

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Актуальність теми.

У зв'язку із популяризацією надвисокочастотних (НВЧ) технологій, освоєння НВЧ простору відбувається дуже активно. Однак вже на сьогоднішній день існує проблема освоєння даного простору: дециметровий та сантиметровий діапазони довжин хвиль НВЧ спектру майже повністю вичерпано. Тому необхідно переходити до освоєння міліметрового та субміліметрового діапазону довжин хвиль. На сьогоднішній день тонкі діелектричні резонатори та структури на їх основі є перспективним шляхом розвитку НВЧ пристроїв. Їх розвиток та подальше дослідження можуть бути використані для виготовлення фільтрів НВЧ з покращеними характеристиками, мініатюризація пристроїв НВЧ, поліпшення технологічності виготовлення пристроїв на основі тонких діелектричних резонаторів та структур на їх основі. Впровадження тонких діелектричних резонаторів дозволить вирішити проблему освоєння міліметрового діапазону довжин хвиль НВЧ спектру, що сприятиме подальшому розвитку НВЧ систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота пов'язана з науковими програмами, планами та темами що розроблюються на кафедрі.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 2857-п "Розробка і дослідження частотоселективних структур міліметрового діапазону на основі тонких багатоходових діелектричних резонаторів". Номер держреєстрації 0115U000358.

Мета й завдання дослідження.

Метою даної роботи є розробка частотоселективних структур на основі тонких діелектричних резонаторів. Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Проведення теоретичне та експериментальне дослідження електродинамічних властивостей тонких діелектричних резонаторів
2. Дослідження принципів керування резонансною частотою тонкого діелектричного резонатора
3. Розробка та експериментальне дослідження конструкції частото-селективних структур на основі тонких діелектричних резонаторів

Об'єктом дослідження є складені діелектричні резонатори.

Предмет дослідження є електродинамічні властивості та характеристики складених діелектричних резонаторів

Методика наукових дослідження включає: обчислювальні методи електродинаміки, методи вирішення математичних задач на ЕОМ. Наукова новизна одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів.

Розробка нових частото-селективних структур на основі тонких діелектричних резонаторів, що сприятиме освоєнню міліметрового та субміліметрового діапазону довжин хвиль у НВЧ спектрі.

Особистий внесок здобувача:

- Експериментальне дослідження тонких діелектричних резонаторів та частото-селективних пристроїв на їх основі;
- Виготовлення експериментально-досліджуваних макетів керованих фільтрів НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

Апробація результатів дисертації проводилась у онлайн-конференції та публікації наукової статті. Перелік представлено нижче.

Поправка А.П., Керовані фільтри НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів / А.П. Поправка, Д.Д. Татарчук, Ю.В. Діденко // Міжнародна наукова

інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 28), Тернопіль, ст. 54-58

Поправка А.П., Математичне моделювання конструкцій фільтрів НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів та методи вимірювання їх параметрів / Д.Д. Татарчук, Ю.В. Діденко, А.П. Поправка, К.С. Браге // Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія Математичне моделювання в техніці та технологіях №3, Харків, ст. 12-20

Abstract

Actuality of theme.

Due to the popularization of ultrahigh-frequency (microwave) technologies, the development of microwave space is very active. However, for today there is a problem of development of this space: the decimetre and centimeter ranges of wavelengths of the microwave spectrum are almost completely exhausted. Therefore, it is necessary to proceed to the development of a millimeter and submillimeter wavelength range. To date, thin dielectric resonators and structures on their basis are a promising way of developing microwave devices. Their development and further research can be used for the manufacture of microwave filters with improved characteristics, the miniaturization of microwave devices, and the improvement of the production efficiency of devices based on thin dielectric resonators and structures on their basis. The introduction of thin dielectric resonators will solve the problem of developing a millimeter wave length range of the microwave spectrum, which will contribute to the further development of microwave systems.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes.

The work is connected with the scientific programs, plans and themes that are being developed at the department.

The work was carried out within the framework of the state budget theme № 2857-p "Development and research of frequency-selective structures of the millimeter range on the basis of thin multi-acting dielectric resonators". State registration number 0115U000358.

The purpose and tasks of the study.

The purpose of this work is to develop frequency-selective structures based on thin dielectric resonators. To achieve the goal, you need to accomplish the following tasks:

1. Carrying out a theoretical and experimental study of electrodynamic properties of thin dielectric resonators

2. Investigation of the principles of control of the resonant frequency of a thin dielectric resonator

3. Development and experimental study of the design of frequency-selective structures on the basis of thin dielectric resonators

The object of research is composed dielectric resonators.

Subject of research are electrodynamic properties and characteristics of composite dielectric resonators.

The method of scientific research includes: computational methods of electrodynamics, methods of solving mathematical problems on a computer. Naukova novelty of the obtained results.

The practical value of the results.

Development of new frequency-selective structures on the basis of thin dielectric resonators, which will facilitate the development of the millimeter and sub-millimeter wavelength range in the microwave spectrum.

The applicant's personal contribution:

- Experimental study of thin dielectric resonators and frequency-selective devices on their basis;
- Manufacturing of experimental-researched models of controlled microwave filters on the basis of thin dielectric resonators.

Approbation of the results of the dissertation was carried out in an online conference and publication of a scientific article. The list is shown below.

Popravka A.P., Controlled microwave filters based on thin dielectric resonators / AP Correction, DD Tatarchuk, Yu.V. Didenko // International Scientific Internet Conference "Information Society: Technological, Economic and Technical Aspects of Formation" (Issue 28), Ternopil, art. 54-58

Popravka A.P., Mathematical modeling of constructions of microwave filters on the basis of thin dielectric resonators and methods of measuring their parameters / D.D. Tatarchuk, Yu.V. Didenko, AP Correction, k.s. Brahe // Bulletin of the National Technical University "KhPI", series Mathematical modeling in technology and technologies №3, Kharkiv, art. 12-20

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1: ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ У КОЛАХ НВЧ	13
1.1 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ І КЛАСИФІКАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ.....	13
1.2 ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ РЕЗОНАТОРІВ.....	17
1.3 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ НВЧ-ПРИСТРОЇВ НА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ.....	20
1.4 МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ДР. ПЕРЕБУДОВИ РЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ	22
ВИСНОВКИ О РОЗДІЛУ	27
РОЗДІЛ 2: ОСОБЛИВОСТІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ	28
2.1 ОСОБЛИВОСТІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ	28
2.2 ЧАСТОТОСЕЛЕКТИВНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ.....	37
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ	44
РОЗДІЛ 3: КЕРОВАНІ ФІЛЬТРИ НВЧ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ	46
3.1 ФІЛЬТРИ. ЇХ РІЗНОВИДИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ	46
3.2 КОНСТРУКЦІЇ КЕРОВАНИХ ФІЛЬТРІВ.....	48
3.3 РОЗРАХУНОК ФІЛЬТРУ.....	51
3.3.1 КОНСТРУКЦІЯ.....	51
3.3.2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	53
3.3.3 РЕЗУЛЬТАТИ.....	59

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ	61
РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	62
4.1 ОПИС ІДЕЇ ПРОЕКТУ.....	62
4.2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ІДЕЇ ПРОЕКТУ	64
4.3 АНАЛІЗ РИНКОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАПУСКУ СТАРТАП-ПРОЕКТУ ...	65
4.4 РОЗРОБЛЕННЯ РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ	74
4.5 РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ ПРОГРАМИ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	77
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ	80
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ	— амплітудно-частотна характеристика;
ДР	— діелектричний резонатор;
ЛП	— лінії передач;
НВЧ	— надвисокі частоти;
РФ	— режекторний фільтр;
СПФ	— смуго-пропускний фільтр;
ФВЧ	— фільтр високих частот;
ФНЧ	— фільтр низьких частот;
ХДР	— хвилеводно-діелектричні резонатори;
D	— діаметр циліндричного резонатора;
R	— радіус циліндричного резонатору;
f	— частота;
f_0	— резонансна частота;
φ	— фаза;
Δf	— зміщення частоти;
g	— товщина базової області комбінованого ДР;
h	— товщина області включення;
ε_i	— діелектрична проникність i -тої області;
$\operatorname{tg}\delta_i$	— тангенс кута діелектричних втрат i -тої області;
δ_M	— глибина скінслою;

Q	— добротність
β_{zpl}	— повздовжнє хвильове число i -тої області;
β_{imnp}	— поперечне хвильове число i -тої області в циліндричній системі координат;
$\vec{1}, \vec{1}$	— відповідно електричний і магнітний вектор Герця;
z_0	— імпеданс вільного простору;
W	— енергія накопичена системою;
ω	— циклічна частота;
T_i	— структурний коефіцієнт добротності i -тої області;
A_{ip}^e	— коефіцієнти розкладу у тригонометричний ряд Фур'є для i -тої області
j	— число, що дорівнює $\sqrt{(-1)}$;
J_n	— функція Беселя першого роду n -го порядку;

ВСТУП

Актуальність теми.

У зв'язку із популяризацією надвисокочастотних (НВЧ) технологій, освоєння НВЧ простору відбувається дуже активно. Однак вже на сьогоднішній день існує проблема освоєння даного простору: дециметровий та сантиметровий діапазони довжин хвиль НВЧ спектру майже повністю вичерпано. Тому необхідно переходити до освоєння міліметрового та субміліметрового діапазону довжин хвиль. На сьогоднішній день тонкі діелектричні резонатори та структури на їх основі є перспективним шляхом розвитку НВЧ пристроїв. Їх розвиток та подальше дослідження можуть бути використані для виготовлення фільтрів НВЧ з покращеними характеристиками, мініатюризація пристроїв НВЧ, поліпшення технологічності виготовлення пристроїв на основі тонких діелектричних резонаторів та структур на їх основі. Впровадження тонких діелектричних резонаторів дозволить вирішити проблему освоєння міліметрового діапазону довжин хвиль НВЧ спектру, що сприятиме подальшому розвитку НВЧ систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота пов'язана з науковими програмами, планами та темами що розроблюються на кафедрі.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми № 2857-п "Розробка і дослідження частотоселективних структур міліметрового діапазону на основі тонких багатоходових діелектричних резонаторів". Номер держреєстрації 0115U000358.

Мета й завдання дослідження.

Метою даної роботи є розробка частотоселективних структур на основі тонких діелектричних резонаторів. Для досягнення мети, необхідно виконати наступні задачі:

4. Проведення теоретичне та експериментальне дослідження електродинамічних властивостей тонких діелектричних резонаторів
5. Дослідження принципів керування резонансною частотою тонкого діелектричного резонатора
6. Розробка та експериментальне дослідження конструкції частото-селективних структур на основі тонких діелектричних резонаторів

Об'єктом дослідження є структури .

Предмет дослідження є складені діелектричні резонатори

Методика наукових дослідження включає: обчислювальні методи електродинаміки, методи вирішення математичних задач на ЕОМ. Наукова новизна одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів.

Розробка нових частото-селективних структур на основі тонких діелектричних резонаторів, що сприятиме освоєнню міліметрового та субміліметрового діапазону довжин хвиль у НВЧ спектрі.

Особистий внесок здобувача:

- Експериментальне дослідження тонких діелектричних резонаторів та частото-селективних пристроїв на їх основі;
- Виготовлення експериментально-досліджуваних макетів керованих фільтрів НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

Апробація результатів дисертації проводилась у онлайн-конференції та публікації наукової статті. Перелік представлено нижче.

Поправка А.П., Керовані фільтри НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів / А.П. Поправка, Д.Д. Татарчук, Ю.В. Діденко // Міжнародна наукова

інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 28), Тернопіль, ст. 54-58

РОЗДІЛ 1: ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ У КОЛАХ НВЧ

1.1 Фізичні принципи роботи і класифікація діелектричних резонаторів

Побудова діелектричних частото-виборчих пристроїв базується на використанні резонансних явищ. Вони можуть розглядатися та застосовуватися як в окремих діелектричних зразках [1] так і у відрізках НВЧ ліній передач з діелектричним заповненням [2].

Існує декілька видів класифікації діелектричних резонаторів (ДР). Перший із них базується на фізичних принципах роботи, які в свою чергу базуються на властивостях електромагнітного поля в обмеженій області простору [3]. Таким чином, ДР можна поділити на два класи: відкриті та металодіелектричні.

Другим типом класифікації є класифікація за матеріалами, з яких виготовлений ДР. Згідно даної класифікації, ДР можуть бути виготовленими з однорідного діелектрика (однорідні) або складатися з кількох матеріалів (комбіновані). В залежності від властивостей матеріалу, з якого виготовлено резонатор, його електродинамічні характеристики будуть різними. Так, наприклад, комбіновані ДР використовуються для створення систем із заданими температурними властивостями та створення керованих нелінійних ДР [4].

Третій вид класифікації базується на типі коливань, який використовує ДР. За даною класифікацією ДР поділяють на резонатори з нижчими типами коливань і резонатори з азимутальними коливаннями високого порядку. Нижче приведено порівняльну таблицю двох даних видів ДР.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця ДР, що працюють в режимах збурення нижчих електромагнітних та азимутальних коливань

Вид коливань, що збурює ДР Параметри	Нижчі типи електромагнітних коливань	Азимутальні коливання високого порядку
Діелектрична проникність матеріалів ϵ з яких створюється резонатор:	$\epsilon \geq$ декількох десятків	$\epsilon \leq$ декількох десятків
Наслідки значення ϵ :	Істотне зменшення розмірів ДР; мініатюризація коливальних систем НВЧ.	Малі значення втрат та випромінювання; створення високодобротних коливальних систем сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль.

Слід зазначити, що поблизу ДР існує зовнішнє електромагнітне поле, поява якого зумовлена наявністю межу розділу діелектрик-повітря. Через це елементи НВЧ пристроїв, що знаходяться поруч з резонатором, змінюють параметри самих резонаторів. Так, наприклад, металеві поверхні розміщують поблизу резонаторів для екранування пристроїв, що зумовлює виділення металодіелектричних резонаторів як окремий клас резонаторів. Металодіелектричні резонатори, в свою чергу, поділяються на екрановані ДР, закриті ДР та хвилеводно-діелектричні резонатори (ХДР).

Екрановані діелектричні резонатори: до їх числа відносять ДР, розташовані поблизу металевих поверхонь, таких як лінії передач або екрани. Через вплив металу, добротність та резонансна частота у цих резонаторах змінна та залежить від відстані між діелектричним зразком і металевою поверхнею.

Закриті діелектричні резонатори мають замкнуті металеві поверхні, всередині яких знаходиться діелектричний елемент.

ХДР виготовляють на основі хвильоводів, частково заповнених діелектриком таким чином, що резонансні явища в них зумовлені сукупністю хвильових процесів у хвильоводі та діелектрику [5, 6]. У такі конструкції використовуються зразки з відносно малим значенням діелектричної проникності ($\epsilon < 20$), а розміри підбираються так, щоб у робочому діапазоні частот у зразках ХДР не виник резонанс. Дані зразки деформують структуру електромагнітного поля хвильоводу. Також розрізняють два різновиди ХДР: резонатори з використанням регулярних хвильоводів, що працюють в одному режимі з хвилею основного типу і резонатори на основі поза межних хвильоводів. У першому випадку ХДР будуються з використанням частково заповнених діелектриком хвильоводів стандартних перетинів, тоді як у другому коливальна система утворюється з відрізка поза межного хвильоводу з розташованим усередині нього діелектриком. У першому випадку резонансні явища, що виникають у ХДР, залежать від співвідношення розмірів хвильоводу і діелектрика, орієнтації діелектрика в хвильоводі та його ϵ . У другому випадку їх підбирають таким чином, щоб порушувався режим поза межності хвильоводу на ділянці з діелектриком. Наявність ДР дозволяє реалізувати коливальну систему з характеристиками, прийнятними для широкого ряду застосувань.

Одним із перспективних напрямів розвитку НВЧ коливальних систем є системи з Е-типом коливань. Відмінність цих резонаторів у тому, що на їх поверхню особливим чином нанесено метал. Це робиться для того, щоб створити умови, сприятливі для збудження коливань Е-типу і щоб перешкоджали виникненню коливань Н-типу. Як показали дослідження, структури з Е-типом коливань мають

менші розміри та вагу, більш розріджений частотний спектр та менше зовнішнє поле порівняно з резонаторами Н-типу. Вони легко узгоджуються з НВЧ лініями передачі, при виготовленні цих структур можливе використання планарної технології, мають багаті функціональні можливості з погляду їх використання у НВЧ, що створює можливість для виготовлення у монолітному виконанні схем, які поєднують діелектричні резонатори і активні напівпровідникові прилади [6].

Головною проблемою використання даних структур є те, що вони погіршують добротність схеми. Ця проблема виникає через наявність металевих стінок, проте дослідження показали, що за допомогою вибору конструкції і матеріалів можна зменшити втрати і домогтися задовільного значення добротності для структур з Е-типом коливань, а також пристроїв на їх основі. Нижче приведено рисунок розподілу електричного та магнітного полів в резонаторах циліндричної форми:

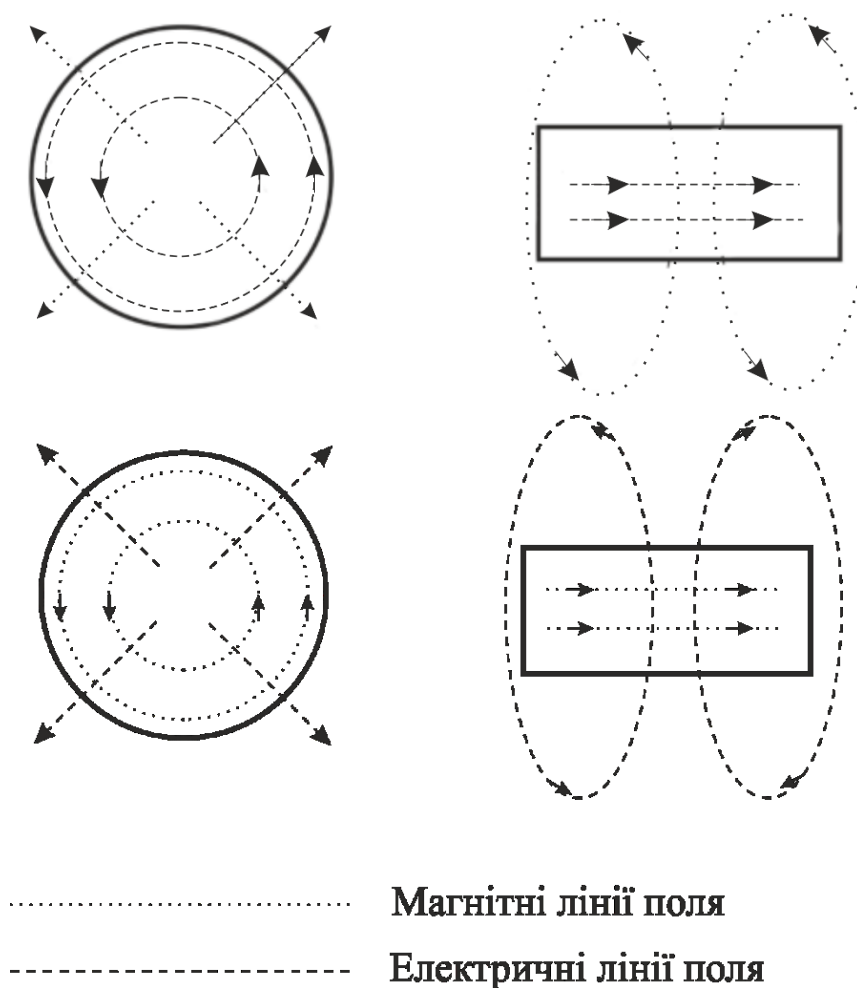


Рис. 1.1 Розподіл електричного та магнітного полів при нижчих коливання Н-типу (а) та Е-типу (б) циліндричних резонаторів

Однак використання традиційних ДР – резонатори, у яких відношення висоти до поперечного перерізу становить більше ніж 0,3 – у міліметровому діапазоні має певні труднощі. Основною проблемою використання даних резонаторів на частотах більше ніж 15 ГГц – це те, що розміри ДР занадто малі для конструкцій, у яких вони використовуються. Наприклад, при частоті 30 ГГц розмір резонатора у 2-3 рази менший, ніж розмір підлаштувального елементу. Тому, проведені раніше дослідження [7] показали, що перспективним шляхом розвитку НВЧ систем, працюючих на частоті понад 15 ГГц є використання тонких діелектричних резонаторів. Тонким вважається резонатору, у якого відношення висоти до поперечного перерізу (L/D) знаходить в межах від 0,1 до 0,04. За рахунок того, що висота такого ДР дуже мала, його поперечні розміри можуть бути відносно великими, що дозволяє вирішити проблему відношення розмірів резонатора до інших елементів системи. Також слід зазначити, що виготовити тонкий ДР можна на основі товстоплівкових технологій, що дозволяє суттєво зменшити його вартість. Також перспективним шляхом розвитку тонких резонаторів є можливість їх використання у вимірювання параметрів тонких плівок у НВЧ діапазоні.

1.2 Основні вимоги до матеріалів резонаторів

Для виготовлення якісного ДР необхідне виконання певних вимог до матеріалів, із яких даний ДР виготовляють. Тому для діелектриків пред'являють наступні вимоги: низькі діелектричні втрати ($\operatorname{tg}\delta \leq 10^{-3}$); висока діелектрична проникність ($\epsilon_0 = 300 \dots 2000$); високі електрична та механічна міцність; висока стабільність електричних параметрів в широкому інтервалі температур; висока однорідність структури та відтворюваність електричних характеристик; стабільність властивостей при взаємодії різноманітних зовнішніх факторів; низька собівартість, доступність сировини і матеріалів, технологічність [4].

Основними параметрами ДР, як відомо, являються власна добротність Q_d , резонансна частота f_0 , температурний коефіцієнт частоти та добротності, а також об'єм. Усі ці параметри визначаються властивостями діелектрика. До цих властивостей відносяться: діелектрична проникність ϵ_0 , тангенс діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$, температурний коефіцієнт діелектричної проникності $TK \epsilon_0$, тангенсом кута діелектричних втрат $TK \operatorname{tg}\delta$, а також температурним коефіцієнтом лінійного розширення α .

Об'єм резонатора V визначає як величину ϵ_0 і, відповідно, можливість мініатюризації ДР. Чим менше значення ϵ_0 тим менший об'єм резонатора бо, як відомо, чим менше значення довжини електромагнітної хвилі у діелектрику тим менше значення розміру резонатора, а отже, и значення об'єму. Також при збільшенні значення ϵ_0 знижуються додаткові втрати на випромінювання в оточуюче середовище. Однак якщо значення ϵ_0 стає дуже великим, то починають виникати технологічні труднощі у виготовленні резонатора. Дані труднощі пов'язані із підвищеними вимогами до допустимих лінійних розмірів резонаторів та якості обробки їх поверхні. Оптимальне ж значення величини ϵ_0 напряду пов'язано із діапазоном робочих частот, типом коливань і від вимог до оптимальних розмірів ДР. Оптимальні значення величини ϵ_0 залежно від діапазону частот приведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Оптимальні значення величини ϵ_0 залежно від діапазону частот

Діапазон частот, $ГГц$	1–2	2–4	4–8	8–18	18–40
ϵ_0	2000–1000	1000–500	500–250	250–100	100–50

Найважливішою вимогою до діелектрику є вимога до низького значення діелектричних втрат, які визначають величину добротності Q_d .

До значного зниження добротності можуть привести механічні напруги, що виникають поблизу структурних дефектів кристалу, таких як чужорідні металічні та газові вкраплення, скол кристалу. Подібні напруги призводять до затухання електромагнітних коливань в ДР, що погано впливає на власну добротність контуру.

Стабільність параметрів ДР також залежить від $TK\epsilon_0$ та $TK \operatorname{tg} \delta$ так як зовнішня стабілізація НВЧ приладів являється небажаною. Нормальними значення даних параметрів структури вважаються значення $TK\epsilon_0 = 10^{-6} \dots 10^{-7} \operatorname{град}^{-1}$ та $TK \operatorname{tg} \delta = 10^{-4} \dots 10^{-5} \operatorname{град}^{-1}$. Однак отримати матеріали, які будуть мати високі показники $TK\epsilon_0$ та $TK \operatorname{tg} \delta$ досить важко, особливо для НВЧ-діапазону. Проблема виникає через те, що у НВЧ-діапазоні можливе використання лише швидких процесів поляризації, а звичайні методи зміни електрофізичних властивостей призводять до діелектричних втрат. Електронна та іонна поляризація дозволяють отримати високе значення поляризованості майже без поглинання електромагнітної енергії на частотах 1–100 ГГц. Інші ж процеси поляризації призводять до суттєвих втрат.

На сьогоднішній день досить популярними стали резонатори, виготовлені на основі керамічних матеріалів які є дешевшими та технологічнішими ніж монокристали. На їх основі можна отримати прилади з високими конструктивно-технологічними характеристиками, які мають високу надійність роботи до та після впливу на них зовнішніх кліматичних та механічних факторів. Окрім того, виготовлення резонатори із керамічних діелектриків можливе шляхом пресування без додаткової механічної обробки, що знижує вартість керамічних ДР.

Розробки останніх років дозволяють отримувати керамічні діелектрики які мають задані характеристики. Так, наприклад, методом осадження компонентів можна отримати діелектрики з добре відтворюваними властивостями, а методом гарячого пресування — з дуже низьким значенням пористості, однорідну, оптично прозору кераміку.

1.3 Основні принципи реалізації НВЧ-пристроїв на діелектричних резонаторах

На сьогоднішній день пристрої на ДР можуть бути розділені на два різновиди. Перший включає в себе використання ДР у зв'язку з додатковими елементами, а другий — використання лише ДР. На основі першого різновиду створюються цілі модулі НВЧ-апаратури (частотні детектори, різноманітні фільтри та перетворювачі частот). Другий же різновид дозволяє отримати сповільнюючі лінії передач, фазочастотні коректори та частотні дискримінатори.

Як ми можемо бачити, діелектричні резонатори досить широко використовуються у НВЧ-пристроях. Така популярність їх використання викликана унікальними властивостями ДР такими як: малі габарити і маса, висока добротність, стійкість до різних дестабілізуючих впливів, надійність та довговічність. Однак найбільш широко ДР резонатори використовуються саме у фільтрах. Основні типи фільтрів у яких використовуються ДР це смуго-пропускні та режекторні фільтри.

Загальний принцип побудови смуго-пропускного фільтру базується на використанні вхідної і вихідної лінії передач (ЛП), зв'язок між якими забезпечується внаслідок перевипромінення енергії ДР [8]. Від зв'язку вхідного і вихідного резонаторів в ЛП також забезпечується потрібна форма амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтру. Також від нього залежать і внесені фільтром втрати. Основні конструкції смуго-пропускних фільтрів можна розділити на дві групи: фільтри із соосним і фільтри із планарним розташуванням ДР в екрані. Особливість перших в тому, що вони забезпечують сильний взаємний зв'язок між резонаторами та має мінімальні втрати в екрані. Перевага ж планарного фільтру зв'язана із простотою реалізації потрібно структури та зв'язків між ДР та мікрополосковими НВЧ-пристроями.

Загальний принцип побудови режекторних фільтрів базується на використанні електромагнітного зв'язку одного або кількох ДР із ЛП. При побудові фільтру потрібно забезпечити близькі до оптимальних параметри зв'язку кожного з

резонаторів із ЛП, виходячи з заданого ослаблення сигналу на центральній частоті смуги загородження. Одночасно потрібне мінімальне ослаблення поза цією смугою. Завдяки малим розмірам і наявності зовнішніх полів ДР необхідні АЧХ фільтра створюються введенням ДР у поле регулярної ЛП. Підвищення частотної виборності фільтра досягають шляхом збільшення числа використовуваних ДР [9], або за рахунок використання ДР із виродженими ортогональними коливаннями, збудженими із зміщенням по фазі на 90° [10].

ДР знайшли широке практичне застосування не тільки в філтах НВЧ а й широко використовуються в твердотільних НВЧ-генераторах, які можна умовно поділити на 5 класів:

1. Генератори, у яких діелектрик використовується як зовнішній стабілізуючий резонатор, включений у вхідну лінію генератора;
2. Генератори, побудовані на одноконтурній схемі стабілізації частоти;
3. Генератори, у яких ДР є термокомпенсуючим елементом активного контуру генератора;
4. Генератори, у яких ДР виконує функцію резонансного елементу паралельного зворотного зв'язку;
5. Генератори, у яких ДР використовується як основний контур.

За останні роки були практично реалізовані передумови створення нового класу частотно-виборчих структур на основі ДР. У результаті розвитку теорії ДР, принципів побудови нових видів твердотільних функціональних вузлів і пристроїв, створення і промислового освоєння нових високодобротних і термостабільних діелектричних матеріалів встановлено, що ДР мають перспективу широкого практичного застосування в техніці НВЧ.

Функціональні можливості ДР можуть бути істотно розширені, якщо вдасться розв'язати задачу перебудови їх резонансних частот при збереженні добротності і

термостабільності системи. Однозначного вирішення цієї задачі поки що немає, а запропоновані способи перебудови дозволяють керувати резонансною частотою тільки в невеликих межах [11]. Це керування може бути реалізовано різними способами, серед яких виділяють: механічний, електричний, магнітний, електромеханічний.

1.4 Методи керування параметрами ДР. Перебудови резонансних частот діелектричних резонаторів

На сьогоднішній день існує велика кількість методів керування параметрами ДР. Їх можна умовно розділити на 4 типи:

1. Пристрої з механічним керуванням параметрами;
2. Пристрої з електромеханічним керуванням параметрами;
3. Пристрої з електричним керуванням параметрами;
4. Пристрої з комбінованим керуванням параметрами.

Також існують інші види керування параметрами фільтрів, наприклад:

- Магнітне керування на основі включення феритових матеріалів;
- Магнітне керування на основі гіромагнітного резонатору;
- Оптичне керування на основі напівпровідникових керуючих елементів;
- Інші види керування.

Розглянемо більш детально методи керування параметрами.

1. Механічне керування параметрами може здійснюватися наступними методами:

1.1 Переміщення в полі ДР металічних нерезонансних керуючих елементів;

1.2 Переміщення в полі ДР діелектричних нерезонансних керуючих елементів;

1.3 Взаємне переміщення частин ДР;

1.4 Переміщення в полі ДР інших резонансних систем.

Пристрої на основі механічного керування дозволяють здійснювати керування параметрами в широкому діапазоні частот (10–25%). Однак через потребу великої кількості взаємних механічних переміщень частин резонатора, обмежується швидкодія таких систем, що, в свою чергу, обмежує їх застосування в техніці НВЧ.

2. Електромеханічне керування параметрами здійснюється наступними методами:

2.1 Використання електромеханічного керуючого елемента в ролі актюатора;

2.2 Використання електромеханічного керуючого елемента в ролі багатофункціонального пристрою.

При електричних керуваннях параметрами використовують сегнетоелектричні, феритові та напівпровідникові елементи. Їх наявність дозволяє отримати керування частотою порядку 10%, однак значно знижує добротність ДР.

3. Електричне керування параметрами здійснюється за допомогою таких методів:

3.1 Керування на основі зосереджених напівпровідникових елементів;

3.2 Керування на основі розподілених напівпровідникових елементів;

3.3 Керування на основі використання нелінійних діелектриків.

Електромеханічне керування поєднує у собі недоліки двох попередніх методів керування.

Комбіноване керування включає в себе можливість використання всіх наведених вище методів в одній системі.

На сьогоднішній день відомі високодобротні п'єзоелектричні способи керування частотою через використання систем, що мають невелику чутливість резонансної частоти до взаємних переміщень її елементів один відносно одного. Вони мають невеликий діапазон зміни частот, невисоку швидкодію, вимагають високих керуючих напруг і ефективні лише в міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль [12].

Перебудови резонансних частот у ДР може відбуватися наступними методами: механічне перебудови частот, електричне, магнітне, електромеханічне та перебудови на основі п'єзоелектричних матеріалів. Розглянемо більш детально кожен із видів перебудови.

Так, наприклад, на основі збурення зовнішнього поля ДР відбувається механічна перебудова резонансної частоти коливань. Збурення поля викликається рухомими нерезонансними елементами, що вносяться у контур ДР або переміщенням частини комбінованого резонатора чи інших частин у коливній системі. В якості нерезонансних елементів використовують тонкі гвинти, які дозволяють змінювати діапазон перебудови у межах 2–3%, або металеві чи діелектричні шайби та пластинки, які в свою чергу дозволяють збільшити діапазон до, приблизно, 10%.

На відміну від механічного перебудови, електричні способи застосовують нелінійні діелектрики, зосереджені або розподілені напівпровідникові елементи в якості ДР.

На основі електричного перебудови була створена система, яка забезпечила невелике електричне підстроювання частоти за допомогою плівкового елемента з нелінійного діелектрика [13]. Конструкція складається із комбінованої резонансної структури з лінійного діелектрика, має малий $\text{tg}\delta$ і високе значення ϵ , що не залежить від напруженості електричного поля та плівки параелектрика, нанесеного

на підложку з низьким значенням діелектричної проникності. Електричне поле, що прикладене до плівки впливає на її електрофізичні параметри, що призводить до зміни характеристик всієї резонансної структури. Якщо ж нанести на поверхню багат шарової діелектричної структури планарні металеві електроди, то система стане зв'язаною, у якій в якості ДР буде виступати щілина резонатора. Перебудови двох зв'язаних коливних систем відбувається при зміні керуючої напруги. Низькодобротне колювання однієї із систем змінює резонансну частоту майже на 25–30%. Друге (високодобротне) — всього на 3-5% при зменшенні добротності в 5..10 разів.

Також можливе включення напівпровідникових керуючих елементів для здійснення електричного перебудови частоти у ДР. За допомогою такого методу можливе досягнення високого діапазону перебудови частоти ДР при низьких керуючих напругах. Наприклад, підключення варакторного діоду до металізованих електродів кільцевого ДР із радіальною щілиною [14] дозволяє керувати частотою у діапазоні до 10%. Недоліком такого методу є те, що добротність подібної структури складає лише декілька сотень. Подібне підключення до напівкільцевого резонатора дозволяє змінити діапазон перебудови до 20-25%, однак добротність подібної структури зміниться на цілий порядок [4]. При зменшенні зв'язку ДР із напівпровідниковим елементом збільшиться значення добротності, але тоді зменшується діапазон перебудови.

Також можливе використання напівпровідникового елемента у системі, зв'язаній із ДР структурою. У таких структурах основним фактором, що впливає на діапазон перебудови є величина коефіцієнту зв'язку ДР із відрізком мікрополосової лінії.

Для збільшення діапазону перебудови при збереженні добротності можна використовувати коливальну систему, у якій варакторні діоди включені в розриви металевих кільць, установлених над ДР [15]. Однак, діапазон перебудови обмежений тим, що перебудови стає причиною значного зниження добротності ДР.

Отже, за допомогою електрично керованих елементів можливе досягнення високої швидкодії і малу потужність керування при значному погіршенні добротності у різних конструкціях ДР.

Також керування резонансною частотою у ДР можна здійснювати за допомогою феритових матеріалів, які знаходяться поряд із діелектричними елементами. Однак використання феритових матеріалів можливе за умову розташування фериту у зазорі магнітної системи, яка створює керуюче магнітне поле. Даний метод використовується при слабких магнітних полях так як внаслідок зміни магнітної проникності фериту змінюється резонансна частота кобінованого ферито-дуелектричного резонатора. Існує декілька різновидів подібних структур. Так в одних використовують кільцеві резонатори, у яких центр заповнений полікристалічним феритом, а поле прикладене по дотичній до торцевої поверхні ДР. Центр резонатора являється областю максимальної напруженості магнітного поля, отже ферит впливає не тільки на частоту перебудови, а й на добротність коливальної системи. Добротність такої структури сильно залежить від співвідношення об'ємів фериту та дієлектрика: при зменшенні об'єму фериту добротність зростає при одночасному зменшенні діапазону перебудови частоти.

В інших же конструкціях ДР із магнітним перебудовим резонансною частоти використовують кільцевий резонатор із розрашований всередині нього гіромагнітним резонатором із монокристалу фериту. Якщо ж замість кільця використовувати два циліндричних резонатори з розашованим між ними гіромагнітним резонатором, то отримаємо зв'язану коливальну систему, у якій відбувається перебудови частоти резонансу при відповідності області частот підмагнічування частотам феромагнітного резонансу. У такому випадку діапазон перебудови частот залежить від співвідношення між лінійними розмірами діелектричних та гіромагнітного резонаторів.

В останні роки досить популярним стало використання ДР на основі п'єзоелектричних матеріалів [16]. Даний спосіб керування здійснюється шляхом переміщення елементів за допомогою деформації п'єзоелементу, керованого

зовнішньою електричною напругою. Даною спосіб є одним із найперспективнішим через збереження високого значення добротності при перестроюванні частот у смузі не менше 10%. Перевагами таких систем є електрична розв'язка між входом та виходом, висока радіаційна стійкість, стійкість до впливу зовнішнього середовища, низька собівартість, простий керуючий пристрій, можливість узгодження з аналоговими та цифровими електронними пристроями. Даний метод перебудови є ефективним на частотах, що перевищують поріг в 20 ГГц.

Висновки о розділу

Численні досліді, проведені за останні роки, показали, що використання тонких ДР являється перспективним шляхом розвитку приладів НВЧ. В залежності від параметрів матеріалів, які використовуються при виготовленні ДР та способу керування параметрами системи можливе отримання приладів НВЧ з високим значення перестроювання резонансних частот при малому зменшенні добротності.

РОЗДІЛ 2: ОСОБЛИВОСТІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ

2.1 Особливості тонких діелектричних резонаторів

Як було зазначено у розділі 1, діелектричні резонатори вже давно широко використовуються у НВЧ техніці, та, особливо, при створенні керуючих пристроїв НВЧ. Вони дозволили значно зменшити розміри пристроїв, що позитивно позначилося на подальшу дослідженні діелектричних резонаторів. Однак через великий попит, дециметровий та сантиметровий діапазони НВЧ спектру майже себе вичерпали. Тому освоєння міліметрового та субміліметрового діапазону НВЧ спектру на сьогоднішні день є пріоритетним завданням.

Для освоєння нових частотних ресурсів необхідно розроблення та впровадження нових комунікаційних пристроїв. Дослідження [11] показали, що для освоєння міліметрових діапазонів довжин хвиль можна ефективно використовувати комбіновані діелектричні резонатори. Однак розробка їх моделей займає багато часу, а високі керуючі напруги та наявність гістерезису для створення частото-селективних пристроїв підводить до думки, що потрібно шукати нові матеріали та пристрої для покращення характеристик резонансних систем.

Використання ж традиційних резонаторів у міліметровому та субміліметровому діапазоні (на частотах понад 15 ГГц) являється ускладненим через занадто малі розміри, що значно ускладнює налаштування необхідної частоти. Вирішити дану проблему можливо шляхом використання тонких діелектричних резонаторів.

Тонким називають резонатор, у якого відношення висоти до поперечного розрізу (L/D) знаходиться у межах від 0,1 до 0,04. Такі резонатори внаслідок малої висоти можуть мати достатньо великі значення поперечних розрізів, розрахованих на ту саму резонансну частоту, що й класичні ДР. Перелічені особливості роблять використання тонких діелектричних резонаторів перспективним шляхом розвитку для освоєння міліметрового діапазону довжин хвиль. Також перевагою тонких ДР є

те, що їх можна виготовити на основі товстоплівкових технологій та можливість використання обраних резонаторів для вимірювання параметрів тонких плівок у НВЧ діапазоні.

Резонансні системи на основі тонких діелектричних резонаторів можна математично описати за допомогою системи рівнянь Гельмгольца (2.1) та граничних умов (2.2).

$$\begin{aligned}\nabla^2 \Gamma_i^e + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^e &= 0; \\ \nabla^2 \Gamma_i^m + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^m &= 0\end{aligned}\tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}n \times (E_i - E_j) &= 0; \\ n \bullet (E_i \varepsilon_i - E_j \varepsilon_j) &= \rho_{cs}; \\ n \times (H_i - H_j) &= j_s; \\ n \bullet (H_i \mu_i - H_j \mu_j) &= 0.\end{aligned}\tag{2.2}$$

де $\vec{\Gamma}^e, \vec{\Gamma}^m$ – електричний і магнітний вектори Герца відповідно, ε_i – діелектрична проникність i -ої області резонансної системи, μ_i – магнітна проникність i -ої області резонатора, k – хвильовий вектор, n – вектор нормалі до межі розділу областей, E – вектор електричного поля, H – вектор магнітного поля, j_s – нормальна до межі поділу областей компонента густини струму, ρ_{cs} – поверхнева густина заряду на межі поділу областей.

Вирішити дану систему можливо засобами ЕОМ використовуючи метод скінченних елементів. Більш детально розв’язок даної системи розглянемо у розділі 3.

Експериментальне дослідження властивосте тонкого діелектричного резонатора можна проводити як у хвильоводах (рисунк 2.1), так і у спеціальних вимірювальних комірках (рисунк 2.2)

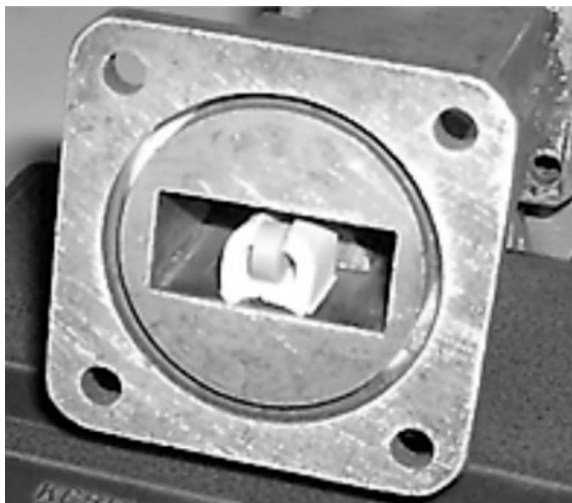


Рисунок 2.1 – Розміщення досліджуваного зразка у хвилеводі



Рисунок 2.2 – Розміщення досліджуваного зразка у вимірювальній комірці

Проведені дослідження показали, що тонкі та надтонкі ДР можна виділити в окрему групу за ознакою взаємного розміщення мод резонатора на частотній шкалі.

Для діелектричних резонаторів з відношенням $(L/D)=0,3$ при строго симетричній орієнтації діелектричного резонатора відносно стінок екрану, ТЕ-мода являється найнижчою, а наступною за нею іде ЕН-мода. Однак у тонких резонаторів взаємне розміщення мод може змінюватися в залежності від великої кількості факторів, таких як:

- Властивості матеріалу;
- Геометрія діелектричного резонатора;
- Орієнтація резонатора відносно електромагнітних збуджуючих полів;
- Кут падіння електромагнітної хвилі.

Так як резонансна частота ТЕ-моді із зменшенням висоти резонатора зростає значно швидше ніж частоти гібридних НЕ та ЕН мод, то ключовими стають залежність висоти ДР до поперечних розмірів і орієнтація резонаторів відносно збуджуючих електромагнітних полів. Дана залежність показана на рисунку 2.3

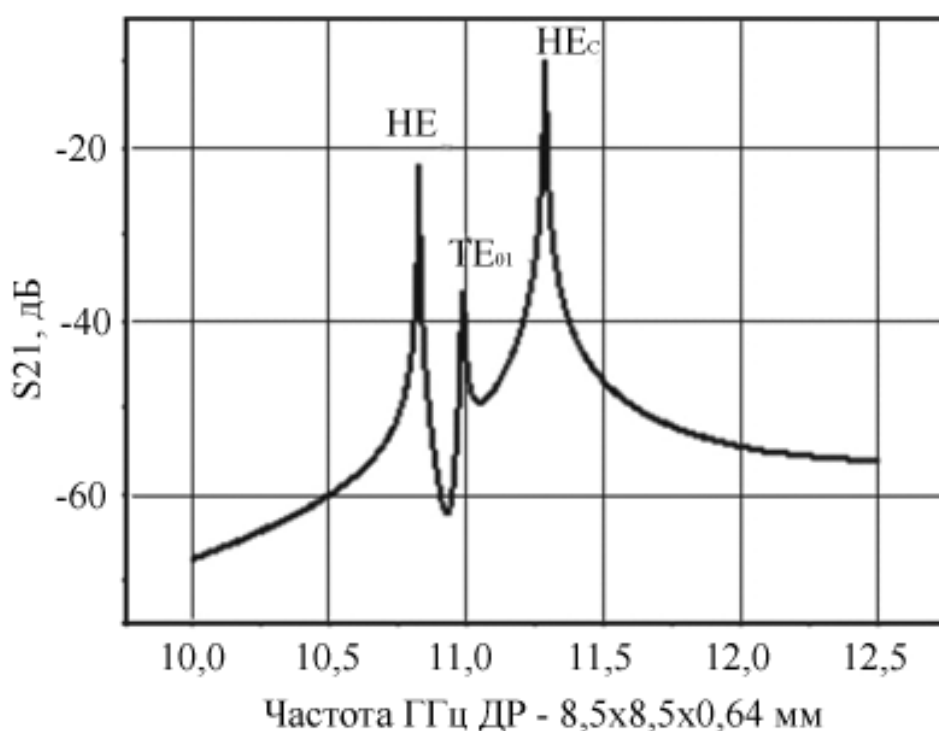


Рисунок 2.3 – Типовий спектр тонкого діелектричного резонатора

Як можна побачити на рисунку, у тонких ДР є схильність до згущення спектру власних резонансних частот. Однак при правильному підборі кутів нахилу ДР до стінок хвилеводу та підбору резонатора правильних розмірів, можна скомпенсувати щільність розташування мод тонкого ДР. Також у результаті досліджень було виявлено, що графік залежності відношення висоти до поперечних розмірів, при яких НЕ мода стає нижчою по частоті, від проникності матеріалу діелектричного

резонатора. Дослідження проводилися у спеціальній вимірювальній комірці розміром 25x12 мм. Результати даного вимірювання показані на рисунку 2.4

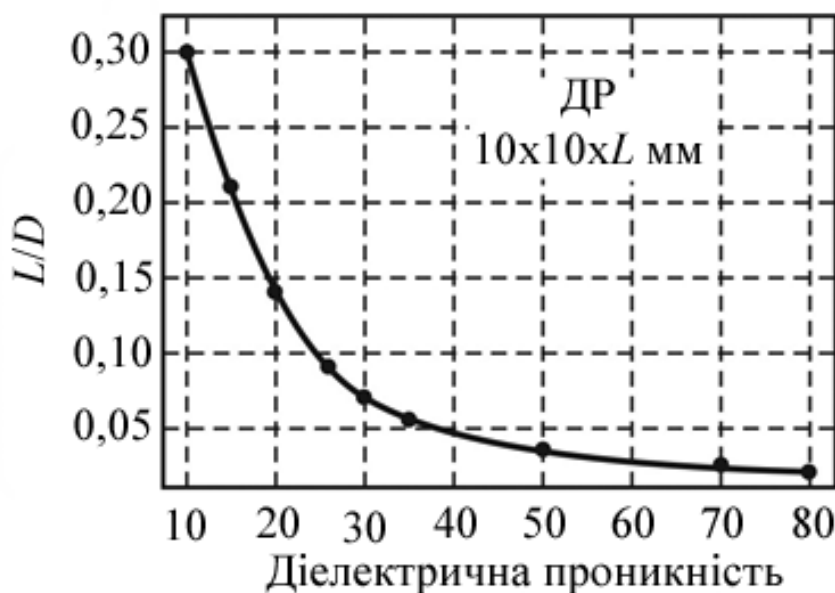


Рисунок 2.4 – Графік залежності відношення висоти до поперечних розмірів, при яких НЕ мода стає нижчою по частоті, від проникності матеріалу діелектричного резонатора, розміщеного у спеціалізованій циліндричній комірці розміром 25x12 мм

В даному випадку тонкий діелектричний резонатор з поперечним перетином 10x10xL мм був розміщений на кварцовій опорі у циліндричному екрані розмірами 25x12 мм,. Аналогічна залежність має місце і при розміщенні тонкого ДР у прямокутному хвилеводі.

Як вже згадувалося раніше, при використанні числових методів розрахунку, похибка становить не більше 1-2%. Однак математичний розрахунок потребує значних затрат часу та ресурсів від ЕОМ. Тому біло вирішено використовувати спрощену модель наближеного розрахунку резонансної частоти тонкого ДР.

Для діелектричних резонаторів з $L/D > 0,3$ отримати наближену формулу для розрахунку досить просто. Це пов'язане з тим, що залежність резонансних частот від відношення висоти діелектричного резонатора до його поперечних розмірів, при різних значеннях діелектричної проникності практично паралельно. Однак для

тонкого ДР отримати вираз таким способом неможливо через те, що залежність резонансної частоти від відношення висоти резонатора до його поперечних розмірів у малих областях L/D , мають різний кут нахилу, який збільшується із збільшенням діелектричної проникності. Залежність продемонстровано на рисунку 2.5.

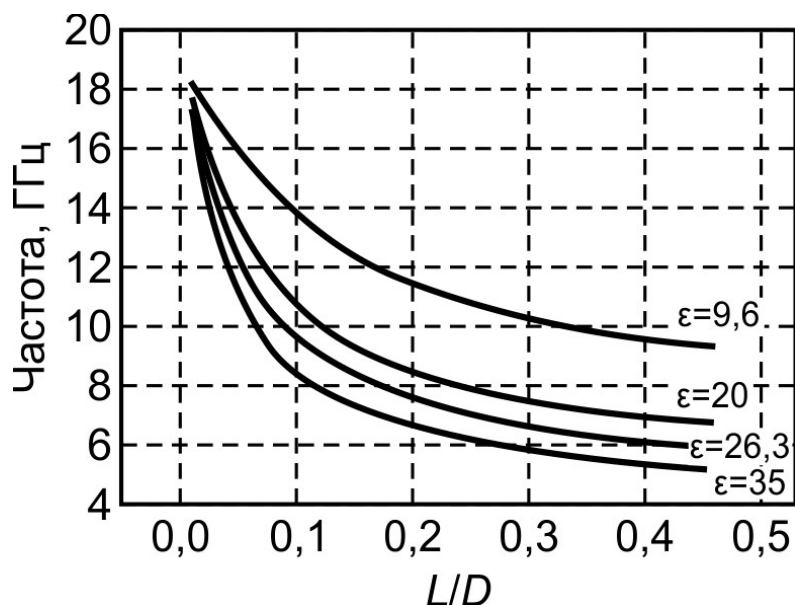


Рисунок 2.5 – Графік залежності резонансної частоти від співвідношення висоти діелектричного резонатора до його поперечних розмірів при різних значеннях діелектричної проникності

Тому, беручи до уваги обмеженість номенклатури діелектричної проникності діелектриків НВЧ, що використовуються у промисловості, можна апроксимувати результати з рисунка 2.5 та отримати наближену формулу розрахунку резонансної частоти:

$$f_r = \frac{0,96C}{4\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{3,83}{\sqrt{D^3}}\right)^L + \left(\frac{3,83}{\sqrt{D^3}L}\right)^{0,5}} \quad (2.3)$$

де C – константа, яка залежить від діелектричної проникності, форми резонатора і типу коливань;

L – висота резонатора;

D – узагальнений поперечний розмір (для циліндричного резонатора D – це діаметр, а для прямокутного резонатора його можна обчислити з наступного виразу):

$$D = \frac{4,81ab}{\pi\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (2.4)$$

де a, b – поперечні розміри прямокутного резонатора. Даний вираз при розрахунку частоти дає для квадратного резонатора похибку $\sim 1\%$. Для прямокутного резонатора похибка дещо більша.

Подібне наближення дозволяє оцінити можливе положення власної резонансної частоти для тонкого діелектричного резонатора без значних затрат часу. Також вираз дозволяє визначити початкове наближення для збільшення швидкості і точності розрахунку.

На рис. 2.6 зображені розрахована та визначена експериментально залежності резонансної частоти від L/D для діелектричного резонатора, виготовленого з промислової кераміки на основі Al_2O_3 ($\epsilon=9,6$), розмірами $10 \times 10 \times L$ мм, розміщеного у циліндричній комірці. Як видно з рисунку, розрахунок добре узгоджується з експериментальними даними, що про адекватність наведених виразів.

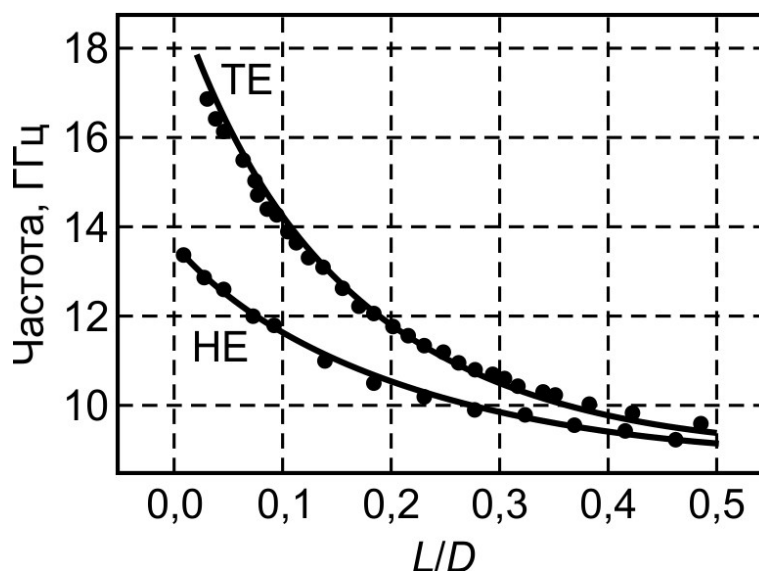


Рисунок 2.6 – Розрахункові і експериментальні залежності $f_r(L, D)$ для тонкого ДР, виготовленого з промислової кераміки на основі Al_2O_3

На рис. 2.7 наведено аналогічну залежність резонансної частоти нижчої ТЕ-моди для тонкого діелектричного резонатора, виготовленого з промислової кераміки ТЦ35 ($\text{BaTi}_4\text{O}_9 + \text{ZnO}$) $\epsilon=35$. Як видно з рисунка і в цьому випадку також має місце добре узгодження теоретичних і експериментальних результатів. Таким чином, в перспективі на основі отриманих співвідношень може бути розроблено метод вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів та методика розрахунку частотоселективних пристроїв НВЧ на основі тонкого діелектричного резонатора.

Вище було вказано на те, що у тонких діелектричних резонаторах внаслідок відмінності фазових швидкостей різних мод, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) і фазочастотна характеристика (ФЧХ) суттєво залежать від його орієнтації відносно збуджуючих полів і кутів падіння електромагнітної хвилі на межу розділу повітря-резонатор.

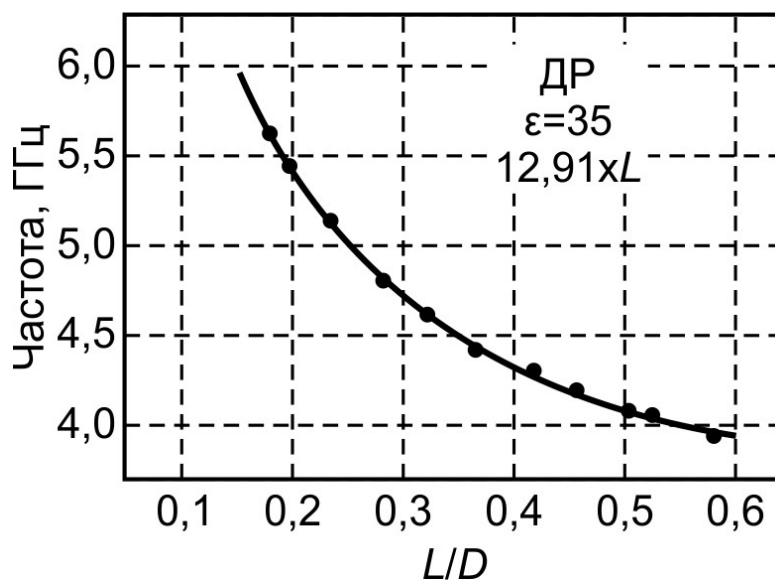


Рисунок 2.7 – Розрахункова і експериментальна залежність $f_r(L, D)$ для тонкого ДР, виготовленого з промислової кераміки на ТЦ35($\text{BaTi}_4\text{O}_9 + \text{ZnO}$) $\epsilon=35$

Оскільки вказана властивість може бути корисна з точки зору створення частотноселективних пристроїв НВЧ (в тому числі електричнокерованих) на основі тонких ДР, в роботі було досліджено залежності резонансних частот НЕ- і ТЕ-мод від кутів повороту резонатора відносно стінок хвилеводу. При цьому було розглянуто два випадки: поворот резонатора відносно широкої стінки хвилеводу у площині XY (кут β рис. 2.8) і поворот відносно широкої стінки хвилеводу у площині XZ (кут α , рис. 2.9) [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

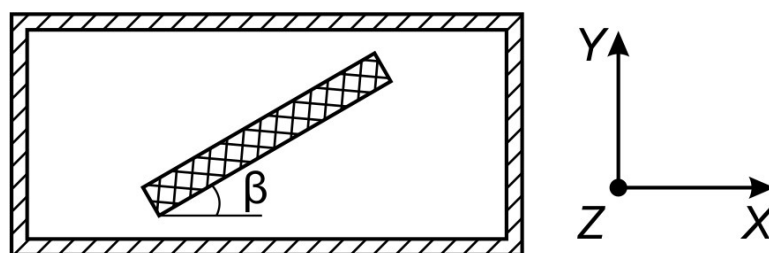


Рисунок 2.8 – Поворот резонатора відносно широкої стінки хвилеводу у площині XY (кут β)

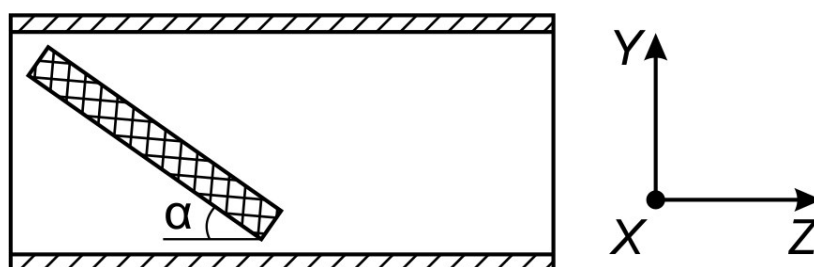


Рисунок 2.9 – Поворот резонатора відносно широкої стінки хвилеводу у площині XZ (кут α)

Отримані результати числового моделювання та експериментального дослідження наведено на рис. 2.10 і 2.11.

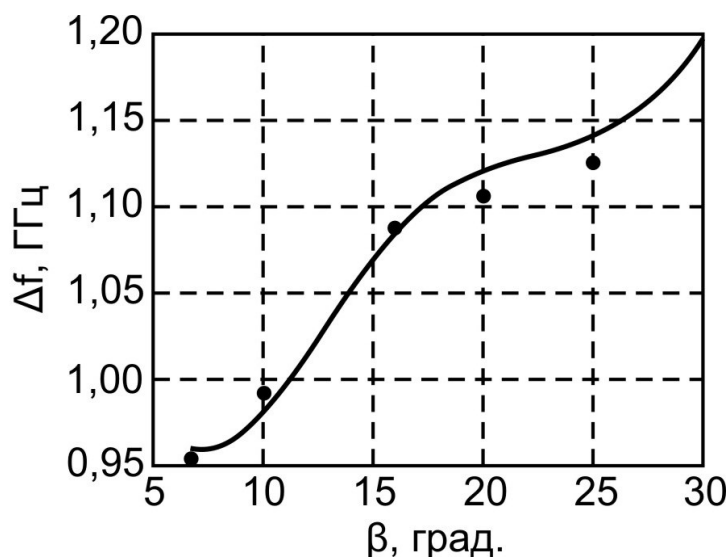
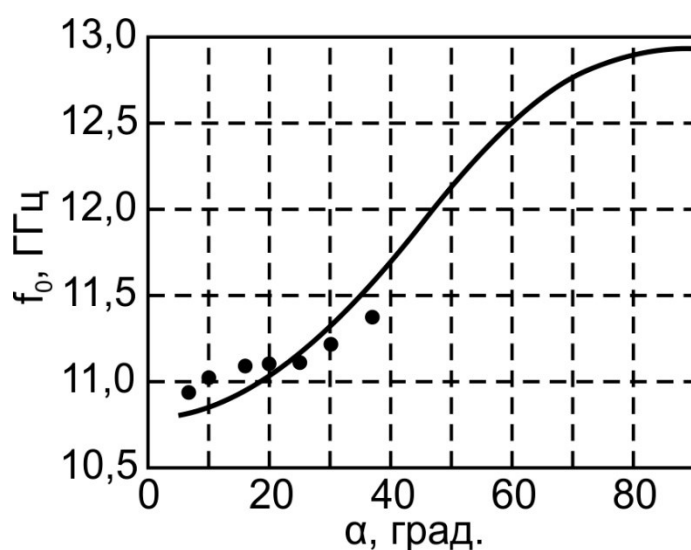


Рисунок 2.10 – Графік залежності різниці між резонансними частотами нижчих НЕ-и ТЕ-мод від кута повороту циліндричного резонатора у площині ХУ ($\epsilon = 35$, $D = 12,8$ мм, $L = 0,63$ мм)



квадратний резонатор ($\epsilon = 35$, $a = 9,9$ мм, $b = 9,9$ мм, $L = 2,48$ мм);

Рисунок 2.11 – Графік залежності резонансної частоти нижчої НЕ-моди від кута повороту резонатора в площині ХZ

2.2 Частотоселективні пристрої на основі тонких діелектричних резонаторів

На сьогоднішній день, опанування міліметрового діапазону довжин хвиль значно ускладнене. Однак зі зростання попиту на використання області НВЧ

спектру, освоєння даного діапазону просто необхідна. Тому в останні роки велику увагу приділяють проблемі створення пристроїв міліметрового діапазону. Такими приладами являються фільтри, фазообертачі, атенюатори. Також перспективним напрямком розвитку приладів міліметрового діапазону на напівпровідникових структурах [17, 18, 19]. Така зацікавленість пов'язана зі спробами створити інтегральні напівпровідникові структури, що включають у себе лінію передач НВЧ сигналу та елементи, що забезпечують керування сигналом. Прикладом такого елемента може служити $p-i-n$ діод (рисунку 2.12)

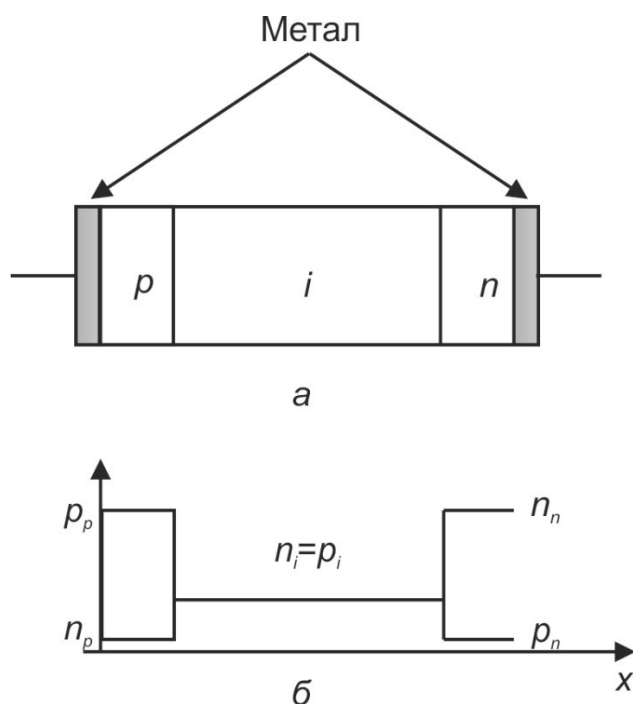


Рисунок 2.12 – Зображення структури ідеального $p-i-n$ діода (а) та розподіл носіїв заряду в областях $p-i-n$ діода (б)

У схематичному зображенні на рисунку 2.12, а можна виділити 5 основних областей:

- Легована область p
- Легована область n
- Область власного напівпровідника i
- Металеві контакти

У зв'язку з тим, що кремній у НВЧ діапазоні має високий питомий опір ($2,3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), низькі втрати (0,0006...0,0025) та достатньо високу діелектричну проникність (11,6), у ньому можливе збудження резонансних електромагнітних хвиль міліметрового діапазону. Якщо розглядати дані структури зі сторони їх характеристик та взаємодії з електромагнітним полем, р-і-п діоди можна розглядати як тонкі діелектричні резонатори. При визначенні НВЧ властивостей діодів перевірялися їх резонансні характеристики у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Щоб перевірити дані характеристики, необхідно розрахувати резонансні частоти і добротності типових кремнієвих р-і-п діодів. Після математичного розрахунку, необхідно перевірити на практиці достовірність отриманих результатів. Порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень були зведені у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Експериментальні та розраховані результати дослідження резонансної частоти і добротності кремнієвих р-і-п діодів з прямокутним перерізом.

Поперечні розміри, мм	Товщин а, мкм	Мода	Частота f_0 , ГГц		Добротність Q_0	
			Теорія	Експеримент	Теорія	Експеримент
2,4×1,3	≈250	E ₂₁₀	61,86	63,2	301	320
1,3×1,3	≈250	E ₂₁₀	69,1	66,7	330	310
2,4×1,2	≈250	E ₂₁₀	64,2	68,3	274	315
1,4×1,4	≈250	E ₂₁₀	65,1	63,1	294	350
0,8×0,8	≈250	E ₁₁₀	62,81	68,2	390	360

АЧХ типового кремнієвого р-і-п діода наведено на рисунку 2.13.

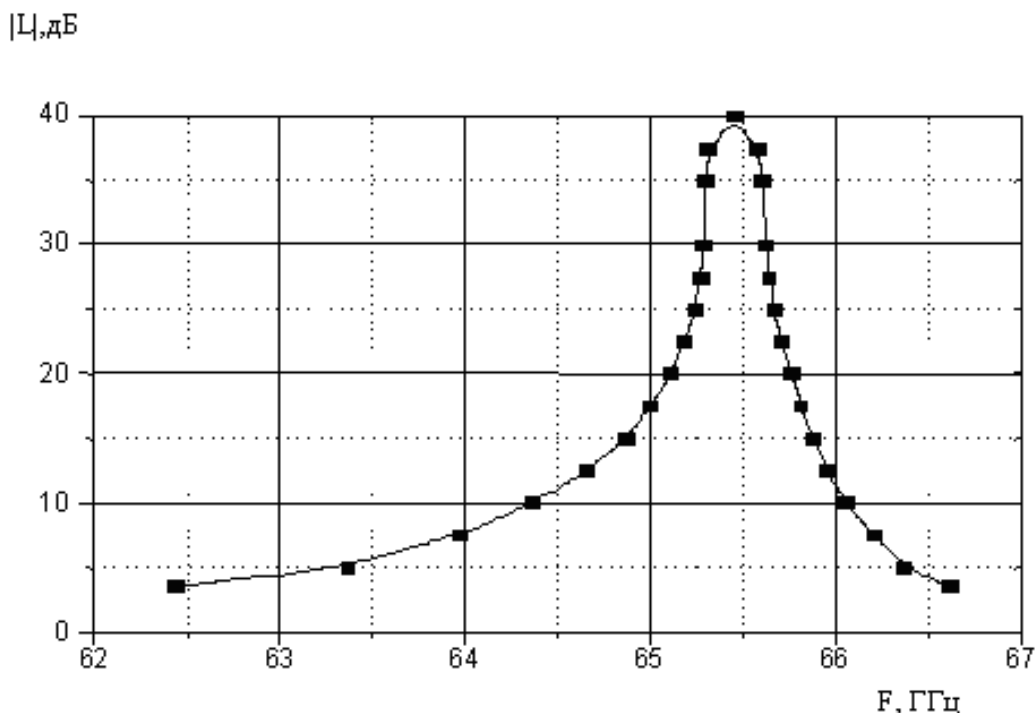


Рисунок 2.13 – АЧХ типового кремнієвого р-і-п діода прямокутної форми.

Як видно з рисунку 2.13 на основі р-і-п діода можна виготовити, розглядаючи його у ролі резонатора, можна створювати фільтри міліметрового діапазону довжин хвиль. Беручи до уваги АЧХ типового кремнієвого р-і-п діода, можна зробити висновок, що для розширення смуги пропускання у смуго-загороджувальному фільтрі можна використати декілька діодів.

Так, наприклад, було досліджено смуго-загороджувальний фільтр, виконаний на основі 2-х р-і-п діодів, які були розташовані паралельно широкій стінці у хвилеводі прямокутної форми. АЧХ дослідженого фільтру показано на рисунку 2.14. Розміри використаних діодів – $1,3 \times 2,4 \text{ мм}^2$.

Однак використовувати р-і-п діоди можна не тільки у звичайних фільтрах НВЧ а й у керованих. Використовуючи залежність НВЧ діелектричних резонаторних властивостей р-і-п діодів від керуючого струму, що пропускається через них, можна побудувати електрокеровані фільтри з дискретним перемиканням частот.

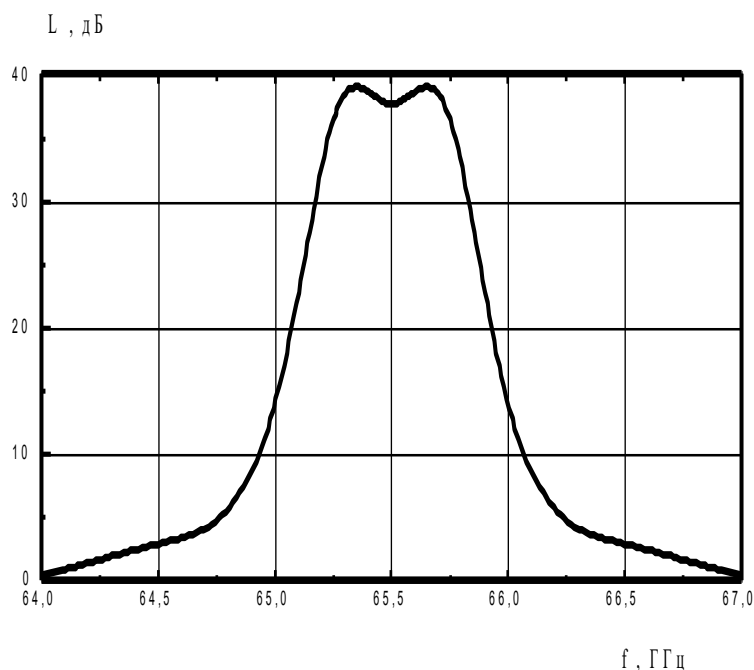


Рисунок 2.14 – АЧХ дворезонаторного хвильоводного фільтру на основі двох р-і-п діодів.

Для реалізації даної концепції необхідно розмістити у хвильоводі декілька незв'язаних р-і-п діодів з різними резонансними характеристиками, і пропустити через них прямий струм. Через збільшення витрат резонанс у діоді подавляється при пропусканні струму певної величини (рисунок 2.15) відкривається можливість здійснювати дискретне керування частотою системи знімаючи струм з р-і-п діода, що має задану резонансну частоту.

Для прикладу на рис. 2.16 наведено АЧХ двох резонаторного фільтру з дискретним керуванням. Пунктиром показано характеристики системи, у випадку коли керуючий струм подано лише на один із діодів, а суцільною лінією зображено АЧХ системи, коли керуючий струм на кожному із діодів рівний нулю.

Однак використовувати таку конструкцію на практиці складно. В першу чергу перешкодою у використанні подібних конструкцій є різке зменшення добротності системи при способі підвести керуючий струм до р-і-п структури. Через це є доцільним використання щільової лінії.

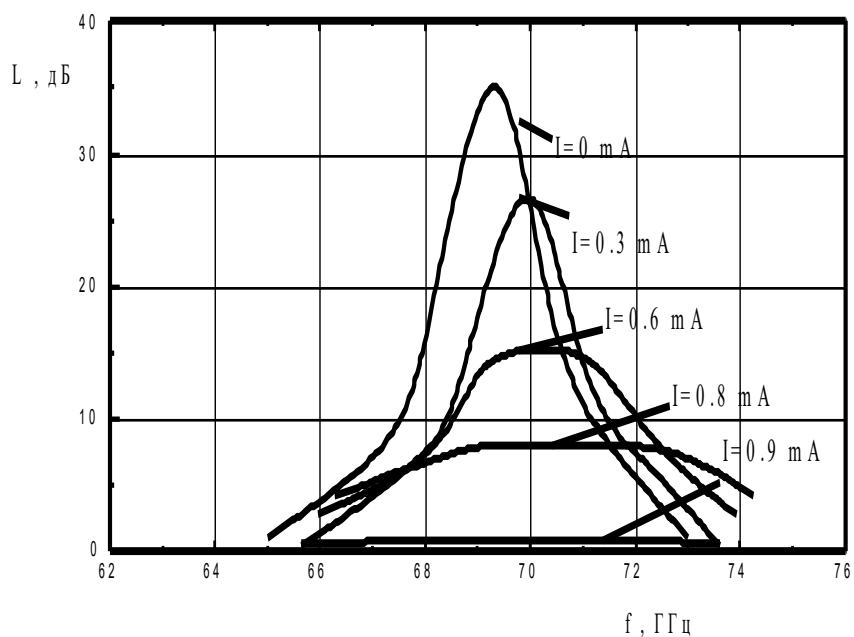


Рисунок 2.15 – АЧХ кремнієвого р-і-п діода квадратної форми при різних значеннях керуючої напругою

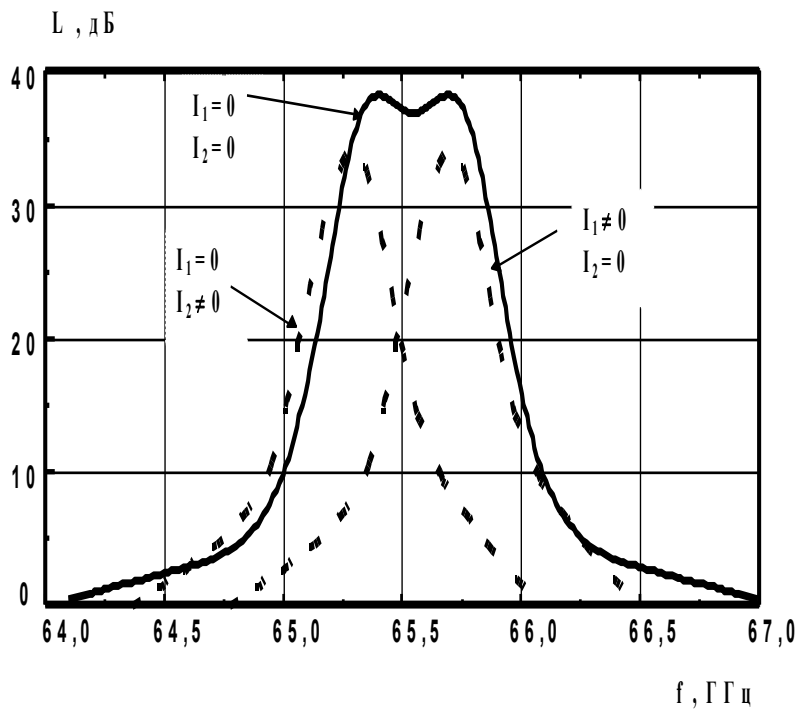


Рисунок 2.16 – АЧХ дворезонаторного керованого фільтра на р-і-п - діодах прямокутної форми, виготовлених з кремнію

Поле в такій лінії сконцентровано в основному поблизу ребер, тому є можливість розмістити струмопровідні шини таким чином, щоб їх вплив на добротність системи був незначний. Для того, щоб забезпечити збудження резонатора його необхідно розмістити на одному із ребер поблизу щілини таким чином, щоб площа інжектуючих контактів була паралельна Е-площині хвилеводу.

Останнім часом значна увага приділяється структурам на основі відрізків позамежних хвилеводів з прямокутними та циліндричними резонаторами, вісь симетрії яких перпендикулярна широкій стінці хвилеводу. Це пов'язано з тим, що в таких структурах легко збуджуються коливання $E_{01\delta}$, які є перспективними для реалізації фільтрів з вузькою смугою.

Такі фільтри мають ряд переваг перед звичайними хвилеводними фільтрами :

- більш розріджений спектр;
- потенційно більш широкий діапазон перестроювання частоти при зміні місцеположення резонатора або за рахунок введення додаткових регулюючих елементів.

Тому досить цікавим є створення таких фільтрів на основі напівпровідникових тонких ДР, оскільки використання напівпровідникових елементів в таких конструкціях може значно збільшити їх функціональні можливості. Особливо це стосується створення на основі таких резонансних систем фільтрів з електричним керуванням.

Оскільки р-і-п – структура у НВЧ діапазоні виявляє властивості діелектричного резонатора, то на її основі можна реалізувати не тільки фільтри, але й інші резонансні пристрої і в тому числі фазообертачі. На відміну від традиційних схем фазообертачів на основі р-і-п- діодів, в яких використовується перемикання в площині діода хвильового опору від нескінченності до нуля, в нашому випадку використовується залежність діелектричної проникності резонансного і- шару від концентрації інжекттованих носіїв. Концентрація інжекттованих носіїв з одного боку впливає на діелектричну проникність, а з іншого боку суттєво впливає на добротність резонатора. Внаслідок невеликої варіації діелектричної проникності

змінюється стала розповсюдження, а відповідно і фаза сигналу. Це дозволяє реалізувати фазообертач із плавним регулюванням фази. Така конструкція може бути реалізована, як на основі прямокутного хвильоводу, так і на основі щільової лінії. Однак з вищевказаних причин конструкція на щільовій лінії має кращі характеристики.

На жаль втрати в вищеописаних конструкціях дуже залежать від якості збірки і якості самої лінії передачі. При створенні макетів для закріплення резонаторів на ребрі було використано клей БФ-2, струмопровідний провідник припаювався за допомогою припою, що містить олово. В результаті втрати внесені в лінію передачі становили 1 дБ, в той час як втрати внесені самим резонатором були не більше 0.5 децибела. Це дає змогу вважати, що при відповідному рівні технології виготовлення в реальних конструкціях можна добитися, щоб рівень втрат при використанні таких структур був незначним.

Крім того слід зауважити, що добротність самого резонатора можна поліпшити за рахунок нижчеперелічених факторів:

Використання більш високодобротних матеріалів.

Використання для створення контактів металів з більшою провідністю (алюміній, мідь, срібло), що призведе до зменшення втрат в металі (в досліджуваних зразках для контактів було використано золото).

Висновки до розділу

Проведені дослідження показали, що тонкі та надтонкі ДР можна виділити в окрему групу за ознакою взаємного розміщення мод резонатора на частотній шкалі за рахунок особливостей тонких діелектричних резонаторів. У тонких ДР можуть збуджуватися коливання Е-типу, Н-типу, а також гібридні моди. Резонансні частоти такої структури суттєво залежать від різноманітних факторів, таких як: властивості матеріалу, геометрія діелектричного резонатора, орієнтація резонатора відносно електромагнітних збуджуючих полів, кут падіння електромагнітної хвилі. Добротність систем побудованих на основі тонких діелектричних резонаторів достатньо висока для їх практичного використання.

На основі напівпровідникових тонких діелектричних резонаторів можна реалізувати фільтри з електронним керуванням резонансною частотою.

РОЗДІЛ 3: КЕРОВАНІ ФІЛЬТРИ НВЧ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ

3.1 Фільтри. Їх різновиди, характеристики та використання

В електроніці фільтри призначені для виділення або затримки певної частини спектру електричного сигналу. Існує різноманітна класифікація фільтрів. Так, наприклад, за методом обробки сигналів виділяють наступні пари фільтрів:

- Аналогові або цифрові;
- Пасивні або активні;
- Лінійні або нелінійні;
- Рекурсивні та нерекурсивні фільтри.

Серед рекурсивних фільтрів, у свою чергу, виділяють фільтри Чебишева, Бесселя, Баттерворта та еліптичні фільтри.

В залежності від того, які частоти фільтр пропускає або затримує, фільтри поділяють на фільтри низьких частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ), смуго-пропускні фільтри (СПФ), смуго-загороджувальні, або їх ще називають режекторні фільтри (РФ) а фазові фільтри.

Кожен з типів фільтрів призначений для роботи на певних частотах та має своє застосування.

Так, наприклад, фільтр низьких частот призначений для ефективного пропускання частот, що будуть менше за певне значення, яке називається частотою зрізу. Ідеальний ФНЧ повністю подавляє всю частоти, зо вище частоти зрізу, а частоти менші за неї пропускає без змін. Однак ідеальний фільтр не може бути реалізований через наявність перехідної зони між полозою пропускання та полозою затримки, хоча в теорії її не існує. Тому ідеальний ФНЧ можливий лише в теорії та

отримуються за допомогою множення вхідного сигналу на прямокутну функцію в частотній області.

Навідміну від ФНЧ, фільтри високих частот призначені для пропускання часто, які більше за значення частоти зрізу. Як і у випадку з ідеальним ФНЧ, ідеальних фільтрів високих частот не існує.

Смуго-пропускні фільтри призначені для пропускання певної полоси частот та характеризуються нижньою та верхньою частотою зрізу в ідеальному випадку, а у загальному — нижньою границею частоти пропускання, верхньою границею частоти пропускання, нижньою границею полоси затримки та верхньою границею полоси затримки. Також даний вид фільтрів характеризується максимальним та мінімальним придушенням у полосі пропускання.

Режекторний фільтри є протилежністю до смуго-пропускного фільтру та служить для того, щоб не пропускати певну смугу частот і пропускати частоти, які не потрапляють у дану смугу. Характеризується даний вид фільтрів, як і СПФ нижньою границею частоти пропускання, верхньою границею частоти пропускання, нижньою границею полоси затримки та верхньою границею полоси затримки. РФ, призначений для придушення однієї певної частоти називають вузькосмуговим загороджувальним фільтром.

На рисунку 3.1 представлена АЧХ усіх 4 видів фільтрів, представлених вище.

ДР широко використовуються у фільтрах без перебудови частот, однак дослідження показали, що можливе використання тонких ДР для створення керованих фільтрів.

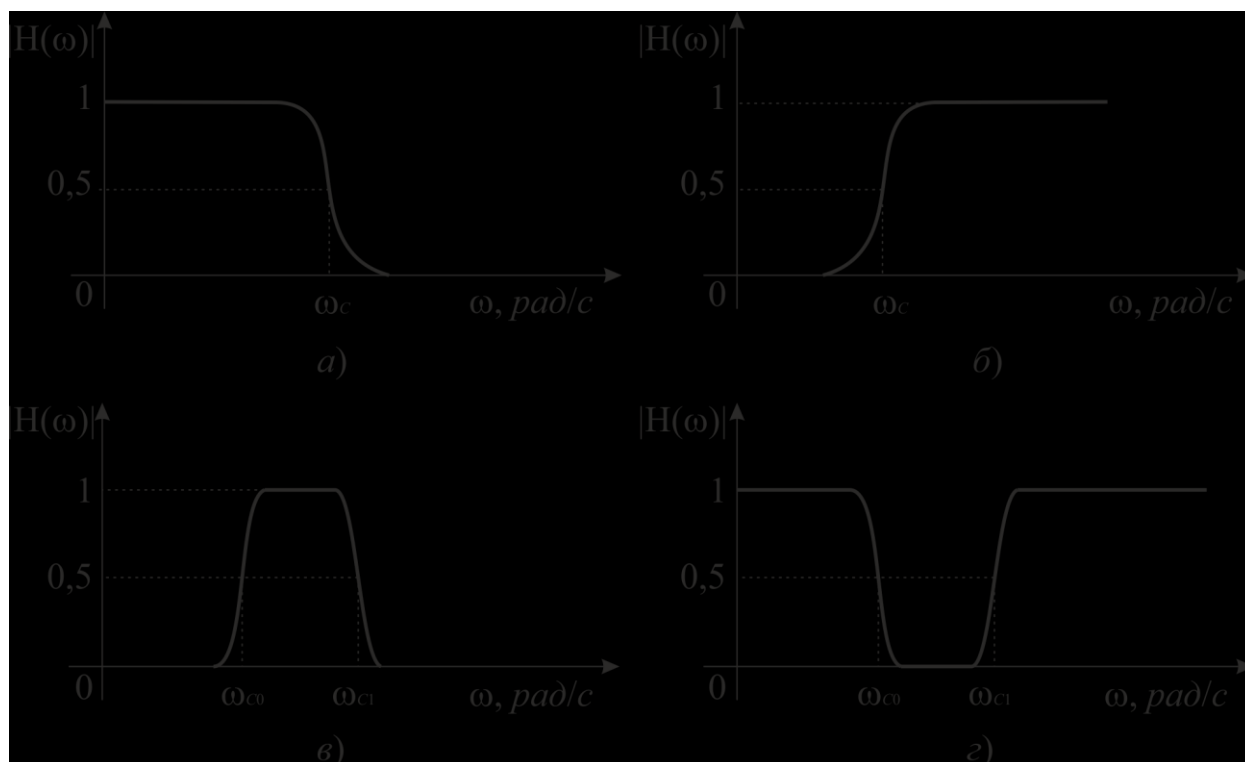


Рисунок 3.1 – АЧХ фільтра нижніх частот (а), фільтра верхніх частот (б), смуго-пропускнуго фільтра (в) та режекторного фільтра (г)

3.2 Конструкції керованих фільтрів

Досить популярними, на сьогоднішній день, є керовані фільтри на основі п'єзокерамічних мікропозиціонерів. Розглянемо більш детально їх основні типи. Першим із них є біморфні мікропозиціонери. Їх принцип роботи полягає в тому, що за рахунок поперечного п'єзоефекту збуджується деформація двошарової п'єзокерамічної структури. В залежності від способу закріплення розрізняють п'єзокерамічні структури консольного та балкового типу [11].

Різниця між цими двома конструкціями полягає в тому, що у консольному типі біморфного п'єзоелементу використовується переміщення незакріпленого кінця. У балковому ж переміщується середня частина структури.

Залежність переміщення, створюваного біморфним елементом, від керуючої напруги U , що прикладена до його електродів визначається за формулою [14]:

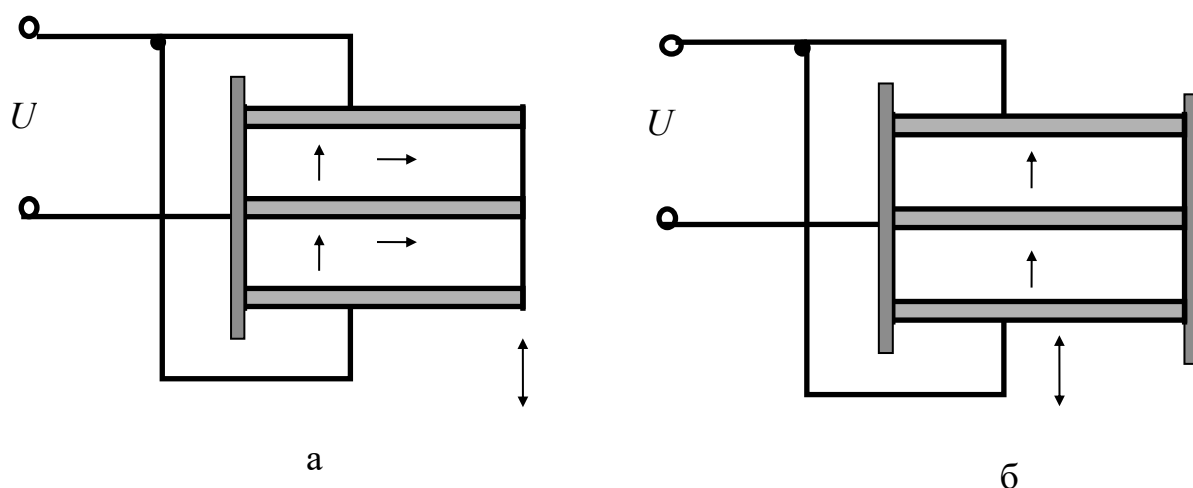


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення конструкції п'єзокерамічних мікропозиціонерів біморфної структури консольного типу (а) та балочкового типу (б) [11]

$$\delta = c \frac{k_u d_{31} U l^2}{t^2} \quad (3.1)$$

де k_u — коефіцієнт, значення якого змінюється від 2,5 до 0,5 із ростом напруги U ;

d_{31} — поперечний п'єзomodуль матеріалу;

l — довжина кожної п'єзопластини біморфного перетворювача;

t — товщина кожної п'єзопластини біморфного перетворювача;

$$c = \begin{cases} 1, & \text{для консольного типу,} \\ 0,25, & \text{для балочного типу.} \end{cases}$$

Другим типом п'єзоелектричних мікропозиціонерів є мультиморфні структури. Їх принцип дії полягає в тому, що за рахунок поздовжнього п'єзоефекту

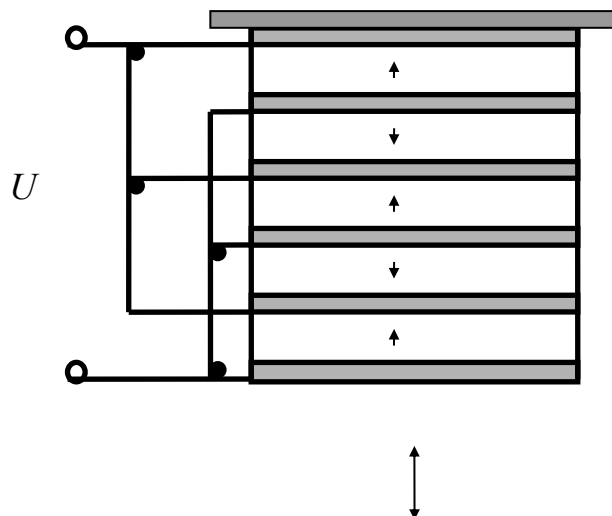


Рис. 3.3 Схематичне зображення конструкції п'єзокерамічного мікропозиціонера мультиморфної структури [11]

виникають товщинні деформації п'єзопластин, з яких складається набраний пакет мікропозиціонерів. На рис. 3.3 представлено зображення схематичної конструкції такого мікропозиціонера.

Залежність переміщення від величини напруги U для даного мікропозиціонера знаходиться за наступною формулою:

$$\delta = d_{33}NU, \quad (3.2)$$

де d_{33} — поздовжній п'єзомодуль керамічного матеріалу;

N — кількість п'єзокерамічних пластин.

Перевагами мультиморфної структури, порівняно із біморфною є те, що пакетний п'єзоелемент практично не піддається впливу вібрацій і ударів та забезпечує плоскопаралельне переміщення об'єкта керування. Також дана конструкція дозволяє отримати більш високу швидкодію. Недоліком же є те, що

мультиморфна структура є більш складною для виготовлення на відміну від біморфної. Існуючі п'єзоелектричні мікропозиціонери здатні відслідковувати частотну форму керуючого електричного сигналу аж до першого резонансу.

Але однією з актуальних проблем використання даних структур є наявність гістерезису та висока керувальна напруга та неточність керувальної системи. Тому було розроблено корисну модель [патент], яка дозволяє підвищити точність електронного керування резонансною частотою НВЧ системи.

Сутність корисної моделі полягає у використанні крокового двигуна, що керується мікроконтролером, як керуючого елементу, а як резонансний елемент використовують тонких діелектричний резонатор, розташований під кутом до широко стінки прямокутного хвилеводу та у напрямку розповсюдження електромагнітних хвиль. Конструкцію резонансної системи роздивимося більш детально у пункті 3.3. При зміні кута нахилу тонкого ДР змінюється резонансна частота резонатора, і, як наслідок, зсув фаз.

Перевагою такого способу керування є відсутність гістерезису та збільшення точності електричного керування резонансною частотою, що досягається через тонке керування двигуном через мікроконтролер.

3.3 Розрахунок фільтру

3.3.1 Конструкція

Для дослідження керованих фільтрів НВЧ на основі тонких ДР нами було обрано дві моделі фільтрів: смугопропускний та режекторний. Конструкції даних фільтрів показано на рисунку 3.4 та 3.5 відповідно. Вибір конструкцій ґрунтувався на можливості проведення експериментальних дослідження через засоби, наявні у лабораторії. Також розрахунок моделей показав, що обидві конструкції прийнятні для використання.

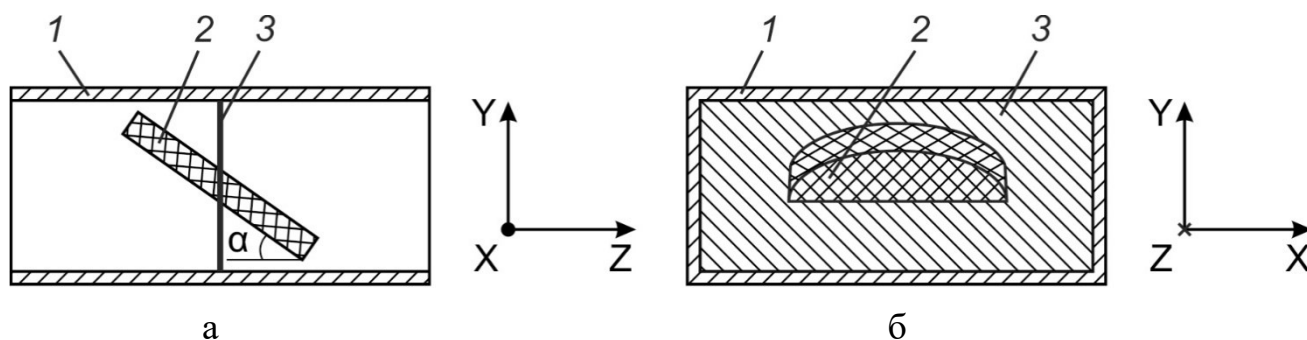


Рисунок 3.4 – Конструкція смугопропускного фільтру на основі тонкого ДР у двох видах: збоку (а) та спереду (б)

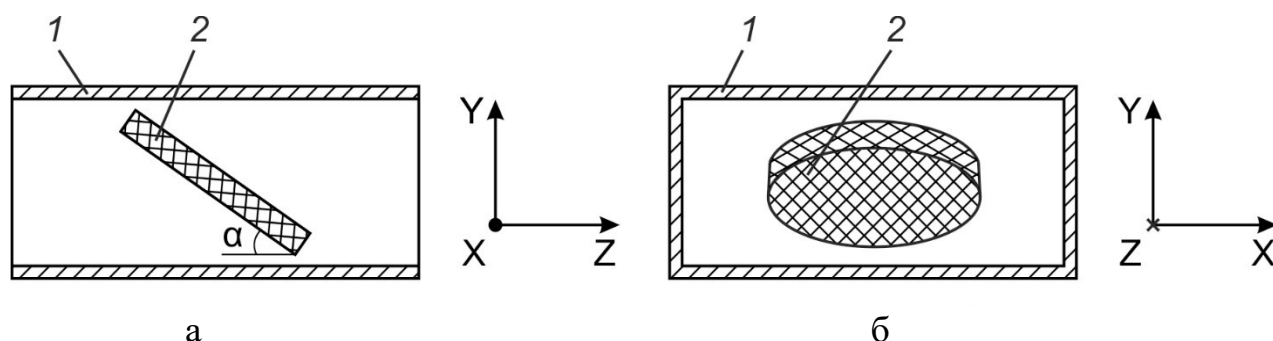


Рисунок 3.5 – Конструкція режекторного фільтру на основі тонкого ДР у двох видах: збоку (а) та спереду (б)

Конструкції фільтру складається з тонкого діелектричного резонатора, з розмірами $D=12,83$ мм – діаметр резонатора, $h=0,63$ мм – товщина резонатора ($h/D=0,05$) та виготовленого із кераміки ТЦ35 ($\text{BaTi}_4\text{O}_9+\text{ZnO}$), діелектрична проникність якого становить $\epsilon = 35...37$. Резонатор розміщено у прямокутному хвилеводі з металевими стінками та під кутом $\alpha = 10^\circ$ до широкої стінки вздовж напрямку розповсюдження електромагнітних хвиль. У якості тримача для резонатора використовувалась підставка виготовлена із Кварцу 3, який є оптично прозорим у даному діапазоні частот ($\epsilon \approx 1$).

Для реалізації смугопропускного фільтру (рисунок 3.4) поперечний переріз хвилевода було перекрито металевою пластиною із отвором, крізь який вставлявся тонких діелектричний резонатор.

3.3.2 Постановка задачі

Точний розв'язок електродинамічної задачі про власні коливання комбінованої структури з діелектричним резонансом ускладнений через наявність некоординатної відкритої межевої поверхні з різкими зламами між середовищами з різними діелектричними проникностями, а також через необхідність врахування дифракційних явищ при розсіюванні хвиль як на межах розділу середовищ, так і на численних ребрах діелектричних областей. Тому для побудови зручних обчислювальних схем доводиться використовувати різні модельні наближення. Так, задачу про власні коливання циліндричного тонкого ДР вдається значно спростити в рамках моделі другого наближення, коли бічним поверхням резонатора ставиться у відповідність магнітна стінка, а на торцевих поверхнях накладаються реальні межові умови. Наявність бічної магнітної стінки дозволяє ортогоналізувати систему власних функцій підобластей резонатора і на основі методу часткових областей побудувати ефективну обчислювальну процедуру для розрахунку резонансних частот циліндричного тонкого ДР. Однак, похибка одержуваних при цьому результатів визначається похибкою моделі і складає 1–2% [20].

Варто зауважити, що похибка моделі другого наближення, в основному, пов'язана з похибкою визначення поперечного хвильового числа. До такого висновку прийшли автори роботи [19], що при розрахунку резонансної частоти основного типу коливань циліндричного ДР знаходять поперечне хвильове число з розв'язку задачі про нескінченно витягнутий діелектричний еліпсоїд. При цьому похибка розрахунку резонансної частоти складає 1%. Однак, такий підхід неприйнятливий для циліндричного ДР через геометрію задачі. Тому у [11] була розроблена наступна математична модель.

Проведено обчислення резонансних частот для випадку циліндричної тонкої структури з діелектричним резонансом, що складається з двох областей із різною діелектричною проникністю ε , що знаходяться між двома нескінченними рівнобіжними металічними площинами із високою провідністю (рис. 3.6).

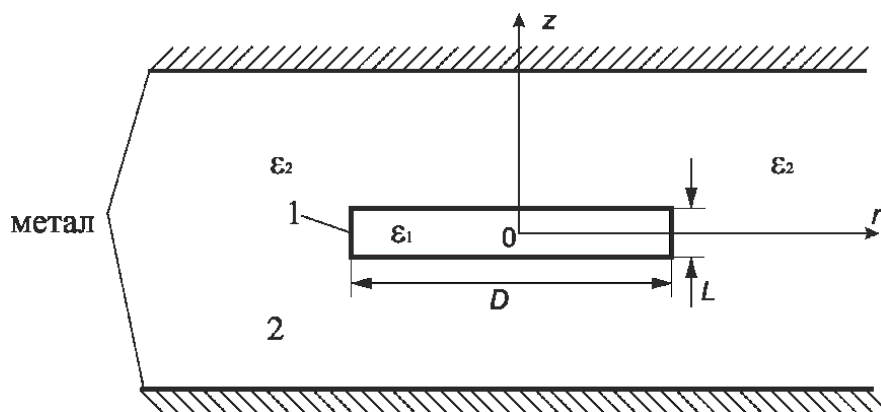


Рис. 3.6 – Схема циліндричного тонкого ДР із металевими стінками

Для побудови моделі даної структури скористалися методом часткових областей. Для цього було описані поля в кожній області і сформульовані умови на межах розділу областей резонатора.

Відомо, що можна розглядати електромагнітне поле як суперпозицію полів Е- і Н-типів при виконанні умов Г. В. Кісунько [21]. Ці умови виконуються для полів із циліндричною симетрією. Тому в даній системі задача значно спрощується.

Як було відзначено вище довільне поле Е-типу може бути виражене через електричний вектор Герця $\vec{\Gamma}$. Причому вектор Герця зручно вибрати в наведеному нижче вигляді

$$\vec{\Gamma} = e_3 U = (0, 0, \Gamma_z^e), \quad (3.6)$$

де U — функція Борнігса;

e_3 — одиничний вектор напрямлений вздовж третьої осі координат (в нашому випадку — це вісь Z).

$$\begin{aligned} \Delta U + \omega^2 \epsilon_1 U &= 0; \\ \vec{E} &= -\text{grad}(e_3 U); \\ \vec{H} &= -j\omega\epsilon(\text{rot}(e_3 U)), \end{aligned} \quad (3.7)$$

Дані рівняння справедливі в декартовій системі координат для будь-якого вибору осей та в циліндричній системі координат за умови, що напрямок e_3 та осі OZ збігаються.

Використавши метод поділу змінних Фур'є отримали:

$$U = \sum_{p=0}^{\infty} A_{ip}^e R_{mnp}^e(r) \Phi_n^e(\varphi) Z_{ip}^e(z), \quad (3.8)$$

де A_{ip}^e — коефіцієнти Фур'є;

$R_{mnp}^e(r)$, $\Phi_n^e(\varphi)$, $Z_{ip}^e(z)$ — функції r , φ , z відповідно.

Для резонаторів циліндричної форми зазначені вище функції обираються таким чином:

$$\begin{aligned} R_{imnp}^e &= J_n(\beta_{imnp}^e r), \quad i=1,2; \\ R_{3mnp}^e &= H_n^{(1)}(\beta_{3mnp}^e r); \\ \Phi_n^e(\varphi) &= \cos(n\varphi + \varphi_0) = \cos(n\varphi); \\ Z_{ip}^e(z) &= \cos(\beta_{zip}^e z_i), \quad z_i = z, \quad i=1,3; \\ &z_i = z - h - g, \quad i=2, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де J_n — функція Беселя першого роду n -го порядку;

H_n — функція Ханкеля другого роду n -го порядку;

β_{zipl} — повздовжнє хвильове число i -ої області в циліндричній системі координат (ЦСК);

β_{imnp} — поперечне хвильове число i -ої області в ЦСК;

h — товщина області включення.

При цьому повинні виконуватися приведені нижче умови для компонентів векторів $\vec{E}, \vec{H}$ (відповідно $E_\phi, E_r, E_z, H_\phi, H_r, H_z$) на межах розділу областей

резонатора з різними електрофізичними властивостями (в даному випадку на межах областей з різними значеннями відносної діелектричної проникності, та на межах метал-діелектрик):

$$\begin{aligned}
 E_{r,2,3} &= 0, E_{\varphi,2,3} = 0, z = g + h \quad \forall r, \varphi; \\
 E_{r,1,3} &= 0, E_{\varphi,1,3} = 0, z = 0 \quad \forall r, \varphi; \\
 H_{r,1} &= H_{r,2}, H_{\varphi,1} = H_{\varphi,2}, E_{r,1} = E_{r,2}, E_{\varphi,1} = E_{\varphi,2}, \varepsilon_1 E_{z,1} = \varepsilon_2 E_{z,2}, z = g \quad \forall r, \varphi; \quad (3.10) \\
 E_{z,1,2} &= E_{z,3}, E_{\varphi,1,2} = E_{\varphi,3}, \varepsilon_{1,2} E_{r,1,2} = \varepsilon_3 E_{r,3}, H_{\varphi,1,2} = H_{\varphi,3}, \mu_{1,2} H_{1,2r} = \mu_3 H_{3r}, \\
 r &= D / 2, \quad \forall z,
 \end{aligned}$$

де ε_i — діелектрична проникність i -ї області комбінованого ДР;

μ_i — магнітна проникність i -області комбінованого ДР (для діелектричних областей тонких ДР μ_i можна вважати рівними 1).

Враховуючи, що системи функцій Z_{ip} є ортонормованими і повними на відрізьку $(0, g + h)$ коефіцієнти A_{ip}^e виразимо через невідомі функції $f_i^e(z)$

$$A_{ip}^e = \frac{\int_0^{g+h} \varepsilon_i f_i^e(z) \cos(\beta_{zip}^e z_i) dz}{\frac{D}{2} \cdot \beta_{zip}^e z_0 R_{imnp}^e \int_0^{g+h} (Z_{ip}^e(z_i))^2 dz}, \quad (3.11)$$

де $z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ — власний імпеданс вільного простору;

D — діаметр резонатора.

В результаті з (3.10–3.11) (підставляємо 3.9 до умови $\mu_{1,2} H_{1,2r} = \mu_3 H_{3r}$ із (3.10) отримуємо систему інтегральних рівнянь відносно невідомих функцій $f_i^e(z)$, яку за допомогою методу Бубнова-Гальоркіна і використовуючи властивості

ортогональності зводимо до лінійної системи рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів.

$$\int_0^{g+h} \left(\sum_i \frac{\varepsilon_k(z) R_{kmi}^e (D/2) (Z_{ki}^e(z))^2 \varepsilon_k(z') (Z_{ki}^e(z'))^2}{(\beta_{kmi}^e)^2 R_{kmi}^e (D/2)} C_{ki} - \sum_p \frac{\varepsilon_3 R_{3mp}^e (D/2) Z_{3p}^e(z) Z_{ki}^e(z) \varepsilon_3 (Z_{3p}^e(z'))^2}{(\beta_{3mp}^e)^2 R_{3mi}^e (D/2)} C_{3p} \right) dz' dz = 0, \quad (3.12)$$

$k=1,2$

де C_{ki} — невідомі коефіцієнти.

Ця система лінійних рівнянь є однорідною. Використовуючи умову існування нетривіального розв'язку однорідної системи рівнянь одержуємо рівняння

$$\det(S) = 0, \quad (3.13)$$

де $\det(S)$ — визначник системи (3.12).

З умови рівності тангенціальних складових полів тонких ДР у областях 1, 2 при $z = g$ (3.10) у першому наближенні отримуємо рівняння

$$\frac{\beta_{z1p}^e \operatorname{tg}(\beta_{z1p}^e g)}{\varepsilon_1} + \frac{\beta_{z2p}^e \operatorname{tg}(\beta_{z2p}^e)}{\varepsilon_2} = 0, \quad (3.14)$$

З умови рівності нулю тангенціальних складових електричного поля на металі (див. 3.10) маємо вираз для обчислення повздовжнього хвильового числа у навколишній області, що оточує резонатор (рис. 2.1)

$$\beta_{z3p}^e = \frac{p\pi}{g+h}, \quad (3.15)$$

де p — натуральне число.

З електродинаміки відомо [4], що хвильові числа в кожній з діелектричних областей зв'язані між собою системою дисперсійних рівнянь, які визначають взаємозв'язок між хвильовими числами в кожній з часткових областей резонатора та навколишнього простору в залежності від електрофізичних властивостей цих областей:

$$\begin{cases} (\beta_p^e)^2 + (\beta_{z1p}^e)^2 = \varepsilon_1 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_1 ; \\ (\beta_p^e)^2 + (\beta_{z2p}^e)^2 = \varepsilon_2 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_2 , \end{cases} \quad (3.16)$$

Доповнивши рівняння (3.13 – 3.15) дисперсійними рівняннями (3.16) остаточно маємо систему нелінійних рівнянь (3.16), що описує циліндричну структуру, зображену на схемі (рис. 3.6) і може бути використана для розрахунку власних частот даної резонансної системи.

Отримана система може бути використана як для подальших теоретичних досліджень фундаментального характеру, так і для практичного розрахунку резонансних частот циліндричних структур з діелектричним резонансом та керованих пристроїв НВЧ на їх основі.

Дана система рівнянь може бути розв'язана методами обчислювальної математики при використанні ЕОМ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \det(S) = 0; \\ \frac{\beta_{z1p}^e \operatorname{tg}(\beta_{z1p}^e g)}{\varepsilon_1} + \frac{\beta_{z2p}^e \operatorname{tg}(\beta_{z2p}^e)}{\varepsilon_2} = 0; \\ (\beta_p^e)^2 + (\beta_{z1p}^e)^2 = \varepsilon_1 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_1; \\ (\beta_p^e)^2 + (\beta_{z2p}^e)^2 = \varepsilon_2 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_2; \\ \beta_{z3p}^e = \frac{p\pi}{g+h}, \end{array} \right. \quad (3.17)$$

3.3.3 Результати

Включення фільтру для підтвердження адекватності математичної моделі розробленої у [11] відбувалося за схемою, показаною на рисунку 3.7. Схема включає в себе:

$A1$ — досліджуваний зразок;

$W1, W2$ — рефлектометри падаючої та відбитої хвиль;

$XW1$ — коаксіальний перехід;

$XW2$ — узгоджене навантаження;

A, B, B, Γ, D — високочастотні кабелі

Використовуючи експериментальні дані та порівнявши їх із розрахованими значеннями для конкретного фільтру отримали графіки наступних залежностей.

Так як метою даної роботи було розрахувати основні параметри керованого фільтру, то на рисунку 3.8 приведена АЧХ смуго-загороджувального (а) та смугопропускного (б) фільтрів з резонансною частотою $10,9 \text{ ГГц}$, діапазоном перебудування $2,5 \text{ ГГц}$ та добротністю не гірше 2000.

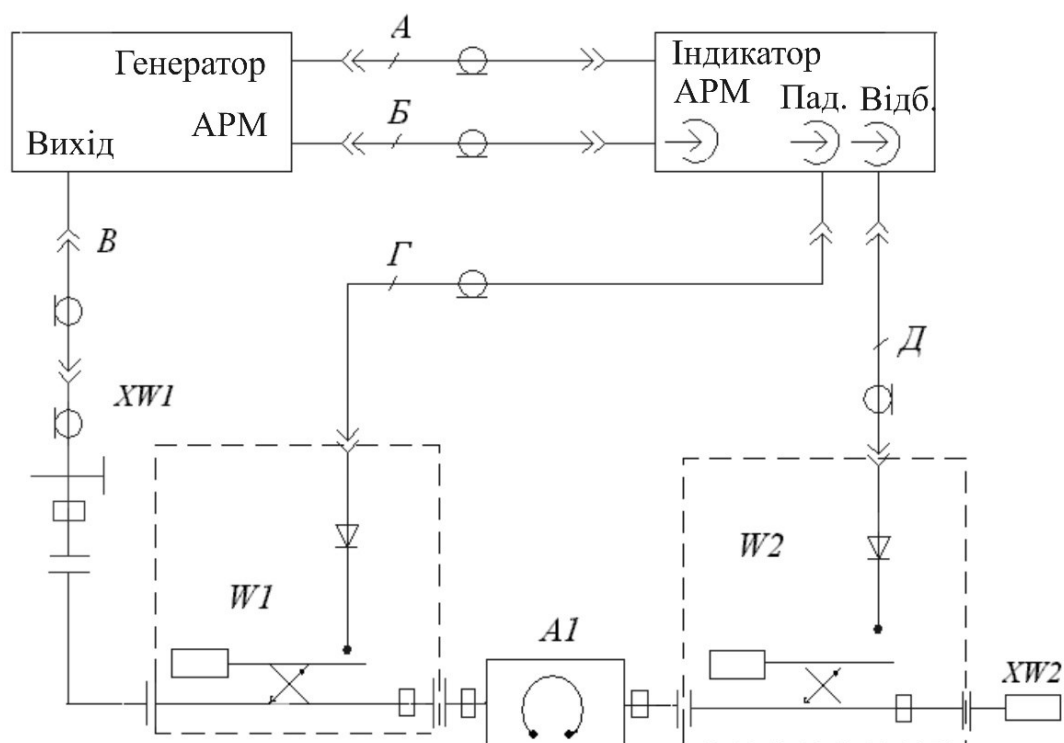


Рисунок 3.7 – Схема вимірювального стенду для визначення параметрів фільтру

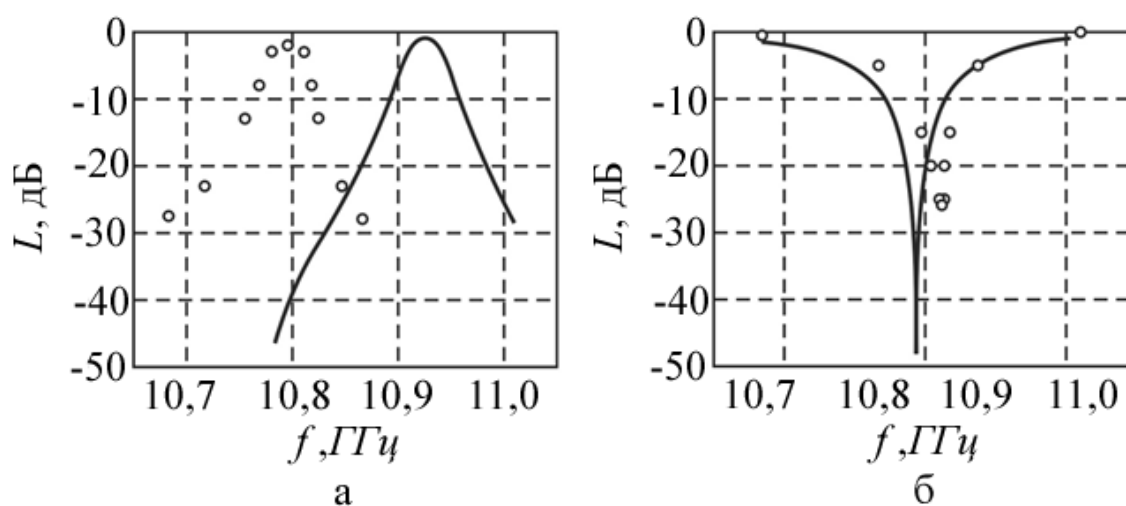


Рисунок 3.8 – АЧХ смуго-загороджувального (а) та смугопрпусного (б) фільтрів НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів

Оскільки дані фільтри є керованими та призначений для використання у НВЧ приладах, то важливими характеристиками для них є значення добротності та діапазон перебудовування резонансної частоти. Як показали експерименти, значення добротності майже не змінюється та залишається достатньо високим для використання системи. Графік залежності резонансної частоти від кута нахилу резонатора відносно стінки хвильовода, представлений на рисунках. 3.10.

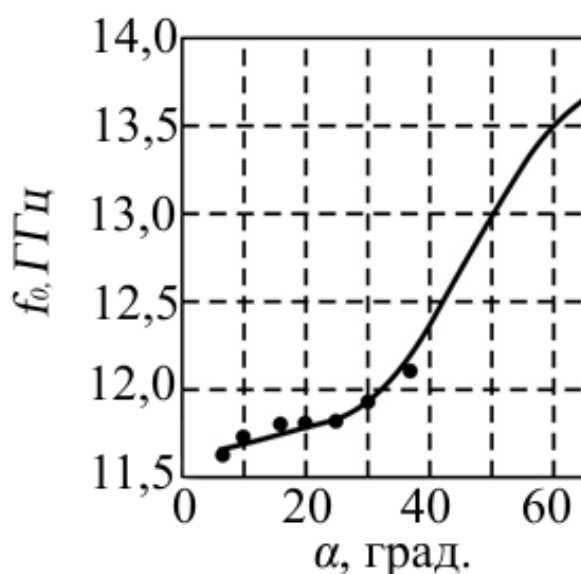


Рис. 3.10 Графік залежності резонансної частоти нижчої НЕ-моди від кута повороту резонатора в площині XZ

Як бачимо із отриманого графіка, максимуму перебудовування частоти (13,6 ГГц) ми досягаємо при значенні кута повороту $\approx 60^\circ$.

Висновки до розділу

Як показали проведені експериментальні дослідження, обрана нами модель керованого фільтру НВЧ на основі тонкого діелектричного резонатора є придатною для практичного застосування. Діапазон зміни частот обраної конструкції сягнув близько 18% при збереженні високого значення добротності.

РОЗДІЛ 4: РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Через постійне вдосконалення інформаційних технологій з'явилася потреба у вдосконаленні та розробленні нових, більш ефективних засобів передачі даних. Особливо помітно дану тенденцію на прикладі бездротових технологій так як частотний ресурс в освоєних діапазонах спектру вичерпує себе. Одним із методів вирішення даної проблеми є зсув несучих частот. Як показали дослідження [7], зсунути несучі частоти в міліметрову область радіочастотного спектру можна шляхом використання керованих фільтрів НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів.

В межах підпункту послідовно проаналізовано і подано у вигляді таблиць наступні інформацію: зміст ідеї; можливі напрямки застосування; основні вигоди, що може отримати користувач; чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартапу

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Керовані фільтри НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів	1. Розробники обладнання НВЧ	Використання фільтрів для виділення певної частоти у своїх приладах
	2. Оператори мобільного та інтернет зв'язку	Покращення якості сигналу за рахунок використання незайнятих частот
	3. Військові служби	Передача даних по вузькому виділеному каналу, що дозволяє забезпечити секретність

		даних
--	--	-------

Висновок: в таблиці приведено основні напрямки використання керованих фільтрів ВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів. Споживачами даної системи можуть бути ті структури, які у своїй роботі активно використовують радіочастотні сигнали: розробники обладнання НВЧ, секретні та військові служби, оператори мобільного та інтернет зв'язку.

Таблиця 4.1 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1			
1	Низькі витрати	30	25		+	
2	Габарити мм	12,83x0,63 мм	20x2 мм			+
3	Матеріал	ТЦ35 (BaTi ₄ O ₉ +ZnO)	Кераміка на основі Al ₂ O ₃		+	
4	Діелектрична проникність	35..37	9,6			+
4	Технологічні сть	77%	50%			+

Висновки: у порівнянні із головними конкурентами товар має ряд переваг – це габарити, технологічність виготовлення та значення діелектричної проникності матеріал. З точки зору виробництва це дає можливість стабільно отримувати високу якість товару та не нести збитків через неякісне виготовлення.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.2 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Зміна діапазону робочих частот	Використання нових видів фільтрів	Наявна	Доступна
4	Зменшення масо- габаритних показників	Використання передових технологій виробництва	Наявна	Доступна
5	Сертифікація для використання у лініях передач	Проходження сертифікації товару	Наявна	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Ідею створити можна. Технологія реалізації ідеї спирається на інноваційність підходу. Тому для того щоб значно виділитися на ринку від конкурентів, необхідно провести сертифікацію для розширення сфер розповсюдження товару

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.3 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	67%

Висновки: за результатами складеної таблиці можна сказати, що вихід на ринок є рентабельним. Практично відсутня конкуренція дає змогу одними із перших зайняти нішу на ринку. При виборі правильного вектору розвитку можна буде розраховувати на великий прибуток, що означає швидку окупність проекту.

Таблиця 4.4 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
1	Зміщення діапазону робочих частот у міліметровий та субміліметровий діапазон	• Оператори мобільного та інтернет зв'язку • Військові служби • Виробникик НВЧ обладнання	Особливості, викликані необхідністю розширення робочих частот інтеграція із існуючими системами	• Стабільність каналів сигналу • Висока якість сигналу • Сертифікація обладнання

Висновки: формування ринку визначається потребою зміщення діапазону робочих частот НВЧ обладнання через зайнятість вже освоєного простору. Основними споживачами є сфери, які пов'язані із використанням частот НВЧ, а саме оператори мобільного та інтернет зв'язку, військові служби, виробники НВЧ обладнання. Беручи до уваги потреби споживачів та їх особливості, головними вимогами до товару є: стабільність роботи та висока якість системи, сертифікація обладнання для його використання.

Таблиця 4.5 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Менша ціна у конкурента при однаковій якості продукту	Відтік клієнтів
2	Економічний	Економічний стан країни-виробника	Відмова від продукту
3	Якість	Не належна якість розробленого обладнання	Відмова від продукту
4	Вартість виробництва	Підвищення вартості виробництва комплектуючих	Пошук нових постачальників, зміна матеріальної бази

Висновки: головним фактором загроз є конкуренція. Виробники, що вже встигли зайняти нішу на ринку мають клієнтську базу, репутацію та певні обсяги виробництва. Конкуренти здатні демпінгувати ціни для отримання нових клієнтів свого товару.

Таблиця 4.6 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення попиту	Збільшення зацікавленості до продукту	Підвищення виробництва
2	Освоєння нових сфер	Продукт використовується у сферах, що не розглядалися конкурентом	Створення спеціальної робочої групи задля дослідження нових характеристик та можливостей використання
3	Співпраця з конкурентами	Конкурент запропонував кооперацію	Оцінки можливих ризиків

Висновки: ринок клієнтів постійно зростає через збільшення споживачів та їх потреб. Збільшення зацікавленості у товарі призведе до збільшення об'ємів виробництва та продажів, що відкриває змоги для більше детальних досліджень товару. Це досягається шляхом рекламування та освоєння нових сфер використання фільтрів НВЧ.

Таблиця 4.7 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції - чиста конкуренція	Мала кількість постачальників даного продукту	• відповідність ринку • прогнозування тенденцій
2. Рівень конкурентної боротьби - міжнародний	Наявність замовників із інших держав	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Використання в одній галузях	Робота маркетингу по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	Товар, що пропонується є одного виду	• Клієнтко-орієнтована стратегія розвитку • Адаптивність до умов ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Вартість залежить від матеріалів виробу	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю - марочна	Вибір постачальника по бренду	Активне рекламування бренду

Висновки: на ринку присутня чиста конкуренція через те, що окремі гравці не можуть впливати на ціну товару. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний із внутрішньогалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів – товарно-видова.

Таблиця 4.8 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Інститут комп'ютерних технологій Мікроприлад	Немає	Дистриб'ютори	Служби спеціального призначення, ператори мобільного та інтернет-зв'язку	Фільтри на основі комбінованих резонаторів
Висновки:	Конкуренція є відносно не великою	Потенційні конкуренти відсутні	Постачальники не диктують правила на ринку	Клієнти диктують умови через велику зацікавленість до товару.	Обмежень практично немає, оскільки маю різні обмеження по використанню

Таблиця 4.9 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Малогабаритність	Зменшення габаритів фільтри порівняно з аналогами
2	Технологічність	Високі вимоги до технології виробництва дозволяють отримувати більше товару в обмежений час
3	Дешевизна	За рахунок технологічності товару, маємо більший відсоток виходу, що дає можливість знизити ціни на кінцевий товар
4	Якість вихідного сигналу	При аналогічних замовленнях, товар буде давати показувати свою роботу краще, ніж конкурентні конструкції

Висновки: оцінено основні фактори конкурентоспроможності. Малогабаритність та технологічність досягаються шляхом вибору конструкції, методу керування та матеріалу, з якого буде виготовлено кінцевий товар. Дешевизна та якість вихідного сигналу дозволять захопити ринок за рахунок поєднання обох факторів.

Таблиця 4.10 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ІКТ						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Мініатюризація	18							+3
2	Технологічність	15				0			
3	Дешевизна	20						+2	
4	Якість вихідного сигналу	16					+1		

Висновки: спираючись на фактори конкурентоспроможності (Таблиця 4.8) та підсумовуючи рейтинг товару відносно головного конкурента, запропонована система має більший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблений продукт відрізнється від аналогів та в яку саме сторону. Детальний аналіз показує, що сильними сторонами є мініатюризація та дешевизна кінцевого продукту.

Таблиця 4.11 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Технологічність 2. Використання керамічних діелектриків 3. Мініатюрність 4. Якість вихідного сигналу 5. Можливість розрахунку вихідного сигналу	Слабкі сторони: 1. Складність розрахунку вихідного сигналу 2. Можлива наявність дефектів у структурах кераміки, що впливає на характеристики
Можливості: 1. Вихід на міжнародний ринок 2. Збільшення попиту 3. Освоєння нових сфер 4. Співпраця з конкурентами	Загрози: 1. Конкуренція 2. Економічна нестабільність 3. Якість продукту 4. Вартість матеріалів 5. Сертифікація

Таблиця 4.12 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуалізм	Висока	9 місяців
2	Кооперація	Середня	11 місяців
3	Суперництво	Нижче середнього	14 місяців

Висновки: в результаті аналізу обрано індивідуалізм, як альтернативну ринкову поведінку через те, що за відносно короткий термін існує велика ймовірність отримання ресурсів.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.13 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	Оператори мобільного зв'язку	+	+	Середня	+
2	Оператори інтернет зв'язку	+	+	Середня	+
3	Військові служби	—	—	Низька	—
4	Виробники НВЧ обладнання	+	+	Висока	—

Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Військові служби потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання обладнання. У випадку успішного реклами є можливість зайняти нішу. На даний момент буде важко конкурувати з уже існуючими системами у серед виробників НВЧ обладнання.

Таблиця 4.14 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспромо- жні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Індивідуалізм	Стратегія диференційова- ного маркетингу	- Адаптація до вимог ринку - Використання новацій	Стратегія лідерства по витратах

Висновки: обрана стратегія розвитку лідерства по витратах через відсутність на ринку більш сильніших гравців.

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохід- цем» 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*
	Є першопрохідц- ем	Буде шукати нових споживачів	Ні	Заняття конкурентної ніші

Висновок: оскільки проект є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію заняття конкурентної ніші.

Таблиця 4.16 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якість вихідного сигналу	Стратегія диференці ації	Дослідження та вдосконалення	Надійність, якість, відповідальність
2	Дешевизна продукту	Стратегія лідерства по витратах	Збільшення обсягів виробництва	Провідний виробник
3	Готовність до сертифікації обладнання	Стратегія диференці ації	Готовність до співпраці	Клієнтоорієнтовність

Висновки: На ряду із використання інноваційних методів виробництва, проект повинен асоціюватися у клієнта надійністю виробника, його якістю та клієнтоорієнтовністю.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.17 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Зміщення діапазону робочих частот у міліметровий та субміліметровий діапазон	Відносно дешева та якісний компонент керування частотою	Ціна, малогабаритність, технологічність виробництва, якість вихідного продукту

Висновки: в результаті визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого клієнта.

Таблиця 4.18 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
Товар за задумом	Пристрій дає можливість керувати резонансними частотами обраних діелектричних резонаторів. Завдяки можливості зсуву резонансної частоти з'являється можливість отримати доступ до міліметрового та субміліметрового діапазону НВЧ спектру. У зв'язку з цим відкриваються можливості освоєння нового НВЧ простору, що, на сьогоднішній день є актуальним питанням з оглядом на розвиток та популяризацію НВЧ у світі.		
Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Малогабаритність	12,83x0,63 мм	Тх
	2. Частотний спектр	>10 ГГц	Тх
	3. Технологічність	Товстоплівков і технології	Тх
	4. Вартість	55	Е
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація для використання НВЧ приладів, сертифікація IEEE.		
Пакування			
Марка: novation technology for people (NTP)			
Товар із підкріпленням	До продажу: наявність тестових зразків для демонстрації, наявність постачальників сировини та кваліфікованих спеціалістів		
	Після продажу: після продажна підтримка, гарантія, сервісне обслуговування, консультація по роботі з приладом		
Захист товару проводиться шляхом патентування пристрою, зберігання у таємниці технології виробництва та бази постачальників сировини.			

Висновки: основними засобами захисту від копіювання є патентування конструкції приладу. Також можлива домовленість з постачальниками сировини про ексклюзивні ціни на продукцію. Захист ідеї товару робить даний прилад унікальним за своїми характеристиками на ринку.

Таблиця 4.19 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
	95-115 у.о.	40-70 у.о.	1200-2000 у.о.	40-95 у.о.

Висновки: обрано середню цінову категорію, оскільки занадто висока ціна відлякує споживача.

Таблиця 4.20 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Продаж	Повний супровід товару до замовника	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)
	Організація системи	Надання консультацій та контроль якості системи	Другого рівня	Посередницький (непрямий)

Висновки: основними каналами збуту продаж приладу та створення цілих систем на його основі. Через відносно не великі об'єми виробництва нема сенсу використовувати підрядників для реалізації товару. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збут та прямої системи збуту. Однак при реалізації систем

необхідно залучати кваліфікованих спеціалістів для побудови самої системи а також по монтажним роботам, які будуть проектувати систему, а в результаті встановлювати її та її кінцевому споживачу. Тому, була обрана глибина другого рівня для каналу збуту систем на основі запропонованого приладу.

Таблиця 4.21 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
	Зовнішні обставини спонукають споживача до пошуку рішення	- Реклама - SMM - Сайт виробника	- Якість - Надійність - Дешевизна	Донесення можливостей отримання прибутку за допомогою цього засобу	Показ застосування системи

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу приладу в соціальних мережах, через сайт виробника, у професійних виданнях та на приватних зустрічах з потенційними замовниками. Метою цих оголошень є донесення можливостей даної системи та вигоди від використання.

Висновки до розділу

Як показав проведений вище аналіз, виведення даного продукту на ринок є конкурентоспроможним та рентабельним. Рентабельність виражається у низькому рівні конкуренції, зростанні попиту на продукцію та динаміці ринку, де все більше та більше з'являється запитів на вдосконалення існуючих систем передачі даних у НВЧ діапазоні.

Основними клієнтами, зацікавленими у використанні даних пристроїв є оператори мобільного зв'язку, інтернет-провайдери, військові служби та виробники НВЧ обладнання. Особливих проблем входження у ринок не передбачено, одна може виникнути необхідність сертифікувати обладнання для подальшої його інтеграції, наприклад, у військову сферу.

Головними показниками конкурентоспроможності проекту є його малогабаритність порівняно з аналогами, дешевизна, якість вихідного сигналу та його прогнозування (що забезпечується попереднім розрахунком), технологічність виготовлення приладу.

Для найвигіднішої реалізації проекту доцільно обрати стратегію лідерства по витратах через відсутність у конкурентів прав на технологію виробництва даних приладів (досягається шляхом патентування конструкції та технології виробництва).

ВИСНОВКИ

Тонкі діелектричні резонатори мають певний ряд переваг, порівняно з іншими резонаторами. Як показали проведені дослідження, тонкі та надтонкі ДР можна виділити в окрему групу за ознакою взаємного розміщення мод резонатора на частотній шкалі. Значення резонансно частоти такого резонатора залежить від багатьох факторів таких як:

- Властивості матеріалу;
- Геометрія діелектричного резонатора;
- Орієнтація резонатора відносно електромагнітних збуджуючих полів;
- Кут падіння електромагнітної хвилі.

Значення резонансно частоти тонких діелектричних резонаторів суттєво залежить від кута нахилу резонатора відносно стінок хвилеводу. Така особливість дозволяє реалізувати на основі тонких діелектричних резонаторів керовані фільтри НВЧ. Керування резонансною частотою у таких фільтрах здійснюється за рахунок обертання тонкого ДР у хвилеводі за допомогою крокового двигуна керованого мікроконтролером.

У ході виконання роботи нами було реалізовано макет керованого фільтру НВЧ на основі тонкого діелектричного резонатора. При збереженні високого значення добротності (порядку 1700) було досягнуто діапазону зміни частоти до 18%. Максимальне значення перебудови частоти (13,6 ГГц) було одержано при значенні кута повороту $\approx 60^\circ$.

Для подальшого використання приладів на основі тонких діелектричних резонаторів необхідне більш детальне вивчення їх характеристик та побудова математичних моделей для розрахунку параметрів діелектричних резонаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гассанов и др.; Под ред. М. Е. Ильченко.-М.: Радио и связь, 1989.-328 с.
2. Ильченко М.Е. Твердотельные частотно-избирательные устройства СВЧ.-Киев: Вища школа, 1987.-68 с.
3. Взятыхшев В.Ф., Ильченко М.Е. Объемные СВЧ резонаторы: принципы, конструкции и свойства, перспективы и проблемы// Межведомств. тем. сб.-М.:МЭИ.-1983.-С.5-19.
4. Безбородов Ю.М., Нарытник Т.Н., Фёдоров В.Б. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах.-Киев: Техника, 1989.-184 с.
5. Капилевич Б.Ю. Волноводные диэлектрические фильтры.-М.: Связь, 1980.-137 с.
6. Капилевич Б.Ю., Трубахин Е.Р. Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры: Справочник.-М.:Радио и связь, 1990.- 272 с.
7. Татарчук Д.Д. Частотно-селективные структуры на основе тонких диэлектрических резонаторов / Д.Д. Татарчук // Electronics and Communications. – 2016. – Т. 21. – №3(92). – С. 6–9.
8. Ильченко М.Е., Кудинов Е.В. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ.-Киев:Изд. Киевского университета, 1973.-175с.
9. Ильченко М.Е., Мелков Г.А., Мирских Г.А. Твердотельные СВЧ фильтры.-Киев: Техника, 1977.-120с.
- 10.Ильченко М.Е. Принцип улучшения частотной избирательности диэлектрических фильтров СВЧ// Изв. вузов СССР. Сер.Радиоэлектроника.-1985.-N12.-С.53-54.
11. Татарчук Д. Д. Комбіновані структури НВЧ з діелектричним резонансом Е-типу [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.27.01 : захищена 29.01.2001 / Татарчук Дмитро Дмитрович. — К., 2000. — 170 с.
- 12.Пьезоэлектрическая перестройка частоты диэлектрических резонаторов КВЧ/ С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, Ю.И. Якименко, С.А. Селиванов// Электронная техника. Сер.Электроника СВЧ.- 1988.-Вып.7(411).-С.6-10.

13. Возможности электромеханической перестройки колебательных систем СВЧ/ Ю.И. Якименко, С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник, С.А. Селиванов// Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника.- 1988.-N10.-С.50-56.
14. Иванов И.В. О применении сегнетокерамических пленок в нелинейных системах сверхвысоких частот// Изв. АН СССР. Сер. физическая.-1965.-Т.29.-N11.-С.2116.
15. Проблемы электрической перестройки миниатюрных диэлектрических резонаторов и резонансных структур/ Алексейчик Л.В., Плохих Н.А.// Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. 25-27 октября 1988.-Тбилиси, 1988.-С.69-71.
- 16.Д. Д. Татарчук Добротность составных диэлектрических резонаторов с Е- типом колебаний // Электроника и связь.-1998.-№5.-С.117-119.
- 17.Микроэлектронные устройства СВЧ / Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Кинин В.В. и др. К.: Техніка, 1984.-184 с.
- 18.Гусаков В.В., Кац Л.И., Сафонов А.А. Физические основы проектирования оптоэлектронных полупроводниковых ВКЧ устройств // Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах » - Тбилиси. 1988. С.184-185.
- 19.Scott M.W., Wu T.E., Butler J.K. Analysis of a Buried Layer Millimeter Wave phase-shifter // IEEE Trans. on MTT.-1987,v.35, №8, p.738-784.
- 20.Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть I. Параметры миниатюрных диэлектрических резонаторов на СВЧ и методы их расчета/Л.В. Алексейчик, И.И. Бродуленко, В.М. Геворкян и др.// Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.- М.:ЦНИИ "Электроника".-1981.-Вып.13(832).-96с.
- 21.Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: Численные методы расчёта и проектирования.- М.:Радио и связь, 1984.-248с.
- 22.Войтенко А.Г., Федоров В.Б. Расчет собственных частот открытых диэлектрических резонаторов// Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.- Вып.6(318).-1980.-С.83-87.

- 23..Mongia R.K., Bhat B. Accurate resonant frequency of cylindrical dielectric resonators using a simple analytical technique // Electronic letters: V.21.-1985.- No.11.-P.479-480.
- 24.Van Bladel J. On the resonances of a dielectric resonator of very high permittivity// IEEE Trans.- 1975.-V.MTT-23.-No.2.- P.199-208.
- 25.Van Bladel J. The excitation of dielectric resonators of very high permittivity// IEEE Trans. - 1975. - V.MTT-23. - No.2.- P.208-217.
- 26.Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики.-М.:Сов. радио, 1970.-120с.
- 27.Цибизов К.Н., Борисов С.А., Безбородов Ю.М. Методы расчета резонансных частот диэлектрических резонаторов// Зарубежная радиоэлектроника.-1981.- N11.-С.21-34.
- 28.Кузнецов В.А., Лерер А.М., Михалевский В.С. Резонансные частоты дисковых диэлектрических резонаторов// Радиотехника и электроника.-1984.-N 11.- С.2124-2128.
- 29.Никольский В.В., Никольская Т.И.Состояние и перспективы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ// Проблемы интегральной электроники СВЧ: Тез. докл. Всесоюз. науч.- техн. конф. 4-6 апреля 1984.-Ленинград.-1984.-С.213.
- 30.J.-G. Ma "Wave Propagation Properties in High - Temperature Superconducting Parallel - Plate Wave guides", IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , vol. 9, No 5, may 1999, pp. 183-185.