

Міністерство освіти і науки України
 Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 (повне найменування вищого навчального закладу)
 Факультет прикладних інформаційних технологій і електроінженерії
 (назва факультету)
 Кафедра радіотехнічних систем
 (повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА до кваліфікаційної роботи

Магістр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Методи проектування хвилевідних
фазоповертачів НВЧ діапазону

Виконав: студент (ка) 6 курсу, групи РРм-61
 спеціальності (напряму підготовки) 172

“Телекомунікації та радіотехніка”

(шифр і назва спеціальності (напряму підготовки))

Керівник

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
Кафедра Радіотехнічних систем
Освітній ступінь Магістр
Напрямок підготовки _____
(шифр і назва)
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 2020__ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Лубянецький Назар Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Методи проектування хвилевідних фазоповертачів
НВЧ діапазону»

Керівник проекту (роботи) к.т.н., старший науковий співробітник, доцент кафедри РТ Умзар Ю.А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «_____» _____ 201__ року № _____

2. Термін подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальна частина</i>			
<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>			
<i>Обґ-ння економічної ефективності</i>			
<i>Екологія</i>			

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
	<i>Отримання завдання</i>		
	<i>Спеціальна частина</i>		
	<i>Обґрунтування економічної ефективності</i>		
	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>		
	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>		
	<i>Оформлення графічної частини</i>		
	<i>Попередній захист</i>		
	<i>Захист</i>		

Студент _____
(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лубянецький Н.В. Методи проектування хвилевідних фазоповертачів НВЧ діапазону.-Рукопис. Кваліфікаційна робота магістра, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2020.

У магістерській роботі дослідження хвилеводних фазоповертачів НВЧ діапазону на основі аналізу уже існуючих прототипів (наукові статті, конференції, патенти, результати досліджень) та проведення власних досліджень спроектованих фазоповертачів різних конструктивних виконань даного типу. Також здійснювалось дослідження радіотехнічних характеристик хвилевідних фазоповертачів механічного та електромеханічного типів (коефіцієнт стоячої хвилі, частотний діапазон, рівень динамічних втрат електромагнітних хвиль).

Ключові слова: хвилевідні фазоповертачі, надвисокі частоти, коефіцієнт стоячої хвилі, С-діапазон, частотний діапазон, коефіцієнт стоячих хвиль.

ANNOTATION

Lubyanetsky NV Methods of designing microwave waveguides for microwave band. - Manuscript. Master's qualification work, Ternopil National Technical University Ivan Puliuy University, Ternopil, 2020.

In the master's work the research of microwave waveguides of the microwave band on the basis of the analysis of already existing prototypes (scientific articles, conferences, patents, research results) and carrying out own researches of the designed phase rotators of various constructive performances of this type. Radio-technical characteristics of waveguide phase-shifters of mechanical and electromechanical types (standing wave ratio, frequency range, level of dynamic loss of electromagnetic waves) were also investigated.

Keywords: wave-phase rotators, ultra-high frequencies, standing wave factor, C-band, frequency range, standing wave factor.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕМХ – електро-магнітна хвиля;
ФО – фазообертач;
АХП – антенно-хвильоводний пристрій;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ДФС – диференціально фазовий зсув;
Ке – коефіцієнт еліптичності;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі;
НВЧ – надвисокі частоти;
РЛС – радіолокаційна система;
ФЧХ – фазово - частотна характеристика;
ЧД – частотний діапазон.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Фазообертач, загальне призначення	
1.2 Широкосмуговий фазовий хвилеводний фазообертач.....	
1.3 Хвилеводний фазообертач	
1.4 Хвилеводний фазообертач, як відрізок прямокутного хвилеводу	
1.5 Висновок до розділу 1.....	
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	
2.1 Метод математичного аналізу лінійних НВЧ пристроїв	
2.2 Хвильові матриці чотириполюсника	
2.3 Розрахунок фазообертача..	
2.4 Висновок до розділу 2.....	
РОЗДІЛ 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	
3.1 Призначення, класифікація фазуючих пристроїв.....	
3.2. Механічний коаксіальний тромбонного типу.....	
3.3. Фазообертачі на основі мостових пристроїв	
3.4. Хвилеводні фазообертачі з діелектричними пластинами і металевими вставками	
3.5. Електронно-керовані діодні аналогові й дискретні фазообертачі	
3.6. Дискретні фазообертачі відбивного типу	
3.7. Феритові НВЧ прилади – фазообертачі.....	
3.8. Висновки до розділу 3.....	
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	

4.1 Підвищення стійкості роботи об'єктів радіотехнічної галузі у воєнний час

4.2 Трудові норми Міжнародної організації праці. Конвенції та Рекомендації МОП. Основні Конвенції МОП в галузі охорони праці.....

4.3 Висновки до розділу 4.....

ВИСНОВКИ.....

БІБЛІОГРАФІЯ.....

ДОДАТКИ.....

ВСТУП

Актуальність теми. Великі об'єми інформації заставляють максимально ефективно використовувати наявні частотні діапазони у широких та над широких смугах робочих частот, ортогональні лінійні та кругові площини поляризації. Для оптимізації цих величин у системах зв'язку ефективно використовуються на першому етапі обробки інформації (селекції поляризаційних та частотних діапазонів) фазоповертачі, які є складовими частинами хвилевідних антенних трактів. Це дає можливість повністю використати весь робочий частотний спектр і різні поляризації.

Ці модернізовані вузли використовуються практично у всіх системах зв'язку, для передачі та прийому інформації в супутникових та радіорелейних цифрових системах.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи проектування (модернізація під нові задачі) та дослідження технічних характеристик хвилевідних фазоповертачів НВЧ, створених на основі прямокутних хвилеводів конструктивного виконання на основі діелектричних фазозатримуючих секцій та стрижнів для підлаштування технічних характеристик (фазової та групової швидкості електромагнітних хвиль).

Задачі досліджень:

1. аналіз радіотехнічних характеристик спроектованих прототипів фазоповертачів;
2. дослідження КСХн спроектованого та виготовленого фазоповертача у двох режимах роботи;
3. дослідження динамічних втрат фазоповертача;
4. перевірка роботи фазоповертача при перемиканні положень діелектричної пластини;

5. аналіз та порівняння технічних характеристик спроектованого фазоповертача з існуючими прототипами.

Об'єктом дослідження є дослідження широкосмугових хвилевідних механічних та механоелектричних фазоповертачів на основі аналізу уже існуючих прототипів (наукові статті, конференції, патенти, результати досліджень) та проведення власних досліджень спроектованих фазоповертачів даного типу.

Предметом дослідження є вимірювання та дослідження радіотехнічних характеристик хвилевідних широкосмугових механічних та механоелектричних фазоповертачів (коефіцієнт стоячої хвилі, частотний діапазон, рівень динамічних втрат електромагнітних хвиль).

Методи дослідження. За стандартними методиками вимірювань проводились вимірювання радіотехнічних характеристик фазоповертачів на лабораторних стендах.

Проводились дослідження впливу різної довжини стрижнів, різних діелектричних пластин для визначення рівня затримки фазової складової.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні результати, що становлять наукову новизну та отримані у ході вирішення завдань, поставлених у дослідженні, полягають в наступному:

створено різні конструктивні варіанти механічного та механоелектричного фазоповертача на фіксовані кути повороту електромагнітної хвилі;

Практичне значення одержаних результатів. Розраховано конструкції механічного та механоелектричного фазоповертачів з метою максимального використання ширини частотного спектру, мінімізації коефіцієнту стоячої хвилі, динамічних втрат, повороту електромагнітної хвилі на 90 кут. градусів ортогональної лінійної поляризації. Використано у відповідності до рекомендацій Регламенту радіозв'язку робочі частотні діапазони.

Публікації. Апробація та оприлюднення результатів досліджень відбулось на VIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та

студентів ”Актуальні задачі СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ” 27-28 листопада 2019 року у м.Тернопіль, Україна.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків, переліку посилань та додатків. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – арк. формату А4 та додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Фазообертач, загальне призначення.

Фазообертач - це пристрій, елемент тракту НВЧ, який служить для зміни фаз електромагнітних коливань. Фазоповертач використовується в вимірювальній та перетворювальній техніці, а також в автоматичі. Конструкція фазоповертача змінюється в залежності від призначеного діапазону частот, меж фазових змін і точності установки пристрою. Фазоповертач, що використовується в діапазоні радіочастот і на низьких частотах, являє собою чотириполіусник. Чотириполіусник складається з індуктивності, ємності і опору.

Фазообертач застосовується в системах з великою кількістю споживачів, щоб забезпечити необхідний розподіл фаз до сигналів, а також в радіосистемних фідерах, вирівнюючи електричні довжини фідера. Крім цього, фазообертач використовується в фазованих антенних решітках, різних когерентних радіосистемах і інших пристроях надвисоких частот техніки.

Фазообертачі за типом хвиль діляться на прохідні і відбивні. За фізичним принципом розрізняються механічні, електромеханічні і електричні пристрої. За зміною фази фазоврацатели бувають з дискретним зміною або плавною зміною.

Найпростішим фазообертачем є ланцюг, що рухає фази, яку складають котушка індуктивності і резистор або конденсатор і резистор. Подібний фазообертач застосовується при фазовому зсуві, який дорівнює $0-90^\circ$. Більш складним за конструкцією вважається фазообертач, що має вигляд бруківки ланцюга з конденсатором і трьома резисторами. Якщо вихідний сигнал мало мінливий, то резистори і конденсатор регулюють зрушення фаз від 0 до 180° .

Ламповий, або транзисторний бруківці фазообертач становить фазоінвертор з розділеним навантаженням, за рахунок якого фаза зсувається на 180° . Всі фазові зрушення в будь-яких фазоврацателях залежать від частоти. І тільки в стежить фазоврацателе при відхиленні зсуву від певного положення параметри міняються автоматично, зменшуючи відхилення.

У колі змінного струму з промисловою частотою фази регулює обертається трансформатор, сельсина, і, крім того, асинхронні електродвигуни з трьома фазами, у якого ротор загальмований. У короткохвильових діапазонах і діапазоні дециметрових хвиль застосовуються фазообертачі, які виготовляються з хвилеводів і декількох відрізків коаксіальних ліній. Фаза встановлюється з похибкою, яка залежить від виду фазообертача. В електронних пристроях похибка становить $0,05-0,1^\circ$, в електромеханічних пристроях - $0,5-1^\circ$.

У фазообертачі НВЧ фаза електромагнітних коливань змінюється на виході передачі НВЧ, це можуть бути радіохвильовід або полоскова лінія. Вихідна фаза змінюється щодо вхідній фази коливань за рахунок зміни електричної довжини лінії. Подібні фазообертачі діляться на регульовані і нерегульовані.

Регульований фазообертач являє собою ділянку фідера, який вносить зсув фази на конкретній частоті або смузі частот, регульований по необхідності. Функції регульованого фазообертача з механічним або електромеханічним управлінням зрушенням фази виконують розсувні секція, відрізок хвилеводу, сжимная секція і бруківці фазообертач. Один з них має вигляд розсувної секції коаксіальної лінії, яка може регулюватися. Також до подібного типу належить хвилеводний діелектричний фазообертач, що виглядає як відрізок хвилеводу. Відрізок містить в собі переміщувану діелектричну пластину, управління фазовим зрушенням ґрунтується на зміні положення пластини з діелектрика і фазової швидкості хвилі. Сжимная секція, або відрізок хвилеводу прямокутної форми, має вузькі стінки з пружними підвісками, які змінюють ширину хвилеводу. Мостовий фазообертач являє собою хвилевідний або коаксіальний

пристрій НВЧ з декількома плечима. Мостовий фазообертач забезпечений двома короткозамкненими шлейфами, які однаково змінюються за своєю довжиною і вважаються спрямованими відгалужувачами. До регульованих хвилевід них фазоповертачів з електричним керуванням відносяться фазообертачі з феритовими пристроями, напівпровідниковими елементами, діелектричними пристроями, плазовими пристроями і з сегнетоелектриків. Робота хвилевід них фазоповертачів з феритовими пристроями базується на взаємодії магнітних моментів феритових підрешіток з електромагнітними хвилями.

Феритові взаємні фазоповертачі забезпечують однаковий зсув фаз у всіх напрямках поширення хвиль.

Феритові невзаємні фазоповертачі мають вигляд та відносяться до НВЧ пристроїв типу гіратори. Фазообертачі з напівпровідниковими елементами є варикапи, а найперспективнішими вважаються фазообертачі з напівпровідниковими діодами р-і-n-структури, які застосовуються як комутаційні елементи.

Напівпровідникові діоди змінюють зсув фази поступово, використовуючи пряму зміну або підключення до лінії набору шлейфів через діоди.

Нерегульований фазообертач є калібрований по фазі відрізок фідера, який реалізує зсув фази, підбираючи значення довжини, розмірів поперечного перерізу або проникності діелектриків.

1.2 Ширококутовий фазовий хвилеводний фазоповертач.

Даний винахід відноситься до хвильового фазоперетворювача і, більш конкретно, до фазообертача, що має складову структуру з послідовних і паралельних ємнісних елементів, їх введення компенсує частотну дисперсію.

Фазообертачі хвильові часто використовуваних в НВЧ схемах для зміщення фази електромагнітного сигналу в одній частині ланцюга щодо такого сигналу в іншій частині ланцюга. На фазообертачі потрібно ввести фазовий

зсув 90° або інше значення фазового зсуву, як це потрібно для виконання функції НВЧ ланцюга.

Вимога НВЧ ланцюга - здатність працювати в заданому діапазоні частот. У разі відносно вузьких вимогам групи. В даний час доступні фазообертачі, як правило, досить точні, щоб забезпечити необхідний обсяг фазовий зсув на всіх частотах в робочій смузі.

Винахід має складову структуру з послідовно і паралельно ємнісних елементів, кожен з яких вводить фазовий зсув. Серія ємнісних елементів не чутливі до частоти, тому фазовий зсув змінюється в залежності від частоти відповідно до частоти дисперсійні характеристики. Паралельні ємнісні елементи також вводять фазовий зсув, який змінюється з частотою відповідно до частоти дисперсійної характеристики. Фізично розміри і розташування послідовних і паралельних ємнісних елементів підібрані таким чином, що перший і другий дисперсійні характеристики, по суті, врівноважують один одного таким чином, щоб забезпечити зрушення фази, частота. Таким чином, фазообертач винахід може бути використано в СВЧ ланцюга для роботи в широкому діапазоні частот.

З посиланням на рисунок 1,1, 1,2 і 1,3, там показаний фазообертач 10 для електромагнітної енергії. Фазообертач 10 утворюється в хвилеводі 12, що має прямокутний перетин, утворений з двох широких стінок, верхню стінку 14 і нижню стінку 16, які з'єднані один з одним короткими бічними стінками 18. Хвилевід 12 підтримує поперечну електричну хвиля з електричним полем паралельно короткій стінці 18. Фазообертач 10 взаємний, так що електромагнітна енергія може входити з обох кінців хвилеводу 12, що розповсюджуються вздовж центральної осі хвилеводу, а вихід на протилежному кінці хвилеводу. Фазообертач 10 виготовлений з металу, такого як латунь або алюміній, щоб забезпечити електропровідність в стінах оною.

Відповідно до винаходу, фазообертач 10 складається з верхнього фазообертача 20, розташовані на внутрішній стороні верхньої стінки 14, і нижній фазообертач 22, розташовані на внутрішній стороні нижньої стінки 16.

Верхній фазообертач 20 включає в себе серію з дев'яти постів 24, що проходить від верхньої стінки 14, на півдорозі до нижньої стінки 16, нижній фазовий зсув 22 включає в себе 26 хребет, який простягається від нижньої стінки 16 на півдорозі до вершини стіни 14. Серія торців 24 і 26 хребта розташовані діаметрально один навпроти одного на протилежних сторонах хвилеводу 12, простягаються паралельно осі хвилеводу 12, і знаходяться на лінії центрів відповідних широких стінок 14 і 16.

Кожен з торців 24 вводить фазовий зсув приблизно -5° , на загальний вклад всі дев'ять торців 24 номінальною значення близько -45° . Хребет 26 вводять фазовий зсув, який має номінальне значення близько -45° . Серія торців 24 забезпечують додатковий фазовий зсув, який зростає зі збільшенням частоти електромагнітної енергії. Хребет 26 забезпечує додатковий фазовий зсув, який зменшується зі збільшенням частоти електромагнітної енергії, поступовий зсув фази на додаток до номінального значення фазового зсуву. Темпи зростання зсуву фази проводиться по постам 24, в залежності від частоти, дорівнює і протилежна швидкості зменшення фазового зсуву проводиться по хребту 26. Таким чином, при поєднанні зсуву фаз серії торців 24 і хребта 26, по суті, постійне значення -90° досягається для всіх значень частоти в робочому діапазоні фазообертача 10 у кращому варіанті винаходу, розширюється робоча смуга в частотному діапазоні 11 ГГц (гігагерц) до 15 ГГц.

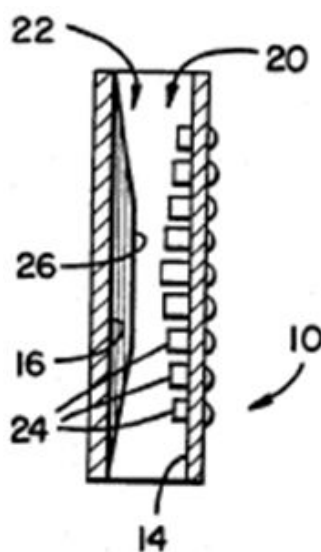


Рисунок 1.1 Вид збоку фазообертача в розріз по лінії;

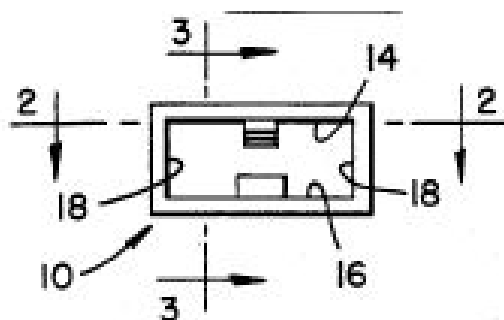


Рисунок 1.2 Вид з торця хвилеводу

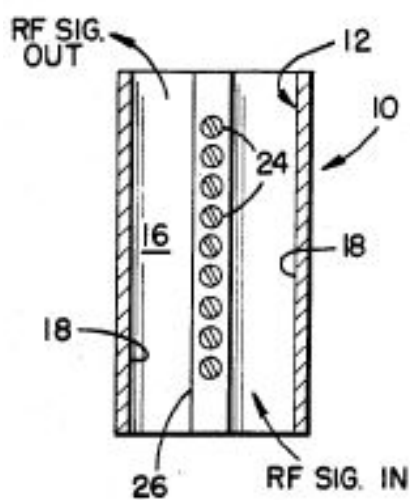


Рисунок 1.3 Вид зверху в розріз по лінії

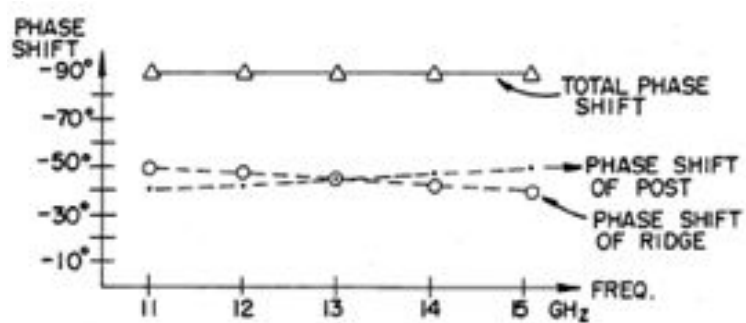


Рисунок 1.4 Графік, що показує частоту дисперсійних характеристик послідовних і паралельних фазообертаючих елементів;

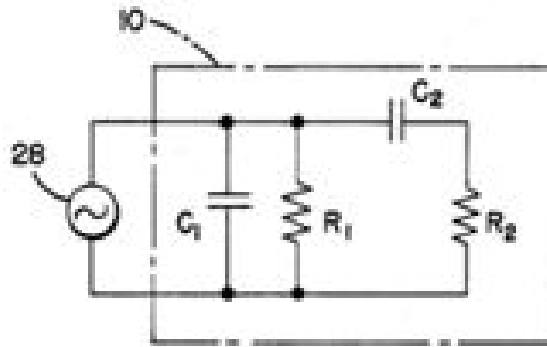


Рисунок 1.5 Схема електрична, яка пояснює роботу серії паралельних і послідовних фазообертаючих елементів фазообертача.

1.3 Хвильоводний фазообертач

Призначений для введення диференційного фазового зсуву між ортогональними складовими лінійних ортогонально поляризованих сигналів, диференційний фазовий зсув яких відносно постійний в широкому діапазоні частот, наприклад діапазон частот 5.925 ГГц до 6.425 ГГц.

Фазообертач включає в себе секції хвильоводів, що мають два протилежних ряди штифтів на внутрішній його поверхні, в першій загальній площині, і двома протилежними гребенями на внутрішній поверхні інших регіонах їх в другій загальній площині, перпендикулярній до першої площини. При відповідній конструкції шпильок і гребенів, відносно постійного результуючий фазовий зсув φ_R може бути досягнуто в зазначені смузі пропускання. Значення φ_R може бути апроксимованим

$$A_0 - B_0 + (A_1 - B_1)(f - f_0) + (A_2 - B_2)(f - f_0)^2, \quad (1.1)$$

де f -обрана частота ортогонально-поляризованих сигналів, F є центральною частотою

Робоча частота пропускання поляризатора , A_0 , A_1 і A_2 , є константами, пов'язані з двома рядами штифтів поляризатора, і B_0 , B_1 і B_2 - константи, пов'язані з двома виступами поляризатора.

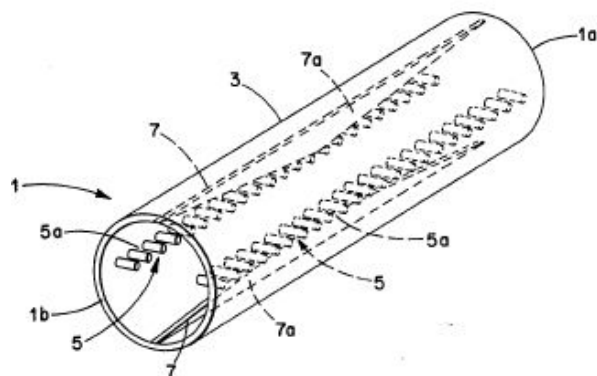


Рисунок 1.2 Криві фазового зсуву φ_r від частоти f для штирьового поляризатора;

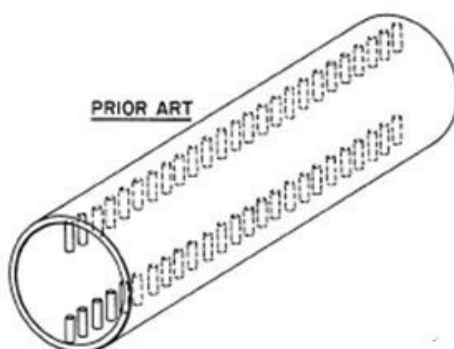


Рисунок 1.3 Крива фазового зсуву φ_g від частоти f для фазообертача;

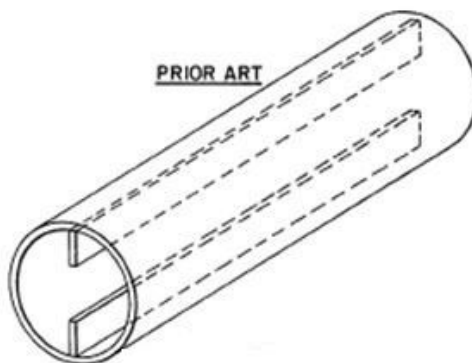


Рисунок 1.4 Перспективний вид прототипу фазообертача

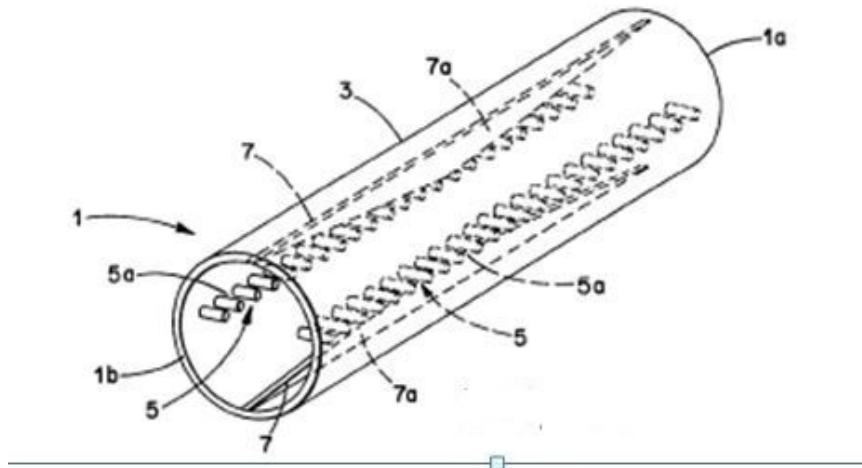


Рисунок 1.5 Перспективний вид широкосмугового фазообертача

1.4 Хвилеводний фазообертач, як відрізок прямокутного хвилеводу

Винахід відноситься до радіотехніки і забезпечує поліпшення узгодження і зменшення довжини сходинок. Хвилеводний фазообертач є відрізком прямокутного хвилеводу (ВПХ) 1, всередині якого паралельно його вузьким стінкам 2 розташована діелектрична пластина (ДП) 3 ступінчастою формою. ДП 3 за допомогою механізму 4 переміщення переміщається перпендикулярно осі ВПХ 1. Сходинки ДП 3 зміщені одна відносно іншої в поздовжньому напрямку в одну сторону і мають довжину не менше $0,9 \lambda_{\text{макс}}$, робочої довжини хвилі в ВПХ 1. Особливість хвилеводного фазовертача в тому, що сходинки мають певну довжину і змінну по довжині висоту, яка описується законом періоду квадратичної синусоїди і мінімальна по краях, в результаті чого поліпшується узгодження. Макс. зсув фази відповідає положенню ДП 3 посередині ВПХ 1, а мінім. зсув положенню ДП 3 у вузькій стінці 2 (див.рис.1.6)

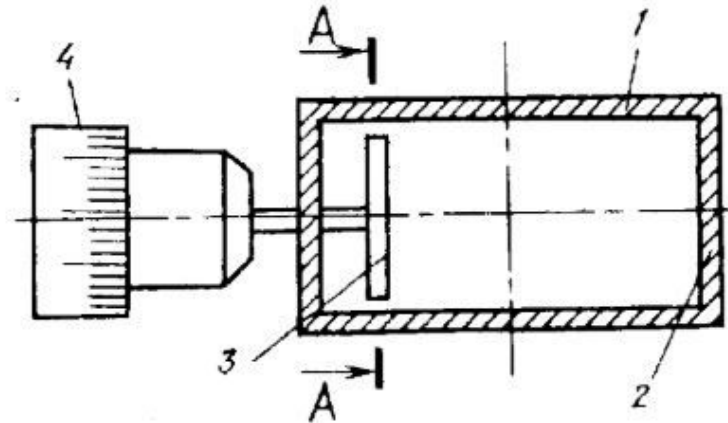


Рисунок 1.6 Хвильоводний фазообертач, поперечний переріз;

Хвильоводний фазообертач містить відрізок 1 прямокутного хвильоводу, всередині якого паралельно його вузьким стінкам 2 розташована діелектрична пластина 3 ступінчастою форми довжиною l і висотою h , встановлена з можливістю переміщення перпендикулярно його осі, наприклад, за допомогою механізму Д переміщення. Сходинок 5 діелектричної пластини 3 зміщені одна відносно іншої в поздовжньому напрямку в одну сторону на відстань L , де i - номер сходинок. Кожна сходинок 5 має змінну по довжині висоту h , яка описується законом періоду квадратичної синусоїди і мінімальна на краях, а довжина S - кожної сходинок 5 становить не менше 0,9 від максимальної робочої довжини хвилі в відрізку 1 прямокутного хвильоводу.

Хвильоводний фазообертач працює наступним чином.

Фазовий зсув регулюється шляхом переміщення діелектричної пластини 3 механізмом 4 переміщення в напрямку, перпендикулярному осі відрізка 1 прямокутного хвильоводу. Максимальний зсув фази відповідає положенню діелектричної пластини 3 посередині відрізка 1 прямокутного хвильоводу, а мінімальний - у його вузької стінки 2.

Завдяки виконанню кожної сходинок 5 діелектричної пластини 3 зі змінною по довжині висотою, описуваної законом квадратичної синусоїди, і довжиною, що дорівнює періоду цієї синусоїди, який становить не менше 0,9

від максимальної робочої довжини хвилі в відрізку 1 прямокутного хвилеводу, досягається поліпшення узгодження і зменшення довжини сходинок.

При числі m сходинок 5 в діелектричній пластині 3, більшому однієї, жорсткість діелектричної пластини 3 досягається або шляхом з'єднання сходинок 5 їх підставами, або поворотом половини однієї з них на 180 щодо її поздовжньої осі.

При наявності резистивного шару на діелектричній пластині 3 пристрій представляє собою хвилеводний атенюатор, що володіє узгодженням в області робочих частот.

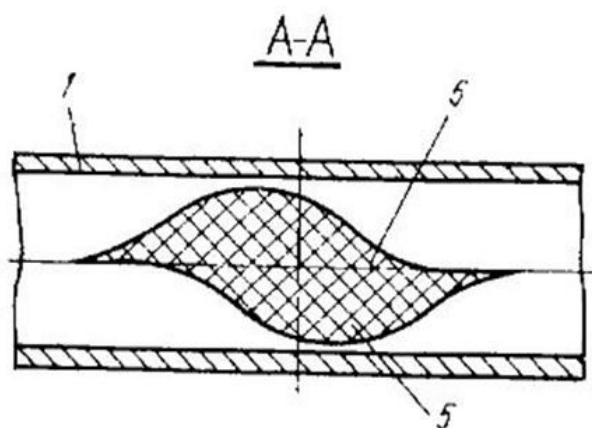


Рисунок 1.7 Розріз А-А хвилеводного фазообертача

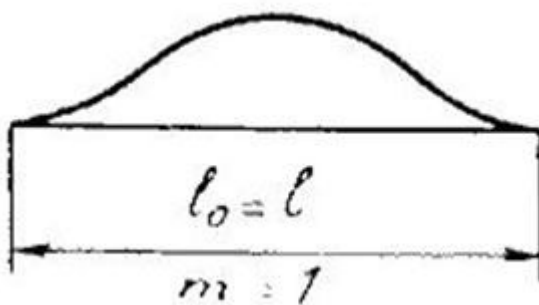


Рисунок 1.8 Діелектрична пластина з однією сходиною хвилеводного фазообертача

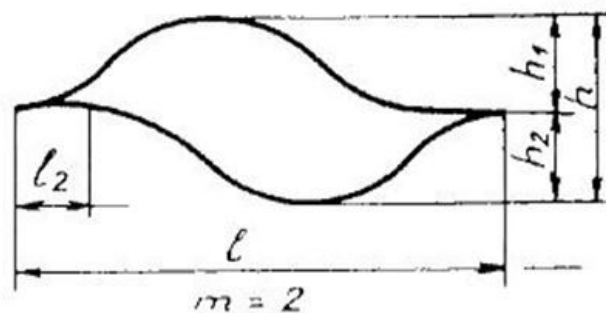


Рисунок 1.9 Діелектрична пластина з двома сходинками хвильоводного фазообертача

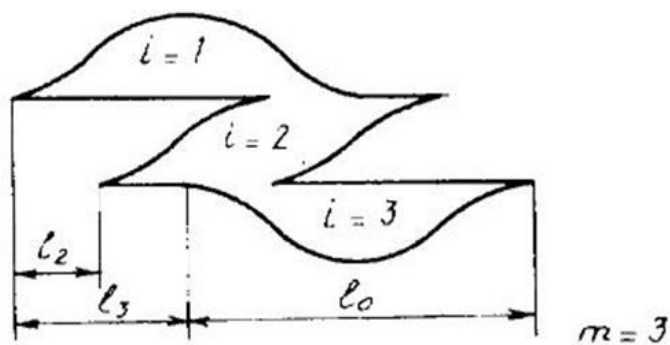


Рисунок 1.10 Діелектрична пластина з трьома сходинками хвильоводного фазообертача

1.5 Висновок до розділу 1

У першому розділі було проведено аналіз широкосмугових фазообертачів – на основі аналізу уже існуючих прототипів (наукові статті, конференції, патенти, результати досліджень) та проведення аналізу досліджень.

РОЗДІЛ 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Метод математичного аналізу лінійних НВЧ пристроїв

Більшість сучасних радіотехнічних систем працюють в НВЧ діапазоні. До них відносяться системи радіолокації, супутнико-космічні системи радіозв'язку, телебачення та радіонавігації, системи телевізійного радіомовлення, системи літакової, морський і наземного радіозв'язку. Висока спрямованість антен в НВЧ діапазоні дозволяє вузьким променем передавати радіосигнал і тим самим істотно знизити потужність радіопередавачів, а підвищене значення частоти несучих коливань на кілька порядків підвищити швидкість і обсяг переданих повідомлень в порівнянні з високочастотним діапазоном.

Теорія роботи НВЧ пристроїв базується на двох фундаментальних поняттях: електромагнітне поле і електричний ланцюг з розподіленими параметрами. Методи електродинаміки, засновані на рішенні рівнянь Максвелла, при певних граничних умовах дозволяють розрахувати електричне та магнітне поле в таких ланцюгах і замінити даний НВЧ елемент деякої моделлю або еквівалентної схемою, що складається з реактивних і активних елементів зосередженого типу. Такий підхід до розрахунку НВЧ елементів називається методом еквівалентних параметрів [28,29].

Інший підхід до аналізу НВЧ пристроїв базується на загальній теорії ланцюгів з заміною поняття "напруга і струм" поняттям "напруга і струм падаючої та відбитої хвилі". При цьому є можливість досліджувати складні НВЧ пристрої, з вхідними в них електронними приладами [20, 30].

Різні НВЧ ланки з'єднують за допомогою фідерних ліній: коаксіальних, полоскова і мікросмужкових ліній передачі та хвилеводів. За ці лініях енергія від одного НВЧ пристрою передається іншому і до антени. При поширенні в лінії тільки Т-хвилі процеси в ній описуються за допомогою так званих

телеграфних рівнянь, що випливають з рівнянь Максвелла [30]. Вирішуючи ці рівняння, знаходять комплексні амплітуди струму і напруги в перетині x лінії передачі (рис. 2,1, а):

$$U(x) = U_{\text{ПАД}0} \exp[-\gamma_0(x - x_0)] + U_{\text{ОТР}0} \exp[\gamma_0(x - x_0)]; \quad (2.1)$$

$$I(x) = \frac{U_{\text{ПАД}0}}{\rho} \exp[-\gamma_0(x - x_0)] - \frac{U_{\text{ОТР}0}}{\rho} \exp[\gamma_0(x - x_0)], \quad (2.2)$$

де $U_{\text{ПАД}0}$, $U_{\text{ОТР}0}$ - комплексні амплітуди напруги падаючої і відбитої хвилі при $x = x_0$;

$Y_0 = a_0 + jB_0$ - постійна поширення;

a_0 - постійна загасання (при нехтуванні втратами $a_0 = 0$);

$B_0 = 2\pi / \lambda$ - фазова постійна;

ρ - хвильовий опір лінії;

λ - довжина хвилі в лінії.

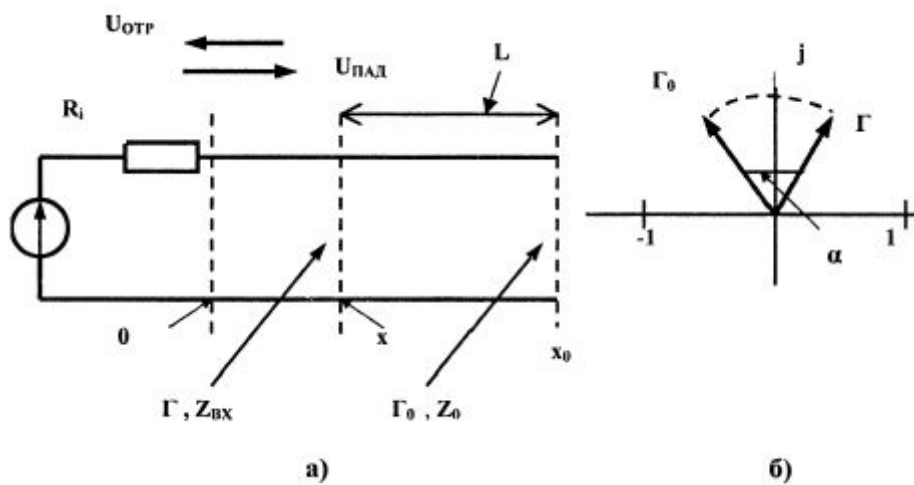


Рисунок 2.1. Комплексні амплітуди струму і напруги в перетині x лінії передачі

Згідно (2.1) і (2.2) в лінії поширюються дві хвилі: падаюча - в напрямку від джерела сигналу до навантаження, і відображена - в зворотному напрямку. Перетворимо (2.1) і (2.2) до вигляду:

$$U(x) = U_{\text{ПАД}0} \exp[-\gamma_0(x - x_0)] \cdot \{1 + \Gamma_0 \exp[2\gamma_0(x - x_0)]\}; \quad (2.3)$$

$$I(x) = \frac{U_{\text{пад}0}}{\rho} \exp[-\gamma_0(x-x_0)] \cdot \{1 - \Gamma_0 \exp[2\gamma_0(x-x_0)]\}, \quad (2.4)$$

де $\Gamma_0 = U_{\text{отр.о}} / U_{\text{пад.о}}$ - коефіцієнт відображення в перетині лінії $x = x_0$ (рис. 2.1, а). У довільному перетині лінії x :

$$\Gamma = U_{\text{отр}} / U_{\text{пад}} = \Gamma_0 \exp[2\gamma_0(x-x_0)]. \quad (2.5)$$

При $a_0=0$ і $L=x-x_0$ із (2.5) отримаємо:

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp(-j4\pi L/\lambda). \quad (2.6)$$

Для будь-якого перетину лінії при відсутності неоднорідностей і втрат $|\Gamma_0| = |\Gamma|$, причому вектор Γ повернуть щодо вектора Γ_0 на кут $\alpha = 4\pi L / \lambda$ (рис. 2.1,б). З (2.3) і (2.4) для вхідного опору лінії в перерізі x маємо:

$$Z = \frac{U(x)}{I(x)} = \rho \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}, \quad (2.7)$$

з якого отримаємо для коефіцієнта відбиття:

$$\Gamma = \frac{Z - \rho}{Z + \rho}. \quad (2.8)$$

Згідно рівнянням (2.1) і (2.2) при включенні в перетині лінії x_0 навантаження Z_H вхідний опір в перетині лінії x при $a_0 = 0$:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U(x)}{I(x)} = \rho \frac{Z_H + j\rho \operatorname{tg}(2\pi L/\lambda)}{\rho + jZ_H \operatorname{tg}(2\pi L/\lambda)} \quad (2.9)$$

Згідно (2.7,2.9) лінію, навантажену на комплексне опір, можна характеризувати як за допомогою вхідного опору, так і коефіцієнта відображення. При цьому опір Z при $\operatorname{Re}(Z) > 0$ в області дійсних γ частот займає половину площині комплексної змінної, а коефіцієнт відбиття Γ згідно

(2.8) і відповідно до правил конформного відображення функцій комплексної змінної - коло одиничного радіуса (рис. 2.2)

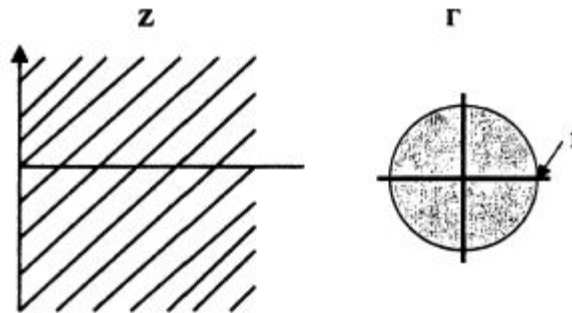


Рисунок 2.2. Функції комплексної змінної - коло одиничного радіуса

Потужності падаючої і відбитої хвилі є:

$$\begin{aligned} P_{\text{пад}} &= |U_{\text{пад}}|^2 / 2\rho, \\ P_{\text{отр}} &= |U_{\text{отр}}|^2 / 2\rho. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Усереднений потік повної потужності, що проходить в будь-якому перетині лінії,

$$P_{\text{пр}} = 0,5 \operatorname{Re}[\dot{U}(x) \dot{I}(x)], \quad (2.11)$$

де комплексні амплітуди напруги і струму згідно (2.1) і (2.2):

$$U(x) = U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}}, \quad I(x) = (U_{\text{пад}} - U_{\text{отр}}) / \rho \quad (2.12)$$

З урахуванням останніх співвідношень для повної потужності маємо:

$$P = 0,5 U(x) I(x) = \frac{1}{2\rho} (|U_{\text{пад}}|^2 - |U_{\text{отр}}|^2 + \dot{U}_{\text{отр}} \dot{U}_{\text{пад}} - \dot{U}_{\text{пад}} \dot{U}_{\text{отр}})$$

Дійсна частина цього виразу згідно (2.12) є проходить потужність, яка з урахуванням (2.10) і (2.11):

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{2\rho} (|U_{\text{пад}}|^2 - |U_{\text{отр}}|^2) = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} \quad (2.13)$$

Що проходить потужність при відсутності втрат лінії повністю поглинається в активної частини навантаження: $P_{\text{н}} = P_{\text{пр}}$. Тому з урахуванням (2.5), (2.10), (2.11) і (2.13) три значення потужності пов'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$P_{\text{пад}} = P_{\text{н}} / (1 - |\Gamma|^2) \quad (2.14)$$

$$P_{\text{отр}} = P_{\text{н}} |\Gamma|^2 / (1 - |\Gamma|^2) = P_{\text{пад}} |\Gamma|^2 \quad (2.15)$$

Різнноманітні типи НВЧ пристроїв можна описати за допомогою падаючих і відбитих хвиль, що поширюються в підключених до них лініях передачі (рис. 2.3). Для спрощення аналізу вважатимемо однаковими і рівними ρ_0 хвильові опору всіх підвідних ліній, що позбавляє від операції нормування. Зазвичай $\rho_0 = 50 \text{ Ом}$ - стандартному значенню хвильового опору.

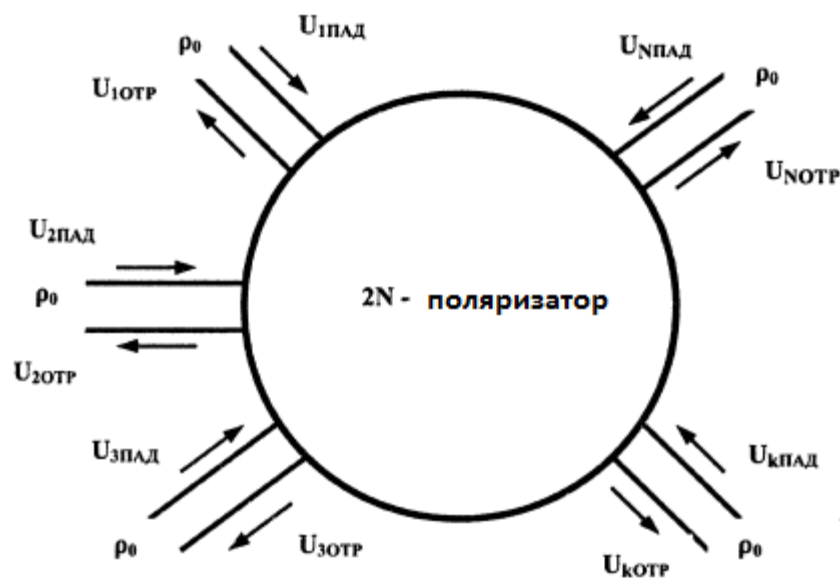


Рисунок 2.3. 2N- поляризатор

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Формула 2.18 матриця розсіювання багатополюсника (поляризатора).

Елементи цієї матриці - S_{km} - параметри розсіювання або S-параметри НВЧ пристрої. Згідно (2.16) - (2.18) властивості лінійного НВЧ-пристрої – 2n-полюсника - можна описати за допомогою квадратної матриці n-го порядку, де n - число входів цього багатополюсника. При відомій матриці розсіювання (2.18) і заданих параметрах зовнішніх джерел сигналу і навантажень, підключених до різних входів багатополюсника (рис. 2.3), за допомогою системи рівнянь (2.16) можна знайти комплексні амплітуди падаючих і відбитих хвиль у всіх зовнішніх лініях передачі. До цього по суті і зводиться рішення більшості завдань з аналізу роботи НВЧ пристроїв. Крім того, s- параметри дозволяють безпосередньо визначити деякі важливі характеристики НВЧ пристрої, в тому числі коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) всіх входів і робоче затухання між усіма входами.

Нехай до входу k підключений джерело сигналу, а до всіх інших (n-1) входів - узгоджені навантаження, рівні ρ_0 . Тоді все $U_{\text{мПАД}} = 0$, крім $U_{\text{кПАД}}$, в результаті чого маємо для КСХ по k-му входу:

$$КСХ_k = (1 + |S_{kk}|) / (1 - |S_{kk}|) \quad (2.19)$$

і для робочого загасання між входами k і m:

$$b_{mk} = 10 \lg(P_k / P_m) = 20 \lg(U_{\text{кППА}} / U_{\text{мООТ}}) \quad (2.20)$$

Коефіцієнт b_{mk} показує, яка частина потужності сигналу, підведена k-у входу багатополюсника досягає m-го входу.

Багатополіусники діляться на активні (при наявності в їх складі електронних приладів) і пасивні. Для пасивного багатополіусника на будь-якій дійсній частоті справедливо нерівність:

$$[\mathbf{S}]_T^* \times [\mathbf{S}] \leq [\mathbf{1}] \quad (2.21)$$

Де $[\mathbf{S}]$ - вихідна матриця розсіювання багатополіусника;

$[\mathbf{S}]_T^*$ - ермітово сполучена матриця по відношенню до вихідної;

$[\mathbf{1}]$ - одинична матриця.

Пасивний багатополіусник називається оборотним або взаємним при $S_{km} = S_{mk}$. а при відсутності в ньому активних втрат - реактивним, для якого (8.21) приймає вид:

$$[\mathbf{S}]_T^* \times [\mathbf{S}] = [\mathbf{1}] \quad (2.22)$$

зване умовою унітарності. Справедливо і зворотне твердження: при виконанні умови унітарності багатополіусник є реактивним.

З (2.22) для реактивного багатополіусника можна отримати:

$$\sum_{i=1}^n |S_{ki}|^2 = 1 \quad (2.23)$$

Де $k=1 \dots n$;

Розкриємо фізичний зміст рівнянь (2.23). При підключенні генератора до входу до і узгоджених навантажень до всіх інших - маємо:

$$|S_{kk}|^2 = P_{k\text{отр}} / P_{k\text{пад}} \quad \text{и} \quad |S_{ik}|^2 = P_{i\text{отр}} / P_{i\text{пад}}$$

Підставивши дані вираз в (2.23), отримаємо:

$$P_{k\text{пад}} = \sum_{i=1}^n P_{i\text{отр}} \quad (2.24)$$

Це є рівняння балансу потужностей в реактивному багатополіуснику: потужність хвилі, підведеної до входу до, дорівнює сумі потужності відбитої хвилі в цьому каналі і потужностей хвиль, що надходять в усі інші канали багатополіусника.

2.2 Хвильові матриці чотириполіусника

Як і раніше, звернемося до аналізу чотириполіусника - одного з основних ланок НВЧ пристроїв - із заданою хвильовою матрицею розсіювання, матрицею S-параметрів. До чотириполіусника підключено дві лінії передачі з хвильовим опором ρ_0 (рис. 2.4).

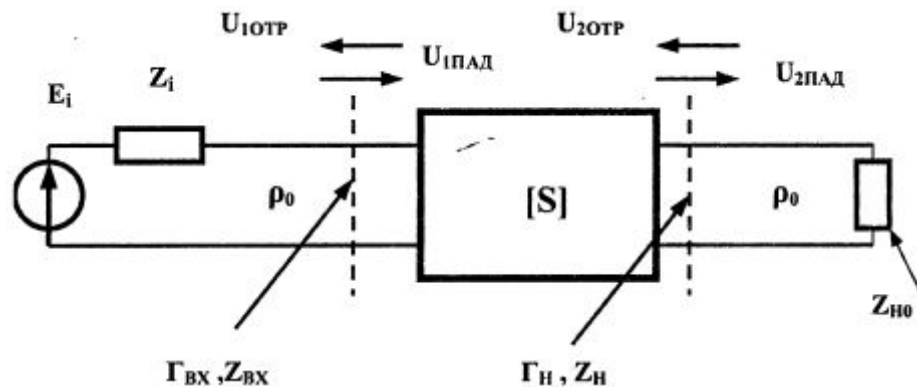


Рисунок 2.4. Дві лінії передачі з хвильовим опором ρ_0

Згідно (2.16) робота чотириполіусника описується системою з двох рівнянь, в лівій частині яких записуються комплексні амплітуди хвиль, що виходять з чотириполіусника:

$$U_{1отр} = S_{11}U_{1пад} + S_{12}U_{2отр} \quad (2.25)$$

$$U_{2пад} = S_{21}U_{1пад} + S_{22}U_{2отр} \quad (2.26)$$

де S_{11} і S_{22} - коефіцієнти відображення по входу і виходу чотириполіусника при узгоджених навантаженнях;

S_{12} і S_{21} - коефіцієнти передачі хвиль напруги при узгоджених навантаженнях.

З рівнянь (2.25) і (2.26) можна знайти S-параметри:

$$\begin{aligned} S_{11} &= U_{1OTR} / U_{1ПАД} \text{ при } U_{2OTR} = 0 \text{ или } Z_{H0} = \rho_0 \\ S_{22} &= U_{2ПАД} / U_{2OTR} \text{ при } U_{1ПАД} = 0 \text{ или } Z_1 = \rho_0 \\ S_{12} &= U_{1OTR} / U_{2OTR} \text{ при } U_{1ПАД} = 0 \text{ или } Z_1 = \rho_0, \\ S_{21} &= U_{2ПАД} / U_{1ПАД} \text{ при } U_{2OTR} = 0 \text{ или } Z_{H0} = \rho_0 \end{aligned}$$

утворюють хвильову матрицю розсіювання:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

З спільного вирішення рівнянь (2.25) - (2.26) з урахуванням співвідношення для коефіцієнта відбиття навантаження на затискачах чотириполюсника $\Gamma_H = U_{2OTR} / U_{2ПАД}$. отримаємо для коефіцієнта відбиття на вході чотириполюсника (рис. 2.4):

$$\Gamma_{BX} = \frac{U_{1OTR}}{U_{1ПАД}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_H}{1 - S_{22}\Gamma_H} \quad (2.28)$$

Чотириполюсники, як і багатополюсники, діляться на активні і пасивні. В активному чотириполюсниками відбувається перетворення енергії джерела постійного струму в енергію високочастотних коливань. Типовим прикладом такого чотириполюсника є НВЧ транзистор.

Пасивні чотириполюсники поділяються на оборотні (або взаємні) і незворотні, симетричні і антисиметричні, реактивні і з активними втратами.

Оборотним називається чотириполюсник, який відповідає правилу взаємності, що виражається рівністю: $S_{12} = S_{21}$, яке означає, що коефіцієнти передачі падаючих хвиль напруги в чотириполюсниками в обох напрямках при підключенні узгоджених навантажень рівні.

Для симетричного оборотного чотириполюсника справедливі рівності: $S_{12} = S_{21}$ і $S_{11} = S_{22}$, що означають, що напруга і струм у зовнішніх колах не залежить від напрямку передачі енергії через чотириполюсник. При антисиметричними чотириполюсниками $S_{12} = S_{21}$ і $S_{11} = S_{22}$.

З умови унітарності (2.22), з яким слід реактивний чотириполюсник, можна отримати наступні рівності:

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1; \quad (2.29)$$

$$|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2 = 1; \quad (2.30)$$

$$|S_{11}||S_{12}| = |S_{21}||S_{22}|; \quad (2.31)$$

$$\varphi_{11} + \varphi_{22} = \varphi_{12} + \varphi_{21} \pm \pi. \quad (2.32)$$

З рівнянь (2.29) - (2.31) випливає, що в реактивному чотириполюсниками $|S_{11}| = |S_{22}|$ і $|S_{12}| = |S_{21}|$, отже, число вихідних параметрів, що визначають властивості об'єкта, може бути зменшено. Рівняння (2.29) - (2.30), як і (2.23), відображають баланс потужностей в реактивному чотириполюсниками.

При використанні хвильової матриці передачі, рівняння описують роботу чотириполюсника (рис. 2.4), приймають вид:

$$U_{1\text{ПАД}} = T_{11}U_{2\text{ПАД}} + T_{12}U_{2\text{ОТР}} \quad (2.33)$$

$$U_{1\text{ОТР}} = T_{21}U_{2\text{ПАД}} + T_{22}U_{2\text{ОТР}} \quad (2.34)$$

Т-параметри цих рівнянь утворюють хвильову матрицю передачі:

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Порівняння рівнянь (2.26) - (2.27) з (2.33) - (2.34) дозволяє встановити зв'язок між S-параметрами хвильової матриці розсіювання (2.27) і Т-параметрами хвильової матриці передачі (2.35):

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} (1/S_{21}) & -(S_{22}/S_{21}) \\ (S_{11}/S_{21}) & [S_{12} - (S_{11}S_{22}/S_{21})] \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} (T_{21}/T_{11}) & [T_{22} - (T_{12}T_{21}/T_{11})] \\ (1/T_{11}) & -(T_{12}/T_{11}) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

При каскадному включенні НВЧ чотириполіусників (рис. 2.5) слід скористатися Т-параметрами, бо загальна матриця такого з'єднання є твір хвильових матриць передачі окремих ланок:

$$[\mathbf{T}] = \prod_{k=1}^n [\mathbf{T}_k] \quad (2.38)$$

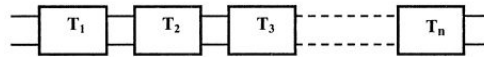


Рисунок 2.5. Каскадне включення НВЧ чотириполіусників

Таким чином, знаючи S або Т-параметри окремих чотириполіусників, можна за допомогою (2-36) - (2.38) знайти загальну матрицю каскадного з'єднання в необхідній системі параметрів. Так, наприклад, якщо задані S-параметри чотириполіусників, то слід спочатку згідно (2.36) перейти від них до Т-параметрам, потім по (2.38) знайти загальну матрицю всього з'єднання і за допомогою (2.37) повернутися до S-параметрам.

Пакет програм Mathcad дозволяє виробляти всілякі операції з матрицями, що забезпечує умови складання програми по розрахунку каскадного з'єднання чотириполіусників відповідно до описаного алгоритму.

У тому випадку, коли для аналізу властивостей об'єкта досить обмежитися тільки значенням вхідного коефіцієнта відображення $\Gamma_{Вх}$, наприклад при розрахунку стійкості, можна скористатися більш простим алгоритмом, що складається в використанні формули (2.28) в якості рекуррентної. Послідовно переходячи від одного чотириполіусника, починаючи з останнього, до іншого і кожен раз визначаючи $\Gamma_{Вх}$, знаходиться значення даного параметра на вході всього каскадного з'єднання.

Наведемо вирази S і T-параметрів для двох типових НВЧ ланок: відрізка лінії передачі (рис.2.6) і двох ліній з різними хвильовими опорами, з включеним на їх стику двухполюсника провідністю Y (рис. 2.7).

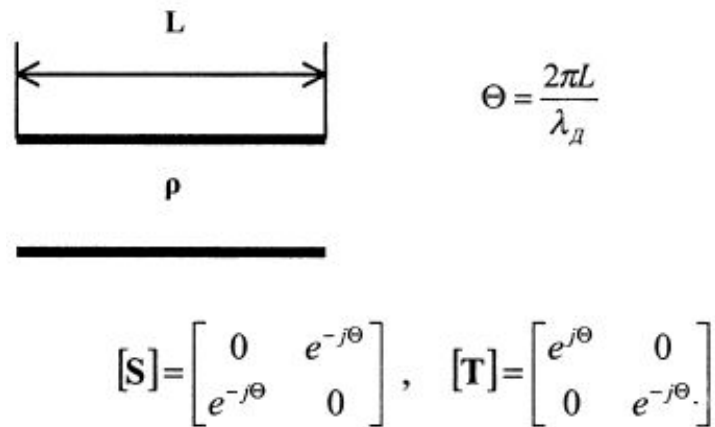


Рисунок 2.6. Відрізок лінії передачі

Де λ - довжина хвилі в лінії;

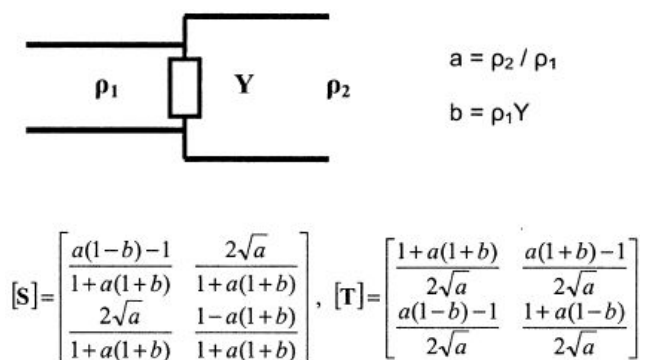


Рисунок 2.7. Дві лінії з різними хвильовими опорами

2.3 Розрахунок фазообертача

Для розрахунку фазообертача необхідно визначити :

- відношення між фазовими зсувами, які створюються металіком та діелектриком, які забезпечують компенсацію дисперсії;
- розміри металічних та діелектричних пластин.

Розрахунок фазової швидкості розповсюдження основної хвилі в круглому хвилеводі з повздовжньою металодіелектричною пластиною, яка паралельна вектору E , основана на використанні методів теорії ланцюгів[4,5]

Хвилевід круглого поперечного січення представляється в виді набору ступеневих хвилеводів прямокутного січення однакової довжини. В області I відрізки хвилеводів заповнена діелектриком з діелектричною проникністю ϵ_1 , в області II-повітрям($\epsilon_2=1$).Хвиля основного типу, яка розповсюджується в такому хвилеводі, має складову швидкості розповсюдження вздовж цієї осі утворюється стояча хвиля. Частина хвилевода, укладену між площинами 1-1 і 2-2, можна розглядати як короткозамкнутий 4-х полюсник, електрична довжина якого рівна $\lambda/4$, а відповідно, $Z_{\text{вх}}=\infty$.

Відношення між напругами і струмами на вході і на виході 4-х полюсника має вигляд:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ J_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_2 \\ J_2 \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

Вхідний опір зі сторони 1-1 короткозамкнутого 4-х полюсника

$$Z_{\text{вх}1-1} = \frac{U_1}{J_1} = \frac{a_{12}}{a_{22}} \quad (2.40)$$

так як $Z_{\text{вх}1-1} = \infty$, то $a_{22}=0$

Коефіцієнти a – повністю визначає властивостями 4-х полюсника. В нашій задачі 4-х полюсник представляє собою з'єднання N - відрізків хвилевода різної висоти, із них m -відрізків вкладаються по товщині систематичних пластин, а q -відрізків-по товщині діелектричної пластини.

Таке з'єднання можна розглядати як каскадне з'єднання відрізків передаючих ліній з різним хвильовим опором. Реактивними опорами стиків можна знехтувати, за винятком стику між m -ним і $(m+1)$ -ним ступенями.

Матриця $[a]$ такої системи рівна створенню матриць $[a]_n$, які складаються 4-х полюсників:

$$|a| = \prod_{n=1}^m |a|_n \times \prod_{n=m+1}^N |a|_n \quad (2.41)$$

Матриця $|a|_n$ відрізка однорідної лінії без втрат має вигляд:

$$|a|_n = \begin{pmatrix} \cos * d_n * l & j p_n * \sin d_n * l \\ \frac{j * \sin * d_n * l}{2a} & \cos * d_n * l \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

Де $l = \frac{r}{N}$ – довжина відрізка лінії; a_n – хвильове число в лінії; P_n – хвильовий опір.

В даному випадку d_n рівне поперечному хвильовому числу відповідної області круглого хвильоводу, а P_n визначається виходячи із того, що величина хвильового опору сходинок пропорційна висоті сходинок і зворотно пропорційна поперечному хвильовому числу. Поперечні хвильові числа d_1, d_2 в області I і II зв'язані з відомими співвідношеннями: $\square_{\text{заливна}}$

$$\text{В області I} \quad \varepsilon \frac{2}{1} = \square_1 k^2 - y_k^2 \quad (2.43)$$

$$\text{В області II} \quad \varepsilon \frac{2}{2} = k^2 - y_k^2$$

Де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – довжина хвилі в хвильоводі з металодіелектричної пластини, яка паралельна вектору E .

Розраховуючи (2.41) з врахуванням (2.42) і (2.43), отримуємо значення a_{22} , яка являється функцією Λ_{k11} значення Λ_k визначається в результаті чисельного рішення за допомогою рівняння :

$$a_{22}(\Lambda_{k11}) = 0$$

По цій же методиці визначається і значення Λ_{k1} для складової перпендикулярної діелектричної пластини. Значення Λ_{k11} і Λ_{k1} в свою чергу являються функціями геометричних розмірів звужуючих і діелектричних пластин. Фазовий зсув Φ , який створюється в хвильоводі поздовжньої пластини між ортогональними складовими поля, рівний

$$\Phi = \Phi_{II} - \Phi_I \quad (2.44)$$

Де Φ_{II} і Φ_I – диференційні фазові зсуви складових E_{II} і E_I відповідно.

Виходячи з результату розрахунку довжин хвиль, були вибрані розміри діелектричної і металічної пластин, які забезпечують необхідний фазовий зсув в робочих діапазонах.

Товщина діелектричної пластини була вибрана рівною 4мм. В якості діелектрика використовувався фторопласт з $\epsilon_r = 2,1$. Результати розрахунку диференційного фазового зсуву $\Delta\Phi$ приведені на рис.6. Як показує розрахунок K_α в всьому діапазоні не перевищує 1,5дБ. Вище не розглядалось вказане місце згибу силових ліній електричного поля всередині хвилевода. Але так як електричне поле сконцентроване в області, де викривлення мало, то дане допущення не вносить значної помилки в визначені критичної частоти.

2.4 Висновок до розділу 2

В даному розділі визначено відношення між фазовими зсувами, які створюються металіком та діелектриком, які забезпечують компенсацію дисперсії, розміри металічних та діелектричних пластин.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Призначення, класифікація фазуючих пристроїв

Фазуючі пристрої призначені для виконання наступних функцій:

- 1) плавна або дискретна зміна фази ЕМХ в одному каналі або перетині фідерного тракту щодо фази ЕМХ в іншому каналі або перетині;
- 2) створення фіксованого або змінного різницевого зсуву фаз ЕМХ, що поширюються в ЛП в протилежних напрямках, або для ЕМХ з взаємно ортогональною поляризацією.

Класифікація фазуючих пристроїв:

1. За типом лінії передачі: коаксіальні, полоскові, хвильові.
2. За способом зміни фази: механічні, електричні керовані.
3. По виду фазового зсуву: плавні, дискретні.
4. За способом створення фазового зсуву: прохідні, відбивні.
5. За наявністю фазового зсуву для ЕМХ зустрічних напрямків: взаємні, невзаємні.

Принцип робіт фазуючих пристроїв заснований на відомому властивості електромагнітної хвилі купувати фазовий набіг при проходженні нею деякої відстані в середовищі з певними електричними і геометричними параметрами.

Фазовий набіг $\Delta\phi$, що купується електромагнітної хвилею при її поширенні в лінії передачі на відрізка довжиною l , може бути визначений з наступного виразу:

$$\Delta\phi = k'l = \frac{2\pi}{\Lambda} l, \quad (3.1)$$

де $k' = 2\pi/\Lambda$ - коефіцієнт поширення ЕМВ в лінії передачі;

Λ - довжина хвилі в лінії передачі.

Як відомо, довжина хвилі в лінії передачі залежить від довжини хвилі генератора і типу лінії передачі (її конструкції, геометричних розмірів, електричних параметрів діелектрика, що заповнює внутрішній простір лінії передачі).

Отже, змінити фазовий набіг ЕМХ при її поширенні в лінії передачі за допомогою таких дій:

- 1) змінити геометричну довжину відрізка лінії передачі l ;
- 2) включити в відрізок лінії передачі зосереджену реактивність, яка, будучи неоднорідністю, змінює амплітудне розподіл електромагнітного поля (ЕМП) уздовж лінії передачі, що в підсумку еквівалентно зміни геометричної довжини відрізка лінії передачі;
- 3) змінити геометричні розміри поперечного перерізу лінії передачі, наприклад розмір широкої стінки прямокутного хвилеводу, що веде до зміни критичної довжини хвилі $\lambda_{кр}$ в ньому і, як наслідок, - до зміни довжини хвилі в хвилеводі Λ ;
- 4) змінити електричні параметри діелектрика про (відносну діелектричну і магнітну проникності), що заповнює лінію передачі, що веде до зміни довжини хвилі в лінії передачі.

На основі цих способів створені різні конструкції фазуючих пристроїв.

3.2 Механічний коаксіальний фазообертач (ФО) тромбонного типу

Механічний коаксіальний фазообертач (ФО) тромбонного типу являє собою відрізок коаксіальної ЛП, в якому для управління зрушенням фази ЕМХ використовується зміна геометричної довжини.

Конструкція такого ФО представлена на рис. 3.1. Змінюючи положення рухомої секції 1 відносно нерухомої 2 (див. Рис. 3.1), можна плавно змінювати довжину відрізка 1 коаксіальної ЛП, а отже, і величину фазового зсуву ЕМХ. Такий фазообертач є прохідним. Він знайшов застосування в фідерном тракті диспетчерського радіолокатора в якості елемента, що забезпечує підбір

оптимальної навантаження на магнетрон передавального пристрою. Крім того, він використовується в тракті харчування антеною решітки радіонавігаційного маяка для регулювання фазових співвідношень струмів збудження її елементів при перебудові робочої частоти.

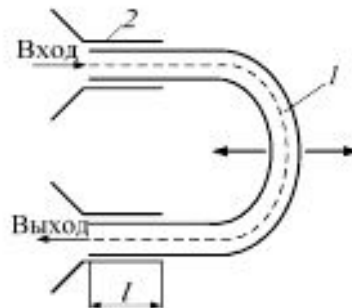


Рисунок 3.1 Механічний коаксіальний фазообертач тромбоного типу

3.3 Фазообертачі на основі мостових пристроїв.

Фазообертачі на основі мостових пристроїв і спрямованих відгалужувачів. Такі фазовідбивачі є відбивними. Принцип їх дії заснований на відображенні ЕМХ від короткозамкнутого відрізка лінії передачі. Вони можуть бути реалізовані на основі волноводно-щілинного моста (Рис. 3.2, а) або трьохдецибельного спрямованого відгалужувача (рис. 3.2, б).

У таких пристроях в вихідних плечах встановлені короткозамкнені рухливі поршні 5 або плунжери 6 (див. Рис. 3.2). змінюючи їх становище, можна в потрібних межах змінювати довжину l відрізка ЛП і, як наслідок, - величину фазового зсуву ЕМХ на виході ФО.

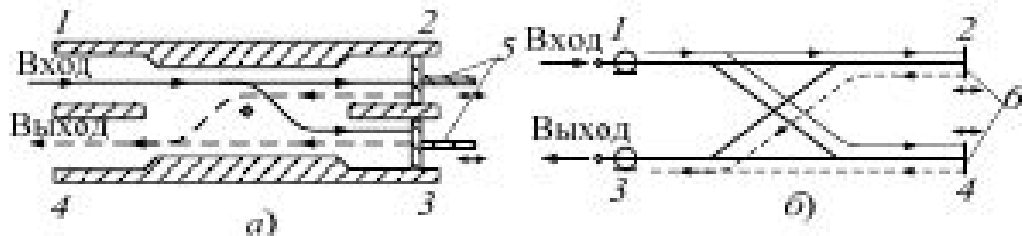


Рисунок 3.2 Фазообертачі на основі мостових пристроїв і спрямованих відгалужувачів

Принцип роботи відбивного ФО пояснюється на прикладі ФО на основі хвилеводно-щілинного моста (див. рис. 3.2. а). ЕМХ, що надходить у вхідне плече 1 моста, ділиться порівну між плечима 2 і 3 і не потрапляє в плече 4. Відбиті від короткозамкнутих поршнів хвилі проходять через здвоєний хвилевід (ділянка зі щілиною) в зворотному напрямку і складаються в плечі 4 по властивості волноводно-щілинного моста. Фаза хвилі на виході (в плечі 4) визначається пройденою відстанню, тобто становищем короткозамкнутих поршнів.

Принцип роботи ФО на основі трьохдецибельного спрямованого відгалужувача аналогічний розглянутому.

Дані ФО знайшли застосування в високочастотних трактах в якості елементів їх налаштування, а також як елементи більш складних пристроїв.

3.4 Хвилеводні фазообертачі з діелектричними пластинами і металевими вставками.

Механічний хвилеводний ФО з діелектричної пластиною є відрізком прямокутного хвилеводу з хвилею H_{10} або круглого хвилеводу з хвилею H_{11} , в порожнині якого розташовується пластина з діелектрика з малими втратами і діелектричної проникністю $\epsilon > 1$.

Існують наступні види конструкції ФО з діелектричними пластинами:

1. Діелектрична пластина розташовується всередині прямокутного хвилеводу паралельно електричним силовим лініям (рис. 3.3). якщо пластина знаходиться поблизу вузької стінки хвилеводу, вона практично не впливає на поширення ЕМХ в ньому, так як в цьому місці напруженість електричного поля мала. Якщо пластину пересувати до середини хвилеводу (до пучності електричного поля), то це призводить до зменшення напруженості поля. У свою

чергу, це еквівалентно тому, що весь внутрішній простір хвилеводу на ділянці з пластиною виявляється заповненим суцільним діелектричним середовищем з деякою ефективною проникністю $\epsilon_{\text{еф}}$: $1 < \epsilon_{\text{еф}} < \epsilon$

Таким чином, при переміщенні пластини від вузької стінки до середини хвилеводу величина $\epsilon_{\text{еф}}$ змінюється від 1 до деякої максимальної величини, що призводить до зменшення довжини хвилі в хвилеводі Λ і зростання величини фазового зсуву ЕМХ.

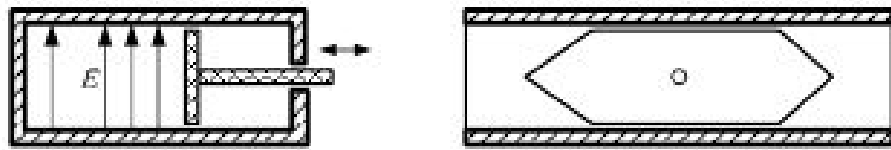


Рисунок 3.3 Хвилеводний фазообертач з діелектричної пластиною 1

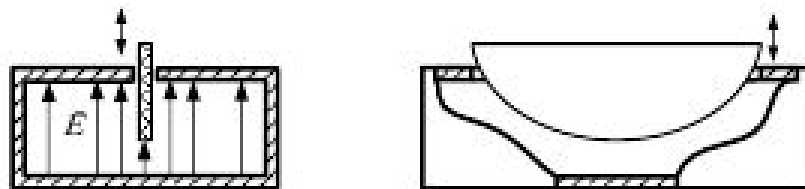


Рисунок 3.4 Хвилеводний фазообертач з діелектричної пластиною 2

Для зменшення відображень від торців пластини її краю зрізають на клин, а довжину вибирають рівної цілому числу півхвиль $l_{\text{пл}} = n\Lambda / 2$, $n = 1, 2, 3$, що забезпечує протифазне складання ЕМХ, відбитих від вхідного і вихідного торців пластини. Ці заходи покращують узгодження фазовращателя з хвилеводним трактом.

2. Діелектрична пластина встановлюється в прямокутний хвилевід через подовжню щілину, що прорізає посередині широкої стінки, і знаходиться при цьому завжди в пучності напруженості електричного поля (Рис. 3.4).

При зміні глибини занурення пластини в хвилевід змінюється $\epsilon_{\text{еф}}$, і, отже, фазовий набіг ЕМХ. Зокрема, чим глибше занурена пластина в хвилевід, тим більше величина $\epsilon_{\text{еф}}$ і тим більший фазовий набіг набуває ЕМХ, яка

розповсюджується в хвилеводі. Для зменшення відображень ЕМХ від пластини її надають форму сегмента кола.

3. Діелектрична пластина розташовується всередині круглого хвилеводу з хвилею H_{11} і може докручуватись щодо поздовжньої осі хвилеводу (рис. 3.5).

Якщо пластина перпендикулярна лініям напруженості електричного поля хвилі H_{11} , її вплив на що проходить ЕМВ незначно.

Якщо ж діелектрична пластина розташовується паралельно силовим лініям вектора E , то ефективна діелектрична проникність зростає, і величина фазового зсуву збільшується. Як і в ФО на прямокутному хвилеводі, для поліпшення узгодження довжину пластини вибирають рівної цілому числу півхвиль, а її краї зрізають на клин.

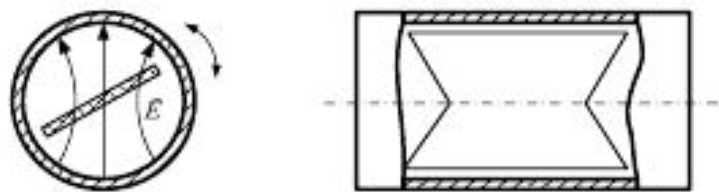


Рисунок 3.5. Хвилеводний фазообертач з діелектричної пластинною 3

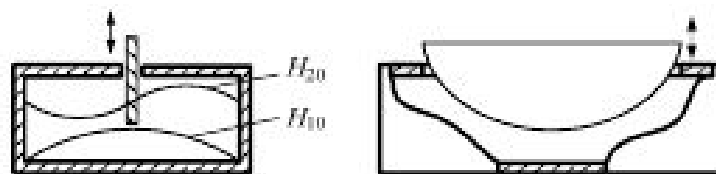


Рисунок 3.6. Механічний хвилеводний фазообертач з металевою вставкою

Механічний хвилеводний ФО з металевою вставкою є відрізком прямокутного хвилеводу, в порожнину якого через щілину, що прорізає посередині широкої стінки, вдвигається металева пластина (рис. 3.6).

Зміна фази ЕМХ в цьому випадку пояснюється тим, що в хвилеводі в просторі, де присутня металева пластина, збуджується хвиля типу H_{20} , критична довжина хвилі якої $\lambda_{кр} = a$ і відрізняється від критичної довжини хвилі H_{10} , яка дорівнює $\lambda_{кр} = 2a$. В результаті на виході фазообертача з'являється

фазовий зсув, обумовлений суперпозицією двох електромагнітних хвиль з різними критичними довжинами хвиль. Очевидно, що і в цьому випадку, чим глибше занурена металева пластина в порожнину хвилеводу, тим більше результуючий фазовий зсув ЕМХ на виході фазообертача.

3.5 Електронно-керовані діодні аналогові й дискретні фазообертачі.

У випадках, коли необхідні великі швидкості зміни фази ЕМХ, використовуються електронно-керовані фазообертачі, в яких застосовуються напівпровідникові високочастотні діоди.

По виду фазового зсуву такі ФО можуть бути як аналоговими, так і дискретними. Практична реалізація електронно-керуваних фазовращателей може виконуватися на схемах з варикапами або на схемах з р-і-п діодами. Схема ФО на варикапах представлена на рис. 3.7. варикап являє собою напівпровідниковий діод з електрично керованою ємністю. Як правило, він включається в хвилевід паралельно, як це показано на рис. 3.7.

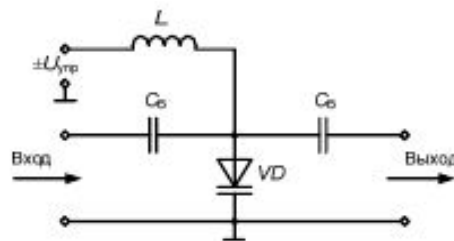


Рисунок 3.7. Фазообертач на варикапах

Залежно від полярності і величини керуючого напруги $U_{упр}$ в такому фазообертачі можуть бути реалізовані наступні режими роботи.

1. Режим замикання хвилеводу. Він створюється шляхом подачі на варікап позитивного керуючого напруги. При цьому варікап представляє собою на еквівалентній схемі коротке замикання в місці його включення.

Цей режим використовується в дискретних фазообертачів відбиваючого типу, в яких застосовуються кілька таких діодів, що забезпечують дискретну

зміна фази за рахунок зміни довжини шляху, який проходить електромагнітна хвиля від входу до місця відображення і назад.

2. Режим плавної зміни фази. Він створюється шляхом подачі на варікап негативної напруги, що управляє. В цьому випадку варікап є на еквівалентній схемі, зосереджену реактивність ємнісного характеру, вплив якої еквівалентний змінні геометричній довжині відрізка лінії передачі. Такий режим використовується в прохідних аналогових фазообертачах. Одним варикапом можна змінити фазу до 45° . Для створення великого фазового зсуву використовують кілька включених в хвилевід діодів (6 - 8 шт.).

Переваги ФО на варикапах - мала потужність керуючих ланцюгів, яка становить мілівати при величині напруги управління одиниці вольт. Недоліки таких ФО - невисока точність зміни фази ЕМХ і обмеження на величину потужності ЕМХ, яку можна передати по хвилеводу. Тому ФО на варикапах застосовуються в основному в прийомних схемах.

3.6 Дискретні фазообертачі відбивного типу.

Дискретні фазообертачі відбивного типу реалізуються на схемах з р-і-п діодами. Вони позбавлені недоліків, властивих фазообертачам на варикапах, і забезпечують можливість роботи на великих високочастотних потужностях (вати ... кіловати). У таких фазообертачів використовуються наступні властивості р-і-п діода.

Р-і-п діод складається з р- і п-областей, між якими знаходиться шар практично чистого напівпровідника - і-область (рис. 3.8, а).

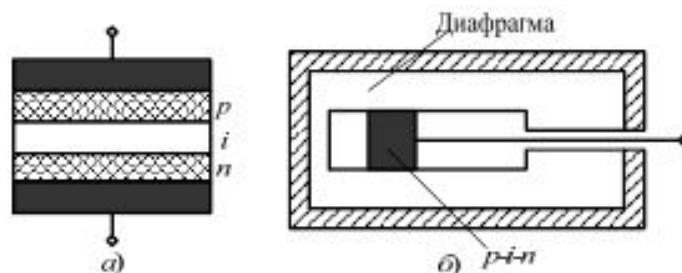


Рисунок 3.8 Дискретний фазовращатели відбивної типу

При негативному зміщенні р-і-п діод являє собою невелику ємність і практично не робить впливу на поширення ЕМХ. При позитивному зміщенні з р- і n-областей інтенсивно інжектуються дірки і електрони в і-область, в результаті чого її опір різко зменшується і діод є короткозамикачем.

Такі діоди включають в резонансну діафрагму, вміщену всередину хвилеводу (рис. 3.8, б). При цьому, в залежності від поданого на діод зміщення, ЕМХ або проходить, або відбивається від діафрагми, що дозволяє побудувати дискретний відображальний фазообертач (рис. 3.9).

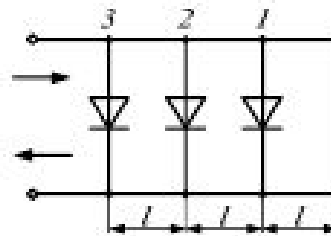


Рисунок 3.9 Дискретний відбивний фазообертач

При негативному зміщенні всіх діодів ЕМХ відбивається від торцевої короткозамкненої стінки хвилеводу. Якщо ж на 1-й діод подано позитивний зсув, то відображення ЕМХ походить від цієї діафрагми, і фаза ЕМХ, що виходить в порівнянні з попереднім випадком, зміниться на величину $\Delta\varphi$, рівну

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi l}{\lambda} \quad (3.2)$$

Очевидно, що при позитивному включенні будь-якого діода зміна фази буде визначатися виразом

$$\Delta\varphi_n = \frac{4\pi l n}{\lambda}, \quad (3.3)$$

де n - номер позитивно включеного діода.

Якщо вибрати відстань між діафрагмами $l = \lambda / 16$, то за допомогою трьох діодів і торцевої стінки можна змінювати фазу з дискретом, рівну 45° .

3.7 Феритові нвч прилади – фазообертачі

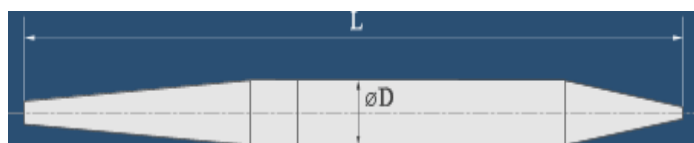


Рисунок 3.10. Фазоуправляючий елемент ФАР мм діапазону хвиль
прохідного типу

Таблиця 3.1

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Поляризація	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикавання, не більше	Інтервал робочих температур, ° С	Габаритні розміри, мм	
							D	L
Елемент ФАР 100	34 ± 0.5	Кругова	1.8	400	100 мкс	мінус 50 ÷ +60	4.8	56.5
Елемент ФАР 100-01	34 ± 0.5	Кругова	1.8	400	100 мкс	мінус 50 ÷ +60	4.8	59.7



Рисунок 3.11. Відбивний елемент ФАР

Таблиця 3.2

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Поляризація	Середні втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикавання, не більше	Енергія перемикавання, не більше	Інтервал робочих температур, ° С	Габаритні розміри, мм	
								D	L
ФВФН1-31МА	$33.45 \div 34.55$	Кругова	1.2	384	90 мкс	80 мкДж	мінус 50 ÷ +80	4.8	45.7

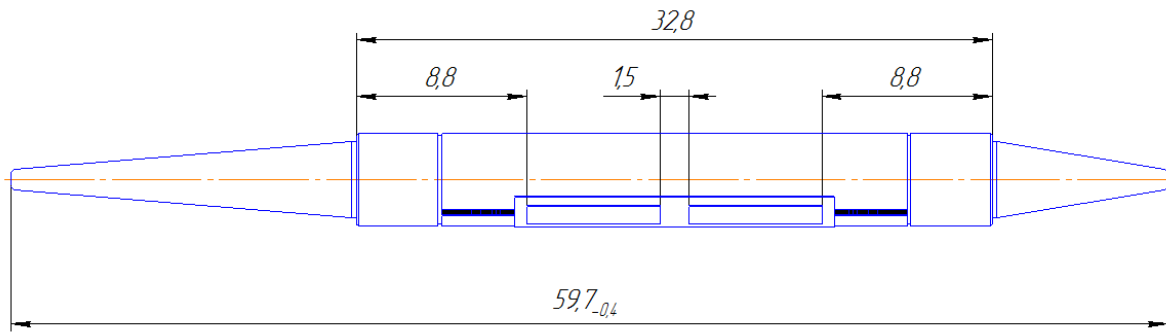


Рисунок 3.12. Прогідний елемент ФАР

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Поляризація	Середні втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикачя, не більше	Енергія перемикачя, не більше	Інтервал робочих температур, °С	Габаритні розміри, мм	
								D	L
ФВФН1-30МА	33.45 ÷ 34.55	Кругова	1.2	384	90 мкс	80 мкДж	мінус 50 ÷ +80	4.8	59.7

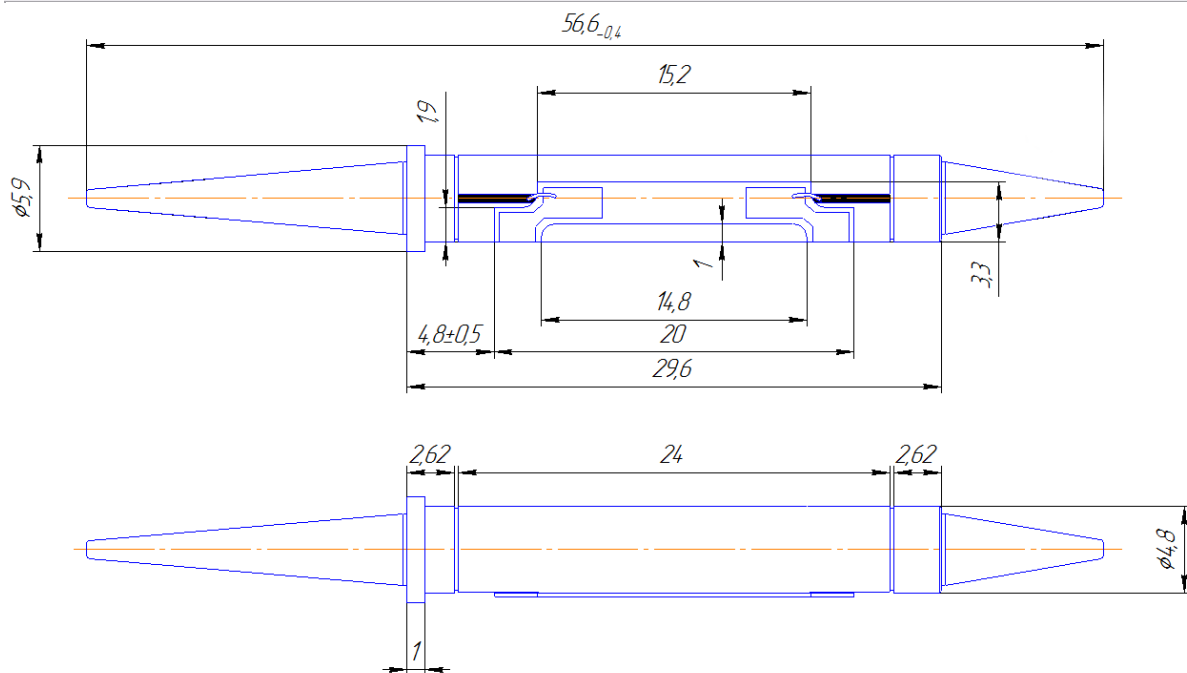


Рисунок 3.13. Фазоуправляючий елемент ФАР з магнітною пам'яттю мм діапазону хвиль фазообертач ФВФН1-29

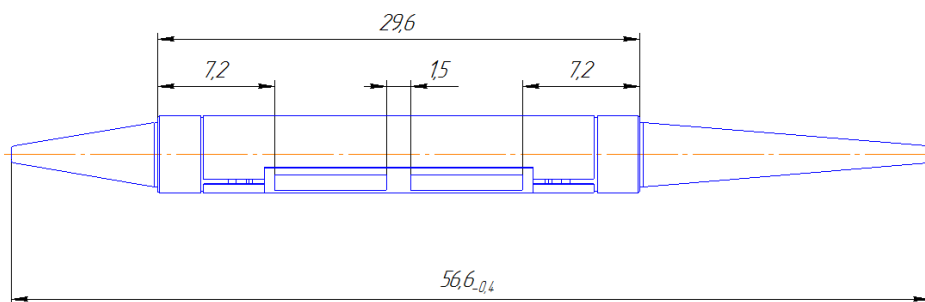


Рисунок 3.14. Фазообертач ФВФН1-30

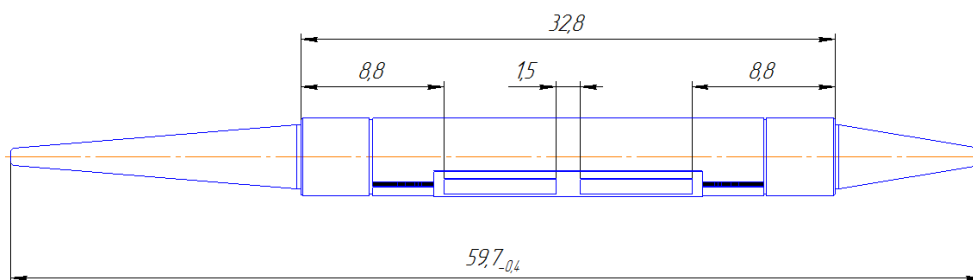


Рисунок 3.15. Фазообертач ФВФН1-30М

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Поляризація	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, ° не менше/не більше	Час перемикання	Інтервал робочих температур, °С
ФВФН1-29	34 ± 0.5	Кругова	1.8	390/490	менше 90 мкс	мінус 60 ÷ +85
ФВФН1-30			1.4			
ФВФН1-30М			1.4			

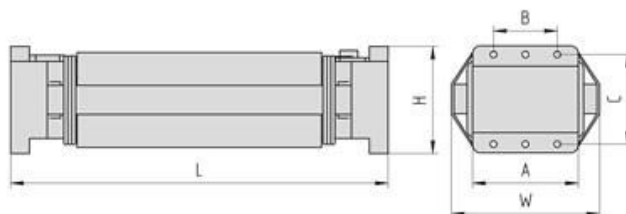


Рисунок 3.16 Взаємний хвиеводний феритовий фазообертач см діапазону

ХВИЛЬ

Таблиця 3.5.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикання	Інтервал робочих температур, °С	Габаритні розміри, мм			Приєднувальні розміри, мм		
						L	W	H	A	B	C
ФВФН2-27	6.5 - 7.0	0.9	360	не більше 105 мкс	мінус 50 ÷ +60	71	27.5	20.1	19.9	12	16.8

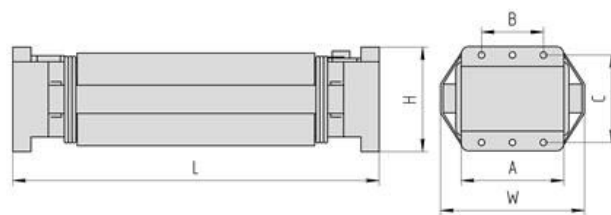


Рисунок 3.17. Взаємний хвильоводний феритовий фазообертач см діапазону хвиль

Таблиця 3.6.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикання	Інтервал робочих температур, °С	Габаритні розміри, мм			Приєднувальні розміри, мм		
						L	W	H	A	B	C
Фазовращатель ФТСК.467711.01	8.8-9.6	1.0	360	не более 90 мкс	минус 60 ÷ +70	55.25	20	15.2	16.3	8	12.2

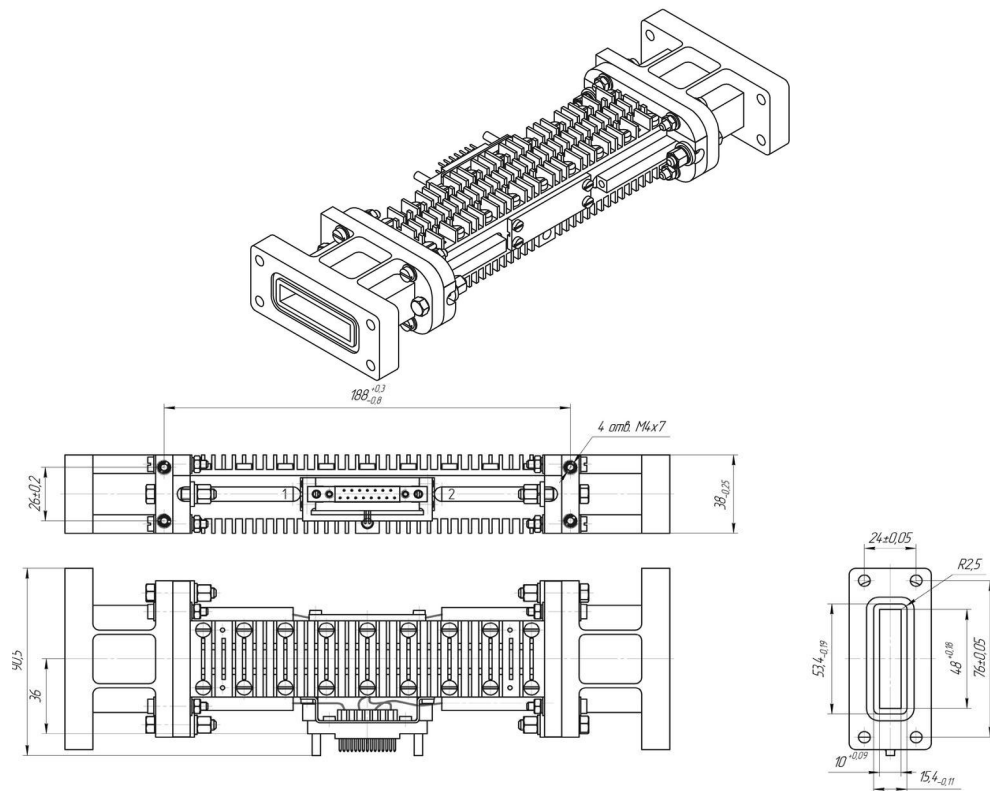


Рисунок 3.18. Феритовий хвиеводний тороїдальний фазообертач високого рівня потужності ФВФВ2-18

Таблиця 3.7.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °не менше	Час перемикання	Інтервал робочих температур, ° С
ФВФВ2-17	3.9 -4.2	0.9	360	не більше 30 мкс	мінус 50 ÷ +50
ФВФВ2-18	2.69 -3.17	0.9	360	не більше 30 мкс	мінус 50 ÷ +60

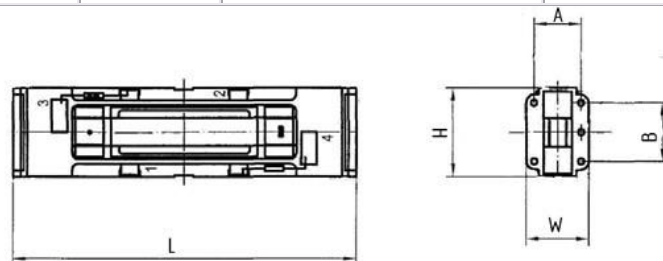


Рисунок 3.19. Феритовий взаємний фазообертач см діапазону хвиль

Таблиця 3.8.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикавання	Інтервал робочих температур, °С	Габаритні розміри, мм			Приєднувальні розміри, мм	
						L	W	H	A	B
ФВФН2-25	6.5-7.0	1.1	360	не более 520 мкс	минус 50 ÷ +65	110	20	28	15	18

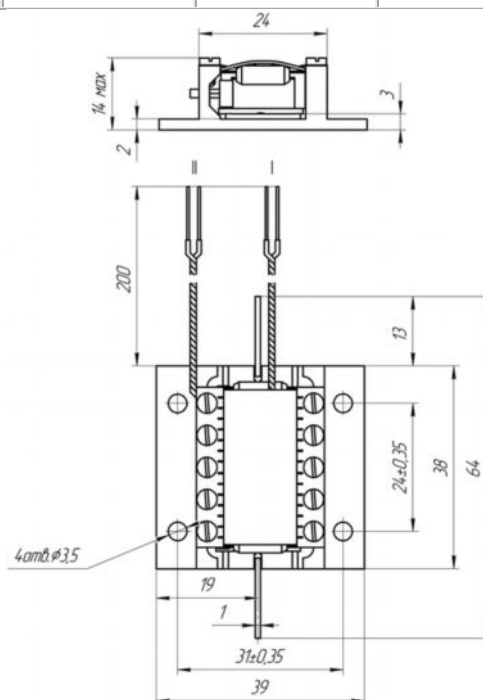


Рисунок 3.20. Мікрополосковий феритовий фазообертач

Таблиця 3.9

Основні (класифікаційні) параметри приладів в нормальних кліматичних умовах

Позначення типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Середні втрати, дБ, не більше	Максимальні втрати, дБ, не більше	Максимальний керований фазовий зсув, ... °, не менше	Інтервал робочих температур, °С	Вхідна імпульсна потужність НВЧ, кВт, не більше	Вхідна середня потужність НВЧ, Вт, не більше
ФПФН2-4	3,9-4,2	2,2	2,6	440	-50 ÷ +50	0,3	50
ФПФН2-4-01	3,9-4,2	2,2	2,6	420	-50 ÷ +50	0,3	50

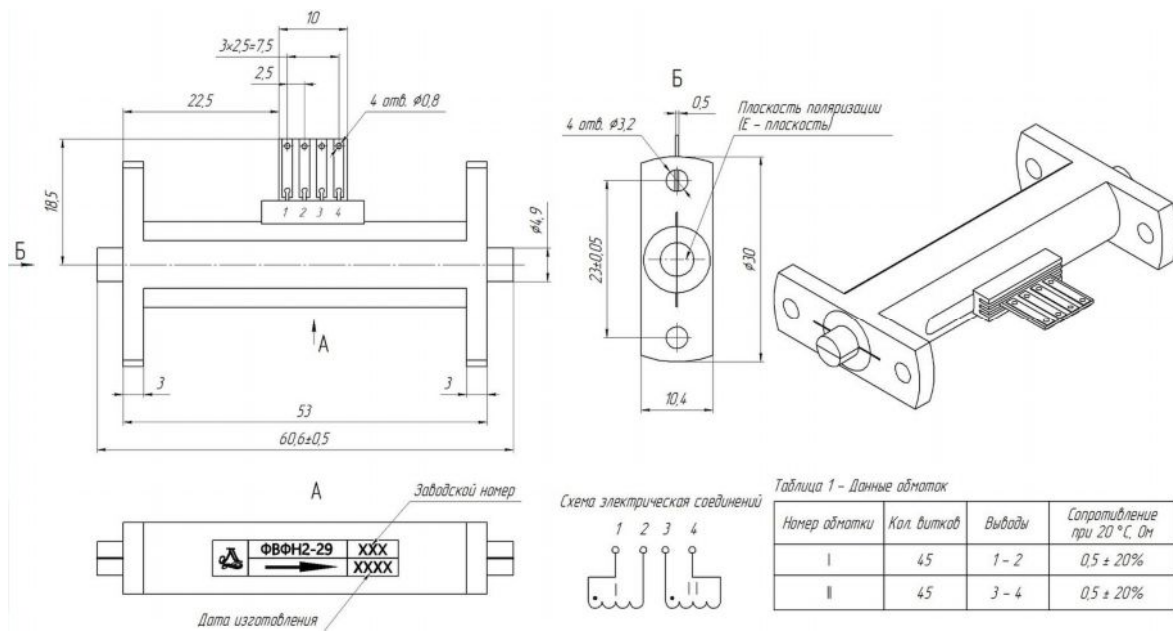


Рисунок 3.21. Фазообертачі хвильові ферритові ФВФН2-29, ФВФН2-29М, ФВФН2-29-01 низького рівня потужності см діапазону довжин хвиль (Вхід і вихід фазообертачів узгоджені на стандартний хвилевід перетином 16х8 мм)

Таблиця 3.10.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення приладу	Діапазон робочих частот, ГГц	Прямі втрати пор. / Макс, дБ, не більше	Максимальний керований фазовий зсув, ... °, не менше	Час перемикання фазового зсуву, мкс, не більше	Діапазон робочих температур, °С	КС ХН, не більше	Потужність, Вт		Енергія перемикання, мкДж, не більше	Управління, В / А, не більше	Маса, кг, не більше
							середня	імпульсна			
ФВФН2-29, ФВФН2-29М, ФВФН2-29-01	15,9 8-16,3 2	1/1,5	400	100	від 80 до мінус 50	1,5	1,8	80	800	30/2	0,02

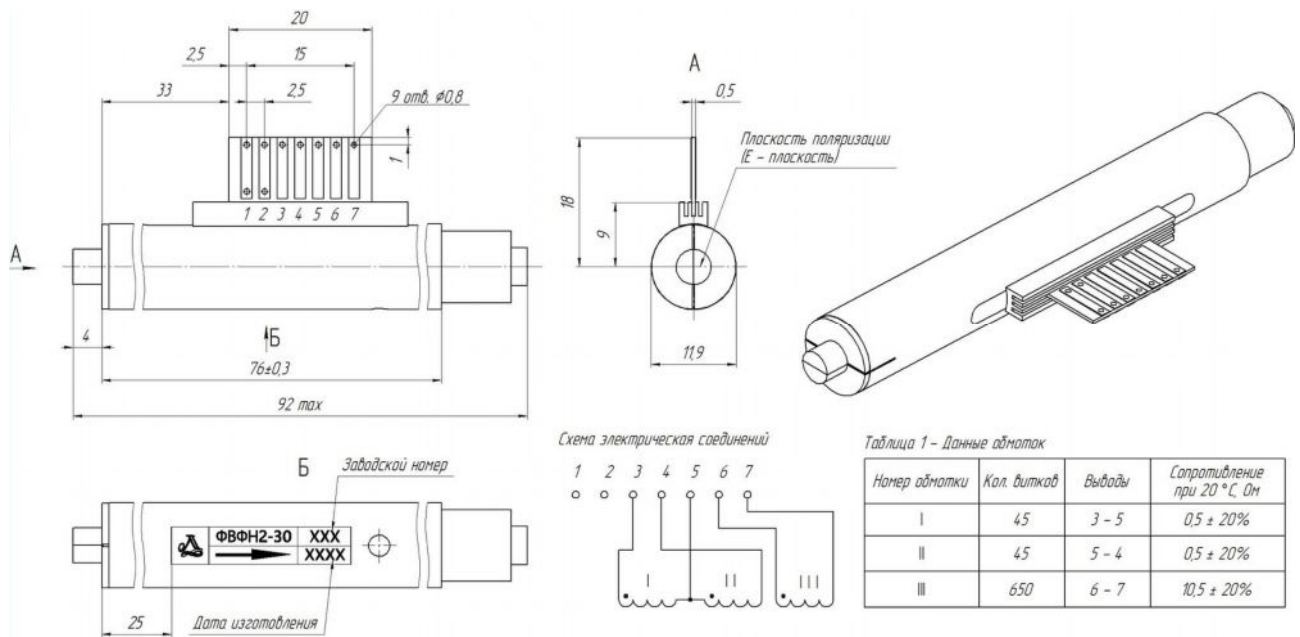


Рисунок 3.22. Фазообертач хвиеводний феритовий ФВФН2-30 низького рівня потужності см діапазону довжин хвиль (Вхід фазообертача узгоджений на хвиевід поперечного перерізу 16x8, а вихід на вільний простір)

Таблиця 3.11.

Технічні характеристики в нормальних кліматичних умовах

Позначення приладу	Діапазон робочих частот, ГГц	Прямі втрати макс, дБ, не більше	Максимальний керований фазовий зсув, °, не менше	Час перемикавання фазового зсуву, мкс, не більше	Час перемикавання поляризації, мс, не більше (при струмі mA не більше)	Ослаблення ортогональних лінійно поляризованих сигналів, дБ, не менше	Діапазон робочих температур, °C	КС ХН, не більше	Потужність, Вт		Енергія перемикавання, мкДж, не більше	Управління фазовим зрушенням, В / А, не більше	Маса, кг, не більше
									середня	імпульсна			
ФВФН2-30	16,0 - 16,3	1,7	420	100	3 (100)	20	від 80 до мінус 50	1,6	1,8	80	800	30/2	0,03

Вимірювання КСХн хвелеводу 61×10мм з діелектричною пластиною

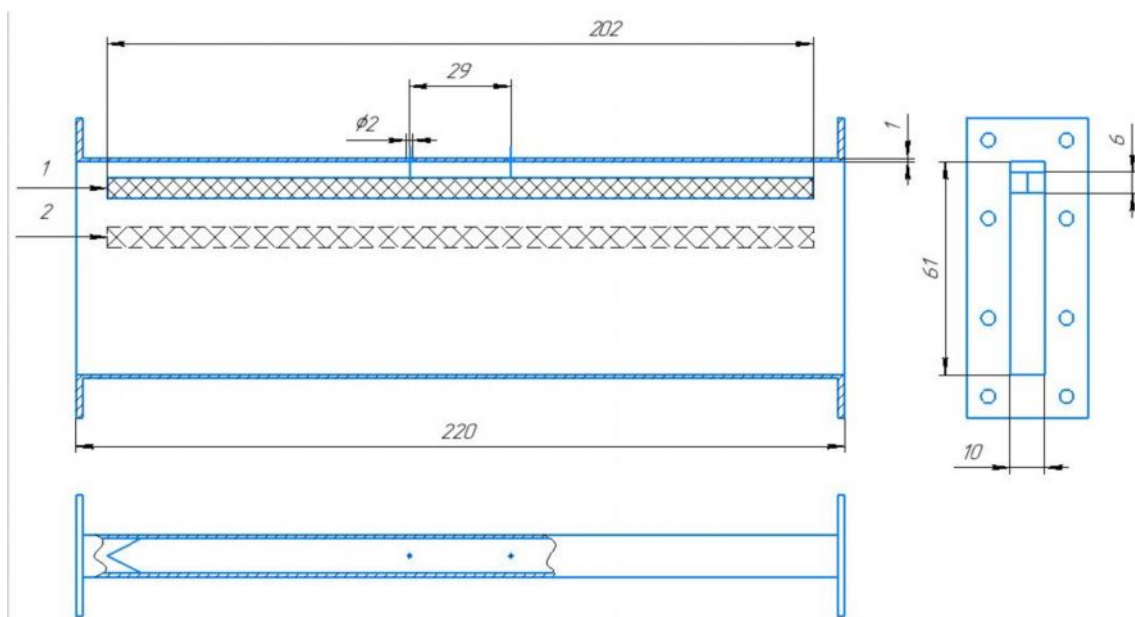


Рисунок 3.23. Варіант конструкції хвелеводного фазоповертачаю

1- діелектрична пластина знаходиться в положенні 1;

2- діелектрична пластина знаходиться в положенні 2;

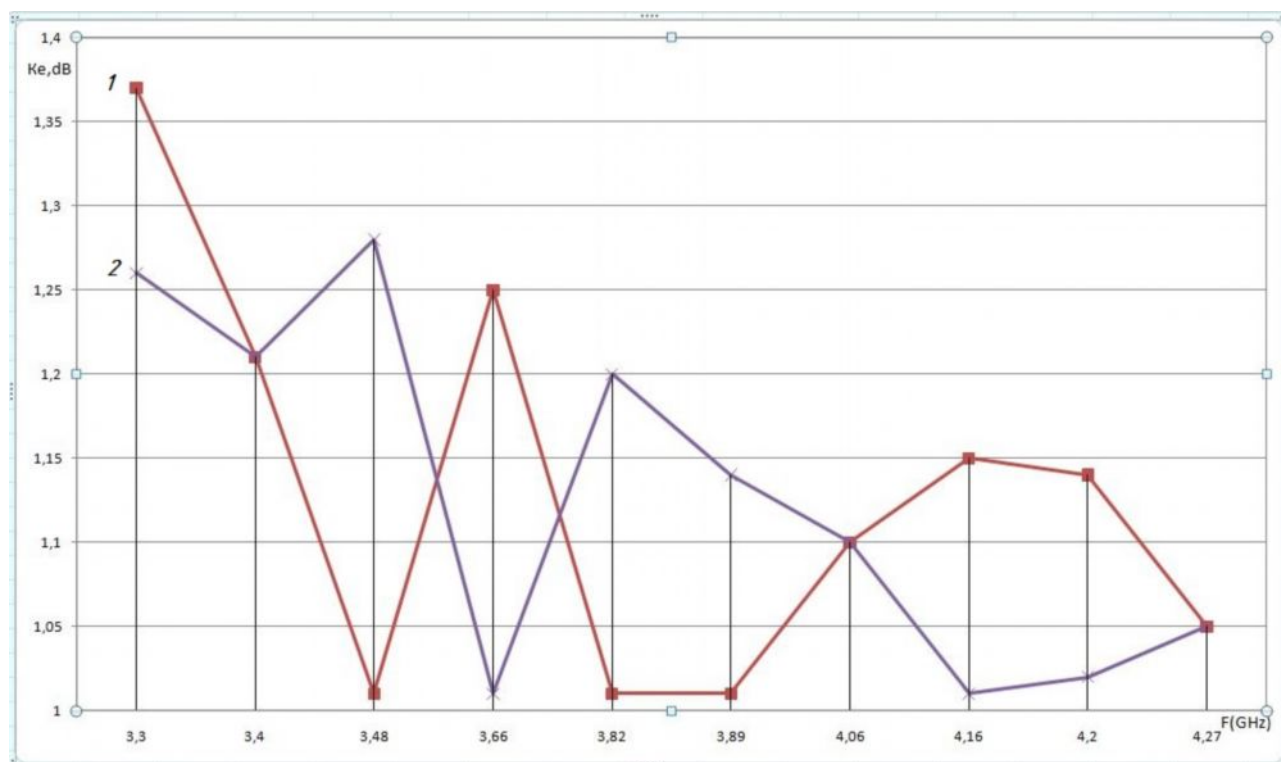


Рисунок 3.15. Діаграми вимірювання КСХн у робочому діапазоні частот при використанні двох фіксованих положень діелектричних пластин

3.8 Висновок до розділу 3

На основі вищеприведених досліджень технічних характеристик поляризаційних секцій виконані вимірювання КСХн, коефіцієнта еліптичності та динамічних втрат, які засвідчили відповідність виміряних значень до стандартних технічних характеристик вузлів даного типу та теоретично розрахованих параметрів. Дані секції можна використовувати у антенно-хвильових трактах систем зв'язку (радіорелейних, супутникових, тропосферних, ефірно-кабельних).

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Підвищення стійкості роботи об'єктів радіотехнічної галузі у воєнний час

На основі вивчення факторів, які впливають на стійкість роботи об'єктів, і оцінки стійкості елементів і галузей виробництва проти уражаючих факторів ядерної, хімічної і біологічної зброї, стихійних лих і виробничих аварій, необхідно завчасно організувати і провести організаційні, інженерно-технічні й технологічні заходи для підвищення стійкості роботи.

Здійснення організаційних заходів передбачає завчасну підготовку всіх структур цивільного захисту, служб і формувань до надзвичайних ситуацій.

Вжиттям технологічних заходів підвищується стійкість роботи об'єктів шляхом змінювання технологічних процесів, режимів, можливих в умовах надзвичайних ситуацій.

Інженерно-технічні заходи мають забезпечити підвищену стійкість виробничих споруд, технологічних ліній, устаткування, комунікацій об'єкта до впливу уражаючих факторів під час надзвичайних ситуацій.

Забезпечення захисту людей та їх життєдіяльності. Створення на об'єкті надійної системи оповіщення про загрозу нападу противника, радіоактивне забруднення, хімічне і біологічне зараження, загрозу стихійного лиха і виробничої аварії. Організація розвідки і спостереження за радіоактивним забрудненням, хімічним і біологічним зараженням; гідрометеорологічне спостереження за рівнем води, напрямком і швидкістю вітру, рухом і поширенням хмари радіоактивного забруднення, СДЯР і ОР.

Створення фонду захисних споруд ЦО, запасів засобів індивідуального захисту і забезпечення своєчасної видачі їх населенню [15].

Завчасна підготовка до масової санітарної обробки населення і знезаражування одягу, організація взаємодії з установами охорони здоров'я для медичного обслуговування населення у надзвичайних ситуаціях.

Підготовка до евакуації населення, розміщеного в зонах можливих руйнувань і катастрофічного затоплення. Завчасна підготовка місць евакуації, організація прийому евакуйованого населення на територію населених пунктів.

Постачання населення продуктами харчування, питною водою, предметами першої необхідності; комунальне побутове обслуговування населення з урахуванням проведення евакуаційних заходів, забезпечення захисту продовольчих запасів.

Навчання населення способам захисту, надання першої допомоги, практичним діям в умовах надзвичайних ситуацій, морально-психологічна підготовка населення для виживання.

Забезпечення чіткої інформації про обстановку та правила дій і поведінки населення в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу.

Забезпечення надійності системи управління і зв'язку. Організація захищеного пункту управління, оснащення його засобами зв'язку, які б дали можливість швидко доводити сигнали ЦЗ до всіх виробничих підрозділів і населення у місцях проживання.

Розробка документів, які регламентують чіткі дії персоналу для забезпечення сталої роботи об'єкта в надзвичайних умовах.

Підготовка необхідного резерву кадрів спеціалістів, механізаторів і керівних працівників для зміни тим, які будуть мобілізовані.

Планування збору даних про обстановку, передачу команд і розпоряджень в умовах впливу на об'єкт уражаючих факторів. Організація використання радіозасобів, телефонного зв'язку, посильних для зв'язку з віддаленими населеними пунктами, виробничими підрозділами, а також з колонами евакуйованого населення, що перебувають у дорозі, і відповідальними особами, які супроводжують під час евакуації. Забезпечення дублювання ліній і каналів зв'язку. Для підтримання на високому рівні ЦЗ

регулярно проводити підготовку населення, спеціалістів, проводити об'єктові тренування і командні навчання.

Радіотехнічні війська (РТВ) — рід військ у складі Повітряних сил, військ ППО країни, сухопутних військ і ВМС. Призначені для ведення радіотехнічної розвідки повітряного, наземного і морського противника, пізнання виявлених цілей і оповіщення про них військ ППО, ін. видів збройних сил, забезпечення наведення винищувачів на ціль, дій зенітних військ і виконання інших завдань.[16].

На РТВ покладаються такі завдання:

- ведення радіолокаційної розвідки повітряного противника;
- радіолокаційне забезпечення управління військами (силами);
- радіолокаційне забезпечення бойових дій (бойового застосування) з'єднань і військових частин ЗРВ, авіації, військових частин і підрозділів РЕБ;
- радіолокаційне забезпечення польотів авіації за планами бойової підготовки;
- контроль за дотриманням порядку використання повітряного простору країни.

Радіотехнічні війська можуть залучатися для виявлення надводних цілей, ядерних вибухів, спостереження за запуском (спуском) космічних об'єктів на початкових (кінцевих) ділянках їх траєкторій.

Радіотехнічна розвідка (РТР) - вид розвідувальної діяльності, метою якого є збір і обробка інформації одержуваної за допомогою радіоелектронних засобів про радіоелектронні системи по їх власних випромінюваннях, і подальша їх обробка з метою отримання інформації про положення джерела випромінювання, його швидкості, наявності даних у випромінюваних сигналах, смислового змісту сигналів.

Системи РТР встановлюються на військовій техніці у складі бортових керівників комплексів і дозволяють забезпечити безпеку, за рахунок своєчасного виявлення джерел електромагнітного випромінювання (електронні

системи ракет, літаків, і ін.), а отже своєчасного попередження про можливу загрозу і проведення операцій по порятунку техніки і людей її керівників. Установка засобів РТР на літаках і супутниках дозволяє виявити на великій території локальні джерела радіовипромінювання, які можуть виявитися системами радіолокацій, передавачами, апаратурою радіоборотьби, радіотрансляторами і т.п. знайти запуск ракет і одержати дані телеметрії, якими вони обмінюються з центром управління, на підставі яких зробити висновки про цілі польоту (використовування систем РТР у складі систем раннього попередження).

Дані одержувані системою РТР військової техніки, можуть бути доступні іншим споживачам за допомогою внутрішніх каналів зв'язку і можуть утворювати так зване «інформаційне поле», що дозволяє більш ефективно аналізувати поточну обстановку.

Системи РТР можуть використовуватися для отримання яких або даних шляхом знімання і розшифровки параметрів електромагнітного випромінювання з телефонних кабельних і абонентних ліній, радіорелейних каналів, кабелів комп'ютерних мереж, випромінювання апаратури працюючої з інформацією (моніторів, комп'ютерів і т.д.), перехоплення радіообміну і т.д.. ретрансляції в центр її обробки [17].

4.2 Трудові норми Міжнародної організації праці. Конвенції та Рекомендації МОП. Основні Конвенції МОП в галузі охорони праці.

Міжнародна Організація Праці (МОП)- це спеціалізоване агентство ООН, що займається поширенням соціальної справедливості та визнаних міжнародною спільнотою людських і трудових прав.

Вона була заснована в 1919 році і залишається донині єдиним збереженим великим результатом Версальського договору.

МОП визначає міжнародні трудові норми у виді Конвенцій і Рекомендацій, які встановлюють мінімальні стандарти основних трудових прав:

свобода асоціацій, право на організацію, колективні угоди, скасування примусової праці, рівні можливості і рівні права, інші стандарти у всьому спектрі питань праці. МОП забезпечує технічну допомогу, в основному в галузі професійного навчання і перепідготовки, політики працевлаштування, управління працею, трудового законодавства та виробничих нормативів, умов праці, кооперативів, соціального забезпечення, статистики праці, охорони праці і виробничої гігієни. Вона допомагає розвитку незалежних організацій працівників і роботодавців, а також забезпечує цим організаціям послуги з навчання та консультування.

Конвенція МОП- це міжнародне зобов'язання, яке розроблене і прийняте МОП. Конвенції підлягають ратифікації державами-членами МОП. Країна, яка ратифікувала Конвенцію МОП, приймає на себе зобов'язання по застосуванню положень цієї Конвенції.

Конвенція передбачає розробку кожною державою національної політики в галузі виробничої безпеки та гігієни праці із зазначенням відповідних функцій та відповідальності державних органів, роботодавців і працівників.

Рекомендація МОП - міжнародний документ, який розроблений і прийнятий МОП і розширює зміст тієї чи іншої Конвенції.

Рекомендації стосуються питань, які не створюють формальних зобов'язань держав - членів МОП. Рекомендація охоплює технічні аспекти такої політики.

Декларація МОП основних принципів та прав у світі праці ухвалена Міжнародною конференцією праці на її 86-ій сесії в Женеві, 18 червня 1998 року.

В Декларації МОП нагадує, що усі держави-члени, вільно вступаючи до МОП, підтримали принципи та права, закріплені у Статуті та Філадельфійській декларації, та взяли на себе зобов'язання добиватися реалізації усіх цілей Організації, використовуючи для цього всі наявні засоби та з повним врахуванням притаманних їм особливостей.

Ці принципи та права втілилися та розвинулися у формі конкретних прав та обов'язків у Конвенціях, які визнаються фундаментальними.

Цією Декларацією МОП заявляє, що всі члени Організації, навіть ті з них, які не ратифікували вказані Конвенції, мають зобов'язання, що випливають вже з самого факту їхнього членства в Організації, дотримуватися, зміцнювати та реалізовувати добросовісно та відповідно до Статуту принципи, що стосуються основних прав, які є предметом цих фундаментальних Конвенцій, а саме:

- свобода асоціації та реальне визнання права на ведення Колективних переговорів;
- скасування усіх форм примусової чи обов'язкової праці;
- реальна заборона дитячої праці;
- недопущення дискримінації в області праці та занятості.

МОП встановлює механізм, за яким від держав-членів щорічно запитуються доповіді, щоб отримати від урядів, які не ратифікували одну чи більше фундаментальних Конвенцій, інформацію стосовно усіх змін, які могли мати місце в їхньому законодавстві та практиці. Ці доповіді, потім будуть розглядатися Адміністративною радою МОП і далі виноситися як доповідь Генерального директора на Конференції МОП для тристороннього обговорення.

Багатонаціональні корпорації повинні повністю враховувати загальні політики країн, у яких вони здійснюють діяльність. Їхня діяльність повинна відповідати першочерговим цілям розвитку та соціальних завдань, а також соціальній структурі країни, у якій вони діють.

Зокрема, в галузі охорони праці Декларація встановлює наступне. Уряди повинні стежити за тим, щоб як багатонаціональні, так і національні корпорації забезпечували для своїх працівників належні норми охорони праці. При цьому урядам, які ще не ратифікували Конвенції МОП про обладнання машин захисними пристроями (119), про захист від радіації (115), про бензол (136), про професійні ракові захворювання (139), настійно пропонується в максимально можливому ступені застосовувати принципи, що викладаються в цих

Конвенціях та в Рекомендаціях, що їх доповнюють (118, 134, 144 та 147). Варто також брати до уваги кодекси практичних правил і практичні керівництва, зазначені в останньому списку публікацій МОП з питань охорони гігієни праці.

Багатонаціональні корпорації повинні встановлювати максимально високі норми охорони праці, що відповідають національним вимогам і враховують накопичений ними в рамках підприємства досвід, включаючи всі відомості про особливі ризики. Крім того, вони повинні надавати представникам працівників підприємства, а також компетентним органам і організаціям роботодавців і працівників на їх вимогу у всіх країнах, у яких вони діють, інформацію по діючим на підприємствах в одних країнах нормам охорони праці, яких вони дотримуються в інших країнах. Зокрема, вони повинні інформувати всіх тих, кого це може стосуватися, про окремі ризики і про відповідні заходи захисту від них, коли вони пов'язані з новими виробничими процесами та продукцією. Варто очікувати, що багатонаціональні корпорації, як і аналогічні національні корпорації, будуть відігравати провідну роль у вивченні чинників ризику для безпеки і гігієни праці та застосуванні відповідних удосконалень у всіх підрозділах корпорації.

Багатонаціональні корпорації повинні співробітничати з міжнародними організаціями, що займаються розробкою та прийняттям міжнародних норм в галузі охорони праці.

Відповідно до національної практики багатонаціональні корпорації повинні повною мірою співробітничати з компетентними органами, що займаються питаннями охорони праці, представниками працівників і їхніх Організацій. Питання, що стосуються охорони праці, варто включати в договори, що укладаються із представниками працівників та їхніх організацій.

4.3 Висновок до розділу 4

В даному розділі розглянуті такі питання як, трудові норми Міжнародної організації праці а також підвищення стійкості роботи об'єктів радіотехнічної галузі у воєнний час. На основі вивчення факторів, які впливають на стійкість роботи об'єктів, і оцінки стійкості елементів і галузей виробництва проти уражаючих факторів ядерної, хімічної і біологічної зброї, стихійних лих і виробничих аварій, необхідно завчасно організувати і провести організацію.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи отримано наступні результати:

1. Виконано дослідження широкосмугових хвилевід них механічних та механоелектричних фазоповертачів на основі аналізу уже існуючих прототипів.
2. Створено різні конструктивні варіанти механічного та механо – електричного фазоповертача на фіксовані кути повороту електромагнітної хвилі;
3. Проводились дослідження впливу різної довжини стрижнів, різних діелектричних пластин для визначення рівня затримки фазової складової.
5. Тема наукових досліджень має наукову, технічну, а також економічну, соціальну або екологічну значущість і сприяє тим самим зростанню темпів науково-технічного прогресу в цілому.
6. Досліджено підвищення стійкості роботи об'єктів радіотехнічної галузі у воєнний час. Оцінка впливу радіоактивного забруднення на процес дослідження технічних характеристик поляризаторів.
8. Досліджено Трудові норми Міжнародної організації праці. Конвенції та Рекомендації МОП. Основні Конвенції МОП в галузі охорони праці. Галузеві системи управління охороною праці. Мета та принципи функціонування. Організаційна та функціональна структури СУОПГ. Встановлення зв'язку нещасного випадку з виробництвом.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. http://m.tntu.edu.ua/storage/news/00003921/Book%202_2019.pdf
2. Ю. Н. Панасюк, А. А. Пудовкин
“Устройства сверхвысоких частот “ 2015р. ст.51
3. https://yandex.ru/patents/doc/SU1312665A1_19870523
4. <https://studfile.net/preview/4574718/page:21/>
5. Модель А.М. - Фильтры СВЧ в радиорелейных системах 1967
6. Kaganov V.I. _ Radiotekhnika Kompjuter Mathcad, 2001,
7. Кантор Л.Я. - Спутниковая связь и вещание. Справочник (1988)
8. Орлеанская Є.В.- Широкополосное устройство для поворота плоскости поляризации, Радиотехника, т.23,№8,1968
9. <http://www.parta.com.ua/referats/view/7736/>
10. <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=65900>
11. <https://works.doklad.ru/view/MV5dkxdFlmE.html>
12. <https://works.doklad.ru/view/vayfNfSTKOY.html>
13. https://pidruchniki.com/11221213/bzhd/osnovni_napryamki_pidvischennya_stiykosti_roboti_obyekta_nadzvichaynih_situatsiyah
14. https://uk.wikipedia.org/wiki/Радіотехнічні_війська_України
15. http://allref.com.ua/uk/skachaty/radiotekhnichna_rozvidka_istoriya_ta_suchasniy_stan
16. <https://studfiles.net/preview/4000649/page:7/>

17. <https://studopedia.org/10-86231.html>
18. <https://studfiles.net/preview/4364404/page:11/>
19. М. В. Андреев, О. О. Дробахин, В. І. Магпо, В. М. Морозов, Д. Ю. Салтиков АНТЕНИ НВЧ. ПОСІБНИК ДО ВИВЧЕННЯ КУРСУ "АНТЕННО-ФІДЕРНІ ПРИСТРОЇ" 2008
20. Х.Хенц, Мауэ, Вестифаль Теория дифракции "Мир" 1964
21. Г.Т. Марков, Гамлин. "Возбуждение электромагнитных волн". "Энергия", 1967
22. Морс, Решбах. Методы теор. физики 2.1 "U.U" 1958
23. Айземберг. Антенны УКВ. 1957
24. Беляев "Апертурный метод как граничная задача с некоторыми краевыми условиями". "Труды МЭИ" 1974, с.194
25. Некоторые ошибки расчета д.н. зеркальных антен с использованием уравнений Кирхгофа. "Electron Lett, 1973, 9, №21"
26. Keller journal Appl Phys №28, 1957
27. W.V.T. Rusch. Сравнения геометрических и интегральных полей от рефлекторов. "Proc. IEEE" 1974, №11
28. Уфимцев. Метод краевых волн в физической теории дифракции. "Сов. рад" М. 1962
29. Фок. Дифракция радиоволн вокруг земной поверхности. 1946
30. Исследования по ррв, сбг. 1948
31. Машковцев, Цибизов. Теория волноводов. "Наука" 1966
32. Paris "Анализ апертурных антенн с помощью ВМ. "IEEE Trans AP" 1968, №2
33. Марков, Сазанов. "Антенны", "Энергия", М, 1975
34. Хургин, Яковлев. Финитные функции в физике и технике. Из "Наука", М, 1971
35. Бергланд. Руководство к быстрому преобразованию Фурье. "Зарубежная РЭ" 1971, №3
36. Бригхэм. Быстрое преобразование Фурье. "ТШЭР", 1967, №10

- 37.D.S.joues. Числовые методы решения антенных задач. "Proc.Just Elec Eug",1974,121, №7
- 38.Непомнящий. Влияние амплитудно – фазового распространения поля в раскрыве антенны, и ее направлении. "Радиотехника" 1972,№8

ДОДАТКИ

Додаток А

Діапазони частот згідно класифікації IEEE

Діапазони частот		
Назва	Частотний діапазон, ГГц	
Назва діапазону	Діапазон частот РЛС	Діапазон частот в супутниковому зв'язку
L	1,0 – 2,0	
S	2,0 – 4,0	
C	4,0 – 8,0	4,0 – 7,0
X	8,0 – 12,0	7,0 – 10,7
Ku	12,0 – 18,0	10,7 – 18,0
K	18,0 – 26,5	18,3 – 20,2; 27,5 – 31,5
Ka	26,5 – 40,0	

Додаток Б

УДК621.372.853.1

Н.В. Луб'янецький,

Г.П. Химич

Ю.А.Умзар, канд. техн. наук, доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

Керований хвилевідний фазоповертач НВЧ діапазону

N.V. Lubjanetskyj

H.P. Khymych

JU.A.Umzar, Ph.D, Assoc. Prof

Controlled waveguide phase shifter of the SHF band

У даній статті розглянута конструкція хвилеводного фазоповертача прохідного типу, який використовується для зміни фази (затримки) прохідного сигналу. Ідеальний невзаємний фазоповертач представляє собою чотириполусник, який пропускає енергію у двох напрямках без затування, але з різним фазовим зсувом. Його матриця розсіювання має такий вигляд:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & e^{j\varphi_{12}} \\ e^{j\varphi_{21}} & 0 \end{pmatrix}$$

Реальний фазоповертач характеризується наступними основними параметрами:

- невзаємний фазовий зсув $\Delta\varphi$;
- вносимі затування (втрати падаючої електромагнітної хвилі);

$$10\lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}} = -20\lg S_{21}$$

- робоча смуга частот Δf , у межах якої значення $\Delta\varphi$ задано, а значення других параметрів не гірше заданих;

- узгодження із хвилеводним трактом, VCWR.

Спроекований хвилевідний фазоповертач НВЧ діапазону (С діапазон) показаний на рис.1. Робочий елемент конструкції – пластина з композитного матеріалу, яка переміщається

вздовж широкої стінки хвилеводу і створює затримку електромагнітної хвилі. Переміщення пластини відбувається електричним способом за допомогою крокового електродвигуна та інтелектуальної системи керування, де задається крок, швидкість переміщення, фазовий зсув.

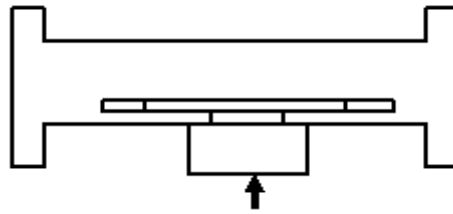


Рисунок 1. Хвильовідний фазоповертач.

Технічні характеристики спроектованого фазоповертача наступні:

- $V_{CWR} \leq 1,2$;
- втрати сигналу $\leq 0,2$ dB;
- частотний діапазон – розширений С діапазон.

Даний фазоповертач може використовуватись у складних двохдіапазонних антенних трактах.