - Залежність передачі зі входу до виходів
$C_d = 0$ – суцільна; $C_d = 0.01$ – пунктирна;
$C_d = 0.05$ – штрихова

3.2 Дослідження МПВ в пакеті програм електродинамічного аналізу «CST Microwave Studio»

Аналізована структура показана на рис.3.6. Розрахунок зроблений для структури з товщиною діелектричної підкладинки *d*=127мкм з діелектричною сталою ε=2.2. Товщина шару металізації підкладинки ξ=35 мкм; хвильовий опір вхідної і вихідних МСЛ становить 50 Ом, що відповідає ширині сигнального провідника МСЛ *w*=386 мкм. Вся структура подільника розташована в екрануючій металевій камері висотою *b*=5.5 мм і шириною *a*=11 мм.

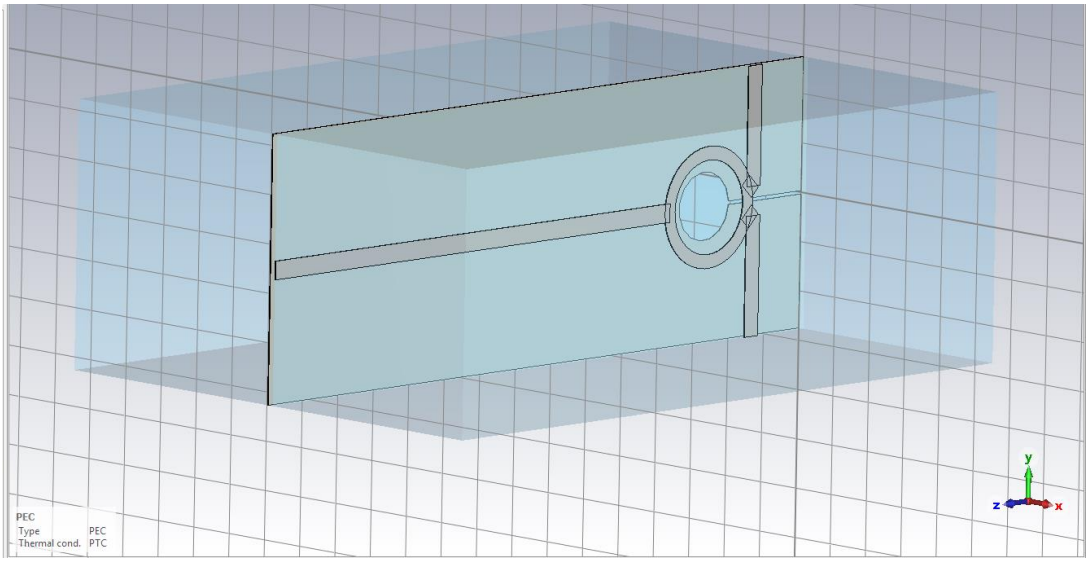


Рисунок 3.6 - Топологія аналізованої структури МПВ

Як відмічалося раніше, невизначеність хвильового опору ХЩЛ не дозволяє заздалегідь розрахувати ширину щілини ХЩЛ, яка б забезпечила нескінченну розв'язку на центральній частоті $f_{0.}$ З іншого боку саме ця величина і є єдиним параметром топології, який має бути оптимізованим.

На рисунку 3.7 відображені частотні характеристики розв'язки ВПУ для трьох значень ширини щілини ХЩЛ *w*: суцільна крива відповідає значенню *w*=70 мкм; штрихова *w*=80 мкм і пунктирна - значенню *w*=60мкм.

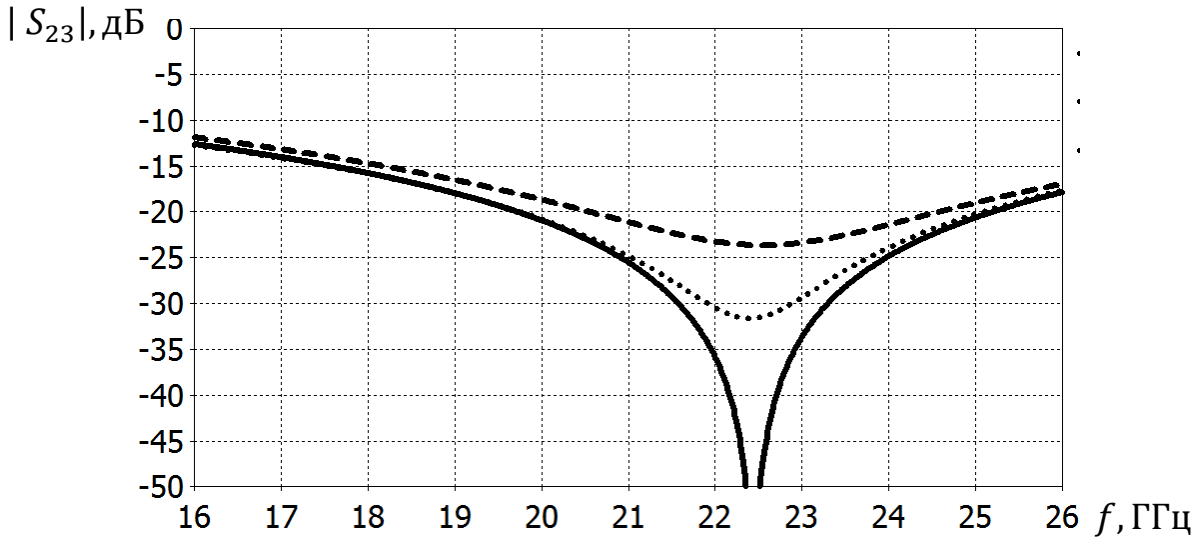


Рисунок 3.7 - Залежність розв'язки: $w = 70$ мкм – суцільна; $w = 60$ мкм – пунктирна; $w = 80$ мкм – штрихова

З рисунку видно, що оптимальнім є значення w=70 мкм. Саме для цього значення ширини щілини ХЩЛ розраховані частотні залежності зворотних втрат з виходу подільника (рис.3.8), з його входу (рис.3.9), а також коефіцієнту передачі (рис.3.10).

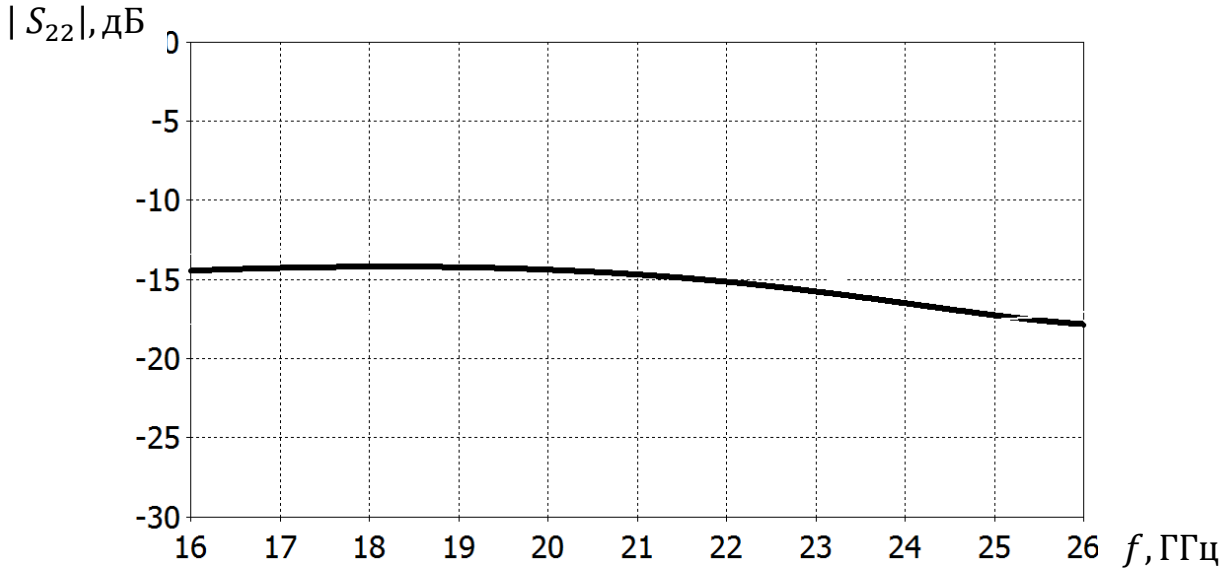


Рисунок 3.8 - Залежність зворотних втрат з виходу подільника

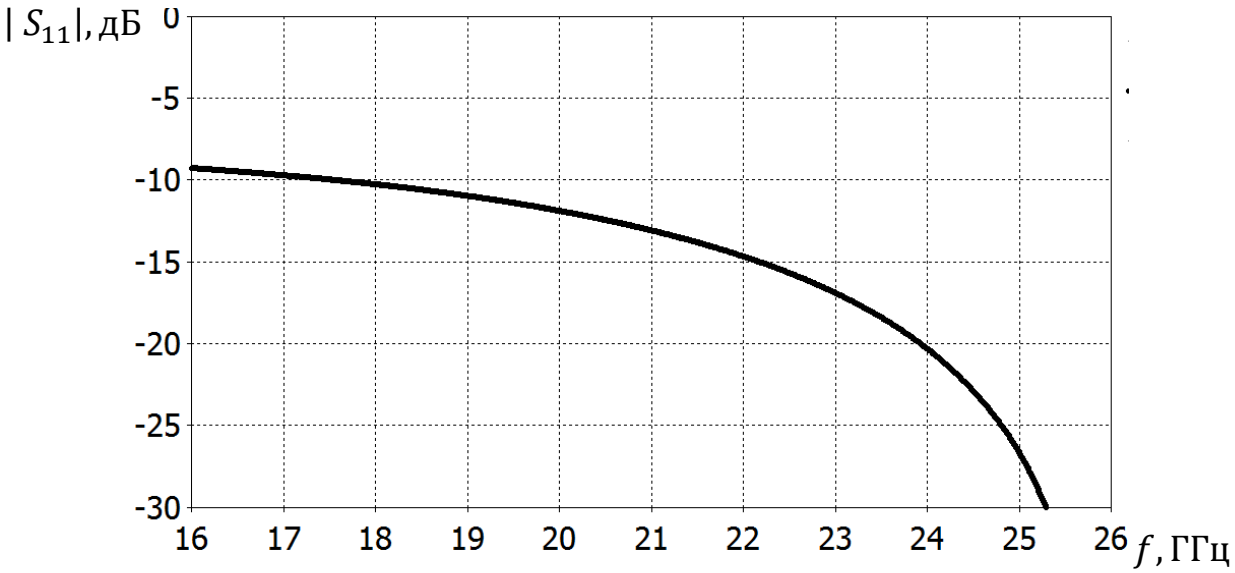


Рисунок 3.9 - Залежність зворотних втрат зі входу подільника

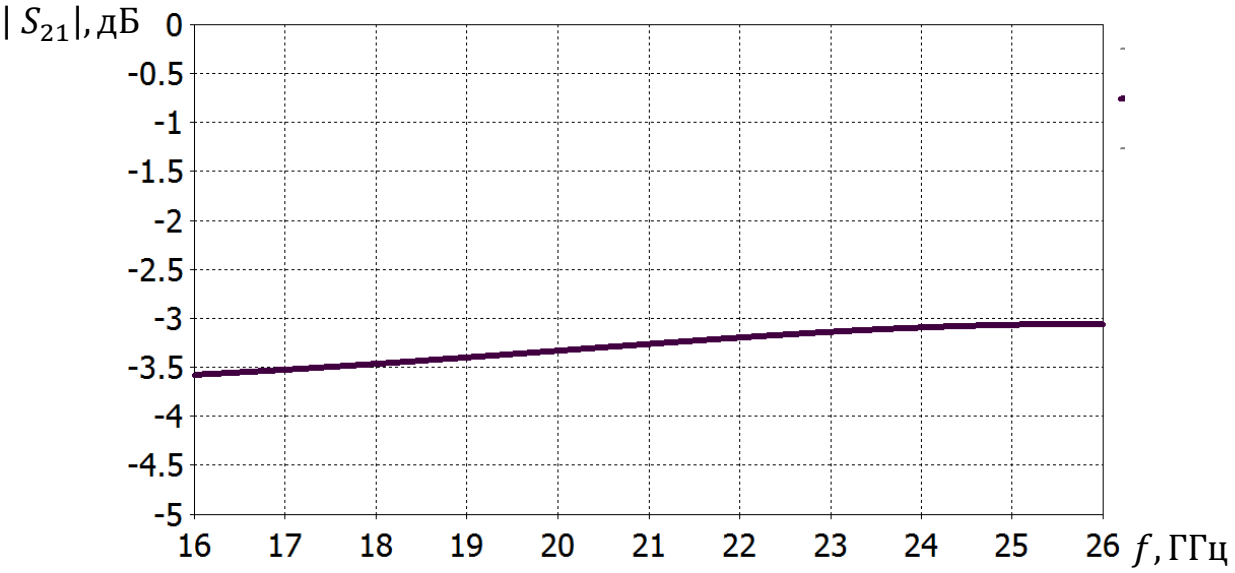


Рисунок 3.10 - Залежність коефіцієнта передачі подільника

Таким чином, запропонований модифікований подільник Вілкінсона долає недоліки КПВ: він не містить елементів, які обмежують використання подільника частотами довгохвильової частини сантиметрового діапазону.

4 ІНЖЕНЕРНО – КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА МПВ.РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Інженерно-конструкторська розробка МПВ містила розробку камери МПВ і розробку його планарної структури.

4.1 Розробка конструкції МПВ

У, а вимірювальне обладнання в цьому діапазоні, як правило, є хвилеводним, експериментальна камера зорієнтована для вимірювання саме на такій апаратурі, а планарна структура повинна містити відповідні переходи від використаних інтегральних ліній передачі до прямокутного хвилевода.

Креслення виготовленої камери показані на рис.4.1 - 4.3.

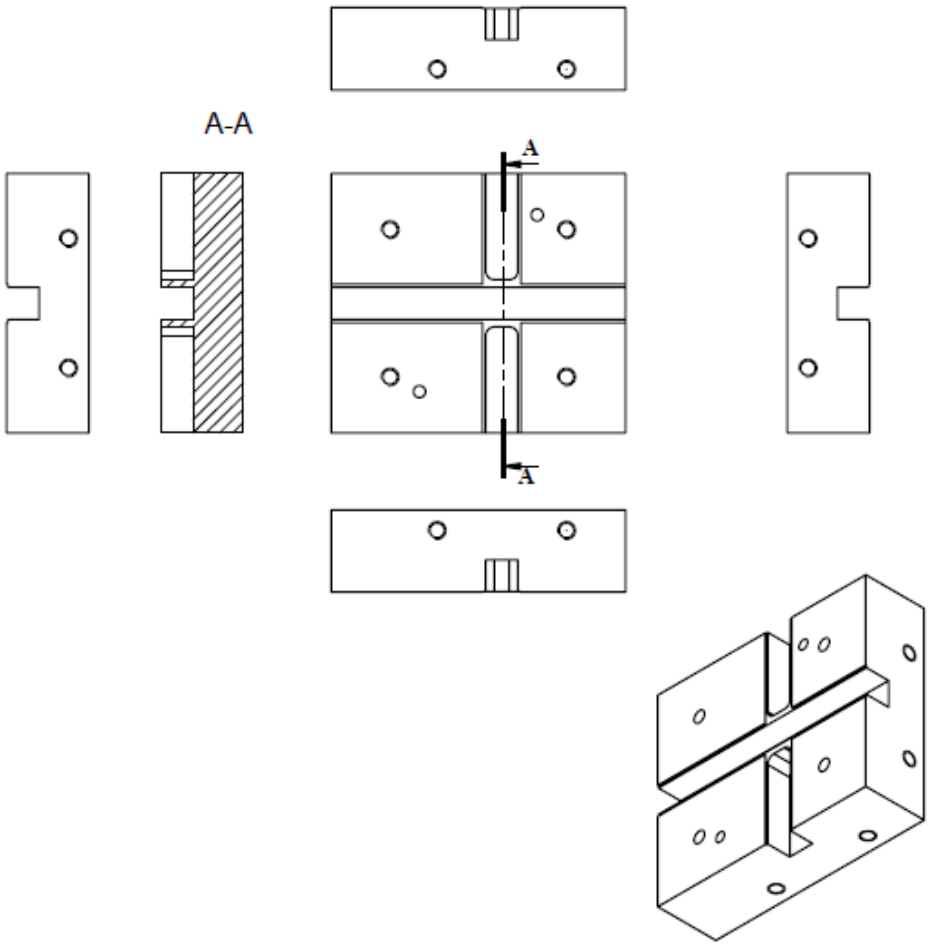


Рисунок 4.1 - Корпус хвилеводної камери МПВ

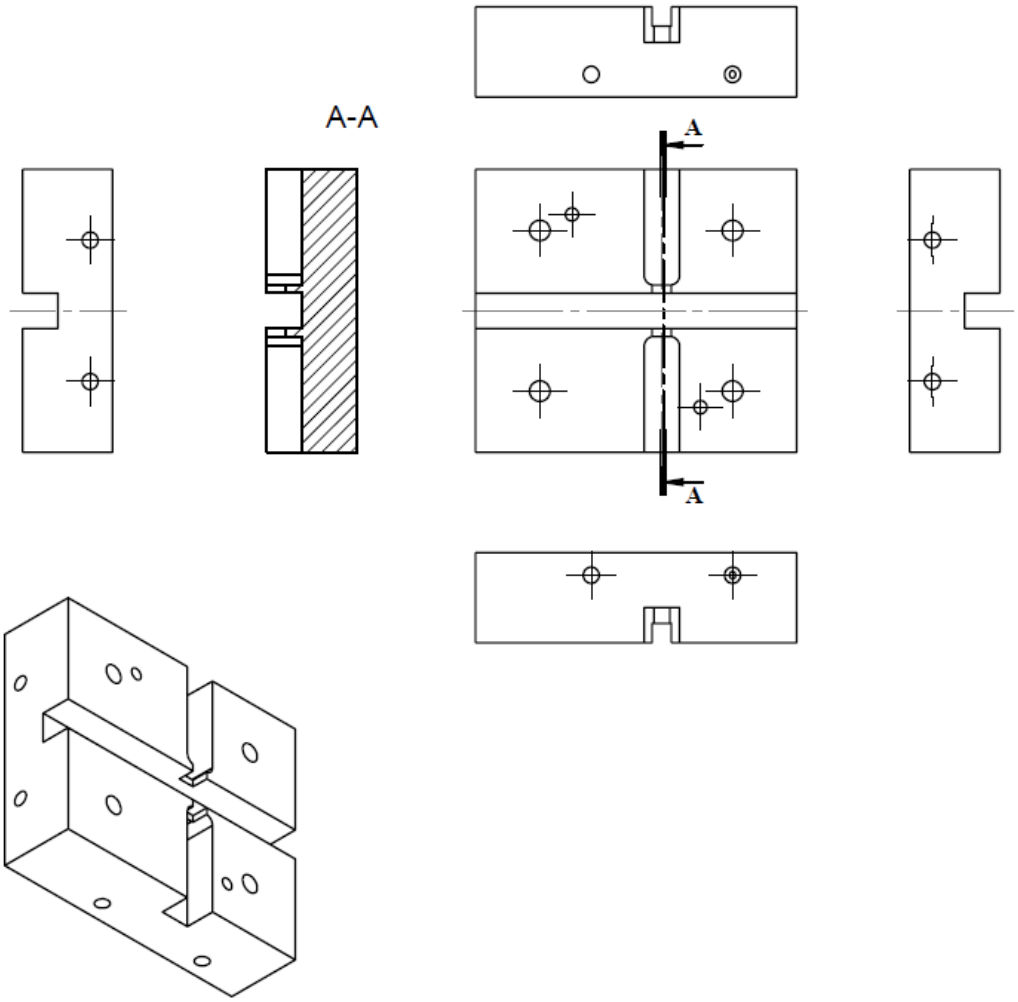


Рисунок 4.2 - Кришка хвилеводної камери МПВ

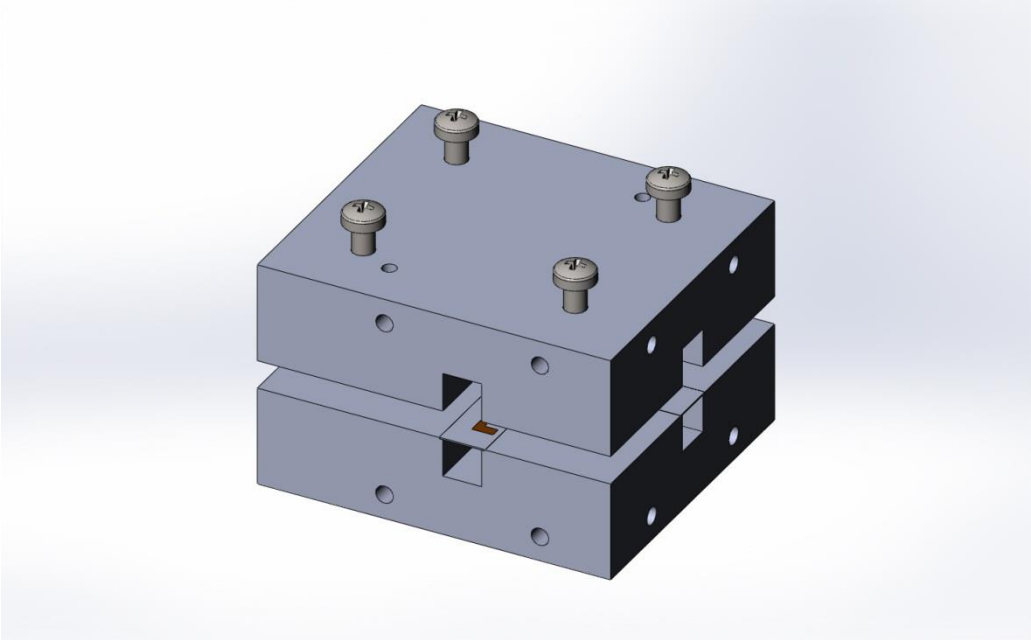


Рисунок 4.3 - Камера МПВ - збірка

Як видно, камера складається з двох половин, в одній з яких виконано спеціальний паз розмірами 0.5x0.16 мм для кріплення планарної структури, яку таким чином буде встановлено в Е-площині прямокутних хвилеводів посередині їх широкої стінки.

Ескіз планарної структури подано на рис.4.4. Оскільки планарна структура виготовляється у повністю автоматизованому виробничому процесі, вихідним для якого є файл, що містить всі дані щодо її топології, поданий ескіз носить лише інформативний характер.

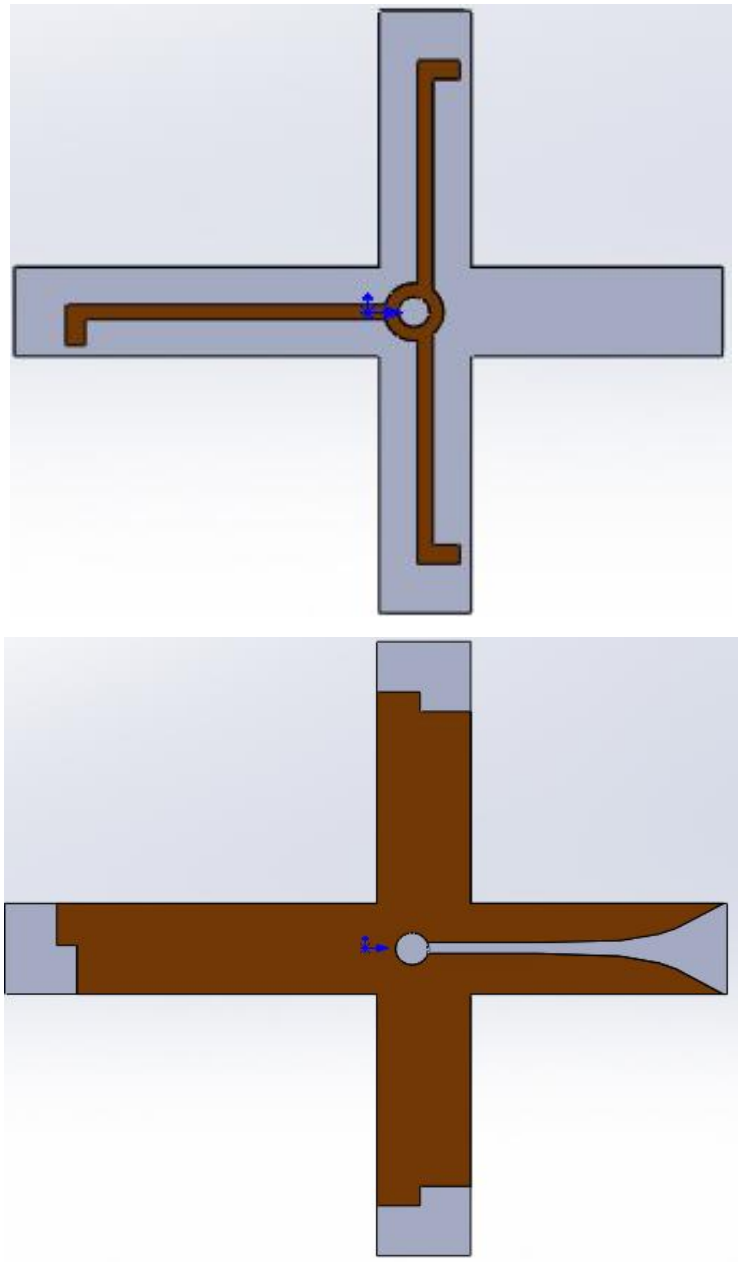


Рисунок 4.4 - Ескіз планарної структури МПВ

4.2 Результати експериментальних досліджень

Як зазначено вище, експериментальні дослідження МПВ проводилися на хвилеводному обладнанні (використовувався панорамний вимірювач КСХ і послаблення типу Р2-66). Тому планарна структура МПВ була доповнена переходами від прямокутного хвилеводу на МСЛ і від прямокутного хвилеводу на ХЩЛ. У якості цих переходів використані поздовжньо-зондовий перехід на МСЛ і плавний перехід на ХЩЛ. Топологія цих переходів була розроблена в лабораторії НВЧ пристроїв кафедри РТС.

На рисунках 4.5 - 4.7 наведені результати експериментального дослідження розв’язки (рис.4.5), КСХ зі сторони виходів (рис.4.6) і КСХ зі сторони входу (рис.4.7).

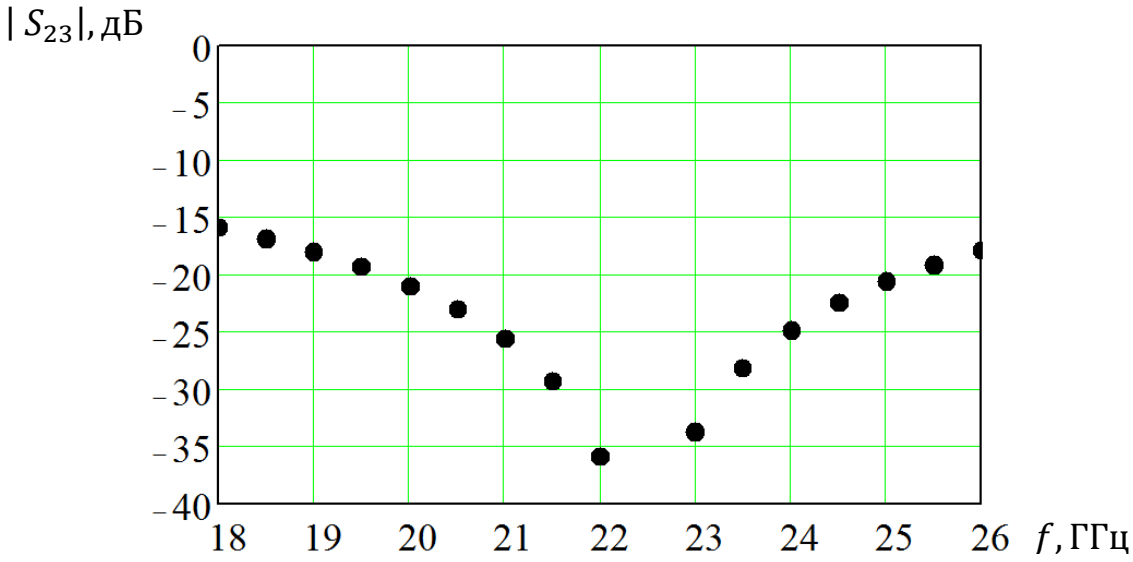


Рисунок 4.5 - Експериментальна залежність розв’язки МПВ

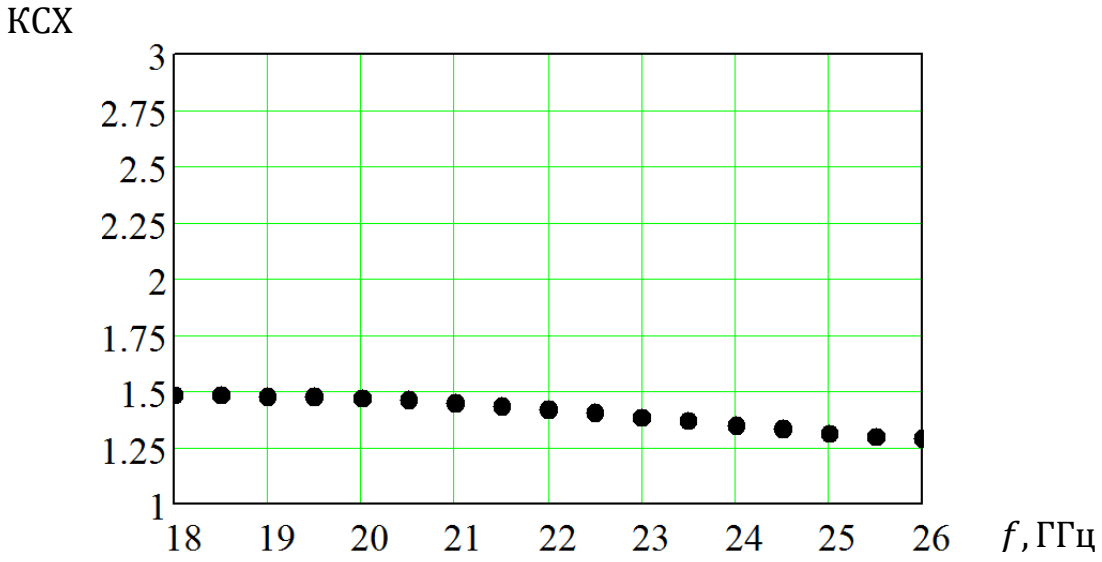


Рисунок 4.6 - Експериментальна залежність КСХ зі сторони виходів МПВ

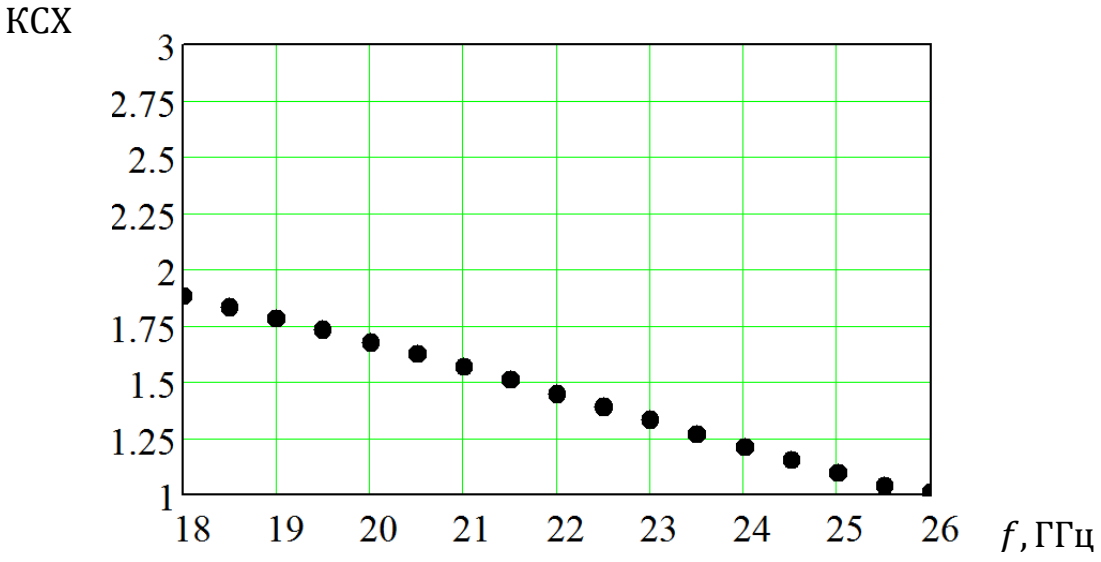


Рисунок 4.7 - Експериментальна залежність КСХ зі сторони входу МПВ

Наведені результати показують, що передбачені при його розробці характеристики були дійсно отримані. Це підтверджує правильність припущень щодо його розробки і адекватність застосованого моделювання.

Фото розробленого і виготовленого зразка показано на рис.4.8

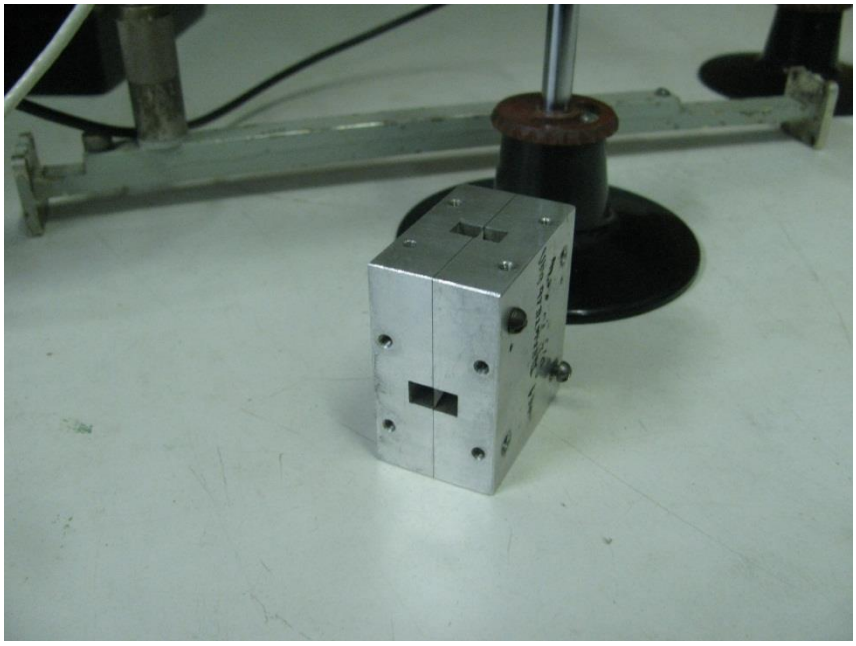


Рисунок 4.8 - Розроблений і виготовлений МПВ

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

а. Опис ідеї проєкту

В таблиці 1 проаналізовано:

- зміст ідеї;
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування).

Аналіз даних пунктів дає можливість визначитись з базовими потенційними ринками, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення модифікованого подільника потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль для покращення ефективності роботи мікрохвильових пристроїв у високочастотному діапазоні.	Радіолокація	Покращення функціональних можливостей пристроїв, які використовують міліметровий діапазон, завдяки оптимізованому подільнику потужності.
	Телекомунікації	Зменшення втрат сигналу та перешкод, що призводить до стабільної роботи системи зв'язку
	Радіозв'язок	Створення нових можливостей для наукових досліджень та експериментів у високочастотному міліметровому діапазоні.

Після визначення потенційного ринку, основним завданням є аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів.

В таблиці 5.2 показано чим дана ідея відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Laird Technologies	Analog Devices	Infineon Technologies			
1	Висока ізоляція між вихідними портами	Є	Є	Є	Є		+	
2	Робота в міліметровому діапазі довжин хвиль	Є	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє			+
3	Компактний та ефективний	Є	Є	Є	Є			
3	Залежність від фінансування	Є	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє	+		
5	Глобальна присутність	Немає	Є	Є	Є	+		

В таблиці 2 літери W, N, S розшифровуються як:

W – слабка сторона;

N – нейтральна сторона;

S – сильна сторона.

b. Технологічний аудит стартапу

В межах даного підрозділу буде проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Для визначення технологічної здійсненності ідеї проекту необхідно дати відповідь на наступні питання:

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Результати проведеної роботи занесені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка ефективного і надійного подільника потужності для міліметрового діапазону довжин хвиль	Подільник потужності	Наявна	Доступна
2		Трансформатори потужності та резистивні елементи	Наявна	Доступна

c. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Наступним кроком буде визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Даний пункт дозволить спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	На східно-європейському ринку є 1 головні гравці це Infineon Technologies (Німеччина)
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум. од	500 грн ум. од
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	• Технічні виклики • Безпека • Залежність від фінансування
5	Специфічні вимоги до стандартизації	Широкосмугова робота Низькі втрати потужності Відповідає вимогам щодо безпеки, надійності та ефективності

На східно-європейському ринку є попит на подільники потужності Вілкінсона. На ньому працює один основний гравець, але є і ряд дрібних компаній, які пропонують конкурентні продукти. Для успіху стартапу на цьому ринку важливо мати чітке розуміння своїх конкурентних переваг. Ці переваги можуть включати: нижчі ціни, кращі характеристики продукту, більш широкий спектр застосувань.

Ринок подільника потужності Вілкінсона в Україні знаходиться на початковій стадії розвитку. Однак, темпи його зростання є високими. Загальний обсяг продажів подільників потужності Вілкінсона на східно-європейському ринку становить близько 500 млн грн на рік.

Модифікований подільник потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль може бути націлений на такі аудиторії:

Промислові підприємства можуть використовувати його для точного розподілу потужності міліметрових хвиль між різними приймачами. Це може допомогти їм підвищити ефективність своїх промислових систем.

Наукові установи можуть використовувати його для проведення більш точних експериментів з міліметровими хвилями.

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба в високоефективних подільниках потужності міліметрового діапазону довжин хвиль	Виробники радіолокаційної техніки	Висока ефективність, низькі втрати, малі габарити, висока надійність
2	Необхідність розподілу потужності в міліметровому діапазоні довжин хвиль	Виробники обладнання для зв'язку та передачі даних	Висока ефективність, низький рівень шуму, компактні розміри, низька вартість
3	Застосування міліметрового діапазону довжин хвиль в інших галузях	Розробники систем безпеки, медицини, промисловості	Специфічні вимоги, що залежать від галузі застосування

Наступним кроком проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблицю факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.6, 5.7).

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Технологічні зміни	Швидкий розвиток технологій у галузі	Активна діяльність у галузі досліджень та розробок,
2	Фактори ринку	Нестача попиту на подільники потужності міліметрового діапазону довжин хвиль	Розробка маркетингової стратегії, спрямованої на залучення клієнтів
3	Залежність від фінансування	Розвиток власного продукту та його створення може вимагати великої суми фінансування для стартапу. Без достатніх фінансових ресурсів стартапу важко досягти поставлених цілей	Для здобуття фінансування стартап може використовувати різноманітні джерела, зокрема, державні гранти або приватні інвестиції через онлайн-сервіси

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Технологічні досягнення	Використання новітніх технологій Вілкінсона для розробки подільника потужності в міліметровому діапазоні довжин хвиль	Внесення інновацій у продукт, щоб забезпечити конкурентоспроможність
2	Фінансова підтримка	Отримання інвестицій та фінансової підтримки для ведення досліджень, розробки та масового виробництва	Розробка ефективної стратегії привертання інвестицій та фінансування

Продовження таблиці 5.7.

3	Ринковий попит	Зростання попиту на технічні рішення для міліметрового діапазону довжин хвиль у зв'язку з розвитком високочастотних застосувань	Зосередження на розробці продукту, що задовольняє потреби ринку

Визначимо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика.	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною).
Рівень технологічності конкурентів	Вплив на швидкість інновацій та якість продукці.	Небезпека втрата клієнтів.Інвестиції в дослідження і розробку, партнерства для обміну технологій.
Розмір і фінансовий стан конкурентів	Можливість конкурсів з великим бюджетом.	Обмеження у рекламі та маркетингу, труднощі в залученні інвестицій. Фокус на регіональних ринках, пошук альтернативних джерел фінансування.
Висока залученість клієнтів	Клієнти вимагають високої якості продуктів та послуг.	Необхідно фокусуватися на потребах клієнтів, пропонувати високоякісні продукти та послуги.
Концентрація ринку	Ринок концентрований,кілька основних гравців контролюють значну частку ринку.	Розробити стратегію, яка дозволить конкурувати з основними гравцями. Надання високоякісних послуг або розробку унікальних продуктів і послуг.

Продовження таблиці 5.8.

Бар'єри на ринку	Бар'єри для входу на ринок є відносно високими.	Розробити стратегію, яка дозволить захистити свій бізнес від конкурентів. Розробка унікальних продуктів і послуг або створення партнерських відносин з іншими компаніями.

На ринку присутня конкуренція, і треба добре планувати, щоб бути кращими за інших. Якщо інші компанії використовують нові технології, треба і самим інвестувати в вдосконалення та розробку. Клієнти завжди хочуть відмінної якості продукти і послуги, отже важливо їм відповідати.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.9).

Стартап може зіткнутися з конкуренцією з боку різних компаній, де присутні великі гравці з великими ресурсами та досвідом. Однак аналіз світового ринку вказує на наявність можливостей для розвитку, оскільки немає значущих обмежень та існує відкрите поле для створення інновацій та задоволення ринкових потреб. Успіх стартапу буде залежати від вдалого поєднання стратегічного управління, ефективності конкуренції та здатності задовольняти вимоги ринку через якісний продукт та високий рівень обслуговування.

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари – замінники
	На ринку присутні кілька великих гравців, таких як Infineon Technologies, Schneider Electric. Ці компанії мають значні ресурси та досвід, що дозволяє їм конкурувати.	Компанії з інших галузей, які можуть вирішити вийти на ринок.	Товар виготовлюється безпосередньо в компанії, і лише окремі його компоненти можуть бути придбані або замовлені окремо.	Мають достатній вибір пропози – цій	Єдиним товаром замінникм в даному випадку є товар конкурен – тів
Висновки	Зрозуміння сильних та слабких сторін конкурентів, використання власних переваг	Контро – лювати ринок	Постачальники не диктують умови роботи на ринку.	вибір, до кого піти, якщо товар, ціна не вла – штує.	Обмежень не має

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 5.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, вимог споживачів до товару та факторів маркетингового середовища визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 5.10).

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкуренто-спроможності	Обґрунтування
1	Ціна	Поділячі потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль є відносно недорогими в порівнянні з іншими типами поділювачів потужності, такими як поділювачі на основі феритових кільців або поділювачі на основі діодів. Це завдяки тому, що поділювачі Вілкінсона використовують відносно просту схему, яка не вимагає дорогих матеріалів або складних технологій виробництва.
2	Пристосованість до конкретних потреб	Поділювачі потужності Вілкінсона можуть бути легко налаштовані для задоволення конкретних потреб. Це можна зробити, змінюючи співвідношення поділу або частотну характеристику. Це робить їх придатними для широкого спектру застосувань, таких як бездротові мережі, радіолокація та зв'язок.

Продовження таблиц 5.10.

3	Відносна легкість впровадження на місцях	Поділювачі потужності Вілкінсона відносно легко встановлювати та експлуатувати на місці. Це завдяки тому, що вони не вимагають складних налаштувань або обслуговування. Це робить їх привабливими для застосування в ситуаціях, де установка та обслуговування поділювача потужності є складними або дорогими.

На додаток до цих факторів, стартап подільника потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль може також конкурувати за рахунок:
високої якості та надійності. Стартап може запропонувати широкий спектр опцій для поділювачів потужності Вілкінсона, щоб задовольнити різні потреби клієнтів. Це може включати різні співвідношення поділу, частотні характеристики, типи підключення та інші функції. За допомогою цих факторів стартап подільника потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль може позиціонувати себе як конкурентоспроможний гравець на ринку.

За визначеними факторами конкурентоспроможності виконаємо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту «Модифікований подільник потужності Вілкінсона міліметрового діапазону довжин хиль»

№	Фактор конкуренто-спроможності	Бали 1-20	Рейтинг у порівнянні з подільниками потужності						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Ціна	17						+	
2	Пристосованість	12				+			
3	Легкість впровадження	18						+	

Перейдемо до фінального етапу ринкового аналізу можливостей впровадження проекту. Складемо матрицю аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей (табл. 5.12), на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11). Даний аналіз також ще називають SWOT-матрицею.

Таблиця 5.12. SWOT– аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Унікальна технологія. Подільник потужності міліметрового діапазону довжин хвиль має ряд переваг перед існуючими рішеннями. Він забезпечує більш високу ефективність, меншу втрату потужності та кращі характеристики шуму. Експертиза в технології довжини міліметрової хвилі. Унікальний дизайн або технологія. Потенціал для високої швидкості передачі даних.Технологія міліметрової довжини хвилі часто забезпечує високу швидкість передачі даних, що може бути перевагою в додатках, які потребують високошвидкісного зв’язку. Ринковий попит на пристрої міліметрової довжини хвилі.	Обмежені ресурси, зокрема фінансових, людських і технологічних. Це може обмежити масштаб і швидкість розвитку. Ринкова невизначеність, технології, що розвиваються, можуть мати непевне визнання на ринку. Можливо, ринок не готовий до рішень із довжиною хвилі міліметра, або впровадження може відбуватися повільно. Залежність від зовнішнього фінансування, стартап може зіткнутися з проблемами, якщо джерела фінансування обмежені або недоступні.

Продовження таблиці 5.12.

Можливості: Розгортання мереж 5G і зростання Інтернету речей (IoT) відкривають можливості для пристроїв з довжиною хвилі міліметра. Співпраця з визнаними гравцями в галузі може забезпечити доступ до ресурсів, каналів розподілу та довіру на ринку. Виявлення нішевих програм, де технологія міліметрової довжини хвилі може надати унікальні рішення, може стати ринковою можливістю.	Загрози: Конкуренція з боку відомих компаній. Відомі компанії, які виходять на ринок міліметрових хвиль зі своїми продуктами, можуть становити загрозу для стартапу. Проблеми з регулюванням і відповідністю. Дотримання норм і стандартів у міліметровому діапазоні хвиль може бути складним завданням і може становити загрозу для проекту. Швидкі технологічні зміни. Швидкі темпи технологічного прогресу можуть призвести до того, що поточні рішення швидко застаріють, створюючи загрозу довгостроковій життєздатності стартапу. Економічний спад. Економічні спади можуть вплинути на фінансування та знизити загальний попит на нові технології.

На основі SWOT-аналізу запуску дільника потужності Вілкінсона в міліметровому діапазоні можна зробити кілька ключових висновків:

Стартап повинен використати свій досвід у технології міліметрових хвиль, щоб стратегічно позиціонувати себе на ринку. Підкреслення унікального дизайну або технології дільника потужності Вілкінсона може бути ключовою перевагою.

Важливо регулярно стежити за динамікою ринку, потребами споживачів і технологічним прогресом. Цей постійний аналіз дозволить стартапу визначити нові можливості та відповідно розробити стратегії.

Підсумовуючи, для успішної реалізації проекту необхідно врахувати як сильні, так і слабкі сторони. Зокрема, важливо знайти джерела фінансування, які дозволять покрити високі витрати на розробку. Також необхідно наростити досвід у комерціалізації, щоб успішно просувати продукт на ринку. Крім того, необхідно стежити за розвитком конкурентів та технологій, щоб бути готовим до змін. Регулярна переоцінка факторів SWOT і відданість інноваціям сприятимуть довгостроковій стійкості та зростанню стартапу.

Визначені альтернативи проаналізуємо з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Перехід на міжнародний рівень	Невелика ймовірність отриманя ресурсів у міжнародних інвесторів	Від 1 до 3 місяців
2	Зменшення розмірів системи та розробка стандартизованих рішень для різних випадків використання подільника потужності, сприятливо вплине на попит серед клієнтів.	Достатня ймовірність отримання ресурсів у міжнародних інвесторів	Від 6 до 12 місяців

d. Розроблення ринкової стратегії проекту

Для розроблення ринкової стратегії першим кроком визначимо стратегію охоплення ринку. Для цього зробимо опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Урядові організації	Середня, подільники можуть використо - вуватися для забезпече - ння зв'язку в критичних інфраструктурах	Середній, попит на подільники потужності в цьому сегменті є меншим, ніж у інших	Середня, оскільки на ринку є лише кілька постачальни – ків подільників потужності	Висока, оскільки для входу в сегмент необхідно мати досвід

Продовження таблиці 5.14.

2	Науково-дослідні інститути та університети	Висока, оскільки подільники потужності є перспектив – ною технологією для досліджень і розробок	Середній, оскільки попит на подільники потужності в цьому сегменті є меншим, ніж у інших	Низька, оскільки на ринку є лише кілька постачальни – ків подільників потужності	Середня, оскільки треба розробити продукт, який буде відповідати їхнім потребам та високим стандартам якості
3	Професійні інженери та технічні спеціалісти	Висока, оскільки подільники потужності є перспектив – ною технологією для розробок та нових технологій.	Середній, оскільки попит постійно зростає. технології стають все більш складними, інженерам та технічним спеціалістам потрібні нові ресурси.	Висока, оскільки багато стартапів і великих компаній пропонують продукти та послуги для цієї цільової групи.	Середня, оскільки треба розробити продукт, який буде відповідати їхнім потребам та високим стандартам якості

За результатами аналізу потенційних груп споживачів в якості цільової групи було обрано одну групу а саме некомерційні організації, які працюють над подоланням цифрового розриву. Через присутність значних фінансових вливань.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформуємо базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Розробка нового продукту з унікальними властивостями	Спеціалізований маркетинг націлений на професійних інженерів та технічних спеціалістів	Висока ефективність, низька собівартість, висока надійність	Інноваційний розвиток
2	Надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей із концентрацією на одному.	Впровадження відмінного товару на ринок, який містить всі важливі з точки зору споживача властивості	Висока ефективність, низька собівартість, висока надійність	Розвиток нових ринків для продукту

6 ВИСНОВКИ

З виконаної роботи можна зробити наступні висновки

1. Теоретичний і чисельний аналіз, проведений в термінах теорії кіл і в середовищі програм електродинамічного аналізу показав, що класичний подільник потужності Вілкінсона обмежений у використанні частотами сантиметрового діапазону довжин хвиль
2. Запропонована в роботі топологія модифікованого подільника Вілкінсона, що не містить зосередженого резистора і позбавлена неоднорідностей МСЛ, характерних для топології класичного подільника потужності Вілкінсона, дозволила уникнути зазначених обмежень і придатна для роботи в міліметровому діапазоні.
3. Це підтвердилось результатами експериментального дослідження розробленого і виготовленого зразка.
4. Розроблений в роботі модифікований подільник Вілкінсона має вигляд гібридно-інтегральної схеми, не потребує жодних дій з налагодження зразка і може легко бути впроваджений у виробництво.

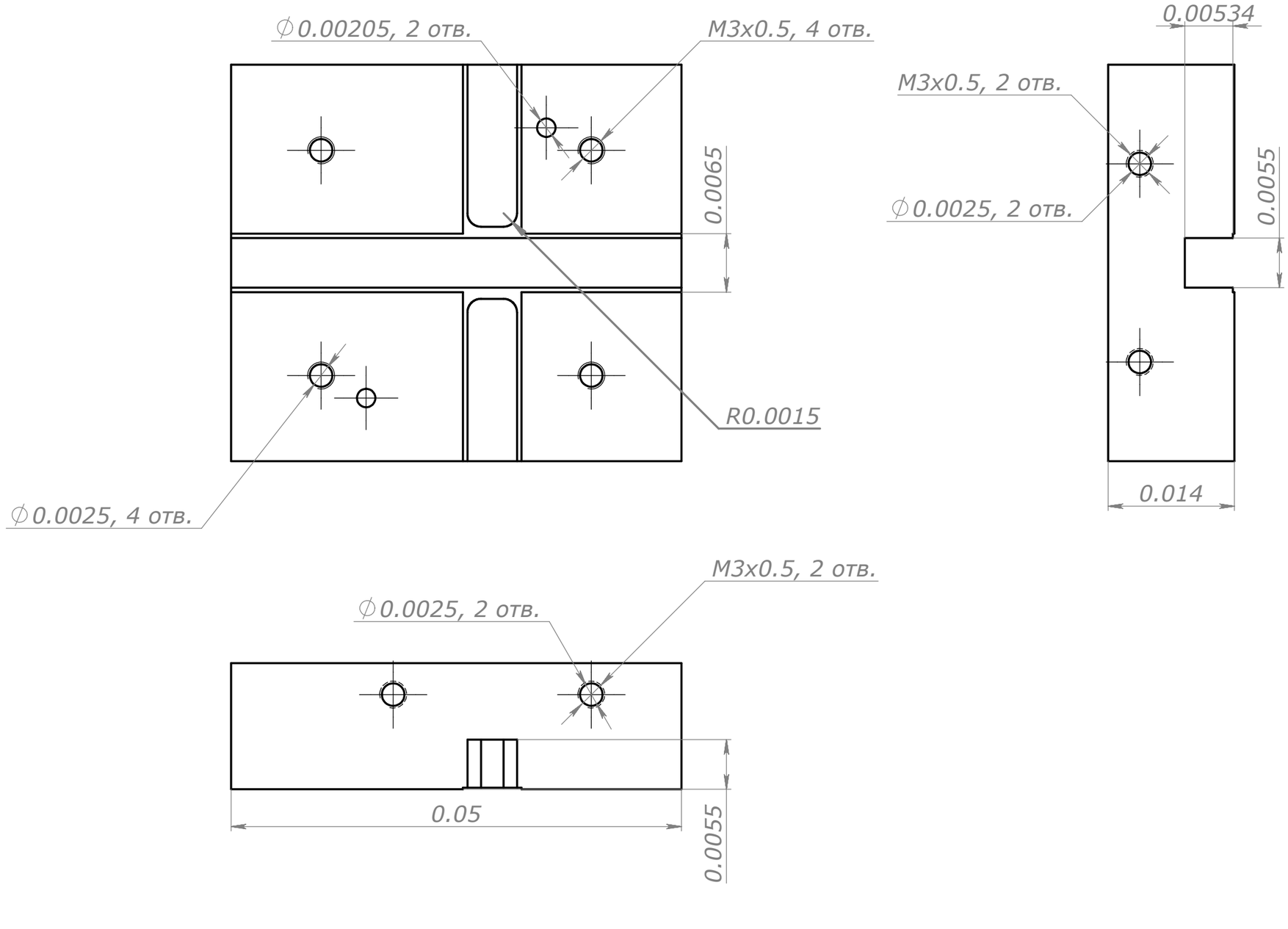
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. V. Schneider, "Microstrip lines for microwave integrated circuits," in *The Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 5, pp. 1421-1444, May-June 1969, doi: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb04274.x.
2. K. C. Gupta (Author), Ramesh Garg (Author), I. J. Bahl Microstrip Lines and Slotlines// Artech House, 1975. 377p.
3. RT/duroid ®5870-5880.https://rogerscorp.com › documents › english PDF
4. Lin Li and K. Wu, "Integrated planar spatial power combiner," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 4, pp.1470-1476, June 2006, doi: 10.1109/TMTT.2006.871360.
5. Microwave engineering/ David M. Pozar.—4th ed. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 978-0-470-63155 p.756. https://www.academia.edu/16822768/Microwave_Engineering_4th_Edition/
6. Омельяненко, М. Ю., & Туреева, О. В. (2017). Волноводно-щелевой 24-канальный делитель мощности Ku-диапазона с малыми потерями. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*, *61*(6), 318–322. https://doi.org/10.20535/S002134701806002X.
7. Gupta, K. C., Garg, R., & Chadha, R. (1981). Computer-aided design of microwave circuits. Artech.Bhat, B. , Koul, S.K. Analysis, Design, and Applications of Fin Lines. Artech House microwave library (1987). https://books.google.com.ua/books?id=8x1TAAAAMAAJ

ДОДАТОК А

Креслення

РСз21мп.621396.001 СК



					РСз21мп.621396.001 СК		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Камера МПУ	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Гавриш К.О.					0.21	
Перев.		Гавриш О.Г.				Лист	Листів	
Т. контр.								
Н. контр.								
Затв.		Турєєва О.В.						

Перш. використ.

Справ. №

Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

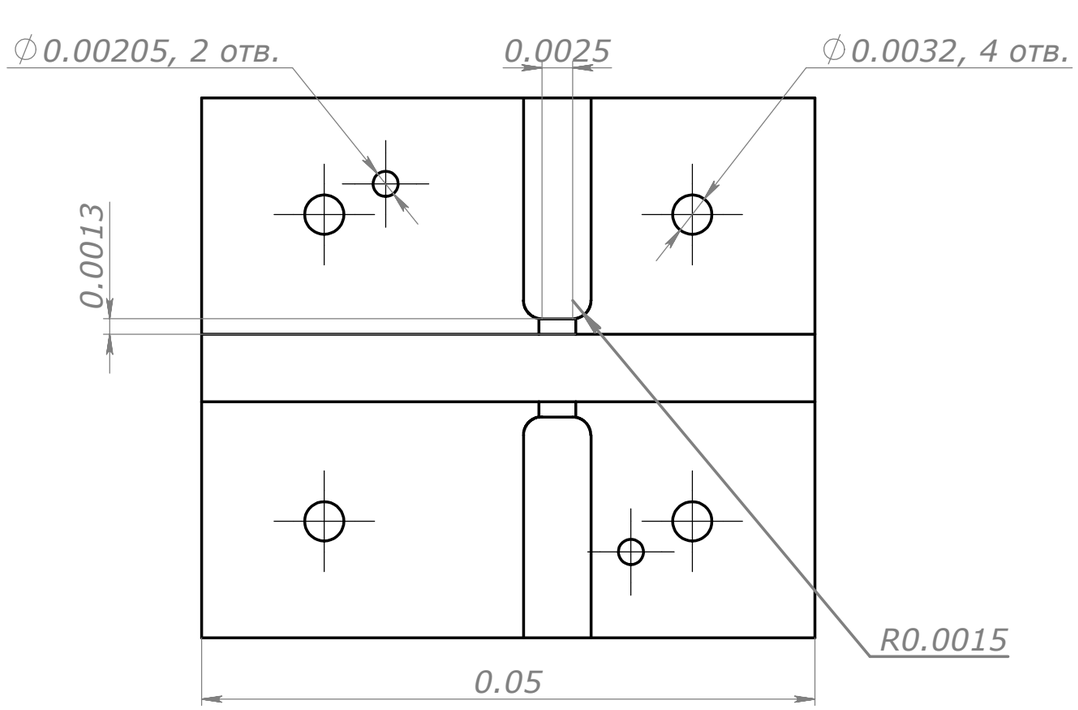
Інв. № подл.

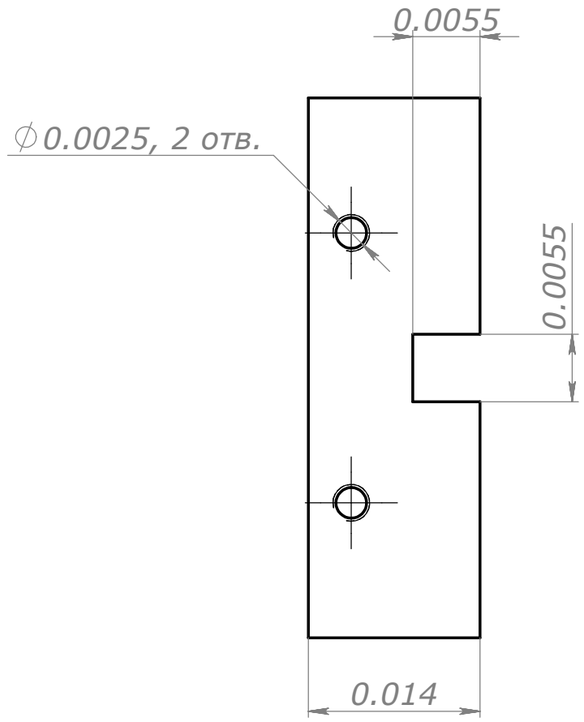
Файл: КАМЕРА МПУ_1

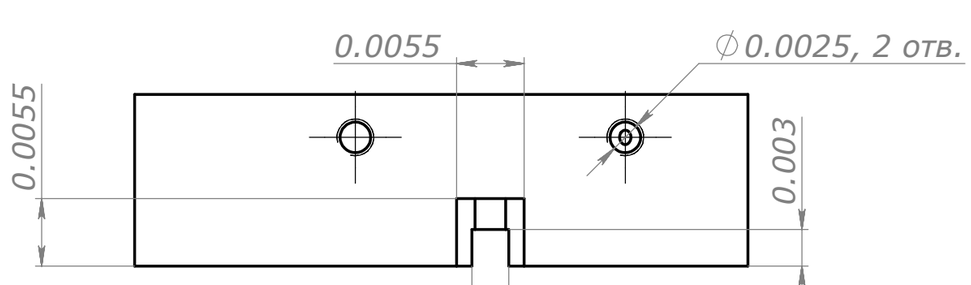
Формат А3

Копіював

РСз21мп.621396.002 СК







					РСз21мп.621396.002 СК		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Камера МПУ	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Гавриш К.О.					0.21	
Перев.		Гавриш О.Г.				Лист	Листів	
Т. контр.								
Н. контр.					⋮		
Затв.		Турєєва О.В.					

Перш. використ.

Справ. №

Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № подл.

Файл: КАМЕРА МПУ_2

Копіював

Формат А3

ДОДАТОК Б

Тези

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА В XXI СТОЛІТТІ

Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіоелектроніка в XXI столітті»
10 – 12 травня 2023
Київ, Україна

Київ — 2023

СЕКЦІЯ 4. РАДІОТЕХНІЧНІ КОЛА ТА СИГНАЛИ. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА. ПРИСТРОЇ НВЧ ДІАПАЗОНУ ТА АНТЕННА ТЕХНІКА

Гавриш К. О. (керівник Турєєва О. В.) Модифікований подільник потужності уілкінсона міліметрового діапазону довжин хвиль	106
Жердєв М. В. (керівник Омеляненко М. Ю.) Гібридно-інтегральний імітатор допплерівського зсуву міліметрового діапазону	109
Задорожний Г. С. (керівник Василенко Д. О.) Моделювання розумної реконфігурованої повехні міліметрового X-BAND діапазону частот	111
Кулаєв В. В. (керівник Турєєва О. В.) Хвилеводно-планарний фільтр з придушенням смуги пропускання вищого порядку	114
Парфило І. О. (керівник Богомолов М. Ф.) Широкосмугова антиподальна антена вівальді для мікрохвильової системи виявлення раку молочної залози	117
Покоюк В. О. (керівник Омеляненко М. Ю.) Гібридно-інтегральний субгармонічний змішувач міліметрового діапазону довжин хвиль	119

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК АВТОРІВ 121

МОДИФІКОВАНИЙ ПОДІЛЬНИК ПОТУЖНОСТІ УІЛКІНСОНА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Гавриш К. О.
(Науковий керівник Турєєва О. В., старший викладач)
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Радіотехнічний факультет

Подільник потужності Уілкінсона (рис.1) - класичний елемент інтегральної технології, що часто використовується при проектуванні НВЧ систем. В гібридно-інтегральних пристроях діапазон їх застосування зазвичай обмежується частотами короткохвильової частини сантиметрового діапазону, що пов'язано з крайовими ефектами у мікросмужкових лініях (МСЛ) в точках підключення баластного резистора $R_б$.

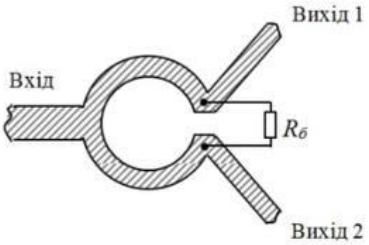


Рисунок 1 – Подільник потужності Уілкінсона на МСЛ

Дійсно, еквівалентна схема розриву провідника МСЛ (рис. 2) містить реактивності, що показують накопичення зарядів на торцях лінії.

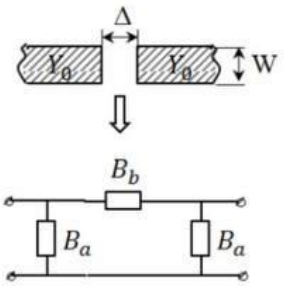


Рисунок 2 – Еквівалентна схема розриву провідника МСЛ

Величини цих реактивностей можуть бути оцінені з наступних співвідношень [1]:

$$B_a/Y_0 \approx \frac{2d}{\lambda} ln\left[ch\left(\frac{\pi\Delta}{d}\right)\right],$$
$$B_b/Y_0 \approx \frac{d}{\lambda} ln\left[cth\left(\frac{\pi\Delta}{d}\right)\right].$$

Зокрема, на частоті 25 ГГц при типових параметрах підкладинки МСЛ ε=2,2, *d*=127 мкм і зазорі Δ=300 мкм маємо

$$B_a/Y_0 \approx 0{,}201$$

$$B_b/Y_0 \approx 1{,}8 \cdot 10^{-5},$$

Так, що шунтуючі резистор провідності достатньо великі, щоб позначитися на поведінці подільника, у якому нормована величина провідності резистора повинна складати

$$1/(R_б Y_0) \approx 0{,}5$$

Це призводить до значного погіршення розв'язки між виходами подільника і збільшенню КСХ зі входу навіть при використанні резисторів з малими паразитними параметрами.

В роботі пропонується змінити вихідну топологію подільника Уілкінсона так, щоб уникнути дії зазначених явищ, виключити неминучий вплив паразитних параметрів резистора, і, таким чином, зробити можливим використання подільника на частотах міліметрового діапазону довжин хвиль. Топологія нового запропонованого подільника потужності показана на рис. 3.

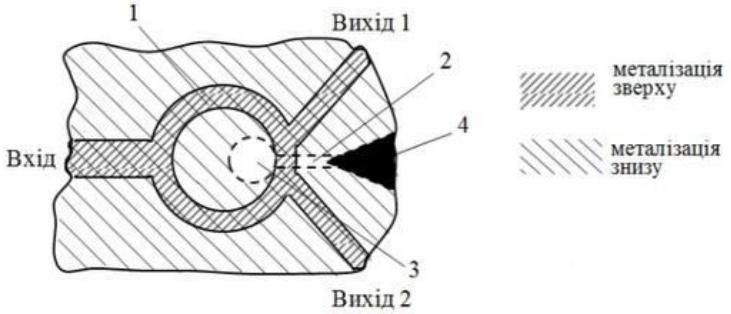


Рисунок 3 – Модифікована топологія подільника потужності на МСЛ

Видно,що подільник містить напівхвильове суцільне по всій довжині кільце сигнального провідника МСЛ з хвильовим опором $Z_0/\sqrt{2}$ і щілинну лінію 2, розташовану на зворотній стороні підкладинки МСЛ. Щілина лінії 2 перетинає проекцію сигнального провідника посередині довжини кільця. Щілинна лінія з боку області МСЛ закінчується круглим отвором 3 в металізації, а поза цієї області - поглиначем 4. Відомо [2], що круглий отвір в металізації щілинної лінії ефективно імітує режим холостого ходу цієї лінії, що і необхідно для її оптимального збудження зі сторони МСЛ. З іншого боку очевидно, що збудження щілинної лінії відбувається лише зі сторони виходів подільника, що і забезпечує їх розв'язку, оскільки хвильовий опір щілинної лінії обирається рівним $2\ Z_0$, а її вихід навантажений на узгоджене навантаження (поглинач).

Ефективність запропонованої конструкції подільника підтверджується її розрахунком в пакеті програм електродинамічного аналізу CST Microwave Studio, рис. 4. Розрахунки проведені для МСЛ з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом, підкладинки товщиною 127 мкм і діелектричною сталою, рівною 2,2. Видно, що подільник забезпечує коефіцієнт передачі мінус 3±0,2 дБ і розв'язку не гірше 12 дБ в усьому робочому діапазоні прямокутного хвилевода перерізом 11x5,5 мм.

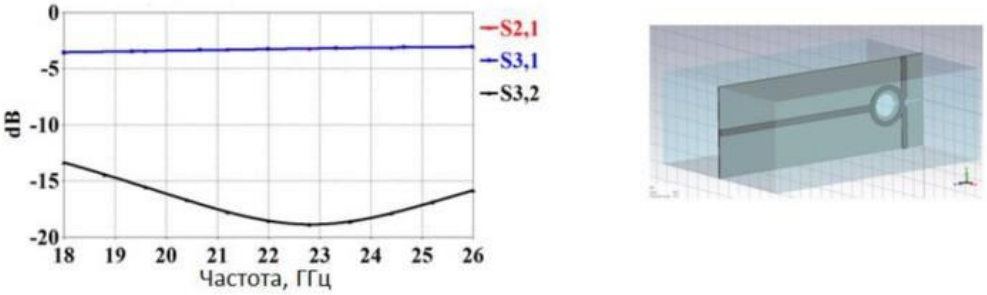


Рисунок 4 – Характеристики розробленого подільника потужності

Таким чином, запропонована реалізація мікросмужкового подільника потужності дозволяє розширити діапазон використання класичного подільника потужності Уілкінсона в область міліметрових довжин хвиль при зберіганні високого значення розв'язки між вихідними портами.

Література

1. Gupta, K. C., Garg, R., & Chadha, R. (1981). Computer-aided design of microwave circuits. Artech.

2. Bhat, B. , Koul, S.K. Analysis, Design, and Applications of Fin Lines. Artech House microwave library (1987). https://books.google.com.ua/books?id=8x1TAAAAMAAJ