

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Борисов О.В.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“13” травня 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 153 «Мікро – та наносистемна техніка»
(код і назва)

на тему: Фазообертач на основі неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ДП-61м
(шифр групи)

Сергєєва Аліна Олександрівна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., ктн., доц., Татарчук Д.Д. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т. _____

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В. _____

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Реферат

81 сторінка, 6 розділів, 26 ілюстрацій, 29 таблиць, 34 джерела за переліком посилань.

Розвиток інформаційних технологій висуває жорсткі вимоги щодо зниження вартості, підвищення надійності, зменшення габаритів і ваги вузлів устаткування зв'язку. Задовольнити ці вимоги можна шляхом розробки нових більш ефективних конструкцій. Одним з перспективних шляхів розв'язку даної проблеми є виокремлення пристроїв на основі мікросмужкових ліній передач.

Смужкові лінії являють собою площинні варіанти двопровідних і коаксіальних ліній. До переваг смужкових ліній і пристроїв на їх основі відносяться: можливість автоматизації (а, отже, і здешевлення) процесу виробництва із застосуванням техніки друкованих схем і виготовлення складних функціональних вузлів, невеликі габарити і вага, широкополосність, простота виготовлення деяких типів смужкових пристроїв в лабораторних умовах .

Тому основним завданням дисертації є розробка керованого НВЧ фазообертача на основі неоднорідних мікросмужкових ліній. Для досягнення цієї мети слід вирішити наступні завдання:

- провести огляд і порівняльний аналіз існуючих конструкцій мікросмужкових фазообертачів;
- на основі проведеного аналізу запропонувати конструкцію фазообертача для діапазону частот 0,5...2 ГГц;
- провести огляд і порівняльний аналіз існуючих методів управління фазою, обрати метод управління і обґрунтувати вибір;
- провести числове моделювання та експериментальне дослідження запропонованої конструкції фазообертача.

Вирішення цих завдань дасть можливість отримати оптимальну мініатюрний керований фазообертач з великим економічним потенціалом.

Об'єктами дослідження даної роботи є керовані фазообертачі НВЧ на основі неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній. Предметом дослідження є електродинамічні характеристики керованих фазообертачів. Для дослідження використано наступні методи:

- Розрахунок та виготовлення досліджуваного макету прохідного фазообертача на основі неоднорідних мікросмужкових ліній;
- включення електрострицкійного актюатора типу «сymbal» в структуру двохрезонаторного фазообертача;
- реалізація електромеханічного керування фазою досліджуваного фазообертача за рахунок зміни відстані між збуджуючим елементом та мікросмужковими резонаторами;

Досліджено новий спосіб керування прохідного фазообертача резонансного типу . Отримані результати показали, що спроектована структура може застосовуватись в різних сферах зв'язку. Результати роботи представлені X Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2017» та на XXXVIII міжнародній науковій конференції "Електроніка та нанотехнології (ELNANO-2018)"

Ключові слова: НВЧ, фазообертач, неоднорідність електромеханічне керування, мікросмужкова лінія.

Abstract

81 page 6 chapters, 26 figures, 29 tables, 34 references.

The development of information technology puts forward stringent requirements to reduce costs, improve reliability, reduce the size and weight of the nodes of communication equipment. These requirements can be met by developing new, more efficient designs. One of the promising solutions to this problem is the virokostannya devices based on microstrip transmission lines.

The striplines are planar versions of two-wire and coaxial lines. The advantages of striplines and devices based on them include: the possibility of automation (and, consequently, cheaper) of the production process with the use of printed circuit technology and the manufacture of complex functional units, small dimensions and weight, broadband, the simplicity of manufacturing certain types of strip devices in the laboratory .

Therefore, the main task of the thesis is to develop a controlled microwave phase shifter based on heterogeneous microstrip lines. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

- review and compare the existing designs of microstrip phase shifter;
- on the basis of the analysis carried out, to propose a phase shifter design for the frequency range 0.5 ... 2 GHz;
- review and compare the existing methods of phase management, choose the management method and justify the choice;
- numerical simulation and experimental study of the proposed phase shifter design were carried out.

Solving these problems will provide an optimal miniature controlled phase shifter with a large economic potential.

The objects of investigation of this work are controlled microwave phase shifters based on heterogeneous segments of microstrip lines. The subject of the study is the electrodynamic characteristics of controlled phase shifters. The following methods were used for the study:

- calculation and manufacturing of the investigated phase phase shifter model of the phase phase on the basis of heterogeneous microstrip lines;
- inclusion of an electrostructural drive of the "plate" type in the structure of a two-resonator phase shifter;
- electromechanical control of the phase of the phase shifter under investigation due to a change in the distance between the excitation element and microstrip resonators;

A new method for controlling a resonant-type pass-through phase shifter was investigate. The obtained results showed that the designed structure can be used in various communication fields The results of the work are presented at the X International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics-2017" and at the XXXVIII International Scientific Conference "Electronics and Nanotechnologies (ELNANO-2018)"

Keywords: Microwave, phase shifter, heterogeneity, electromechanical control, microstrip line.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1.СМУЖКОВІ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧ.....	9
1.1.Типи смужкових ліній	9
1.2. Переваги та недоліки смужкових ліній.....	12
Висновки по розділу	14
2.ТЕОРІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НВЧ ПРИЛАДІВ.....	15
2.1. Способи виготовлення смужкових НВЧ приладів	15
2.2. Матеріали що використовуються при виготовленні смужкових НВЧ ЕЛЕМЕНТІВ	18
Висновки по розділу	22
3. ФІЛЬТРИ НВЧ НА СМУЖКОВИХ ЛІНІЯХ.....	24
3.1.Типи фільтрів НВЧ, їх призначення, характеристики.....	24
3.2. Основні структури і фізичні основи роботи фільтрів.....	26
3.3 Принципи керування фільтрами на базі смужкових ліній	28
3.4 Схеми керування фільтрами на базі смужкових ліній	28
3.5. Способи керування характеристиками фільтрів на основі НВЧ на основі мікросмужкових ліній	30
Висновки по розділу	33
4. ФАЗООБЕРТАЧІ.....	35
4.1 Різновиди фазообертачів	35
4.2. Особливості конструкції фазообертачів.....	37
4.3. Параметри фазообертачів.	39
4.4. Конструкція фазообертача на основі мікросмужкових ліній із ступінчастою неоднорідністю.	40
Висновки по розділу	42
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗООБЕРТАЧА НА ОСНОВІ НЕОДНОРІДНИХ ВІДРІЗКІВ МІКРОСМУЖКОВИХ ЛІНІЙ	43
5.1. Теоретичне дослідження та розрахунок обраної конструкції фазообертача на основі неоднорідних мікросмужкових ліній.....	43
5.2. Експериментальне дослідження обраної конструкції фазообертача на основі неоднорідних мікросмужкових ліній зі ступінчастою неоднорідністю.....	51
5.3. Керовані фазообертачі на основі неоднорідної мікросмужкової лінії передачі зі ступінчастою неоднорідністю.	56
Висновки по розділу	64
6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	65

6.1 ОПИС КЕРОВАНОГО НВЧ ФАЗООБЕРТАЧА НА ОСНОВІ НЕОДНОРІДНИХ МІКРОСМУЖКОВИХ ЛІНІЙ	65
6.2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ІДЕЇ ПРОЕКТУ	67
6.3 АНАЛІЗ РИНКОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАПУСКУ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	67
6.4 РОЗРОБЛЕННЯ РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ	72
6.5 РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ ПРОГРАМИ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	74
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ	76
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ЗФ – загороджувальний фільтр

ІС – інтегральна схема

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі

МСР – мікросмужковий резонатор

МСЛ – мікросмужкова лінія

НВЧ – надвисокі частоти

СПФ – смуго-пропускний фільтр

ФВЧ – фільтр верхніх частот

ФНЧ – фільтр нижніх частот

ФО – фазообертач

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

ВСТУП

Розвиток інформаційних технологій висуває жорсткі вимоги щодо зниження вартості, підвищення надійності, зменшення габаритів і ваги вузлів устаткування зв'язку. Задовольнити ці вимоги можна лише шляхом розробки нових більш ефективних конструкцій [1]. Одним з перспективних шляхів розв'язку даної проблеми є вирокистання пристроїв на основі мікросмужкових ліній передач.

Смужкові лінії являють собою площинні варіанти двопровідних і коаксіальних ліній. До переваг смужкових ліній і пристроїв на їх основі відносяться: можливість автоматизації (а, отже, і здешевлення) процесу виробництва із застосуванням техніки друкованих схем і виготовлення складних функціональних вузлів, невеликі габарити і вага, широкополосність, простота виготовлення деяких типів смужкових пристроїв в лабораторних умовах [2].

Широкосмугові властивості смужкових ліній, як і двопровідних і коаксіальних, пояснюються тим, що в них можливе поширення (не має відсічення) поперечних електромагнітних хвиль TEM (точніше, квазі-TEM – хвиль). Всі інші переваги смужкових ліній і пристроїв обумовлені їх практично двомірною (площинною) конфігурацією напівпровідників. Різні системи, виконані на основі смужкових ліній, знаходять все більше застосування в техніці надвисоких частот. В даний час смужкові лінії – це єдиний перспективний тип ліній передачі для здійснення мікромініатюризації в діапазоні НВЧ. А це, в свою чергу, тісно пов'язано з вирішенням ряду радіотехнічних проблем, наприклад, проблем надійності радіоапаратури [2].

Мікроелектронні схеми складаються з сотень і тисяч елементів на одній підкладці, виготовлених і з'єднаних між собою за одну робочу операцію без пайки та зварювання (металеве напилення), тому вони відмовляють в роботі набагато рідше, ніж звичайні схеми на дискретних компонентах. Зі зменшенням розмірів схеми пропорційно знижуються паразитні ємності і в мікроелектронних схемах може бути зменшена затримка поширення сигналу, а отже, збільшена швидкодія.

Радіоелектронна апаратура стає більш складною і це є характерною рисою розвитку сучасної радіотехніки (наприклад, прийомні системи типу «фазовані решітки» містять до 10^6 і більше компонентів). Велике число різних елементів також включають в себе малогабаритні багатоканальні (на сотні і тисячі каналів) системи зв'язку тощо.

Цілком очевидно, що для створення таких пристроїв необхідно використовувати смужкові лінії і системи, так як застосування коаксіальних і хвилеводних ліній призведе до значного подорожчання і збільшення розмірів пристроїв.

Конфігурація смужкових ліній не тільки дозволяє спростити і здешевити виробництво апаратури, але й дає можливість здійснити технологічно дуже складні функціональні вузли. В першу чергу мається на увазі придатність смужкових ліній і пристроїв для інтегральних схем. Розвиток напівпровідникової техніки та використання методів машинного проектування відкривають нові можливості при конструюванні пристроїв НВЧ. Можна спочатку відпрацювати кожен вузол складного пристрою, потім відтворити і доопрацювати всі вузли на єдиній монолітній підкладці інтегрального пристрою, а потім виготовляти ці пристрої без будь-яких додаткових налаштувань. Розрахунок пристроїв можна програмувати створюючи картотеки [2].

Смужкові лінії конструктивно і по електричним параметрам придатні для роботи з різними шаруватими структурами, в тому числі низькотемпературними (переходи Джозефсона тощо).

Смужково – передавальні лінії НВЧ, вперше використали в період другої світової війни в ланцюгах розподілу потужності антенних систем. Техніка друкованих схем і смужкових пристроїв НВЧ отримала розвиток в післявоєнні роки. Це пояснюється тим, що багатьох привертала легкість і простота виготовлення пристроїв НВЧ на основі смужкових ліній в лабораторних умовах. Адже для їх виготовлення потрібні лише ножиці, металева фольга, пластини діелектрика і клей. Однак з'ясувалося, що існують певні проблеми: для отримання хороших параметрів пристроїв НВЧ необхідні високоякісні діелектрики і клей, а також висока точність

виготовлення. Великі труднощі виникли при розробці широкосмугових переходів до хвилеводів і коаксіальних ліній, а також з'єднань окремих смужкових пристроїв. Сюди ж слід віднести складність математичного аналізу цих простих з фізичної точки зору ліній передачі. Інтерес до дослідження та застосування смужкових ліній різко зростає, що пояснюється швидким розвитком космічних досліджень, фізики і техніки напівпровідників, інтегральної техніки, широким застосуванням твердотільних параметричних підсилювачів, ЕОМ (електронна обчислювальна машина) тощо [3].

У сучасній електроніці широко використовують пристрої які працюють у надвисокочастотному діапазоні. Діапазон 900...2000 МГц використовують у стільниковій телефонії, частоти в околі 2 ГГц – в роботі космічних телеметричних та тропосферних комунікаційних систем, які забезпечують зв'язок на великих відстанях тощо. Для підвищення ефективності роботи пристроїв НВЧ електроніки необхідно підвищувати їх якість. Насамперед це стосується засобів зв'язку. До важливих функціональних вузлів такого обладнання відносять різноманітні резонансні НВЧ пристрої такі як фільтри та резонансні фазообертачі. Фазообертач – це пристрій (елемент тракту НВЧ) який використовується для зміни фаз електромагнітних коливань. Фазообертачі застосовують в вимірювальній та перетворювальній техніці, а також в автоматичі.

Фазообертач застосовується в системах з великою кількістю споживачів, щоб забезпечити необхідний розподіл фаз до сигналів, а також в радіосистемних лініях передачі, вирівнюючи електричні довжини ліній передачі. Крім цього, фазообертач використовується в фазованих антенних решітках, різних когерентних радіосистемах. Їх використовують у панорамних приймачах, антенних решітках, базових станціях стільникових телефонів, радіоприймальних пристроях, радіопередавальних пристроях тощо [4].

Тому метою магістерської дисертації є розробка керованого НВЧ фазообертача на основі неоднорідних мікросмужкових ліній. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести огляд і порівняльний аналіз існуючих конструкцій мікросмужкових фазообертачів;
- на основі проведеного аналізу запропонувати конструкцію фазообертача для діапазону частот 0,5...2 ГГц;
- провести огляд і порівняльний аналіз існуючих методів управління фазою, обрати метод управління і обґрунтувати вибір;
- провести числове моделювання та експериментальне дослідження запропонованої конструкції фазообертача.

1. СМУЖКОВІ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧ

1.1. Типи смужкових ліній

В апаратурі сантиметрового і дециметрового діапазонів хвиль в якості ліній передачі головним чином застосовуються хвилеводи, коаксіальні і смужкові лінії.

Хвилеводи відрізняються порівняно малими втратами, забезпечують повне екранування і дозволяють отримати високу добротність. Розв'язка між елементами в хвилеводах досягається легше, ніж в інших видах ліній. Однак хвилеводна апаратура важка, в ряді випадків громіздка, дорого коштує, і при її виготовленні необхідно дотримуватися заданих розмірів.

Елементи коаксіальних ліній мають дещо менші розміри, але при їх виготовленні також потрібно дотримуватися жорстких допусків, що робить їх виробництво ще більш дорогим і складним.

Велика складність конструкцій вузлів на основі звичайних хвилеводів і коаксіальних ліній (і внаслідок цього висока вартість навіть при їх масовому виробництві) призвели до необхідності застосування інших, так званих смужкових ліній передачі.

Смужкові лінії – це системи з двох або кількох провідних смуг, уздовж яких поширюється електромагнітна хвиля. Роль однієї з цих смуг може грати металевий екран.

Розрізняють два основних типи смужкових ліній (Рис. 1.1): несиметричні (а) та симетричні (б) [5].



а)



б)

Рисунок 1.1 – Типи смужкових ліній :

а – несиметричні, б – симетричні

Несиметрична смужкова лінія являє собою пластину діелектрика, на одній стороні якої нанесені провідники (проводять смужки) схеми, а на іншій - металізоване покриття, що утворює провідну (із заземленням) площину. Така лінія є простою в налаштуванні, виготовленні та експлуатації.

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


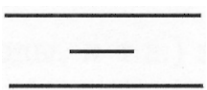

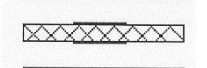
У симетричній друкованої смужковій лінії центральний провідник укладений між двома діелектричними пластинами з металізованими зовнішніми поверхнями. Такі лінії мають гарне екранування, проте вони складні у виготовленні і налаштуванні, вимагають дотримання механічної симетрії для забезпечення малих втрат на випромінювання. Центральний провідник симетричної смужкової лінії в зібраному вигляді абсолютно недоступний для регулювання, що створює певні незручності при налаштуванні схем.

Високодобротні смужкові лінії застосовуються в тому випадку, коли необхідно щоб добротність ненавантаженої передавальної лінії була досить високою (близько 2000). Високодобротна лінія передачі має об'єм більший ніж симетрична друкована лінія, але менший, ніж коаксіальна лінія або хвилевід. Така лінія забезпечує гарне екранування і є менш чутливою до технологічних змін діелектричної постійної і товщини підкладки [6].

Вибір типу смужкової лінії повинен проводитися з урахуванням виконання ряду вимог: малі втрати, можливість серійного виробництва, простота налаштування, малий об'єм і вага, стабільність параметрів, низька вартість.

У таблиці 1.1 наводяться характеристики основних типів смужкових ліній і відзначаються їх основні переваги та недоліки:

Таблиця 1.1 Типи смужкових ліній [4]

Тип смужкової лінії	Переріз лінії	Переваги	Недоліки
Несимметрична смужкова лінія з кисневим заповненням		Мала вага	Відсутність екранування, великі втрати, необхідне кріплення
Несимметрична друкована смужкова лінія (з малим $\epsilon \approx 2 \div 3$ підкладки)		Малі габарити та вага, низька вартість, не потребує кріплення	Великі втрати у несиметричній лінії, відсутність екранування
Мікросмужкова лінія (з високим $\epsilon \approx 10$)			
Симетрична смужкова лінія з кисневим заповненням.		Малі втрати, мала вага	Великі габарити, необхідне кріплення
Симетрична смужкова лінія великої граничної потужності		Велика гранична потужність, МВт	Великі габарити, велика вартість, необхідне кріплення
Симетрична друкована смужкова лінія		Малі габарити, не потребує кріплення	Порівняно великі втрати, велика вага
Високодобротна смужкова лінія		Малі втрати	Треба кріплення, порівняно великі габарити

У більшості випадків ці лінії робляться у вигляді тонких металевих шарів, нанесених на листи діелектрика. В якості діелектрика використовується відповідний для НВЧ матеріал з малими втратами: фторопласт, поліетилен, кераміка та ін. Але це може бути і просто система металевих пластин без будь-якого твердого діелектрика (в такому випадку говорять про лінії з повітряним заповненням).

Смужкові лінії можна застосовувати не тільки для передачі енергії, а й для виготовлення різних елементів надвисокочастотної апаратури. Мікросмужкові лінії передачі застосовуються в гібридних і монолітних інтегральних схемах (ІС) НВЧ діапазону. У гібридних ІС дискретні компоненти (транзистори, діоди, тощо) укладені в невеликому корпусі (або модулі) мікросмужкової конструкції. У монолітних ІС всі елементи схеми реалізуються всередині загальної напівпровідникової пластини і частково на її поверхні. Гібридні схеми в порівнянні з монолітними володіють кращими електричними характеристиками, широкою смугою пропускання, малими шумами, високою добротністю. Монолітні схеми мають більш низьку вартість, менші габарити і більшою мірою пристосовані для автоматизації виробництва [7].

1.2. Переваги та недоліки смужкових ліній

У порівнянні з хвилеводними і коаксіальними лініями передачі смужкові лінії мають переваги.

Майже всі вузли НВЧ пристроїв можуть бути виконані не на площині. Для їх виробництва застосовуються ті ж стандартні методи і техніка, які використовуються при виготовленні низькочастотних друкованих схем. Це дозволяє з високою точністю виготовляти складні (що складаються з багатьох деталей пристрою) схеми. Такі схеми друкуються за один прийом, незалежно від числа елементів які в них входять і їх складності. Тому вартість їх виробництва приблизно в 10 разів менше в порівнянні з аналогічними пристроями на основі хвилеводних і коаксіальних ліній.

Завдяки високій точності виготовлення пристроїв можна отримати високу відтворюваність їх характеристик.

Хвилеводні і коаксіальні лінії, а також вузли НВЧ апаратури на їх основі зазвичай важкі та громіздкі. Разом з тим у багатьох випадках в смужкових лініях поширюється хвиля, близька до TEM-хвилі. Для неї критична довжина хвилі $\lambda_{кр}$ дорівнює нескінченності, тому поперечні розміри лінії можна зробити малими. З цієї ж причини довжина хвилі в лінії близька до довжини хвилі у вільному просторі, заповненому діелектриком, що зменшує поздовжні розміри пристроїв в $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ разів (де ϵ_r – відносна діелектрична проникність, μ_r - відносна магнітна проникність речовини). Діелектрик який використовується при виготовленні смужкових ліній має вигляд тонких пластин, а металеві провідники - дуже тонких плівок. Внаслідок цього розміри пристроїв на основі смужкових ліній менше і в поздовжньому, і в поперечному напрямках, і як наслідок - їх вага значно знижується .

Робоча смуга частот смужкової лінії більше, ніж у стандартних прямокутних хвилеводів. Дійсно, на низьких частотах принципових обмежень немає, по лінії може бути переданий навіть постійний струм. Але розміри резонансних елементів стають великими починаючи з частоти порядку 100 МГц. З боку високих частот існує деяка межа, при якій з'являються вищі типи хвиль. Ця межа лежить в області частот, для якої $\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ стає порядку поперечних розмірів лінії (λ_0 - довжина хвилі в вакуумі).

При створенні пристроїв з приладами, виконаними на основі твердого тіла, конструктивно найбільш зручним типом лінії передачі є смужкова. Значимість цієї особливості смужкової ліній в даний час зросла, оскільки виробники напівпровідникових приладів створюють пристрої, розміри яких відповідають товщині лінії [8].

Отже, головні переваги смужкової лінії наступні: простота, компактність, мала вага і низька вартість виробництва.

Недоліки передавальних ліній цього типу такі:

а) пробивна потужність смужкової ліній в кілька разів менше, ніж у прямокутного хвилевода, а втрати в кілька разів більше. Пробивна потужність приблизно однакова з коаксіальними хвилеводами, але втрати менше (лише у

високодобротних смужкових лініях втрати такі ж, як і у коаксіального хвилевода). Однак у хвилеводного ланцюга з усіма включеними пристроями довжина може бути набагато більшою, ніж у відповідній смужковій лінії, а отже, будуть великими і загальні втрати;

б) недоліком смужкових ліній є випромінювання потужності на різного типу неоднорідностях, так як вони є відкритими системами (особливо це помітно для несиметричної смужкової лінії). Тому дані лінії не завжди зручні для створення систем з високою добротністю. У таких випадках застосовують екрановані смужкові лінії або використовують поєднання хвилеводних і коаксіальних резонаторів зі смужковою лінією;

в) великі труднощі зустрічаються при конструюванні ряду пристроїв (наприклад, узгоджене навантаження вимірювальної лінії) на основі смужкової лінії, і в першу чергу, ліній з діелектричним заповненням. Особливі труднощі виникають при створенні керованих пристроїв;

г) техніка вимірювань в смужкових лініях помітно ускладнюється. У зв'язку з цим необхідні вимірювання часто проводять в хвилеводних і коаксіальних лініях, які переходять потім в смужкову лінію [9].

Висновки по розділу

Перераховані вище властивості смужкової ліній обумовлюють область їх застосування: це пристрої діапазону частот вище 100 МГц, розраховані на малий і середній рівень потужності, де можуть бути допущені порівняно великі втрати. Тут вирішальну роль грають невеликі розміри, вага і вартість (наприклад, високочастотні тракти приймачів дециметрового і сантиметрового діапазонів хвиль, встановлюваних на радіолокаційних станціях, літаках, супутниках тощо).

Смужкова лінія передачі є оптимальним рішенням для поставленого завдання.

2. ТЕОРІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НВЧ ПРИЛАДІВ

Застосовуючи смужкові лінії передачі, можна виготовлювати найбільш важливі і поширені елементи НВЧ апаратури: атенюатори, фіксовані навантаження, фільтри різних типів, спрямовані відгалужувачі тощо. При цьому смужкові вузли зручніші для масового виробництва в порівнянні з коаксіальними і хвилеводними їх еквівалентами. Хоча таке виробництво доцільно якщо: по-перше - необхідно отримати велику кількість однакових елементів, і, по-друге, якщо забезпечується точна відповідність параметрів, що виготовляються для вузлів з заданими характеристиками. Однією з особливостей смужкових вузлів є те, що після їх виготовлення налаштування є затрудненим і дорого коштує. У зв'язку з тим, що розкид електричних параметрів смужкових вузлів визначається точністю їх виготовлення, то питання технологічного характеру набувають особливого значення, часто будучи основними при відпрацюванні пристроїв. Відповідно, більшу роль відіграє точність виготовлення окремих частин пристроїв, які складаються з окремих елементів схем. У ряді випадків, особливо коли одночасно виготовляються і напівпровідникові елементи, потрібно дотримуватись мікронної точності. Забезпечення такої точності при виготовленні смужкових пристроїв дозволяє отримувати їх відтворюваність в межах однієї партії пристроїв і від партії до партії [10].

2.1. Способи виготовлення смужкових НВЧ приладів

На початку 60-х років для виготовлення смужкових НВЧ пристроїв застосовувалися технологічні процеси, які раніше були розроблені для низькочастотних друкованих схем. Деякі з цих процесів досі зберегли своє значення в лабораторних умовах, коли більш важлива швидкість виготовлення пробних макетів, а не їх точність або відтворюваність.

В даний час для пасивних смужкових НВЧ елементів виділилися два технологічних напрямки: по-перше, різні способи нанесення струмопровідних

елементів схем в готовому вигляді на поверхню діелектрика; по-друге, способи видалення зайвого металу з повністю металізованого діелектрика.

Найпростішим є метод, який умовно можна назвати методом аплікації. При цьому методі провідники, іноді досить складної конфігурації, вирізаються з суцільної металевої фольги, а потім кріпляться на діелектричній пластині. У лабораторних умовах цю роботу можна проводити практично будь-яким інструментом. На підприємствах вирізку іноді замінюють штампуванням, часто об'єднаним з процесом кріплення готових провідників на діелектричній підкладці. Метод аплікації є найпростішим, але не забезпечує високої точності виготовлення смужкових НВЧ пристроїв. При використанні цього методу виникають труднощі, які не мають прямого відношення до виробництва металевих провідників. Це, перш за все, вибір відповідного клею для кріплення металу до діелектрика і боротьба з утворенням повітряних бульбашок при клейовому кріпленні. Ці питання мають важливе значення, так як клей не тільки повинен міцно прикріпити метал до діелектрика, а й володіти малими високочастотними втратами. Повітряні бульбашки на окремих ділянках схеми змінюють хвильовий опір смужкових ліній, що викликає небажані віддзеркалення і, в кінцевому результаті, погіршує параметри пристрою в цілому.

Все це визначає сферу застосування методу аплікації, яка в основному обмежується лабораторіями.

У низькочастотних схемах, де зміна хвильового опору ділянок схеми і високочастотні втрати не грають великої ролі, даний метод широко використовується і сьогодні.

Деяке поширення отримав метод нанесення елементів схеми за допомогою провідних фарб або паст. Цей метод простий і для низькочастотних схем цілком прийнятний. Придатність його для виготовлення НВЧ пристроїв обмежена. По-перше, використовуючи фарби і пасту, важко виготовити струмопровідні елементи схеми достатньої точності. По-друге, в схемах, виготовлених за допомогою паст і фарб, втрати на 25-30% вище втрат в схемах, зроблених з металу. У багатьох випадках це дуже важливо.

Точність виготовлення і розмір ліній, які ще можуть бути нанесені на діелектричний лист, обумовлюються способами нанесення фарб і паст. Зазвичай для цього застосовуються спеціальні трафарети, які повинні бути надзвичайно якісними.

Існують і інші способи нанесення струмопровідних елементів. Наприклад, використовується метод напилення металу через трафарет, але при цьому метал зазвичай наноситься в рідкому вигляді. Застосовуються також методи впресовки і вжигання металевих порошків в діелектрик тощо.

Більш прогресивними є методи, засновані на видаленні зайвого металу з попередньо металізованого діелектрика. Тут також можливі різні варіанти процесу. Спочатку в лабораторних умовах застосовувався метод ручного гравірування. За цим методом тонка металева фольга прорізається на всю глибину за допомогою спеціального різця по контуру провідників. Непотрібний метал, зазвичай досить легко видаляється після гравіювання, якщо його обережно відокремити від діелектрика. При такій технології можна виготовляти лише окремі НВЧ елементи, наприклад, трійники, фільтри тощо з досить непоганими параметрами. Однак для пристроїв, що вимагають при своєму виготовленні точності більш ніж 0,1–0,2 мм, цей метод непридатний.

Технічно більш досконалим є метод механічного гравіювання. Він відрізняється від описаного вище методу ручного гравірування тільки тим, що замість різця використовується спеціальна фреза, а людська рука замінена верстатом. Як і перший, метод механічного гравіювання непридатний для масового виробництва і не може забезпечити високу точність. Недоліком є також те, що даний метод дозволяє отримувати провідники і відстані між ними тільки певної величини, оскільки фреза має кінцевий діаметр. Тому, користуючись методом механічного гравіювання, майже неможливо виготовити НВЧ спрямований відгалужувач або фільтр, де відстані між окремими провідниками іноді становлять величину порядку декількох десятків мікрон і менше. Потрібно також мати на увазі, що як і при ручному, так і при механічному гравіруванні, практично неминучі пошкодження поверхні діелектрика.

Більш досконалим є метод, при якому зайвий метал видаляється з поверхні діелектрика травленням. При цьому поверхня діелектричної підкладки залишається неушкодженою. Способів хімічного гравірування існує кілька, але всі вони використовують один принцип застосування захисних покриттів для ділянок схеми, які залишаються після закінчення гравірування. Іншою особливістю методу є те, що він зручний для масового виробництва ідентичних пристроїв, дозволяє отримати вироби з високою точністю виготовлення і складною конфігурацією [11].

На сьогоднішній день найпоширенішим є метод формування металічної плівки методом магнетронного розпилення і подальшого травлення плівки з поверхні діелектрика. Такий метод дозволяє досить точно отримувати рівномірну плівку з певною заданою товщиною, та малюнок топології з точністю до сотих мікрон.

2.2. Матеріали що використовуються при виготовленні смужкових НВЧ елементів

Діелектрики. При виготовленні смужкових НВЧ вузлів можуть бути використані матеріали, які задовольняють декільком основним вимогам. Діелектрик, призначений для використання в смужкових НВЧ пристроях, повинен:

- Мати малі високочастотні втрати;
- Мати якомога більшу діелектричну проникність;
- Досить легко оброблятися;
- Бути міцним і стійким до перевантажень і ударів;
- Повинен мати діелектричну постійну, яка легко піддається контролю при виробництві діелектрика;
- Бути придатним для використання в фотолітографічному процесі;
- Не бути дефіцитним і дорогим.

Розглянемо ці вимоги докладніше.

Що стосується втрат, то це питання не вимагає спеціального пояснення. Слід лише зазначити, що на високих частотах відбувається концентрація електромагнітного поля в діелектрику, а це веде до збільшення втрат.

Застосування смужкових пристроїв в техніці НВЧ дозволяє не тільки отримати більш дешеву апаратуру, але і зменшити її габарити. Оскільки довжина хвилі в смужкових пристроях менше, ніж у вільному просторі (для різних типів і розмірів ліній зменшення довжини хвилі може бути різним), лінійні розміри НВЧ пристроїв стають меншими. З цієї точки зору бажано застосовувати діелектрики з великим ϵ . До таких діелектриків, наприклад, відносяться різні ситалли, матеріали з високим вмістом Al_2O_3 , титанату барію тощо. Недоцільно застосовувати такі матеріали, як фторпласт-4, полістирол і тощо.

Відносно легкості обробки бажано мати матеріали, які можна легко різати, штампувати, гнути і піддавати іншим механічним чи іншим діям з метою зміни форми і розмірів. Однак потрібно мати на увазі, що в ряді випадків такі дії можуть бути небажаними, тому необхідно, щоб матеріал міг більш-менш успішно протистояти деформації. М'які, матеріали які легко деформуються, для застосування в смужкових НВЧ пристроях малопридатні. До цього потрібно додати ще одне міркування. Для отримання високоякісних виробів поверхню діелектричних матеріалів необхідно якомога краще (приблизно до 12–13 класу чистоти) обробляти, а іноді полірувати. М'які матеріали для цього не придатні. Доцільно використовувати більш тверді матеріали, наприклад кераміки, надаючи їм необхідну форму ще до відпалу з тим, щоб після відпалу виробляти лише їх шліфування та полірування.

Матеріал, призначений для використання в НВЧ пристроях, не повинен бути крихким і легко руйнуватись під впливом зовнішніх навантажень. Це дуже важлива вимога.

Виконання механічних вимог ще не означає повної придатності діелектрика для використання в НВЧ вузлах. Марно намагатися застосовувати діелектричний матеріал, діелектрична постійна якого не може досить точно контролюватися в процесі його виробництва. Цей контроль може здійснюватися за процентним

вмістом вихідних діелектричних матеріалів які входять до складу матеріалу який виготовляється, або безпосередньо за допомогою вимірювання діелектричної постійної. У всіх випадках остання повинна контролюватися [12].

Матеріал повинен бути придатним для застосування в фотолітографічному процесі, як найбільш прогресивному в даний час.

Як відомо, НВЧ елементи випускаються у великій кількості примірників. Тому діелектрик повинен бути досить дешевим і виготовлятися з недефіцитної сировини. Зокрема, в техніці смужкових ліній передачі НВЧ можуть знайти застосування матеріали, основні відомості про яких наведені в таблиці:

Таблиця 2.2.1 Діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат різних матеріалів[12]

Матеріал	ε_r		$tg\delta \cdot 10^4$	
	10 ГГц	25 ГГц	10 ГГц	25 ГГц
Алюміна-96	8,9	8,7	6	7
Алюміна-99	9,0	8,9	1	3
Алюміна-995	9,5	9,0	2	1
Алюміна-999	9,9	-	0,10	-
Берілл-99	6,1	6,0	1	40
Берілл-995	6,1	6,0	1	40
Боросилікатне скло	5,7	-	36	-
Сапфір с-осі	11,6	-	2	-
Сапфір \perp с-осі	9,3	-	4	-
Полікор	9,8	-	0,8	-
Сапфірит	9,65	-	0,5	-
Ситал СТ-38-1(ТХО.735.039)	7,25	-	2	-
Брокерит-9	6,6	-	6	-

З урахуванням перерахованих вище вимог одним з найбільш підходящих матеріалів є діелектрик, що виготовляється з порошку Al_2O_3 і представляє собою тверді керамічні пластини. Цей матеріал в зарубіжній літературі називається «алюміна-96» і випускається цілим рядом фірм. Його характеристики на частотах 10 і 25 ГГц наведені в таблиці 2.2.1, з якої видно, що матеріал алюміна-96 з вмістом Al_2O_3 96% має більш високі втрати і меншу діелектричну проникність. Самі по собі ці чинники ще не можуть визначати вибір матеріалу, оскільки у алюмінію-96 втрати майже в два рази нижче, ніж у поширеного НВЧ діелектрика полістиролу. Більш суттєвим є те, що алюміна-96 має великий розкид електричних параметрів (ϵ_r і $tg\delta$). Іншою обставиною, що свідчить на користь алюмінію-995, є структура матеріалу. Алюміна-995 має більш дрібнозернисту структуру і в результаті цього легше шліфується і полірується. Обробка ж поверхні дуже впливає на величину втрат у провіднику, які можуть бути значно більше втрат в діелектрику. Це пояснюється, по-перше, скін-ефектом, а по-друге при нерівній поверхні діелектрика металева плівка також стає нерівною і неоднорідною по товщині. В результаті опір, а отже, і втрати зростають. На користь такого висновку свідчать результати експериментів, проведених для встановлення впливу мікронерівностей поверхні на втрати.

Втрати в смужкових лініях з поліпшенням якості поверхні діелектрика швидко падають. Таким чином, матеріал, який краще піддається поліровці, безсумнівно, краще, незважаючи на його велику вартість.

Необхідно також пам'ятати, що зі збільшенням поверхневих нерівностей зростає небезпека порушення цілісності шару фоторезиста. В кінцевому підсумку це може призвести до браку при виготовленні смужкових елементів. Експерименти показали, що при поверхневих нерівностях близько 0,6 мкм і більше в шарі фоторезиста, що наноситься на металеву плівку, з'являються розриви. Зменшення нерівностей до 0,25 мкм усуває небезпеку появи подібних розривів практично повністю. Однак шар фоторезиста в такому випадку залишається неоднорідним по товщині. Тому поверхню потрібно полірувати, домагаючись зменшення на ній

неоднорідностей до величини 0,04 мкм. При поверхневих неоднорідностях 0,04-0,05 мкм виходять найкращі результати. Подальше зменшення поверхневих неоднорідностей навряд доцільно через підвищення виробничих витрат і зменшення адгезії металу до діелектрика. Однак для розрахункової частини буде використаний полікор, який схожий за параметрами до матеріалу алюміна-96, через його доступності та низької вартості для подальшого конструювання в лабораторних умовах [12].

Метали. Як правило, в якості струмопровідних покриттів використовуються досить добре метали (мідь, золото, срібло). У ряді випадків можливе застосування і інших металів (алюміній, нікель і ін.). Зокрема, нікелева фольга використовується при виготовленні смужкових НВЧ елементів, призначених для роботи у важких кліматичних умовах.

Струмопровідний шар повинен мати товщину в кілька разів більшу товщини скін-шару, яка на НВЧ порядку одного мікрона.

Отже, товщина металевих плівок повинна бути в межах від 4 до 6-8 мкм. Найбільш придатними металами для смужкових НВЧ елементів з точки зору втрат є мідь і срібло. Однак з урахуванням вартості перевагу потрібно віддати міді.

При осадженні міді на поверхню діелектрика необхідно наносити початковий шар металу - гетерра. В якості останнього зазвичай беруть хром, що має дуже високу адгезією до алюмінію і великий антикорозійну стійкість. Хром осідає у вигляді найтоншого шару, на який потім наноситься струмопровідний шар міді [13].

Слід зазначити, що матеріали, які використовуються у виробництві смужкових вузлів, вимагають попередньої ретельної очистки (це стосується як діелектрика, так і використовуваних металів).

Висновки по розділу

Для виготовлення пристроїв на основі мікросмужкових ліній необхідно використовувати матеріали, які відповідають наступним вимогам:

- а) низький рівень діелектричних втрат;

- б) механічна міцність;
- в) технологічність;
- г) висока термостабільність;
- д) низька вартість та доступність на ринку тощо.

Проведений аналіз матеріалів показав, що найбільш прийнятним для створення НВЧ приладів на основі мікросмужкових ліній є полікор. Він є поширеним на ринку, відносно дешевим, має діелектричні втрати в НВЧ діапазоні $\text{tg}\delta \approx 8 \cdot 10^{-5}$, достатньо високу діелектричну проникність $\epsilon \approx 9,9$.

3. ФІЛЬТРИ НВЧ НА СМУЖКОВИХ ЛІНІЯХ

3.1. Типи фільтрів НВЧ, їх призначення, характеристики

Фільтром називається пристрій, який добре пропускає коливання одних частот і подавляє коливання інших.

Фільтри є одним з основних елементів в НВЧ пристроях. Вони широко використовуються для поділу і складання сигналів різних частот в перетворювачах або помножувачах частоти, в багатоканальних лініях зв'язку. Їх застосовують для обмеження спектра випромінювання потужних передавачів, а також для запобігання приймачів від інтерференції з сигналами, що лежать поза їх робочої смуги частот, широкопasmового узгодження імпедансів ліній з різними хвильовими опорами, в ланцюгах затримки і в якості уповільнюючих схем.

Фільтруючі властивості фільтра можна однозначно охарактеризувати його загасанням, що вносяться в тракт. При цьому смугу частот з малим загасанням називають смугою пропускання, а смугу частот з великим загасанням – смугою загородження. З урахуванням вище сказаного прийнята така класифікація фільтрів (Рис.3.1.1): фільтри нижніх частот (ФНЧ), щоб забезпечити проходження нижніх частот НВЧ діапазону; фільтри верхніх частот (ФВЧ), пропускають високі частоти; смуго-пропускні (СПФ), і смуго-загороджувальні фільтри (СЗФ), які відповідно пропускають або пригнічують необхідну смугу частот [14].

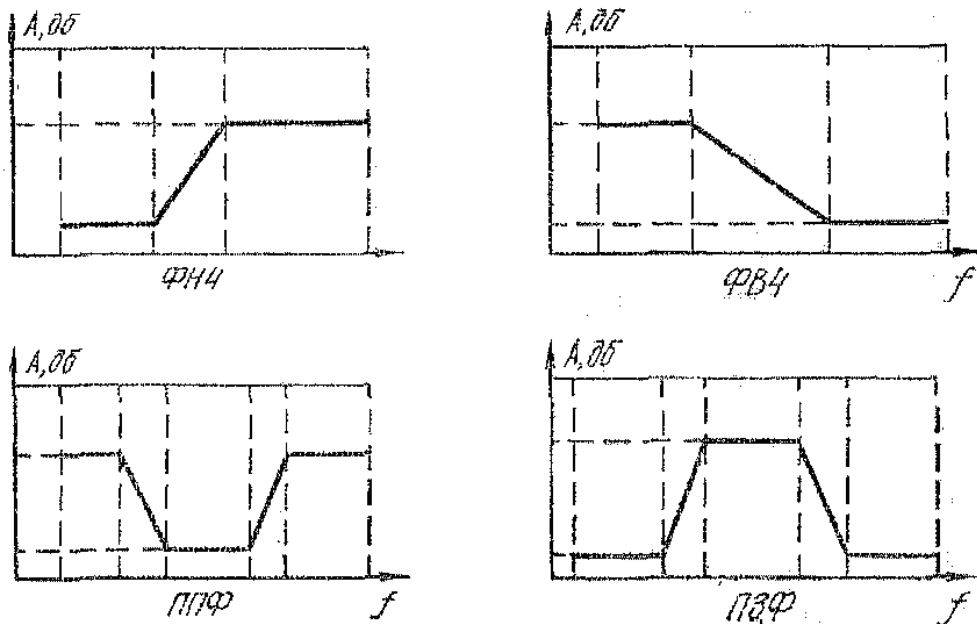


Рисунок 3.1.1 – Класифікація фільтрів

Окрім цього, кожен фільтр має перехідну область, яка б пов'язала смуги загородження і пропускання. Це область, в якій загасання змінюється від мінімального до максимального і яка визначається крутизною характеристики. Зазвичай намагаються звести дану область до мінімуму, але іноді це ускладнює можливість реалізувати фільтрів. На рис. 3.1.1 наведені типові характеристики фільтрів.

При конструюванні фільтрів задають такі характеристики:

- 1) смуга пропускання (або частота (частоти) зрізу фільтра);
- 2) максимальний рівень загасання в смузі пропускання;
- 3) смуга (смуги) затримування фільтра. Зазвичай вказуються ділянки, обмежені заданими частотами, в яких рівень загасання повинен бути не менше заданої величини;
- 4) мінімальний рівень загасання в смузі затримування;
- 5) вага і габарити.

3.2. Основні структури і фізичні основи роботи фільтрів

Виконання завдання фільтрації, тобто поділ або обмеження даних ділянок частот за величиною загасання, може бути вироблено на НВЧ різними шляхами.

Найбільш поширеними на НВЧ є ланцюгові схеми, в яких фільтровані коливання проходять по одному шляху, але з різним ступенем заломлення (рис. 3.2.1 а).

Параметри фільтруючого ланцюга вибираються так, щоб коливання з частотами, що входять в смугу пропускання фільтра, поширювалися в ланцюзі з мінімально можливим шунтуванням їх паралельними гілками ($1-1'$; $2-2'$; $3-3'$) і мінімальним загасанням в елементах послідовних ланцюгів і передавалися від джерела коливань ($A-A'$) до навантаження ($B-B'$) з малим загасанням [15].

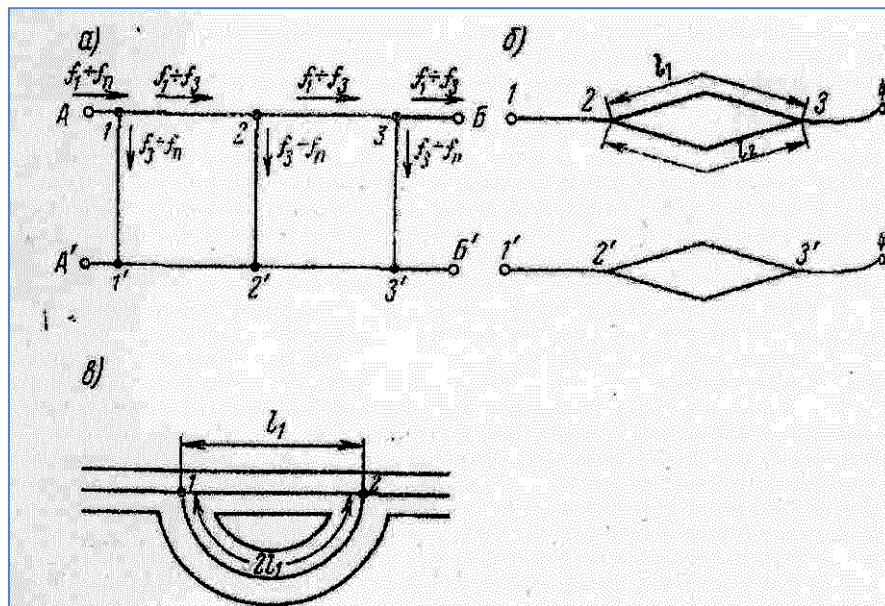


Рис. 3.2.1 Фільтри, виконані по мікросмужковій технології [15].

Електричні коливання з частотами, що входять в смугу затримки фільтра, максимально шунтуються паралельними гілками і проходять з перетину ($A-A'$) до навантаження ($B-B'$) з великим загасанням.

Фільтрація високочастотних коливань може бути здійснена інтерференцією фільтрованих коливань. У цьому випадку сигнал направляється до місця прийому по декількох шляхах.

У разі приходу в точку прийому ($3—3'$ на рис. 3.2.1 б) в протифазі ($\Delta\varphi = 180^\circ$) складові сигналу віднімаються; при приході в фазі - складаються ($\Delta\varphi = 0$). Величина загасання, що вноситься фільтром, буде залежати від співвідношення фаз коливань, які прийшли за різними шляхами l_1 і l_2 , Фаза коливання, що приходить в точку складання $3—3'$ може змінюватися при зміні довжини шляху одного або обох відрізків, включених між точками $2—3$ (рис. 3.2.1 б).

На рис. 3.2.1 в показаний СЗФ на відрізках ліній передачі [15]. Відстань l_1 вибирається рівним одній чверті довжини хвилі нижньої частоти зрізу фільтра. Максимальна величина загасання, що вноситься таким фільтром, виходить на частотах, де коливання приходять в точку 2 в протилежній фазі, тобто, коли електричні довжини шляхів відрізків лінії передачі від точки 1 до точки 2 стають відповідно рівними довжині хвилі і половині довжини хвилі. Такі схеми можуть бути використані для створення мостових фільтрів на НВЧ. Розглянуті вище два способи побудови фільтруючих ланцюгів характерні також і для низькочастотних фільтрів.

На НВЧ фільтруючі ланцюги можуть бути отримані шляхом, нехарактерним для низькочастотних схем, наприклад за допомогою діелектричних матеріалів, що володіють різними величинами загасання на різних частотах. В якості такого матеріалу може бути використаний намагнічений ферит, розташований в відрізку передавальної лінії (коаксіальної або смужкової). Смуга затримки такого фільтра створюється областю резонансного поглинання електромагнітних хвиль намагніченим ферритом. Зменшення загасання фільтра в його смузі пропускання домагаються шляхом узгодження тракту з відрізком лінії, до якого включено феррит. Зазвичай для цього підбирають кути розміщення феритових пластин (або циліндрів) і ставлять елементи узгодження (штирі, гвинти тощо). Одним із способів подавлення хвиль вищих типів в лінії передачі полягає у виборі певних розмірів лінії передачі [16].

Нові напрямки в конструюванні фільтрів НВЧ відкриваються при використанні в якості реактивних елементів фільтра і їх комбінацій різноманітних елементів НВЧ тракту, наприклад, мікрохвильових резонаторів з малими втратами у вигляді сфер з залізо-ітрієвих гранатів (ЖИГ), діелектричних матеріалів з високою діелектричною постійною в резонаторах НВЧ і тощо.

3.3 Принципи керування фільтрами на базі смужкових ліній

В фільтрах НВЧ на базі смужкових ліній можливо змінити частотні та фазові характеристики.

Для досягнення відповідних змін можливо змінювати: геометричні розміри смужкових ліній, діелектричну проникність підкладки, змінювати розташування металічних пластин відносно підкладки, змінювати електричне включення схемми тощо.

Для виконання поставленого завдання необхідно вибрати рішення яке буде технологічно просте, малогабаритні, та найбільш надійне.

Таким вимогам відповідає спосіб зміни хвилевої довжини резонаторів між значеннями $\lambda/4$ та $\lambda/2$ шляхом створення короткого замикання і холостого ходу між смужками резонаторів та металізацією на тильній стороні підкладки [17].

Такий спосіб повинен бути виконаний шляхом електричного керування, щоб відповідати умовам малих габаритів, надійності та керованості системи, що неможливо реалізувати механічним переключенням.

3.4 Схеми керування фільтрами на базі смужкових ліній

Схема керування вмикається (показано на рис. 3.4.1) таким чином, щоб створити режим короткого замикання і холостого ходу між смужками резонаторів та металізацією на тильній стороні підкладки [18]

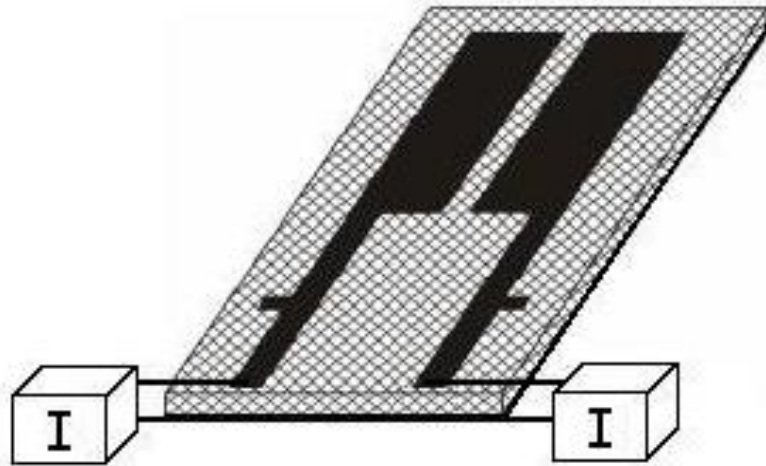


Рисунок 3.4.1 – Конструкція дворезонаторного фільтра з включеним блоком управління (I)

Схему керування можливо виконати за допомогою підключення діоду. В такому випадку, щоб створити коротке замикання необхідно подати напругу на підкладку. Такий варіант не дуже зручний із-за поганої електричної розв'язки та додаткового паразитного впливу напруги на металізацію на тильній стороні підкладки.

Тому кращім варіантом керування для виконання поставленої задачі буде використання однокаскадного транзисторного підсилювача на рис. 3.4.2 [18].

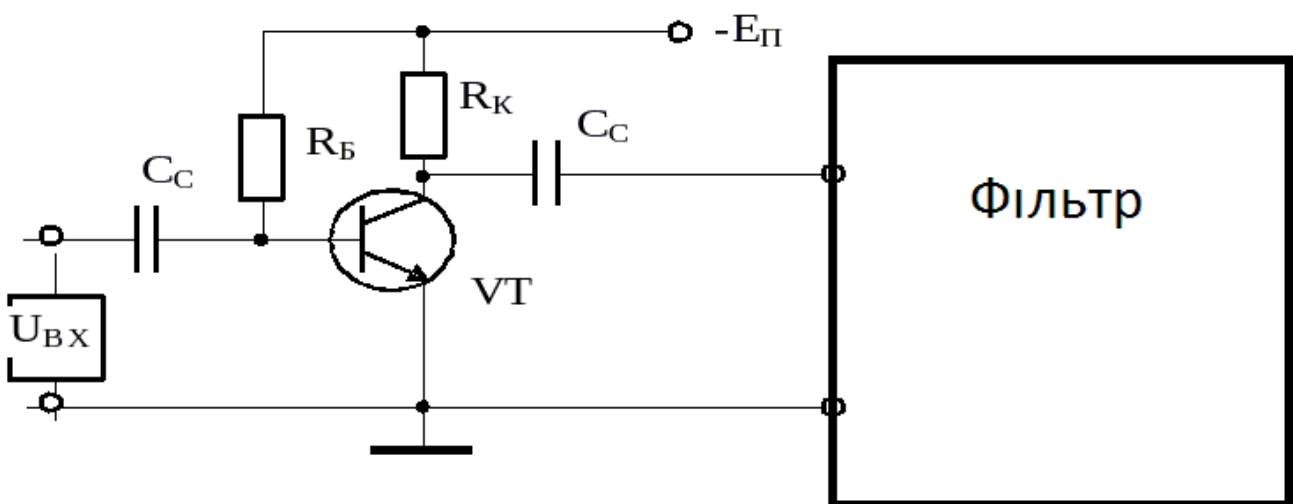


Рисунок 3.4.2 – Електрична принципова схема керування фільтром

3.5. Способи керування характеристиками фільтрів на основі НВЧ на основі мікросмушкових ліній

Існує ряд способів управління характеристиками частотоселективних структур [26]:

- 1) Управління ємністю за допомогою електричного поля (наприклад, з використанням варакторів);
- 2) Управління діелектричною проникністю за допомогою електричного поля (наприклад, з використанням сегнетоелектричних плівок);
- 3) Управління ефективною проникністю системи за рахунок зміни її геометрії (наприклад, зміни взаємного розташування елементів структури за допомогою електромеханічних перетворювачів);
- 4) Оптичне управління діелектричною проникністю;
- 5) Управління магнітною проникністю за допомогою магнітного поля;
- 6) Комбіноване магніто–електричне управління;
- 7) Управління провідністю матеріалу за допомогою електричного поля, освітлення і тощо.

Кожен з перерахованих методів має свої переваги та недоліки. Наприклад, для управління діелектричною проникністю за допомогою електричного поля необхідні сильні поля, але також цей метод вносить великі втрати. Керування ємністю дозволяє керувати резонансною частотою в широких межах, але при цьому також значно зменшується добротність. Системи з магнітним керуванням мають великі масогабаритні показники тощо.

Для управління резонансними частотами фільтрів були обрані два способи: управління ефективною проникністю системи за рахунок зміни її геометрії та управління провідністю матеріалу за допомогою електричного поля та освітлення.

Для реалізації управління ефективною проникністю системи за рахунок зміни її геометрії була розроблена конструкція дворезонаторного фільтра [35], аналогічна представлений на рис. 3.4.1. Переріз такого фільтра показано на рис.3.5.1

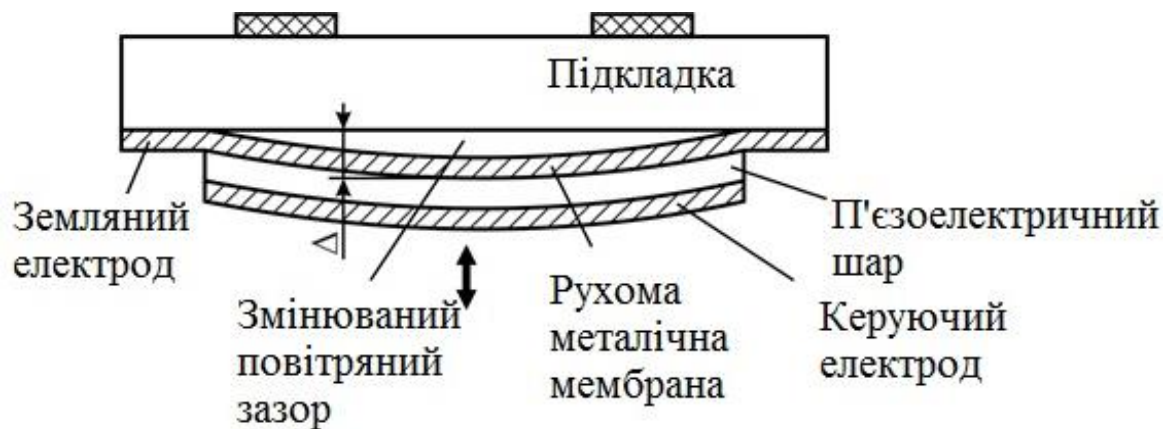


Рисунок 3.5.1 – Боковий вигляд конструкції фільтра на основі неоднорідної мікросмужкової лінії передачі з електромеханічним керуванням

Управління реалізовано шляхом зміни ширини зазору між підкладкою і земляним електродом. Така повітряна неоднорідність (зазор) перериває силові лінії електричного поля системи, що призводить його до сильного збурення. Як наслідок, з'являється суттєве зміщення резонансної частоти системи навіть при малих змінах ширини повітряного зазору. На рис. 3.5.2 показана АЧХ даного фільтра. Переміщення металевої мембрани здійснюється за допомогою п'єзоелектричного актюатора.

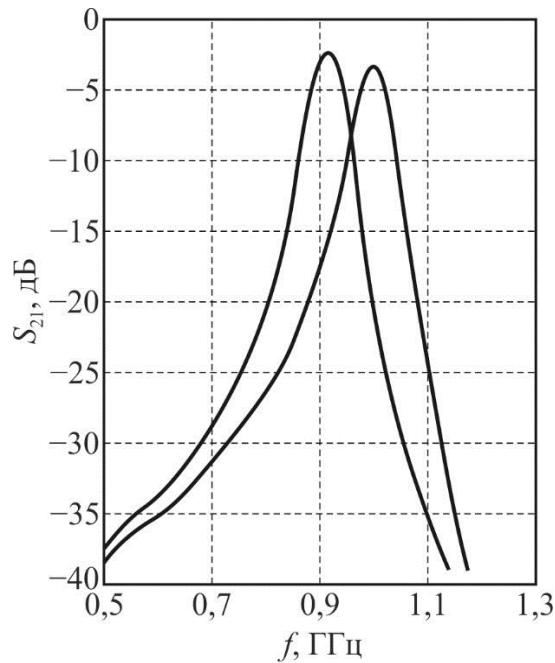


Рисунок 3.5.2 – АЧХ фільтра на основі неоднорідної мікросмушкової лінії передачі з електромеханічним керуванням

У досліджуваному фільтрі при зміні величини повітряного зазору від 10 до 100 мкм зміщення резонансної частоти $\sim 10\%$. При цьому максимальне значення керуваної напруги становило ~ 300 В.

Перевагою даного способу управління є можливість плавної зміни резонансної частоти фільтра. Однак є і суттєві недоліки - порівняно низька швидкодія і висока керуюча напруга.

На сьогоднішній день значний інтерес у всьому світі викликає оптичне управління [19,20]. Це пов'язано з тим, що такі системи мають підвищену швидкодію, стійкі до НВЧ перешкод, легко інтегруються з волоконно-оптичними мережами і пристроями обробки інформації.

У дослідженнях оптичне управління було реалізовано за рахунок зміни рухливості носіїв заряду при освітленні напівпровідникової GaAs підкладки. При нормальних умовах і при відсутності освітлення в НВЧ діапазоні власні напівпровідники (Si і GaAs) мають низький рівень втрат [21, 27].

Структура макета зображена на рис. 3.5.3.

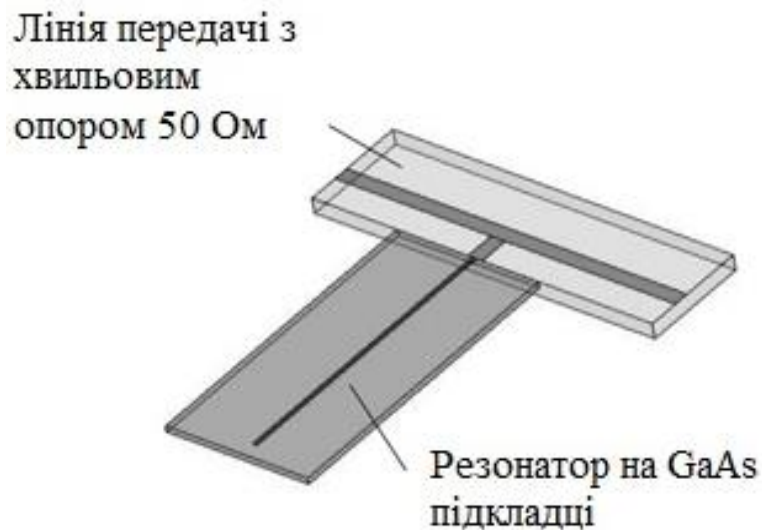


Рисунок 3.5.3 – Схематичне зображення конструкції робочого макета фільтра на основі неоднорідних мікросмужкових ліній на підкладці з високоомного GaAs

На GaAs підкладці розміром 20x10x0,4 мм був сформований мікросмужковий резонатор, підключений до мікросмужкової лінії з хвильовим опором 50 Ом. Дослідження проводилися в частотному діапазоні 3 ... 6 ГГц. Добротність резонансного відрізка на резонансній частоті 3,43 ГГц склала $Q_0 = 240$. При висвітленні GaAs підкладки світлодіодом з фокуруючою системою, коефіцієнт передачі змінювався від 27 дБ (без освітлення) до 21 дБ. При цьому спостерігалось зміщення резонансної частоти на 1% в область більш низьких частот [31,34].

Висновки по розділу

Огляд методів керування характеристиками НВЧ пристроїв на основі мікросмужкових ліній показав, що можуть бути застосовані:

- а) електричне керування;

- б) оптичне керування;
- в) керування за допомогою зміни діелектричної проникності;
- г) керування за допомогою магнітного поля;
- д) електромеханічне.

Кожен з перерахованих методів має свої переваги та недоліки. Наприклад, для управління діелектричною проникністю за допомогою електричного поля необхідні сильні поля, але також цей метод вносить великі втрати. Керування ємністю дозволяє керувати резонансною частотою в широких межах, але при цьому також значно зменшується добротність. Системи з магнітним керуванням мають великі масогабаритні показники. Оптичне керування є технологічно складним.

Широкий діапазон керування без погіршення добротності присторою можна забезпечити за допомогою електромеханічного методу керування. Реалізація даного методу є достатньо простою, оскільки на ринку існує велика кількість п'єзоелектричних та електрострикційних актюаторів. Більш доцільним є використання електрострикційних актюаторів, оскільки в них відсутній гістерезис.

4. ФАЗООБЕРТАЧІ

Фазообертач – це пристрій, який призначений для зміни фази електромагнітних коливань на виході лінії передачі НВЧ щодо фази на її вході, що здійснюється за допомогою зміни електричної довжини цієї лінії. Фазообертачі застосовуються для зміни форми вхідного сигналу, компенсації фазових спотворень, фазової модуляції, вирівнювання електричних довжин ліній передач, створення заданих фазових зсувів сигналів у когерентних радіосистемах (наприклад, в фазованих антенних решітках) та інше. Фазообертачі використовують в НВЧ техніці, наприклад, в системах з великим числом споживачів - для забезпечення необхідного розподілу початкових фаз сигналів, які до них надходять, в лініях передач радіосистем – для вирівнювання електричних довжин цих ліній, в фазованих антенних решітках – для формування заданої діаграми спрямованості та інших когерентних радіосистемах.

4.1 Різновиди фазообертачів

Найважливішими параметрами і характеристиками ФО є потужності втрат і керування, гранично допустима робоча смуга частот, швидкодія, залежність фазового зсуву від керуючого впливу, маса, габарити і вартість.

Хвилеводне, коаксіальне, смугове, мікросмугове виконання ФО визначається вибором не тільки фідерного тракту, а й типу випромінювача. У діапазоні НВЧ знайшли широке застосування напівпровідникові і ферритові фазообертачі, які прийнято розподіляти на декілька груп. Серед них виділяють прохідні і відбиваючі, взаємні і невзаємні, дискретні та плавні, з пам'яттю фазового зсуву і без запам'ятовування [25].

Прохідний ФО – це чотирьохполюсний узгоджений пристрій, що вносить додатковий фазовий зсув від 0 до 360 °. Фазовий зсув при цьому залежить від керуючого сигналу.

Відбиваючий ФО – це двополюсний пристрій (короткозамкнутий відрізок лінії НВЧ), у якого фаза відбитої хвилі також керуєма. Замикання вихідних клем в прохідному ФО перетворює його у відбиваючий. Відбиваючий ФО може бути перетворений в прохідний за рахунок застосування мостового пристрою.

Взаємний ФО забезпечує однаковий внесений фазовий зсув при прямому і зворотному напрямку поширення хвилі. Невзаємний ФО цією властивістю не володіє. Як правило, він використовує в електрично керованому середовищі невластивий ефект, наприклад ефект Фарадея в фериті. Взаємний відбиваючий ФО з Y-циркулятором утворює прохідний невластивий ФО.

Напівпровідникові та феритові дискретні ФО володіють елементом пам'яті, тобто зберігають внесений фазовий зсув після зняття керуючого впливу. Аналогові ФО з плавною зміною фази від керуючого сигналу можуть мати дискретність фазування, коли система керування промінем антени пов'язана з ЕОМ.

До теперішнього часу розроблені ФО на різні рівні потужності, робочі діапазони і розрядності. Феритові ФО на довжинах хвиль коротше 5 см можуть володіти меншими втратами, ніж напівпровідникові, що мають більшу швидкодію і менші масу і габарити. Збільшення розрядності призводить до додаткових втрат, більшої вартості і збільшення потужності управління [26].

Реалізуються ФО на механічному принципі, на основі діелектриків або феритів, на основі PIN-діодів та ін.

За принципом зміни фазового зсуву під дією зовнішнього сигналу ФО діляться на дві групи [27]:

- 1) аналогові, фазовий зсув в яких є безперервною функцією керуючого сигналу (напруги або струму);
- 2) цифрові (дискретні), фазовий зсув в яких задається двійковим кодом:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2^{Q-1}} \sum_{k=0}^{Q-1} a_k \cdot 2^k, \quad (4.1.1)$$

де $\begin{pmatrix} a_0^{(q)} \\ a_1^{(q)} \\ \vdots \\ a_{Q-1}^{(q)} \end{pmatrix} = A^{(q)} - Q$ - мірний вектор, що складається з нулів і одиниць.

Наприклад, якщо $Q = 3$, то $A^{(q)}$ містить вісім векторів та згідно (4.1) може визначити набір фазових зсувів: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$.

В аналогових ФО фазовий зсув змінюється під зовнішнім впливом на магнітну або діелектричну проникність матеріалу. Таким матеріалом може служити ферит або сегнетоелектрик.

Дискретність фаз вписується в структуру команд керуючої ЕОМ, але іноді призводить до деяких помилок в завданні координат променя антени і незначного збільшення рівня бічних пелюсток її діаграми спрямованості, якими, як правило, можна знехтувати.

Основним елементом дискретного ФО є діодний або транзисторний ключ. Використання напівпровідникових приладів в таких схемах засновано на тому, що вони можуть мати два різних стани - в одному струм крізь них не йде, в іншому проходить. Час перемикання напівпровідникових приладів залежить від потужності керованого сигналу і знаходиться в межах 0,05-5 мкс.

4.2. Особливості конструкції фазообертачів.

Конструкція фазообертача залежить від діапазону частот, для якого він призначений, меж зміни фази і точності її установки. На низьких частотах і в діапазоні радіочастот (до декількох МГц) в якості фазообертача зазвичай застосовують чотирьохполюсники, що складаються з резисторів, котушок індуктивності і конденсаторів. Простий фазообертач - фазозсувна ланка. Такий фазообертач зазвичай використовують для створення фіксованого фазового зсуву в межах від 0 до 90. У фазозсувних ланках з зосередженими параметрами зрушення фаз обумовлено дією реактивних елементів, з розподіленими параметрами -

кінцевим часом поширення електричного сигналу від входу ланки до її виходу. Більш досконалі фазообертачі, зібрані по схемі з трьох резисторів і одного конденсатора, які забезпечують регульований зсув фаз в межах від 0 до 180° . Застосовуються також транзисторні (або лампові) мостові фазообертачі, до складу яких входить пристрій, що перетворює вхідну напругу в дві напруги, зсунуті по фазі на 180° [28].

У діапазоні дец иметрових і більш коротких хвиль застосовують НВЧ фазообертачі, зібрані з відрізків НВЧ ліній передачі, в яких фазовий зсув здійснюють за допомогою зміни електричної довжини лінії. НВЧ фазообертачі поділяються на регульовані і нерегульовані. До регульованих НВЧ фазообертачів відносяться [28–29]:

- Розсувна секція коаксіальної лінії, регульована за допомогою зміни I ;
- Хвилеводні діелектричні НВЧ фазообертачі – відрізок хвилеводу, що містить переміщувану пластину з діелектрика; управління фазовим зсувом в такому фазообертачі засноване на зміні фазової швидкості хвилі і X при зміні положення пластини в хвилеводі;
- Стисна секція – відрізок прямокутного хвилеводу, вузькі стінки якого забезпечені пружними підвісками, що дозволяють змінювати ширину хвилеводу (і тим самим X);
- Мостовий НВЧ фазообертач – багатоплечевий пристрій (коаксіальний або хвилеводний), забезпечений двома узгоджено змінюваними по довжині короткозамкненими відрізками лінії передачі (шлейфами), включеними в основну лінію, за якою здійснюється передача енергії НВЧ від генератора до навантаження, послідовно з навантаженням або паралельно йому;
- Фазообертачі з напівпровідниковими елементами (такими, як напівпровідникові діоди з р-п-структурою, варикапи), феритовими пристроями, сегнетоелектриками, плазмові. Перспективні НВЧ фазообертачі на р-п-діодах, використовуваних як комутаційні елементи.
- Діоди дозволяють змінювати фазовий зсув східчасто за допомогою або прямої зміни, або підключенням до лінії (через діоди) набору шлейфів.

Поширені також феритові фазообертачі, робота яких заснована на використанні ефекту Фарадея на НВЧ та явища феромагнітного резонансу в намагніченому фериті.

Феритові фазообертачі поділяються на взаємні, що забезпечують однаковий фазовий зсув для обох напрямків поширення хвилі, і невзаємні, в яких зсув фаз для хвиль, що поширюються в протилежних напрямках, неоднаковий.

Нерегульований фазообертач реалізують у вигляді каліброваного по фазі відрізка лінії передачі, фазовий зсув в якому досягається підбором значення його довжини, розмірів поперечного перерізу (при використанні хвилеводу) або ефективної діелектричної проникності.

4.3. Параметри фазообертачів.

Серед основних параметрів фазообертачів виділяють [30]:

Робочий діапазон частот. Оскільки фазообертачі працюють на різних частотах, та в різних пристроях, при виборі конкретної моделі необхідно відштовхуватись від поставленої мети. Так, наприклад, в своїй роботі я розглядаю фазообертач на ДР з Е–типом коливань, що працюють в діапазоні частот 4–6 ГГц.

Максимальний керуємий фазовий зсув. Суть керованого фазообертача полягає в керуванні частотою. Тому важливою характеристикою слід виділити максимально керуємий фазовий зсув.

Потужність втрат. Фазообертачі частіше за все виступають в якості частини складної системи, або приладу. Тому їх продуктивність зростає при зменшенні втрат за потужністю.

Швидкодія. Швидкість завжди виступає однією чи не важливішою характеристикою при виборі складових приладів. Оскільки швидкість кожної зі складових впливає на швидкість процесу або приладу в цілому.

Коефіцієнт стоячої хвилі. Співвідношення значень напруженості електричного поля у максимумі і мінімумі стоячої хвилі.

Габарити. В зв'язку з прямуванням новітніх технологій до мінімізацій приладів, без втрат їх функціональності, зазвичай обирають складові з меншими габаритами.

Вартість. Ще однією не мало важливою характеристикою фазообертачів є ціна. Оскільки вона є показником для виробників. Чи є доцільним використовувати саме цю модель, а не яку-небудь іншу.

4.4. Конструкція фазообертача на основі мікросмужкових ліній із ступінчастою неоднорідністю.

Розглянемо чвертьхвильовий резонатор із ступінчастою неоднорідністю, який складається з двох відрізків мікросмужкової лінії, які з'єднані послідовно [31-34](рис.3.6.1).

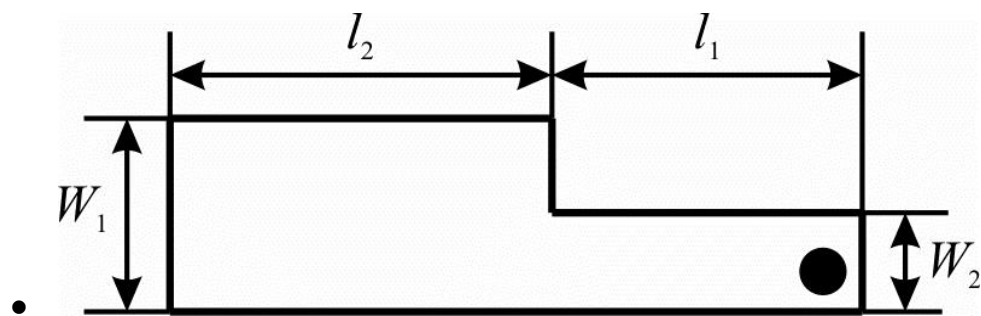


Рисунок 4.4.1 – Мікросмужковий резонатор зі ступінчастою неоднорідністю

Відрізки мають різний хвильовий опір. Таким чином, на межі між двома відрізками хвильовий опір лінії змінюється стрибкоподібно. Відрізок з великим хвильовим опором з'єднаний з підкладкою (місце з'єднання позначено на рис. 4.4.1 чорним колом).

У цьому випадку вхідний опір резонатора можна розрахувати співвідношенням [35]:

$$Z_{in0} = Z_{w2} \frac{j(Z_{w1} \operatorname{tg}(\beta l_1) + Z_{w2} \operatorname{tg}(\beta l_2))}{Z_{w2} - Z_{w1} \operatorname{tg}(\beta l_1) \operatorname{tg}(\beta l_2)} \quad (4.4.1)$$

де Z_{w1} – хвильовий опір широкого проміжку,

Z_{w2} – хвильовий опір вузького проміжку,

l_1 – довжина широкого проміжку,

l_2 – довжина вузького проміжку.

Використовуючи граничні умови на торцях резонатора, можна визначити хвильові числа і резонансну частоту даної резонансної системи. Похибка розрахунку не перевищує 2 ... 4% в широкому діапазоні співвідношень розмірів l_2/l_1 і W_2/W_1 [31].

Теоретичні дослідження показали перспективність використання таких резонаторів для створення простих двухзвенних фазообертачів (рис.4.4.2), а також фазообертачів з керованими характеристиками [34]. Характеристики таких фазообертачів залежать як від характеристик резонаторів, так і від коефіцієнтів зв'язку (ємнісного k_C і індуктивного k_L) між ними.

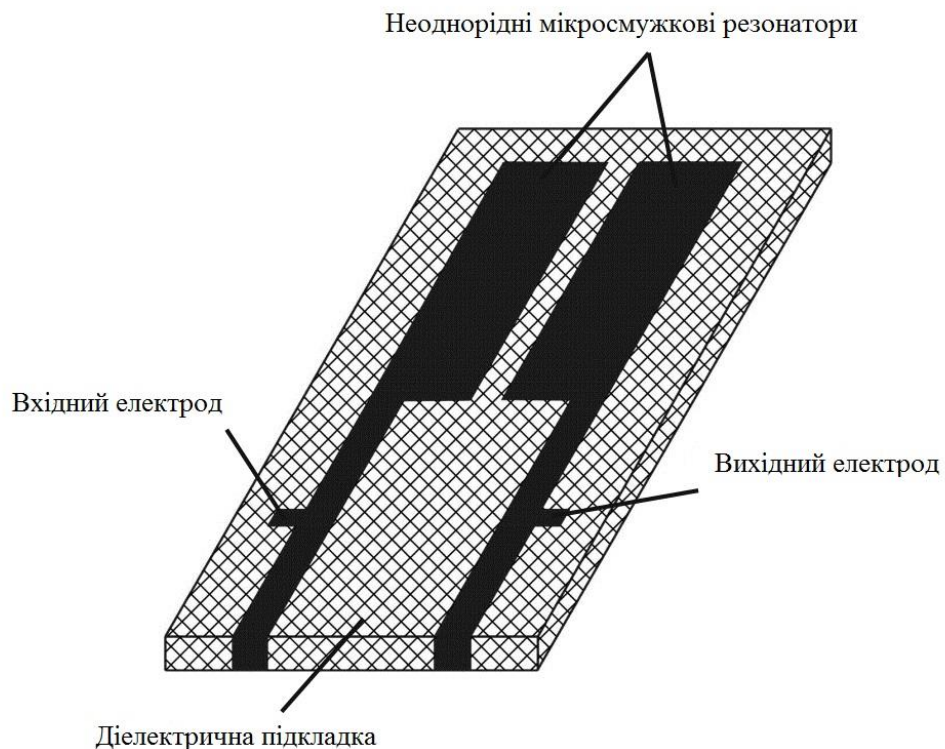


Рисунок 4.4.2 – Конструкція дворезонаторного фазообертача

Розрахувати коефіцієнти зв'язку можна використовуючи методику запропоновану в [24]. Такий підхід дуже гнучкий оскільки дозволяє формувати необхідну характеристику фазообертача, а також отримати теоретичне обґрунтування залежності характеристик фазообертачів від коефіцієнтів зв'язку між резонаторами.

Коефіцієнт зв'язку може бути визначений за зсувом резонансної частоти зв'язаного і незв'язаного резонатора:

$$k = \pm \frac{1}{2} \left(\frac{f_{02}}{f_{01}} + \frac{f_{01}}{f_{02}} \right) \sqrt{\left(\frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \right)^2 - \left(\frac{f_{02}^2 - f_{01}^2}{f_{02}^2 + f_{01}^2} \right)^2}, \quad (4.4.2)$$

де f_{01} і f_{02} – власні резонансні частоти резонаторів,
 f_{p1} і f_{p2} – резонансні частоти зв'язаних резонаторів.

Якщо резонансні частоти резонаторів збігаються, то даний вираз спрощується:

$$k = \pm \frac{k_L + k_C}{1 + k_L k_C} = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2}, \quad (4.4.3)$$

де k_L – коефіцієнт зв'язку індуктивностей,
 k_C – коефіцієнт зв'язку ємностей.

Висновки по розділу

Запропоновано конструкцію прохідного фазообертача резонансного типу. Дана конструкція дає змогу реалізувати широкий діапазон зміни фази сигналу на основі електромеханічного керування.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗООБЕРТАЧА НА ОСНОВІ НЕОДНОРІДНИХ ВІДРІЗКІВ МІКРОСМУЖКОВИХ ЛІНІЙ

5.1. Теоретичне дослідження та розрахунок обраної конструкції фазообертача на основі неоднорідних мікросмужкових ліній.

Для проведення та виконання поставлених завдань необхідно провести розрахунок, моделювання та випробовування трьох різних конфігурацій фазообертачів на основі мікросмужкових неоднорідних ліній.

Як вхідні дані будемо використовувати фізично доступні для дослідження матеріали підкладки, а так само задавати вихідні необхідні резонансні частоти як описано в [35].

Задамо наступними початковими даними:

Перший зразок. Діелектрична проникність підкладки – 40, товщина підкладки – 2 мм, резонансна частота – 915 МГц.

Другий зразок. Діелектрична проникність підкладки – 9.8, товщина підкладки – 1 мм, резонансна частота – 1640 МГц.

Третій зразок. Діелектрична проникність підкладки – 40, товщина підкладки – 2 мм, резонансна частота – 1825 МГц.

Засобами програми serenade 8.5, по заданим значенням резонансних частот та діелектричних проникностей :

Перший зразок. $f_0 = 915 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, $\varepsilon = 40$;

Другий зразок. $f_0 = 1640 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, $\varepsilon = 9,8$;

Третій зразок. $f_0 = 1825 \cdot 10^6 \text{ Гц}$, $\varepsilon = 40$;

були підібрані геометричні параметри резонаторів і зазор між ними.

Перший зразок:

$W_1 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина широкої ділянки.

$W_2 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина вузької ділянки.

$l_1 = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина лінії передачі з опором 50 Ом.

$l_2 = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина вузької ділянки.

$l_3 = 6.25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина широкого ділянки.

$S = 0,166 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – зазор між широкими ділянками резонаторів.

$h_{\text{нід}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – товщина підкладки.

Другий зразок:

$W_1 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина широкої ділянки.

$W_2 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина вузької ділянки.

$l_1 = 0.9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина лінії передачі з опором 50 Ом.

$l_2 = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина вузької ділянки.

$l_3 = 6.25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина широкого ділянки.

$S = 0,166 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – зазор між широкими ділянками резонаторів.

$h_{\text{нід}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – товщина підкладки.

Третій зразок.

$W_1 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина широкої ділянки.

$W_2 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина вузької ділянки.

$l_1 = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – ширина лінії передачі з опором 50 Ом.

$l_2 = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина вузької ділянки.

$l_3 = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – довжина широкого ділянки.

$S = 0,165 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – зазор між широкими ділянками резонаторів.

$h_{\text{нід}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – товщина підкладки.

За допомогою програми «serenada 8.5» були побудовані АЧХ фазообертача

(Рис. 5.1.1 – 5.1.3).

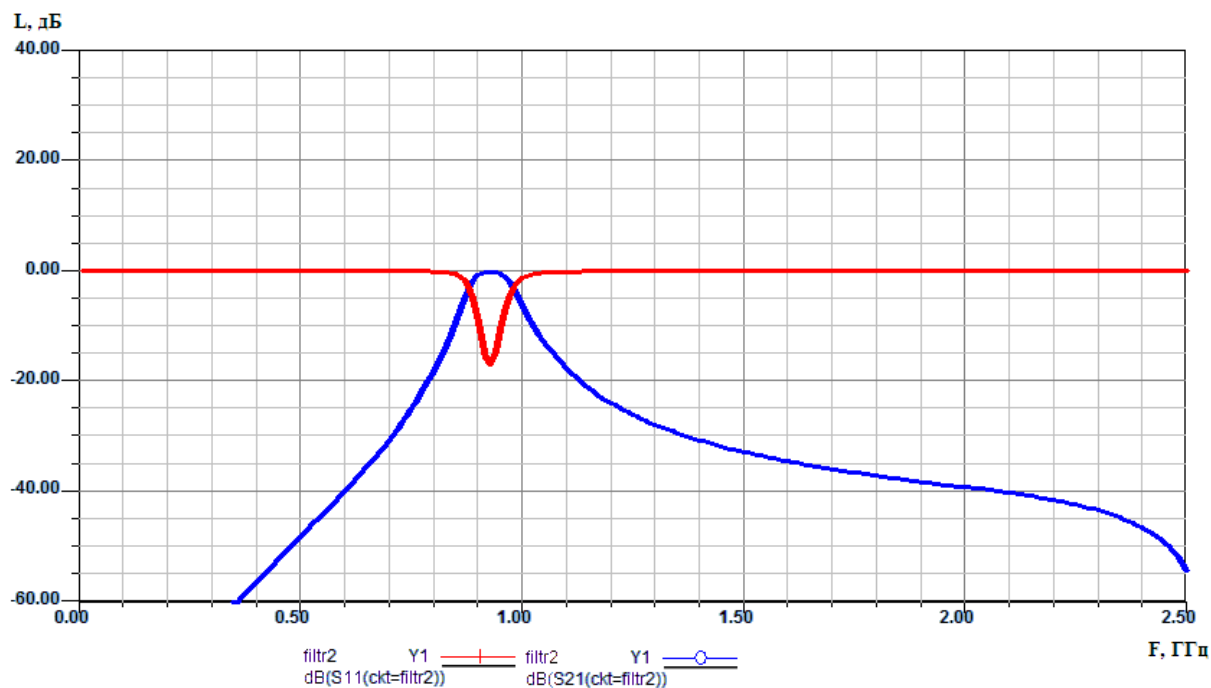


Рисунок 5.1.1 – Графік АЧХ першого зразка з короткозамкненими резонаторами

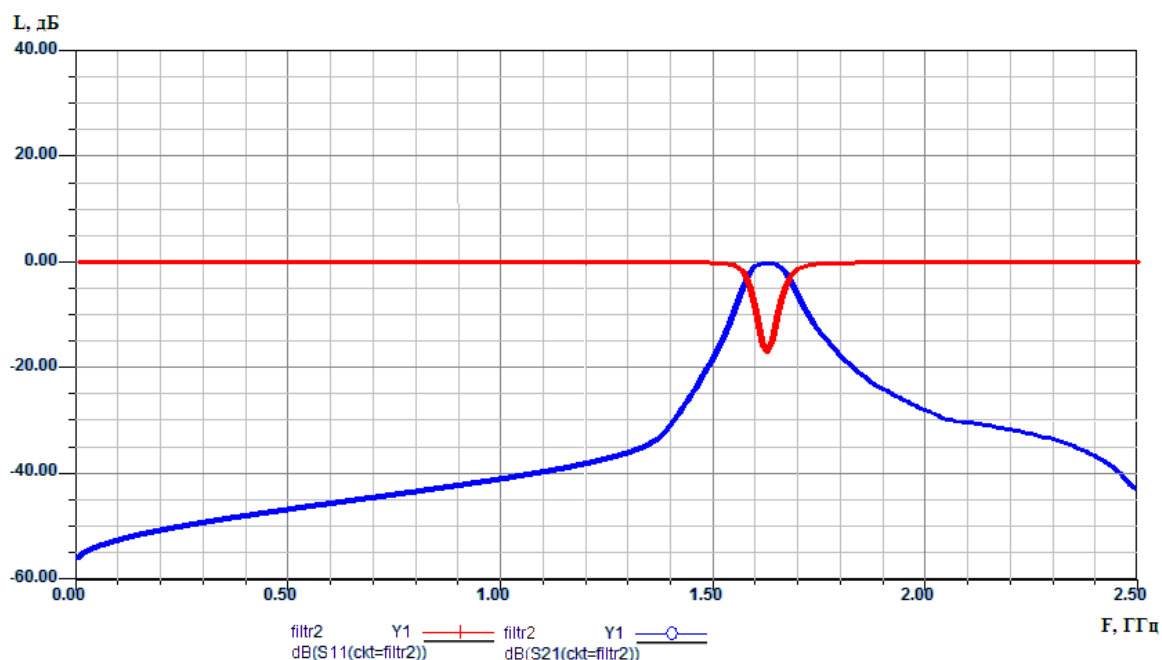


Рисунок 5.1.2 – Графік АЧХ другого зразка з короткозамкненими резонаторами

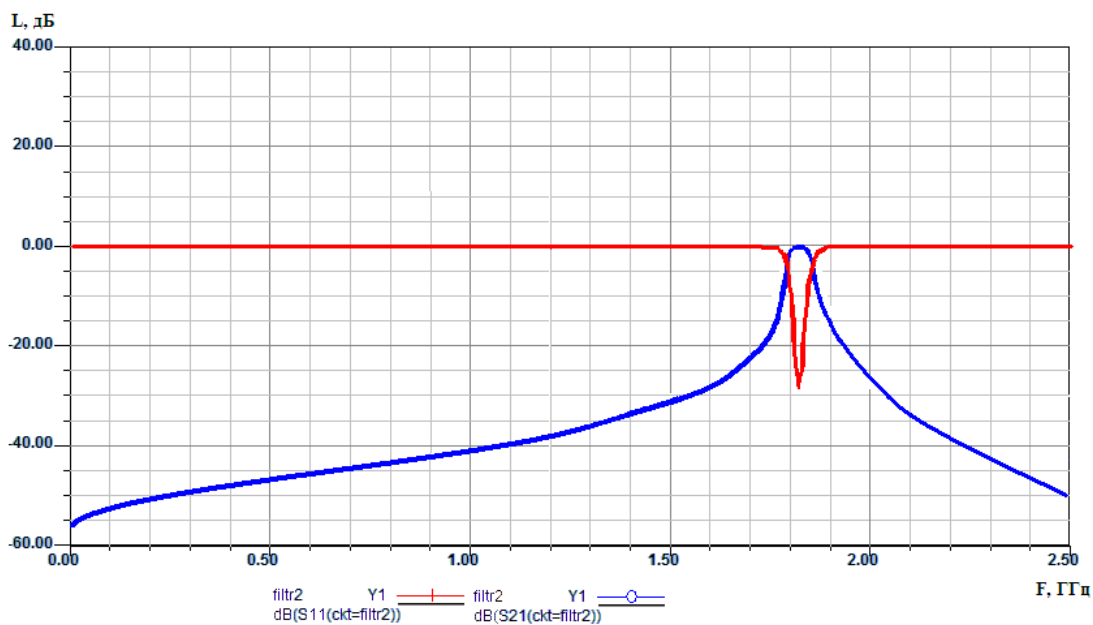


Рисунок 5.1.3 – Графік АЧХ третього зразка з короткозамкненими резонаторами

Дану конструкцію фазообертача можна подати за допомогою еквівалентної електричної принципової схеми (рис. 5.1.4).

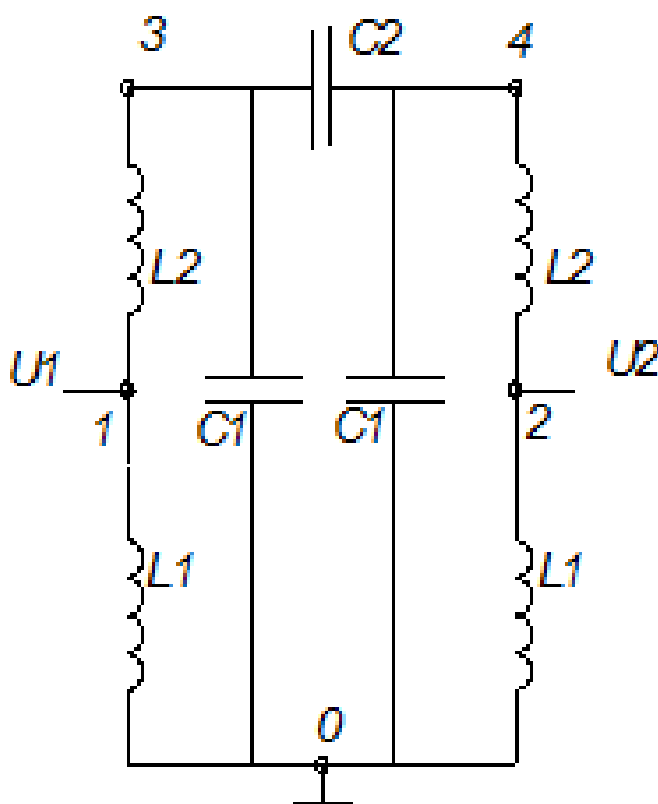


Рисунок 5.1.4– Еквівалентна, електрична принципова схема фазообертача

Для перевірки правильності розрахунку одного із зразків проведемо розрахунок номіналів схеми за методикою, викладеною в [9].

Знайдемо співвідношення ширини відрізків до товщини підкладки по формулі:

$$X = \frac{W}{h} \quad (5.1.1)$$

$$X_1 = \frac{W_1}{h_{\text{нод}}} = \frac{4,4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 4,4 \quad (5.1.2)$$

$$X_2 = \frac{W_2}{h_{\text{нод}}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 2,2 \quad (5.1.3)$$

$$X_3 = \frac{l_2}{h_{\text{нод}}} = \frac{4,4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 4,4 \quad (5.1.4)$$

Проведемо розрахунок ефективної діелектричної проникності, хвильового опору, і довжини хвиль для кожної ділянки неоднорідності за формулами 5.1.5, 5.1.12, 5.1.19 відповідно:

$$\varepsilon_{\text{ef}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} - \frac{\varepsilon - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{X}}} \quad (5.1.5)$$

$$\varepsilon_{\text{ef1}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} - \frac{\varepsilon - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{X_1}}} \quad (5.1.6)$$

$$\varepsilon_{\text{ef1}} = \frac{40 + 1}{2} - \frac{40 - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{4,4}}} = 9,71 \quad (5.1.7)$$

$$\varepsilon_{\varepsilon\phi 2} = \frac{\varepsilon + 1}{2} - \frac{\varepsilon - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{X_2}}} \quad (5.1.8)$$

$$\varepsilon_{\varepsilon\phi 2} = \frac{40 + 1}{2} - \frac{40 - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{2,2}}} = 12,21 \quad (5.1.9)$$

$$\varepsilon_{\varepsilon\phi 3} = \frac{\varepsilon + 1}{2} - \frac{\varepsilon - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{X_3}}} \quad (5.1.10)$$

$$\varepsilon_{\varepsilon\phi 3} = \frac{40 + 1}{2} - \frac{40 - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + \frac{10}{7}}} = 7,99 \quad (5.1.11)$$

$$Z = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_{\varepsilon\phi}} \cdot X \cdot \left(1 + 1,735 \cdot \varepsilon_{\varepsilon\phi}^{-0,0724} \cdot X^{-0,836}\right)} \quad (5.1.12)$$

$$Z_1 = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_{\varepsilon\phi 1}} \cdot X_1 \cdot \left(1 + 1,735 \cdot \varepsilon_{\varepsilon\phi 1}^{-0,0724} \cdot X_1^{-0,836}\right)} \quad (5.1.13)$$

$$Z_1 = \frac{377}{\sqrt{9,71 \cdot 4,4} \cdot \left(1 + 1,735 \cdot 9,71^{-0,0724} \cdot 4,4^{-0,836}\right)} = 19,27 \text{ } Om \quad (5.1.14)$$

$$Z_2 = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_{\varepsilon\phi 2}} \cdot X_2 \cdot \left(1 + 1,735 \cdot \varepsilon_{\varepsilon\phi 2}^{-0,0724} \cdot X_2^{-0,836}\right)} \quad (5.1.15)$$

$$Z_2 = \frac{377}{\sqrt{12,21 \cdot 2,2 \cdot (1 + 1,735 \cdot 12,21^{-0,0724} \cdot 2,2^{-0,836})}} = 128,04 \text{ Ом} \quad (5.1.16)$$

$$Z_3 = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эф3}} \cdot X_3 \cdot (1 + 1,735 \cdot \varepsilon_{\text{эф3}}^{-0,0724} \cdot X_3^{-0,836})}} \quad (5.1.17)$$

$$Z_3 = \frac{377}{\sqrt{7,99 \cdot 7 \cdot (1 + 1,735 \cdot 7,99^{-0,0724} \cdot 7^{-0,836})}} = 14,73 \text{ Ом} \quad (5.1.18)$$

$$\lambda = \frac{c}{f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}} \quad (5.1.19)$$

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф1}}}} \quad (5.1.20)$$

$$\lambda_1 = \frac{3 \times 10^8}{915 \times 10^6 \cdot \sqrt{9,71}} = 0,1052 \text{ м} \quad (5.1.21)$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф2}}}} \quad (5.1.22)$$

$$\lambda_2 = \frac{3 \times 10^8}{915 \times 10^6 \cdot \sqrt{12,21}} = 0,0938 \text{ м} \quad (5.1.23)$$

$$\lambda_3 = \frac{c}{f_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф3}}}} \quad (5.1.24)$$

$$\lambda_3 = \frac{3 \times 10^8}{915 \times 10^6 \cdot \sqrt{7,99}} = 0,1159 \text{ м} \quad (5.1.23)$$

Перейдемо до розрахунків параметрів елементів електричної схеми:

$$L_1 = \frac{Z_1 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_1}{\lambda_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_0} \quad (5.1.25)$$

$$L_1 = \frac{19,27 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,1052} \right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 915 \cdot 10^6} = 1,0016 \cdot 10^{-10} \text{ Гн} \quad (5.1.27)$$

$$L_2 = \frac{Z_1 \cdot l_2 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф1}}}}{c} \quad (5.1.28)$$

$$L_2 = \frac{19,27 \cdot 7,26 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{9,71}}{3 \cdot 10^8} = 1,453 \cdot 10^{-9} \text{ Гн} \quad (5.1.29)$$

$$C_1 = \frac{l_3 \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{эф2}}}}{Z_2 \cdot c} \quad (5.1.30)$$

$$C_1 = \frac{6,25 \cdot 10^{-3} \sqrt{12,21}}{128,04 \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,568 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} \quad (5.1.31)$$

$$C_2 = \frac{0,636 \cdot \operatorname{arcct} \left(e^{\frac{\pi \cdot s}{2 \cdot l_3}} \right) \cdot l_3}{Z_3 \cdot f_0 \cdot \lambda_3} \quad (5.1.32)$$

$$C_2 = \frac{0,636 \cdot \operatorname{arcct} \left(e^{\frac{3,140,16610^{-3}}{2 \cdot 6,25 \cdot 10^{-3}}} \right) \cdot 6,25 \cdot 10^{-3}}{14,73 \cdot 915 \cdot 10^6 \cdot 0,1159} = 2,653 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \quad (5.1.33)$$

Проведемо моделювання за отриманими результатами за допомогою програми RFSim99. Отримаємо АЧХ, показану на рис.5.1.5.

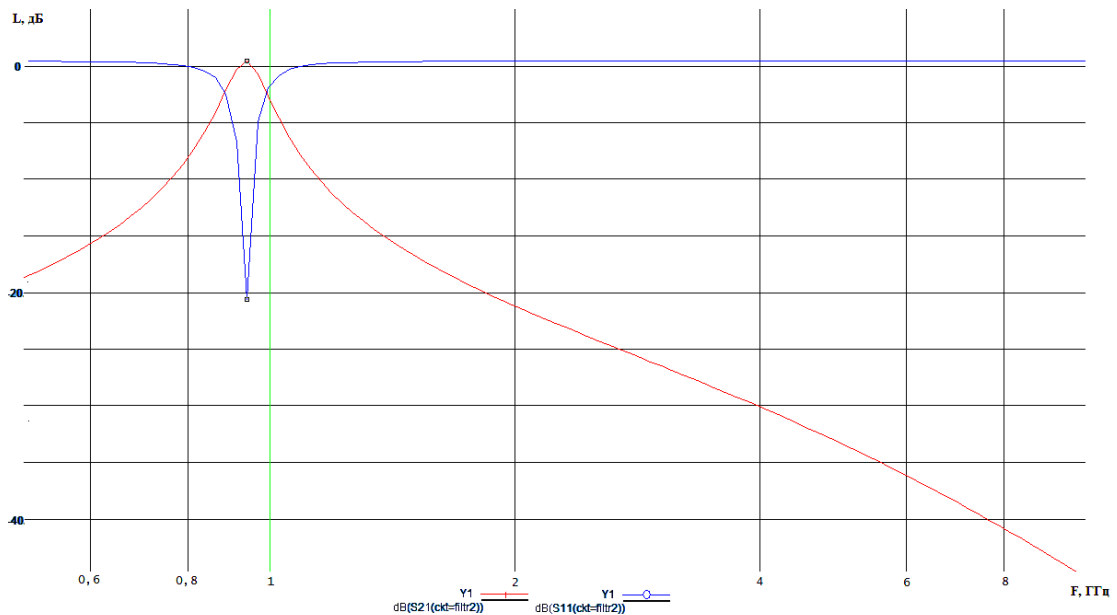


Рисунок 5.1.5– АЧХ фільтра з короткозамкненими резонаторами

Отримані значення центральної частоти $f_0 \approx 915 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ та половою пропускання $\Delta f = 887 \cdot 10^6 - 976 \cdot 10^6 \text{ Гц}$. Відхилення від заданого значення не перевищують 2%, що свідчить про достатню точність розрахунків геометричних параметрів мікросмушкового фазообертача із ступінчастою неоднорідністю.

5.2. Експериментальне дослідження обраної конструкції фазообертача на основі неоднорідних мікросмушкових ліній зі ступінчастою неоднорідністю.

Для проведення експериментальних досліджень фазообертачів на основі неоднорідних відрізків мікросмушкових ліній були виготовлені зразки показані на рисунку 5.2.1

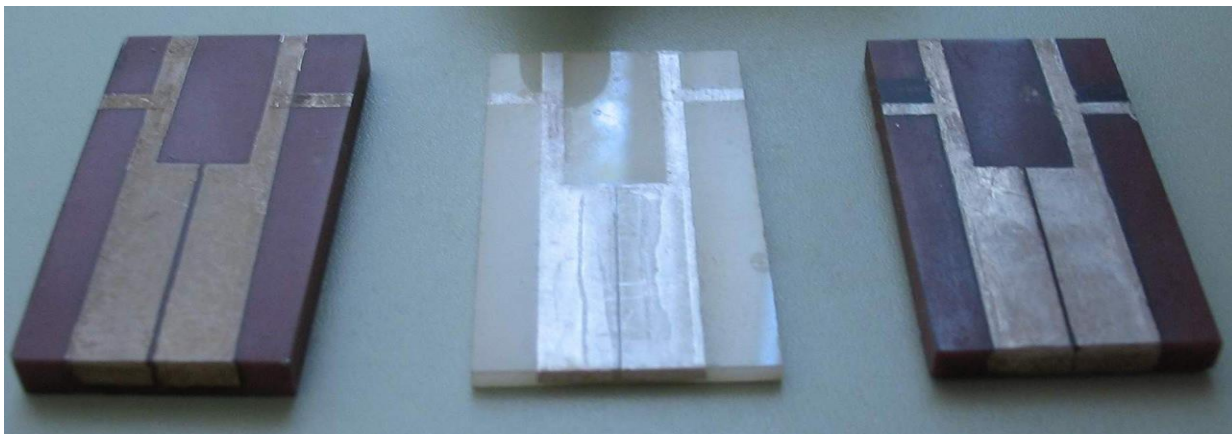


Рисунок 5.2.1– Зразки фазообертачів на основі неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній (з ліва на право перший,другий і третій зразок відповідно)

За допомогою лабораторного стенду (Рис. 5.2.2) були виміряні амплітудно-частотні характеристики показані на рисунках 5.2.3 – 5.2.5.

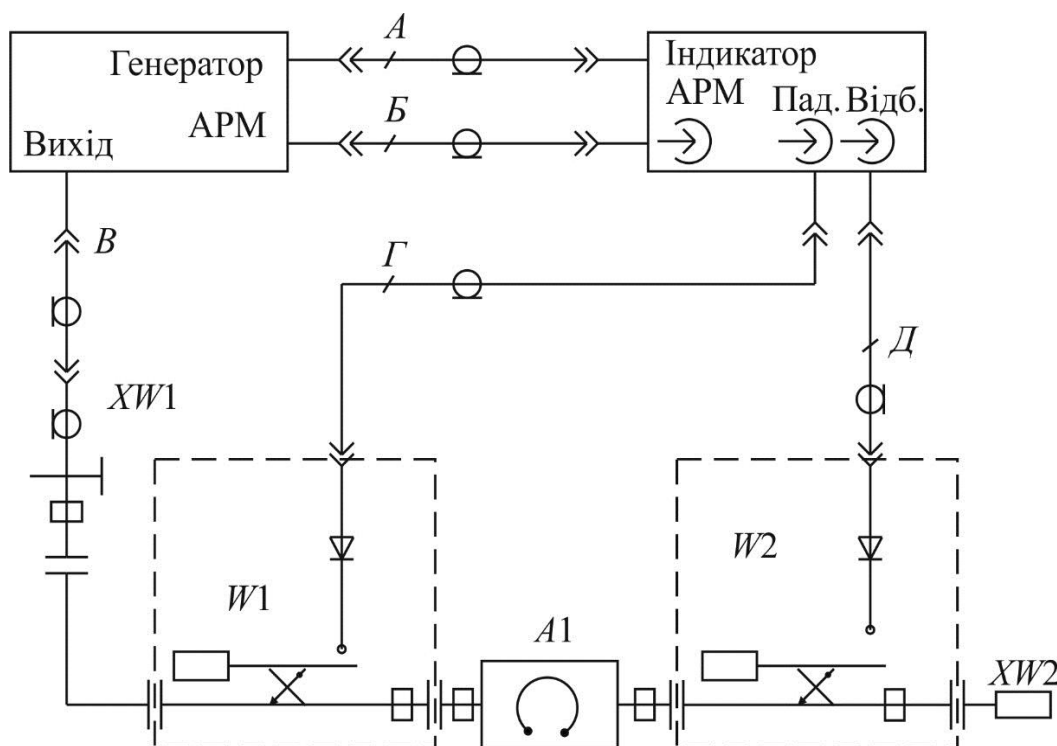


Рисунок 5.2.2 – Схема лабораторного стенду:

A1 – досліджуваний макет;

W1, W2 – рефлектометри падаючої та відбитої хвиль;

XW1 – коаксіальний перехід;

XW2 – узгоджене навантаження;

А, Б, В, Г, Д – високочастотні коаксіальні кабелі

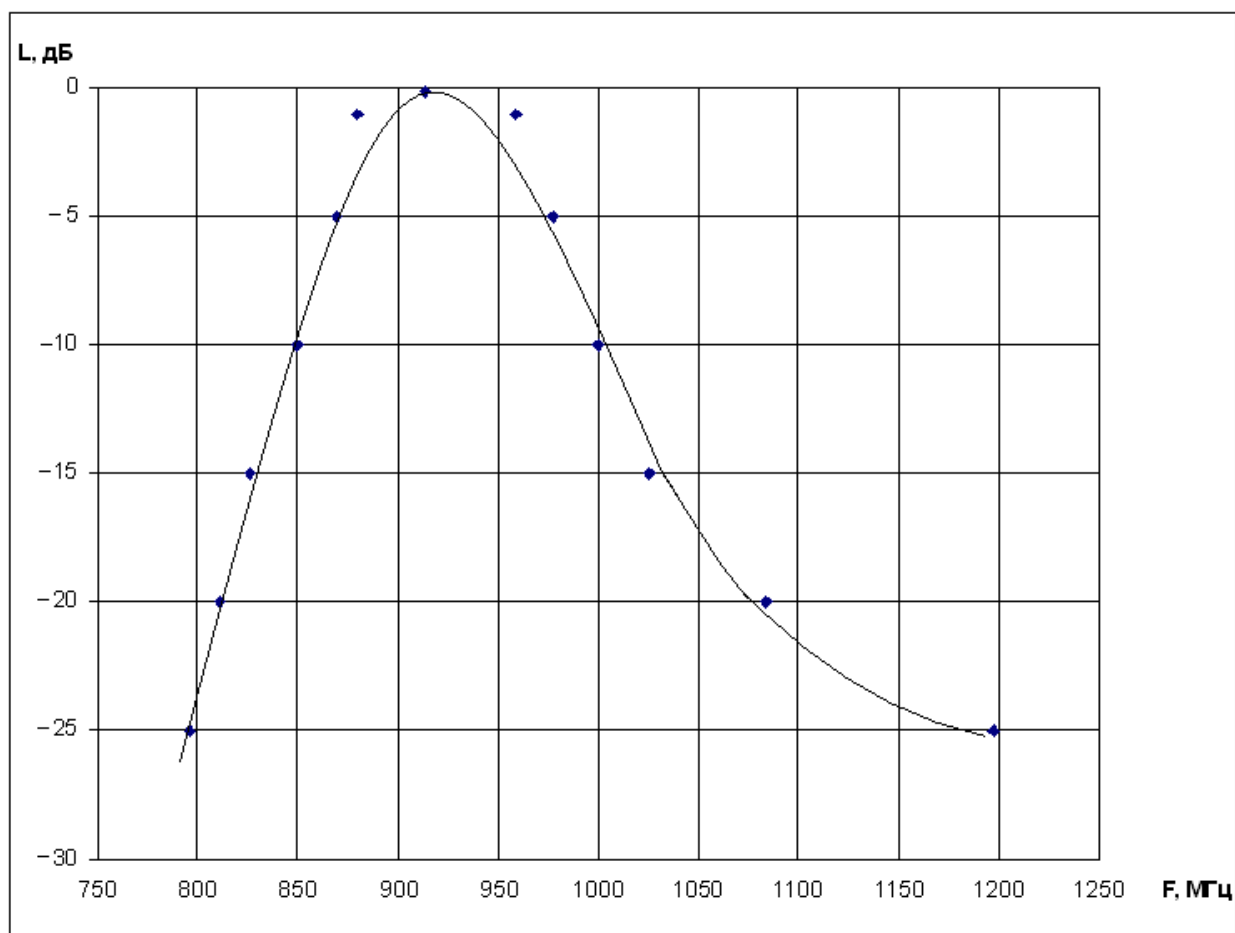


Рисунок. 5.2.3 – Виміряна АЧХ першого зразка.

Таблиця 5.2.1 Виміряні значення першого зразка фазообертача

L, дБ	25	20	15	10	5	1	0.15	1	5	10	15	20	25
F, МГц	796	811	826	850	869	880	914	959	977	1000	1025	1084	1197

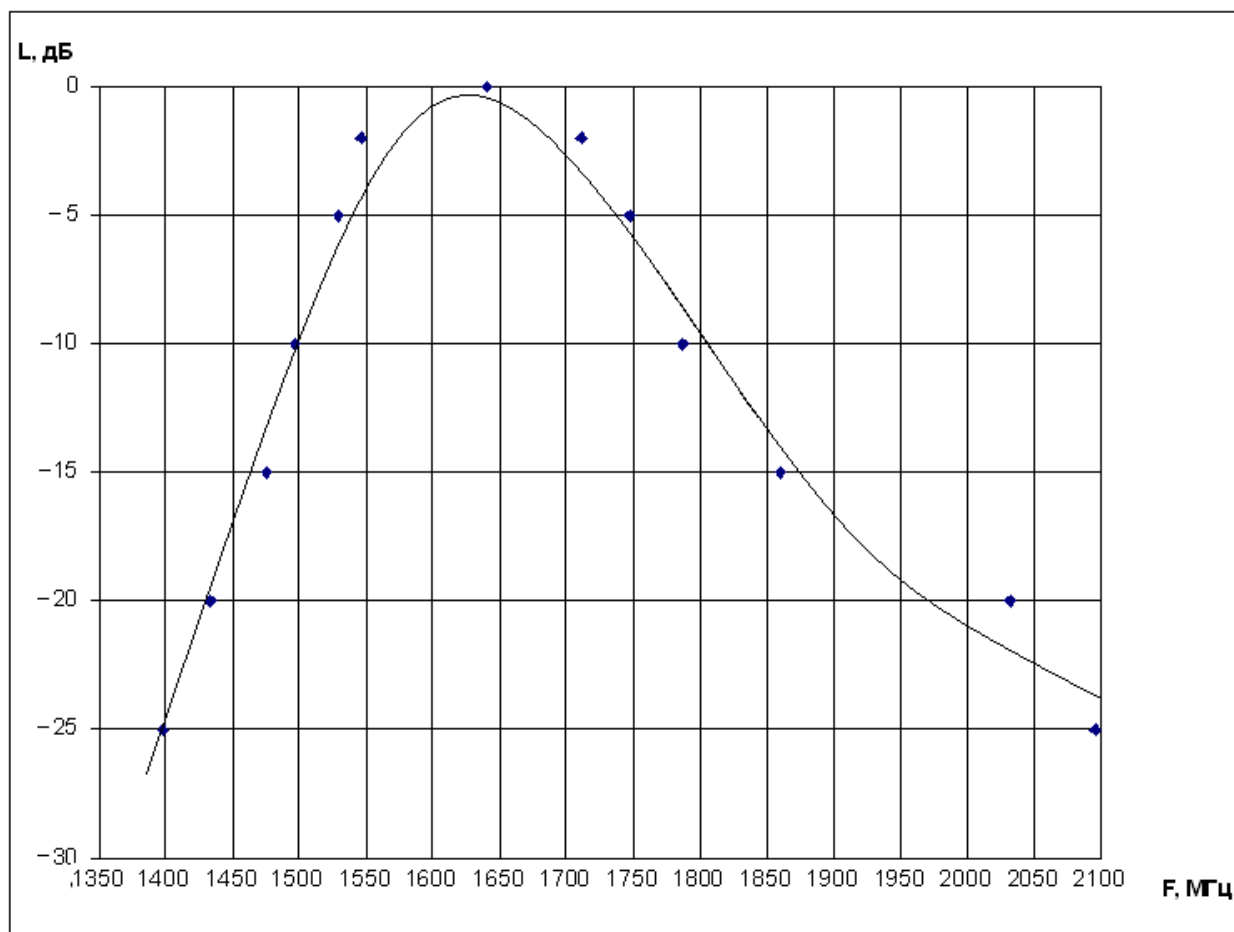


Рисунок. 5.2.4 – Виміряна АЧХ другого зразка.

Таблиця 5.2.2 Виміряні значення другого зразка фазообертача

L, дБ	25	20	15	10	5	2	0.2	2	5	10	15	20	25
F, МГц	1398	1433	1475	1496	1529	1546	1641	1711	1747	1787	1861	2032	2096

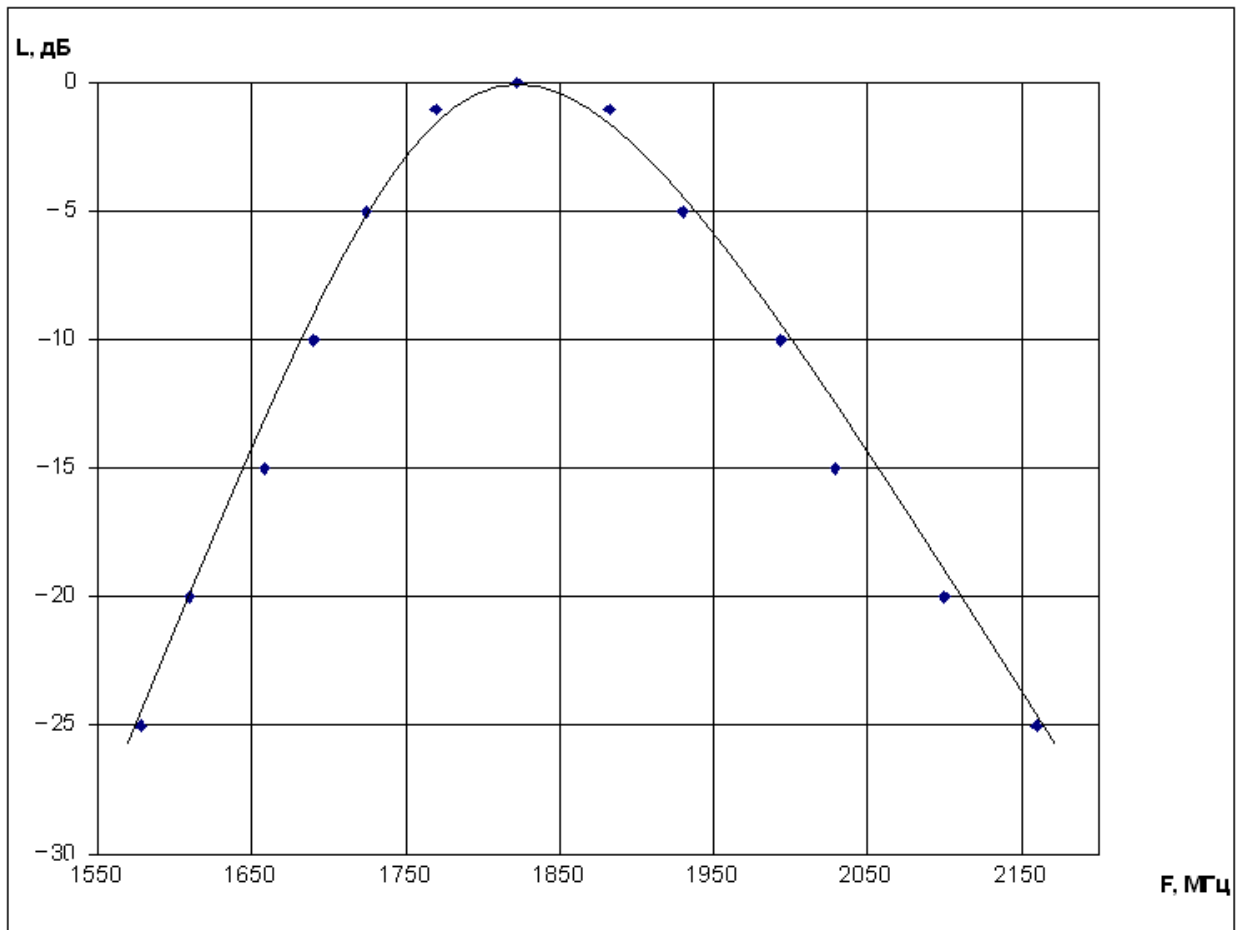


Рисунок. 5.2.5 – Виміряна АЧХ третього зразка.

Таблиця 5.2.3 Виміряні значення третього зразка фазообертача

L, дБ	25	20	15	10	5	1	0.5	1	5	10	15	20	25
F, МГц	1578	1610	1659	1690	1725	1770	1822	1882	1930	1994	2029	2100	2160

Порівнюючи отримані дані в результаті експерименту і розраховані значення, отримане відхилення між цими даними не перевищує 5%.

Виходячи з цього, методика розрахунку фазообертачів на основі неоднорідних відрізків мікросмужкових ліній представлення в цій роботі може використовуватися для розрахунку фазообертачів такого типу з іншими характеристиками.

5.3. Керовані фазообертачі на основі неоднорідної мікросмужкової лінії передачі зі ступінчатою неоднорідністю.

За способом управління фазою фазообертачі діляться на аналогові і дискретні. Для тих і інших використовуються різні керуючі елементи. У разі електромеханічного управління, один і той же керуючий елемент може забезпечити як аналоговий, так і дискретний режим роботи.

Конструкції фазообертачів на ферромагнетиках, керовані магнітним полем, занадто інерційні. Швидкодіючі фазообертачі на сегнетоелектричних плівках мають недостатній діапазон управління фазою і високі втрати. Пристрої, в яких фаза НВЧ сигналу регулюється напівпровідниковими елементами: або р-і-п діодами, або варакторами, відрізняються високими характеристиками, і в мікросмужковому виконанні вони мініатюрні, технологічні у виробництві, прості в налаштуванні.

Але існує проблема створення фазообертачів в міліметровому діапазоні довжин хвиль, де для пристроїв на ферромагнетиках необхідні неприйнятно великі магнітні поля для управління, а для напівпровідникових елементів необхідні характеристики поки недосяжні. Тому це актуально.

Запропонована і розроблена конструкція фазообертача – це конструкція на основі керованого планарного фільтра;

Її переваги :

а) регулювання зсуву фази в більших межах, в порівнянні з "нерезонансною" конструкцією, виготовленою на відрізку узгодженої з трактом лінії передачі.

б) в "резонансному" фазообертачі в робочій смузі частот заданий максимальний рівень потужності не змінюється при зміні діелектричної проникності, так як при цьому відповідну зміну резонансних частот мікросмужкових резонаторів практично не руйнує балансу зв'язків між ними.

Для підтвердження вищесказаного можна порівняти керований зсув фази відрізка мікросмужкової лінії передачі довжиною l в умовах резонансу і в

узгодженому режимі. Відомо [23], що частотна залежність фази в резонансі визначається формулою:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{Q} \frac{\omega / \omega_0}{1 - (\omega / \omega_0)^2} \right), \quad (5.3.1)$$

де Q – добротність резонансу,

$\omega_0 = \pi c / l \sqrt{\varepsilon}$ – резонансна частота, виражена через довжину відрізка МСЛ – l ,

c – швидкість світла у вакуумі;

ε – ефективна діелектрична проникність підкладки.

Величина керованого зсуву фази буде визначатися похідною:

$$\frac{d\varphi}{d\varepsilon} = \frac{Q\omega}{2\omega_0\sqrt{\varepsilon}} \times \frac{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{Q^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 \sqrt{\varepsilon} + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sqrt{\varepsilon}} \quad (5.3.2)$$

Так як поблизу резонансу $\omega \approx \omega_0$, то:

$$\frac{d\varphi}{d\varepsilon} \approx \frac{Q}{\varepsilon} \quad (5.3.3)$$

У разі узгодженого відрізка МСЛ такої ж довжини l зрушення фази сигналу що пройшов, дорівнює його електричній довжині:

$$\varphi = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda} \quad (5.3.4)$$

де λ – довжина хвилі сигналу в вакуумі

В результаті:

$$\frac{d\phi}{d\varepsilon} \approx \frac{\pi \cdot l}{\lambda \sqrt{\varepsilon}} \quad (5.3.5)$$

а при $\omega \approx \omega_0$ $\lambda \approx 2l \varepsilon$, тому

$$\frac{d\phi}{d\varepsilon} \approx \frac{\pi}{2\varepsilon} \quad (5.3.6)$$

Таким чином, керований зсув фази в умовах резонансу в відрізьку МСЛ приблизно в Q (навантажена добротність резонатора) раз більше, ніж в ідентичному, але узгодженому відрізьку лінії. Теоретичні дослідження розглянутої конструкції фазообертача проводилися в квазістатичному наближенні на моделі дворезонаторного фільтру зі стрибком хвильового опору.

Прямі втрати у всіх випадку не перевищували 1 дБ. Обурення планарної структури, виготовленої раніше, здійснювалося наближенням або віддаленням діелектричної пластини до розімкненим кінців чвертьхвильових резонаторів (рис 5.3.1, 5.3.2).

При вимірюваннях робоча точка вибрана так, щоб при перебудові залишитися в смузі пропускання. Крім заданої центральної частоти f_0 і ширини смуги пропускання Δf за рівнем -3 дБ від рівня мінімальних втрат, задавався максимальний рівень відображень НВЧ потужності. Налаштування робочої смуги фазообертача здійснювалася корекцією довжини і ширини полосових провідників і зазору між резонаторами. Було проведено невелике стандартне налаштування, для зменшення нерівномірності АЧХ в смузі пропускання і зниження рівня відображень НВЧ потужності.

Для оцінки впливу матеріалу обурюючого елемента на величину зміни фази і форми АЧХ були проведені експерименти з допомогою механічної мікропозоціонууючої системи. Експериментальні дослідження з обурюючими

елементами з металів і діелектриків з проникностями 3 – 100 показали, що з підвищенням проникності, ефективність управління зростає. При цьому дія обурюючого елемента з $\epsilon \geq 80$ по впливу практично не відрізняються від металу. Використання металевго обурення елемента показало високу перебудову фази, однак вносило значні зміни в форму АЧХ при перебудові і високі втрати при малих значеннях повітряного зазору між зразком і діелектричної пластиною.

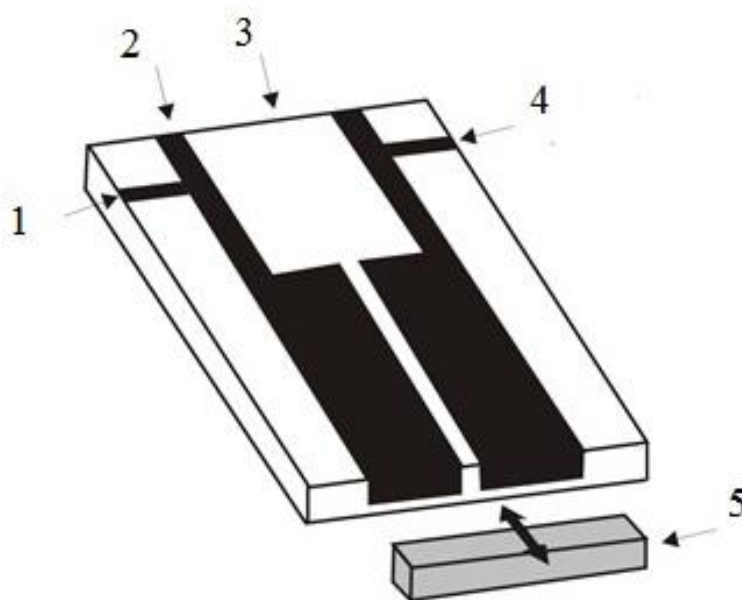


Рисунок 5.3.1 – Зображення схеми керування фазообертача за допомогою діелектричної пластини :

- 1 – вхід електромагнітної хвилі;
- 2 – мікросмужкова лінія;
- 3– діелектрична підкладка;
- 4 – вихід електромагнітної хвилі;
- 5 – збурюючий елемент

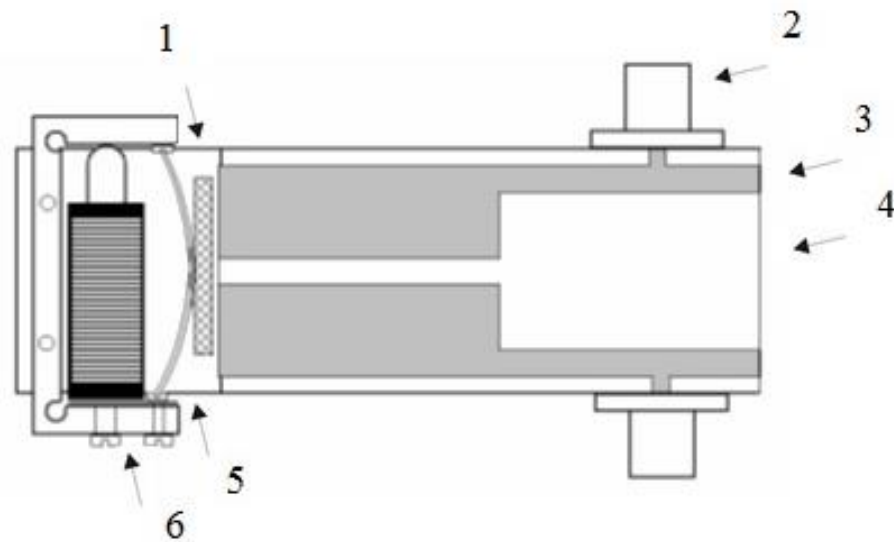


Рисунок 5.3.2 – Креслення фазообертача керованного за допомогою діелектричної пластини:

- 1 – збурюючий елемент;
- 2 – коаксіальний вхід
- 3 – мікросмуужкова лінія;
- 4 – діелектрична підкладка;
- 5 – п'єзочутливий елемент;
- 6 – пристрій регулювання напруги на п'єзочутливому елементі

Таблиця 5.3.1 Вимірянні значення залежності зміни фази від використанного матеріалу керуючого елемента

Керуючий елемент, ϵ	Зміна фази, град
80 (суцільний)	116
80 (з виїмкою)	136
35 (суцільний)	101
метал	153

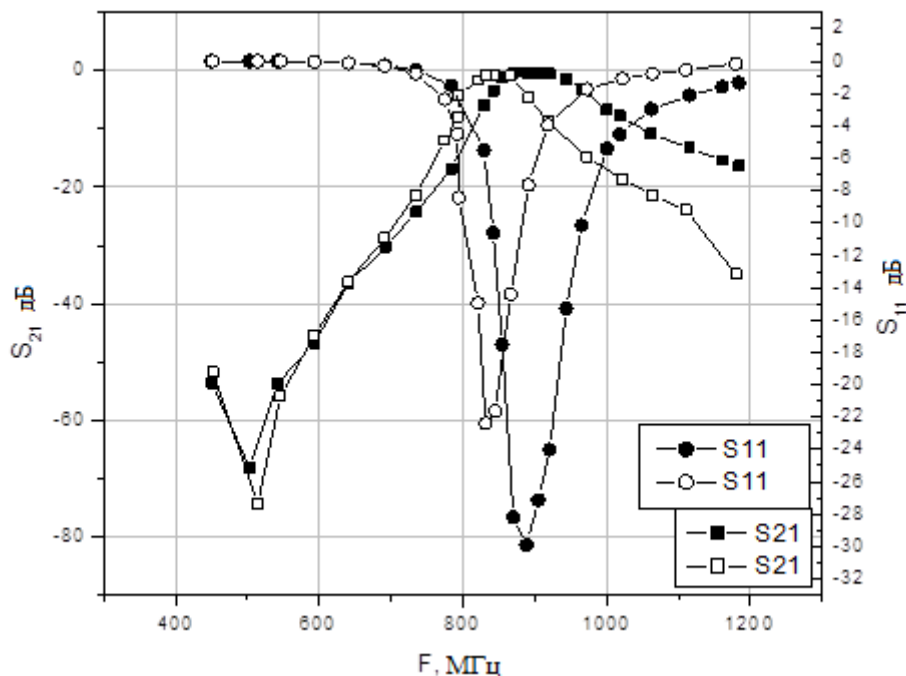


Рисунок 5.3.3 – АЧХ зразка при зміщенні збурюючого елемента від 0(білі мітки) до 200мкм (чорні мітки).

Форма АЧХ практично не змінюється в діапазоні перебудови. Однак ефективна перебудова відбувається при зміні зазору від 0 до 50 мкм. Зміщення середньої частоти фільтра відбувається за тим же законом, що і зміна фази (Рис. 5.3.3). Зворотні втрати так само не змінюються, тобто КСХ (коефіцієнт стоячої хвилі) залишається на одному рівні. Прямі втрати навіть в експериментальному зразку досить малі і незначно зростають зі зменшенням зазору.

Частота низька і збурюючий елемент взаємодіє із зовнішнім полем резонаторів на ділянці близько $1/10 \lambda$ і як наслідок відносно невелика зміна фази (Рис.5.3.4 , 5.3.5).

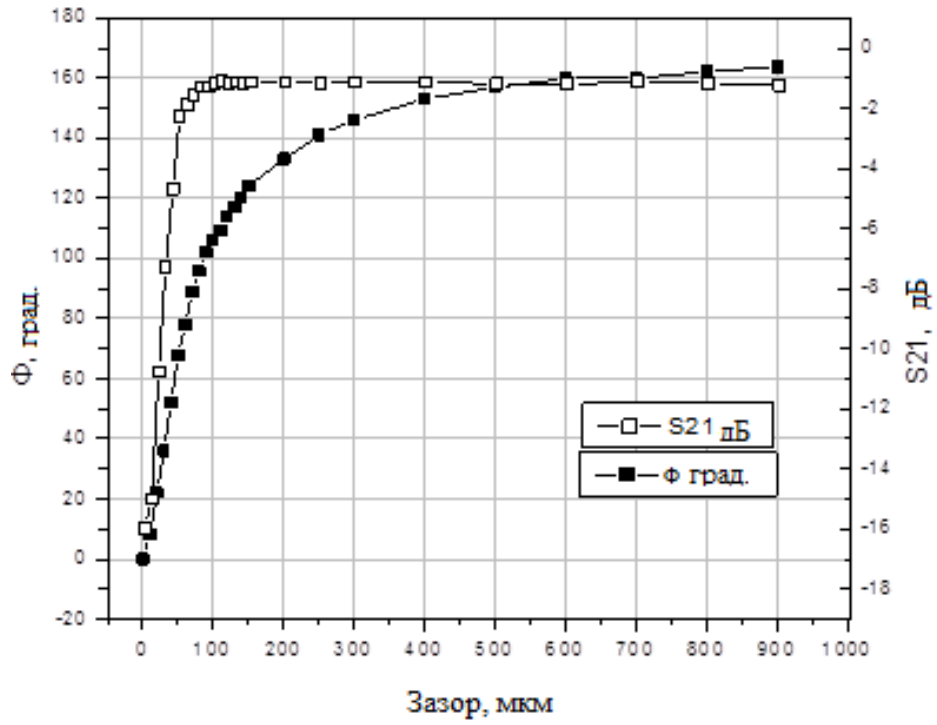


Рисунок 5.3.4 – Фазова характеристика і прямі втрати в діапазоні перебудови фільтра.

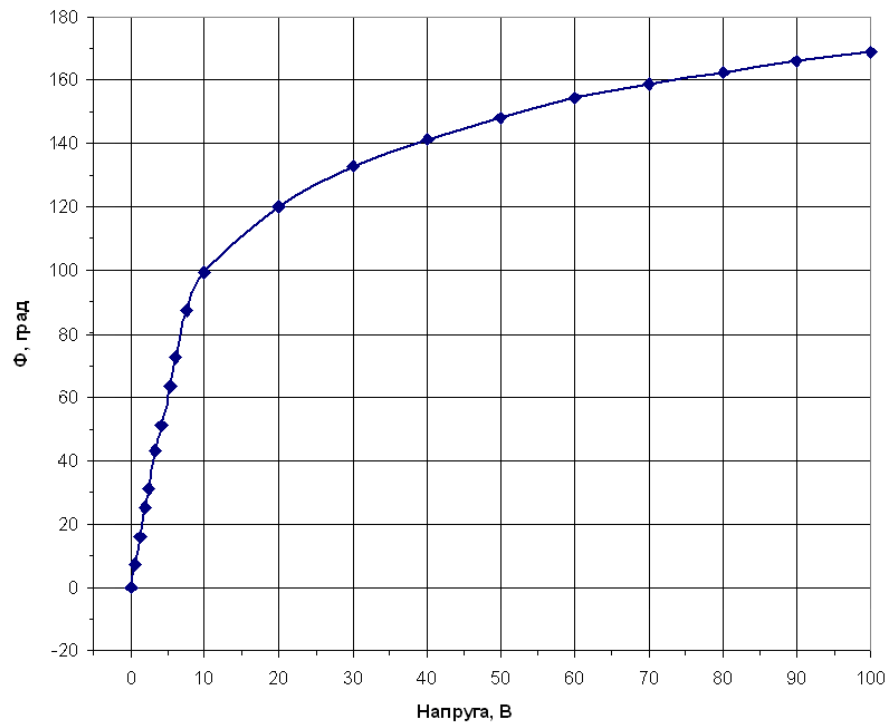


Рисунок 5.3.5 – Характеристика перебудови фази від прикладеної напруги в разі використання в такій конструкції "сymbal" подібного актюатора

Таблиця 5.3.2 Значення втрат в фазообертачі

Матеріал Розміри	Ширина по рівню 3 дБ Не збурений стан, %	Ширина по рівню 3 дБ Збурений стан, %	Прямі втрати дБ	Розмір упр. елемента, $\epsilon=35$	$\Delta\phi$
Полікор 24x15x1	9	6	1	8x3,5x2,5	98

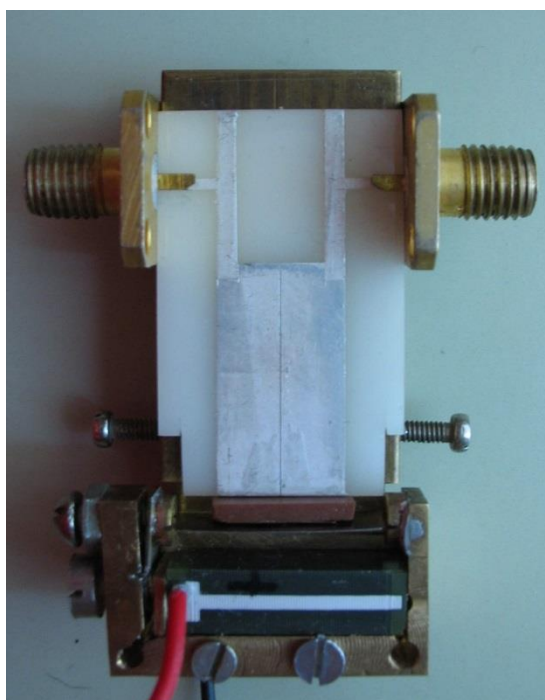


Рисунок 5.3.6 – Конструкція фазообертача на основі фільтра

На даному принципі були створені макети п'єзоелектричних керованих фазообертачів. У даних конструкціях привід і його активний елемент, закорочений по полю НВЧ і розташовується поза зоною взаємодії з керованим елементом, оскільки зона активного збурення, навіть в дециметровому діапазоні довжин хвиль, не перевищує 200 – 250 мкм, тому практично не вносить втрат і не впливає на роботу пристрою.

Висновки по розділу

За використання актюатора «сymbal»-типу досліджувана конструкція прохідного фазообертача резонансного типу дала змогу отримати фазовий зсув майже 2π радіан при зміні керувальної напруга від 0 до 100 В. Форма АЧХ залишалась практично незмінною в усьому діапазоні зміни фази. Найбільша крутизна керуючої характеристики має місце при зміні зазору від 0 до 50 мкм, що відповідає зміні напруги від 0 до 40 В.

6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

6.1 Опис керованого НВЧ фазообертача на основі неоднорідних мікросмушкових ліній

Таблиця 6.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ідея полягає в новій конструкції фазообертача з покращеними характеристиками та вдосконаленою схемою керування.	1. НВЧ техніка для мобільного зв'язку; 2. НВЧ техніка космічного та військового зв'язку.	Покращені характеристики за зниженою ціною, за рахунок використання недорогих матеріалів.

Таблиця 6.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Економічні	170 у.о.	620 у.о.	310 у.о.	450 у.о.			+
2.	Призначення	НВЧ техніка мобільного, космічного та військового	НВЧ техніка мобільного, космічного та військового	НВЧ техніка мобільного, космічного та військового	НВЧ техніка мобільного, космічного та військового		+	

		зв'язку.	о зв'язку.	о зв'язку.	о зв'язку.			
3.	Надійності	Використання надійної високо добротної системи	Використання дорогого, але також надійного обладнання	Використання механічних систем керування	Використання механічних систем керування	+		
4.	Технологічні	Не потребує налаштування після виробництва. Є необхідний алгоритм розрахунку	Потребує налаштування після виробництва. Потребує довгих розрахунків параметрів	Потребує налаштування після виробництва.	Потребує налаштування після виробництва.		+	
5.	Ергономічні	Система зручна в керуванні та налаштуванні	Система зручна в керуванні та налаштуванні	Система зручна в керуванні та налаштуванні	Система зручна в керуванні та налаштуванні		+	
6.	Органолептичні	-	-	-	-		+	
7.	Транспортабельності	Має мініатюрні розміри, може встановлюватись в маленьких корпусах.	Має мініатюрні розміри, але система керування займає приблизно такі розміри, як і сам фазообертач.	Має мініатюрні розміри, але система керування займає приблизно такі розміри, як і сам фазообертач.	Має мініатюрні розміри, але система керування займає приблизно такі розміри, як і сам фазообертач.			+
9.	Екологічнос	-	-	-	-		+	

	ті							
10	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Конкурент 1: НВЧ фазообертач з керуванням за допомогою оптичних систем.

Конкурент 2: НВЧ фазообертач з керуванням за допомогою механічних систем МЕМС.

Конкурент 3: НВЧ фазообертач з керуванням за допомогою варисторних систем.

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 6.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Просте і технологічне керування характеристиками фазообертача.	Планарна технологія мікросужкових ліній.	Наявні, використовуються стандартні методи металізації.	Доступно
		Керуюча схема – однокаскадний підсилювач на біполярному транзисторі.	Наявна добре відпрацьована роками технологія	Доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: однокаскадний підсилювач на біполярному транзисторі.				

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 6.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2870
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає

4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	300

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 6.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Необхідність фільтрувати та змінювати фазу переданого сигналу	Компанії зв'язку, військові, космічні програми.	Поведінку клієнта формують укази держави, де планування та закіпівля подібної апаратури у відповідні установи.	Легкість в керуванні, компактність, надійність.

Таблиця 6.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємким тому потрібні люди з певними навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2.	Потреба в ресурсах	Для створення продукту потрібне технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності	Укладання договорів з державними структурами для фінансування та надання можливостей для тестування продукту

Таблиця 6.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові	Ускладнення структури та функціональної

		продукти, знижувати витрати їх виробництва і вартість	наповненості товару
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій	Рекламна діяльність, просування товару у інтернеті

Таблиця 6.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються випуском НВЧ фазообертачів	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби національний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально; офіси розміщено у різних містах	Створювати веб-сайт компанії
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Слідкувати за продуктами конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж	Продавати товар за низькою ціною.

	конкуренти.	
6. За інтенсивністю - марочна	Боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває брендинг	Реклама товару, створення символіки продукту

Таблиця 6.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	“БЕЛЛА”, “Микран”,	Немає	Товар продається безпосередньо розробникам	Вимоги до якості	Замінників немає
Висновки:	Інтенсивність досить висока, бо продукт є наукоємким і тому не кожна фірма здатна розробити такий продукт	Немає	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним та дешевим	Обмежень немає

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та програмування.

Таблиця 6.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	Продукт має мати зручний механізм керування.
2.	Якість розробки з точки	Продукт має працювати стабільно при помірному

	зору оптимальності показників надійності	зовнішньому тиску, вологості та механічних коливаннях.
3.	Наявність наукових ресурсів	Необхідні кваліфіковані кадри для оптимізації розрахованих даних.
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару не має бути занадто висока, щоб знайти потенційних покупців та сформувати імідж фірми.

Таблиця 6.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з "Electronic eye"						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	15						+	
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	14					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	17				+			
4.	Економічний (ціна товару)	20	+						

Таблиця 6.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: економічна (ціна товару).	Слабкі сторони: ступінь задоволення потреб користувача.
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати якість продукту; формування попиту у користувачів за рахунок рекламної діяльності.	Загрози: потрібно знайти людей з певними навичками і знаннями і запропонувати вигідні умови для співпраці до того як це зроблять конкуренти; технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності продукту.

Таблиця 6.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, створення реклами, взаємодія з органами державної влади для перевірки	90 %	2 роки

	працездатності програмного забезпечення		
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення програмного забезпечення, тестування	70%	3 роки

Обрано альтернативу № 1.

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 6.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні установи	Готові	Високий	Висока	Середня
2.	Приватні підприємства	Готові	Високий	Середня	Середня

Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.

Таблиця 6.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	1	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів (портфеля укладених контрактів на постачання) і	Витрати на виробництво	Стратегія лідерства на витратах

		продуктивності підприємство може досягнути менших витрат		
2.	2	Надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару бути реальною або уявною.	Формування попиту у користувачів за рахунок спеціального функціоналу та високої якості товару	Стратегія диференціації

Обрано стратегію лідерства на витратах.

Таблиця 6.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні	Так	Так, основний функціонал і якісні показники	Наслідкування лідера

Таблиця 6.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)

1.	Електрична розв'язка НВЧ системи зі схемою управління, зменшення впливу однієї на іншу.	Лідерства на витратах.	Низька ціна, просте керування, компактність.	Оптимальне співвідношення ціна/якість, наукоємність, співпраця.
----	---	------------------------	--	---

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 6.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Постота керування та електрична розв'язка	компактність	Використання дешевих матеріалів, висока надійність.

Таблиця 6.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Фазообертач на основі неоднорідних мікросмужкових лініях зі ступінчатою неоднорідністю та керованими характеристиками.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Сумістність с сучасними НВЧ системами.	М	
	2. Низька ціна 150 у.о.	М	
	3. Використання механізму керування	М	
	4. Система зручна в керуванні та налаштуванні.	М	
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія, надання кредиту.		
	Після продажу: монтаж , доставка, обслуговування.		

Таблиця 6.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
-	-	200 – 1000 у.о.	10000 у.о. і вище	100 – 500 у.о.

Таблиця 6.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті компанії або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 6.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Використання товару у цілях фільтрування та зміни фази НВЧ сигналів	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Низька ціна, проста система керування	Поширення відомостей про сервіс, демонстрація солідарності підприємств, безумовного виконання взятих на себе зобов'язань; інформація про	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується на тому чи іншому мотиваційному підході, покликаному впливати на споживчі переваги

				випробування товару і поліпшення його задля споживачів.	покупців - наприклад, функціональну перевагу, задоволення, імідж, захоплення і альтруїзм.
--	--	--	--	---	---

Висновки по розділу

В данному розділі було розглянуто принцип побудови та розроблення стартап проекту для фазообертача НВЧ на основі неоднорідних мікросмушкових ліній.

Отриманий результат є досить непоганим у порівнянні з існуючими конкурентами і тому може впроваджуватись на ринок.

ВИСНОВКИ

1. Для реалізації поставленої задачі було обрано конструкцію прохідного фазообертача резонансного типу з електромеханічним керуванням. Реалізація даного методу є достатньо простою, оскільки на ринку існує велика кількість п'єзоелектричних та електрострикційних актюаторів. Більш доцільним є використання електрострикційних актюаторів, оскільки в них відсутній гістерезис.

2. Для створення НВЧ приладів на основі мікросмужкових ліній найбільш прийнятним матеріалом підкладки є полікор. Він є доступним, відносно дешевим, має діелектричні втрати в НВЧ діапазоні $\text{tg}\delta \approx 8 \cdot 10^{-5}$, достатньо високу діелектричну проникність $\epsilon \approx 9,9$.

3. За використання актюатора «cymbal»-типу досліджувана конструкція прохідного фазообертача резонансного типу дала змогу отримати фазовий зсув майже π радіан при зміні керувальної напруги від 0 до 100 В. Форма АЧХ залишалась майже незмінною в усьому діапазоні зміни фази. Найбільша крутизна керувальної характеристики має місце при зміні зазору від 0 до 50 мкм (діапазон зміни керувальної напруги від 0 до 40 В).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. STI Inc., “A receiver front end for wireless base stations,” *Microwave Journal*, 39, 4, 1996, 116–120.
2. Беляев Б.А., Титов М.М., Тюрнев В.В. Коэффициент связи нерегулярных микрополосковых резонаторов *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2000. Т. 43. № 8. С. 722-727.
3. T.-Y. Yun and K. Chang. A low loss time-delay phase shifter controlled by piezoelectric transducer to perturb microstrip line. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol 10, pp.96-98, Mar. 2000.
4. Полосковая лінії і пристрої надвисоких частот: Под ред. В. М. Седих. - М.: Вища школа, 1974. - 276с.
5. Малорацький Л. Г. Проектування і розрахунок НВЧ елементів на смужкових лініях./ Л. Г. Малорацький, Л. Р. Явич. - М.: Радянське радіо, 1972. - 232 с.
6. В. І. Молчанов, Ю. М. Поплавко: Основи мікрохвильової електроніки. Київ НТУУ «КПІ» 2010. - 79с.
7. J.-S. Hong and M. J. Lancaster, “A novel microwave periodic structure—The ladder microstrip line,” *Microwave and Optical Technology Letters*, 9, July 1995, 207–210.
8. Теория линий передачи сверхвысоких частот: Пер. с англ. /Под ред. А. И. Шпунтова. - М.: Советское радио, 1951. - 258с.
9. R. Garg and I. J. Bahl, “Characteristics of coupled microstrip lines,” *IEEE Trans.*, MTT27, 1979, 700–705.
10. J.-S. Hong and M. J. Lancaster, “Investigation of microstrip pseudo-interdigital bandpass filters using a full-wave electromagnetic simulator,” *Int. J. Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, 7, 3, May 1997, 231–240.
11. А.И.Абраменко, И.И.Бородуленко и др. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в перестраиваемых полупроводниковых генераторах.//Обзоры по электронной технике. Серия 1, вып.5.1988г.

12. Поплавко Ю.М. Физика диэлектриков: учебное пособие для вузов. – 1980, 32-33 с.
13. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике
14. В.И.Молчанов, Ю.И.Якименко, В.М.Пашков О возможности использования пьезоэффекта для управления резонансной частотой твердотельных СВЧ фильтров. // Тез. док. Всесоюзная науч. -тех.конф." Проблемы интегральной электроники СВЧ"- Ленинград,1984,с.156.
15. А.С.№ 1259370,22.05.1986 В.И.Молчанов, Ю.М.Якименко, В.М.Пашков, С.В.Пятчанин, С.А.Селиванов Перестраиваемый СВЧ фильтр.
16. A.V.Willams and F.J.Taylor, Electronic Filter Design Handbook, 3rd ed.- New York: McGraw-Hill, 1995, ch
17. Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. / A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York. - 2001. -pp. 456- 460
18. Д. Б. Халяпин. Коаксиальные и полосковые фильтры сверхвысоких частот.- М.: Связь, 1969. -63с.
19. Seeds A., De Salles A. Optical control of microwave semiconductor devices // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1990. Vol. 38, № 5. P. 577-585.
20. Seeds A. Microwave photonics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, № 3. P. 877-887
21. Диденко Ю.В. Частотные и температурные зависимости диэлектрических потерь в полупроводниках на СВЧ / Ю.В. Диденко // Electronics and Communications. – 2015. – Т. 20. – №3(86). – С. 9–11
22. В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук Резонатори на основі коротко замкнених відрізків неоднорідних ліній із ступінчастою неоднорідністю // Електроніка і зв'язь, Київ, 2002, №16, с. 47-48.
23. Шмыгин Д.А., Татарчук Д.Д., Еременко А.В., Пашков В.М., Молчанов В.И., Поплавко Ю.М. Фильтры на основе линий передач со скачком волнового сопротивления // CriMiKo 2010

24. Беляев Б.А., Титов М.М., Тюрнев В.В. Коэффициент связи нерегулярных микрополосковых резонаторов Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 8. С. 722-727.
25. O.N. Litvinenko, V.I. Soshnikov, Oscillating systems for intermittent lenses, Moscow, Soviet radio, 1971. (in Russian).
26. Randall W. Rhea. HF Filter Design and Computer Simulation. / Noble Publishing, Atlanta. - 1994. - pp. 432 - 434
27. P. Yaghmaee, O. H. Karabey, B. Bates, C. Fumeaux, and R. Jakoby, "Electrically Tuned Microwave Devices Using Liquid Crystal Technology," Int. J. Antennas Propag., pp. 1–9, 2013, DOI: 10.1155/2013/824214.
28. A. S. Nagra, O. Jerphagnon, P. Chavarkar, M. VanBlaricum, and R. A. York, "Bias free optical control of microwave circuits and antennas using improved optically variable capacitors," in 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.00CH37017), 2000, vol. 2, pp. 687–690, DOI: 10.1109/MWSYM.2000.863276.
29. P. R. Herczfield, A. S. Daryoush, V. M. Contarino, A. Rosen, Z. Turski, and A. P. S. Khana, "Optically Controlled Microwave Devices and Circuits," in MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1985, pp. 211–214, DOI: 10.1109/MWSYM.1985.1131943.
30. Z. Vagra, G. Jaro, and T. Berceci, "Optical control of microwave filters using photodiodes," in 10th MICROCOLL Conference, 1999, pp. 299–302.
31. М.С. Сергеев А.А. Сергеева К.С. Мазур, Збірник статей «X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2017» «Перестраиваемый СВЧ фильтр на основе неоднородных микрополосковых линий» - 2017 – С. 215-218.
32. Патент України на корисну модель № 107297 «Комірка на основі напівхвильового мікросмушкового резонатора для вимірювання комплексної діелектричної проникності матеріалів на надвисоких частотах» /Пашков В. М.; Татарчук Д. Д.; Молчанов В. І.; Поплавко Ю. М.; Діденко Ю. В.; Сергеев М. С.

33. Mazur K.S. Filters based on segments of microstrip lines / K.S. Mazur, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, and A.O. Serheieva // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018): Proc. of 38th Int. Sci. Conf. (April 24 – 26, 2018, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2018. – PP. XX – XX.
34. Черний Б.С. Расчет электродинамических характеристик диэлектрических резонаторов с перестройкой частоты диэлектрическими дисками// Изв. вузов СССР. Сер.Радиоэлектроника.- 1980.-N2.- С.60-66.