

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

В.о. зав. кафедрою

_____ Михайло Степанов

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Радіозв'язок і оброблення сигналів»

**за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» на тему:
«Хвилевідний фільтр Ку діапазону»**

Виконав

студент 2 курсу, групи РА-01мп
Демченко Іван Вольдемарович _____

Керівник:

професор, д.т.н.

Степанов Михайло Миколайович _____

Рецензент:

Старший викладач каф. РІ,
Андрій БУЛАШЕНКО _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіозв'язок і оброблення сигналів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Михайло СТЕПАНОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента
Демченко Івана Вольдемаровича

1. Тема дисертації «Хвилевідний фільтр Ку діапазону»
науковий керівник дисертації Степанов Михайло Миколайович, д.т.н.,
професор затверджені наказом по університету від «15» листопада 2021 р.
№3744-с
2. Термін подання студентом дисертації 12 грудня 2021 року
3. Об'єкт дослідження особливості конструкції та параметри фільтру
4. Вихідні дані
смуговий фільтр,
смуга пропускання 14-14.7ГГц,
ослаблення у смузі загородження не менше 20дБ
5. Перелік завдань, які потрібно розробити смуговий фільтр, дослідні
характеристики
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу презентація
7. Орієнтовний перелік публікацій I.V. Demchenko, V.Y. Dmytrenko, N.S. Yelahina,
O.A. Kornieva, S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko “Adjustable guide filtering device for Ku-
band range for radioelectronic systems”, X International Conference “Radioengineering

fields, signals, equipment and systems”, Kyiv, Ukraine, November 9–11, 2021, pp. 35–37

9. Дата видачі завдання 02 вересня 2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих реалізацій фільтрів	Початок 02.09.2021-	виконано
2	Вибір фільтру та аналіз літератури	04.12.21	виконано
3	Формування технічного завдання	04.12.21	виконано
4	Моделювання структури фільтру та аналіз його характеристик	14.12.21	виконано
5	Розробка стартап проєкту	17.12.21	виконано
6	Оформлення та підготовка до захисту МД	20.12.21	виконано
7	Підготовка презентації	20.12.21	виконано

Студент

Іван ДЕМЧЕНКО

Науковий керівник

Михайло СТЕПАНОВ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітньо-професійна програма «Радіозв'язок та оброблення сигналів») — Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021, Київ.

Пояснювальна записка магістерської дисертації складається з 50 сторінок, 36 рисунків та 15 джерел посилань.

Актуальність теми: Пристрої фільтрації сучасних телекомунікаційних систем є важливим їх компонентом. Робочі характеристики таких систем параметрами хвилеводних фільтрів мікрохвильового діапазону. Тому розробка таких фільтрів є актуальною задачею для систем зв'язку.

Метою роботи є дослідження методів синтезу та реалізації оптимальної конструкції хвилеводного фільтру Ку-діапазону.

Об'єктом дослідження є особливості конструкції та параметри фільтру.

Предметом дослідження є хвилевідні фільтри Ку-діапазону.

Ключові слова: хвилевідні фільтри, НВЧ, Ку-діапазон, індуктивні діафрагми.

ABSTRACT

Master's dissertation for a master's degree in 172 "Telecommunications and Radio Engineering" (educational and professional program "Radiocommunication and Signal Processing") - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", 2021, Kyiv. The explanatory note of the master's dissertation consists of 50 pages, 36 figures and 15 sources of references.

Relevance of the topic: Filtration devices of modern telecommunication systems are an important component of them. Performance of such systems by parameters of waveguide filters of a microwave range. Therefore, the development of such filters is an urgent task for communication systems.

Subject of research is to study the methods of synthesis and implementation of the optimal design of the Ku-band waveguide filter.

The object of research is the design features and parameters of the waveguide filter.

The subject of the research are Ku-band waveguide filters

Keywords: waveguide filters, microwave range, Ku-band, inductive irises.

Зміст

Оглавление

РЕФЕРАТ	3
ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
1. Вступ.....	7
1.1 Різновиди фільтрів, їх характеристики	7
2. НВЧ фільтри	11
2.1 Реалізації НВЧ фільтрів	11
2.2 Технології виготовлення НВЧ фільтрів	21
3. Розробка фільтру 3.1 Постановка задачі.....	26
3.2 Синтез	27
3.3 Моделювання	29
4. Дослідження впливу радіусних скруглень на фільтр.....	35
5. Розробка стартап проекту	42
5.1 Опис ідеї проекту	42
5.2 Технологічний аудит проекту.....	43
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту	44
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	48
5.5 Розроблення маркетингової програми.....	50
ВИСНОВКИ	51
Перелік посилань.....	52

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ФНЧ – фільтр низьких частот

ФВЧ – фільтр високих частот

НВЧ – надвисокочастотний

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі

СП – смуга пропускання

СЗ – смуга загородження

ЦОС – цифрова обробка сигналів

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

SDR – англ. Software-defined radio

BUC – англ. Block Upconverter, перетворювач частоті «вгору» з підсилювачем потужності, використовуються в системах космічного зв'язку

SIW – англ. Substrate Integrated Waveguide

МСЛ – мікросмужкова лінія

КЛ – копланарна лінія передачі

1. Вступ

Фільтри є одною з найпоширеніших складових систем зв'язку, радіолокації, вимірювального обладнання. Характеристики цих систем значно визначаються електродинамічними характеристиками фільтрів. Різноманіття фільтрів дуже велике, і визначається вибором робочого діапазону, умовами експлуатації, призначенням, вибором компонентної бази.

Основним призначенням фільтрів є придушення одних частотних складових та добра передача інших складових деякого складного сигналу.

1.1 Різновиди фільтрів, їх характеристики

За частотними характеристиками фільтри можна поділити [1]:

- фільтр нижніх частот ФНЧ
- фільтр високих частот ФВЧ
- смуговий фільтр
- смуга загороджувальний фільтр або режекторний

Загальний вигляд амплітудно-частотних характеристик можна подивитися на

Рис. 1.1.

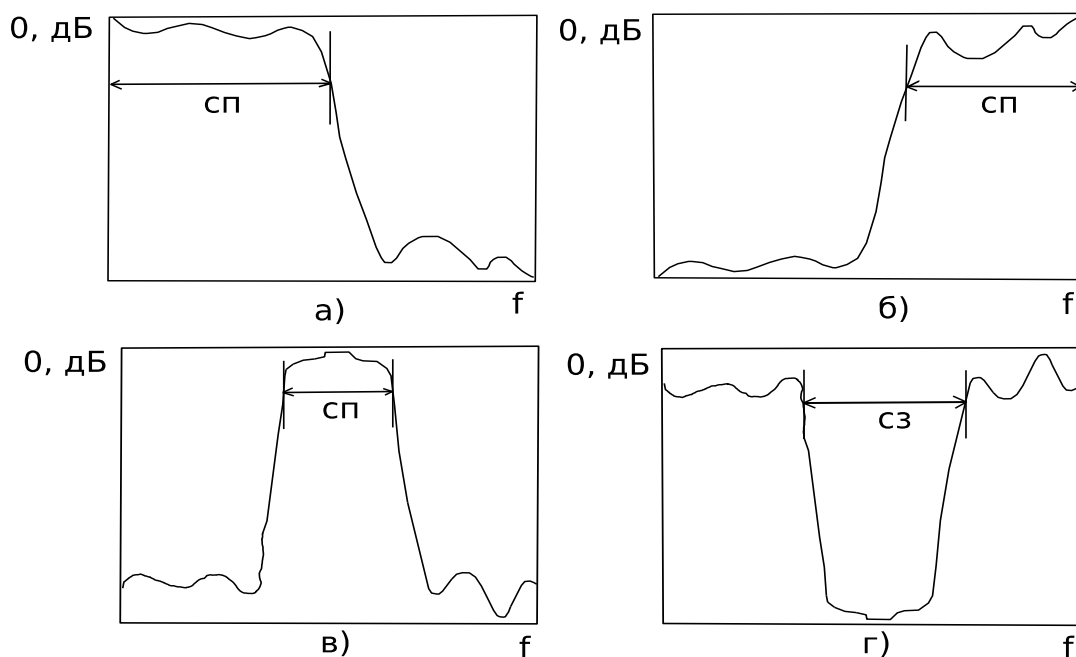


Рис. 1.1 АЧХ а) ФНЧ, б) ФВЧ, в) смуговий г) режекторний

Діапазон з невеликим затуханням яке не перевищує певне значення (часто 3дБ) називають смугою пропускання. Область між смугою пропускання та смугою загородження називають смугою переходу, та не пред'являють вимог, що до поведінки АЧХ. Існують також фільтри с АЧХ складної форми, вони можуть бути несиметричними, і взагалі задовільної форми.

Розглянемо більш детально характеристики смугового фільтра, на Рис. 1.2

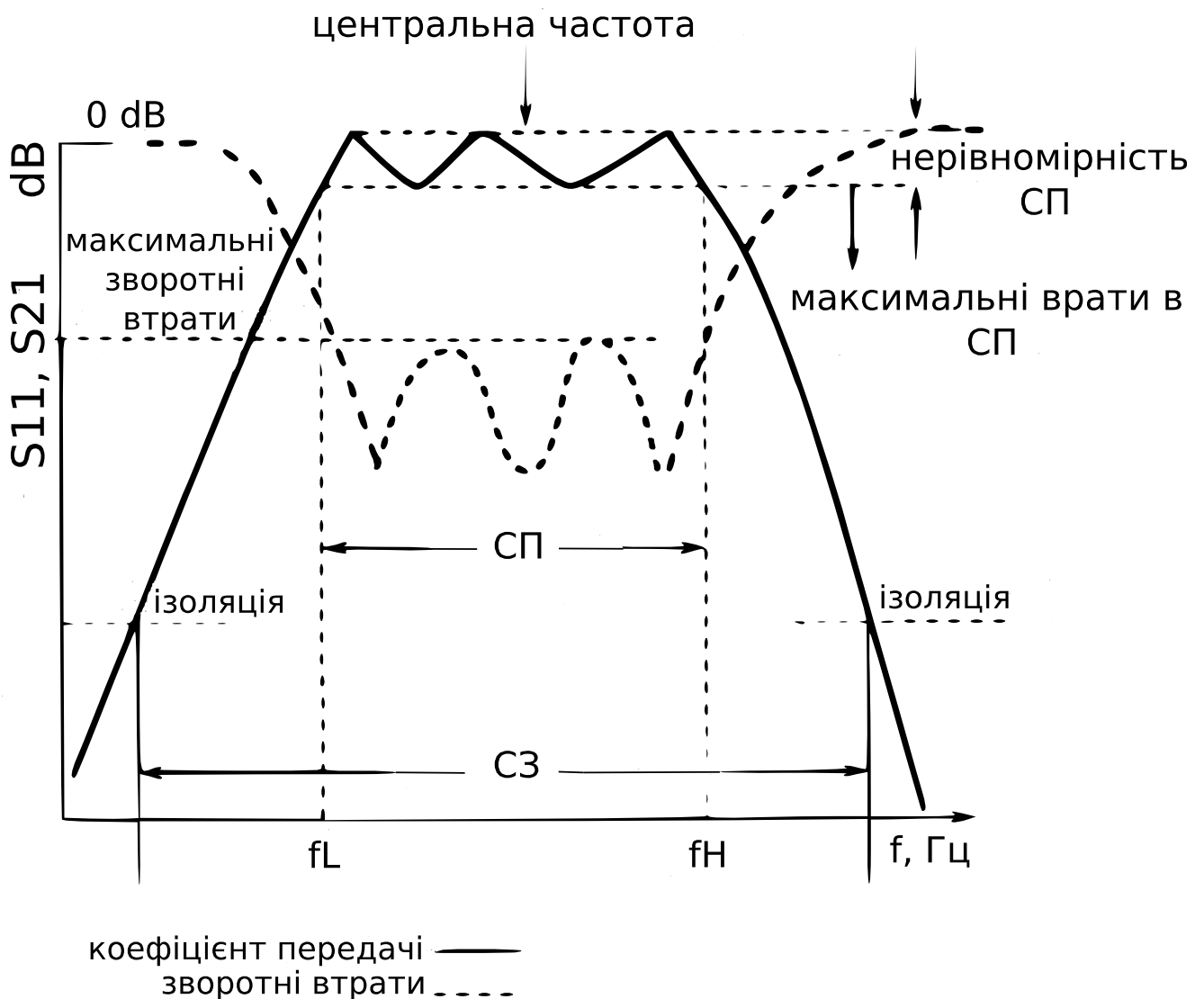


Рис. 1.2 Характеристики смугового фільтра

Можна спостерігати такі параметри:

- СП – смуга пропускання
- СЗ – смуга загородження
- f_L – частота пропускання знизу

- f_H – частота пропускання зверху
- максимальні зворотні втрати (цей параметр можна виразити як КСХ)
- нерівномірність СП
- ізоляція в смузі загородження

Це основні характеристики смугового фільтру.

Також фільтри можна класифікувати за видом АЧХ фільтрів, фільтри з максимально плоскою амплітудно-частотною характеристикою (фільтри Батерворта), фільтри з осцилюючою АЧХ в смузі пропускання (фільтри Чебишева), та еліптичні фільтри в яких АЧХ осмілює як в смузі пропускання так і в смузі загородження.

За смугою пропускання фільтри поділяються: на вузькосмугові , середньосмугові та широкосмугові . Треба зауважити, що широкосмугові фільтри не використовуються з хвилеводами стандартного перерізу, бо у регулярних хвилеводів робоча смуга 20 відсотків, що обумовлено утворенням вищих типів хвиль вище робочого діапазону [8].

Фільтри можна поділити на цифрові та аналогові: Цифрові фільтри на зараз набувають широкого поширення, адже завдяки ЦОС вони мають багато переваг (адаптивність, прямокутність АЧХ), але їх застосування не виключає необхідності застосування аналогових фільтрів, як мінімум це буде ФНЧ на вході АЦП, чи на виході ЦАП. Такий підхід використовують в радіосистемах, що визначаються за допомогою програм (SDR), це забезпечує такі переваги, як малі габарити та вагу, гнучкість системи, то що.

В системах НВЧ цифрова обробка здійснюється все після одно або декількох перетворень частоти, на відносно низьких частотах [10]. Так як доступні АЦП і ЦАП мають максимальні робочі частоти в сотні мегагерц, а

реалізації на одиниці гіга герц хоча і існують вони занадто дорогі та малодоступні.

Аналогові фільтри в сучасній техніці дуже різноманітні, це можуть бути фільтри на зосереджених елементах, резонаторах (керамічних, діелектричних, об'ємних, гіромагнітних), поверхневих хвилях, лініях зв'язку тощо.

Частина фільтрів виготовляється як стандартній виріб, але це стосується елементів на який є масовий попит. До таких можна віднести, фільтри проміжної частоти, це мабуть перші перші фільтри які почали виготовлятися як стандартна деталь. З розповсюдженням систем мобільного зв'язку стали стандартним виробом необхідні для них фільтри.

2. НВЧ фільтри

2.1 Реалізації НВЧ фільтрів

В НВЧ техніці найбільш розповсюджені ФНЧ, та смугові фільтри. Конструктивно вони представляють собою відрізок лінії передачі з розміщеними в ній реактивними елементами, але такими які не вносять дисипативних втрат.

Одним із самих розповсюджених способів виготовлення НВЧ фільтрів є друкований метод. Недоліком такого методу є складність отримання необхідних параметрів, високі втрати, що збільшуються із підвищенням частоти, неможливість застосування на високих потужностях.

Зовнішній вигляд смугового фільтру С-діапазону виконаного методом друку на матеріалі японської фірми Rogers зображений на Рис. 2.1. Виконання фільтра на підложці із високим значенням діелектричної проникності Рис. 2.2 , Рис. 2.3 дозволяє мінімізувати габарити, та підвищує технологічність пристрою, також матеріал підложки має менші втрати ніж основна плата. Також треба зауважити, що параметри ламінатів доволі сильно відрізняються від партії до партії, а з урахуванням вартості виготовлення, доцільно такі елементи виготовляти окремо.

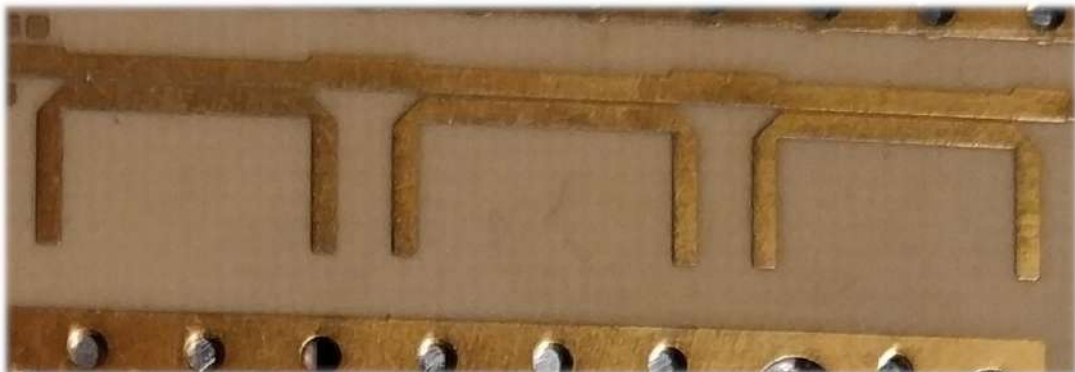


Рис. 2.1 Мікросмушковий фільтр



Рис. 2.2 Мікросмушковий фільтр на підложці з високою діелектричною проникністю

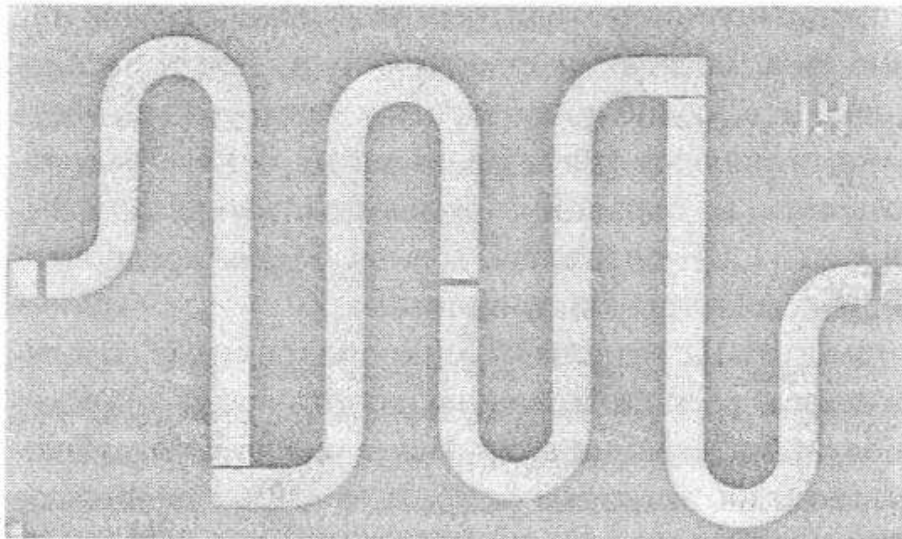


Рис. 2.3 Фільтр на полі коровій підложці [11]

Існує безліч варіантів топології планарних фільтрів, деки з них зображені на Рис. 2.4.

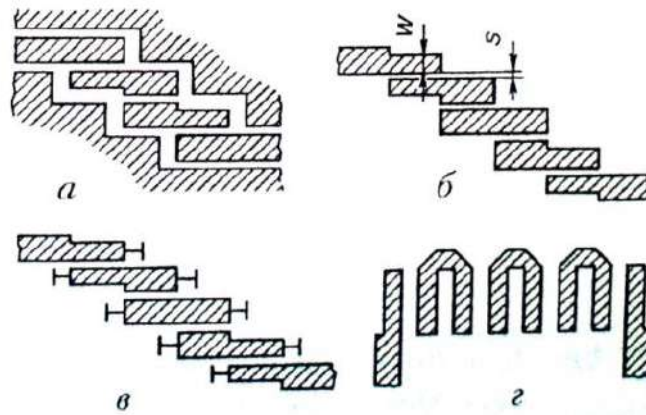


Рис. 2.4. Смугопропускаючи фільтри на паралельно зв'язаних півхвильових резонаторах: а - на КЛ; б - на МСЛ; в - на МСЛ з короткозамкнутими резонаторами; г - на меандрових розімкнених резонаторах [11]

На сьогодні існує багато конструкцій фільтрів на діелектричних резонаторах, їх можна реалізувати, як для хвилеводів, так и для коаксіальних ліній. Деякі варіанти конструкцій смугових фільтрів наведено на Рис. 2.4. На Рис. 2.5 наведено можливі реалізації ежекторних фільтрів на основі діелектричних резонаторів.

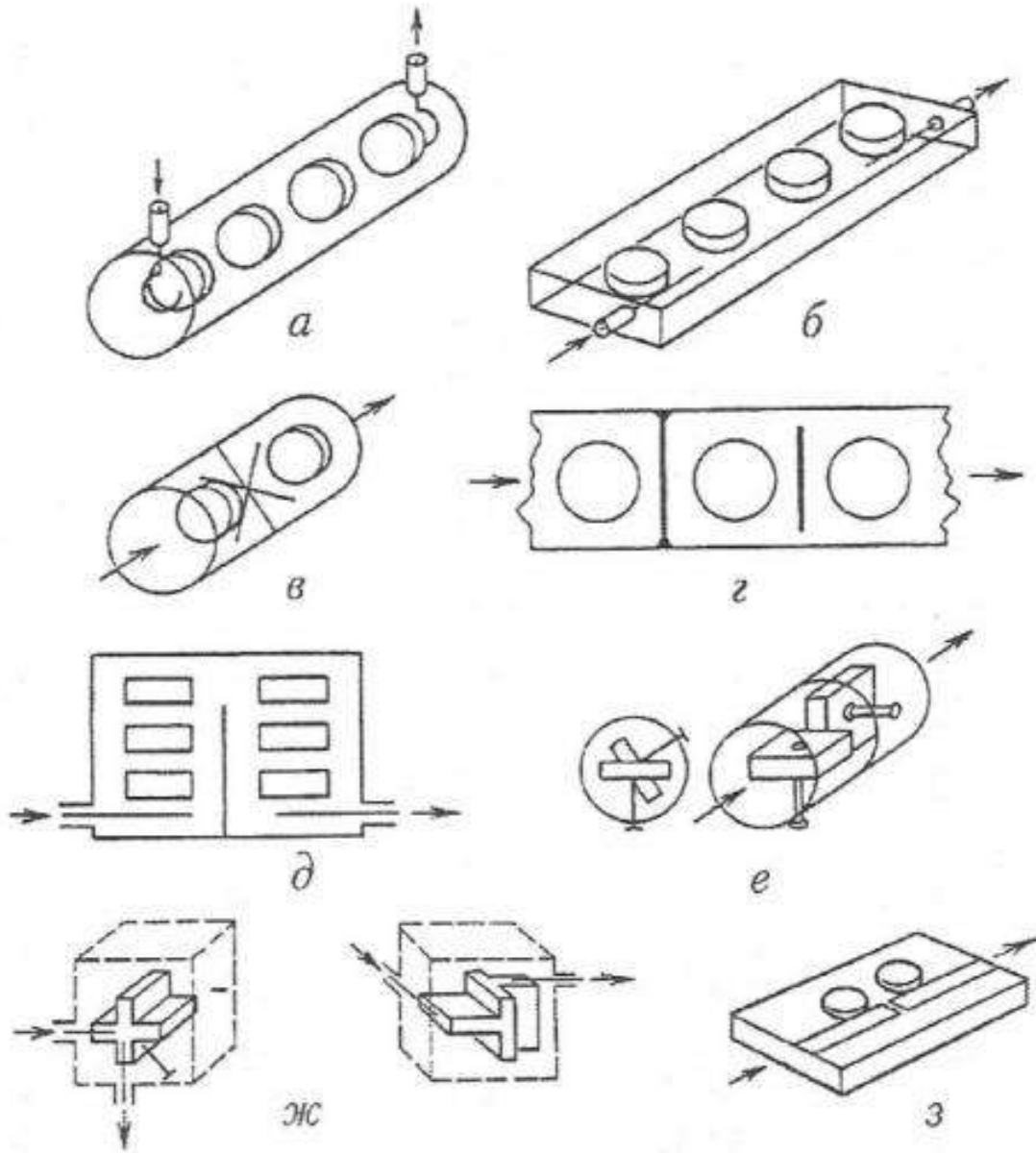


Рис. 2.4 Смугопропускаючи фільтри на діелектричних резонаторах [11]

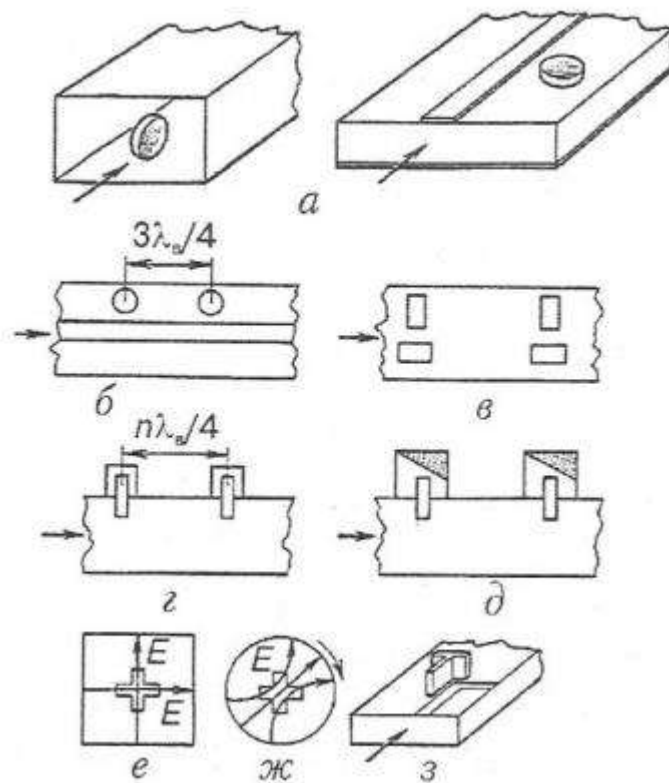


Рис. 2.5 Режекторні фільтри на діелектричних резонаторах [11]

Фільтри реалізовані за допомогою індуктивних або ємнісних стержнів у хвилеводах Рис. 2.6 також знаходять розповсюдження у хвилевідній техніці. Такі структури мають менші втрати ніж фільтри на діафрагмах, що дозволяє проектувати вузько смугові фільтри, недоліком є складність виготовлення та налагодження.



Рис. 2.6 Хвилевідний фільтр з металевими стержнями

На знятих характеристиках (Рис. 2.7) помітна спотворення АЧХ, яка обумовлена невдалим налаштуванням, або порушенням конструкції фільтру.

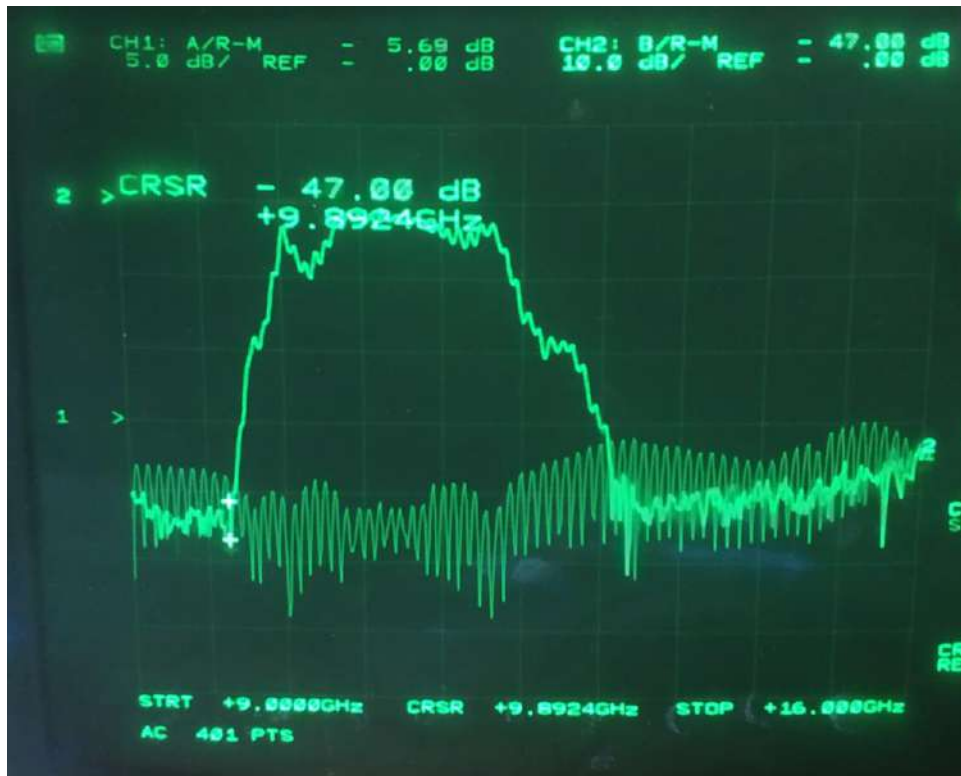


Рис. 2.7 АЧХ хвильоводного фільтру з металевими стержнями

Вигляд смугового фільтру із гребінками показаний на Рис. 2.1.8.

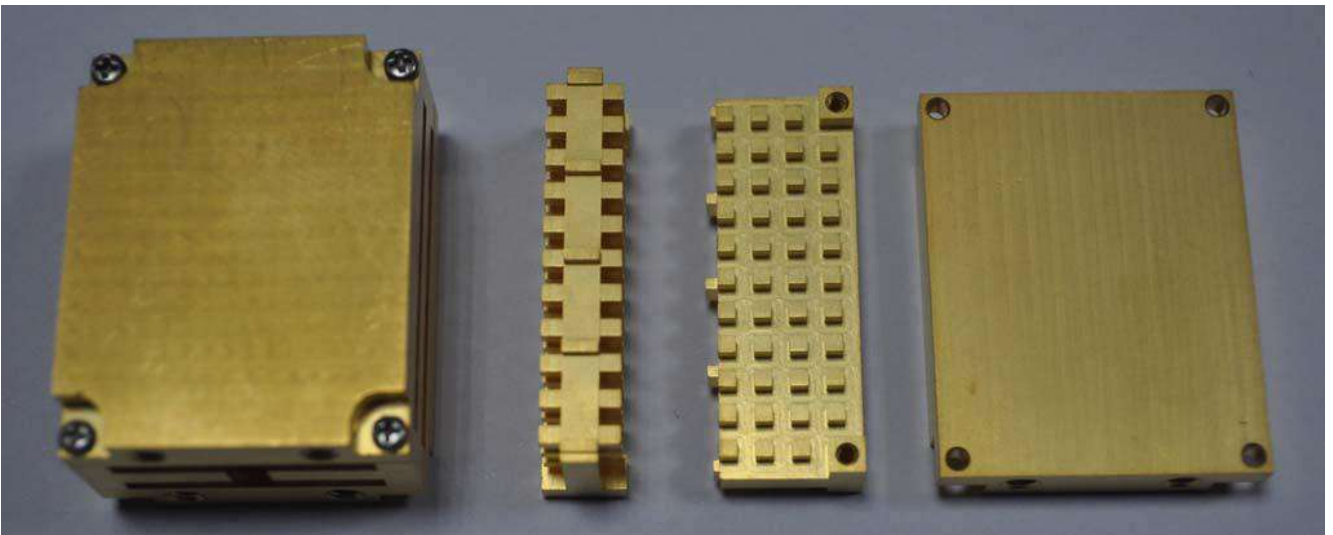


Рис. 2.8 Фільтр на ємнісних гребінках [12]

Фільтри із металевими вставками між двох половинок хвилеводу у Е-площині [5] представлені на Рис. 2.9. Такі фільтри широко розповсюджені в НВЧ пристроях. Металеві вставки можуть бути, як окремими деталями, так і одною деталлю. Вони утворюють ємнісну структуру, яка може мати складну структуру, а у деяких варіантах має елементи налагодження.

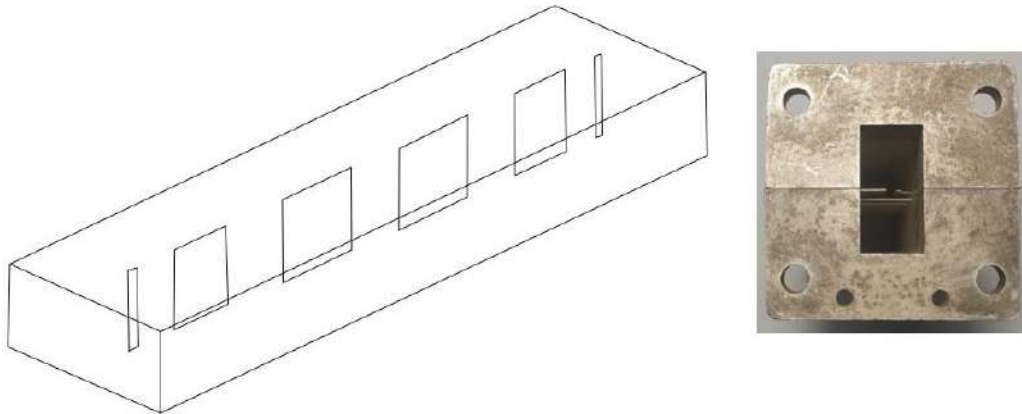


Рис. 2.9 Вигляд хвилевідного фільтру з металевими вставками в Е-площині між половин хвилеводу

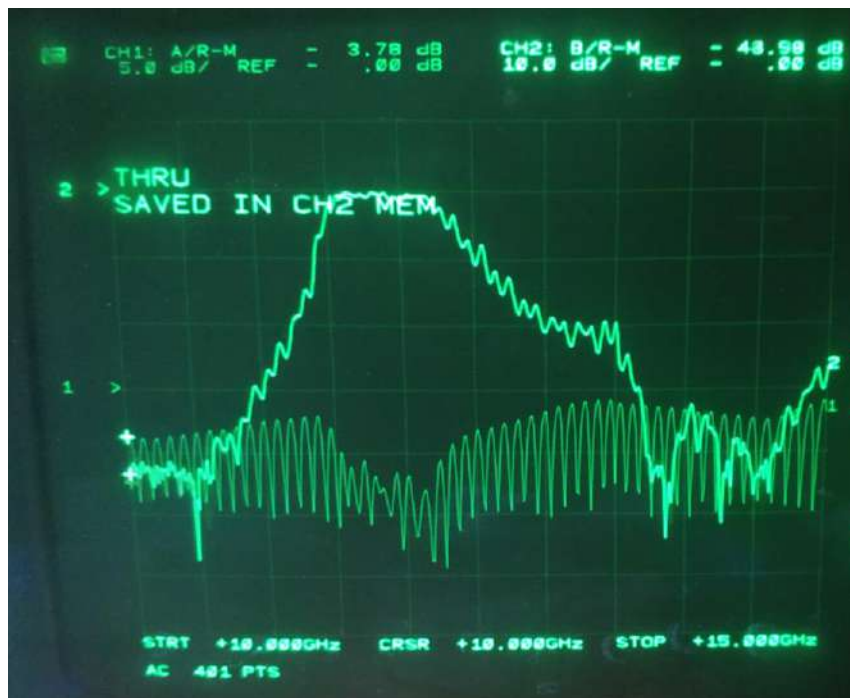


Рис. 2.10 АЧХ фільтру з металевими вставками в Е-площині між половин хвилеводу

Цей фільтр має цікаву АЧХ, що представлена на Рис. 2.10. Можливо така форма в неї реалізована спеціально, адже коефіцієнт відбиття на пологій ділянці згори по частоті значно не зростає.

Фільтри на індуктивних та ємнісних діафрагмах представлена на Рис. 2.11. Вони широко розповсюджені за рахунок простої конструкції та виготовлення. Їх недоліком є складність налаштування. Ємнісні діафрагми рідше застосовують, вони мають більші втрати.

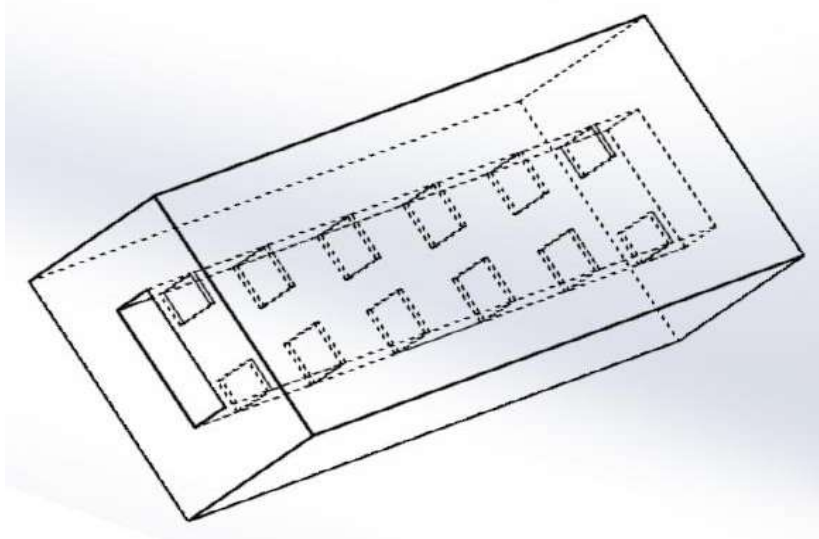


Рис. 2.11 Хвилевідний фільтр з індуктивними діафрагмами

В деяких випадках використовуються фільтри з комбінованою топологією [4]. Один із варіантів поданий на Рис. 2.12. Комбінування структури дозволяє отримати необхідні характеристики, або забезпечити можливість підстроювання його характеристик. Особливість конструкції фільтру із діафрагмами складної форми представлена на Рис. 2.14. Автори [14] реалізували на них як смугові, так і режекторні фільтри. Ще один варіант із комбінованою топологією зображений на Рис. 2.15. Представлений фільтр має вузьку смугу частот.

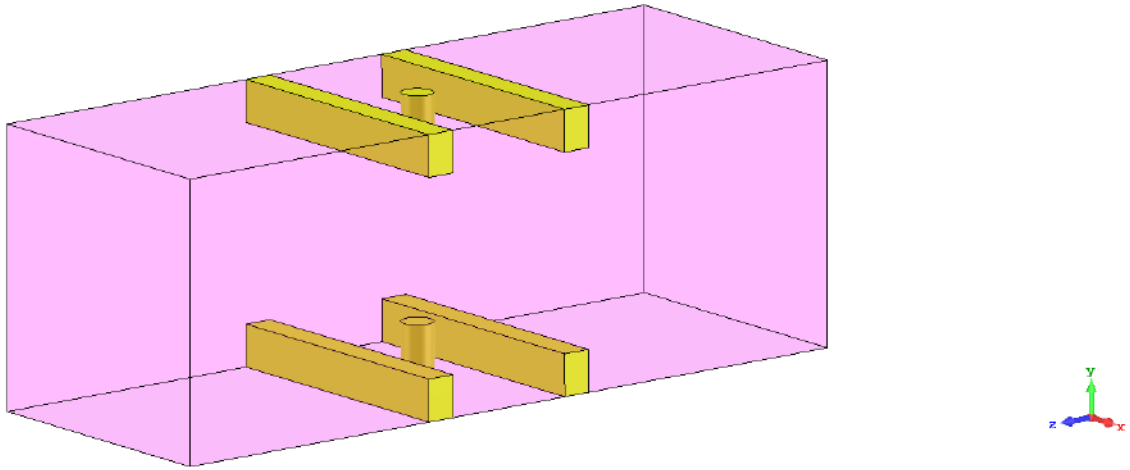


Рис. 2.13 Хвилевідний фільтр з комбінованою топологією

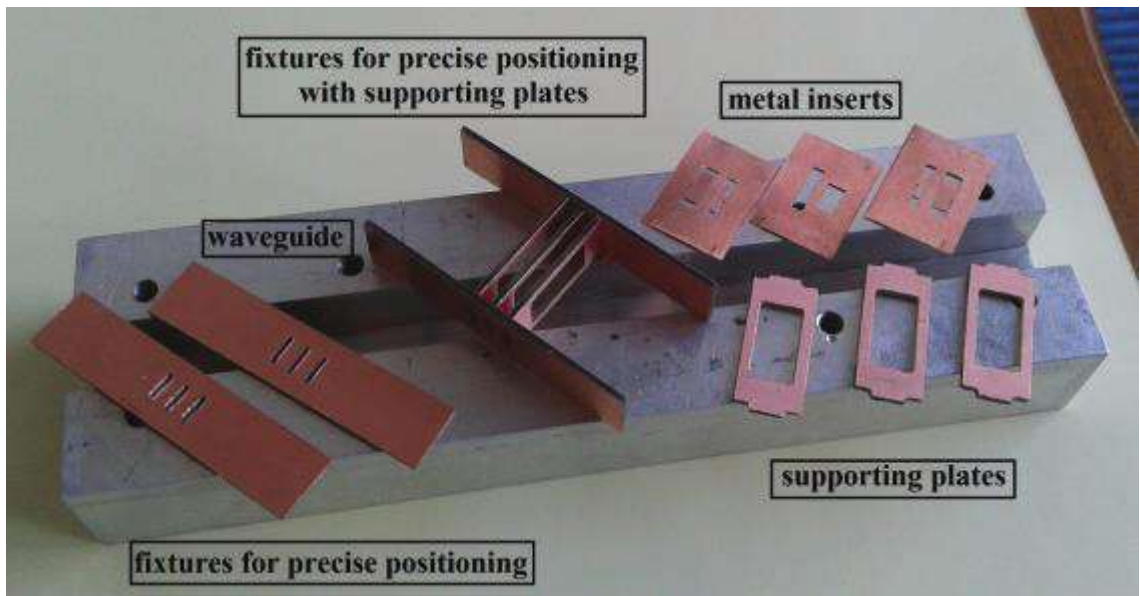


Рис. 2.14 Хвилевідний фільтр на діафрагмах складного перерізу [14]

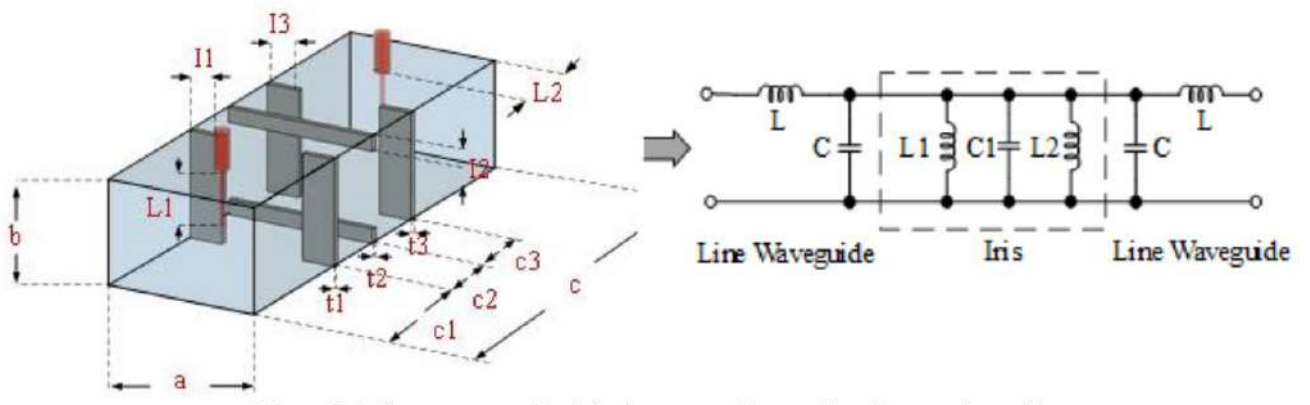


Рис. 2.15 Хвилевідний фільтр з комбінованою топологією [15]

Одною із найважливіших вимог до деяких фільтрів, які застосовуються в системах радіолокації та космічного зв'язку, є достатньо високій рівень робочих потужностей, що обмежує застосування планарних структур. Для цієї мети добре підходять хвилевідні та резонаторні НВЧ структури. Розміри НВЧ фільтрів реалізованих на відрізках прямокутних хвилеводів з неоднорідностями у вигляді металевих штирів, діафрагм або в комбінації штирів з діафрагмами визначаються габаритами базових хвилеводів.

Розміри фільтрів на об'ємних резонаторах значно більші, незважаючи на можливість коаксіальних зв'язків між ними, що дозволяє зменшити габарити в порівнянні з хвилеводними зв'язками. Але втрати в коаксіальних лініях та відбиття при переходах, роблять такий варіант мало доцільним.

2.2 Технології виготовлення НВЧ фільтрів

Вартість, та швидкість виготовлення є значними чинниками вибору конструкції фільтру.

Технології виготовлення можна поділити на дві групи:

- адитивні
- традиційні

До адитивних технологій можна віднести тривимірний друк за допомогою металу або пластику. Крім того, сюди відносяться всі технології нанесення покриттів:

- гальванічні технології;
- вакуумні електронні;
- вакуумні динамічні (плазмові);
- газодинамічні;
- хімічні.

Розглянемо тривимірний друк пластиком, застосовувати в серійних виробках. Виникає питання довгострокової стабільності пластиків. Більш того, при виготовленні будуть необхідні і інші операції, гальваніка, тощо. Більшість пластиків є гіроскопічними і з часом волога потрапить у хвилевідний тракт та зіпсує при цьому металеве покриття. Друк металом на зараз є занадто коштовним, та малопоширеним. Конструкції фільтрів у вигляді темної лиття застосовують для виробів із великими серіями. Таку технологію також можна віднести до адитивних технологій (Рис. 2.16).

З адитивних технологій доволі поширений метод напилення металів на підложки з великою діелектричною проникністю. Такий фільтр можна спостерігати у серійному пристрої ВУС фірми NJR. На Рис. 2.16 та на Рис. 2.1 також зображено фільтр виконаний за такою технологією.

На Рис. 2.18 зображений НВЧ підсилювач з елементам узгодження. Однією з таких технологій є напилення за допомогою магнетрона (мається на увазі не той магнетрон, який потужний НВЧ генератор). Як видно, у серійних пристроях такі технології доволі розповсюджені.



Рис. 2.16 Хвилевідний фільтр у складі пристрою виготовлений методом лиття

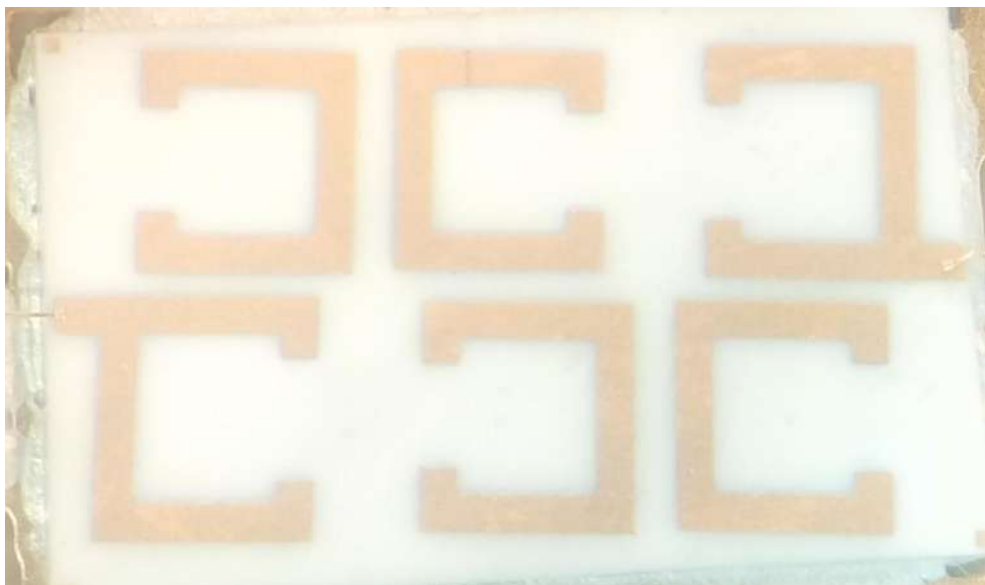


Рис. 2.17 Планарний фільтр, напилення на керамічну підложку

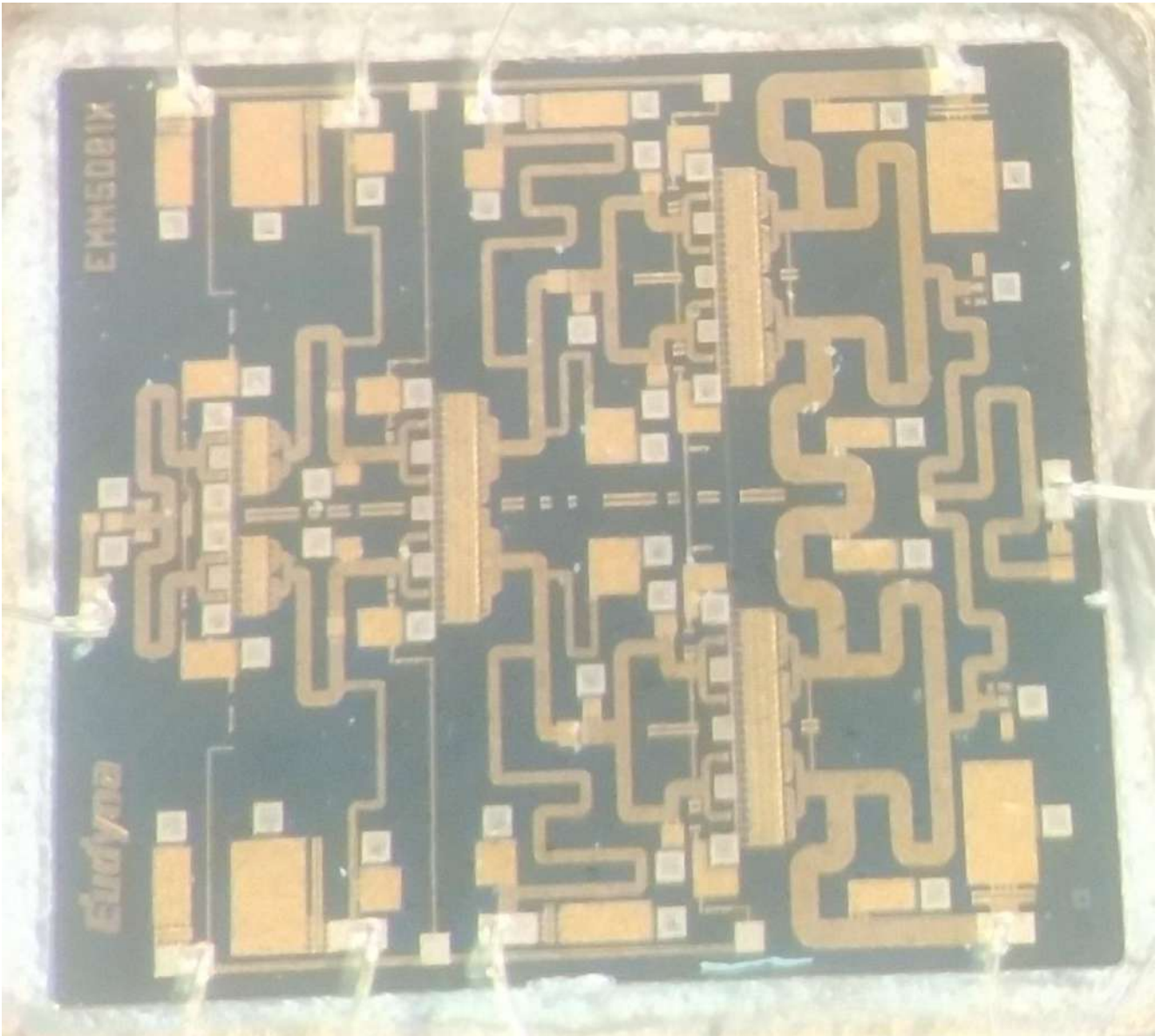


Рис. 2.18 Гібридний НВЧ підсилювач, що виконаний методом напилення на підложку

Традиційні технології – це такі технології, які в процесі обробки віднімають масу від заготовки. Тобто майже всі методи механічної обробки, такі як токарна, фрезерна, шліфувальна, свердлильна то що. Електроерозійна обробка дозволяє робити вирізи з дуже малими радіусами, але вона є дорогою та дуже повільною.

На зараз стали доступні фільтри виготовлені за технологією SIW або інтегрований в підложку хвилевід (Рис. 2.19), тобто хвилевідна структура з двох плоско-паралельних металевих шарів, що поєднані двома рядами металевих

штирів. Така структура реалізується за допомогою сучасних пленарно інтегральних технологій [6]. Але такі технології виробництва доцільні лише при дуже великих тиражах.

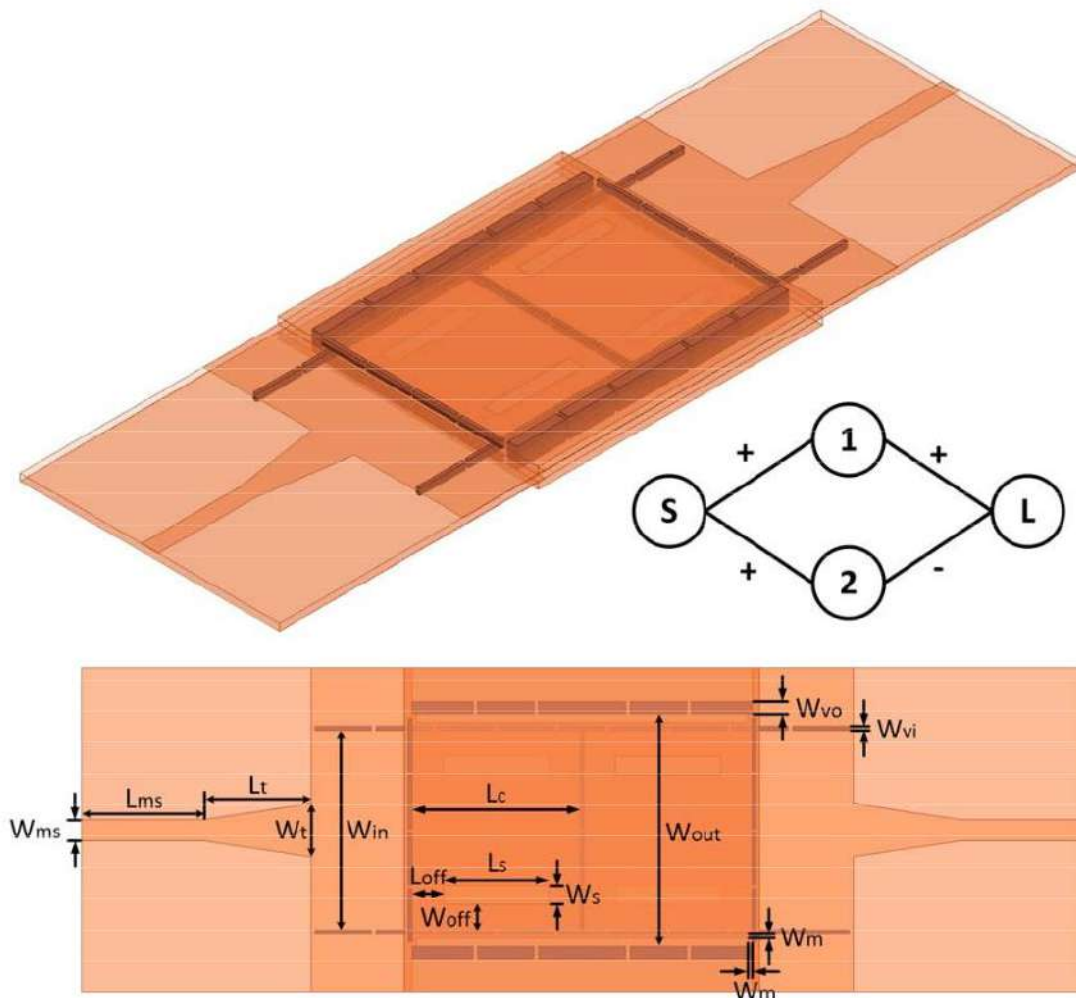


Рис. 2.19 Фільтр на основі інтегрованих в підложку хвилеводів [13]

Сьогодні дуже зручно різати на замовлення листові матеріали лазером. Цікавий варіант обробки гідроабразивна різка, але доступність такого обладнання погана.

Для малосерійних та одиничних виробів доцільно використовувати мінімум технологічного обладнання. Непоганий результат дає фрезкування за допомогою верстатів з числовим програмним керуванням, в них короткий шлях від моделі до

готового виробу з мінімумом операцій та ручної роботи.

Якщо фільтр виготовляється на міліметровій діапазон варто зробити покриття сріблом НВЧ структур, інколи таке покриття доцільно робити і на низьких частотах.

Виріб, що буде використовуватися у реальній експлуатації варто вкрити захисним покриттям. А фланці використовувати з ущільнюючими кільцями.

3. Розробка фільтру

3.1 Постановка задачі

При використанні ВУС Ku діапазону 14.0-14.5 часто виникає проблема потрапляння в носійну гетеродина, яка в свою чергу потрапляє у робочий діапазон Ku-low 12.75-13.25ГГц. Це при певних обставинах вимагає додаткової фільтрації, вже по високій потужності.

Визначимо необхідні параметри фільтрації так:

Смуговий фільтр з смугою пропускання 13.5-14.7ГГц

Нерівномірність в робочій смузі <0.5 дБ

Поза смугове придушення >20 дБ

Фільтр на хвилеводному тракті WR-75 з розмірами 19.05 на 9.52мм який має робочу смугу 10-15 ГГц при роботі в моді [7].

Оскільки в тракті маємо високу потужність >40Вт, то відразу перейдемо до фільтрів з малими втратами та простою конструкцією. Такими є хвилевідні фільтри на діафрагмах. Оберемо фільтр на індуктивних діафрагмах, оскільки вони мають вищу добротність. Товщину діафрагм оберемо 0.6мм.

3.2 Синтез

Оберемо фільтр прототип з Чебишевською характеристикою

(3.2)

де рівень пульсацій в смузі пропускання ϵ .

Оскільки в хвилеводі важко реалізувати послідовні та паралельні резонатори одночасно, то використаємо перетворювачі імпедансу [2]. Розрахуємо коефіцієнти перетворювачів імпедансу

$$\frac{K_{j,j+1}}{Z_0} = \frac{\pi \Delta}{2\sqrt{g_j g_{j+1}}} \text{ де } j = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.3)$$

$$\frac{K_{N,N+1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_N g_{N+1}}} \quad (3.4)$$

Була оцінена кількість діафрагм [3] для даної смуги пропускання, яка вийшла мінімум 6 за допомогою співвідношення

$$N \geq \frac{(L_A + RL + 6)}{20 \log(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1})} \quad (3.5)$$

де

L_A – ізоляція

RL – зворотні втрати

γ – відношення смуги загородження до смуги пропускання

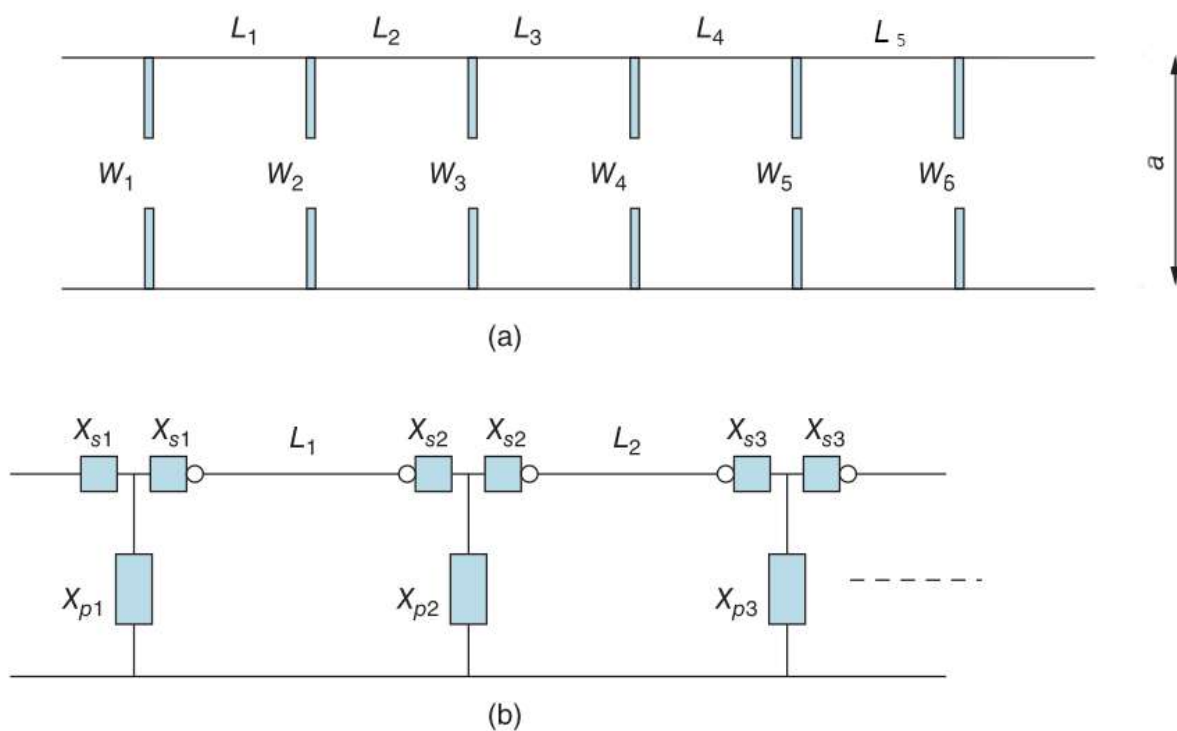


Рис. 3.1 Вигляд фільтру: а) Фізична реалізація б) еквівалентна схема [2]

Оскільки параметри діафрагм не можна розрахувати аналітично подальші розрахунки виконуються чисельним методом за допомогою комп'ютерного моделювання у комерційному програмному забезпеченні.

3.3 Моделювання

Сучасні системи автоматизованого проектування НВЧ використовують наступні алгоритми:

Схемотехнічні (теорії кіл), МоМ (Method of Moments) – метод моментів, FEM (Finite Element Method) – метод кінцевих елементів,

МоМ/FEM – гібридний метод моментів/кінцевих елементів,

UTD (Unitform Theory of Diffraction) – метод теорії дифракції,

GTD (Geometrical Theory of Diffraction) – метод геометричної теорії дифракції,

FDTD (Finite Difference Time Domain) – метод кінцевої різниці в часовій області,

FIT (Finite Integration Technique) – метод кінцевих інтегралів.

В більшості наведених методів наведені конструкції розбиваються на часткові області. При цьому рішення знаходять у вигляді інтегралів, чи рядів функцій.

У практичному застосуванні наведених методів виникають ряд проблем, таких, як помилки інтерполяції, фіктивні рішення, адекватність математичної моделі об'єктам дослідження при заданих обмеженнях, затрати часу на обчислення. Похибки в основному обумовлені заміною диференціальних рівнянь на кінцево-різницевиими, що призводить до похибок функцій в вузлових точках, різницею в побудові інтерполяційних та шуканих функцій. На ці похибки впливає не лише крок сітки, а й характер поля.

Таким чином, можна зробити висновки, що виникають проблеми низької відповідності результатів або дуже великої ресурсомісткості процесу моделювання.

За допомогою чисельного моделювання було синтезовано геометрію та ітераційно оптимізован конструкцію пристрою, що представлений на Рис. 3.2. Всі розміри на рис. 3.2 подані в міліметрах. Як видно, фільтр симетричний, як в вертикальній, так і у горизонтальній площинах. Зовнішній вигляд перерізу представлений на Рис. 3.3. Для прискорення та спрощення задачі використовувалась «зворотна» модель (рис. 3.4).

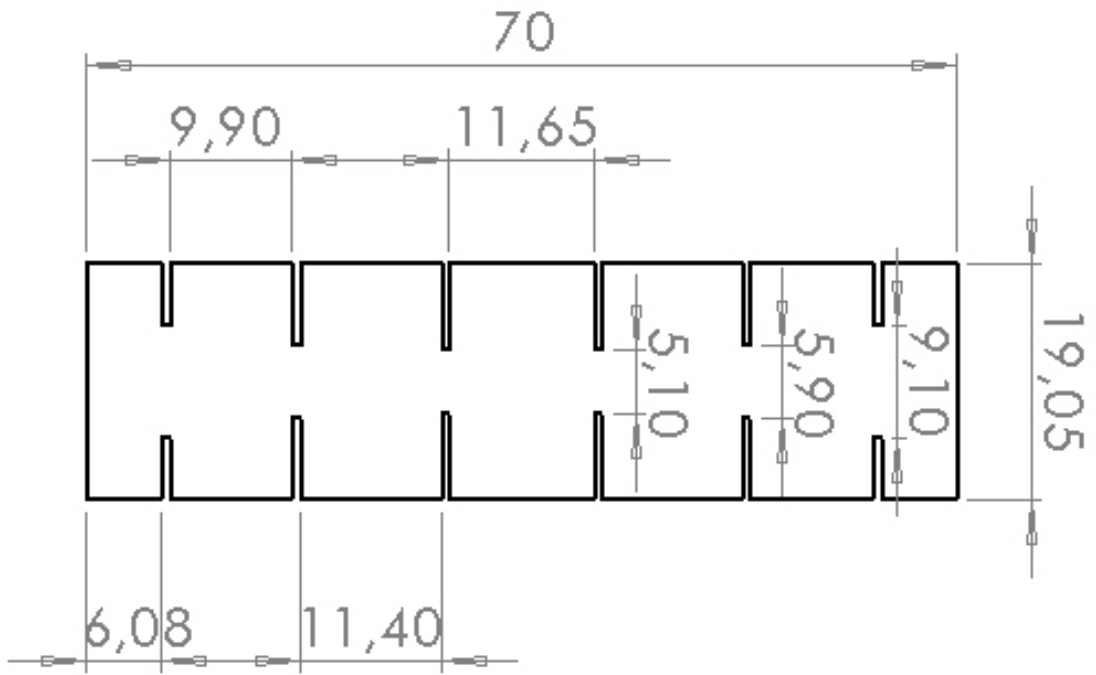


Рис. 3.2 Синтезована геометрія фільтру

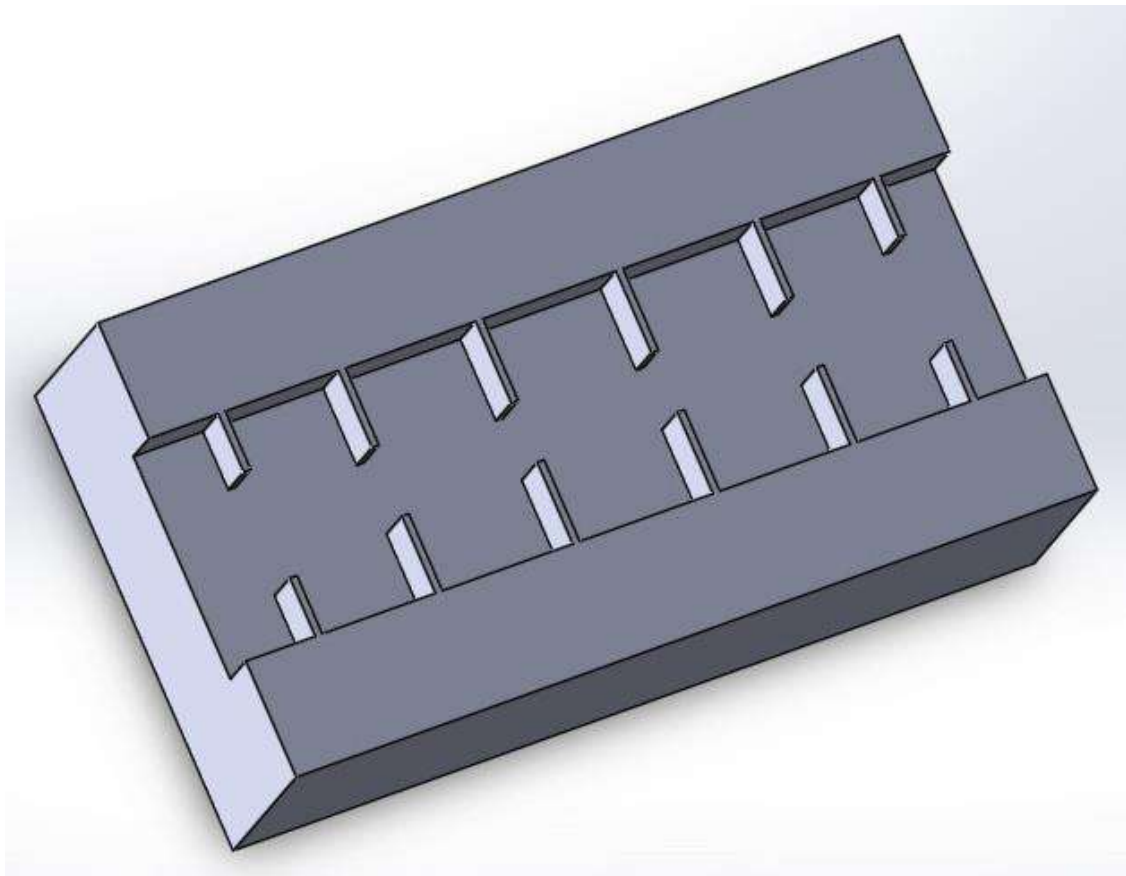


Рис. 3.3 Розріз тривимірної моделі фільтру

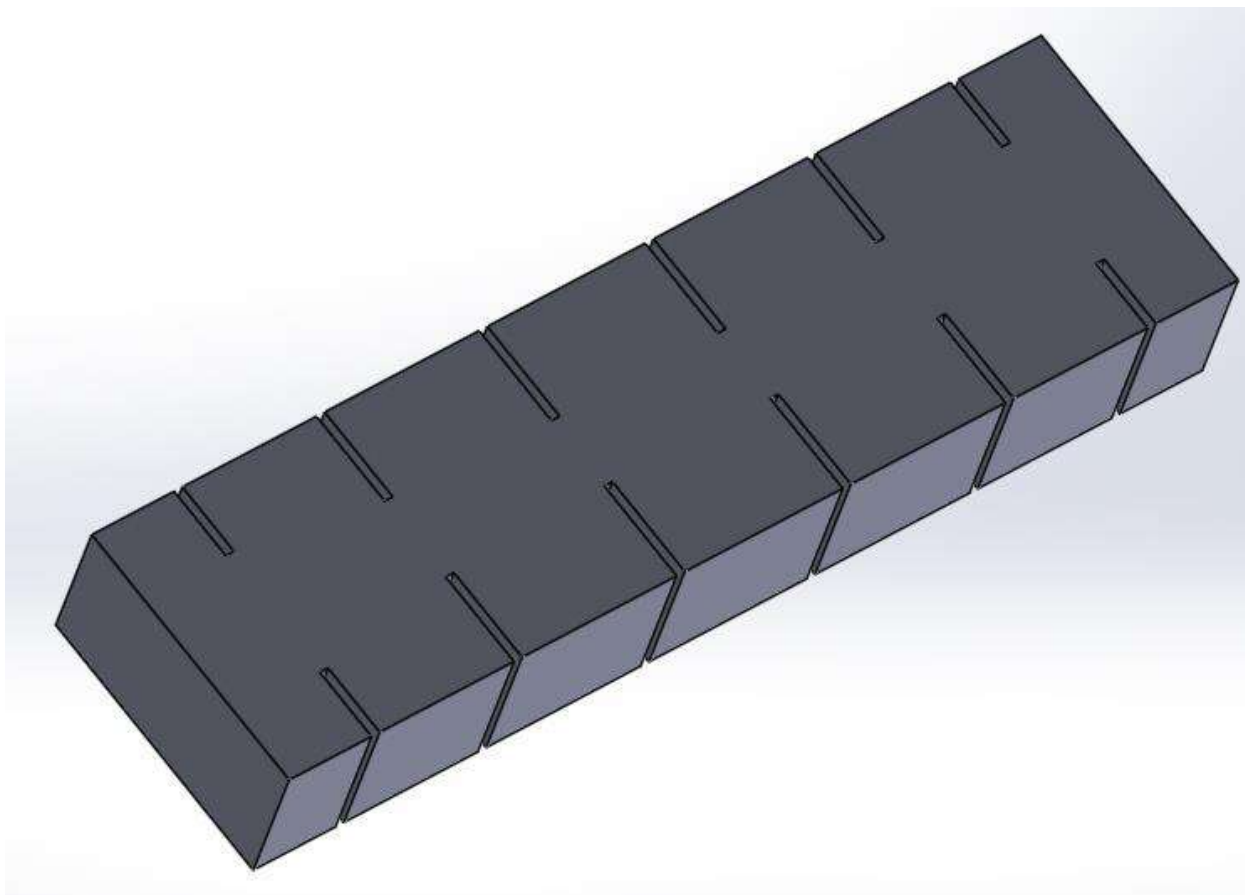


Рис. 3.4 Модель фільтру для швидкого обчислення

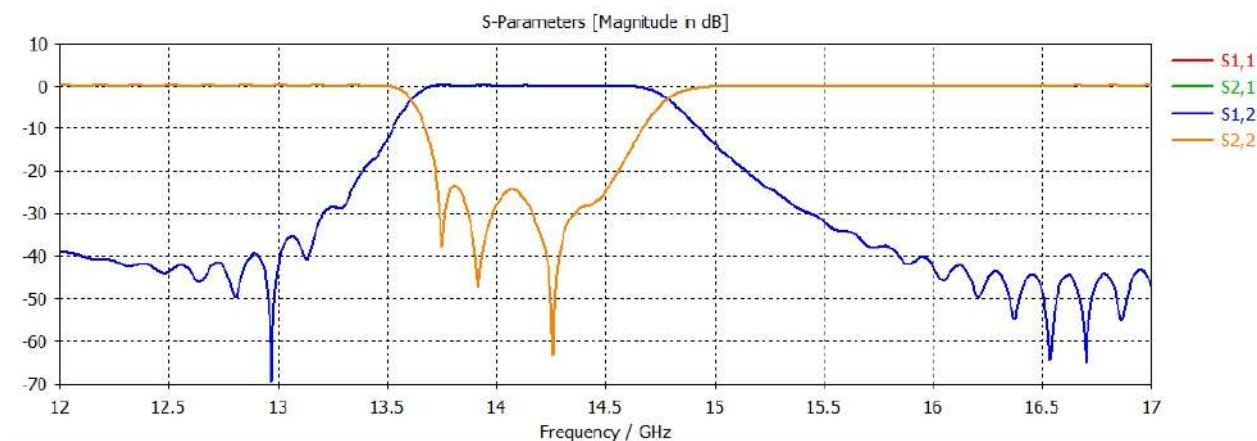


Рис. 3.5 Коефіцієнти передачі фільтру, розрахункові

Оптимізація відбувалась комплексно за смугою пропускання та придушенням за смугою пропускання. Розраховані коефіцієнти передачі для моделі без будь-яких радіусів Рис. 3.5.

За даною геометрією було виготовлено реальний екземпляр фільтру, що представлений на Рис. 3.6. На Рис. 3.7 та 3.8 передані графіки коефіцієнти передачі фільтру у вигляді чисельної моделі та реального прототипу відповідно. Як видно, коректована модель із радіусами 0.3мм, що приблизно відповідають радіусам виготовленого пристрою.



Рис. 3.3 Геометрія прототипу фільтру

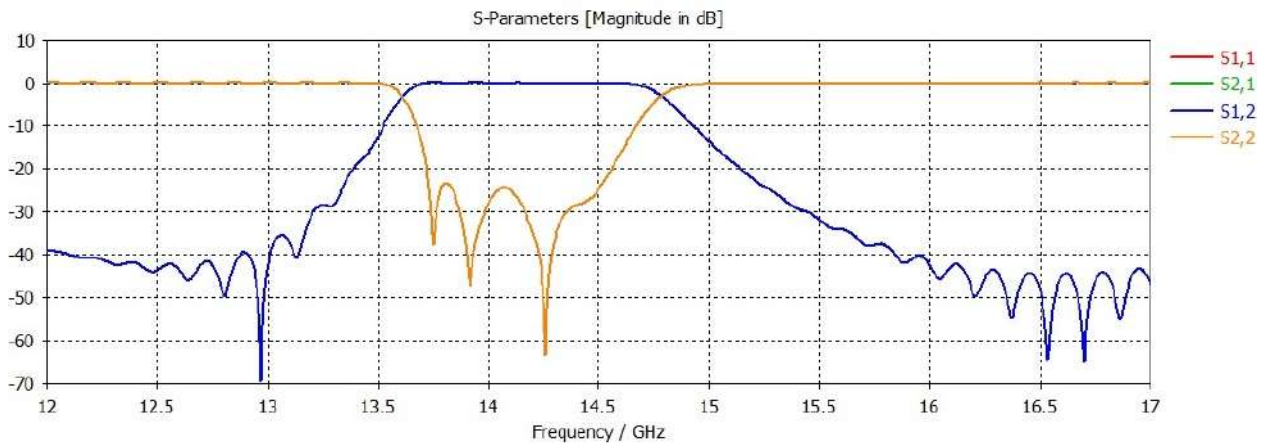


Рис. 3.4 Коефіцієнти передачі фільтру, розрахункове, $R=0.3\text{мм}$

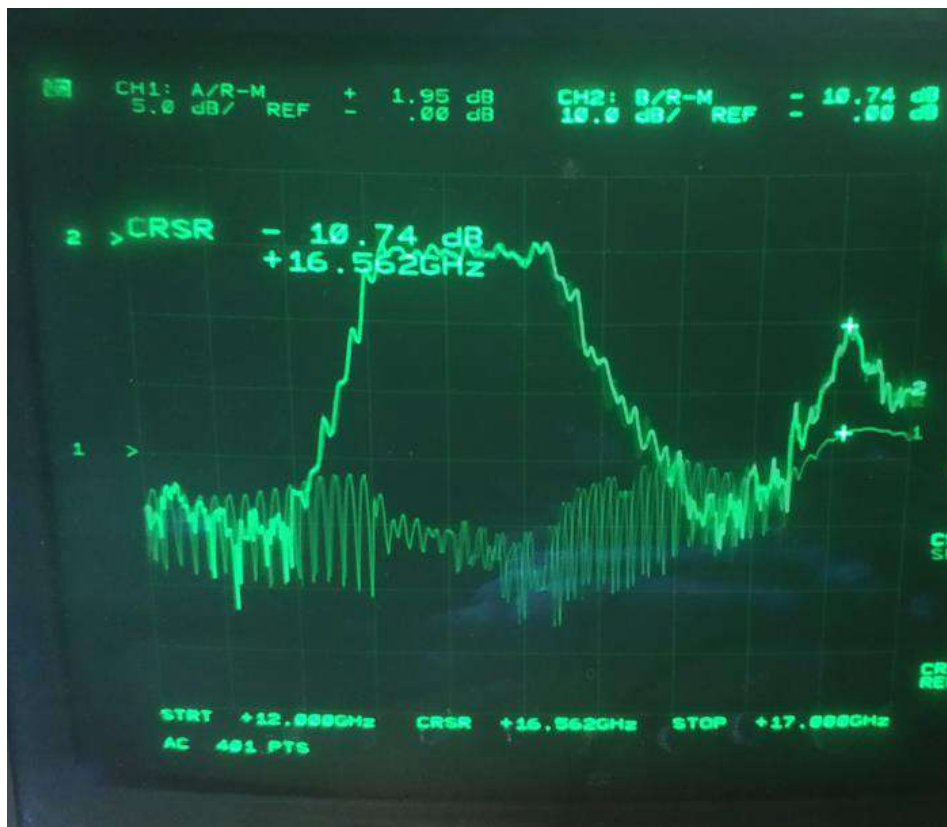


Рис. 3.5 АЧХ реального прототипу фільтру

Як видно із наведених рисунків, робоча смуга відповідає розрахунковій 13.5ГГц-14.7ГГц. Розбіжності пояснюються малим динамічним діапазоном приладу $\sim 40\text{дБ}$, підйом характеристики з права з піком на частоті 16.5ГГц

пояснюється утворенням вісчих типів хвиль. Коливання викликані резонансами в вимірювальній оснастці.

4. Дослідження впливу радіусних скруглень на фільтр

Оскільки методом фрезування фільтри виготовляти швидше, то було обраховано вплив радіусів на характеристики. Розміри радіусів пов'язані з розмірами металообробного інструменту. Від розмірів фрез сильно залежить швидкість обробки, а значить і вартість виготовлення, і ця різниця може сягати десятків разів. Обрані розміри пов'язані з фрезами діаметром 2, 3, 4, 5 мм.

Радіусі округлення в Н-площині, 4 варіанта. На Рис 4.1 наведено модель з максимальними радіусами в 2.6мм.

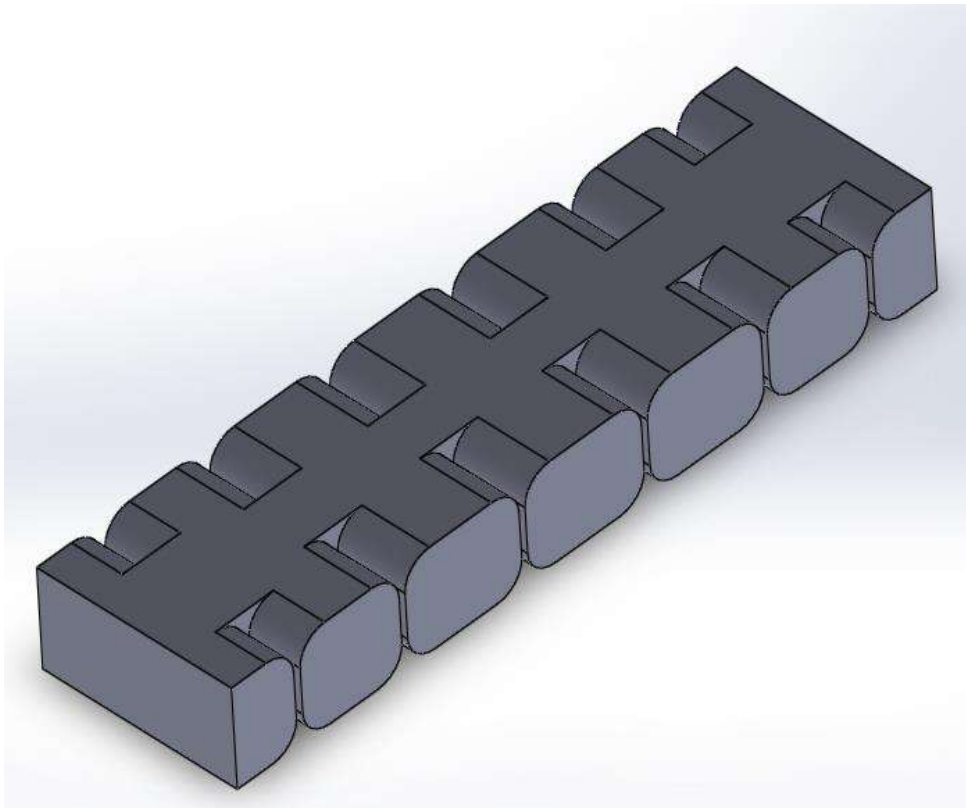


Рис. 4.1 Тривимірна модель в Н площині для $R=2.6\text{мм}$

На графіку Рис. 4.2 спостерігається зсув частоти вгору із збільшенням радіусу закруглення, що є логічним, адже переріз хвилеводу зменшується. Але такий великий зсув для більшості застосувань вимагатиме перерахунку фільтру.

Також спостерігається збільшення послаблення на нижніх частотах близько 2 дБ, та зменшення на високих частотах ця різниця сягає в середньому 5-7дБ.

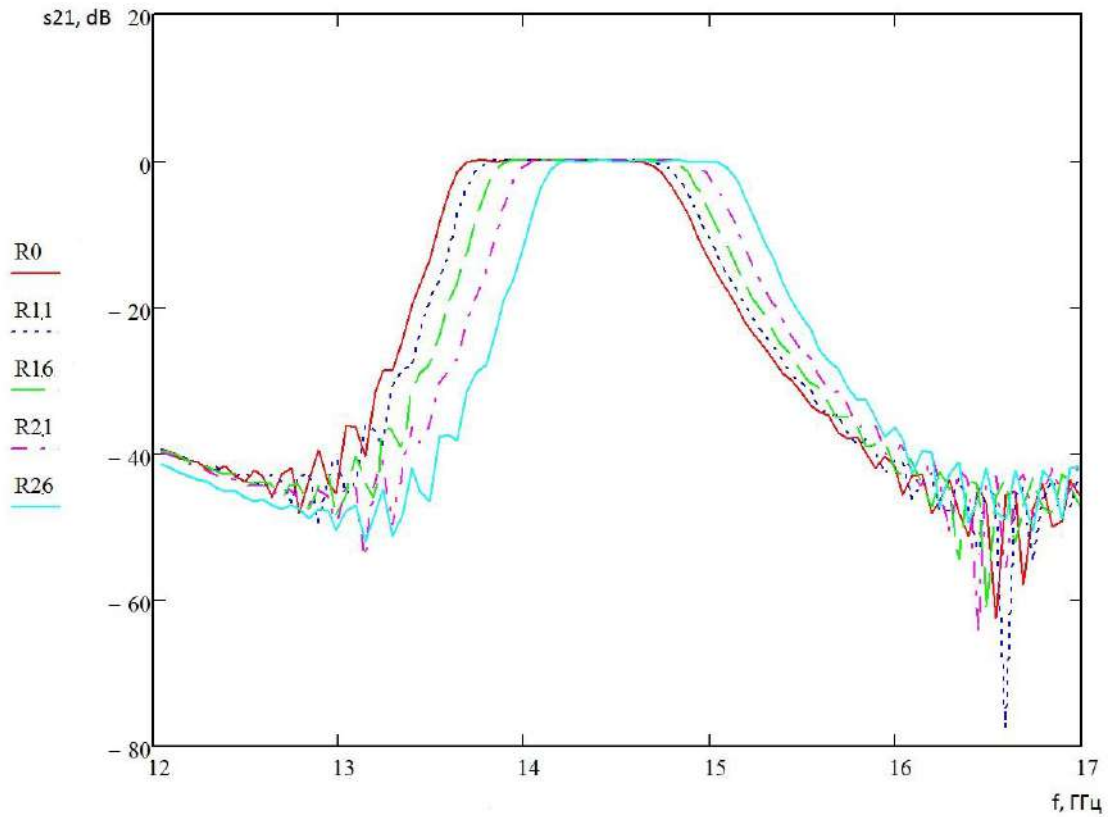


Рис. 4.2 Коефіцієнти передачі для різних радіусів

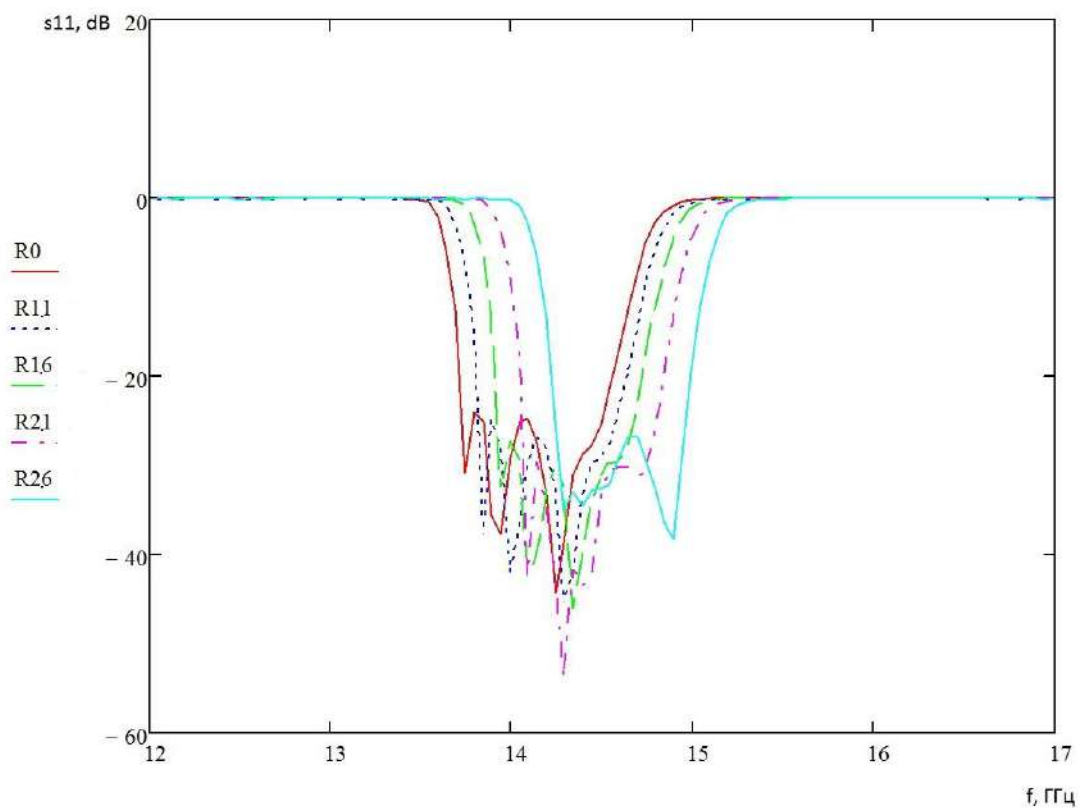


Рис. 4.3 Коефіцієнти відбиття для різних радіусів

Відбиття залежно від радіусів показано на графіку Рис. 4.3. Найгірший випадок, як можна спостерігати, при відсутності будь яких закруглень спостерігається при найбільшому радіусу закруглень 2.6мм. Крім того, видно, що відбиття починає зростати.

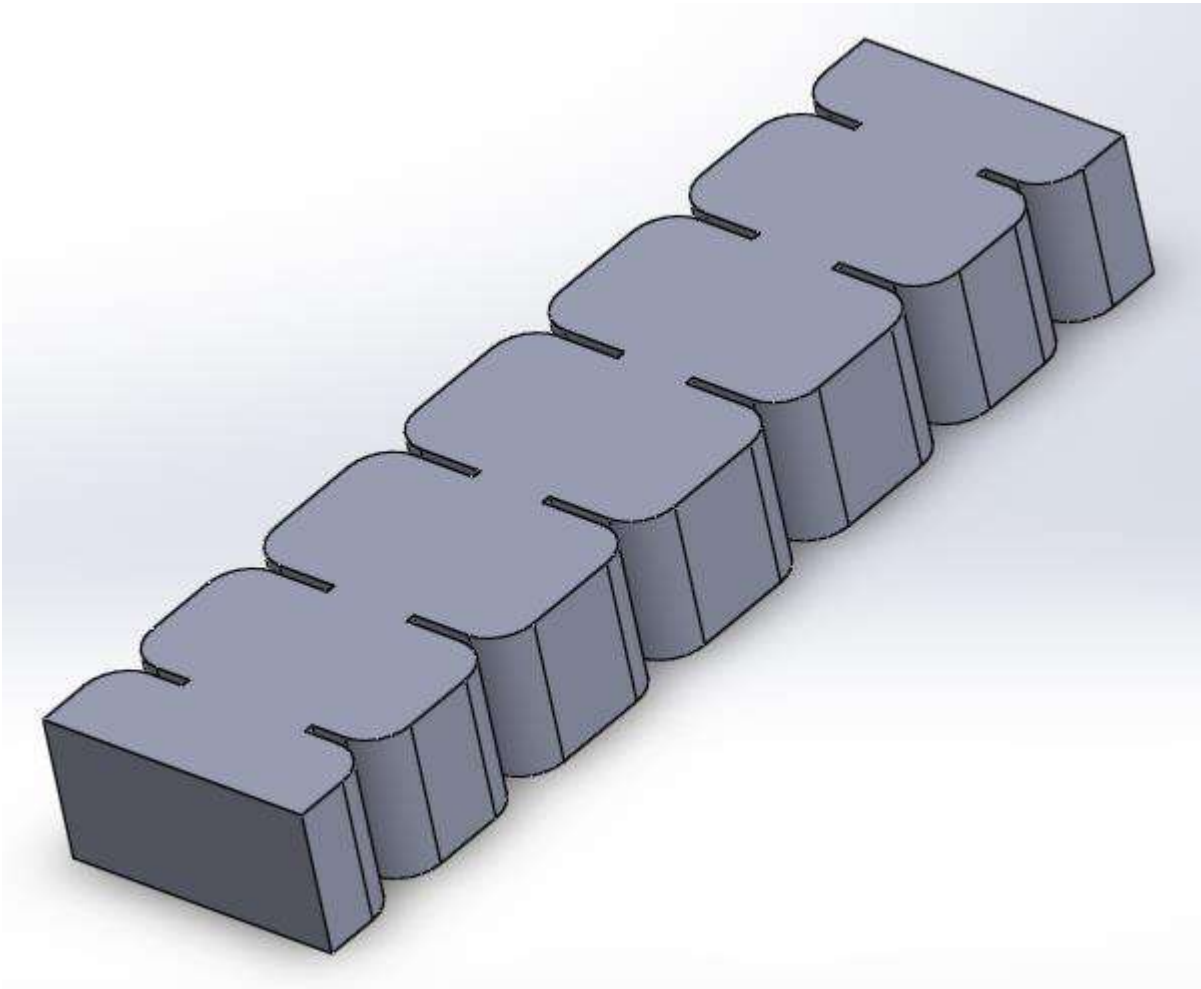


Рис. 4.4 Тривимірна модель в Е-площині із $R=2.6\text{мм}$

Радіуси в Е-площині, 4 варіанта, зовнішній вигляд такого варіанту з максимальними радіусами наведено на Рис 4.4. На Рис. 4.5 наведено коефіцієнти передачі. Як можна бачити, він слабо залежать від розміру радіусів в електричній площині.

Коефіцієнти відбиття наведено на Рис. 4.6. З них видно що, є коливання і найбільші вони на краях смуги пропускання.

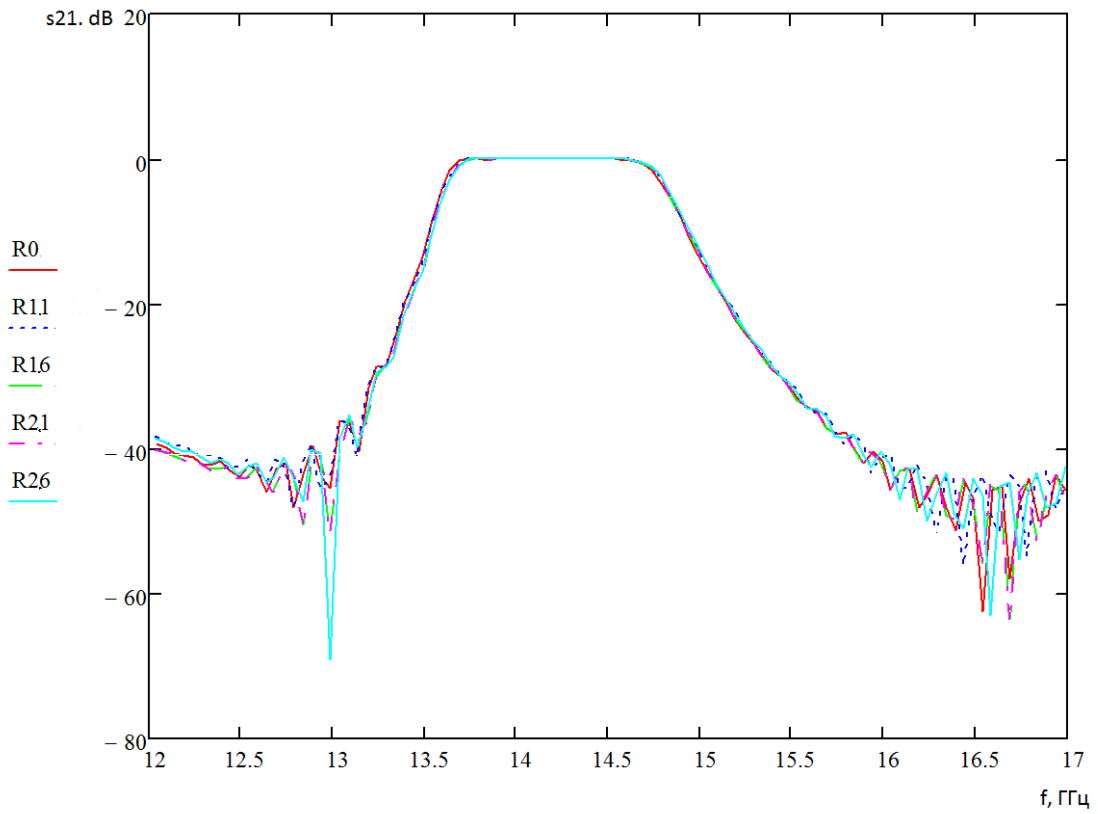


Рис. 4.5 Коефіцієнти передачі для різних радіусів (E)

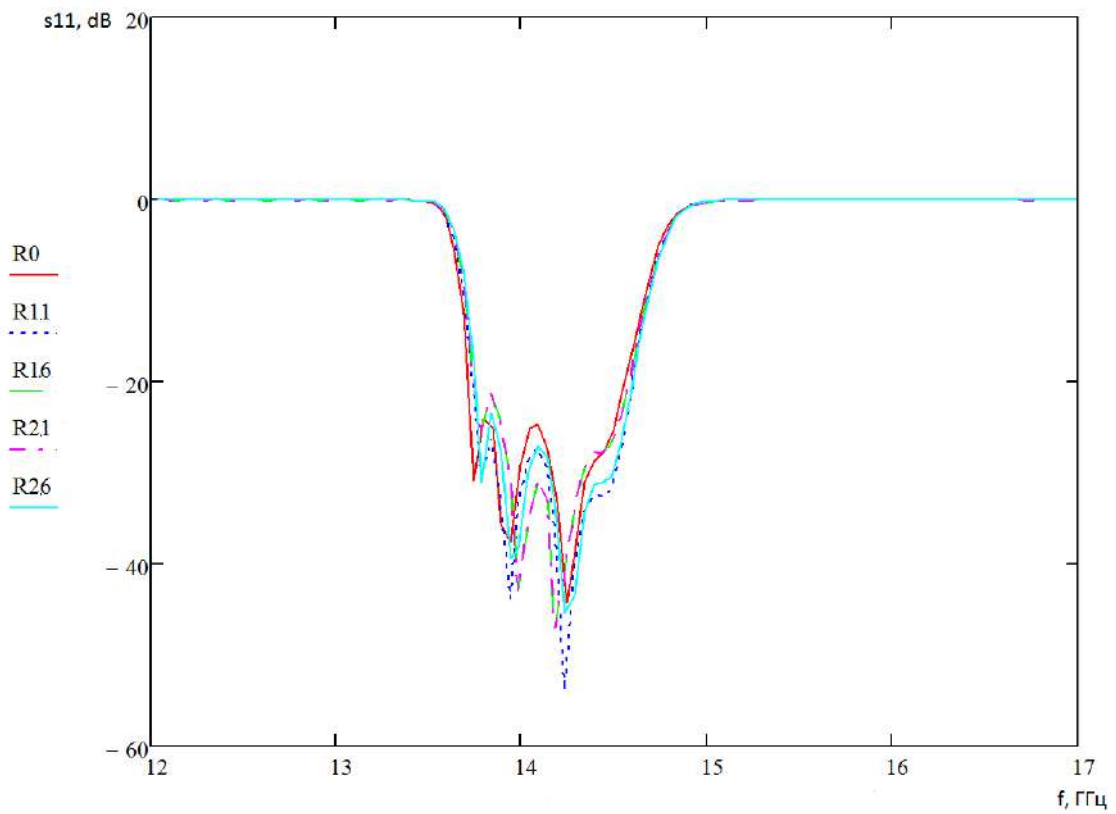


Рис. 4.6 Коефіцієнти відбиття для різних радіусів (E)

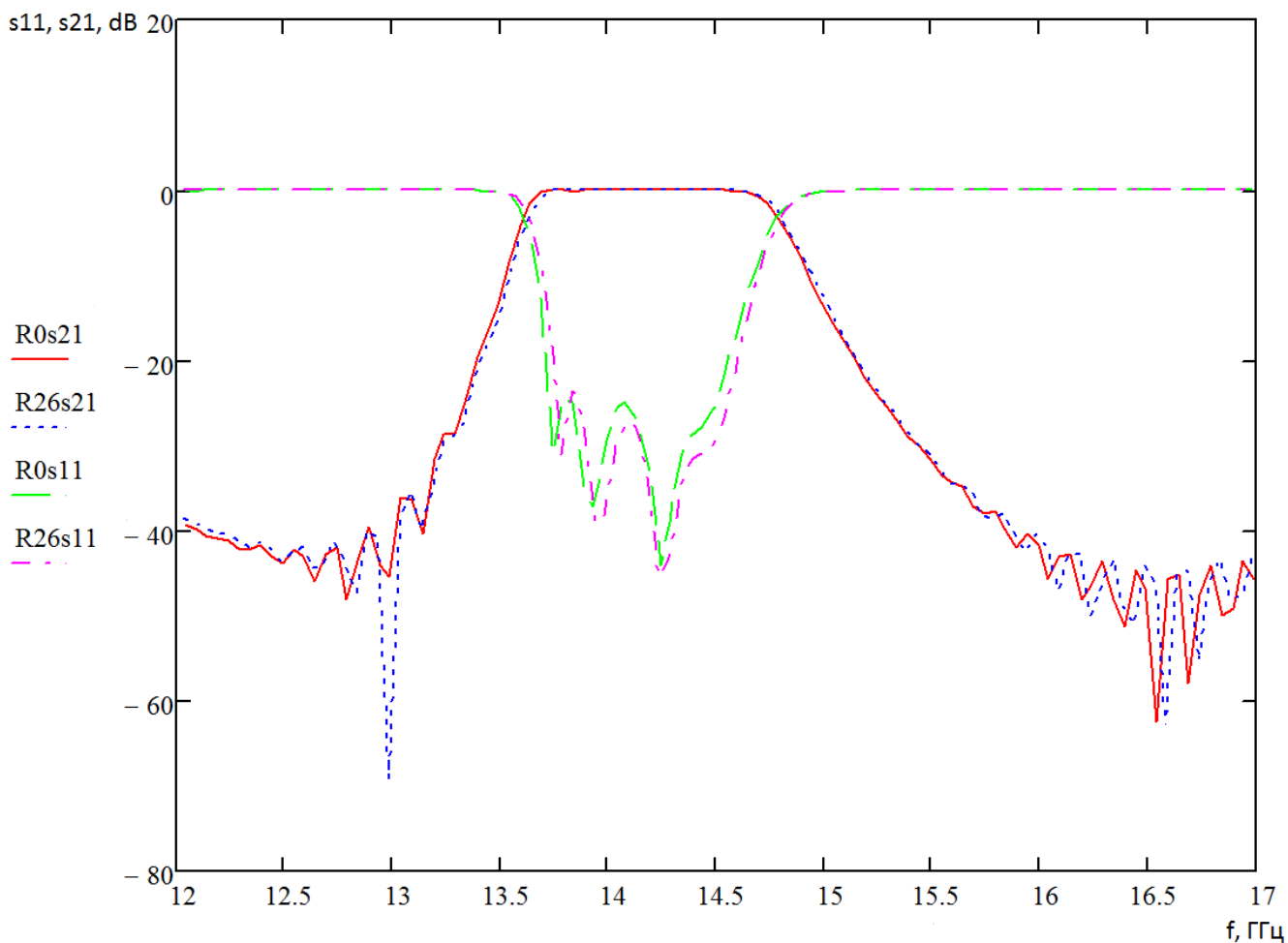


Рис. 4.7 Коефіцієнти передачі та відбиття $R=0$, $R=2.6$ в Е-площині

При розрахунку фільтра з запасом по коефіцієнту відбиття, або не критичності цього параметру по краям смуги пропускання підхід з використанням округлень вздовж коротких стінок дозволяє застосовувати його без повторного розрахунку фільтра. Ці висновки підтверджує пристрій з Рис. 2.2.1, адже точність виготовлення литого пристрою без механічної обробки не дуже висока.

Як видно з Рис. 4.7 різниця коефіцієнту передачі в зоні смуги пропускання дуже незначна, коефіцієнт відбиття покращився на високих частотах за рахунок свого зміщення.

Така конструкція має недолік, що полягає в тому, що розрізи стінок йдуть по стінкам ,на які затікають струми, а це унеможлиблює забезпечити щільний контакт.

5. Розробка стартап проекту

5.1 Опис ідеї проекту

Було проведено аналіз стартап-проекту за змістом ідеї, сфери застосування, якостей, що може отримати користувач.

Таблиця 5.1

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створити методику синтезу хвилевідних фільтрів на індуктивних діафрагмах	1. Супутникові системи зв'язку	Проектування на замовлення з необхідними характеристиками
	2. Радіолокаційні системи	Якісна фільтрація

Конкурентами є фірми які серійно виготовляють обладнання в даній сфері.

Таблиця 5.2

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Серійне виробництво	На замовлення			
1.	Витрати на матеріали					✓	
2.	Швидкість	✓					✓
3.	Універсальність	✓					✓
4.	Витрати на фахівців					✓	

5.2 Технологічний аудит проекту

У роботі були застосовані наступні програмні засоби, а саме, Matlab, CST Studio – це програмне забезпечення для математичних та інженерних розрахунків та пакет для електродінамічних розрахунків.

Таблиця 5.3

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створити методику синтезу хвилевідних фільтрів на індуктивних діафрагмах	Технологія 1 Програмна реалізація на Matlab та перевірка і оптимізація CST Studio	наявна	доступна
2		Технологія 2 замінити Matlab на середовище мови python, CST Studio замінити на openems	Потрібно розробити	доступна
3		Технологія 3 (матеріальна база для проведення досліджень)	Потрібно розробити	Не доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Matlab, CST Studio				

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

Дослідження ринкової спроможності комерціалізації даного проекту

Таблиця 5.4

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Невідомий
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20

На основі проведеного аналізу ринку можливе існування зацікавлених клієнтів. Визначимо потенційні групи клієнтів.

Таблиця 5.5

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Швидке проектування/виготовлення фільтрів за замовлення з необхідними параметрами	Телекомунікаційні підприємства, дослідники, Військово-промисловий комплекс, приватні підприємці,	Відсутні, у військових закупівля за конкурсною основою	Швидкість проектування / виготовлення

У наступних таблицях наведено дані для аналізу ринку, тобто фактори що сприятимуть впровадженню проекту, та фактори загроз.

Таблиця 5.6

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Впровадження нового програмного забезпечення	Поява більш досконалого програмного забезпечення	Конкуренція
2	Не готовність цільової аудиторії впроваджувати нові софти	Люди можуть бути не готові використовувати новий софт	Конкуренція

Таблиця 5.7

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Швидка реакція на потреби клієнтів	Збільшення клієнтської бази	Збільшення персоналу та обороту коштів
2	Стабільність роботи	Формування стабільного потоку замовлень	Фінансові резерви

Наступна таблиця буде оцінювати стан конкуренції на ринку.

Таблиця 5.8

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції чиста	Безліч конкурентів на світовому ринку.	Покращувати параметри, швидкість
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	міжнародний	Підвищення зручності обслуговування
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Внутрішньо галузева. Всесвітня	Рекламування можливостей, потенційним клієнтам
4. Конкуренція за видами товарів: -товарно-родова	Товарно-родова. Існує конкуренція з іншими виробниками.	Одночасно ведеться боротьба з конкурентами

5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Нецінова. При виборі товару клієнт дивиться на якість отриманих результатів роботи. Цінова. Для приблизно половини клієнтів ціна є визначальною при виборі	Головною перевагою є швидкість реалізації
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	Марочна	Виготовлення унікальних або малосерійних виробів

Після звичайного аналізу галузі можна провести більш детальний, за М. Портером.

Таблиця 5.9

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки:	Фірми які серійно виробляють фільтри (наявні в інтернеті) невеликі приватні підприємства	Бар'єри на вхід є незначними. Потенційні конкуренти наявні, строки їх виходу на ринок не визначені	Залежність від постачальників відсутня	Споживачі можуть вільно купити продукцію	Товарів замінників немає.

За аналізом, головне зручність, швидкість, якість, ціна за балансу цих переваг клієнти придуть до тебе.

Таблиця 5.10

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Швидкість	Сучасні засоби комунікації, автоматизація
2	Зручність	Оплати/ потенційно сайт з конструктором
3	Якість	Ретельна перевірка продукції
4	Ціна	Помірні ціни

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Хвилевідний фільтр Ку діапазону»

Таблиця 5.11

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з pasternak							
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
1	Швидкість	+2		✓						
2	Зручність	+3				✓				
3	Якість	+1								✓
4	Ціна	+1	✓							

Виділивши сильні та слабкі сторони проекту, у порівнянні з конкурентами і з аналізу внутрішніх факторів та використовуючи аналіз маркетингових загроз та можливостей складемо SWOT-аналіз.

Таблиця 5.12

Сильні сторони: 1. Швидкість 2. Зручність 3. Якість 4. Ціна	Слабкі сторони: 1. Пошук клієнтів 2. Стабільний ринок 3. Малий розмір стартового капіталу
Можливості: 1. Потреби клієнтів 2. Імідж 3. Можливість збільшення обсягів реалізації	Загрози: 1. Незручність для клієнтів 2. Погана якість 3. Великий термін виконання

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Таблиця 5.13

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Диверсіфікація	Висока	Помірні

Не спеціалізуватися на одному виді виробів, бажано взагалі комбінувати галузі

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення цільових груп потенційних клієнтів.

Таблиця 5.14

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Телекомунікації	Так	Високий	Середня	Просто
	Приватні підприємці	Так	Високий	Висока	Середньо
2	Лабораторії	Ні	Середній	Висока	Складно
3	ВПК	Ні	середній	Висока	Складно
Які цільові групи обрано: Телекомунікації, приватні підприємці					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку

Таблиця 5.15

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Спеціалізація	Цільовий сегмент	Унікальна продукція	Стратегія спеціалізації

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 5.16

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	ні	Забирати існуючих і шукати нових	так	Стратегія заняття конкурентної ніші.

Таблиця 4.17

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Відповідальність характеристик замовника	Стратегія заняття конкурентної ніші	Швидкість розробки/ виготовлення	Швидкість Зручність Більш доступна ціна

5.5 Розроблення маркетингової програми

Першим кроком є формування концепції товару з точки зору маркетингу, який отримає споживач

Таблиця 5.18

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Швидкість	Швидке отримання необхідного унікального обладнання	Максимальна автоматизація
2	Зручність	Зручність замовлення	Автоматизоване формування вимог клієнта
3	Якість	Відповідність характеристикам	Зацікавлення споживача у якості, яку він отримає

Таблиця 4.19

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Проект націлений на швидке проектування/виробництво смугових фільтрів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. АЧХ		
	2. КСХ		
	3. Фланці		
	Якість: відповідність гарантується наскрізним тестуванням		
Пакування: якісне			
Марка: власна			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: рівень розробки		
	Після продажу: пристрій у власності клієнта		

ВИСНОВКИ

В даній роботі було здійснено огляд реалізацій деяких НВЧ фільтрів та технологій, що використовуються для їх виготовлення. За допомогою сучасного комерційного програмного забезпечення було розроблено числову модель хвилеводного фільтр Ку діапазону. Крім того, було виготовлено реальний прототип такого фільтру. В результаті було досліджено розбіжності параметрів АЧХ числової моделі та виготовленого прототипу.

Було досліджено за допомогою числової моделі як впливають на характеристики моделі різні варіанти з різними радіусами скруглення. Закруглення вздовж Е площини виглядають перспективними в плані практичних реалізацій, бо дозволяють використовувати більш прості для синтезу моделі.

Таким чином, можна зробити загальний висновки, що при урахуванні в моделюванні розбіжностей виготовлення та точному виготовленні результати виготовлених пристроїв матимуть відповідні параметри.

Перелік посилань

1. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Пер с англ. под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. Москва, Связь. 1971. Т.1. 440 с. Т.2. 496 с.
2. Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R. Microwave filters for communication systems. NY, Wiley. 2007. 772 p.
3. Raju Balasubramanian COMPUTER AIDED DESIGN OF WAVEGUIDE FILTERS USING THE MODE MATCHING METHOD 1997 146 p.
4. I.V. Demchenko, V.Y. Dmytrenko, N.S. Yelahina, O.A. Kornieva, S.I. Piltyay, A.V. Bulashenko "Adjustable guide filtering device for Ku-band range for radioelectronic systems", IX International Conference "Radioengineering fields, signals, equipment and systems", Kyiv, Ukraine, November 9–11, 2021, pp. 35–37.
5. Гололобов В.П. Волноводно-щелевые резонаторы с несколькими пластинами / В.П. Гололобов, М.Ю. Омеляненко, Г.Н. Шеламов // Известия вузов. Радиоэлектроника – 1986. – Vol. 29, No. 2. – pp. 97-98.
6. Омеляненко М.Ю. Волноводно-планарные полосно-пропускающие фильтры с широкой полосой заграждения/ М.Ю. Омеляненко, Т.В. Романенко // Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2020. – Vol. 80. – pp. 5-13. DOI: 10.20535/RADAP.2021.80.5-13.
7. David M. Pozar "Microwave Engineering" Third edition John Wiley and Sons 2005.
8. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Москва, Советское радио. 1967. 652 с.
9. Yechou, Lahcen; Tribak, Abdelwahed; Kacim, Mohamed; Zbitou, Jamal; Mediavilla, Angel (2014). [IEEE 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) - Marrakech, Morocco (2014.4.14-2014.4.16)] 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) - Ku-band waveguide band-pass filter with iris radius. , (), 1435–1438. doi:10.1109/icmcs.2014.6911230.
10. Мещанов В.П. СВЧ-фильтры и мультиплексоры для систем космической связи. Москва, Радиотехника, 2017. 256 с.
11. Слюсар О. В. "Фільтр на основі діелектричного резонатора" // Дипломна робота на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка» спеціальності 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка». – НТУУ «КПІ», 2019. – 68 с.
12. Dongquan Sun, Jinping Xu A Novel Iris Waveguide Bandpass Filter Using

Air Gapped Waveguide Technology IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, VOL. 26, NO. 7, JULY 2016.

13. Jiapin Guo, Ke Wu Mode Composite Waveguide Filter with Dual-Mode Operation Poly-Grames Research Center, Ecole Polytechnique de Montreal, Canada

14. Snežana Lj. Stefanovski Pajoviü, Milka M. Potrebiü, and Dejan V. Tošiü Microwave Bandpass and Bandstop Waveguide Filters Using Printed-Circuit Discontinuities 23rd Telecommunications forum TELFOR 2015.

15. S. Akatimagool , N. Intarawiset , S. Inchan Design of Waveguide BandPass Filter using Cascade Inductive and Capacitive Irises 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP).