

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

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис) _____ (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

з напряму підготовки _____ **6.050801 Мікро-та наноелектроніка**
(код і назва)

на тему: фільтр на основі діелектричного резонатора _____

Виконав (-ла): студент (-ка) ____ 4_ курсу, групи _____ ДП-52 _____
(шифр групи)

Слюсар Олег Васильович _____ (підпис)
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник Свечніков Георгій Сергійович _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

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

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

Консультант з НВЧ-фільтрів доц. к.т.н. Татарчук Д.Д. _____

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

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019__ року

Завдання на дипломний проект, дипломну роботу

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет електроніки _____
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 6.050801 “Мікро- та наноелектроніка” _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

Слюсару Олегу Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) фільтр на основі діелектричного резонатора _____

керівник проекту (роботи) Свечніков Георгій Сергійович _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ___ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 4 червня 2019 року _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Смугозагороджувальний фільтр _____

Центральна частота $f_0=8,62$ ГГц _____

Перебудова частоти $\geq 10\%$ _____

Матеріал резонатора АЛТК _____

Керуюча напруга не більше 300 В _____

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

Огляд методів керування резонансною частотою ДР. Вибір конструкції фільтру. Розрахунок параметрів фільтру. Експериментальна перевірка отриманих результатів. _____

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

Способи керування резонансними частотами діелектричних резонаторів.

Постановка задачі розрахунку резонансних частот ДР з Е-типом коливань.

Конструкція

фільтра. Результати експериментальних досліджень. _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
НВЧ-фільтри	Доцент Татарчук Д.Д.		

7. Дата видачі завдання 8.04.2019 _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури за темою	22.04.2019	
2	Огляд методів керування частотами	29.04.2019	
3	Розробка конструкції фільтра	06.05.2019	
4	Розрахунок	13.05.2019	
5	Експериментальні дослідження	20.05.2019	
6	Обговорення результатів досліджень та написання дипломної роботи	25.05.2019	

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

З М І С Т

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
В С Т У П	7
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО МІКРОХВИЛЬОВИМ ФІЛЬТРАМ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ	10
1.1. Основні положення	10
1.2. Коаксіальні фільтри	14
1.3. Хвилеводні фільтри	15
1.4. Планарні смужкові фільтри	22
1.5. Фільтри на основі діелектричних резонаторів	36
1.6. Малогабаритні металокерамічні фільтри	49
2. КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ З Е-ТИПОМ КОЛИВАНЬ	54
2.1. Класифікація та області застосування резонансних пристроїв НВЧ	54
2.2. Керовані фільтри на основі комбінованих діелектричних резонаторів із Е - типом коливань	56
ВИСНОВКИ.....	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ	- амплітудно-частотна характеристика
ДР	- діелектричний резонатор
ДКР	- діелектричний комбінований резонатор
ІЛП	- інтегральна лінія передачі
КЛ	- копланарна лінія передачі
КП	- коефіцієнт підсилення
КСХН	- коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі
ЛП	- лінія передачі
МКФ	- металокерамічні фільтри
МСЛ	- мікросмуужкова лінія
НВЧ	- надвисокі частоти
НГЧЗ	- нерівномірність групового часу затримки
ПЧ	- проміжна частота
СФ	- смугопрпускний фільтр
СЗФ	- смугозагороджувальний (режекторний) фільтр
ФВЧ	- фільтр верхніх частот
ФНЧ	- фільтр нижніх частот
ФЧХ	- фазо-частотна характеристика
ЦДР	- циліндричний діелектричний резонатор

АНОТАЦІЯ

В дипломному проекті представлено результати аналітичного огляду схемо-технічних принципів побудови та функціонування частотно-вибіркових пристроїв, що знаходять широке застосування в сучасних мікрохвильових телекомунікаційних пристроях, та обґрунтування доцільності створення НВЧ-фільтрів на основі діелектричних резонаторів.

Приведено результати розробки та дослідження керованих НВЧ-фільтрів на основі діелектричних резонаторів. Запропоновані конструкції фільтрів з електромеханічним (п'єзоелектричним) керуванням частотою міліметрового та сантиметрового діапазонів відрізняються від існуючих кращими масо-габаритними характеристиками, більшою швидкістю і більшим діапазоном перестроювання частоти (до 30 %).

ANNOTATION

The diploma project presents the results of an analytical review of circuit-technical principles of the construction and operation of frequency-selective devices that are widely used in modern microwave telecommunication devices, and the substantiation of the feasibility of creating microwave filters based on dielectric resonators.

The results of development and research of guided microwave filters based on dielectric resonators are presented. The proposed designs of filters with electromechanical (piezoelectric) control of the frequency of millimeter and centimeter ranges differ from the existing best-weight-dimensional characteristics, higher speed and a large frequency rebuilding range (up to 30%).

ВСТУП

У результаті розвитку інноваційних технологій виникла всеохоплююча інформаційна мережа, що докорінно змінило сучасний світ. Не тільки ефективність, а й надійність такої всесвітньої мережі зазвичай залежить від якості засобів зв'язку, а це передбачає розробку якомога дешевшого та ефективнішого обладнання. Полосозагороджуючі (режекторні) фільтри займають важливу нішу в їх розвитку. У передових мікрохвильових пристроях телекомунікації фільтри використовують для того, щоб забезпечити одночасно роботу як приймача, так і передавача на одну антену; запобігання потрапляння в антену електромагнітних коливань гетеродина, адже їх випромінювання може перешкоджати іншим радіоелектронним засобам; для того, щоб захистити перші каскади приймача від значних зовнішніх перешкод; послаблення сили шумового впливу гетеродина на змішувач; для того, щоб обмежити спектр випромінювання передавача і в результаті виконати вимоги електромагнітної сумісності.

У залежності від різновиду використаних елементів зазвичай мікрохвильові фільтри поділяють на смужкові, коаксіальні, хвилеводні, твердотільні.

Смужкові та коаксіальні фільтри мають меншу масу й габарити, ніж хвилеводні, проте їм властиві значні втрати й менша пропускна потужність.

У хвилеводних фільтрів втрати в смузі пропускання порівняно малі, вони здатні витримати високі рівні потужності, однак їх і габаритні розміри та маса вважаються досить великими.

Твердотільні фільтри у свою чергу мають менші втрати, розміри та пропускну потужність. Розглядаючи цей тип, особливо цікавими вважають діелектричні резонатори, що характеризують малими габаритами і масою, високою добротністю, стійкістю до різноманітних дестабілізуючих впливів, а

також надійністю та довговічністю. Вони широко застосовуються в активних і пасивних резонансних НВЧ-пристроях різного призначення.

Із стрімким розвитком інформаційних технологій з широким використанням засобів зв'язку, неспинно зростають вимоги до їх якості, збільшення технологічності виготовлення та зниження вартості. Більш того, через невідомо зростаючий рівень інтегрування засобів зв'язку, збільшується потреба в оволодінні новими частотними діапазонами, що без сумніву сприяє розвитку інноваційних проектів у сфері НВЧ-пристроїв. Саме тому все частіше постає питання створення ряду нових селективних НВЧ-приладів, які будуть здатні демонструвати такі покращені характеристики, як технологічність та економічність виготовлення, широкий діапазон керування резонансною частотою.

Мета роботи: розробка конструкції керованого фільтра з заданими характеристиками.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- на основі аналізу існуючих конструкцій фільтрів НВЧ обрати конструкцію фільтра і метод керування його характеристиками;
- провести розрахунок параметрів фільтру;
- провести експериментальну перевірку обраної конструкції.

Об'єкт дослідження: фільтри НВЧ з керованими характеристиками

Предмет дослідження: електродинамічні властивості фільтрів НВЧ з керованими характеристиками.

1.ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО МІКРОХВИЛЬОВИМ ФІЛЬТРАМ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

1.1. Основні положення

Фільтрами НВЧ називають лінійні чотиріполюсники, які здійснюють передачу коливань НВЧ від джерела(генератора) до узгодженого навантаження відповідно до заданої частотної характеристики. Фільтри використовуються у сучасних телекомунікаційних мікрохвильових системах для виокремлення спектра випромінювання передавача на спільну антену з метою виконання вимог електромагнітної сумісності, забезпечення одночасного функціонування передавача й приймача на одну спільну антену, запобігання потрапляння в антену електромагнітних коливань гетеродина, адже їх випромінювання може перешкоджати іншим радіоелектронним засобам; для того, щоб захистити перші каскади приймача від значних зовнішніх перешкод та послаблення сили шумового впливу гетеродина на змішувач. Також відоме їх використання з метою узгодження комплексних навантажень на широких смугах, а також визначення частот радіоелектронних засобів, котрі працюють завдяки гребінчастому фільтру, перестроюваному фільтру або навіть набору фільтрів.

У залежності від різновиду використаних елементів зазвичай мікрохвильові фільтри поділяють на смужкові, коаксіальні, хвилеводні, твердотільні. Смужкові та коаксіальні фільтри мають меншу масу й габарити, ніж хвилеводні, проте їм властиві значні втрати й менша пропускна потужність. У хвилеводних фільтрів втрати в смузі пропускання порівняно малі, вони здатні витримати високі рівні потужності, однак їх і габаритні розміри та маса вважаються досить великими. Твердотільні фільтри у свою чергу мають менші втрати, розміри та пропускну потужність.

Під час розробки фільтрів враховують не лише електричні характеристики , а також можливість та зручність перестроювання, що стає необхідним у результаті неоднорідностей матеріалу, впливу корпусу, а також

сумісності конструкції фільтрів з рештою елементів пристрою, у якому вони влаштовані.

Серед важливих параметрів фільтра НВЧ виділяють загасання, яке вноситься до тракту, а також нерівномірність групового часу затримки, яке визначають фазочастотною характеристикою фільтра. Смуга частот, де спостерігається мале допустиме загасання відома як смуга пропускання, а ділянку з великим загасанням натомість називають смугою затримки.

У залежності від взаємного розташування смуги пропускання та затримки вирізняють такі частото-вибіркові пристрої як фільтри нижніх частот, фільтри верхніх частот, смугові та загороджувальні фільтри.

Амплітудно-частотна характеристика фільтра визначається залежністю його згасання $L = 10 \lg(P_{\text{вх}} / P_{\text{вих}})$ від частоти, де $P_{\text{вх}}$ – потужність сигналу на вході фільтра, а $P_{\text{вих}}$ – потужність сигналу на виході фільтра. Така ж залежність при вираженні через S -параметри має вигляд $L = -20 \lg(S_{21})$.

Фільтри класифікують також за шириною смуги пропускання. Якщо фільтр має смугу пропускання до 3% , то його називають вузькосмуговим, від 3% до 10% - середньосмуговим і зрештою понад 10%- широкосмуговим.

Синтез фільтра СВЧ відбувається в два етапи. Перший з них – структурний синтез, що має на увазі вибір елементної бази, складу та структури приладу НВЧ. Це означає, що на основі заданої АЧХ визначають схему фільтру-прототипу, що має зосереджені параметри. На другому етапі відбувається параметричний синтез, метою якого є визначення значення параметрів конструктивних елементів обраної структури, що забезпечують задану частотну характеристику, тобто здійснюється реалізація фільтра-прототипу завдяки схемі з розподіленими параметрами.

Облік дисипативних втрат в елементах фільтра є одним з ключових факторів при розробці мікрохвильових фільтрів. У техніці низьких частот є можливість управління формою АЧХ за теплових втрат методом передспотворення, однак він є непридатним у діапазоні надвисоких частот,

адже призводить до посиленого загасання, погіршеного узгодження, а також введення перепадів опору на вході та виході фільтра.

Тому був реалізований двоетапний метод синтезу фільтра, що включає проектування фільтра без втрат та аналіз їх впливу, що дало можливість врахувати втрати заздалегідь.

На даний момент при синтезуванні фільтрів НВЧ знайшов найбільш широке застосування спосіб, у якому спершу використовується простий метод розробки без урахування втрат, а згодом машинний аналіз отриманої частото-вибіркової структури на основі моделей з урахуванням втрат. Завдяки високому рівню розвитку програмного забезпечення та обчислювальної техніки цей спосіб вважається досить простим. Варто зазначити, що при машинному аналізі нерідко використовують чітко визначені електродинамічні моделі елементів фільтрів, завдяки чому підвищується результативність такого способу.

Серед фільтрів НВЧ також вирізняють фільтри, що розташовані на виході або на вході генератора системи або високочастотної частини приймача та ті, що безпосередньо впливають на формування як АЧХ, так і ФЧХ на проміжних частотах.

У високочастотному відділі приймачів мікрохвильових телекомунікаційних пристроїв використовують три основні типи смугових фільтрів: сигнальний фільтр на вході тракту прийому, який мінімізує втрати в смузі пропускання, придушує сигнал передавача і побічних каналів прийому; фільтри гетеродина й передавача, котрі мають більш вузькі смуги пропускання й великі втрати, ніж сигнальний фільтр. Фільтр передавача використовують для придушення побічних та позасмугових випромінювань передавача, а фільтр гетеродина натомість для мінімізування шумів та гармонік гетеродина. З метою реалізації високочастотних фільтрів такого типу застосовують об'ємні конструкції резонансних елементів, які відомі високою добротністю, що в результаті забезпечує прямокутність АЧХ фільтра.

Щодо фільтрів тракту проміжних частот, ключовою вимогою є низькі втрати в смузі пропускання, загасання на тих частотах, що є сусідніми каналам прийому, висока прямокутність амплітудно-частотної характеристики, та малі фазові спотворення в смузі пропускання. Найбільш вагомим є вихідний фільтр приймача, який у свою чергу закінчує формування АЧХ тракту, тому зазвичай такі фільтри оснащують коректором НГЧЗ.

1.2. Коаксіальні фільтри

У наші дні коаксіальні фільтри використовують значно рідше, ніж фільтри інших типів. Фільтри на мікросмугових, об'ємних хвилеводних і діелектричних резонаторах практично витіснили смугово-пропускні фільтри на основі коаксіальних резонаторів [2].

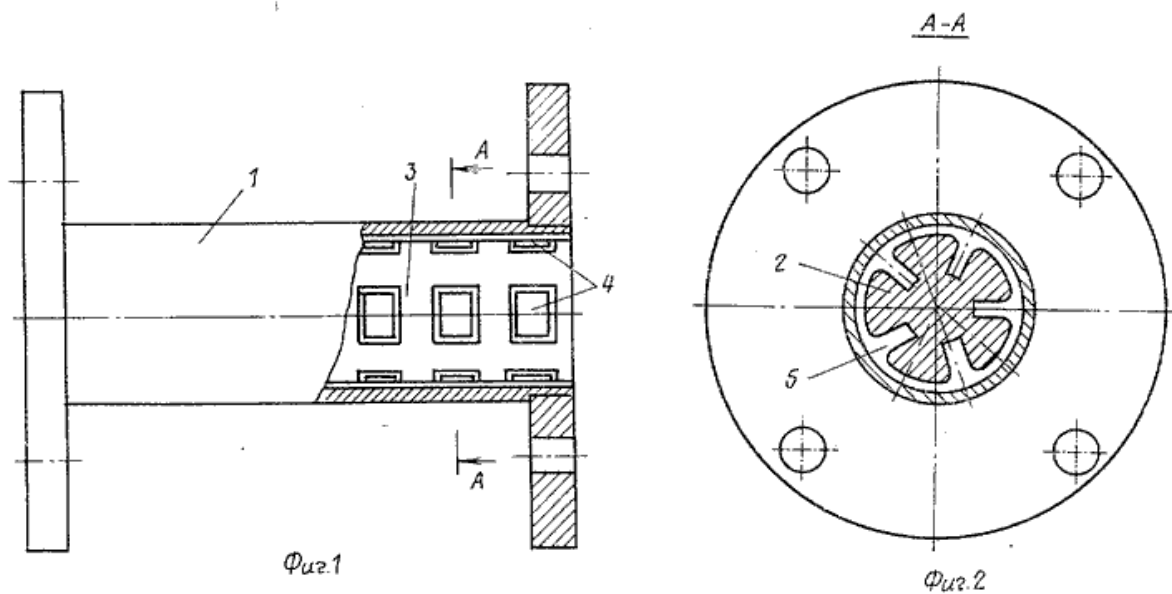


Рис.1.1 Конструкція коаксіального фільтра нижніх частот: 1-зовнішній провідник, 2-центральный провідник, що має ділянки 3 та 4 з меншим та більшим діаметрами відповідно, 5-радіальний паз виконаний на центральному провіднику 2 на ділянці з більшим діаметром 4.

Створення фільтрів нижніх частот (рис.1.1) вважають одним з основних застосувань коаксіальних фільтрів в об'ємних конструкціях генераторних та перетворювальних пристроїв діапазонів НВЧ та ВВЧ.

Серед переваг таких фільтрів варто виділити простоту їх виготовлення зі збереженням високої точності допусків на окремі розміри елементів. З іншого боку, коаксіальні фільтри відомі своєю високою металоємністю, великими масо-габаритами у довгохвильовій частині діапазону нижніх частот, де можна спостерігати найбільшу добротність.

1.3. Хвилеводні фільтри

В останній час хвилеводні фільтри все частіше використовують у довгохвильовій частині ВВЧ-діапазону та короткохвильовій частині НВЧ-діапазону хвиль. Не дивлячись на те, що фільтри на смугових лініях передачі мають гірші характеристики в порівнянні з хвилеводними фільтрами, перші впевнено витіснили останніх з довгохвильової та дециметрової частини НВЧ-діапазону.

Хвилеводні фільтри являють собою з'єднання ряду хвилеводних резонансних елементів, між якими встановлюється чвертьхвильовий або безпосередній зв'язок.

Розглядаючи конструкції фільтрів на основі прямокутних хвилеводів необхідно мати на увазі, що хвилеводи відомі властивостями ФВЧ, адже не пропускають ті частоти, які є нижчими за критичну. Незважаючи на це, за допомогою хвилеводів можна також реалізувати фільтр низьких частот. Щоб досягти цього, необхідно їх виготовляти вафельними(з поперечними та повздожніми канавками у широкій стінці) або рифленими(з канавками у широкій стінці).

Щодо хвилеводних смуго-загороджувальних фільтрів, то в техніці НВЧ їх зазвичай використовують для придушення частот, що є небажаними. Даний тип реалізують як каскадне з'єднання Е- або Н- площинних шлейфів(рис.1.2).

Схему виготовлення таких фільтрів успішно застосовують при синтезі режекторних фільтрів з широкою загороджувальною смугою, але у випадку проектування з вузькою загороджувальною смугою можуть виникати проблеми пов'язані зі складністю практичної реалізації геометричних розмірів шлейфів, особливо у діапазоні вкрай високих частот.

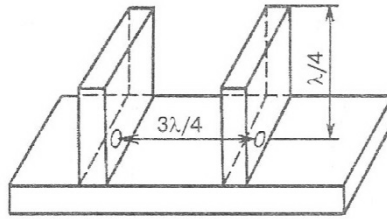
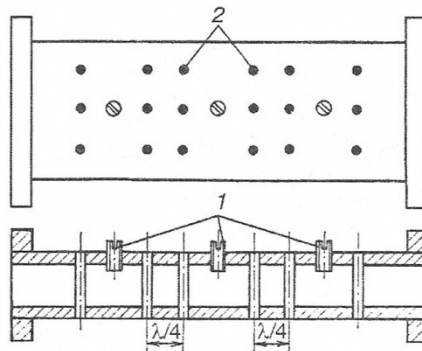


Рис.1.2. Конструкція смуго-загороджувального фільтру на шлейфах

Хвилеводні смуго-пропускні фільтри зазвичай поділяють на конструкції з поздовжніми та поперечними діафрагмами. У якості діафрагм використовують штирі, пластини з різними розмірами й отворами.

Останнім часом усе популярнішими стають смуго-пропускні фільтри на поперечних діафрагмах. Однією з найвідоміших вважають конструкцію виконану на основі прямокутного хвилеводу з використанням чвертьхвильових зв'язків. Ключовим є те, що система ємнісних підстроювальних гвинтів та індуктивних штирів грає роль поперечних діафрагм, що показано на рис.1.3.



**Рис.1.3. Хвилеводний смуговий фільтр з чвертьхвильовими зв'язками:
1- підстроювальні ємнісні гвинти; 2 – індуктивні штирі**

Незважаючи на простоту налаштування та гарну здатність до пропуску напруги, даний фільтр має велику довжину з'єднувальних елементів, що є головним недоліком.

Сучасні смуго-пропускні фільтри з поперечними діафрагмами являють собою ланцюг об'ємних хвилеводних резонаторів, котрі зв'язані резонансними вікнами різних форм, причому є можливою реалізація як одномодового, так і багатомодового режиму роботи деяких резонаторів фільтра. Даному типу фільтрів властива мала кількість втрата у смузі згасання, а також велика прямокутність амплітудно-частотної характеристики, хоча в порівнянні з фільтрами, що мають повздовжню діафрагму вимагається вища точність виготовлення. Завдяки високим значенням загород їх широко застосовують в диплексорах ВВЧ-діапазону.

На рис.1.4. зображені найпоширеніші види смугопропускних фільтрів на основі круглих і прямокутних хвилеводних резонаторів, що зв'язані між собою за допомогою прямокутних і круглих діафрагм.

З метою отримання прийнятної точності під час розрахунку таких фільтрів, рекомендують для прямокутних хвилеводів, що мають прямокутні діафрагми, використовувати такі типи коливань як TE_{mn} - і TM_{mn} - до $m = 5$, $n = 4$ у резонаторних секціях та до $m = 13$, $n = 4$ у секціях діафрагм. Щодо круглих хвилеводів та діафрагм для TE_{11} -типу коливань, то варто зважати на вищі моди (до TE_{121} , TM_{121} у великих , а TE_{115} , TM_{115} у менших круглих секціях хвилевода). Для TE_{01} -типу коливань враховують відповідно TE_{021} та TM_{015} . Для хвилеводного прямокутного фільтру , що має круглі хвилеводні резонатори з TE_{111} -типом коливань, необхідно зважати на такі вищі моди TM_{134} , TE_{134} для прямокутних резонаторних секцій та TE_{121} , TM_{121} , TE_{312} , TM_{312} , TE_{58} , TM_{58} для круглих резонаторних секцій, причому для менших круглих хвилеводних секцій обирають наступні вищі моди: TE_{115} , TM_{115} , TE_{38} , TM_{38} , TE_{54} , TM_{54} .

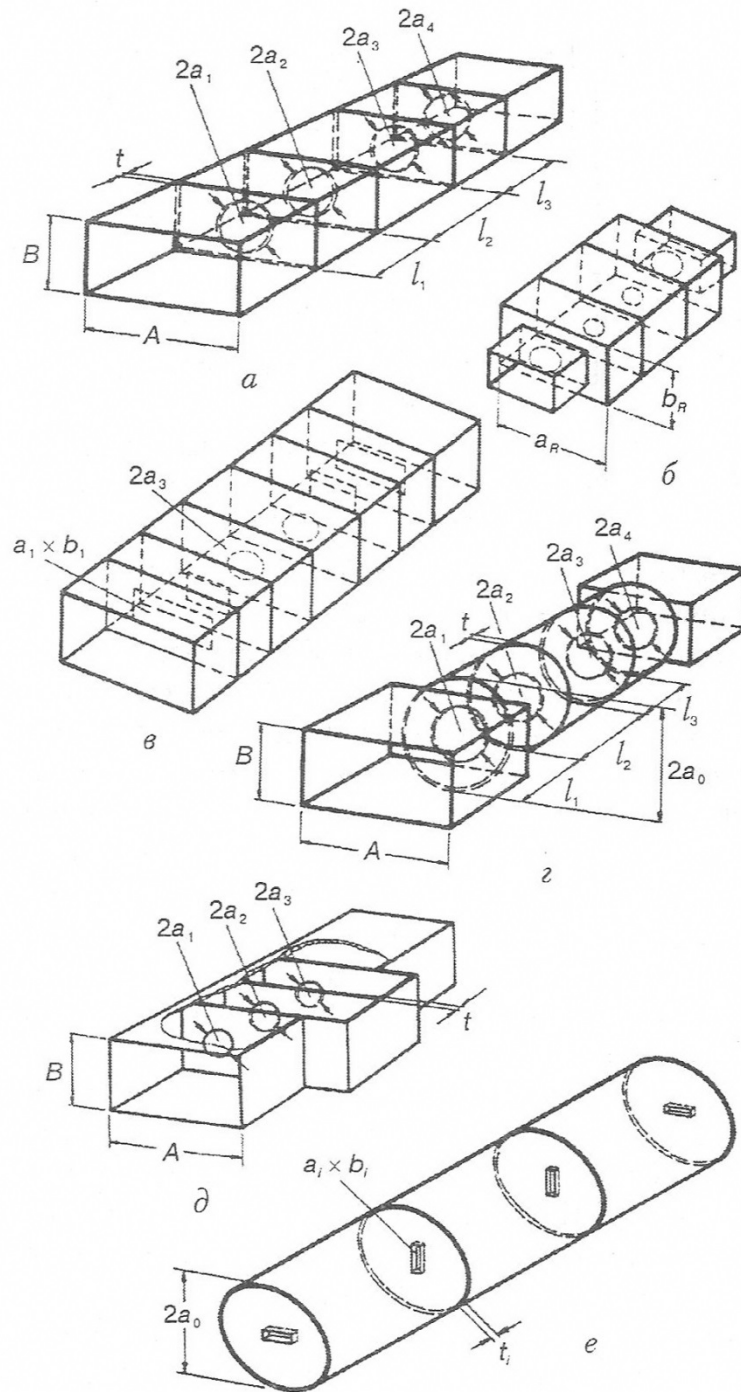


Рис.1.4. Види СФ на основі круглих і прямокутних хвильоводних резонаторів, що зв'язані між собою прямокутними і круглими діафрагмами:

a - хвильоводні прямокутні резонатори зв'язані круглими діафрагмами;

б - прямокутні розширені резонатори зв'язані круглими діафрагмами;

в - хвильоводні прямокутні резонатори зв'язані круглими і прямокутними діафрагмами;

г - хвильоводні круглі резонатори зв'язані круглими діафрагмами;

д - прямокутні асиметричні резонатори зв'язані круглими діафрагмами;

***е* - хвильоводні круглі резонатори з прямокутними діафрагмами**

На рис.1.5. зображені АЧХ трьох-резонаторних СФ з круглими й прямокутними хвильовдними резонаторами та поперечними круглими діафрагмами.

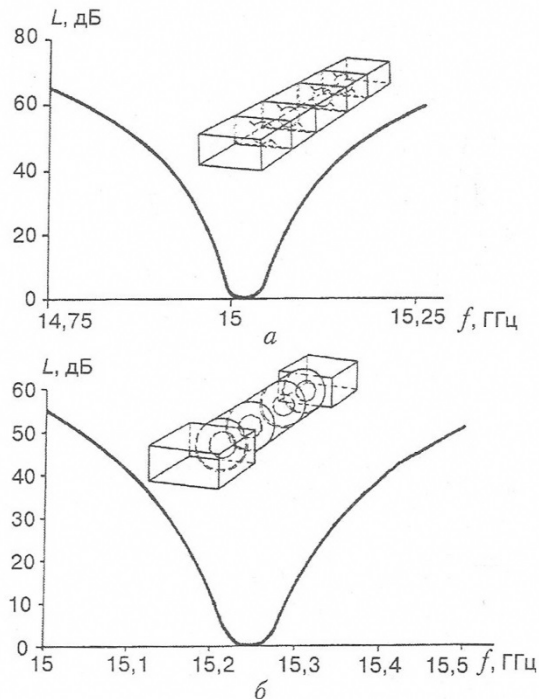


Рис.1.5. АЧХ 3-резонаторних СФ з діапазоном 15 ГГц:

a - прямокутний хвильовдний фільтр зв'язаний круглими діафрагмами (відповідно до рис.1.4, розміри *a* в міліметрах: $A = 15,8$; $B = 7,9$; $t = 0,218$; $a_1 = 2,577$; $a_2 = 1,142$; $a_3 = 1,125$; $a_4 = 2,592$; $l_1 = 12,499$; $l_2 = 12,819$; $l_3 = 12,461$);

б - прямокутний фільтр зв'язані 3 круглими резонаторами та діафрагмами (відповідно до рис.1.4, розміри *г* у міліметрах: $A = 15,8$; $B = 7,9$; $t = 0,192$; $a_0 = 6,985$;

$a_1 = 3,208$; $a_2 = 1,695$; $a_3 = 1,695$; $a_4 = 3,205$; $l_1 = 16,605$; $l_2 = 17,219$; $l_3 = 16,599$)

Хвильовдний прямокутний СФ фірми СМС (м. Единбург, Сполучене Королівство) серії P/N 406670 з діапазоном частот 37...40 ГГц (хвильовід WR 28) з розмірами 47,5 * 19 * 19 мм зображений на рис.1.6.

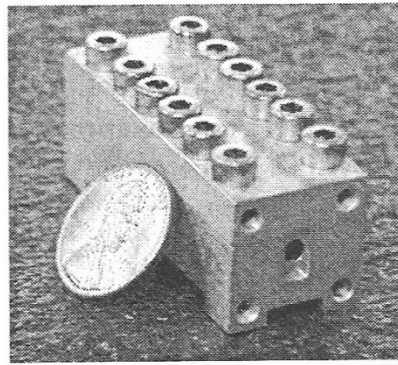


Рис.1.6. Хвилеводний прямокутний СПФ фірми СМС

(м. Единбург)серії P/N діапазону частот 37...40 ГГц

Параметри:

Мінімальна смуга пропускання, МГц.....	350
Максимальні втрати на центральній частоті фільтру, дБ.....	1,2
Максимальна нерівномірність в смузі пропускання, дБ.....	0,5
КСХН у смузі пропускання, не більше.....	1,3
Загасання при відстроюванні від центральної частоти на ± 525 МГц, дБ.....	55

Інша фірма Lorch Microwave пропонує широкий вибір хвилеводних фільтрів з наступними основними характеристиками:

Діапазон робочих частот, ГГц.....	4... 40
Смуга пропускання, %.....	0,5... 5,0
Кількість секцій.....	2... 8
Максимальний КСХН.....	1,5
Середній рівень потужності, Вт.....	1

Рівень загасання фільтрів можна визначити з рис.1.7. У радіотехнічних системах, що працюють на двох взаємно ортогональних поляризаціях, знаходять застосування СПФ на плоскопоперечних неоднорідностях в круглому хвилеводі з азимутально-неоднорідним типом хвилі H_{11} .

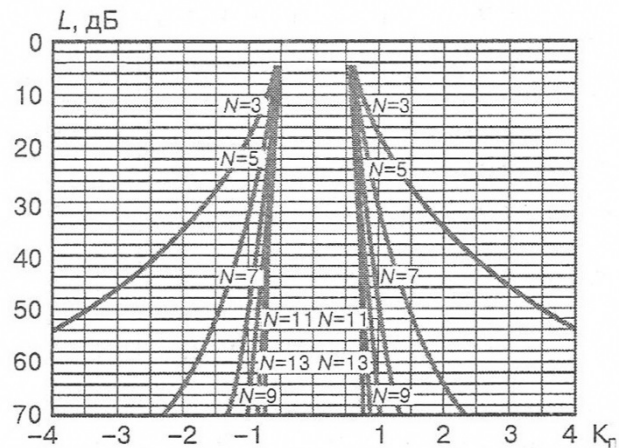


Рис.1.7. Залежність загасання L від відносної відстройки K_r , рівною кількості смуг пропускання по рівню мінус 3 дБ від центральної частоти фільтру, для різного числа секцій N

Смугові фільтри з поздовжніми стрічковими діафрагмами (E -площинні фільтри), що розташовані в поздовжньому перетині прямокутного хвилеводу паралельно його вузькій стінці, вважають найбільш технологічними. Така конструкція фільтру не лише проста у виготовленні, а також відома зменшеними втратами в ній завдяки розрідженню просторового спектра поля, бо хвилі, що мають парні номери при падінні хвилі H_{10} , не збуджуються.

На рис. 1.8 зображена конструкція цього фільтру, що виконано як хвилеводна вставка, що складається з половинок хвилеводу(2), що розрізані по E -площині та мідної стрічки з вікнами(1), що закріплено гвинтами у єдину конструкцію.

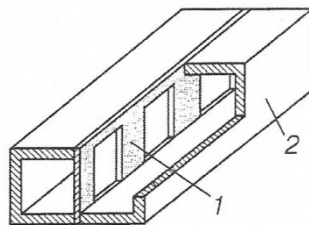


Рис.1.8. Смуговий фільтр виконаний з поздовжньою діафрагмою:

1 - поздовжня індуктивна діафрагма; 2 - хвилевод (корпус фільтру)

1.4. Планарні смужкові фільтри

Останнім часом саме планарні смужкові фільтри використовують як фільтри тракту проміжних частот.

У залежності від інтегральної лінії передачі вирізняють копланарні, мікросмужні, комбіновані, а також підвішені смужкові конструкції фільтрів, причому перші два типи залишаються найпоширенішими НВЧ-пристроями, зважаючи на зручність інтеграції в єдиному технологічному циклі з мікросхемами активних НВЧ-пристроїв, тому на їх основі особливо часто реалізують різні види фільтрів.

Особливістю є те, що у якості реактивних елементів використовують розімкнені або короткозамкнені відрізки смужкової лінії, що при довжині, яка менша, ніж чверть довжини хвилі, вважаються резонансними та еквівалентними послідовному й паралельному коливальному контуру залежно від того, чи є вони розімкненими або зімкнутими на кінці. Для виготовлення таких фільтрів використовують технологію прецизійної фотолітографії, завдяки чому забезпечується висока точність передачі характеристик. З іншого боку, через невисоку термостабільність резонаторів і добротність смужкових фільтрів є практично неможливою реалізація на їх основі вузькосмугових СФ з великою прямокутністю та малими втратами в діапазоні ВВЧ та короткохвильовій частині діапазону НВЧ. Для подібних цілей як правило більш придатні або хвилеводні, або фільтри на діелектричних резонаторах.

Фільтри з чвертьхвильовими резонаторами відомі завдяки зручності кріплення смужкових резонаторів короткозамкненими шлейфами (рис.1.9). Такі фільтри мають більші ємнісні зазори зв'язку, ніж півхвильові. Мікросхема СФ на основі копланарної лінії передачі, що дозволяє досить легко сполучити центральний провідник із заземленою поверхнею через шлейф, показана на рис.1.10.

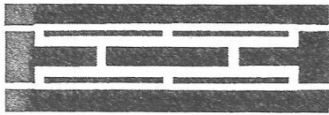


Рис.1.9. Мікросхема СФ на основі зв'язаних КЛ (темне - металізований шар)



Рис.1.10. Смугово-пропускний фільтр на основі КЛ, в якій використовуються чвертьхвильові резонатори (діелектрична підкладка RT-5880 завтовшки 1,57мм) (темне - металізований шар)

Амплітудно-частотні характеристики такого чебишевського п'яти-секційного фільтра зі смугою пропускання 350 МГц отримані експериментально зображено на рис. 1.11.

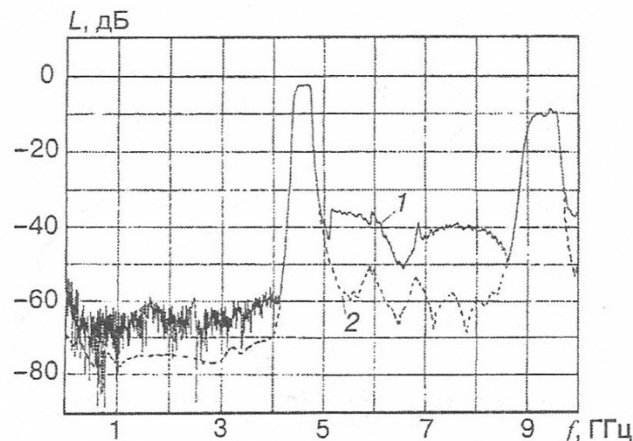


Рис. 1.11. Амплітудно-частотні характеристики СФ на основі КЛ, в якій використовуються чвертьхвильові резонатори:

1 - без поглинаючого матеріалу; 2 - з поглинаючим матеріалом

Власні добротності резонансних секцій (близько 90 Ом) та індуктивних шлейфів при тому, що відстань між земляними смужками рівна 4,5 мм, склали 380 і 100...300 відповідно. Втрати в смузі пропускання не є вищими за 2,5 дБ. Розміщенням поглинаючого матеріалу на екран фільтра можливо досягти збільшення показника загасання фільтра поза його смугою пропускання. Не менш важливим є те, що така конструкція робить можливим реалізацію такого фільтра навіть без діелектрика, адже шлейфи є достатньо жорсткими кріпленнями центральних смуг копланарної лінії передачі. Варто додати, що таким чином можна підвищити добротність резонаторів, а також нівелювати

вплив паразитного каналу діелектричної підкладки, через що знижується загасання фільтра поза його смугою пропускання, але як наслідок значне збільшення розмірів фільтра може стати необхідним.

Фільтри на півхвильових резонаторах з ємнісним зв'язком фактично є розімкненими півхвильовими резонаторами, що послідовно зв'язані торцевими ємностями. Віддаленість між центрами зазорів рівна половині довжини хвилі в інтегральній лінії передачі, а смуга пропускання визначається шириною зазорів. У таких фільтрах широта смуги пропускання забезпечується у випадку сильного зв'язку між резонаторами, що є можливим при великих ємностях, що означає надзвичайно малі розміри зазорів. Як результат технологічних обмежень, що накладають на ширину зазору, реалізовані смуги пропускання як правило є не вищими за 20 %.

Найбільш вузьким місцем даного типу фільтрів вважають зазор між смужками на краях фільтру, де необхідна реалізація сильного зв'язку, через що виникла потреба в реалізації ряду конструкцій. На рис.1.12 зображена полікорова мікросхема, що має розміри 48x30x1 мм 4-резонаторного СФ на півхвильових резонаторах, що мають торцевий зв'язок з діапазоном 1,4 ГГц. Завдяки встановленню керамічної ємності (1 пФ) над крайовими торцевими зазорами реалізується сильний зв'язок.

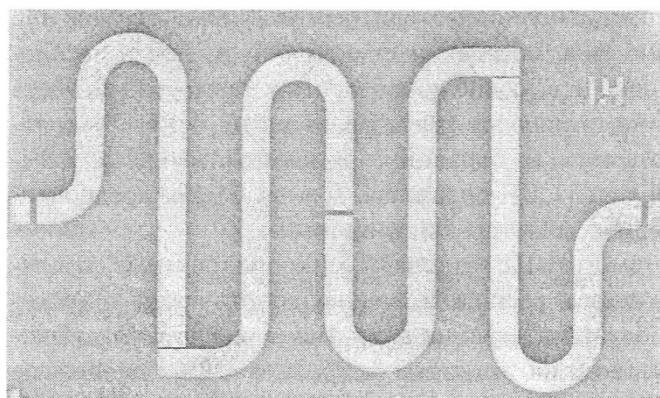


Рис.1.12. Мікросхема 4-резонаторного СФ на півхвильових мікросмужкових резонаторах з торцевим зв'язком діапазону 1,4 ГГц

Основні параметри СФ

Центральна частота смуги пропускання, ГГц.....	1,4
Смуга пропускання за рівнем -1 дБ, МГц.....	28

Втрати на центральній частоті фільтру, дБ, не більше.....2,5
 Загасання при відстроюванні на ± 60 МГц, дБ, не менше.....35

З іншого боку, запропонована конструкція використовує навісний елемент, який не дозволяє реалізувати готовий СФ у результаті одного технологічного циклу(фотолітографії). Також варто враховувати, що у стандартних керамічних конденсаторів чітко встановлені ємності, котрі неможливо змінювати для досягнення певних параметрів зв'язку. Саме тому було запропоновано використовувати не звичайну ємність (зазор між провідниками), а планарну структуру конденсатора на зустрічних штирях(рис.1.13).

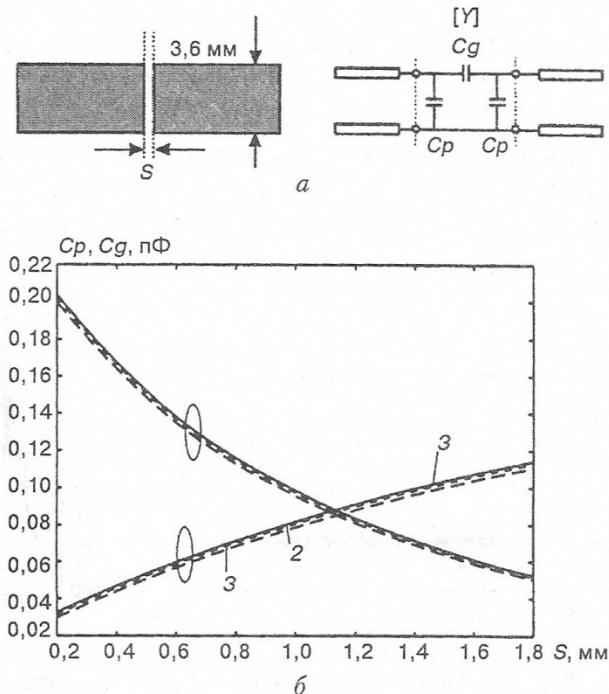


Рис.1.13. Ємнісний зазор в МСЛ і його еквівалентна схема(а), а також залежність реактивностей елементів схеми від величини зазору (б) (підкладка завтовшки 1,27 мм і $\epsilon_r = 10,2$); f , ГГц: 1 -3,0; 2 -2,0; 3-1,0

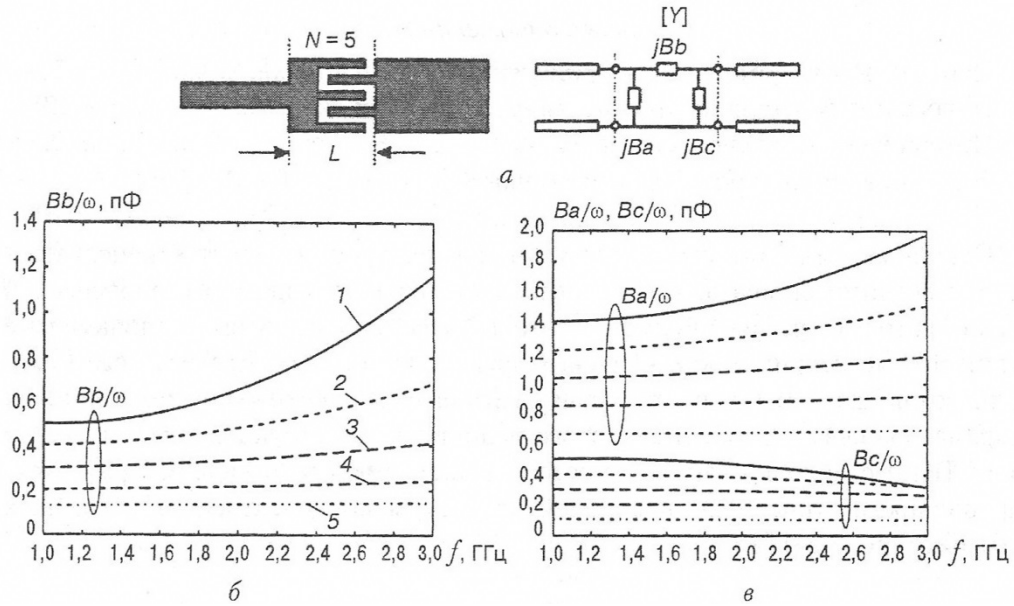


Рис.1.14. Елемент зв'язку на зустрічних штирях та його еквівалентна схема (а); частотні залежності реактивностей елементів схеми (б і в) (підкладка завтовшки

На $\epsilon_r = 10,2$); L, мм:

ДОВЖ 1 – 5,2; 2 – 4,4; 3 – 3,6; 4 – 2,8; 5 – 2,0

2,7%, а також його частотні характеристики у широкій та вузькій смугах частот.

ГИПУ З
СКАННЯ

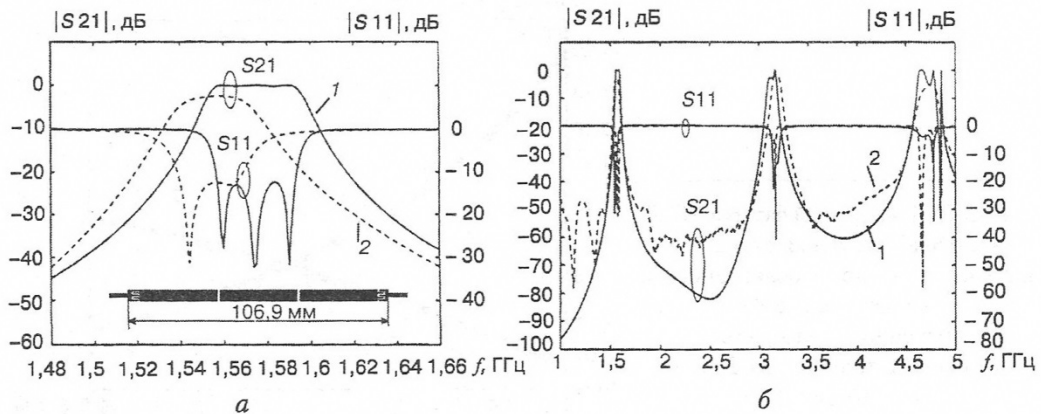


Рис.1.15. Розрахункові (1) і виміряні (2) частотні залежності S-параметрів СПФ з штировими ємностями на кінцях у вузькій (а) і широкій (б) смугах частот

На рис.1.15 представлено, як у ході оптимізації такого фільтра було зменшено його довжину до 68,58 мм введенням структур з закороченим послідовним шлейфом. Кінцева мікросхема СФ, а також параметри наведені на рис.1.16.

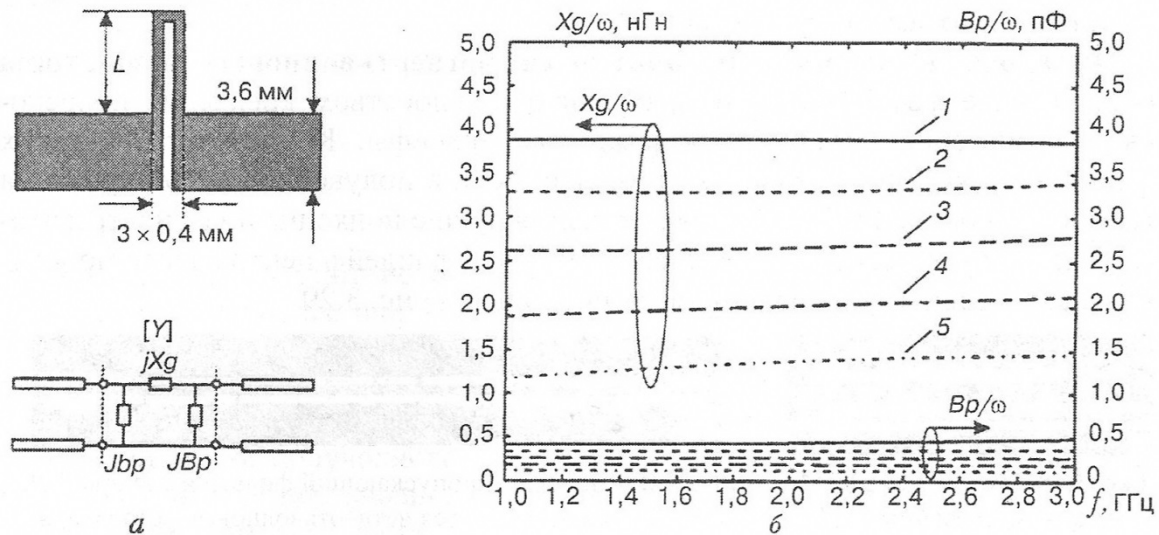


Рис.1.16. Послідовний закорочений шлейф і його еквівалентна схема (а), а також частотні залежності ємнісного і індуктивного елементів схеми (б) (підкладка завтовшки 1,27 мм, $\epsilon_r = 10,2$);

L , мм: 1 - 4; 2 - 3,2; 3 - 2,4; 4 - 1,6; 5 - 0,8

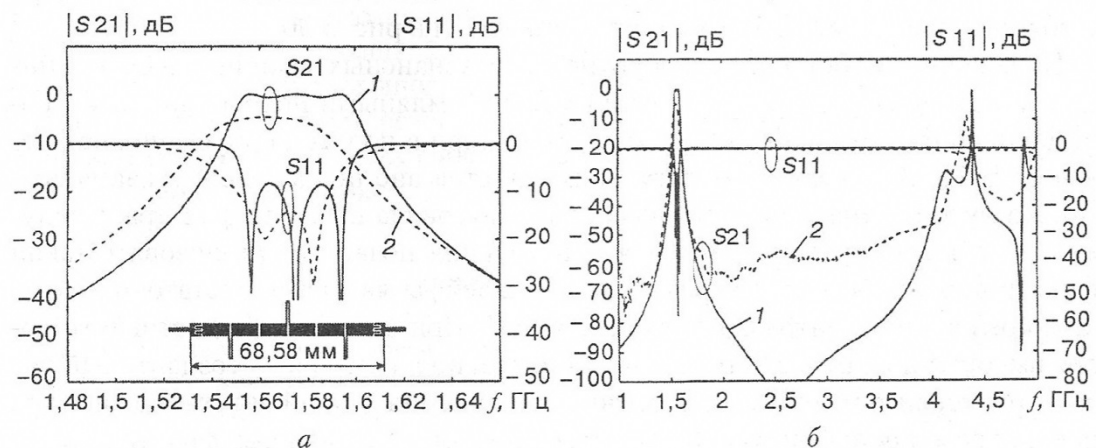


Рис.1.17. Розрахункові (1) і виміряні (2) частотні залежності S-параметрів ППФ з штировими ємностями та послідовними закороченими шлейфами у вузькій (а) і широкій (б) смугах частот

Останнім часом смугові фільтри на зв'язаних лініях найбільш широко використовуються серед мікросмуужних фільтрів НВЧ, а саме через наявність численних методів проектування таких пристроїв [1, 3, 5, 8, 35,36]. Дані фільтри реалізують як на і зустрічних штирях, так і на півхвильових зв'язаних резонаторах. На рис.1.17 зображені, як в останніх чвертьхвильові зв'язані ІЛП каскадно ввімкнені, причому два їх плеча сполучено сусідніми каскадами, у

той час, як інші два функціонують у режимі короткого замикання або холостого ходу. Кожен з каскадів має довжину, що рівна чверті довжини хвилі на центральній частоті СФ, і хвильові опори парного і непарного коливачь. Фільтри такого типу для вузьких смуг пропускання безперешкодно виконують на МСЛ (рис.1.18 б). При широких відносних смугах пропускання(понад 20%) зазори між провідниками стають надзвичайно малими і як наслідок важко здійснюваними. Більш того, у смуго-пропускних фільтрів на зв'язаних півхвильових резонаторах досить великі габарити, проте шляхом згортання кожного резонатора в меандр вдається зменшувати розміри подібних фільтрів.

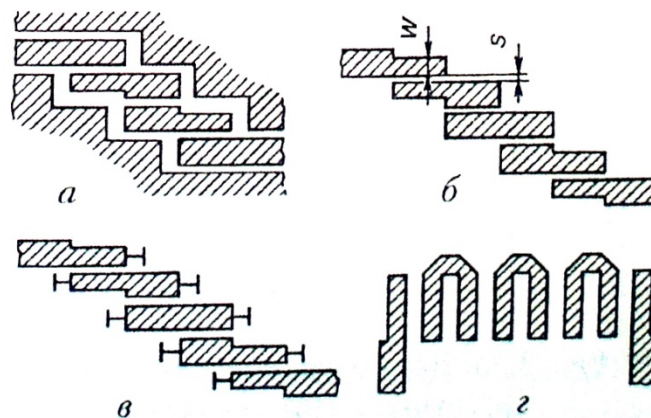


Рис. 1.18. Смуговопроепускні фільтри на паралельно зв'язаних півхвильових резонаторах: а - на КЛ; б - на МСЛ; в - на МСЛ з короткозамкнутими резонаторами; г - на меандрових розімкнених резонаторах

Попри усі переваги цих фільтрів, в області $f = 2f_0$ їм притаманні паразитні смуги пропускання через різницю фазових швидкостей непарного та парного типів коливачь, а також неможливість створення вузьких смуг пропускання через різке зростання втрат, що робить мінімальну смугу пропускання близько 5%. На рис.1.19 зображено АЧХ даного фільтра.

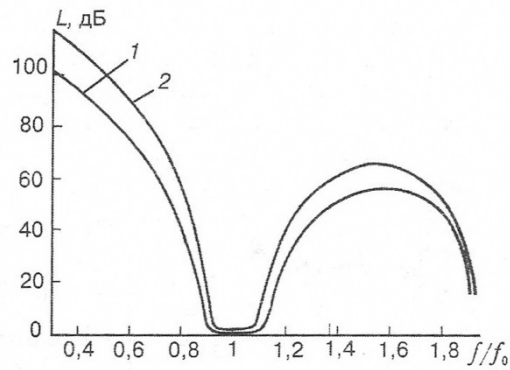


Рис.1.19. Ідеальна АЧХ фільтру на паралельно зв'язаних півхвильових мікросмужних резонаторах з максимально плоскою характеристикою (добротність резонаторів - 200):

$$1-; 2- \Delta f / f_0 = 15\%$$

Завдяки об'єднанню фільтрів на зв'язаних та півхвильових резонаторах з торцевими зв'язками вдалося створити нову схему СФ з діапазоном 60 ГГц [2]. Фільтр є сформованим на полікоровій підкладці товщиною 0,15 мм з $\epsilon_r = 8,9$, ширина вихідної і вхідної МСЛ рівна 150 мкм, в той час як загальна площа не перевищує 1x1 мм. На рис.1.36 преставлені топологія, еквівалентна схема та частотні залежності S -параметрів такого фільтру.

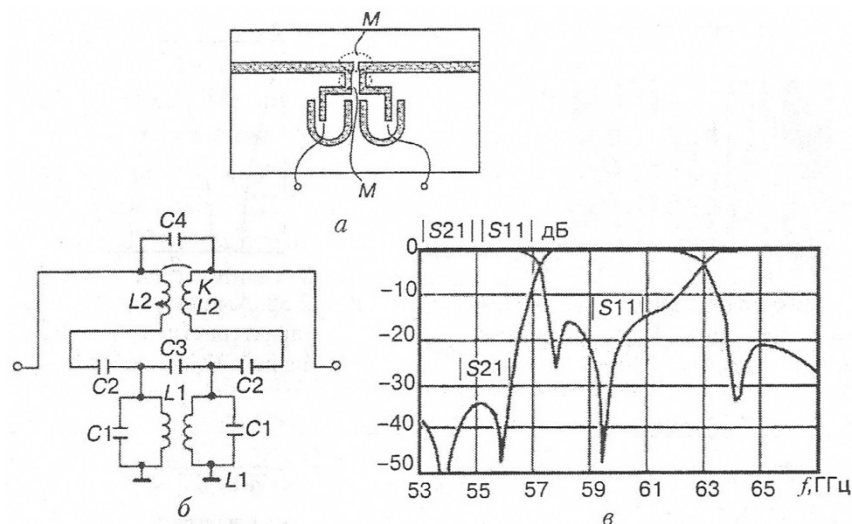


Рис.1.20. Мініатюрний мікросмужковий СФ діапазону 60 ГГц:

a - мікросхема фільтру (*M* - зони максимального зв'язку);

б - еквівалентна схема фільтру ($C4 = 0,002618$ пФ; $K = 0,2913$;

$L2 = 1,255$ нГн; $C3 = 0,005950$ пФ; $C2 = 0,005513$ пФ; $C1 = 0,8811$ пФ; $L1 = 0,00750$ нГн); *в* — частотна залежність S -параметрів фільтру

Мініатюрні мікросмужкові фільтри значно перевершують по масогабаритним параметрам фільтри з іншими типами резонаторів, проте є гіршими, ніж останні, за своїми електричними характеристиками. Це пов'язано насамперед з тим, що мікросмужкові резонатори мають порівняно з іншими електродинамічними резонаторами меншу власну добротність. Як наслідок, підвищення селективності мікросмужкових фільтрів стає неможливим завдяки простому збільшенню числа ланок у ньому, адже рівень втрат у смузі пропускання у результаті може стати більшим за допустимий. Через це продовжується пошук та розвиток альтернативних підходів, які могли би посприяти підвищенню селективності фільтрів такого типу. Тому останнім часом іде стрімкий розвиток конструкцій мініатюрних мікросмужкових фільтрів, що побудовані комбінуванням різноманітних типів резонаторів. Дані фільтрам властиві не тільки значні електричні параметри, а й малі розміри в довгохвильовій частині діапазона НВЧ.

На рис.1.21 зображені чотирьох-, шести- та восьмиррезонаторні СФ на півхвильових петлевих резонаторах з розривом, які з точки зору застосування у телекомунікаційних пристроях вважають найбільш цікавими.

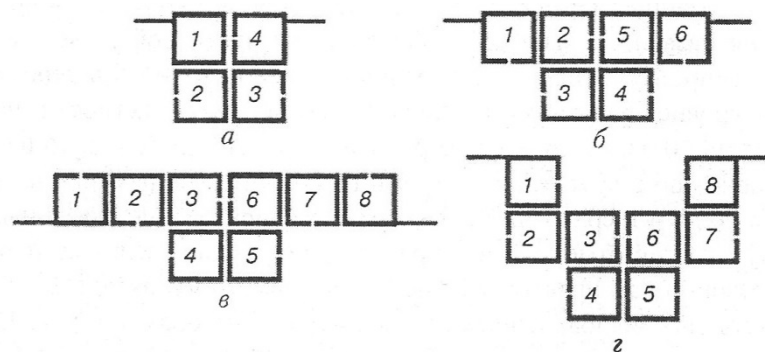


Рис.1.21. Чотирьох- (а), шести- (б) і восьмиррезонаторні (в, з)

У такому фільтрі нескладно створювати міцні зв'язки між резонаторами, що визначають зазорами між резонаторами. Дані фільтри вважають однією з модифікацій звичайного СФ на основі півхвильових резонаторів з торцевим зв'язком. Смугопрпускні фільтри є реалізованими на підкладці товщиною 1,27 мм з $\epsilon_r = 10,8$. АЧХ 6- (рис.1.21, б) і 8-резонаторних фільтрів (рис.1.21, в) у

вузькій і широкій смугах частот показані відповідно на рис.1.22 і 1.23. Розміри цих СФ - 70×84 та 100×34 мм для 6- та 8-резонаторного фільтра відповідно.

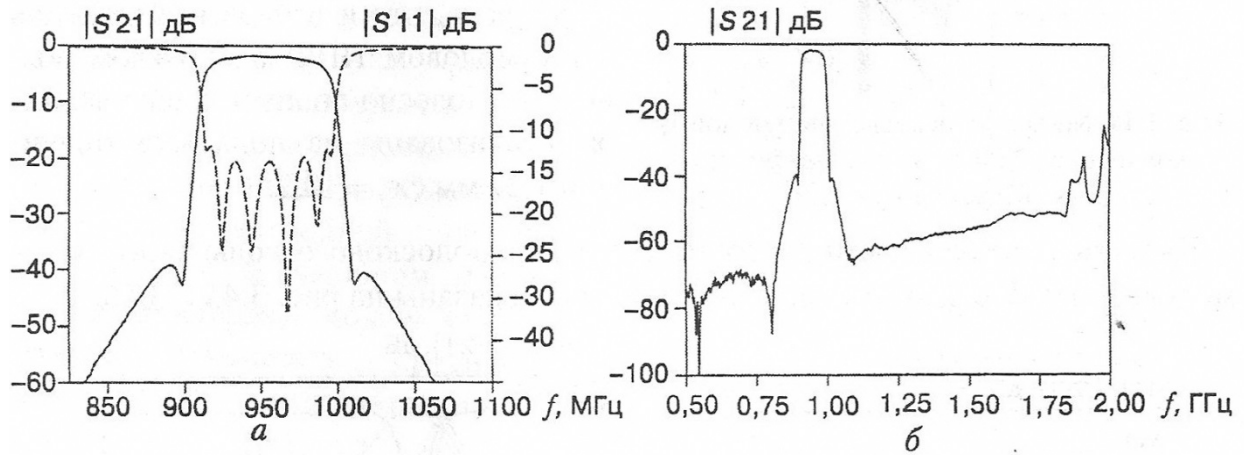


Рис.1.22. Зображена через S -параметри АЧХ 6-резонаторного СФ у вузькій (а) та широкій (б) смугах частот

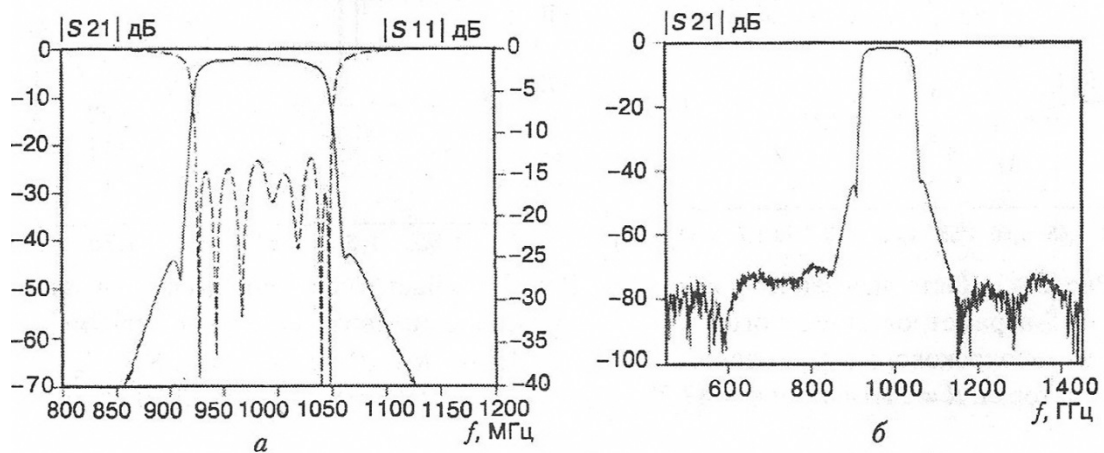


Рис.1.23. Зображена через S -параметри АЧХ 8-резонаторного СФ у вузькій (а) та широкій (б) смугах частот

Подібний двохмодовий фільтр можливо реалізувати також на мікросмушковому кільцевому резонаторі [19], як показано на рис.1.24

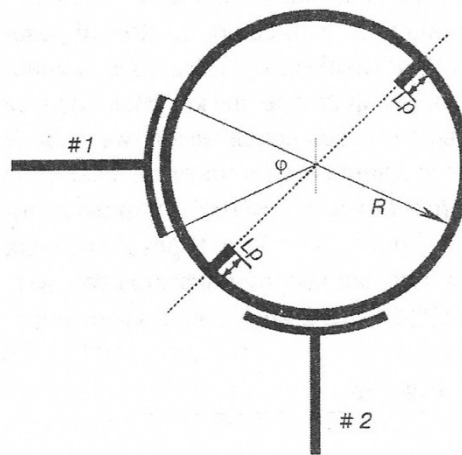


Рис.1.24. Мікросмушковий двохмодовий кільцевий СФ з двома шлейфовими елементами збудження

Такий СФ має дві сигнальні лінії, котрі розташовані на 90° один відносно одного, щоб створити зв'язок із двома виродженими модами, два шлейфових елементи збудження довжиною L_p , які виконують таку ж роль, що й штирі збудження у двомодовому СФ на основі круглого хвилевода. Смугопропускні фільтри, що реалізовані на підкладці товщиною 1,27 мм з $\epsilon_r = 10,2$. На рис .1.25 і 1.46. показані залежності S -параметрів мікросмушкового кільця двомодового СФ з різними значеннями R і φ від частоти.

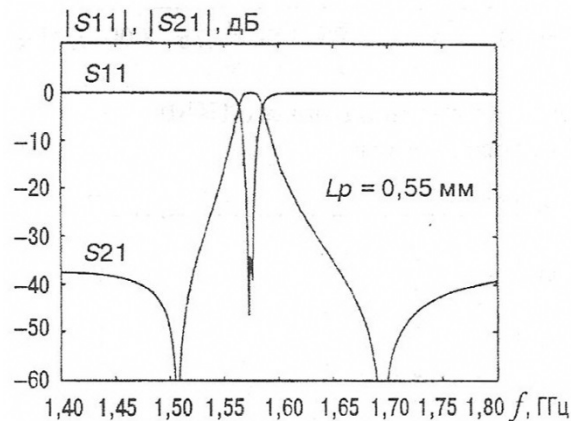


Рис.1.25. Частотна залежність S -параметрів окремого мікросмушкового двохмодового резонатора з $R = 11,15$ мм і $\varphi = 47,2^\circ$

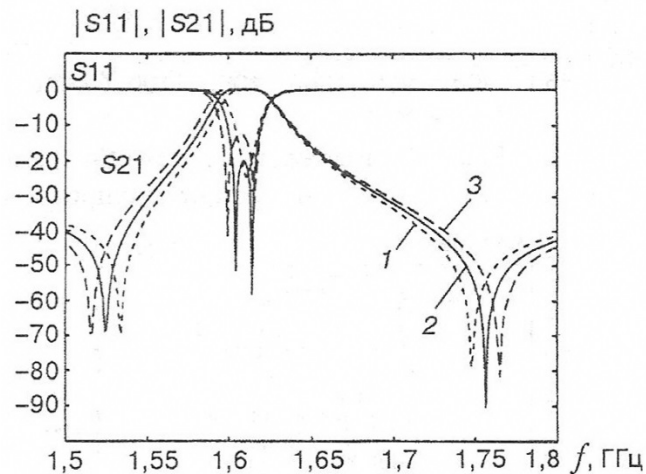


Рис.1.26.Частотна залежність S-параметрів мікросмушкового кільця

двохмодового СФ з $R = 10,90$ мм і $\varphi = 58,8^\circ$; L_p , мм: 1 - 0,65; 2 - 0,75; 3 - 0,85

З вище наведених графіків можна зробити висновок, що мікросмушковому двомодовому фільтру на основі одного кільцевого резонатора властива висока вибірковість, що часто є вищою, ніж у звичайних багаторезонаторних МСЛ-фільтрах, що робить представлену схему досить привабливою для використання в інтегральних НВЧ-пристроях.

Фільтри отримані у результаті мікромініатюризації мікросмушкового фільтра отриманого для резонансних структур, що утворений низькоомними резонаторами, котрі зв'язує ємнісний зв'язок зазору, створеного вздовж торцевих смужок.

Цікаві результати по мікромініатюризації мікросмушкових фільтрів отримані для резонансних структур, утворених низькоомними резонаторами, які зв'язані між собою ємнісним зв'язком зазору, створеного уздовж їх торцевих смужок. Такий фільтр показаний на рис.1.27. Він є діелектричною підкладкою, на одній стороні якої нанесена заземляюча підстава, а на іншій - резонатори 2, короткозамкнені з одного високоомного кінця 3 [2]. Розімкнений кінець кожної з високоомних (вузьких) ділянок сполучений з низькоомною (широким) ємнісною ділянкою 1. Низькоомні ділянки сусідніх резонаторів зв'язані за допомогою електромагнітного поля, переважно індуктивного характеру. До

вихідного і вхідного резонаторів кондуктивно ввімкнуто вхідну 4 і вихідну 5 лінії передачі.

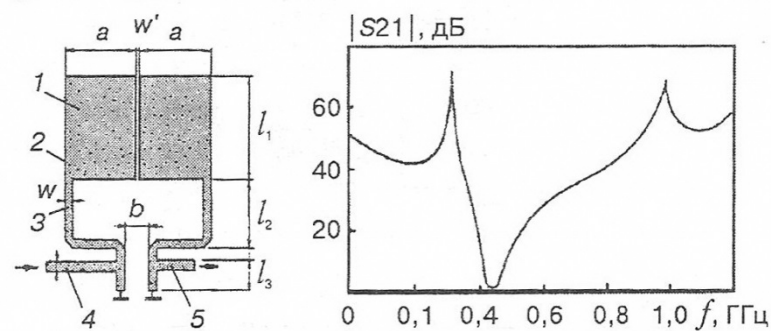


Рис. 1.27. Мініатюрний мікросмушковий фільтр і його АЧХ

Даний фільтр має наступний принцип дії: НВЧ-сигнал надходить через резонатори 3 на вхідну лінію 4, проходячи до вихідної лінії 5. Високоомні складові сусідніх резонаторів 1, що розташовані один від одного на деякій відстані, забезпечують необхідним електромагнітним зв'язком. Йому властивий індуктивний характер, бо основний внесок здійснює магнітна складова поля, котра із ємнісним зв'язком, що притаманний низькоомним ділянкам резонаторів уможливорює утворення резонансного ланцюга зв'язку. Зміни відстані між високоомними або низькоомними ділянками резонаторів дозволяють у широких межах впливати на ємнісну або на індуктивну частини резонансної мережі і на резонансну частоту. Зміна складових безпосередньо дає можливість змінювати місце розташування полюса у частотному діапазоні праворуч або ліворуч смуги пропускання Δf_f .

Причиною поява полюса у далекій верхній зоні загороджувальної смуги є резонансні властивості самих резонаторів, його ж місце визначають за допомогою співвідношення хвильових опорів низькоомних та високоомних відрізків резонатора. Отже, наявність додаткового зв'язку між резонаторами (індуктивного або ємнісного типів) у традиційній структурі зв'язаних чвертьхвильових на одному кінці короткозамкнених резонаторів дає можливість формувати АЧХ, котру описують квазіеліптичною функцією, таким чином підвищуючи крутість будь-якого із падінь АЧХ.

Таку конструкцію резонансного зв'язку реалізують поміж кожною парою прилеглих резонаторів, дозволяючи отримати фільтр з необхідною кількістю полюсів та резонаторів. Структуру фільтру за заданою смугою пропускання АЧХ визначають методом синтезу [21], полюси у смузі загасання ж знаходять експериментально підстроюванням додаткових зв'язків. Від структури фільтра перехід до геометричних розмірів резонаторів і провідників здійснюють згідно з розробленими методиками [22].

Мініатюрний мікросмушковий фільтр виготовили на основі алюмооксидної діелектричної підкладки (з полікора ($\epsilon_r = 9,8$)) завтовшки 1 мм; 50-омні вихід і вхід були реалізовані завдяки переходам з МСЛ в коаксіальні роз'єми.

Отже, розглянутий фільтр уможливує формування АЧХ, що є близькою до еліптичної функції з полюсами у смузі загородження. Цей клас фільтрів рекомендований для використання в сантиметровому та дециметровому діапазонах.

1.5.Фільтри на основі діелектричних резонаторів

Створення фільтрів з малими габаритами вважається однією з ключових областей використання діелектричних резонаторів, адже багато з них сконструйовано саме на ДР з високим показником діелектричної проникності на нижніх типах коливань. Насамперед, було створено безліч конструкцій СФ та СЗФ на екранованих ДР нижніх типів коливань, яким властива висока діелектрична провідність.

При синтезуванні смугового фільтра зазвичай використовують вхідну та вихідну лінії передачі, між якими забезпечується електромагнітний зв'язок завдяки декільком ДР. Окрім ДР, до конструкції входять діелектричні тримачі резонаторів, екран, що є корпусом фільтра, елементи вводу та виводу енергії, які сприяють збудженню крайніх резонаторів.

Функція екрану полягає в усуненні випромінювання електромагнітних хвиль та включенні прямого електромагнітного зв'язку між виходом та входом фільтра завдяки певному вибору поперечних розмірів. Металевий екран зазвичай має форму прямокутного паралелепіпеда або циліндра. Електромагнітна енергія може втрачатися на стінках екрану, що знижує добротність ДР. Якщо ДР розташовано близько до стінок екрану, то в резонаторах з невисокою діелектричною проникністю ($\epsilon_r = 10 \dots 40$) зниження добротності ДР особливо помітно. У процесі вибору поперечного екрана виникають труднощі, пов'язані з необхідністю урахування несмужкового згасання. Власна добротність ДР залежить від діелектричних втрат та втрат на випромінювання, котрі значно зменшуються екрануванням. Тангенс кута діелектричних втрат пов'язують з власною добротністю ДР наступним чином:

$$\operatorname{tg} \delta \leq \frac{1}{1,3Q_0}$$

З метою збільшення власної добротності фільтра збільшують поперечний розмір екрану, знижуючи таким чином втрати у пропускарній смузі фільтра,

проте одночасно зменшуючи позасмугове згасання. У результаті зменшення поперечних розмірів екрану знижується власна добротність ланок фільтра (зростають втрати у пропускарній смузі), збільшується частота основного $H_{01\delta}$ – типу коливань резонатора та знижується частота вищих E -типів коливань, що робить їх ближчими до робочої частоти, через що коректний вибір поперечних розмірів екрану значно впливає на параметри фільтра. Як результат, поперечний розмір екрану не перевищує 1,3...1,6 діаметра циліндричного ДР .

Діелектричні тримачі є плоскими пластинами, кільцями, шайбами з матеріалу з малою проникністю ($\epsilon_r \leq 2,5$) (фторопласт, пенопласт, кварц, полістирол). Елементи вводу і виводу енергії реалізують у вигляді: відрізка порожнистого хвилевода, що збуджує ДР (рис.1.28, а); провідникових (смушкових, дротяних, елементів, замкнених на корпусі (рис.1.28, г, д, ж) або від нього ізольованих(рис.1.28, б, в). З метою покращення узгодження штиря(провідникового елемента) із лінією передачі його можуть виконувати потовщеним (рис.1.28, б).

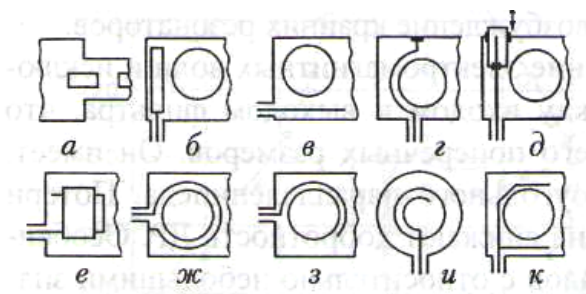


Рис.1.28. Елементи введення та виведення енергії СФ:

а – регулярний хвилевод; **б, в, г, д** – штирові збуджувачі;

е, ж, з, и, к – напівпетлеві та петлеві елементи

Елемент в вигляді меандру (рис.1.28, е), петлі (рис. 1.28, ж), напівпетлі (рис. 1.28, и, к) сприяють посиленому зв'язку поля ДР з ним, в той час як з метою підстроювання зв'язку для фіксованих положень резонатора та штиря використовують підбудований гвинт (мал. 1.28, д) , що має більший діаметр.

Не дивлячись на велику різноманітність елементів вводу й виводу енергії, серед конструкцій СФ вирізняють 2 основних типи, причому різниця полягає у відносному розташуванні ДР: зі співвісним (рис.1.28, а) та планарним (рис.1.28, б) розташуванням в екрані ДР. Їх вважають базовими конструкціями при проектуванні СФ на базі екранованих ДР.

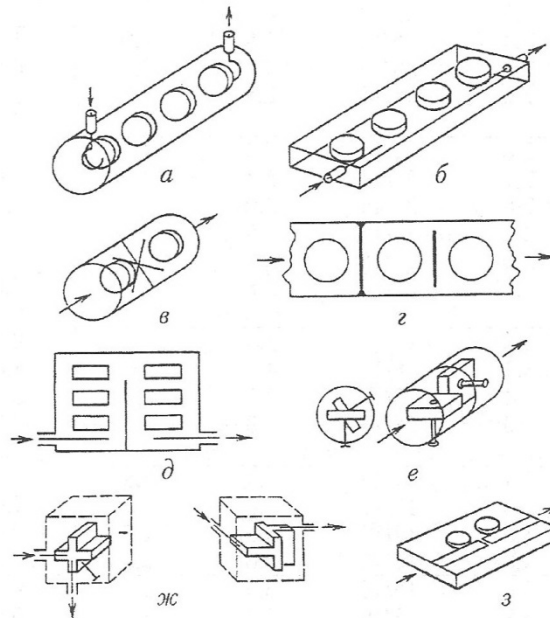


Рис.1.29. Смугопропускні фільтри з ДР нижчого типа коливань

Ключовою відмінністю фільтрів, що мають співвісне розташування циліндричних ДР (ЦДР) вважають реалізацію потужних взаємних зв'язків між резонаторами та якомога меншими втратами в екрані [10]. У табл 1.1 наведені рекомендовані розміри основних елементів фільтрів зі співвісним розташуванням ЦДР у круглому екрані у діапазоні частот 1,2...12 ГГц ($\epsilon_r = 8$).

У даній таблиці наведено відношення діаметра екрана (мм) і ЦДР $\left(\frac{D_{\text{ЦДР}}}{D}\right)$, а також приведені до діаметра значення висоти ЦДР середніх η_c і крайніх η_k ланок фільтра. При використанні діелектриків з $\epsilon_r = 40$ усі розміри наведені в табл. 1.5 потрібно в 1,4 рази збільшити.

Таблиця 1.1

**Рекомендовані розміри основних елементів СФ
зі співвісним розташуванням діелектричних резонаторів**

$f, \text{ГГц}$	$(D_{\bar{y}} / D)$	η_K	η_C		$f, \text{ГГц}$	$(D_{\bar{y}} / D)$	η_K	η_C
1,2	44/34	4,8	4,2		4,6	13/8,5	4,9	4,4
1,3	44/34	3,5	3,0		4,8	13/8,5	4,0	3,5
1,4	44/34	2,8	2,4		5,0	13/8,5	3,7	3,2
1,5	44/34	2,1	1,7		5,2	13/8,5	3,1	2,6
1,5	35/25	6,0	5,6		5,4	13/8,5	2,8	2,3
1,6	35/25	4,5	4,1		5,6	13/8,5	2,5	2,0
1,7	35/25	3,9	3,3		5,6	10,5/7	4,7	4,2
1,8	35/25	3,1	2,6		5,8	10,5/7	3,2	3,7
1,9	31/22	3,9	3,4		6,0	10,5/7	3,7	3,2
2,0	31/22	3,3	2,9		6,2	10,5/7	3,3	2,8
2,1	31/22	2,9	2,4		6,4	10,5/7	3,0	2,5
2,2	25/18	4,7	4,2		6,6	10,5/7	2,7	2,2
2,3	25/18	4,1	3,6		6,8	10,5/7	2,5	2,0
2,4	25/18	3,5	3,0		6,6	9/6	4,5	4,0
2,5	25/18	3,2	2,6		6,8	9/6	4,0	3,5
2,6	25/18	2,8	2,3		7,0	9/6	3,7	3,2
2,6	21/15	5,3	4,7		7,2	9/6	3,4	2,9
2,7	21/15	4,4	3,8		7,4	9/6	3,0	2,5
2,8	21/15	3,9	3,4		7,6	9/6	2,8	2,3
2,9	21/15	3,5	2,1		7,8	9/6	2,6	2,1
3,0	21/15	3,9	2,6		7,8	7/5	5,4	4,9
2,1	21/15	2,8	2,4		8,0	7/5	4,6	4,1
3,0	18/13	5,3	4,7		8,2	7/5	4,2	3,7
3,2	18/13	4,1	3,5		8,4	7/5	3,9	3,4
3,4	18/13	3,3	2,8		8,6	7/5	3,6	3,2
3,6	18/13	2,8	2,3		8,8	7/5	3,4	2,8
3,4	17/12	4,4	3,8		9,0	7/5	3,2	2,6
3,6	17/12	3,6	3,1		9,2	7/5	2,9	2,4
3,8	17/12	3,0	2,5		9,4	7/5	2,7	2,3
4,0	17/12	2,6	2,1		9,6	7/5	2,6	2,2
3,6	15/10	6,0	5,5		9,4	6/4	6,0	5,5
3,8	15/10	5,4	4,9		9,8	6/4	4,8	4,4
4,0	15/10	4,4	3,9		10,0	6/4	4,4	3,9
4,2	15/10	3,7	3,2		10,4	6/4	3,8	3,3
4,4	15/10	3,1	2,6		10,8	6/4	3,3	2,8
4,6	15/10	2,9	2,4		11,0	6/4	3,2	2,7

Зручність сполучення фільтрів з мікросмуговими приладами НВЧ, що виконаними за планарною технологією є основною перевагою саме фільтрів, що мають планарне розташування ДР (бічний зв'язок між резонаторами). в табл. 1.2 представлено рекомендовані типові розміри внутрішнього поперечного перерізу екрана ($a \times b$) та діаметра резонатора (D).

Таблиця 1.2

**Рекомендовані розміри основних елементів СФ
із планарно розташованими діелектричними резонаторами**

f , ГГц	ε_r	D , мм	$a \times b$, мм		f , ГГц	ε_r	D , мм	$a \times b$, мм
1,2...1,5	80	29,0	29× 43		6...7	80	6,5	6× 10
1,5...1,8	80	25,0	24× 37		7...8	80	6,0	5× 9
1,8...2,0	80	23,0	20× 35		8...9	80	5,0	4× 8
2,0...2,5	80	18,0	18× 28		9...10	80	4,0	3,5× 7,0
2,5...3,0	80	15,0	16× 24		10...11	40	6,0	10× 10
3,0...3,5	80	13,0	14× 20		11...14	80	5,0	8× 8
3,5...4,0	80	12,0	12× 18		14...18	80	4,0	5× 8
4,0...4,5	80	10,0	10× 15		18...22	80	3,0	5,5× 5,5
4,5...5,0	80	8,5	9× 13		22...26	80	3,0	3,0× 5,5
5,0...6,0	80	7,0	7× 11		26...36	80	2,0	3,0× 3,4

Базуючись на основних конструкціях фільтрів, реалізують різноманітні модифікації СФ з поліпшеними характеристиками та параметрами. Наприклад, застосовуючи різні діафрагми між ДР, можливо послабити зв'язок між ланками, таким чином зменшувати довжину фільтра, окрім того, придушити деякі паразитні смуги пропускання, причиною яким є вищі типи коливань. В останній ситуації діафрагми грають роль фільтрів певних типів коливань.

Хрестоподібні діафрагми (рис.1.29, в), введені в фільтр, що має співвісне розташування ДР, здатні зменшувати його довжину до 1,4 разів та придушувати паразитні пропускарні смуги, обумовлені коливаннями Е-типу.

Завдяки введенню подібних металевих стрижнів між ДР у фільтрі з планарним розташуванням резонатора (рис.1.29, г) стає можливим змінювати величину міжланкового зв'язку. Варто зазначити, що коли екран з'єднано з кінцями

стрижня, зв'язок зменшується, в той час як стрижень, будучи ізольованим від екрана, посилює зв'язок між резонаторами, даючи можливість розширити пропускарну смугу фільтра.

Налаштування фільтрів полегшується завдяки введенню роздільних налаштувань ланок по частотам і контроль зв'язку між ними. Наприклад, у СФ, показаному на рис.1.29, *е*, кожен ДР та його елемент штир (підстроювання по частоті) закріплені окремо в циліндричних секціях, які утворюють фільтр. Вони здатні повертатися відносно одне одного навколо осі, при цьому змінюючи зв'язок від нульового (за перпендикулярного розташування ДР) до максимального (за розташування ДР у одній площині). У такому СФ довжина незалежна від ширини пропускарної смуги, як у фільтрах базових конструкцій (рис.1.29, *а, б*).

Використання Т-подібних та хрестоподібних ДР дає можливість створювати СФ з малими габаритними розмірами. Т-подібний та хрестоподібний резонатори, власне кажучи, являють собою три- або дволанкові СФ (рис.1.29, *ж*). Для цього потрібно зв'язати один із шарів із вхідною, інший - з вихідною лінією передачі й створити зв'язок між шарами порушенням симетрії або введенням неоднорідності. У даному випадку виключається взаємний зв'язок між розташованими ортогонально виходом і входом. Відмінною рисою конструкції дворезонаторного мікросмугового СФ (рис.1.29, *з*) називають ємнісний зв'язок вихідного і вхідного стрічкових провідників, дозволяючи реалізувати більшу прямокутність АЧХ еліптичного виду.

На рис.1.29а зображений приклад реалізації СФ зі співвісним розташуванням ДР в круглому позамежному екрані. ДР 1 закріплені у діелектричних втулках 2, котрі утримують резонатори у металевому екрані 5. Коаксіальні вихідний й вхідний роз'єми 3, що з'єднані центральними провідниками з смужковими напівпетлями 4, котрі розміщені на діелектричних підкладках та виконують функцію елементів введення і виводу енергії. АЧХ СФ такої конструкції з ДР на основі ТБНС із зовнішнім діаметром 40 мм показана на рис.1.30, *б*.

Варто зазначити, що даний СФ відрізняється досить високою вибірковістю у сусідньому каналі прийому, малими втратами та чебишевською характеристикою у смузі пропускання. Нерівномірність ГЧЗ даного фільтра дійсно низька, що в свою чергу стало причиною широкого використання СФ, котрі були розглянуті раніше, для приймачів аналогового сигналу. З іншого боку, на рис.1.30, б спостерігається недолік фільтра, а саме близьке розташування паразитної смуги прийому на верхніх частотах.

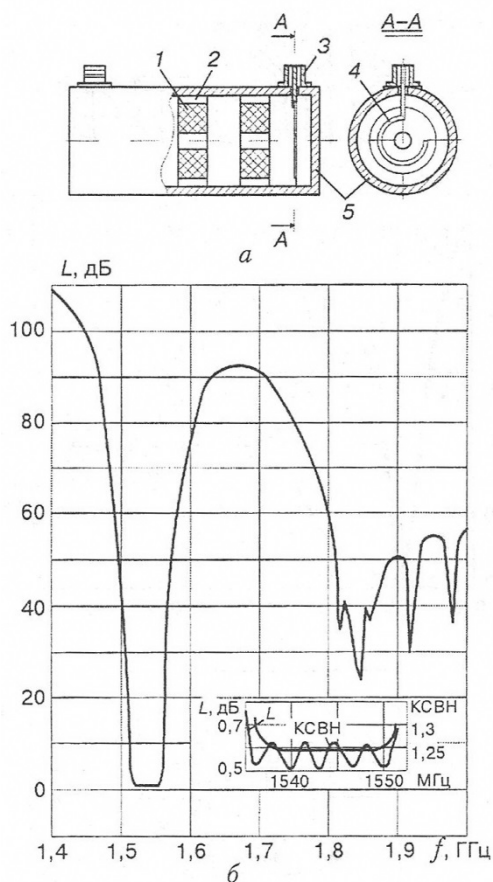


Рис.1.30. Конструкція п'ятиланкового СФ на ЦДР (а) і його АЧХ (б)

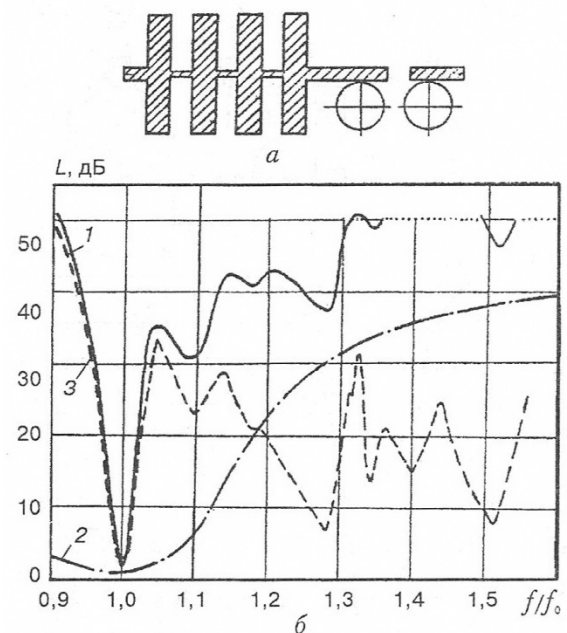


Рис.1.31. Комбінований фільтр на основі ФНЧ і ДР: а - схематичне зображення; б - амплітудно-частотні характеристики комбінованого фільтру (1), ФНЧ (2) і діелектричного фільтру (3) окремо його АЧХ (б)

У зв'язних приймачах окрім вузькосмугового СФ на ДР на початку тракту ПЧ встановлюють мікросмужковий широкосмуговий фільтр або ФНЧ, котрі мають найбільше загасання на частоті паразитної смуги пропускання кінцевого СФ.

Така конструкція, що виконана на каскадному включенні мікросмужкового ФНЧ та дворезонаторного СФ на ДР [11], представлена на рис.1.30, а. Фільтр на

полікоровій підкладці $48 \times 30 \times 1$ мм та містить 7 ланок ФНЧ і два ДР ($\varepsilon_r = 80$), розташованих біля розімкнутих країв відрізків МСЛ. на рис.1.31 наведена АЧХ цього фільтра.

Принцип побудови режекторного фільтра на ДР, основою якого є використання електромагнітного зв'язку одного або декількох резонаторів із ЛП. У якості такої лінії зазвичай використовують хвилевід або мікросмушкову лінію передачі (рис.1.32, *а*). На резонансній частоті системи хвилевід - ДР у результаті поглинання і відбиття її енергії резонатором передача на вихід пристрою мінімальна. Розташування та кількість ДР у ЛП визначається вимогами до рівня загородження у заданій смузі частот. У багаторезонаторних СЗФ з резонаторами, що розташовані вздовж ЛП (рис.1.32, *б*) і пов'язані з нею однією (поздовжньою або поперечною) складовою поля хвилі, що поширюється, відстань між ДР рівна $\frac{3}{4}\lambda$, де λ – довжина хвилі у ЛП на центральній частоті СЗФ.

Причиною цьому є необхідність виключення безпосереднього взаємного зв'язку ДР у полях вищих типів таких хвиль, які не поширюються. Досить цікавими вважають конструкції (рис.1.32, *в*), у яких б застосовують прямокутний хвилевід, в той час як ЦДР розташовані у областях кругової поляризації магнітного поля НВЧ, а орієнтація кожного ЦДР, що розташовані в тому ж поперечному перерізі хвилевода, відповідає окремо зв'язку поперечної або поздовжньої складової магнітного поля НВЧ. Унаслідок цього можливо покращити прямокутність АЧХ за рахунок реалізації по схилам АЧХ мінімумів загасання нижче й вище центральної частоти РФ, що обумовлені нерезонансним зв'язком між ЦДР і хвилеводом.

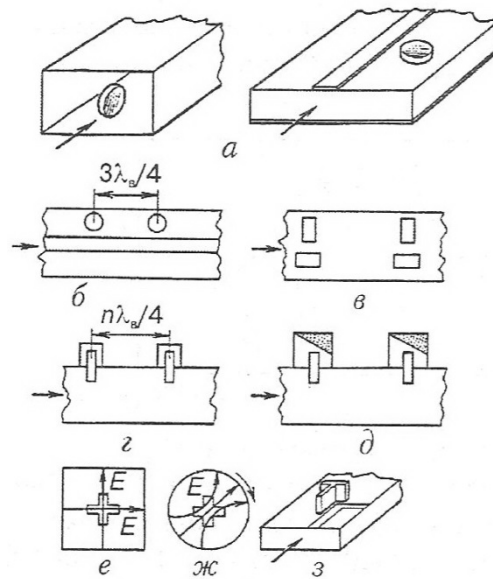


Рис.1.32. Режекторний фільтр на основі ДР

Шляхом наближення (видалення) резонаторів ближче до відрізків поза межних хвилеводів, що розташовані відносно поздовжньої осі лінії передачі перпендикулярно і з нею пов'язані, наприклад, по вузькій стінці прямокутного хвилеводу (рис.1.32, *г*) регулюють ступінь зв'язку ДР з полем хвилі, яка поширюється, у СЗФ. У такому випадку можливо, що резонансний зв'язок між ДР і прямокутним хвилеводом істотно зменшиться, і симетрія АЧХ коефіцієнта передачі поліпшиться через мінімальний нерезонансний зв'язок ДР із хвилеводом.

З метою зменшення відбиття РФ на центральній частоті фільтра раціональним вважають розташування резонаторів у відрізках регулярних хвилеводів, що включає поглинаючі навантаження в них (рис.1.32, *д*).

Смугозагороджувальний фільтр, де за основу взято ввімкнення ЦДР в прямокутний хвилевід, показано на рис.1.33. Такий фільтр конструктивно є відрізком прямокутного хвилеводу 3, в *E*-площині якого розташовані ДР 1, закріплені у діелектричній вставці 2 (зазвичай із пористого пінопласту), який частково або повністю заповнює поперечний переріз хвилеводу.

АЧХ двох трирезонаторних СЗФ, параметри яких дано в табл. 1.3, представлені на рис.1.34.

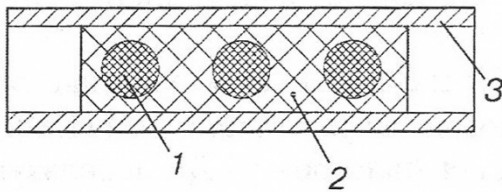


Рис.1.33. Смугозагороджувальний фільтр на ДР (розріз в E -площині хвилевода): 1 - ДР; 2 - діелектрична вставка; 3 — хвилевод

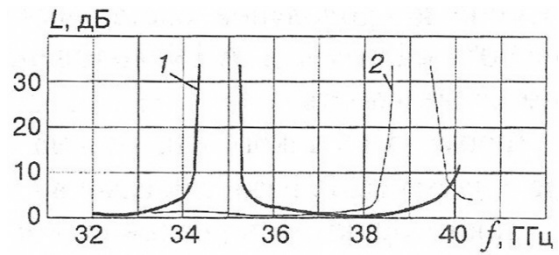


Рис.1.34. Амплітудно-частотні характеристики СЗФ на основі ДР: 1 - СЗФ1; 2 –СЗФ2

Таблиця 1.3

Параметри СЗФ на основі ДР, що ввімкнено прямокутний хвилевід

Номер СЗФ	Діаметр ДР, мм	Товщина ДР, мм			Смуга загородження за рівнем -30 дБ, ГГц	Смуга пропускання за рівнем -0,5 дБ, ГГц
		1-й	2-й	3-й		
1	2	0,560	0,575	0,595	34,447... 35,247	37,0...38,4
2	1,5	0,375	0,385	0,395	38,874...39,247	34,0...37,0

Перший з наведених фільтрів використовує ДР на основних (нижчих) E -типів коливаль, у той час як другий - ДР на основних H -типах коливаль, що пов'язано з несиметричністю АЧХ ДР. У якості матеріалу для резонаторів була обрана кераміка АЛТК. Такий СЗФ придушує сигнал в смузі загородження більше ніж на 30 дБ, а втрати у смузі пропускання не є вищими за 0,6 дБ.

Дані СЗФ використовують для придушення дзеркальних каналів прийому при проміжній частоті 1,4 ГГц , а також відповідно верхнього або нижнього гетеродинів.

Завдяки використанню Т-подібних і хрестоподібних ДР у СЗФ (рис.1.32, $e - z$) стає можливим здійснення фільтрації не тільки двох взаємно ортогональних хвиль з різною або однаковою частотами, а і хвиль , що мають обертову поляризацію. Такі резонатори застосовують у сполученні із мікросмушковими ЛП (рис.1.32, z).

Конструкції СЗФ на основі прямокутного хвилеводу із ДР у формі куба хрестоподібного резонатора або кулі, що розташовано в області кругової поляризації магнітного поля НВЧ так, що у ДР збуджуються 2 ортогонально поляризовані вироджені коливання, при цьому за рахунок їхнього роздільного збудження поздовжньої та поперечної складових поля хвилеводу зі зрушенням фази на 90° реалізують АЧХ коефіцієнта передачі, що має підвищену частотну вибірковість.

У багатьох конструкціях фільтрів на ДР використовують частотно-вибіркові структури в вигляді кількох резонаторів, що зв'язані як один з одним, так і з ЛП. Коефіцієнти, які кількісно оцінюють ступінь цих зв'язків, визначають вигляд АЧХ коефіцієнтів відбиття та передачі.

Перспективними вважають фільтри на основі ДР, включених у діелектричний хвилевід (ДХ), у яких можливо реалізувати максимальну добротність резонаторів. У роботі [7] експериментально досліджені СФ і СФ на основі ДР і ДХ. Конструкція розглянутого СФ показана на рис.1.35, а.

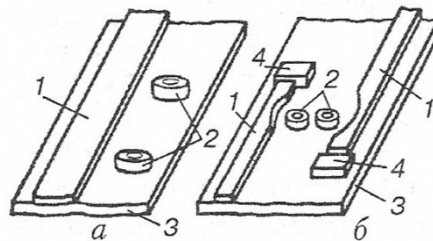


Рис.1.35. Смугозагороджувальний (а) і смугопрпускальний (б) фільтри на основі ДР і ДХ

Діелектричний хвилевід 1 та діелектричні резонатори 2 розташовано на металевій полірованій підставі 3. Діелектричний хвилевід, що виготовлено з полікора кріплять до підкладки, чим забезпечують міцність конструкції. Співвідношення широкої та вузької сторін є рівним 2,22. хвиля E_{11}^0 збуджувалася у ДХ. Діелектричний резонатор виготовлено з матеріалу керамічного діелектрику АЛТК ($\epsilon = 38$). Форма була обрана, враховуючи максимальну добротність Q . У ДР збуджувався тип коливання E_{01} . З метою збільшення зв'язку між ДХ і ДР поверхня ДХ має бути неоднорідною.

Неоднорідності можуть виглядати як смуги або виїмки на бічній поверхні ДХ, котрі мають форму (рис.1.35, б), при якій найбільший зв'язок реалізується. Співвідношення висоти ДР і ДХ впливає на силу зв'язку, завдяки приблизній рівності яких забезпечується найбільший зв'язок.

На рис.1.36 штриховою лінією показана АЧХ даного СЗФ. Втрати у смузі загасання 2,5 % становлять 32 дБ, у той час як поза нею -0,3 дБ.

На рис.1.35, б показана конструкція дворезонаторного СФ, що складається з двох відрізків ДХ 1, двох ДР 2, а також двох металевих поршнів 4, що розташовані на металевій поверхні 3. Найкращий зв'язок ДХ і ДР забезпечується у результаті переміщення металевих поршнів.

На рис.1.36 суцільною лінією показана АЧХ дворезонаторного СФ.

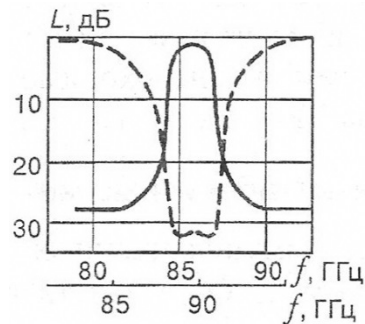


Рис.1.36. Амплітудно-частотна характеристика СЗФ (пунктирна лінія) і СФ (суцільна лінія) на основі ДР і ДХ

Втрати в смузі пропускання 1,5 % рівні 0,7 дБ, а поза нею - 28 дБ. У даному випадку не спостерігалися паразитні смуги пропускання у діапазоні до 20 % вище центральної смуги фільтра, що пояснюється розходженням форми ДР, унаслідок чого в них резонансні частоти вищих типів коливань розрізняються.

Завданням інженерного розрахунку НВЧ-фільтрів на ДР є знаходження розмірів елементів конструкцій фільтрів, параметрів резонаторів та використовуваних ЛП, при яких вдається виконати технічні вимоги завдання на характеристики проектного фільтра.

Один з найбільше широко застосовуваних підходів інженерного розрахунку СФ на ДР заснований на знаходженні коефіцієнтів зв'язку ДР тазовнішніх

добротностей крайніх резонаторів шляхом застосування табульованих значень елементів низькочастотних прототипів, які залежать від кількості ланок фільтрів та їхньої характеристики. З цією метою використовують раніше розраховані таблиці синтезу фільтрових структур на різній елементній базі [3]. У випадку неврахування дисипативних втрат резонаторів, обмежується область застосувань фільтрів із ДР. З цих міркувань намагаються комбінувати цей метод з іншими, що враховують втрати у резонаторах [33, 34]. Метод синтезу фільтрів із урахуванням дисипативних втрат, який засновано на новітніх методах апроксимації АЧХ і досі залишається актуальним питанням, адже це дасть можливість врахування втрат пристроїв і мінімізування коефіцієнта відбиття від входу фільтра [12].

1.6. Малогабаритні металокерамічні фільтри

У мобільному зв'язку, телебаченні й практично у всіх трактах ПЧ передатчиків систем зв'язку надзвичайно важливу роль грає діапазон частот від 40 МГц до 3000 МГц. У результаті безперервної модернізації електричних характеристик пристроїв даного діапазону і прагнення до зменшення габаритів частото-вибіркових пристроїв виник новий клас малогабаритних фільтрів, а саме металокерамічні фільтри (МКФ).

До появи цього класу призвело об'єднання ДР із металевими резонансними структурами й привело [2]. МКФ є прямокутним блоком кераміки, що має циліндричні отвори та велике значення ϵ_r . Внутрішність отворів як і зовнішня поверхня структури вибірково металізовані (рис. 1.37).

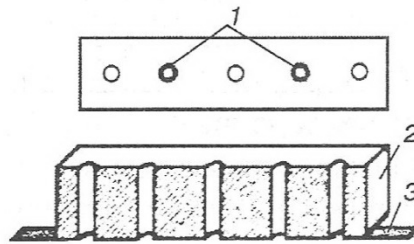


Рис. 1.37. Реалізація СФ в монолітному керамічному блоці: 1 – ізолювані металізовані отвори; 2 – металізований шар; 3 – контактна смужка

Ця структура є еквівалентною періодичним ґратам паралельно зв'язаних ТЕМ-ліній передачі. Так, зустрічно-штировий фільтр реалізується при ізолюваних протилежних кінцях сусідніх отворів. У такому випадку, враховуючи діелектрик, довжина отворів має бути рівною чверті довжини хвилі, яка відповідає центральній частоті фільтра, у той час як смугу пропускання МКФ визначають відстані між отворами. Використання зосереджених ємностей у комбінації з керамічним блоком дозволяє робити точне налаштування фільтра. Власну добротність МКФ визначають через тангенс кута втрат діелектрика в матеріалі кераміки, електропровідність металевого покриття, поперечний переріз резонаторів.

Враховуючи те, що смугопропускний фільтр на МКФ має менші розміри, ніж СФ на ДР, більшу термостабільність і добротність, ніж мікросмужковий фільтр, він забезпечує параметри прямокутності та втрат в смузі пропускання, що є близькими до фільтра на ДР.

Для порівняння якості приладів на основі МКФ із різними значеннями ε_r були розроблені й виготовлені макети СФ. фільтри. Конструктивно були реалізовані за типовою схемою [5] та відрізнялися саме тим, що елементи зв'язку й регулювання виготовлені на відкритій поверхні МКФ у вигляді планарних електродів, що фактично є конденсаторами. Порівняльні характеристики фільтрів, виготовлених з матеріалів з різним значенням ε_r , наведені. Смуга частот пропускання у всіх фільтрах становила 24...25 МГц, і КСВН у цій смузі не перевищував 1,4. Власну добротність Q_0 у резонаторах визначали по величині ослаблення сигналів НВЧ у смузі пропускання фільтра.

Порівняльний аналіз характеристик фільтрів у табл.1.4 показує, що добротність резонаторів для матеріалів з $\varepsilon_r = 21$ вище, ніж для резонаторів з $\varepsilon_r = 38$ та $\varepsilon_r = 80$. Оскільки спектр власних частот у резонаторах зі зменшенням ε_r стає більше розрідженим, фільтри, виконані на МКФ із матеріалів з меншої ε_r , мають більш високу якість по сукупності електричних характеристик, чим аналогічні на резонаторах з $\varepsilon_r = 38$ й $\varepsilon_r = 80$. Очевидно, що подальше зменшення ε_r дозволить реалізувати МКФ у пристроях НВЧ, що працюють на більш високих частотах. Варто зазначити, що зі зменшенням значення ε_r спрощується налаштування МКФ, а також знижуються вимоги до точності топології елементів зв'язку, завдяки чому підвищується технологічна відтворюваність виробів.

Таблиця 1.4

Порівняльні характеристики смужкових МКФ

Перетин резонатора МКФ, мм	ϵ_r	$tg\delta \cdot 10^4$ на частоті 10^{10} Гц	Ослаблення в смузі пропускання, дБ	Центральна частота f_0 , МГц	Q_0
3 × 3	20	7...8	2,0...2,5	1350	350
13 × 13	21	3...4	0,8...0,9	1350	1050
10 × 10	21	3...4	0,8...1,0	1345	980
8 × 8	21	3...4	1,2...1,5	1330	580
13 × 13	38	3...4	1,8...2,0	1350	580
10 × 10	38	3...4	2,0...2,2	1355	450
8 × 8	38	3...4	2,4...2,5	1375	350
10 × 10	38	2	1,8...2,0	1470	480
8 × 8	80	10	2,5...3,0	1420	500

У роботі [19] конструкція трьохрезонаторного МКФ запропонована. Цей фільтр складається з ряду окремих резонаторів (рис.1.38), котрі виконують певну функцію та мають власні елементи зв'язку (рис.1.39), коефіцієнт зв'язку (КЗ) для яких наведений на рис.1.40.

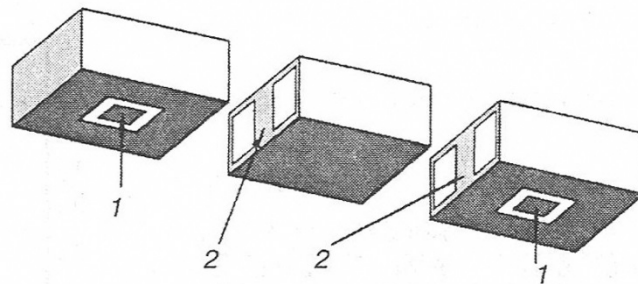


Рис.1.38. Трьохрезонаторний металокерамічний фільтр:

1 - ввід; 2 - планарні елементи зв'язку

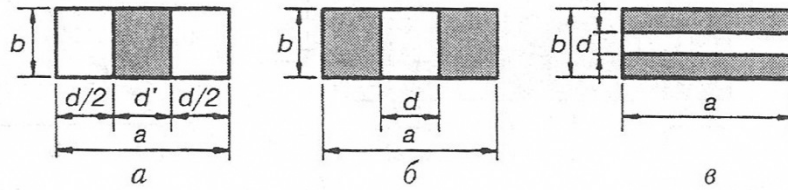


Рис.1.39. Елементи зв'язку у вигляді планарних діафрагм: індуктивна смужка (а), індуктивне (б) та ємнісне (в) вікна

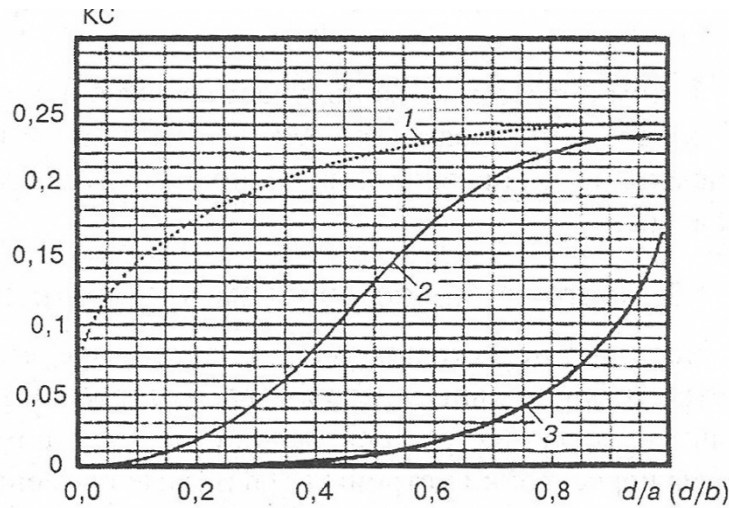


Рис.1.40. Залежність коефіцієнта зв'язку від приведеного апертурного розміру для планарних діафрагм зв'язку у вигляді ємнісного (1) та індуктивного (2) вікон, а також індуктивної смужки (3)

Дана конструкція фільтра дозволяє використовувати прямокутні площадки введів для безпосереднього з'єднання із центральним провідником коаксіальної лінії або через металевий шток крізь підкладку зі смужкою МСЛ, розташовуваної на зворотній стороні підкладки. Характеристики такого трирезонаторного фільтра висотою 2,5 мм із розмірами, зазначеними на рис.1.41, представлені на рис.1.42. У якості елемента зв'язку була використана індуктивна смужка (рис.1.39, а), в якості кераміки кераміка - матеріал з $\epsilon_r = 37$ і добротністю 4000 на частоті 10 ГГц; металізація фільтра виконувалася сріблом із провідністю $3 \cdot 10^7$ См/м. Втрати у смузі пропускання склали 0,8 дБ.

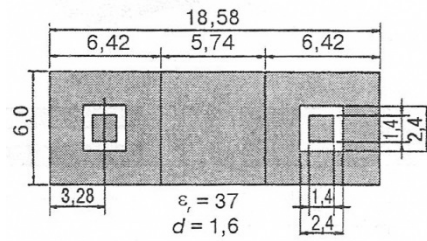


Рис.1.41. Розміри трирезонаторного МКФ (в міліметрах)

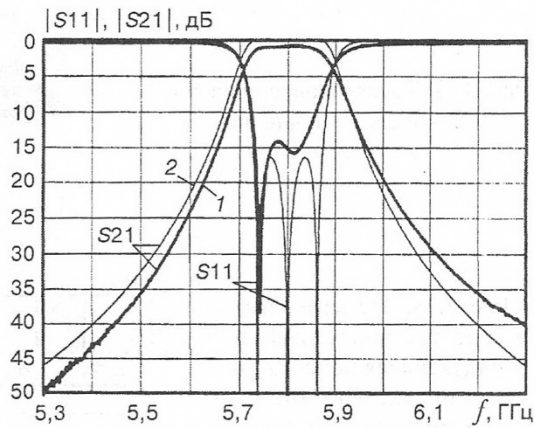


Рис.1.42. Частотна залежність S-параметрів

3-резонаторного МКФ: 1 - виміряні; 2 - розраховані

Отже, завдяки високим електричним параметрам та малим габаритним розмірам металокерамічні фільтри на теперішній час є також одним з перспективних напрямків у техніці фільтрів довгохвильової частини НВЧ-діапазону.

2. КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ З Е-ТИПОМ КОЛИВАНЬ

2.1.Класифікація та області застосування резонансних пристроїв НВЧ

Не дивлячись на те, що розроблена велика кількість резонансних пристроїв НВЧ, унаслідок стрімкого розвитку інформаційних технологій, які базуються на використанні засобів зв'язку, постійно зростають вимоги до якості цих пристроїв, до зменшення вартості, до збільшення технологічності їх виготовлення. Крім того в результаті все більшої інтеграції засобів зв'язку у повсякденне життя виникла потреба в опануванні нових частотних діапазонів, що потребує пошуку нових рішень у сфері створення НВЧ-пристроїв.

На рис.2.1 представлено області практичного застосування таких пристроїв.

Завдяки унікальній комбінації властивостей діелектричних резонаторів (ДР) таких як малі габарити та маса, стійкість до дестабілізуючих впливів, надійність та довговічність, висока добротність, вони викликають великий інтерес до застосування їх в активних та пасивних резонансних НВЧ-пристроях . (рис.2.1) [30].

Для створення нового класу керованих селективних пристроїв НВЧ з покращеними характеристиками (широкий діапазон керування резонансною частотою, низька собівартість, технологічність виготовлення і т.д.) на основі діелектричних комбінованих структур з діелектричним резонансом Е- типу було проведено ряд теоретичних та експериментальних досліджень, результатом яких стала розробка ряду практичних конструкцій селективних

пристроїв НВЧ з керованими характеристиками на основі діелектричних та напівпровідникових комбінованих структур [30].

Резонансні пристрої НВЧ	
Фільтри	Генератори
Смугозагороджувальні, режекторні фільтри, частотні фільтри, фільтри типів хвиль, частотні селектори каналів	Стабілізовані по частоті, транзисторні генератори, мазери, генератори з керованою частотою, високостабільні генератори з ДР АК.
Вимірювальні пристрої	Антенні пристрої
Вимірювачі діелектричної проникності, вимірювачі температури та вологості, вимірювачі діелектричних втрат, вимірювачі розподілу НВЧ полів	Резонансні випромінюючі антени з одним ДР, антенні решітки, резонансні директорні елементи, антени хвиль з лінійною та круговою поляризацією
Пристрої обробки НВЧ сигналів	Інші резонансні пристрої НВЧ
Уповільнюючі системи, фазочастотні коректори, частотні дискримінатори, частотні детектори, функціональні модулі, резонансні підсилювачі, фільтри з керованими параметрами,	Резонатори з феритовим керуванням, підсилювачі сигналів, обмежувачі рівня потужності, керовані фазообертачі

перетворювачі частот

Рис. 2.1. Класифікація резонансних НВЧ-пристроїв

2.2. Керовані фільтри на основі комбінованих діелектричних резонаторів із Е - типом коливань

Досі залишається актуальним питання створення керованих фільтрів на ДР, що безпосередньо пов'язано з перестроюванням резонансної частоти ДР. На даний час практикують численні методи керування параметрами ДР, що умовно поділяють на чотири основних групи: пристрої з механічним керуванням параметрами; пристрої з електромеханічним керуванням параметрами; пристрої з електричним керуванням параметрами; пристрої з комбінованим керуванням параметрами (рис.2.2) [17].

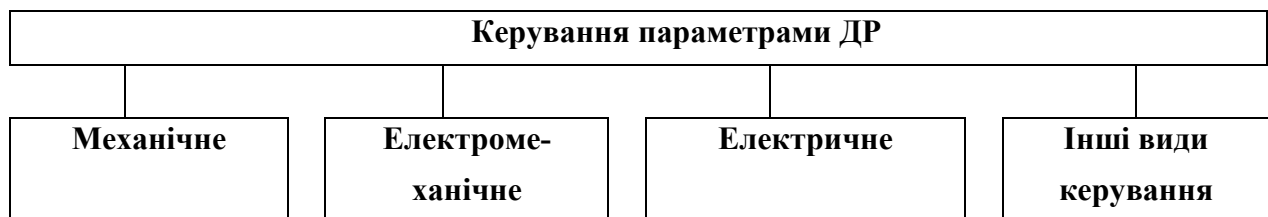




Рис. 2.2 Способи керування параметрами ДР

Питання перестроювання резонансної частоти ДР тим не менш досі не має однозначного вирішення. Так, при використанні електричних способів керування частотою резонатора, використанні феритових, сегнетоелектричних і напівпровідникових елементів вдається отримати керування частотою близько 10%, проте значно знижується добротність ДР. З іншого боку, пристрої з механічним керуванням параметрами дають змогу здійснювати керування параметрами у широкому діапазоні частот, що складає від 10% до 25%, причому добротність системи не погіршується суттєво, хоча це потребує переміщення механічних частин резонатора, таким чином обмежуючи швидкодію подібних систем, і як наслідок їх використання в НВЧ-апаратурі. Відомі конструктивні опції п'єзоелектричного керування частотою [12, 24] шляхом використання систем, що мають досить невисоку чутливість резонансної частоти до взаємного переміщення її елементів один відносно

одного, малий діапазон зміни частоти, невисоку швидкодію, вимагають використання високих керуючих напруг і ефективні лише в субміліметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль [22]. З точки зору покращення цих характеристик п'єзоелектричного перестроювання частоти перспективним є використання діелектричних комбінованих резонаторів (ДКР) з Е- типом коливань, що містять повітряний зазор у ролі неоднорідності .

У ДКР такого типу дуже висока чутливість резонансної частоти до зміни повітряного зазору між складовими частинами резонатора. Наприклад, для зміни резонансної частоти такого ДКР на десяти долі відсотків, взаємне переміщення складових частин резонатора має складати лише кілька відсотків від товщини основної області резонатора. За допомогою таких переміщень вдається реалізувати різноманітні конструкції п'єзоелементів.

Практично застосовують два основних типи п'єзоелектричних мікропозиціонерів: біморфні і мультиморфні (пакетні) [27, 28]. У перших за рахунок поперечного п'єзоефекту збуджується деформація двошарової п'єзокерамічної структури, що у залежності від способу закріплення може бути консольною (рис.2.3,а) або балковою (рис.2.3,б). У консольному типі біморфного п'єзоелементу використовують переміщення незакріпленого кінця, тим часом у балковій - середньої частини структури. Залежність переміщення, що створюється біморфним елементом, від керуючої напруги U , котру прикладають до його електродів визначають виразом [32] :

$$\delta = c \frac{k_u d_{31} U l^2}{t^2}, \quad (2.1)$$

де k_u - коефіцієнт, значення якого змінюється від 2,5 до 0,5 із ростом напруги; d_{31} -поперечний п'єзомодуль матеріалу; l , t - довжина і товщина кожної п'єзопластини біморфного перетворювача;

$$c = \begin{cases} 1, & \text{для консольного } T \text{ типу} \\ 0.25, & \text{для балочного } T \text{ типу.} \end{cases}$$

У мультиморфній структурі поздовжній п'єзоэффект викликає товщинні деформації п'єзопластин, з яких набраний пакетний мікропозиціонер (рис. 2.3, в).

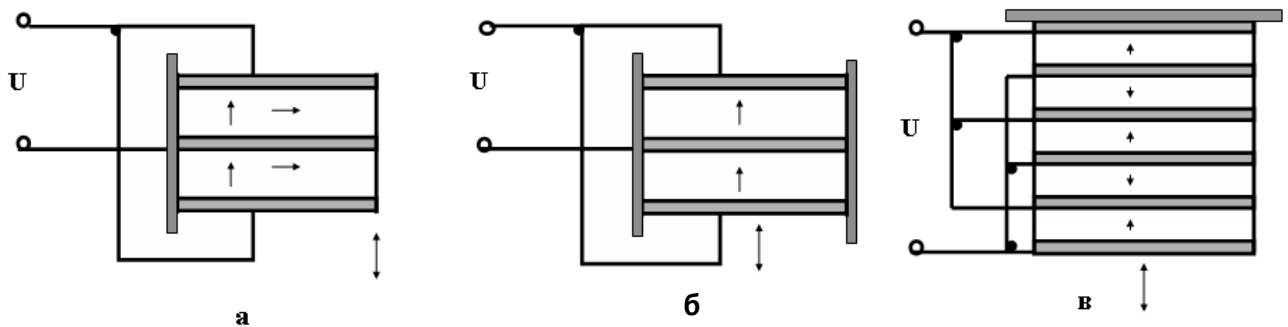


Рис.2.3.Схематичне зображення конструкцій п'єзокерамічних мікропозиціонерів біморфної консольного типу (а), біморфної балочного типу (б), і мультиморфної (пакетної) (в) структур

Переміщення δ тут залежить від величини напруги U , поздовжнього п'єзомодуля керамічного матеріалу d_{33} , із якого виготовлені п'єзокерамічні пластини і кількості N цих пластин [7]:

$$\delta = d_{33}NU, \quad (2.2)$$

Пакетний п'єзоелемент майже не піддається впливу вібрацій і ударів порівняно з мікропозиціонером біморфної конструкції, а також забезпечує плоскопаралельне переміщення об'єкта керування, будучи складнішим у виготовленні. Найбільш відмінною рисою пакетної конструкції є її висока швидкодія, що є недосяжною для інших електромеханічних пристроїв [1].

Дослідження характеристик п'єзоелектричного способу перестроювання частоти комбінованих структур з діелектричним резонансом Е- типу коливань і повітряним зазором у ролі неоднорідності проводилися на циліндричних діелектричних резонаторах, що були виготовлені з керамічного діелектричного

матеріалу АЛТК ($\epsilon \approx 40$) у сантиметровому і міліметровому діапазонах довжин хвиль.

Вихідними даними для режекторного фільтра будемо вважати резонансну частоту $f_0=8,62$ ГГц, перебудову частоти $\geq 10\%$, коефіцієнт стоячої хвилі(КСХ)=1,3, матеріал резонатора АЛТК, власну добротність резонатора $Q_0 \geq 1000$, тип АЧХ- Чебишевська.

Обчислимо кількість резонаторів з формули:

$$N = \frac{\ln\left(2 \frac{\sqrt{10^{0,1L_3-1}} \sqrt{\text{КСХ}}}{(\text{КСХ} - 1)}\right)}{\ln\left(\frac{W_3}{W_{\Pi}} + \sqrt{\left(\frac{W_3}{W_{\Pi}}\right)^2 - 1}\right)}$$

Зважаючи на власну добротність, оберемо $\frac{W_3}{W_{\Pi}} = 2,5$ та $L_3 = 10$ дБ.

У результаті маємо $N=1$, що означає те, що у подальшому матимемо справу з однорезонаторним фільтром.

Розрахуємо нерівномірність втрат:

$$\Delta L_{\Pi} = 10 \lg \frac{(\text{КСХ} + 1)^2}{4 \text{КСХ}} = 0,074$$

При втратах розсіювання на граничних частотах $\Delta L_{\Pi 1,2} = 0,1$ знайдемо смугу пропускання:

$$W_{\Pi} = \frac{N * 8,686}{Q_0 * \Delta L_{\Pi 1,2}} = 0,087$$

Розрахуємо максимальне затухання:

$$L_3(f_0) = N * 20 * \lg(W_{\Pi}) * Q_0 = 32,79, \text{ що } \epsilon \text{ рівним } 20 * \lg\left(1 + \frac{Q_0}{Q_{3B}}\right).$$

Звідси отримаємо зовнішню добротність $Q_{3B} = 23,47$.

Визначимо розміри циліндричного діелектричного резонатора. Оберемо прямокутний хвилевід 10x23 мм. Для заданої резонансної частоти та матеріалу маємо діаметр $D=4$ мм, товщина основної області $g=2,8$ мм.

Конструкція такого однорезонаторного фільтру схематично подана на рис.2.4. У ній резонатор 1 розташований посередині широкої сторони прямокутного металевого хвилевода 3, використовуючи стінку хвилевода як одне з провідних дзеркал, так, що його торцева поверхня була паралельна широкій стінці хвилеводу, також як і площина повітряної неоднорідності. У ролі другого дзеркала використовувався шар срібла, нанесений на інший торець резонатора.

Керування частотою резонатора відбувається за рахунок зміни відстані між нижньою стінкою хвилеводу(метал) та ДР. Для перестроювання резонансної частоти ДКР шток 3 у конструкції, поданій на рис. 2.4, приєднувався до п'єзоелектричного мікропозиціонера, розташованого за межами НВЧ-кола і виготовленого з промислового керамічного матеріалу типу ЦТС-19.Його розміри вибиралися порівняними з розмірами хвилеводних секцій для досліджуваного діапазону частот.

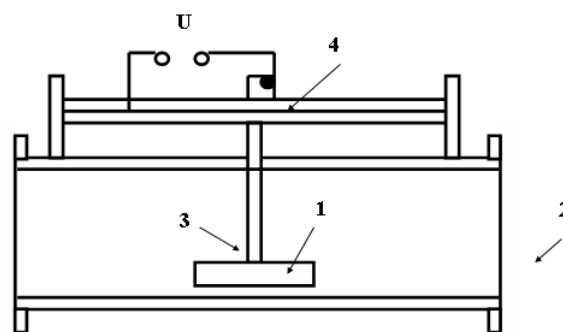


Рис.2.4. Керований однорезонаторний фільтр: 1- діелектричний керований резонатор; 2 – хвилевод; 3 – шток; 4 – п'єзоелектричний актуатор

Розрахункові й експериментальні результати визначення резонансних частот циліндричних ДКР з Е- типом коливань із повітряним зазором , виготовлених із кераміки АЛТК ($D=4$ мм $g=2.8$ мм $\epsilon_1=40$) подано у табл.2.1.

Таблиця 2.1

h мкм.	f_{0e} ГГц	f_{0p} ГГц	Мо-дуль різ-ниці %
0	8,62	8,6	0,2
50	8,95	9,0	0,5
100	9,33	9,4	0,8
150	9,91	9,99	0,8
160	10,05	10,13	0,8
170	10,1	10,21	1,1
200	10,17	10,26	0,9

Залежність $f_0(h)$ графічно представлена на рис.2.5.

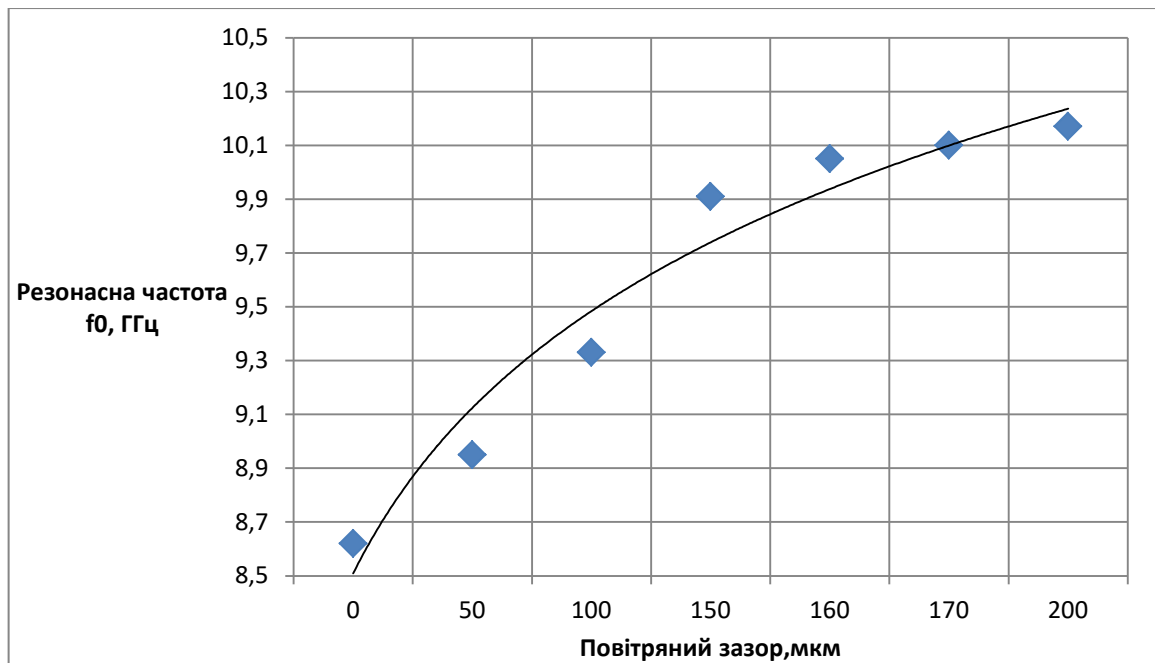


Рис.2.5. Графік залежності резонансної частоти від величини повітряного зазору.

Використання ДКР з Е- типом коливань має ряд переваг.

До них у першу чергу відносяться:

- збільшення діапазону перестроювання резонансної частоти ДР.
- можливість побудови п'єзокеруючих пристроїв не тільки в міліметровому діапазоні довжин хвиль, але й у сантиметровому, а також у короткохвильовій частині дециметрового діапазонів;
- зменшення напруг, або розмірів п'єзоелектричних мікропозиціонерів, що збільшує швидкодію п'єзоелектричного керування;

Швидкодія п'єзоелектричного керування перестроюванням частоти цілком визначається масою рухомої частини резонатора, динамічними властивостями вузла керування і залежить від форми і розмірів п'єзоелементів. У проведених експериментальних дослідженнях швидкодія досліджуваного способу перестроювання частоти ДР обмежувалася частотою низькочастотного керуючого сигналу, після якого припинялася зміна частоти ДКР. Збільшення швидкодії можна досягти, як це впливає з (2.3), (2.4), за рахунок зменшення розмірів п'єзоелементів, а це веде до зниження h або зростанню U . Тому в кожному конкретному випадку вибирається компромісний варіант.

Як уже було відзначено, розглянута вище конструкція формує АЧХ коефіцієнта передачі, що відповідають одноланковому фільтру. Поліпшення частотної виборності таких структур може бути досягнуте збільшенням числа використовуваних ДКР і продемонстрований у [29], де запропонований дворезонаторний смугопропускний фільтр, виконаний на ДКР із п'єзоелектричним перестроюванням частоти, розташованих у прямокутному позамежному хвилеводі. Ще одним можливим шляхом поліпшення характеристик фільтрів є використання резонаторів спеціальної форми.

При розробці різних селективних пристроїв із п'єзоелектрично керованими характеристиками необхідно враховувати ряд проблем, пов'язаних як з особливостями конструкцій, так і з електричними, фізичними і механічними характеристиками п'єзоматеріалів:

- електромеханічним гістерезисом деформаційної характеристики, обумовленим втратами в матеріалі, що призводить до неоднозначної залежності механічних переміщень від напруги;
- обмеженим зверху частотним діапазоном п'єзоелемента;
- чутливістю до зовнішніх впливів механічного характеру (ударів, вібрацій);
- недостатньою температурною стабільністю параметрів п'єзокерамічного матеріалу.

З метою забезпечення точного позиціонування необхідно використовувати схемотехнічні засоби автоматичного регулювання, реалізація яких спрощується завдяки існуванню простих, але надійних датчиків положення та переміщення. Використання таких датчиків в автоматичній системі дозволяє значно зменшити гістерезисні помилки і добитися точності позиціонування 0,05%. Недоліком вищеописаного способу є низька швидкодія.

Проблема вібростійкості може вирішуватися як вибором жорстких конструкцій п'єзоелектричних мікропозиціонерів (пакетної, біморфної із

балковим закріпленням, використання укріплюючих шарів), так і за рахунок конструктивних рішень вібростійкого переміщення складових частин ДКР, наприклад, переміщення кожної із частин ДКР своїм мікропозиціонером так, що результуючий повітряний зазор утворюється за рахунок асинхронного переміщення (вібраційні впливи синхронно переміщують обидві частини ДКР).

При великих механічних навантаженнях може позначатися крихкість п'єзокерамічного матеріалу. Ця проблема вирішується застосуванням укріплюючих шарів інших матеріалів або використанням інших п'єзоматеріалів (композитів, полімерів).

Крім того слід зазначити, що в керованих фільтрах на комбінованих структурах з діелектричним резонансом Е-типу крім п'єзоелектричних можуть використовуватися й інші способи перестроювання частоти. Висока чутливість резонансної частоти до переміщення частей такого ДКР дозволяє здійснити в міліметровому діапазоні довжин хвиль перестроювання за допомогою мікропозиціонерів, в яких використовується ефект електрострикції, що дозволяє позбутися більшості з перерахованих недоліків. Крім цього, інтерес до таких систем може бути викликаний і з погляду механічного керування характеристиками фільтра. Головними перевагами таких структур залишаються збереження високої добротності коливальної системи при перестроюванні частоти і широкий діапазон зміни резонансних частот.

ВИСНОВКИ

1. За результатами аналізу відомих конструкцій фільтрів НВЧ обрано конструкцію на основі діелектричного резонатора з Е-типом коливань, що дозволило реалізувати діапазон пере налаштування резонансної частоти на 18 % при переміщенні резонансного елемента не більше як на 200 мкм.
2. Як керувальний елемент обрано біморфний п'єзоелемент балкового типу, який уможливив переміщення резонансного елемента на 200 мкм за керувальної напруги менше 200 В.
3. На основі моделі діелектричного резонатора з Е-типом коливань проведено розрахунок резонансних частот та добротності фільтру. Результати розрахунків перевірено експериментально. Різниця між розрахованими і експериментальними даними не перевищує 5%.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи: В 2 т. Т. 2. - М.: Связь, 1972. - 496 с.
2. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. -М.: Радио и связь, 1990.-288 с.
3. Собенин Я. А. Расчет полиномиальных фильтров. - М.: Связьиздат, 1963. - 272 с.
4. Справочник по расчету фильтров с учетом потерь: Пер. с нем. / Под ред. К. А. Сильвинской. - М.: Связь, 1972. - 200 с.
5. Безбородов Ю. М., Нарытник Т. К., Федоров В. Б. Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. - К.: Техника, 1989. - 184 с.
6. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М. Е. Ильченко. - М.: Радио и связь, 1989.-328 с.
7. Loop-gap resonator: a lumped mode microwave resonant structure / M. Mendizadeh, T. K. Ishii, J. S. Hyde, W. Francisz // IEEE Trans. MTT. -1983. - Vol. 31, nr 12. - P.1059 - 1064.
8. Исследование новых СВЧ керамических диэлектриков, коаксиальных диэлектрических резонаторов и фильтров на их основе / А. Г. Белоус, О. В. Овчар, Ю. Д. Ступин, В. Г. Цыкалов // Материалы V Крым. конф.«СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии», (Севастополь, 25 - 27 сентября 1995 г.): В 2 т. - Т.1. -

- Севастополь: Вебер, 1995. - С. 269 - 272.
9. Татарчук Д.Д. Комбіновані структури НВЧ з діелектричним резонансом Е-типу. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.- НТУУ «КПІ», Київ, 2000. – 170 с.
 10. Молчанов В.И., Пятчанин С.В. Полосовой фильтр КВЧ на диэлектрических резонаторах с пьезоэлектрической перестройкой частоты// Электронная техника. Сер.Электроника СВЧ.-1989.- Вып.4(418).-С.3-5.
 11. 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.
 12. Д.Д.Татарчук, В.И.Молчанов, Ю.В.Прокопенко. СВЧ фильтры на основе диэлектрических резонаторов с перестраиваемыми характеристиками // Электроника и связь. -1997.- №2.- С.441-446.
 13. Молчанов В.И., Пятчанин С.В., Прокопенко Ю.В. Составной диэлектрический резонатор с воздушным зазором// Изв. вузов СССР. Сер.Радиоэлектроника.-1987.-N1.-С.31-35.
 14. Диэлектрический резонатор, перестраиваемый в широком диапазоне частот без ухудшения добротности / Пятчанин С.В., Войтенко А.Г., Молчанов В.И. и др.// Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. 25-27 октября 1988.- Тбилиси, 1988.-С.74-75.
 15. 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.
 16. Живков А.П., Пятчанин С.В., Молчанов В.И. Фильтры на диэлектрических резонаторах с частотно-перестраиваемыми характеристиками// Изв. вузов СССР. Сер.Радиоэлектроника.-1990.- N 5.- С.77-79.
 17. Методичні вказівки до виконання організаційно-економічного розділу дипломних проєктів для студентів приладобудівних спеціальностей / Уклад.: Т.В.Левицька, Т.В.Мельник, С.В.Войтко. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2002. – 20 с.
 18. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.
 19. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник. 3-вид./ За ред. М.П.Гандзюка. – К.: Каравела, 2006. -392 с.
 20. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. - М.: Высш. шк.,1990.-335 с.
 21. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем / М.З.Згуровский, М.Е.Ильченко, С.А.Кравчук и др. : В 2 т. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003. – Т.1.: Распространение радиоволн. Антенные и частотно-избирательные устройства. – 456 с.

22. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. -М.: Радио и связь,1990.-288 с.
23. Собенин Я. А. Расчет полиномиальных фильтров. - М.: Связьиздат, 1963. - 272 с.
24. Справочник по расчету фильтров с учетом потерь: Пер. с нем. / Под ред. К. А. Сильвинской. - М.: Связь, 1972. - 200 с.
25. Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. А. Л. Фельдштейна. - М.: Связь, 1979. - 336 с.
26. Бачина Е. Л., Прохорова Н. И., Фельдштейн А. Л. Потери в фильтрах СВЧ и проблемы миниатюризации // Радиотехника. - 1971. - Т. 26, № 10. - С. 46 - 52.
27. Коган С. Х. Влияние диссипативных потерь в резонаторе на форму частотной характеристики полосового фильтра // Радиотехника и электроника. - 1963. - Т. 8, № 10. - С. 1671 - 1677.
28. Осипенков В. М., Бачина Е. Л., Фельдштейн А. Л. Вопросы расчета фильтров СВЧ с потерями // Радиотехника. - 1973. - Т. 28, № 4. - С. 25 - 30.
29. Гусева М. Н. Обобщенный метод синтеза пассивных фильтров СВЧ с учетом диссипативных потерь // Радиоэлектроника. - 1980. - № 11. -С. 14-18 (Изв. вузов).
30. Вязгин В. А., Федоров В. В. Математические методы автоматизированного проектирования. - М.: Высш. шк., 1989. - 184 с.
31. Гупта К, Гордою Р., ЧадхаР. Машинное проектирование СВЧ устройств. -М.: Радио и связь,1987.- 432 с.
32. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. - М.: Радио и связь, 1988. - 560 с.
33. Калабеков Б. А., Лapidус В. Ю., Малафеев В. М. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи. - М.: Радио и связь, 1990.-272 с.
- 34.Инженерно-технический справочник по электросвязи. Радиорелейные линии / Н. Н. Каменский, А. А. Метрикин, Л. В. Надененко и др. - М.: Связь, 1970. - 440 с.
- 35.Модель А. М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. - М.: Связь, 1967. - 352 с.
- 36.Степаненко П. Я. Фильтры на тонких индуктивных диафрагмах в круглом волноводе // Радиоэлектроника. - 1989. - Т. 32, № 11. - С. 72 -73. (Изв. вузов).
- 37.Беляев Б. А., Тюрнев В. В. Частотно-зависимые коэффициенты связи микрополосковых резонаторов // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. - 1992. - Вып. 4 (448). - С. 23 - 27.