

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки,
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «ПРОЄКТУВАННЯ ФІЛЬТРІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ
 НА ОСНОВІ КОМБІНАЦІЇ ВІДРІЗКІВ НЕРЕГУЛЯРНИХ ЛІНІЙ»

«DEVELOPMENT OF THE MICROWAVE FILTERS BASED
 ON A COMBINATION OF SEGMENTS OF IRREGULAR LINES»

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи РТ-519м
 Спеціальності 172 Радіотехніка та
телекомунікації

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Тхоровський А.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Фурманова Н.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Воскобойник В.О.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки,
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
 Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Шило Г.М.,
 д-р. техн. наук, доцент

« 15 » грудня 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Тхоровського Андрія Андрійовича
 (прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема проєкту (роботи) Проектування фільтрів надвисоких частот на основі комбінації відрізків нерегулярних ліній
 керівник проєкту (роботи) Фурманова Наталія Іванівна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом закладу вищої освіти від «12» листопада 2020 року №325
- Строк подання студентом проєкту (роботи) 18 грудня 2020 року
- Вихідні дані до проєкту (роботи): смугопр пропускаючий фільтр, товщина мікросмужкової лінії 5 мкм, матеріал підкладки – полікор ВЧ-96
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Загальні положення проектування фільтрів НВЧ; 2. Математичний опис конструкцій мікросмужкових фільтрів 3. Синтез мікросмужкових фільтрів на нерегулярних лініях. 4. Економічне обґрунтування дипломної роботи
- Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 18 рисунків; 14 таблиць; презентація роботи.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3 Основна частина	Фурманова Н.І., доцент		
4 Економіко-організаційна частина	Левченко Н.М., професор		
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Якімцов Ю.В., доцент		
Нормоконтролер	Поспєєва І.Є., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання “ 01 ” вересня 2020 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Визначення тематики роботи	1 тиждень	
2	Аналіз конструкцій фільтрів	2 тиждень	
3	Постановка задачі дослідження	3 тиждень	
4	Аналіз методів математичного моделювання фільтрів	4-5 тижні	
5	Вибір програмного забезпечення для електромагнітного моделювання фільтрів НВЧ	6 тиждень	
6	Проектування мікросмужкового фільтра на відрізках нерегулярних ліній	7-8 тижні	
7	Оптимізація топології фільтра НВЧ	9-10 тижні	
8	Виконання економіко-організаційної частини	11 тиждень	
9	Розробка заходів з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	12 тиждень	
10	Оформлення пояснювальної записки	13 тиждень	
11	Оформлення супровідної документації	14 тиждень	
12	Нормоконтроль та рецензування	15 тиждень	
13	Захист роботи	16 тиждень	

Студент(ка)

(підпис)

Гхоровський А.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Фурманова Н.І.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 106 с., 18 рис., 14 табл., 92 джерела, 1 додаток.

Об'єктом дослідження в даному дипломному проєкті є конструкції мікросмужкових фільтрів на нерегулярних лініях.

Мета роботи – провести дослідження можливостей створення мікросмужкових фільтрів ФНЧ, ФВЧ, СПФ, СЗФ на базі нерегулярних ліній передачі.

Основними задачами дипломного проєктування є аналіз існуючих конструкцій МСФ на НЛП, огляд чисельних методів опису структур з метою визначення конструкцій, для яких існує математичний апарат, визначення обмежень в моделюванні фільтрів на відрізках НЛП, отримання бази даних для синтезу МСФ на НЛП, розробка конструкцій МСФ з використанням комбінацій відрізків НЛП.

Актуальність проведення дослідження обумовлена недостатнім рівнем опису математичного апарату для структур з використанням нерегулярних ліній передачі, що описуються синусоїдально з різкою зміною розмірів смужки.

СМУГОПРОПУСКАЮЧИЙ ФІЛЬТР, НЕРЕГУЛЯРНА ЛІНІЯ ПЕРЕДАЧІ, МІКРОСМУЖКОВА ЛІНІЯ, ПАРАЗИТНА СМУГА ПРОПУСКАННЯ, ЦЕНТРАЛЬНА ЧАСТОТА, ШИРИНА СМУГИ ПРОПУСКАННЯ.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	8
Вступ.....	9
1 Загальні положення проєктування фільтрів НВЧ.....	10
1.1 Конструкції ліній передач	10
1.2 Хвилі в смужковій лінії	12
1.3 Мікросмужкові лінії передачі	13
1.4 Матеріали підкладок і провідників СЛ.....	14
1.5 Реалізація елементів у мікросмужковому виконанні	15
1.5.1 Резистори	15
1.5.2 Конденсатори.....	15
1.5.3 Індуктивності.....	16
1.6 Проєктування мікросмужкових фільтрів.....	17
1.6.1 Загальна характеристика фільтрів.....	17
1.6.2 Фільтри на одиночних мікросмужкових лініях	21
1.6.3 Мікросмужкових фільтри на неоднорідних лініях і з використанням східчастих переходів.....	22
1.6.4 Класифікація фільтрів за взаємним розташуванням смуг пропускання і загородження	26
1.6.5 Класифікація фільтрів за виглядом передавальної функції	28
1.6.6 Реалізація фільтрів	30
2 Математичний опис конструкцій мікросмужкових фільтрів	33
2.1 Чисельні методи розрахунку пасивних структур НВЧ і міліметрового діапазонів	33
2.1.1 Метод кінцевих різниць	35
2.1.2 Метод кінцевих елементів.....	35

	6
2.1.3 Метод матриці ліній.....	35
2.1.4 Метод інтегральних рівнянь	36
2.1.5 Метод моменту і метод Гальоркіна.....	36
2.1.6 Метод узгодження мод	36
2.1.6 Метод поперечного резонансу.....	37
2.1.7 Метод ліній	37
2.1.8 Метод багатомодової матриці	37
2.1.8 Метод розрахунку у спектральній області	38
2.1.9 Еквівалентно-хвилеводних моделей	38
2.1.10 Модель планарних схем	39
2.2 Методи синтезу мікросмушкових фільтрів	40
2.3 Методи розв'язку електродинамічних задач для мікросмушкових структур.....	47
2.4 Математичний опис фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою	51
2.4.1 Фільтри першого і другого порядків	51
2.4.2 Частотні характеристики фільтрів	54
3 Синтез мікросмушкових фільтрів на нерегулярних лініях.....	57
3.1 Побудова конструкції мікросмушкового фільтру на нерегулярних лініях в системі HFSS	57
3.2 Оптимізація і параметризація конструкції мікросмушкового фільтру на нерегулярних лініях в системі HFSS.....	61
3.3 Можливості синтезу фільтрів на відрізках НЛП	65
4 Економічне обґрунтування дипломної роботи	69
4.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу	69
4.2 Визначення трудомісткості та тривалості роботи.....	70

	7
4.3 Розрахунок кошторису витрат на реалізацію проекту	72
4.3.1 Розрахунок вартості матеріалів	73
4.3.2 Спеціальне обладнання для реалізації проекту	74
4.3.3 Розрахунок заробітної плати.....	75
4.3.4 Відрахування на соціальні заходи.....	76
4.3.5 Загальновиробничі витрати.....	76
4.4 Бальна оцінка економічної ефективності науково-дослідної роботи..	77
4.5 Висновки	79
5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	81
5.1 Аналіз потенційних небезпек	81
5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	82
5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці.....	85
5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	89
5.4.1 Заходи з пожежної безпеки	89
5.4.2 Заходи з цивільного захисту	92
Висновки	96
Перелік посилань.....	98
Додаток А.....	107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ЕМ – електромагнітний

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

МСЛ – мікросмужкова лінія

МСФ – мікросмужковий фільтр

НВЧ – надвисокочастотний

НДР – науково-дослідна робота

НЛП – нерегулярна лінія передачі

ОС – операційна система

ПК – персональний комп'ютер

СЛ – смужкова лінія

СЗФ – смугозагороджуючий фільтр

СПФ – смугопропускаючий фільтр

ФВЧ – фільтр верхніх частот

ФНЧ – фільтр нижніх частот

ВСТУП

Фільтри НВЧ відносяться до частотно-селективних пристроїв. Вони є одними з основних компонентів практично будь-якої НВЧ апаратури. Перш за все, це системи супутникового зв'язку, радіолокаційна апаратура, системи стільникового зв'язку, телебачення. Фільтри НВЧ також знаходять застосування в вимірювальній апаратурі і системах діагностики і контролю. Нерідко від фільтрів залежать такі найважливіші параметри апаратури в цілому як чутливість, стійкість перед перешкодами, габарити, вага.

Велика кількість параметрів, яким фільтр повинен задовольняти, вимагає щоразу заново його проєктувати для конкретної апаратури. Тому при проєктуванні НВЧ фільтрів широко використовуються пакети програм систем автоматизованого проєктування (САПР). Їх використання дозволяє виключити або зменшити обсяг робіт з експериментальної доопрацювання конструкції фільтра, знизити витрати часу і праці.

Перспективними і простими у технологічній реалізації, на наш погляд, є конструкції мікросмужкових фільтрів на нерегулярних лініях передачі. Дані конструкції фільтрів мають ряд переваг у порівнянні з традиційними фільтрами.

Тому в дипломному проєкті після порівняння існуючих конструкцій мікросмужкових фільтрів було проведено аналіз можливостей синтезу мікросмужкових фільтрів на нерегулярних лініях та їх комбінаціях, усі отримані результати було внесено до бази даних, що містить інформацію про розміри, форму нерегулярних ліній передачі, параметри АЧХ, яку було отримано при використанні певних конструкцій. Проведено розрахунок фільтру нижніх частот на комбінації відрізків нерегулярної лінії, розраховано його АЧХ, проведено параметризацію габаритних розмірів фільтру.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЄКТУВАННЯ ФІЛЬТРІВ НВЧ

1.1 Конструкції ліній передач

Лінією передачі називають пристрій, що обмежує область поширення електромагнітних коливань і направлений потік електромагнітної енергії в заданому напрямку [1].

Лінії передачі - смужкові, хвилеводні та коаксіальні (жорсткі або гнучкі), використовуються для передачі сигналів від передавача до антени і від антени до приймача для з'єднання блоків апаратури, модулів і вузлів.

Відрізки лінії передачі слугують основою конструкції ряду пристроїв. Лінії повинні бути прості у виготовленні, придатні для роботи в широкому діапазоні частот, володіти достатньою електричною міцністю, мінімальними габаритними розмірами і масою, стійкістю до механічних і кліматичних впливів і не призводити до неприпустимих втрат і спотворень сигналів.

У лініях передачі НВЧ можуть поширяться в загальному випадку хвилі чотирьох класів: Е - електричні хвилі, Н - магнітні, Т - поперечні електромагнітні хвилі і ЕН (НЕ) - гібридні. Кожен клас включає безліч типів хвиль, що відрізняються один від одного структурою поля, а також значеннями коефіцієнта поширення, хвильового опору, критичної частоти (починаючи з якої даний тип хвилі може поширюватись) та інших параметрів.

Смужковою лінією передачі (СЛП) називають таку лінію, в якій провідник стрічкового, круглого або квадратного перетину розташований на деякій відстані від металевої площини (підстави) або укладений між двома металевими площинами (рис. 1.1).

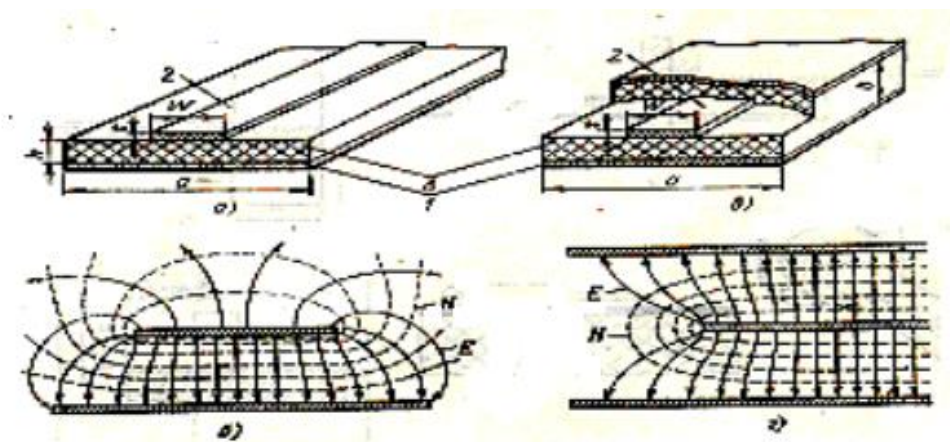
Смужкові лінії (СЛ) і вузли на їх основі широко застосовуються для роботи на дециметрових, сантиметрових і рідше на міліметрових хвилях. Особливостями СЛ є:

– малі габаритні розміри і маса, оскільки використовуваний в них діелектрик являє собою тонкі пластини, а металеві площини - тонкі плівки;

- велика широкосмуговість - критична чистота $f_{кр}$ основної хвилі СЛ рівна нулю (по СЛ може протікати постійний струм);
- зручне сполучення з активними напівпровідниковими приладами;
- невисока вартість, оскільки самі СЛ і СВЧ вузли на їх основі навіть дуже складної структури можуть бути виконані за єдиною технологією одночасно, а плоска форма їх конструкцій полегшує автоматизацію виробництва з хорошою відтворюваністю параметрів і характеристик.

Разом з тим СЛ володіють низькою електричною міцністю і придатні для роботи на порівняно невеликих рівнях потужності. Вони мають помітні втрати енергії, малу добротність. Для проведення ряду вимірів, наприклад коефіцієнта стоячої хвилі напруги (КСХН), потрібно перехід на коаксіальну лінію.

Найбільшого поширення в даний час отримала несиметрична смужкова лінія, конструкція і структура поля якої показані на рис. 1.1, а, 1.1, б.



а - ширина підкладки; b, h – товщина підкладки;

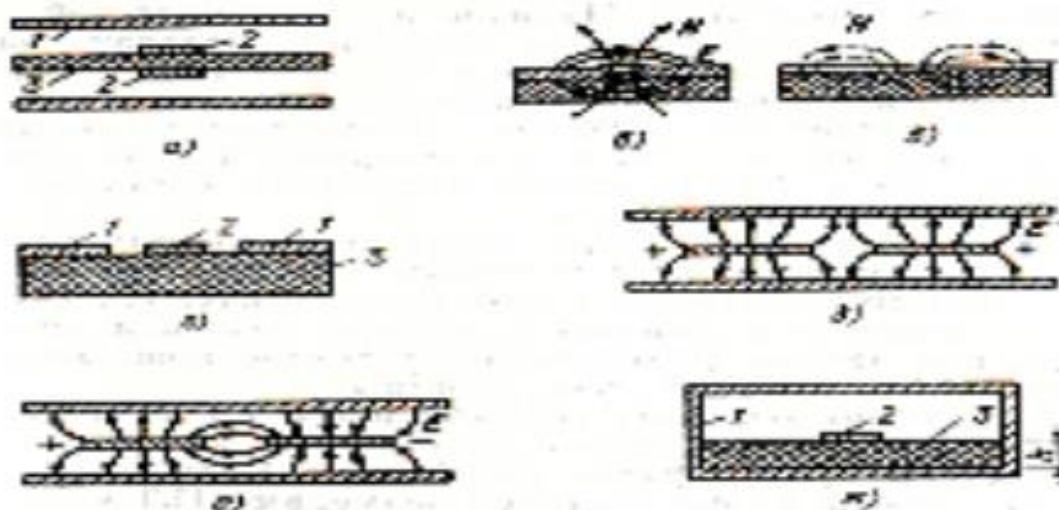
W – ширина смужки; t – товщина смужки.

Рисунок 1.1- Пристрій і структура електромагнітного поля несиметричних і симетричних смужкових ліній

Мікросмужковою лінією передачі (МСЛ) називається провідник стрічкового типу 1 (смужка) прямокутного перерізу, розташований на підкладці 2 з високою діелектричною проникністю, на зворотному боці якої розташована заземлена металева площина 3 (екран).

Існують також наступні смужкові лінії:

- високочастотні (рис. 1.2, а);
- щілинна та її поле в двох перетинах (рис. 1.2, б, 1.2, в);
- компланарність (рис. 1.2, г);
- пов'язані і їх поля при непарному порушенні (рис. 1.2, д, 1.2, е);
- широкосмужкова в екрані (рис. 1.2, ж).



1 – заземлена металева пластина (екран);

2 – провідник; 3 – діелектрична підкладка

Рисунок 1.2 – Типи смужкових ліній

1.2 Хвилі в смужковій лінії

Смужкова лінія, як несиметрична (рис. 1.1, а), так і симетрична (рис. 1.1, в), є окремим випадком направляючої системи відкритого типу, що складається з декількох ізольованих один від одного металевих провідників, нижчий тип хвилі в цій лінії – Т-хвиля.

Строгий аналіз складний. Обмежимося наближеним розглядом цього питання шляхом зіставлення смужкової і коаксіальної ліній, заснованим на тому, що смужкову лінію в якійсь мірі можна розглядати як деформовану коаксіальну лінію.

При деформації поперечного перерізу коаксіальної лінії тип хвилі в ній не змінюється. Змінюється лише форма силових ліній електричного і магнітного

полів. На рис. 1.3 показано, як від коаксіальної лінії шляхом послідовної зміни форми провідників можна прийти до симетричної смужкової лінії. На останньому етапі (рис. 1.3, г) вузькі бічні стінки зовнішнього провідника видаляються на нескінченну відстань.

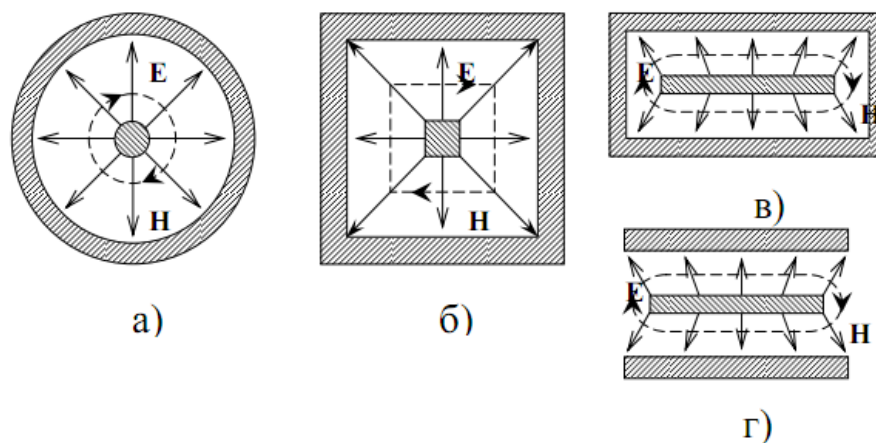


Рисунок 1.3 - Деформація поперечного перерізу коаксіальної лінії

1.3 Мікросмужкові лінії передачі

Мікросмужкова лінія є одним з основних елементів мікросхем НВЧ і широко використовується в якості складових частин таких пристроїв, як відгалужувачі, дільники потужності, фільтри, фазообертачі та інші. МСЛ характеризується рядом параметрів: хвильовим опором, коефіцієнтом втрат, граничної потужністю, що передається, довжиною хвилі і її дисперсією [2].

Зв'язаними називаються дві або кілька ліній передач, між якими є безперервна по довжині електромагнітна зв'язок. Конструкція зв'язаних ліній МСЛ представлена на рис. 1.4.

У зв'язаних лініях можуть існувати хвилі з парних розподілом поля, з непарним, а також сукупність цих хвиль.

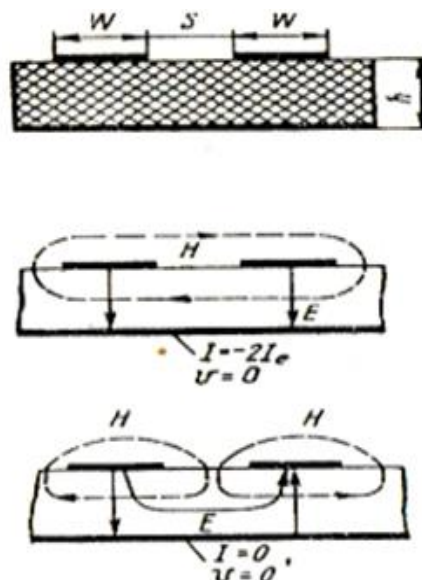


Рисунок 1.4 - Зв'язані МСЛ передачі

1.4 Матеріали підкладок і провідників СЛ

Підкладка як основний елемент СЛ і несуча конструкція гібридних інтегральних схем (ГІС) повинна володіти малими втратами, достатньо великою величиною ϵ_r і постійністю її значення в широкому діапазоні частот і температур; мати хороші зчеплення з провідним шаром (адгезію); бути хімічно стійкою, механічно міцною, однорідною за складом; допускати механічну обробку - різання, свердління, полірування до 12-14 класу шорсткості (середнє арифметичне відхилення складає 0,04-0,01 мкм); володіти теплопровідністю, достатньою для усунення самоперегріву компонентів і елементів ІС.

Коефіцієнт теплопровідності K_T [Вт / (м*с)] чисельно дорівнює кількості тепла, що протікає за секунду через протилежні грані одиниці об'єму речовини при різниці їх температур в 1С°. У ГІС найчастіше застосовують:

- полікор ($\epsilon_r = 9,6$);
- низькочастотної частини сантиметрового діапазону – глиноземну кераміку 22-С ($\epsilon_r = 9,7$);
- ситал СТ-38-1 ($\epsilon_r = 9,7$);
- у високочастотній частині сантиметрового діапазону і на міліметрових хвилях - кварц, що має невелике, але досить стабільне значення $\epsilon_r = 3,82$.

У пристроях з підвищеним тепловіділенням застосовують підкладки з брокірита (окис берилію) ($\epsilon_r=6,4-6,6$), що відрізняється високою теплопровідністю. Для реалізації невзаємних пристроїв застосовують феритові підкладки ($\epsilon_r =13,8-16,3$).

Матеріал провідників СЛ повинен володіти високою електропровідністю, малим температурним коефіцієнтом опору, легко напилюватися або електрично осідати на підкладку.

При тонкоплівковій технології спочатку на підкладку напилюють плівки хрому, ванадію або титану (товщиною 0,01-0,02 мкм), що володіють хорошою адгезією, на які потім наносять плівки міді, срібла або золота. При товстоплівковій технології суміші на основі золота або срібла вжигаются в кераміку підкладки.

1.5 Реалізація елементів у мікросмужковому виконанні

1.5.1 Резистори

Резистори знаходять широке застосування в мікросхемах діапазону НВЧ: подільниках, формувачах фаз, підсилювачах, детекторах, в якості схемних елементів, кінцевих навантажень.

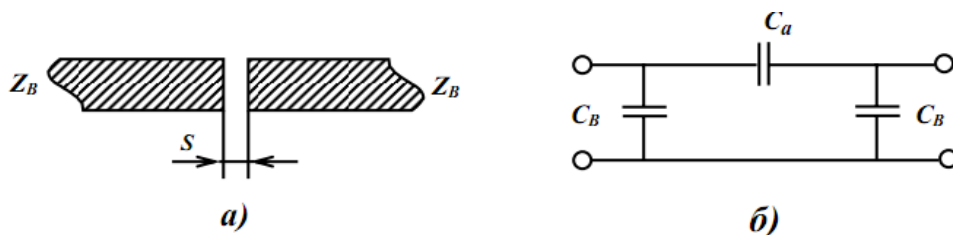
Резистор, включений у МСЛ, являє собою відрізок лінії передачі, виконаний з матеріалу з високим поверхневим опором.

При збільшенні опору резистора від 50 до 5000м переkritтя змінюється від 0,7 до 0,2 мм. Для виключення впливу похибки суміщення МСЛ з резисторами ширина МСЛ в цьому місці повинна бути вдвічі більше похибки суміщення.

1.5.2 Конденсатори

У широкосхемних діапазонах НВЧ широкого поширення набули конденсатори з зосередженими параметрами, що використовуються як блокувальник і перехідник, а також у складі ряду пристроїв, наприклад фільтрів. У залежності від призначення і величини ємності, конденсатори можуть

виконуватися у вигляді планарної конструкції. Конденсатором для діапазону НВЧ є розрив МСЛ (рис. 1.5).

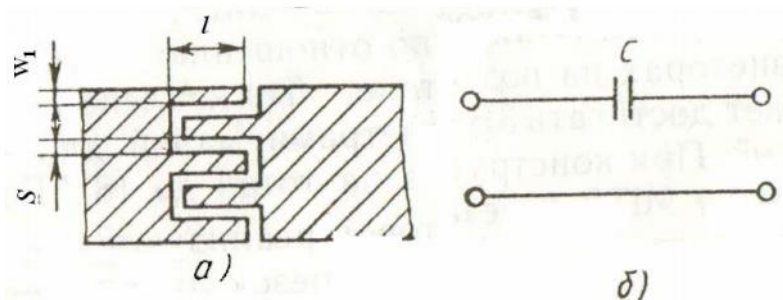


а – конструктивне виконання; б – еквівалентна схема

Рисунок 1.5 – Розрив МСЛ

Ємність такого конденсатора мала і становить частки пікофарад.

Ємність 1-10 пФ можна отримати за допомогою гребінчастих конденсаторів (рис. 1.6).



а – конструктивне виконання; б – еквівалентна схема

Рисунок 1.6 - Гребінчастий конденсатор

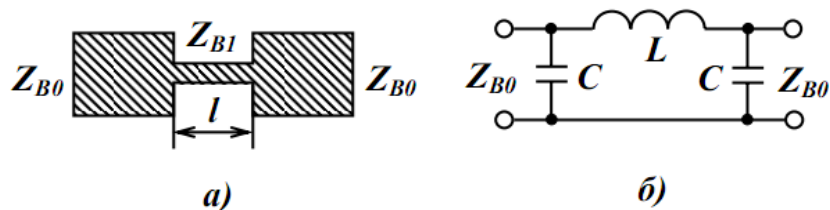
1.5.3 Індуктивності

Індуктивність в пристроях НВЧ застосовують як елемент резонансного контуру, високочастотних дроселів, елементів настройки, комплектуючих елементів.

Найпростішим індуктивним елементом в діапазоні НВЧ є прямокутний відрізок МСЛ.

Послідовно включена індуктивність може бути сконструйована в вигляді стрібки ширини МСЛ або як показано на рис. 1.7.

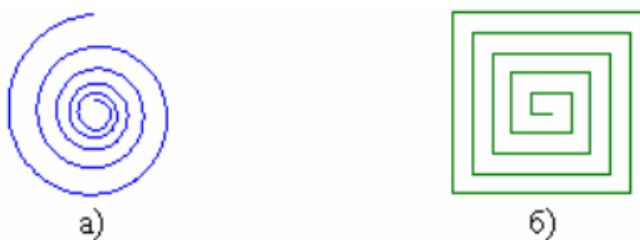
Її еквівалентна схема може бути представлена у вигляді П-подібного з'єднання двох малих ємностей і послідовної індуктивності.



а – конструктивне виконання; б – еквівалентна схема

Рисунок 1.7 – Послідовна індуктивність у вигляді відрізка лінії з високим хвильовим опором:

Індуктивність порядку одиниць наногенрі може бути отримана за допомогою одиночного витка круглої або прямокутної форми (петлі). Для отримання індуктивностей в кілька десятків і сотень наногенрі використовують плоскі спіралі круглої і прямокутної форми (рис. 1.8).



а – кругла форма; б – прямокутна форма

Рисунок 1.8 - Різні форми індуктивності

Для отримання індуктивностей, що досягають декількох мікрогенрі на 1 см поверхні, можна скористатися ефектом збільшення індуктивності при переміщенні контуру в середовище з великою магнітною проникністю.

1.6 Проектування мікросмужкових фільтрів

1.6.1 Загальна характеристика фільтрів

Фільтрами СВЧ називають пасивні чотирьохполюсники, що здійснюють передачу НВЧ коливань в узгоджену навантаження відповідно до заздалегідь заданої частотної характеристикою.

Конструктивними основними елементами фільтрів НВЧ є реактивні неоднорідності, прохідні резонатори, а також з'єднують їх відрізки лінії передач.

За принципом дії фільтри розділяються на відбивальні і невідбивальні.

Фільтр може бути налаштованим на фіксовану частоту і перенастроювати шляхом сполученої перебудови всіх його ланок-резонаторів.

В залежності від того, які види елементів використовуються, фільтри НВЧ можуть бути хвилеводними, коаксіальними, смужковими, твердотільними.

При проектуванні фільтрів, крім необхідних електричних параметрів, враховують можливість їх перебудови і зручності підстроювання, необхідної внаслідок впливу корпусу, неоднорідностей матеріалу та інших факторів, а також сумісності їх конструкцій з іншими елементами твердотільних пристроїв (ТТП) і модулів НВЧ.

Важливими параметрами фільтра є його загасання, що вноситься в тракт. Смугою частот з малим припустимим загасанням називають смугою пропускання, а з більшим - смугою затримування. За взаємним розташуванням смуг пропускання і затримування розрізняють фільтри нижніх частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ), смугові фільтри (СФ), режекторні фільтри (РФ).

Прийнято вважати, що до вузькосмугових відносяться фільтри, що мають відносну смугу пропускання до 3%, до середньосмугових - від 3% до 10%, до широкосмугових - понад 10%.

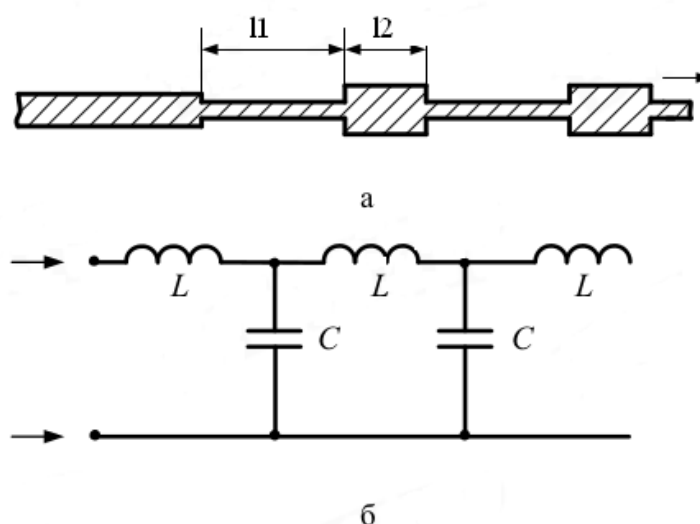
Оскільки в даній роботі мікросмужкова лінія вивчається на прикладі МСЛ фільтра, приділимо фільтрам деяку увагу.

Найбільшого поширення в ТТП отримали мікросмужкових фільтри. Їх елементами є короткозамкнені (розімкнуті) відрізки МСЛ.

Фільтри на мікросмужкових лініях з зазорами можуть бути реалізовані:

- на одиночних мікросмужкових напівхвильових резонаторах із зазорами;
- на одиночній смужковій лінії з використанням гребінчастих конденсаторів і паралельно включених коротких шлейфів;
- на чвертьхвильових резонаторах, включених як чотирьохполюсники;
- на напівхвильових резонаторах зі ступінчастою зміною хвильових опорів.

ФНЧ утворюється лінійним провідником, які мають конфігурацію, показану на рис. 1.9, а. Ділянка L1 лінії має більше хвильовий опір, щодо опору лінії підведення, а ділянка L2 має менший опір. Якщо $L1 < \lambda / 4$ і $L2 < \lambda / 4$ (λ відповідає граничній частоті ФНЧ), то ділянка L1 має індуктивний опір, так як є аналогом закороченими відрізка лінії передачі довжиною менше $\lambda / 4$, а ділянка L2 має ємнісний опір, так як є аналогом розімкнутого відрізка лінії передачі з довжиною менше $\lambda / 4$. На рис. 1.9, б показана еквівалентна електрична схема цього фільтра. Відповідність схем рис. 1.9, а і 1.9, б один одному залежить від співвідношення довжин L1 і L2 з найменшою довжиною хвилі в смузі пропускання фільтра. Зазвичай достатньо виконати умову $L_i \leq \lambda/8$, де L_i - довжина I-го відрізка ФНЧ на мікросмуужковий лінії (МСЛ); λ - довжина хвилі в лінії, відповідна граничній частоті ФНЧ.

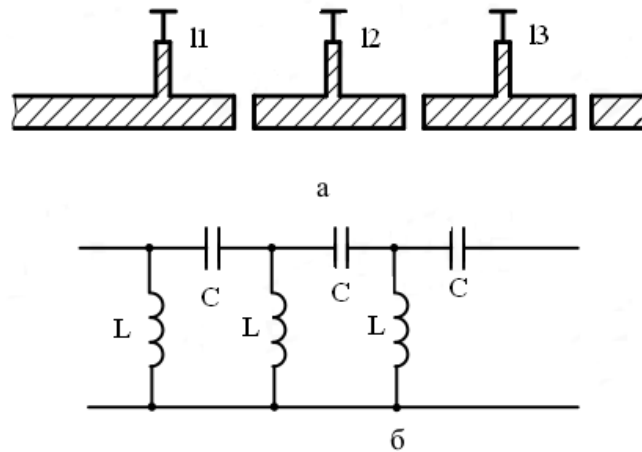


а - конфігурація; б - еквівалентна схема;

L1, L2 - довжина ділянок

Рисунок 1.9 - ФНЧ на МСЛ

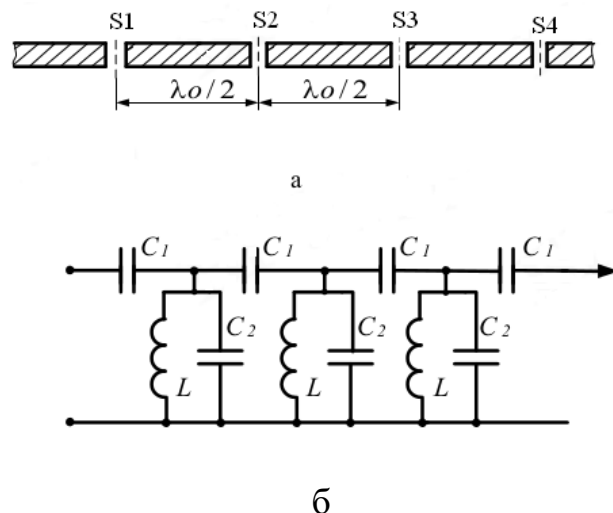
ФВЧ утворюється за допомогою відрізків ліній, закорочених на кінці, і розривів в основній лінії передачі (рис. 1.10, а). Довжини закорочених відрізків L1, L2, L3 повинні задовольняти умовам, розглянутим вище для ФНЧ. Розриви в основний МСЛ утворюють послідовні ємності. Еквівалентна схема фільтра наведена на рис. 1.10, б.



а – конструкція; б – еквівалентна схема

Рисунок 1.10 – ФВЧ на МСЛ

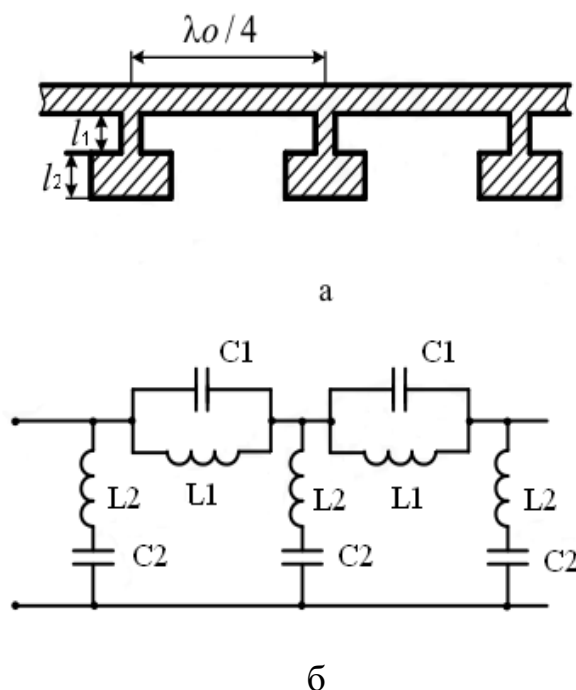
Є велика кількість конструкцій СПФ на МСЛ. На рис. 1.11, а показана конструкція фільтра, утвореного системою послідовних резонаторів НВЧ, виконаних у вигляді розімкнутих відрізків лінії передачі довжиною $\lambda_0/2$ (λ_0 - довжина хвилі, відповідна середній частоті), зв'язок між контурами утворюється невеликими розривами в лінії передачі S1, S2 і т. д. Еквівалентна схема такого фільтра показана на рис. 1.11, б. Недоліком даної конструкції СПФ є її відносно велика протяжність.



а - конструкція ; б - еквівалентна схема

Рисунок 1.11 - СПФ на МСЛ з позовжньо розташованими резонаторами

Конструкція СЗФ, що складається з підключених через чверть хвилі відгалужень ліній передачі, що включають вузький і широкий L1 L2 провідники, наведена на рис. 1.12, а. Таке відгалуження еквівалентно послідовному з'єднанню індуктивності та ємності. Якщо еквівалентні індуктивність і ємність утворюють резонанс на частоті f_0 , то в МСЛ опір у точках підключення відводу виявляється близьким до нуля. У цьому випадку опір ділянки лінії передачі буде дуже великим - відрізок довжиною $\lambda/4$, закорочений на кінці. Еквівалентна схема СЗФ наведена на рис. 1.12, б. [3].



а - конструкція;

б - еквівалентна схема;

L1, L2 - відрізки лінії, що створюють послідовний контур

Рисунок 1.12 - смугопропускаючий фільтр, що загороджує:

1.6.2 Фільтри на одиночних мікросмужкових лініях

Єдиною перевагою фільтра на одиночній мікросмужковій лінії є його мала ширина (рис. 1.13, а). Однак ця перевага компенсується великою довжиною і складністю отримання та розрахунку необхідних зазорів. Тому реалізовані смуги пропускання не перевищують 20%.

Спроби збільшити смугу пропускання в фільтрах на одиночній мікросмужковій лінії призводять до застосування гребінчастих конденсаторів, а прагнення усунути паразитні смуги пропускання до застосування зазорів в мікросмужковій лінії з паралельно включеними короткими шлейфами (паралельний коливальний LC контур) (рис. 1.13, б).

Фільтри можуть бути виконані на основі зазорів в мікросмужковій лінії і короткозамкнених шлейфів (J-, K-інверторів), сполучених чвертьхвильовими резонаторами одиночної мікросмужкової лінії. Фільтри даного типу мають великі зазори в мікросмужковій лінії, більш загасання в смугі загородження і в два рази меншу довжину, в порівнянні з фільтрами на основі одиночних мікросмужкових напівхвильових резонаторів із зазорами (рис. 1.13, в).

СПФ на напівхвильових резонаторах з ступневою зміною хвильових опорів (рис. 1.13, г) в даний час не мають практичного застосування і можуть бути синтезовані з використанням чвертьхвильового трансформатора як прототипу [9].

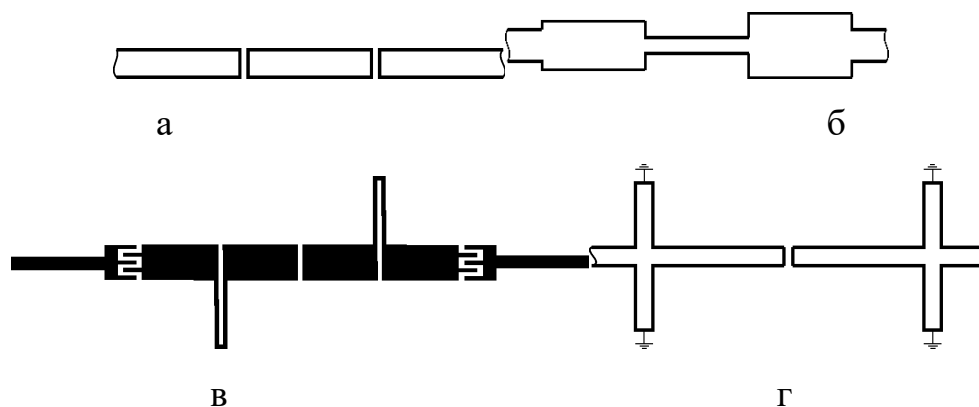
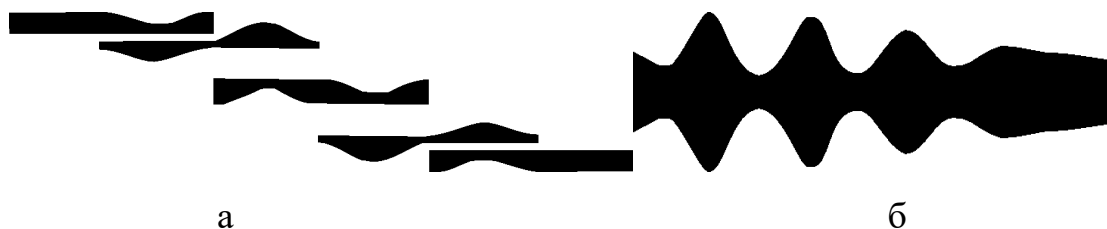


Рисунок 1.13 - Конструкції СПФ на одиночних мікросмужкових лініях з зазорами

1.6.3 Мікросмужкових фільтри на неоднорідних лініях і з використанням східчастих переходів

Необхідно відзначити СПФ з використанням неоднорідних ліній передачі. Так, в роботі [8] представлений фільтр з смугою пропускання 40%, втрати в смугі пропускання не більше 0,5 дБ на основі одиночної мікросмужкової лінії, плавно змінюється (рис. 1.14, а). Однак фільтр має невисокий рівень загасання в смугі загородження - 20 дБ. Пов'язані неоднорідні лінії з синусоїдальною зміною

ширини (рис. 1.14, б) використовуються для вирівнювання фазових швидкостей парної і непарної мод і усунення паразитної смуги пропускання фільтра на частоті $2f_0$.

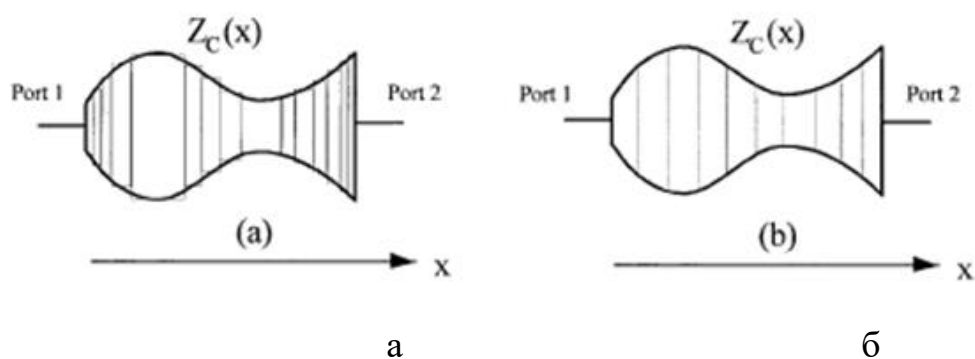


а – на зв'язаних лініях; б – на одиночній лінії

Рисунок 1.14 – МСФ з використанням неоднорідних ліній

Такі фільтри можуть бути реалізовані на одиночній нерегулярній лінії передачі, а також на зв'язаних нерегулярних лініях передачі.

Нова технологія з використанням плавних неоднорідних ліній краще, ніж в покроковому наближенні (яка була широко застосована в конструюванні мікрохвильової інженерії) по причині пов'язаної з обчислювальною ефективністю і точністю. Метод нерозривної кусково-лінійної апроксимації очевидно кращий, ніж ступінчастої апроксимації, яка показана на рис. 1.15, а.



а – метод ступінчастої апроксимації;

б – метод нерозривної кусково-лінійної апроксимації

Рисунок 1.15 - Мікросмужкові неоднорідні лінії

МСФ на зв'язаних лініях підрозділяються на:

– фільтри на напівхвильових резонаторах, розімкнутих (короткозамкнених) на кінцях;

- шпилькові;
- зустрічно-стрижньові;
- гребінчасті.

У переважній більшості випадків при проектуванні мікросмужкових фільтрів використовуються зв'язані лінії з боковим зв'язком. Для класичної конструкції фільтра на однакових зв'язаних лініях з боковим зв'язком [3], ширина смуги пропускання фільтра становить 5-20%, а перша паразитна смуга пропускання розташована на частоті $2f_0$ (f_0 - центральна частота смуги пропускання фільтра або частота зрізу ФНЧ і ФВЧ). Існує різновид даного типу фільтрів з кінцевими ланками фільтра у вигляді неоднакових зв'язаних ліній з врівноваженими зв'язками. Неоднакові зв'язані лінії мають трансформуючі властивості, що дозволяє проектувати внутрішні ланки фільтра з використанням нормуючого хвильового опору, який відрізняється від хвильового опору ліній живлення.

Наявність паразитної смуги пропускання на частоті $2f_0$ призвела до ряду робіт, присвячених конструктивним способам усунення паразитних смуг пропускання. Щодо компактності конструкції, що використовує зв'язок через зміщений торцевої зазор для поліпшення форми частотної характеристики (збільшення крутизни характеристики в перехідній області) та підвищення загасання в смузі загородження, може також використовуватися для усунення паразитної смуги пропускання [4].

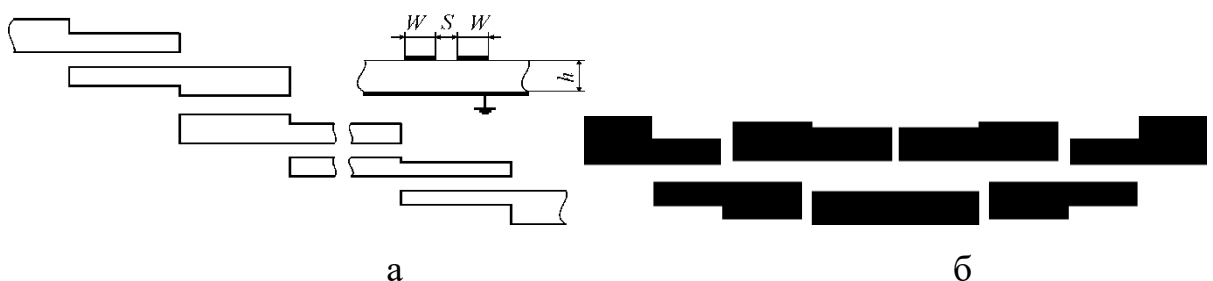


Рисунок 1.16 - МСФ на зв'язаних лініях у вигляді напівхвильових резонаторів з чвертьхвильовими зв'язаними лініями

Окремим напрямком у способах усунення паразитних смуг пропускання стало часткове видалення заземленого екрануючого шару. Так, в роботі [5] для усунення паразитних смуг пропускання екранує шар запропоновано виконувати у вигляді складного топологічного малюнка (ширини фотонної забороненої зони) (рис. 1.17, а). Додатковими перевагами даної конструкції є спрощення виконання рисунка в екрануючих шарі у зв'язку з великими (в порівнянні з традиційними фільтрами) розмірами топологічних елементів.

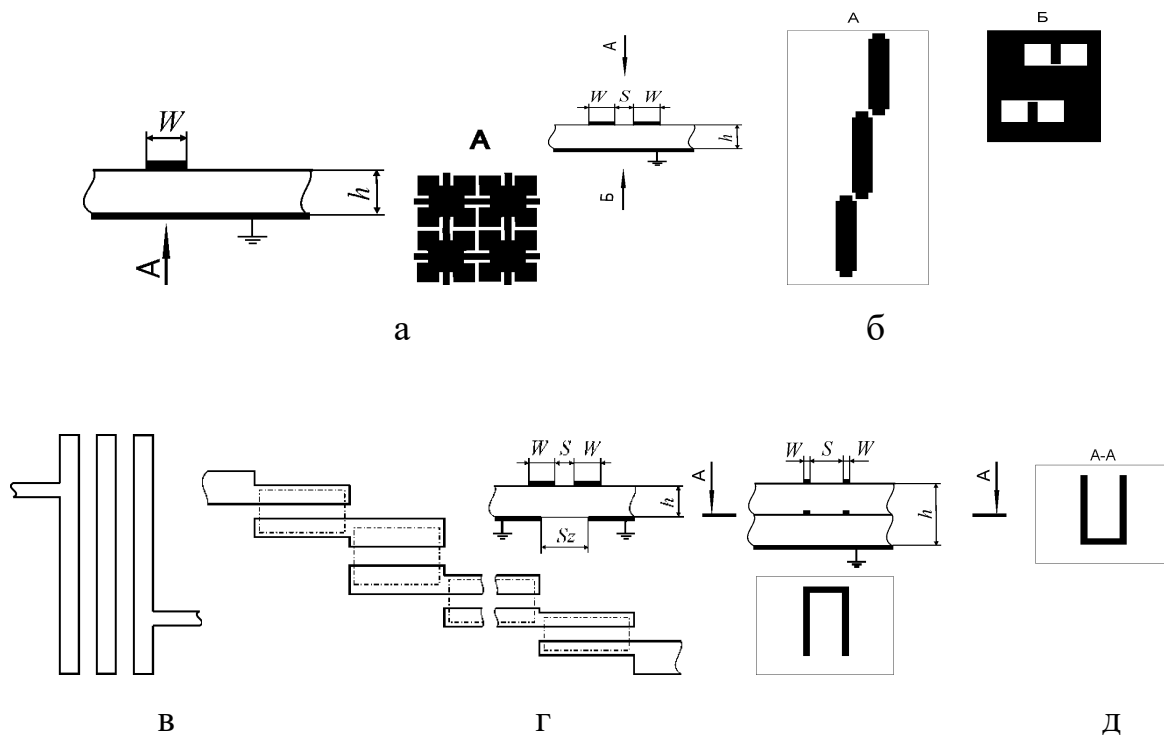
Інший варіант часткового видалення шару екрану для усунення паразитної смуги пропускання (рис. 1.17, б) наведені в [6], де вдалося досягти рівня загасання в паразитній смузі пропускання більше 40 дБ. В роботі [7], пропонується вводити отвір в екрані уздовж всієї галузі зв'язку. Спочатку ця модифікована структура пов'язаних ліній була запропонована авторами [8] для вирівнювання фазових швидкостей парної і непарної мод. Завдяки конструкції, наведеній на рис. 1.17, в, вдається не тільки усунути паразитних смугу пропускання, але і збільшити геометричні розміри ширини пов'язаних ліній і зазору між ними, що знижує вимоги до технології виготовлення. Крім того, ця конструкція дозволяє значно збільшити широкосмуговість фільтра.

Заслужують уваги фільтри на основі компактних багаторівневих згорнутих пов'язаних ліній (рис. 1.17, г). Конструкція фільтрів з використанням даних ліній, незважаючи на технологічну складність у виготовленні, набагато більш компактна і забезпечує більшу крутість частотної характеристики в перехідній області у порівнянні з традиційними фільтрами на зв'язаних лініях.

До фільтрів на зв'язаних лініях можна віднести фільтри на зв'язаних мікросмужкових резонаторах, крайні з яких кондуктивно підключені до зовнішніх ліній передачі (рис. 1.17, д). На величину загасання в смузі загородження і на крутизну амплітудо-частотній характеристиці в перехідній області у значній мірі впливає спосіб підключення резонаторів до ліній передачі. Перевагою фільтрів даного типу є можливість усунення декількох паразитних смуг пропускання.

Фільтри, реалізовані на відрізках нерегулярної передачі, в деяких межах можуть бути описані з використанням теорії плавних переходів, якщо форма

топології може відповідати експоненціальній або гіперболічній характеристикам. Недоліком таких плавних переходів є їхня велика довжина при значних перепадах хвильового опору. Фільтри, топологія яких включає відрізок нерегулярної МПЛ, що описується за допомогою синусоїди, досі описано не було. Крім того, синтез фільтрів на відрізках НЛП досі не автоматизовано.



а - на мікросмужковій лінії з повторюваним рисунком отворів в екрануючому шарі;

б - на зв'язаних мікросмужкових лініях з отворами в екрануючому шарі;

в - на повторюваних на зв'язаних мікросмужкових лініях;

г - на зв'язаних мікросмужкових лініях з отворами в екрануючому шарі під ділянками зв'язаних ліній;

д - на зв'язаних мікросмужкових резонаторах, крайні з яких кондуктивно підключені до зовнішніх ліній передачі

Рисунок 1.17 - Конструкції СПФ на базі зв'язаних ліній

1.6.4 Класифікація фільтрів за взаємним розташуванням смуг пропускання і загородження

За взаємним розташуванням смуг пропускання й загородження виділяють такі види фільтрів: нижніх частот (ФНЧ), верхніх частот (ФВЧ),

смуго пропускаючі (СПФ), смуго загороджувальні (режекторні) (СЗФ), спеціальні, що мають складну частотну характеристику [3].

На рис. 1.18 в координатах $K(f)$ зображені АЧХ ідеальних фільтрів.

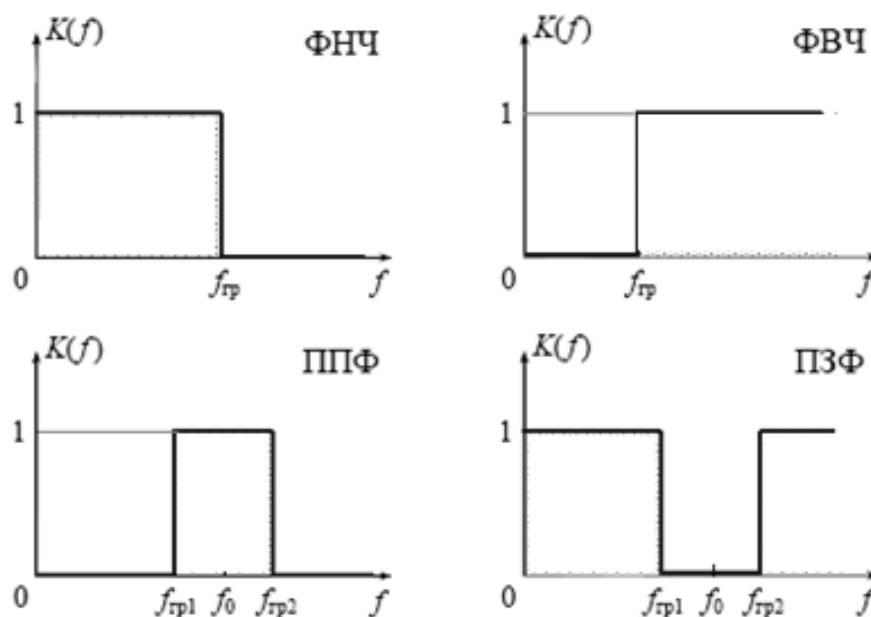


Рисунок 1.18 - АЧХ ідеальних фільтрів

У реальних фільтрах досягти таких характеристик неможливо. Тому при проектуванні фільтрів зазвичай задаються певні вимоги до частотним характеристикам, які визначають ступінь їх відхилення від ідеальних.

По-перше, в смузі пропускання допускається відхилення значення коефіцієнта передачі фільтра від одиниці на величину δK_p , а в смузі загородження - від нуля на величину δK_z (рис. 1.19). Величину δK_p називають нерівномірністю АЧХ в смузі пропускання, а величину δK_z - максимальним відхиленням АЧХ в смузі затримання.

По-друге, з огляду на те, що реалізувати різку зміну коефіцієнта передачі фільтра від нуля до одиниці і, навпаки, у відповідності з характеристиками, показаними на рис. 1.19, не вдається, на реальній АЧХ з'являється так звана перехідна область між смугою пропускання і смугою загородження. У межах цієї смуги коефіцієнт передачі фільтра змінюється довільним чином від значень, заданих для смуги пропускання, до значень, необхідних в смузі загородження.

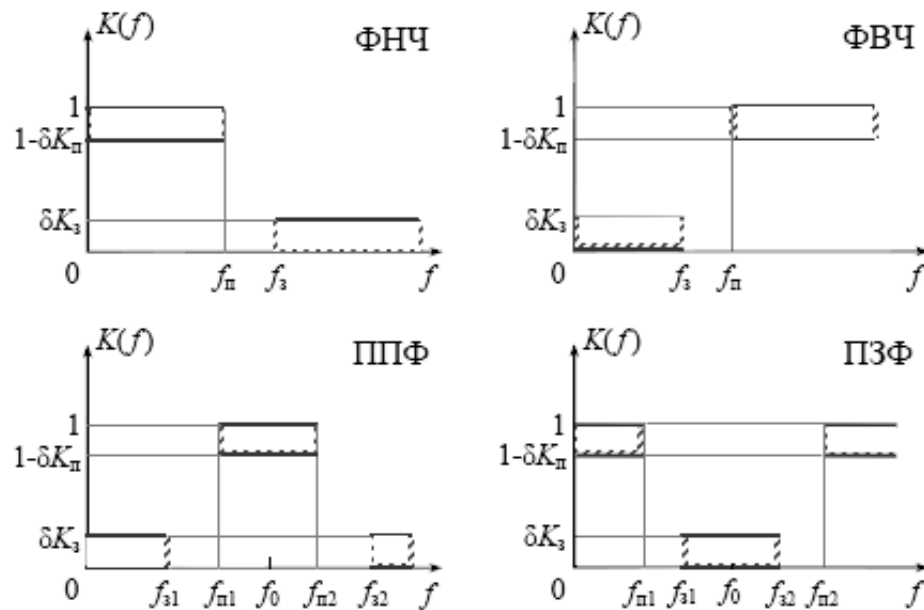


Рисунок 1.19 - АЧХ основних типів фільтрів з допустимими відхиленнями (виділені області) в смузі пропускання - δK_n і в смузі загородження - δK_s

Таким чином, в якості вихідних даних при проектуванні фільтрів задаються граничні частоти смуг пропускання і загородження, допуски на максимальне значення нерівномірності АЧХ в смузі пропускання і максимальне відхилення АЧХ від нуля в смузі загородження.

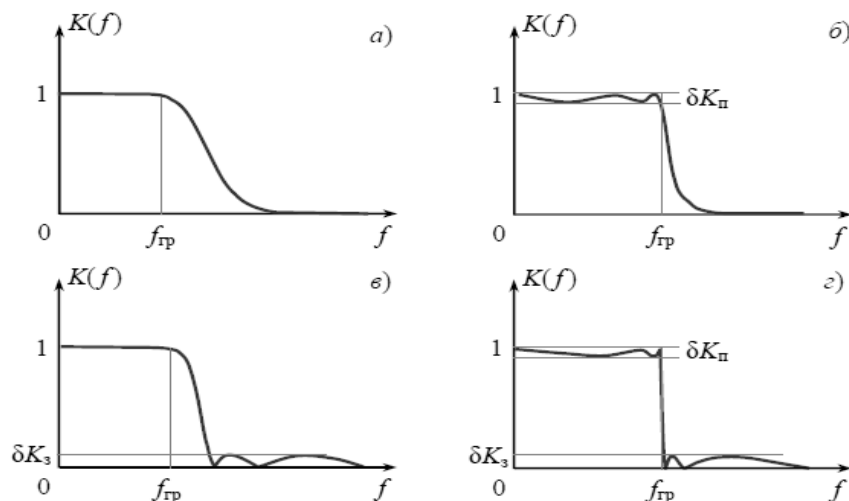
1.6.5 Класифікація фільтрів за виглядом передавальної функції

Залежно від вимог, що пред'являються до форми АЧХ, розрізняють такі групи фільтрів:

- фільтри Баттерворта - проектуються так, щоб їх АЧХ була максимально згладженою на частотах смуги пропускання (рис. 1.20, а).

- фільтри Чебишева - фільтр, характерною особливістю якого є більша крутизна спаду АЧХ та її суттєві пульсації на частотах смуг пропускання (так званий фільтр Чебишева I роду – рис. 1.20, б) і придушення (так званий фільтр Чебишева II роду - рис. 1.20, в) порівняно із АЧХ фільтрів інших типів. Фільтр названий за ім'ям математика П.Л. Чебишева, оскільки характеристики цього фільтру описуються многочленами Чебишева. Фільтри Чебишева забезпечують

найкраще наближення до ідеальної прямокутної частотній характеристиці при заданому числі ланок фільтра.



а – Баттерворта; б, в – Чебишева; г – еліптичний (Кауера)

Рисунок 1.20 - Типи АЧХ електричних фільтрів

Еліптичні фільтри (Кауера) - частотно-селективні пристрої, відмінною особливістю яких є пульсації на амплітудно-частотній характеристиці і в смузі пропускання, і в смузі придушення (рис. 1.20, г). Фільтр Кауера забезпечує швидке збільшення загасання відразу ж за частотою зрізу і до першої режекторні частоти. Характеристика загасання фільтра Кауера має мінімуми в смузі затримання.

Величина пульсацій в кожній зі смуг не залежить один від одного. Іншою характерною особливістю фільтрів Кауера є дуже велика крутизна спаду АЧХ, тому за допомогою фільтра цього типу можна досягати ефективніший поділ частот у порівнянні з іншими лінійними фільтрами. Назва ці фільтри отримали у зв'язку з тим, що їх АЧХ описуються за допомогою еліптичних функцій.

Розглянемо на прикладі смугово-проникного (смугового) фільтра головні з цих параметрів. Селективні властивості смугових фільтрів визначаються в першу чергу коефіцієнтами крутизни схилів АЧХ поблизу робочої смуги пропускання (рис. 1.21). Ці коефіцієнти залежать від ширини смуги пропускання $\Delta f_{п}$, вимірної по деякому заданому рівню, наприклад, - 3дБ, що відповідає половині минулій

потужності, і ширини смуг частот Δf_n і Δf_v , визначених від частоти f_0 до низькочастотного і високочастотного схилів на рівні L_3 .

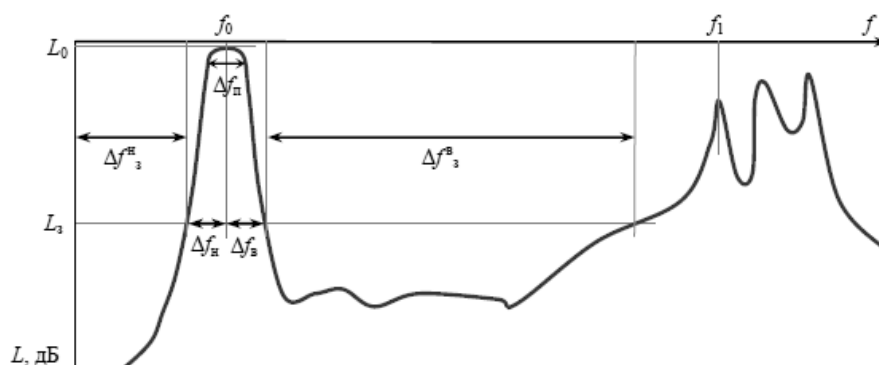


Рисунок 1.21 – Основні параметри АЧХ смугового фільтра, що визначають його селективні властивості

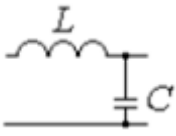
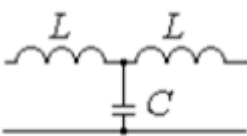
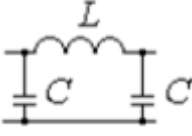
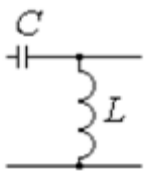
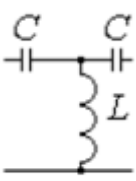
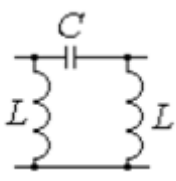
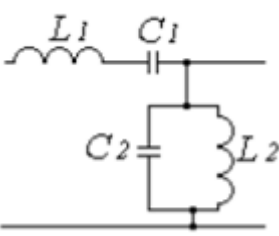
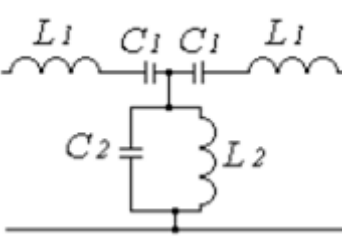
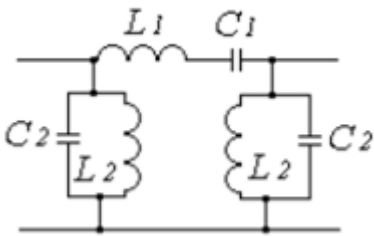
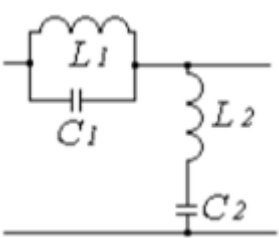
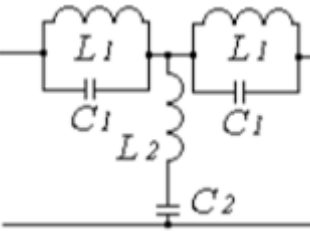
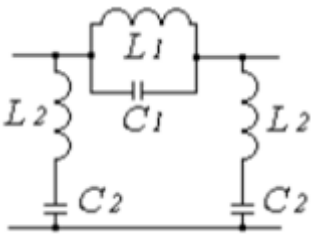
Крім того, вибірковість фільтра описується також величиною втрат L_0 в смузі пропускання, рівнем придушення L_3 у смугах загородження і шириною високочастотної смуги загородження Δf_{zv} , яка в межі обмежується другою, паразитною, смугою пропускання f_1 . Тут АЧХ фільтра наведена в логарифмічному масштабі ($L [дБ] = 20 ЛГК$), як це прийнято в теорії та практиці НВЧ фільтрів [4].

1.6.6 Реалізація фільтрів

У табл. 1.1 наведені схеми низькочастотних прототипів фільтрів, використовуваних при їх реалізації.

Найбільш поширеним прийомом є заміна зосереджених ємностей, індуктивностей і коливальних контурів відрізками ліній передачі, що особливо зручно, якщо відносна смуга пропускання частот фільтра перевищує 5%. Приклади заміни зосереджених індуктивностей і ємностей укороченими ($L < \lambda_v / 4$) відрізками коаксіальної лінії передачі при короткому замиканні або холостому ході на кінці показані на рис. 1.22 [3].

Таблиця 1.1 - Схеми НЧ прототипів фільтрів

Типи фільтрів	Схеми фільтрів		
	У вигляді Г-напівланки	У вигляді Т-напівланки	У вигляді П-напівланки
ФНЧ			
ФВЧ			
СПФ			
СЗФ			

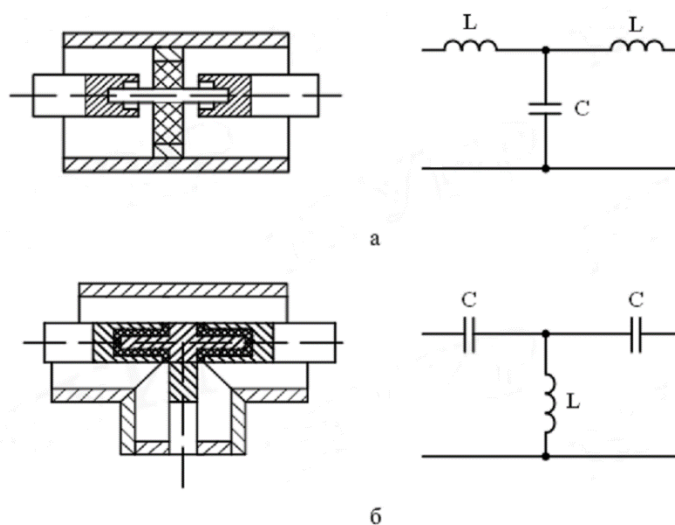


Рисунок 1.22 - Приклади реалізації ФНЧ (а) і ФВЧ (б) на коротких відрізках ліній передачі

Після вибору прототипу фільтру і перетворення частотної змінної виникає завдання, пов'язане із заміною ідеальних зосереджених елементів прототипу. Вирішення цього завдання здійснюється залежно від діапазону частот, в якому повинен працювати фільтр, типу застосовуваних ліній передачі, вимог до відносної смуги пропускання фільтра та ін.

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС КОНСТРУКЦІЙ МІКРОСМУЖКОВИХ ФІЛЬТРІВ

2.1 Чисельні методи розрахунку пасивних структур НВЧ і міліметрового діапазонів

Недавні досягнення в інтегральних схемах міліметрового діапазону, особливо монолітних, збільшили потребу в автоматизації проєктувальних робіт. На відміну від гібридних інтегральних схем на відносно низьких частотах, розрахунок інтегральних схем НВЧ і міліметрового діапазону хвиль надзвичайно важкий, і по суті неможливо коригувати характеристики монолітних пристроїв, якщо вони вже виготовлені.

Отже, точні програми автоматизованого проєктування істотно необхідні для проєктування цих пристроїв.

Вихідна точка для розвитку програм автоматизованого проєктування - це точне визначення характеристик пасивних і активних структур, включених в схему. Хоча більшість програм автоматизованого проєктування засноване на емпіричних формулах і пошукових таблицях, а не на точному числовому розрахунку характеристик, останні можуть використовуватися, якщо вони є. Крім того, вони можуть бути використані, щоб генерувати пошукові таблиці і перевіряти точність емпіричних формул.

У відповідності зі значними очікуваннями в можливостях комп'ютерів, чисельні методи також розвивалися в останні роки. Деякі методи стали більш ефективними, а деякі прийшли з інших дисциплін, наприклад, технічної механіки, і знайшли застосування в електромагнітних хвильових задачах.

Розрахунок чисельних характеристик та моделювання пасивних компонентів хвилеводних структур були важливими предметами дослідження в останні два десятиліття. Потреба в цьому ставала все більш і більш очевидною в останні роки, через зростання науково-дослідницького інтересу до інтегральних схем НВЧ і міліметрового діапазону хвиль і монолітним інтегральним схемами. Перебудовувати і налаштовувати ці схеми, один раз виготовлені, неможливо

більше ні економічно, або в багатьох випадках, навіть взагалі. Отже, необхідні надзвичайно точні методи визначення характеристик моделі структури.

Через те, що більшість структур, що використовуються в сьгоднішніх друкованих та плоских інтегральних схемах неможливо розрахувати аналітично, чисельні методи для визначень характеристик, надзвичайно необхідні. Проєктувальники вважають за краще поки використовувати пакети автоматизованого проєктування (CAD), які в більшості випадків складаються з апроксимації емпіричної кривої або емпіричних формул. Проте перевірка правильності цих формул має бути підтримана точними визначеннями характеристики. Крім того, будь-які чисельні методи розрахунку характеристики повинні бути як можна ефективніше і економічно можливими, і достатніми по тимчасових вимогам і вимогам пам'яті центрального процесора, хоча недавні прогнози в комп'ютерній області накладають менш серйозні обмеження на ефективність і економіку методу. Інший аспект важливий у розробці чисельних методів - експлуатаційна гнучкість чисельних методів.

Фактично, чисельні методи обрані на основі компромісів між точністю, швидкістю, вимогою пам'яті, експлуатаційною гнучкістю і т.д., і часто залежать від аналізованої структури. Починаючи з появи інтегральних схем СВЧ, був винайдений ряд нових методів і кілька класичних методів були вдосконалені для сучасних структур.

Для аналізу конкретної структури, потрібно зробити вибір, який метод найкраще підходить для структури. Отже, користувач повинен робити критичну оцінку передбачуваного методу. У цій главі, ми розглядаємо список методів і представляємо загальноприйнятні оцінки для них. Оскільки неможливо дати вичерпний список з усіх доступних методів, розглянуті найбільш важливі. Хоча оцінка буде націлена на визначення характеристики пасивних тривимірних структур, багато методи також ефективні для двовимірних проблем. Крім того, методи з двома розмірностями можуть використовуватися як окремий випадок загальної програми визначення характеристики для тривимірних структур.

2.1.1 Метод кінцевих різниць

Цей метод, як відомо, є менш за все аналітичним. Обробка математики мінімальна, і метод може застосовуватися до широкого класу структур, включаючи несиметричні форми. Ціною цього є чисельна неефективність. Деякі заходи повинні бути прийняті до уваги, коли метод використовується для завдання з відкритою областю, в якій область буде скорочуватися до кінцевого розміром. Також, метод вимагає, щоб точки осередку лежали в межах об'єкту аналізу [15].

2.1.2 Метод кінцевих елементів

Метод кінцевих елементів [17, 18, 19, 20, 21] дещо подібний до методу кінцевих різниць, однак він має варіаційні особливості в алгоритмі і містить кілька гнучких особливостей.

У методі кінцевих елементів замість частних диференціальних рівнянь з граничними умовами, відповідні функціонали складають систему варіаційних виразів, що відносяться до кожної з малих областей чи об'ємів, виділяється область, що представляє інтерес. Зазвичай, ці малі сегменти - багатокутники типу трикутників і прямокутників для двовимірних завдань і тетраедричних елементів для тривимірних задач. Через таку дискретизацію, не всякі обмеження можуть бути накладені на форму структури.

Свого часу був запропонований метод граничних елементів [24, 25]. Це комбінація методу інтегрального рівняння на границі, і техніки дискретизації, подібної алгоритмом кінцевих елементів, вживаному до кордону.

Одна з переваг цього методу полягає у зменшенні необхідної пам'яті і часу розрахунку, що слідує зі зменшенням розмірності.

2.1.3 Метод матриці ліній

У методі TLM [26, 27] задача поля перетворена до тривимірної еквівалентної схемної завдання. Цей метод більш підходить для моделювання явищ поширення хвилі в часовій області, ніж для визначення характеристики

структури. У вихідній формі тривимірного TLM методу, простір дискретизований в тривимірну ґратку з періодом T . Шість польових компонент представлені гібридним TLM осередком. Межі, відповідні електричній стінці та магнітній стінці, представлені короткозамкненими схемами і схемами з відкритими кінцями. Втрати можуть бути представлені резистивними навантаженнями паралельних вузлів. Після того, як отримана реакція в часовій області, частотна характеристика знаходиться перетворенням Фур'є.

2.1.4 Метод інтегральних рівнянь

Поле в тривимірній структурі може бути знайдено, з невідомих величин окремих струмів на кінцевій кордоні, які вирішені цим методом [29]. При цьому часто потрібні невеликі попередні аналітичні розрахунки.

2.1.5 Метод моменту і метод Гальоркіна

Ці методи є популярними засобами для дискретизації операторного безперервного рівняння типу інтегрального рівняння [30]. У найвужчому сенсі, метод моменту використовує ступінчасті функції як базисні функції базису і дельта функції як тестові функції. Однак вибори базисних функцій і функцій тестування можуть бути набагато більш гнучкі. Базисні функції та функції тестування, однакові в методі Гальоркіна, і результуючі рішення, як відомо, є варіаційним [32].

Є декілька поліпшених версій методу узгодження в точках. Наприклад, функції вищого порядку або кусково-синусоїдальні функції можуть використовуватися для базисної функції [33].

Метод Гальоркіна працює подібно до метода Релея - Рітца. У методі Гальоркіна базисні функції і функції тестування ідентичні і визначені в одному і тому ж діапазоні.

2.1.6 Метод узгодження мод

Цей метод зазвичай застосовується до задачі розсіювання хвильової структури з обох сторін неоднорідності. Поля з обох сторін неоднорідності розкладаються в термінах типів хвиль (мод) у відповідних областях з невідомими коефіцієнтами [34].

Так як використовуються ортогональні функції розкладання, ми отримуємо лінійну систему однорідних рівнянь для невідомих коефіцієнтів в кожній області. Ми шукаємо значення постійної поширення, яка робить детермінант цієї системи рівнянь рівним нулю [36].

2.1.6 Метод поперечного резонансу

Цей метод дещо подібний до методу узгодження мод і підходить для визначення характеристики неоднорідності в плоскій хвильової структурі. Мета аналізу - знайти резонансну частоту, з якої може витягти інформацію щодо неоднорідності.

2.1.7 Метод ліній

У цьому методі дві з трьох розмірностей дискретизуються для чисельної обробки, в той час як аналітичні вирази знаходяться в залишилися розмірності. Істотна особливість цього методу по перше пояснюється за допомогою простої двовимірної завданням знаходження постійної поширення мікросмужкової лінії [38].

Цей метод може бути розширений на тривимірну задачу типу мікросмужкового резонатора [39]. Метод ліній застосовувався до ряду практичних, але аналітично складних структур. Приклади включають трикутний мікросмужковий резонатор і періодичну структуру смужкової лінії.

2.1.8 Метод багатомодової матриці

Хоча цей метод був розроблений для аналізу складних неоднорідних завдань, він може використовуватися для визначення характеристики каскадних неоднорідностей, часто використовуються в пасивних компонентах типу фільтра

в Е -площині [40]. Багатомодову матриця розсіювання враховує взаємодію на неоднорідності домінуючою моди і мод високого порядку. Цей метод може використовуватися з іншими методами типу методу узгодження мод, який розраховує єдину неоднорідність.

Метод може застосовуватися до складної неоднорідності, розкладаючи його на окремі неоднорідності з менш складною геометрією, для яких рішення відомі [41].

2.1.8 Метод розрахунку у спектральній області

Цей метод - Фур'є перетворення - версія методу інтегрального рівняння, що застосовується до мікросмужкових ліній або іншим друкованих структур. Цей метод - один з найбільш бажаних методів в останні роки. Метод, як відомо, є ефективним, але обмежений взагалі структурами правильної форми, з нескінченно тонкими провідниками.

Цей метод застосовувався до двовимірним хвилеводним задачам [42] і був розширений на неоднорідні завдання [43].

2.1.9 Еквівалентно-хвилеводних моделей

Цей метод - не чисельний, але формально використовується для задач аналізу неоднорідностей мікросмужкової лінії. Після того, як завдання мікросмужкової лінії перетворене до еквівалентної моделі хвилеводу, один з відповідних чисельних методів використовується для розрахунку неоднорідностей.

Спочатку, цей метод був введений Олінером для смужкових структур [44]. Додаток до мікросмужкових структур було представлено групою дослідників, очолюваної Wolff [48, 49]. Істотна особливість цього підходу - ідентифікація гіпотетичного хвилеводу, що представляє мікросмужкову лінію. І навпаки, неоднорідність мікросмужкової лінії замінюється на еквівалентну хвилеводну структуру. Еквівалентний хвилевід має ту ж саму висоту як товщина підкладки, дві ідеально проводяться стінки верхньої та нижньої межі, і дві магнітних стінки.

Простір заповнений гіпотетичної середовищем з ефективною діелектричною постійною, і ширина дорівнює ефективній ширині.

Метод по суті обмежений випадком, коли поверхневе збудження хвилі і явище випромінювання на неоднорідності незначні, прийнятно точні дані були отримані, поки на відносно низьких частотах.

2.1.10 Модель планарних схем

Цей метод - також формалізація для аналізу плоских пасивних компонент. Розкладання на власні моди і інтегральне рівняння часто використовується для цієї моделі. Крім того, так звана сегментація і декомпозиція - потужні доповнення для планарних схем.

Вищезгаданий метод застосуємо до структури з довільною формою. Однак коли форма ланцюга правильніша, скажімо, прямокутна або кругова, другий метод більш зручний і інформативний.

Інше розширення методу планарних схем - метод декомпозиції [53]. Цей метод можна застосовувати до геометрії, яка може бути проаналізована легко чи початковим методом планарних ланцюгів або методом сегментації, якщо простий елемент додано.

Кожен метод має свої переваги і недоліки. Відзначимо, що стійке поліпшення персональних комп'ютерів надає додаткові можливості для чисельного рішення електродинамічних задач. Деякі прості характеристики можуть бути розраховані безпосередньо на сучасних персональних комп'ютерах. Крім того, ці машини можуть використовуватися для зберігання бази даних або пошукових таблиць. Дані можуть бути отримані на більшій машині або в деяких випадках на самих персональних комп'ютерах.

В залежності від довжини ділянки та розкиду ширини МСЛ у поперечному перерізі на такій топології можна отримати як ФНЧ, так і СПФ (який може бути застосований як фільтр псевдо верхніх частот). При цьому широку частину топологічного рисунку можна представити в еквівалентній схемі заміщення як

ємність, вузьку – як індуктивність, а при певних значеннях поздовжніх характеристик – як ємність.

Фільтри, топологію МСЛ яких можна описати за допомогою синусоїд, у традиційному виді можна привести до ФНЧ на мікросмужковій лінії зі ступінчатим опором. Проте проведені розрахунки показали, що в залежності від ширини у поперечному перерізі (максимальної та мінімальної), та довжини окремих ланок на мікросмужковій лінії з синусоїдальною зміною ширини можна реалізувати різні типи фільтрів. Крутизну характеристики визначає кількість окремих ланок та апроксимуючий поліном. Так, при апроксимації Баттерворта необхідна більша кількість ланок, ніж при апроксимації Чебишева, для досягнення однакової крутизни вихідної характеристики фільтра.

2.2 Методи синтезу мікросмужкових фільтрів

Існує досить велика кількість робіт, присвячених радіотехнічним аналоговим фільтрам.

В 50-х роках минулого сторіччя кількість робіт по фільтрам було відносно невеликим, оскільки стан розробок знаходився на початковій стадії. В той час деякі автори [54] пропонували графоаналітичний метод синтезу і розрахунку частотних характеристик робочого затухання електричних аналогових фільтрів, що значно спрощує їх розрахунок. Наводяться рекомендації щодо вибору оптимальних частотних характеристик, що забезпечують необхідне затухання при мінімальній кількості елементів фільтрів. Перевагою даного методу є можливість отримати готову криву затухання фільтра, максимально наближеного до кривої реального фільтра. Крім того, розглядаються розрахунки різних типів фільтрів: ФНЧ, ФВЧ, СПФ, СЗФ, наведені електричні схеми і формули для розрахунку їх елементів. В цій роботі можна відслідкувати підходи до синтезу фільтрів, проте ці підходи не отримали необхідного розвитку. Даний метод не дозволяє вести розрахунки для схем фільтрів високих порядків.

На наступних етапах відмічається подальший розвиток синтезу аналогових фільтрів. В одній із публікацій описана методика проектування і синтезу

діапазонних аналогових RC- і LC-фільтрів. Діапазонні LC-фільтри розраховані за методом хвильових параметрів [55]. Наведена таблиця узагальнених параметрів, що спрощує розрахунок і проєктування подібних RC-фільтрів для великого діапазону заданих вихідних даних. За цією таблицею, виходячи із параметрів, обирається принципова схема фільтра і його передавальна функція. Метод є простим у застосуванні і досить зручним, проте він не розрахований на схеми високих порядків.

В [56, 57, 58] описаний метод синтезу пасивних фільтрів драбинної структури, фільтрів Баттерворта, Чебишева, Кауєра і фільтрів загального типу [Херреро]. Даний метод і на сьогоднішній день є одним із найбільш розповсюджених методів синтезу фільтрів. В основі методу лежить розкладання передавальної функції за поліномами Баттерворта, Чебишева з наступним знаходженням коефіцієнтів поліномів. Весь процес апроксимації передавальної функції передавальної функції можна розділити на декілька послідовних дій.

Припустимо, що є деяка передавальна функція $S(j\omega)$. Розглянемо уважніше характеристику низькочастотного прототипу:

$$|S(j\omega)|^2 = \begin{cases} A, & |\omega| < \omega_c \\ 0, & |\omega| > \omega_c \end{cases}$$

Причому $A' \leq 1$, щоб забезпечити можливість отримання $S(p)$. Так як $|S(j\omega)|^2$ - кінцева раціональна функція від ω^2 , то вона неперервна, і тому ми можемо лише апроксимувати ідеальну характеристику з допустимою помилкою. Таким чином, типові обмеження для характеристик можна виразити так, як це наведено нижче:

$$A' \leq |S(j\omega)|^2 \leq A \quad \text{при } |\omega| < \omega_p$$

$$|S(j\omega)|^2 \leq B \quad \text{при } |\omega| > \omega_s$$

Розглянемо чотири типи розв'язків при такій постановці задачі апроксимації. Найбільш загальним із них є той, де характеристика отримується рівнохвильовою. Так в фільтрах Чебишева застосовується рівнохвильова апроксимація в смузі пропускання при монотонно зростаючому затуханні в смузі загородження, з максимальною девіацією, що лежить всередині заданих меж як у

смузі пропускання, так і в смузі не пропускання. Така характеристика відома як характеристика еліптичного типу, тому що аналітично вона виражається через еліптичні функції Якобі.

Якщо $\omega_p \rightarrow 0$ і $A' \rightarrow A$, то це відповідає наближенню до максимально плаского рішення поблизу початку координат. Ця апроксимація з нульовою шириною смуги загородження називається максимально пласкою характеристикою в смузі пропускання, тому що тут припускається, що максимальна кількість похідних від $|S(j\omega)|^2$ прирівнюється нулю при $\omega = 0$.

Характеристика, оптимально рівно хвильова в смузі пропускання, називається оберненою чебишевською характеристикою. Якщо необхідна максимально плоска характеристика в смузі загородження і збереження рівнохвильового характеру характеристики в смузі пропускання, то необхідно застосовувати чебишевську характеристику. Для апроксимації з нульовою шириною смужки в обох областях, тобто для характеристики, максимально пласкої як у смузі пропускання, так і в смузі не пропускання, маємо максимально пласке рішення [59, 60]. У вищевказаних роботах отримані передавальні характеристики для цих чотирьох випадках без розгляду будь-яких конкретних видів реалізації – для максимально пласкої характеристики, чебишевської характеристики, оберненої чебишевської характеристики і еліптичної характеристики.

Питання апроксимації характеристик і синтез схем аналогових фільтрів були розглянуті в роботі [61]. Фільтри реалізуються за допомогою апроксимуючих функцій, що однаково можуть бути застосованими до фільтрів із зосередженими і розподіленими параметрами і до хвильових фільтрів. Також наведений розв'язок для частотно-вибіркових фільтрів. Це створює основу для розвитку суміжних проблем, таких як широкосмугове узгодження, спрямована фільтрація і т. ін., а також для розуміння підходу, який може бути використаний для чисельних рішень задач щодо синтезу фільтрів з обмеженнями, що не дають можливості отримати аналітичний розв'язок.

Дещо інший метод синтезу фільтрів наведено в роботі [62], де розглядаються теорії електричних кіл, принципи і схеми реалізації аналогових фільтрів. Приділено увагу також і проектуванню аналогових фільтрів, і елементам синтезу, розглядаються задачі реалізації пасивних схем. Мостові схеми використовуються для реалізації всепропускаючих передавальних функцій. Досліджується задача знаходження відповідних передавальних функцій за відповідними апроксимаціями Баттерворта, Чебишева, Бесселя.

Недоліки теорій полягають у тому, що розглядаєми метод синтезу за вже відомими апроксимаціями Баттерворта, Чебишева і т.д. є досить неточним, трудомістким і застарілим на сьогодні. Труднощі з'являються в зв'язку з громіздким розрахунком передавальної функції при знаходженні коефіцієнтів у апроксимуючих поліномів. Велика завантаженість даного методу різними формулами для розрахунку передавальної функції вносить певну похибку в метод, що призводить до неточності даного методу. При реалізації фільтрів високих порядків виникають додаткові складності в розрахунку.

Пізніше багато уваги було приділено методам синтезу класичних фільтрів і реалізація їх на RLC-елементах, що викладено в роботах [63, 64]. Деякі автори стверджують, що задачу синтезу аналогових фільтрів можна розбити на два етапи: перший – знаходження передавальної функції фільтра, що реалізується, яка забезпечує задані вимоги до АЧХ (етап апроксимації); другий етап полягає у розробці структурної і принципової схеми фільтра. Другий етап складніший за перший і неоднозначний, оскільки одній і тій самій передавальній функції відповідає безліч структур фільтрів, що засновані на тих чи інших схемо технічних рішеннях і використовують різне елементні бази. В одній із цих робіт пропонується стандартний метод синтезу фільтрів (апроксимація за поліномами), до недоліків якого можна віднести невелику кількість прикладів проектування пасивних аналогових фільтрів, а також те, що в основному мова іде про активні схеми фільтрів.

У ряді робіт розглядаються етапи синтезу аналогових фільтрів з максимальною пласкою апроксимацією і чебишевською апроксимацією ідеальних

частотних характеристик. Схемотехнічна реалізація аналогових фільтрів нижніх і верхніх частот, а також смугових фільтрів, заснована на їх частотних характеристиках, наведена у роботах [65, 66, 67].

Проаналізувавши запропоновані методи синтезу фільтрів, можна зробити висновок, що загальноприйнятим способом апроксимації в даних роботах АФЧХ фільтрів є апроксимація поліномами Баттерворта, Чебишева, Кауера-Золотарьова і Бесселя відповідно порядку. Основні недоліки такої апроксимації полягають у значній складності моделі і недостатній точності її відповідності оригіналу. Даній проблемі присвячено досить велику кількість робіт, проте достатньо задовольняючих результатів не досягнуто і на даний момент часу.

Серед відносно нових книг, присвячених радіоелектронним пристроям, необхідно відмітити роботу [68], в якій пропонується розділити метод синтезу аналогових фільтрів на дві частини. На першому етапі обирають деяку ідеалізовану функцію, яка достатньо точно описує частотний коефіцієнт передачі за потужністю. Етап включає в себе також апроксимацію вибраної ідеальної частотної характеристики такої функції, яка може належати фільтру, що можливо фізично реалізувати (апроксимація за многочленами Баттерворта, Чебишева). Другий етап синтезу полягає у практичній реалізації фільтра, що має отриману частотну характеристику. В якості основи реалізації схеми фільтра служить його передавальна функція. Запропоновані схемні рішення фільтрів, що відповідають певним передавальним функціям, які також наведені у роботі. Даний метод синтезу має недостатньо високу точність і може бути застосований для фільтрів невисокого порядку.

Крім вищерозглянутого поліноміального синтезу, можна виділити два основні підходи до синтезу фільтрів: синтез фільтрів з використанням методу характеристичних параметрів [69] і синтез фільтрів за робочими параметрами. Класичні методи синтезу фільтрів за робочими параметрами одержали подальший розвиток у вигляді синтезу фільтрів з використанням фільтрів-прототипів нижніх частот [70]. Синтез фільтрів за робочими параметрами передбачає знаходження структури кола та його параметрів за заданою частотною характеристикою. При

цьому теоретично такого результату можна досягти за рахунок використання одного варіанту зі значної кількості можливих еквівалентних схем. Проте важливою умовою при синтезі пристроїв є необхідність мінімізації кількості елементів, що призводить до використання канонічних форм Фостера і Кауера [71]. Додатковою задачею є передавання корисного сигналу без втрат та з мінімальним фазовим зсувом, тобто синтез мінімально-фазових фільтрів, що мають однозначну залежність між АЧХ та ФЧХ. Такий метод синтезу є складним, має неоднозначний процес рішення [72], тому розробниками частіше використовується метод синтезу на основі фільтрів-прототипів нижніх частот, що вже згадувався вище. Цей метод дозволяє синтезувати всі інші типи фільтрів: ФВЧ, СПФ та СЗФ. Дуже часто можливий коректний перехід від фільтра-прототипу до цілих класів фільтрів з розподіленими параметрами, при цьому перехід здійснюється за допомогою найпростіших формул, в результаті чого метод є дуже розповсюдженим при інженерному проектуванні [73]. Однак метод синтезу на основі фільтрів-прототипів НЧ не може бути використаним у випадку, коли АЧХ має нестандартний вид, для якого відсутні однозначні співвідношення з фільтром-прототипом, або при використанні топологічних елементів, заступні схеми яких не можуть бути коректно пов'язаними з фільтрами-прототипами.

Мікросмужкові фільтри реалізуються з використанням різних топологічних елементів, основними з яких є відрізок одиночної МСЛ, відрізок зв'язаних МСЛ, неоднорідності МСЛ у виді поворотів, щілин, зазорів, відгалужень, зміни ширини лінії (ступінчатої або плавної). Кожен із цих елементів може бути вважати зосередженим. Синтез фільтра за заданими частотними характеристиками передбачає отримання топологічного рішення у виді об'єднання певних елементів на мікросмужкових лініях з вищеперахованих, а також введених умов короткого замикання або холостого ходу.

Традиційно певні послідовності топологічних елементів відповідають певним схемам заміщення. Так, зазор у МСЛ, що є базовими елементом при проектуванні ФНЧ та СПФ, найчастіше представляється у виді ємності [74].

Ступінчатий перехід – стрибкоподібну зміну ширини МСЛ – представляють у виді послідовної індуктивності або паралельної ємності [75]. Такі елементи топології використовуються як трансформатори опору для узгодження двох ліній передачі, тому відносно часто використовуються при синтезі фільтрів різних типів. Якщо кількість сходинок не перевищує чотирьох, для синтезу ступінчатого переходу може застосовуватись метод невизначених коефіцієнтів, при якому розраховуються хвильові опори сходинок. Іншим методом синтезу можна виконати розрахунок переходів з довільною кількістю сходинок за робочими параметрами.

Певним ускладненням ступінчатих переходів є плавний перехід – монотонна зміна ширини мікросмушкової лінії [76], розрахунок яких заснований на розв'язку телеграфних рівнянь, коефіцієнти яких залежать від просторових координати. Перевагою плавного переходу, описаного інтегралом Фур'є, у порівнянні зі східчастим, що описується тригонометричним поліномом, є розмежованість смуг пропускання і загородження, які у східчастого переходу чергуються.

В подальшому вивчення плавних переходів призвело до розвитку теорій нерегулярних ліній [77, 78, 79]. Було виявлено принципову можливість використання відрізків НЛП для проєктування фільтрів НВЧ. Однак на сьогодні методи синтезу мікросмушкових фільтрів на основі нерегулярних ліній розвинені недостатньо для того, щоб їх можна було застосувати в САПР.

Синтез фільтрів за заданими частотними характеристиками в одних випадках припускає єдине рішення, в інших дає можливість вибору користувачем топологічної реалізації серед декількох варіантів. Фільтри НВЧ реалізуються на різноманітних резонаторних структурах, які в певному наближенні можуть бути розраховані за вищезгаданими класичними методами синтезу з подальшим уточненням результатів обраними методами аналізу топології та оптимізацію конструкції фільтра, що пов'язано зі значними часовими витратами.

Таким чином, питання синтезу фільтрів методами, що не висувають значних вимог до апаратного забезпечення та можуть розраховувати фільтри, для яких

відсутні точні розрахункові моделі, є актуальним. Ґрунтуючись на можливостях сучасних технологій виготовлення та методів синтезу, необхідно вибрати такі рішення мікросмужкових фільтрів, що дозволяють отримати необхідні частотні характеристики, припустимі геометричні розміри топологічного рисунку та плати в цілому.

На підставі обраних конструкцій мікросмужкових фільтрів необхідно розробити методики проєктування фільтрів, що підвищують точність розрахунку топології та вихідних характеристик. При цьому запропоновані методики мають бути невимогливими до обчислювальних ресурсів за рахунок використання аналітичних співвідношень, часткового застосування квазістатичного аналізу і розпаралелювання обчислень для зменшення часу, що витрачається на проведення розрахунків.

2.3 Методи розв'язку електродинамічних задач для мікросмужкових структур

Універсальний апарат рівнянь Максвелла дозволяє на електродинамічному та квазістатичному рівнях розв'язувати задачі аналізу та синтезу мікросмужкових ліній та пристроїв на їх основі. При цьому необхідно при виборі методів моделювання виходити із міркування забезпечення розв'язку задачі з достатнім ступенем точності і з допустимими витратами часу, що, в свою чергу, забезпечить ефективну реалізацію методів аналізу, параметричної оптимізації і ймовірнісного моделювання складних систем НВЧ. Можна виділити три основні підходи, що використовуються для рішення внутрішніх задач електродинаміки: квазістатичний, електродинамічний та чисельний.

Перші теоретичні роботи з дослідження смужкових структур і неоднорідностей на їх основі використовували квазістатичні підходи, які є досить адекватними реальним об'єктам, особливо в довгохвильових діапазонах, коли виконуються умови $\lambda > 8h\sqrt{\varepsilon}$; $\lambda > 4w\sqrt{\varepsilon}$ (λ - довжина хвилі у лінії; h - товщина підкладки; w - ширина провідника; ε - відносна діелектрична проникність), крім

того, мають виконуватися ще дві умови, а саме $h \ll \lambda$, $w \ll \lambda$. Тільки в цьому випадку можна вважати, що струми протікають вздовж смужок, і практично відсутні компоненти полів, направлені вздовж смужок. При цьому розв'язуються рівняння Пуассона для потенціальної функції або для функції Гріна з урахуванням граничних умов. Для виключення диференційних операцій за однією з координат використовується перетворення Фур'є, а також вводиться пробна функція розподілення щільності зарядів по смужковому провіднику з наступним її уточненням виходячи із принципу мінімізації функціоналу для погонної ємності мікросмужкової структури. Інший підхід базується на використанні інтегрального рівняння:

$$\iint_{\Omega} \rho_s(x', y') G(x, y/x', y') dx' dy' = \Phi(x, y)$$

де $\rho_s(x', y')$ - поверхнева щільність зарядів; $G(x, y/x', y')$ - функція Гріна;

Ω - периметр поперечного перерізу провідника;

$\Phi(x, y)$ - потенціальна функція.

Функція Гріна визначається методом дзеркальних відображень. Для наближеного розв'язку інтегрального рівняння периметр поперечного перерізу розбивається на N частин. Припускається, що на кожній частковій смужці щільність заряду ρ_{sk} є сталою. Тоді інтегральне рівняння зводиться до системи N лінійних неоднорідних рівнянь для щільностей зарядів ρ_{sk} на частковій смужці Ω_k :

$$\sum_{k=1}^N \rho_{sk} \iint_{\Omega} G(x, y/x', y') dx' dy' = \Phi(x, y), \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Ця система рівнянь розв'язується чисельними методами. Метод багатократних дзеркальних відображень заснований на побудові в однорідному просторі множини додаткових фіктивних зарядів-зображень, величини і розташування яких підбираються таким чином, щоб виконувались граничні умови для потенціалу на межах розподілу середовищ структури, що моделюється.

Складення функції Гріна цим методом здійснюється на основі геометричних побудов, що обмежує його застосування аналізом найпростіших структур.

Ряд робіт з квазістатичного моделювання мікросмужкових структур заснований на використанні метода конформних перетворень, який дозволяє отримати компактні і цілком прийнятні для практики співвідношення. В той же час, застосування строгих підходів є необхідним, тому що вони є єдиними прийнятними в так званій резонансній області частот і розмірів, в якій неприйнятні ні квазістатичні, ні асимптотичні методи. Часто тільки строгі методи дозволяють пояснити складні фізичні процеси та явища і отримати фундаментальні математичні результати.

Мікросмужкову лінію можна представити у виді сполучення елементарних комірок. Об'єднання комірок еквівалентне розміщенню в відповідних перерізах електричних або магнітних стінок в залежності від типу розглянутої хвилі. Таким чином, граничні умови визначається конфігурацією або конструктивним типом смужкової структури. Зазвичай умови, що накладаються на при розв'язку електродинамічної задачі, зводяться до наступних: провідники нульової товщини мають ідеальну провідність; абсолютні проникності середовищ, між якими вони розміщені, рівні ϵ_{ai} , μ_{ai} ($i=1,2,3\dots$); закон зміни складових електромагнітних полів власних хвиль від часу t і поздовжньої координати z пропонується у формі $\exp[j(\omega t - \beta z)]$ (де β - фазова стала власного середовища, яка підлягає визначенню; ω - кругова частота; j - уявна одиниця). Тоді рішення задачі можна звести до інтегрування рівняння Гельмгольца для кожної із часткових областей, що входять до комірки, яка розглядається. Поля власних хвиль мають задовольняти граничним умовам: дотична складова вектора напруженості електричного поля $E_\tau = 0$ на електричних стінках; дотична складова вектора напруженості магнітного поля $H_\tau = 0$ на магнітних стінках; умовам безперервності дотичних на межах розподілу середовищ; умовам Мейкснера на ребрах смужкового провідника. При розв'язку рівняння Гельмгольца методом часткових областей результат представляється у вигляді нескінченної системи рівнянь, у кожне із яких входять подвійні ряди з повільною сходимістю. Висока ступінь наближення до строгого

розв'язку досягається при дуже великій кількості рівнянь і членів у подвійних рядах, що призводить до значних обчислювальних труднощів з точки зору витрат часу. Тому часто знаходять застосування альтернативні методи, такі як метод Шварца [10]. Замість нескінченної системи рівнянь аналітичне рішення записується у вигляді подвійних рядів, що швидко сходяться. При цьому зазвичай вдається підсумувати один із рядів і звести рішення до одного ряду, окремі частини якого також піддається додаванню. В результаті розв'язок представляється у виді простих і компактних формул, зручних для програмної реалізації. Ідея метода Шварца полягає у наступному. В перерізі смужкової структури виділять дві підобласті, що частково перекривають одна одну і утворюють деяку загальну область. Потім розв'язується задача для одної із підобластей. Для неї зазвичай відомі граничні умови, за виключенням тієї ділянки контуру підобласті, який одночасно є межею загальної частини. На цій ділянці граничні умови задаються довільно. Далі розв'язується задача для другої підобласті. Оскільки частина контуру другої підобласті належить до першої підобласті, граничні умови для цієї частини задаються із розв'язку задачі, отриманого в першій підобласті. Таким чином знаходиться розв'язок у першому наближенні. Потім знову розв'язується задача для першої підобласті, причому граничні умови на ділянці контуру, що входить до першої підобласті, визначаються із попереднього розв'язку для другої підобласті. Процес повторюється до тих пір, поки наступне наближення не повторить попереднє у межах заданої точності. Послідовності отриманих наближень сходяться до граничних функцій, що розв'язують поставлену задачу для суми двох підобластей.

Для задач аналізу неоднорідності мікросмужкової лінії часто використовується метод Олінера. Основна ідея цього методу полягає у заміні смужкової структури еквівалентною хвиле водною структурою, для якої розв'язок граничної задачі або уже відомий, або його легко отримати. Таким чином створюється набір елементарних смужкових структур та їх моделей, з яких

розробник може побудувати складний пристрій, аналіз якого ведеться уже не електродинамічними методами, а більш простими методами теорії кіл НВЧ.

2.4 Математичний опис фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою

2.4.1 Фільтри першого і другого порядків

До фільтрів першого і другого порядків відносять фільтри, у яких порядок полінома знаменника передавальної функції дорівнює одиниці або двом.

Фільтри зі складними передавальними функціями можна представити як сукупність більш простих фільтрів першого і другого порядків шляхом їх розбиття (декомпозиції) на типові складові. Тому вивчення поведінки фільтрів першого і другого порядків дозволяє спростити аналіз поведінки складних систем.

При розробці пристроїв автоматики також доцільно розбиття математичної моделі на типові складові для спрощення реалізації системи.

Розглянемо основні способи з'єднання частотних фільтрів.

При послідовному з'єднанні n -го кількості фільтрів сумарна передавальна функція $K(p)$ буде визначається як твір передавальних функцій окремих фільтрів

$$K(p) = \prod_{i=1}^n K_i(p)$$

При паралельному з'єднанні n -го кількості фільтрів сумарна передавальна функція визначається як сума передавальних функцій окремих фільтрів У табл. 2.1 наведені найбільш поширені фільтри першого і другого порядку, а також ряд інших поширених частотно-залежних елементів. У табл. 2.1 наведено докладний математичний опис (передавальна функції, диференціальне рівняння, перехідна і вагова функції, АЧФ і ФЧФ) тільки для найбільш простих фільтрів. Для фільтрів другого порядку докладний опис розглянуто лише лише талько фільтра низьких частот другого порядку. Для інших фільтрів другого порядку наведена лише передавальна функція і вирази для амплітудно-частотної і фазово-частотної функцій.

У теорії автоматичного управління і теорії обробки сигналів з метою спрощення аналізу складних лінійних систем останні розбиваються на сукупність типових ланок (фільтрів) першого і другого порядку.

Таблиця 2.1 - Найбільш поширені фільтри першого і другого порядку

№	Найменування	Математичний опис
1	2	3
1	ФНЧ 1 порядку	$K(p) = \frac{k \cdot \alpha}{p + \alpha}, K(\omega) = \frac{k \cdot \alpha}{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}, F(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\omega}{\alpha}$ $g(t) = k\alpha e^{-\alpha t}, h(t) = k \cdot (1(t) - e^{-\alpha t}), \frac{dy(t)}{dt} + \alpha y(t) = k\alpha x(t)$
2	ФВЧ 1 порядку	$K(p) = \frac{k \cdot p}{p + \alpha}, K(\omega) = \frac{k \cdot \omega}{\sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}, F(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\alpha}$ $g(t) = k\delta(t) - k e^{-\alpha t}, h(t) = k \cdot e^{-\alpha t}, \frac{dy(t)}{dt} + \alpha y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$
3	ФНЧ 2 порядку	$K(p) = \frac{k\omega_2^2}{p^2 + 2\alpha p + \omega_2^2} = \frac{k\omega_2^2}{p^2 + \frac{\omega_2}{q} p + \omega_2^2}$ $K(\omega) = \frac{k \cdot \omega_2^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_2^2)^2 + 4\alpha^2 \cdot \omega^2}}, F(\omega) = \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot \alpha \cdot \omega}{\omega_2^2 - \omega^2} \right)$ $\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\alpha \frac{dy(t)}{dt} + \omega_2^2 = k\omega_2^2 x(t)$ $q < 0,5, p_1 = -\alpha_1, p_2 = -\alpha_2$ $K(p) = \frac{k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{(p + \alpha_1) \cdot (p + \alpha_2)}$ $g(t) = \frac{k\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), h(t) = k1(t) + \frac{k(\alpha_2 e^{-\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{-\alpha_2 t})}{\alpha_1 - \alpha_2}$ $q = 0,5, p_{1,2} = -\alpha$ $K(p) = \frac{k \cdot \alpha^2}{(p + \alpha)^2}, g(t) = k\alpha^2 t e^{-\alpha t}, h(t) = k1(t) + k(1 + \alpha t)e^{-\alpha t}$

Продовження табл. 2.1

1	2	3
		$0,5 < q < \infty, \quad p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_1, \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_2^2 - \alpha^2}$ $g(t) = k \frac{\omega_2^2}{\omega_1} e^{-\alpha t} \sin \omega_1 t$ $h(t) = k l(t) - \frac{k}{\omega_1 \omega_2} e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t + \arctg \frac{\omega_1}{\alpha})$ $q = \infty, \quad p_{1,2} = j\omega_2$ $K(p) = \frac{k \cdot \omega_2^2}{p^2 + \omega_2^2}, \quad g(t) = k \omega_2 \sin \omega_2 t, \quad h(t) = k(1 - \cos \omega_2 t)$
4	ФВЧ 2 порядку	$K(p) = \frac{k \cdot p^2}{p^2 + 2 \cdot \alpha \cdot p + \omega_2^2}, \quad K(\omega) = \frac{k \cdot \omega^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_2^2)^2 + 4\alpha^2 \cdot \omega^2}}$

Розглянемо інший підхід. В основу розбивки складних систем покладені не передавальний функцію, а вагову (імпульсну) функцію лінійної системи. Це дозволить використовувати певну спільність (дуалізм) в математичному описі сигналів і фільтрів як в тимчасовій, так і в частотній області.

Окремим випадком вагової (імпульсної) функції виду

$$g(t) = k_1 \delta(t) + k_2 e^{-\alpha_1 t} \cos(\omega_1 t - \varphi_1)$$

є вагові функції, відповідні інтегратору ($k_1 = 0$. $\alpha_1 = 0$. $\omega_1 = 0$. $\varphi_1 = 0$). підсилювача ($k_2 = 0$). фільтрам першого і другого порядків, наприклад, фільтру низьких частот першого ($k_1 = 0$. $\alpha_1 = 0$. $\varphi_1 = \pi/2$) та другого ($k_1 = 0$. $\varphi_1 := \pi/2$) порядків.

Таким чином, за допомогою однієї узагальненої вагової функції фільтра можуть бути описані всі фільтри першого і другого порядку. Інша перевага використання саме даної узагальненої функції при декомпозиції фільтрів пов'язано із спектральними уявленнями в координатах комплексної частоти.

Всі розглянуті фільтри відрізняються за математичним описом в часовій і частотній області. Як правило, найбільший інтерес приставляє опис фільтрів в частотній області. За частотним характеристикам ланок можна судити про їх динамічних властивостях і про роботу в сталих режимах роботи.

2.4.2 Частотні характеристики фільтрів

Розглянемо частотні характеристики найбільш поширених фільтрів першого і другого порядків. У амплітудно - частотній характеристиці будь-якого частотного фільтра можна виділити смугу пропускання (СП), смугу загородження (СЗ), перехідну область (ПО). Залежно від розташування на амплітудно - частотній характеристиці зазначених областей та їх кількості розрізняють фільтри низьких частот, фільтри високих частот, смугові фільтри, всепропускаючі фільтри і т.д.

Фільтром нижніх частот називають фільтр з смугою пропускання від 0 до певної частоти, званої частотою загородження. Розрізняють ідеальний і реальний фільтри низьких частот. На рис. 2.1 наведені амплітудно - частотні характеристики для ідеального фільтра (крива 1) і реальних фільтрів різного порядку (криві 2, 3, 4, 5), апроксимуючих ідеальну характеристику відповідно з деяким критерієм близькості.

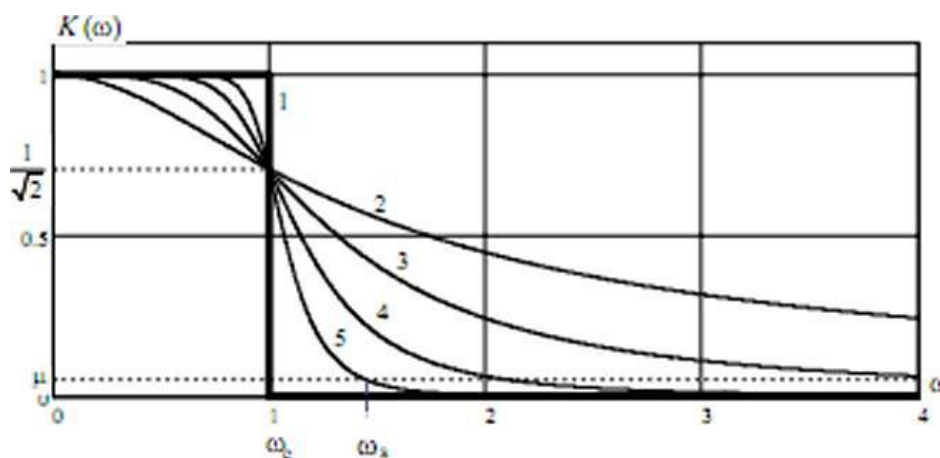


Рисунок 2.1 - Амплітудно- частотна характеристика ідеального і реальних фільтрів низьких частот

У амплітудно-частотній характеристиці ідеального ФНЧ можна виділити дві області: смуга пропускання (область частот від 0 до ω_3) і полога загородження (діапазон від ω_c до нескінченності), а для в АЧХ реального ФНЧ - три області: податку пропускання (від 0 до ω_c), смуга загородження (діапазон від ω_3 до, нескінченності), перехідна область (від ω_c до ω_3).

Частота ω_3 називається частотою загородження, а частота ω_c - частотою зрізу. У реальних фільтрах низьких частот частота зрізу визначається зазвичай як $1/\sqrt{2}$ від коефіцієнт посилення на нульовій частоті $K(0)$.

Для всіх фільтрів першого порядку по осі абсцис відкладено значення не частоти, а відношення частоти до параметру передавальної функції ω/a . Таким чином, побудована характеристика буде справедлива для всіх значень a . Частотні характеристики фільтрів 2 порядку істотно залежать від одного з параметрів передавальної функції фільтра - q , званого добротністю фільтра. Хоча більш правильно говорити не про добротності передавальної функції, а про добротності полінома знаменника другого порядку.

Значення добротності менше або рівне 0,5 відповідає значенню дійсних коренів полінома знаменника передавальної функції. АЧХ ФНЧ 2 порядку в цьому випадку багато в чому аналогічна характеристиці ФНЧ 1 порядку, так як є твором АЧХ двох характеристик фільтрів низьких частот першого порядку.

При добротності фільтра вище 0,5 (випадок комплексно-сполучених коренів) має місце максимум АЧХ на так званій резонансній частоті

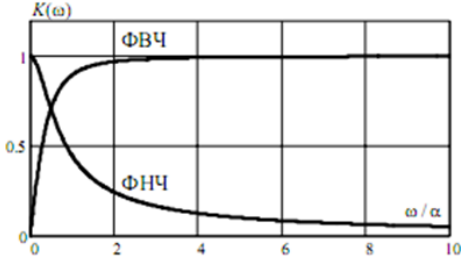
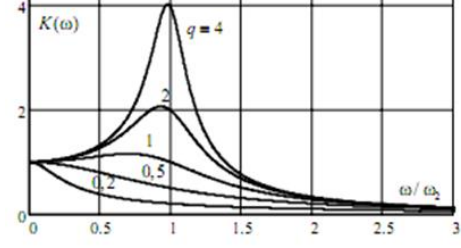
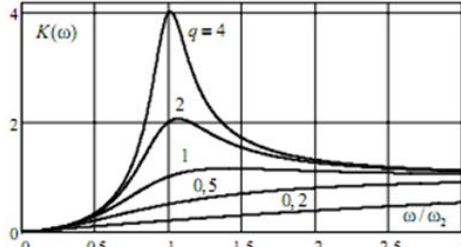
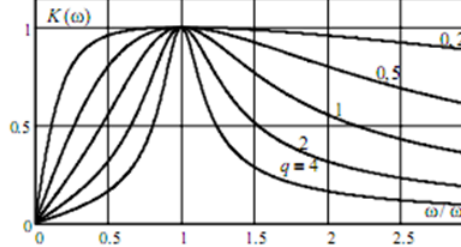
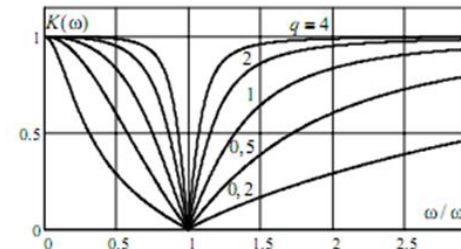
$$\omega_1 = \sqrt{\omega_2^2 - \alpha^2}.$$

З ростом добротності значення максимуму збільшується і в межі при q дорівнює нескінченності прагнуть до нескінченності. Принципова відмінність амплітудно- частотних характеристик фільтра низьких частот з нулем передачі на відміну від звичайного ФНЧ 2 порядку полягає в наявності так званого нуля передачі на частоті.

Передавальні функції (частотні характеристики) фільтрів низьких частот третього, четвертого і вищих порядків можна представити як сукупність передавальних функцій фільтрів низьких частот першого і другого порядків.

За аналогією з фільтром низьких частот розрізняють поняття «ідеального» фільтра верхніх частот (ФВЧ) і реального ФВЧ. Даний фільтр має смугу загородження в низькочастотній області, тобто «дзеркально» протилежний ФНЧ.

аблиця 2.2 - АЧХ фільтрів

№	Тип	АЧХ
1	ФНЧ, ФВЧ 1 порядку	
2	ФНЧ 2 порядку	
3	ФВЧ 2 порядку	
4	СПФ 2 порядку	
5	СЗФ 2 порядку	

Особливості частотних характеристик ФВЧ 2 порядку, також як і ФНЧ 2 порядку, при $q \geq 0,5$ пов'язані з наявністю так званих «викидів» АЧХ поблизу резонансної частоти.

3 СИНТЕЗ МІКРОСМУЖКОВИХ ФІЛЬТРІВ НА НЕРЕГУЛЯРНИХ ЛІНІЯХ

3.1 Побудова конструкції мікросмушкового фільтра на нерегулярних лініях в системі HFSS

Для побудови конструкції мікросмушкового фільтра на нерегулярних лініях, було вирішено використовувати систему електродинамічного моделювання і проєктування Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator).

Система проєктування HFSS використовується для визначення параметрів і моделювання електромагнітних кіл у складних пристроях НВЧ-діапазону за допомогою методів кінцевих елементів. Програмне забезпечення включає в себе модуль побудови тривимірних об'єктів, модуль розрахунку, яка включає декілька методів вирішення граничних задач і постпроцесорів для обробки і детального аналізу отриманих результатів [13].

Система HFSS містить велику базу даних матеріалів із визначеною діелектричною проникністю, магнітною проникністю, а також даними щодо електричних і магнітних тангенсів кутів втрат. Також система HFSS містить у своєму складі велику бібліотеку стандартних структур, що значно скорочує процес проєктування та моделювання складних об'єктів.

За допомогою системи проєктування HFSS можливо розрахувати:

- ближнє електромагнітне поле і поле дальньої зони;
- характеристичні імпеданси портів і сталі розповсюдження в регулярних лініях передачі, які підключені до портів;
- одномодові і багатомодові матриці розсіювання пристроїв.

HFSS включає в себе програму розрахунку власних хвиль хвилеведучих структур, і власних коливань НВЧ резонаторів Eigenmode. При використанні Eigenmode, HFSS розраховує резонансні частоти власних коливань і сталі розповсюдження власних хвиль структури на основі її геометрії, властивостей матеріалу і граничних властивостей. Система HFSS може отримувати рішення для фіксованої частоти і для ряду частот.

Перед початком розв'язання електродинамічних задач необхідно накреслити пристрій, що аналізується, визначити матеріали для кожного об'єкту, вказати порти і граничні умови на поверхнях. Потім система HFSS виконає розрахунок електромагнітне поле в усіх точках структури, що досліджується, і знайде по цим даним S-параметри й інші характеристики.

Першим кроком при проектуванні мікросмушкового фільтру на нерегулярних лініях в системі HFSS є створення проєкту і встановлення таких параметрів як: одиниці вимірювання проєкту і глобальні прив'язки.

Наступним кроком є побудова діелектричної підкладки фільтру використовуючи елемент Vox. За допомогою вікна властивостей підкладки задаємо її геометричні розміри і матеріал.

Для того, щоб провести електродинамічний аналіз фільтру, необхідно створити середовище, в якому він буде експлуатуватися. Для цього будується бокс повітря, який охоплює фільтр.

Після побудови діелектричної підкладки і боксу повітря, переходимо безпосередньо до побудови струмонесучої частини фільтру. Для цього необхідно обрати робочу площину, на якій будуть розташовані провідники.

Топологія мікросмушкового фільтру на нерегулярних лініях побудована на основі вихідних даних, які були описані вище.

Нерегулярними лініями слугують декілька видів синусоїд, які будуюмо через команду Draw Equation Based Curve, де вказуємо рівняння, яке має вигляд $A * (-\sin(3/(K+1) * (t))) * (1\text{mm}) + (5\text{mm})$. Наступним кроком є дзеркальне відображення отриманої лінії. Далі з'єднуємо обидві синусоїди з двох боків за допомогою прямих ліній (Draw Line), виділивши які, об'єднуємо командою Unite.

В системі Ansoft HFSS при моделюванні пристроїв НВЧ-діапазону на вході і на виході необхідно встановити порти. Їх можна визначити як відрізки хвильових ліній (WavePort), або як зосереджені порти (LumpedPort).

Хвильовий порт представляє собою поверхню, через яку сигнал вводиться або виводиться з геометричної структури. Перерізами портів служать вертикальні

площини, які включають частину підкладки, під мікросмушкової лінією, і вся площа корпусу, над мікросмушкової лінією. При вирішенні S-параметрів, передбачається, що структура збуджується хвилями тих типів), які зв'язані з цими перерізами. Збудження кожного хвильового порту індивідуальне.

Зосереджені порти подібні до традиційних хвильових портів, але можуть бути розташовані всередині моделі і мають комплексний імпеданс, який визначається користувачем. Зосереджені порти визначають S-параметри безпосередньо всередині порту.

При проектуванні фільтра на нерегулярних лініях були використані хвильові порти, оскільки отримані за допомогою їх результати більш точні.

Використовуючи елемент креслення Rectangle (прямокутник), навпроти ліній живлення намалюємо два прямокутники і позначимо їх як WavePort1 і WavePort2. За допомогою вікна властивостей порту зазначимо: хвильовий опір 50 Ом і кількість мод – 1.

Після того, як порти були встановлені, необхідно задати граничні умови фільтру. Для цього треба окреслити периметр спроектованої структури фільтру і зазначити його як ідеальний провідник Perfect E, що має нульові тангенціальні складові. Це здійснюється шляхом використання елементу креслення Rectangle.

Модель мікросмушкового фільтру на неоднорідних лініях, яка спроектована за допомогою системи Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.1.

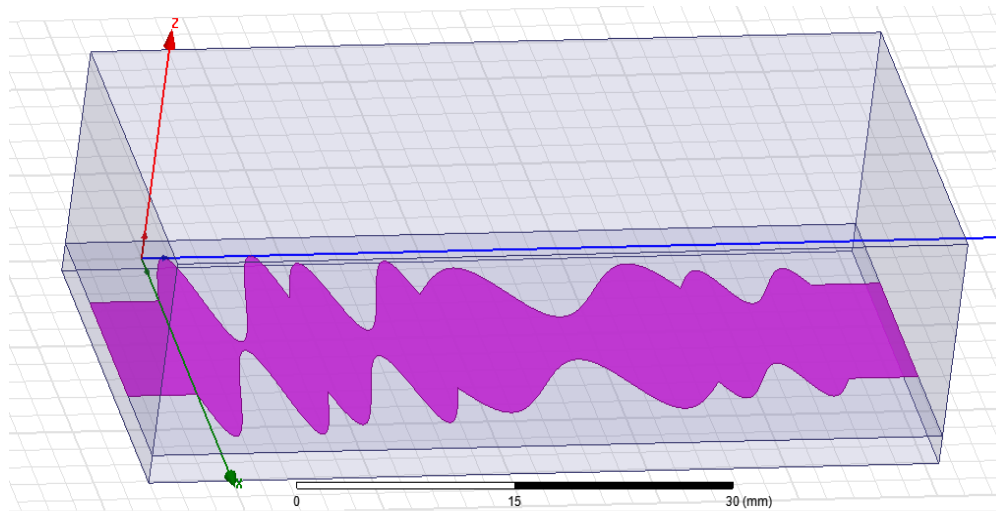


Рисунок 3.1 – Модель мікросмушкового фільтру на неоднорідних лініях, створена в системі Ansoft HFSS

Щоб визначити, яким чином система HFSS буде проводити розрахунок структури поля фільтру, необхідно визначити параметри вирішення задачі. При встановленні параметрів вирішення задачі, необхідно скористатись командою Add Solution Setup. За допомогою даної команди можливо встановити частоту, на якій виконується пошук рішення і максимальну кількість ітерацій.

Для того, щоб в установку параметрів включити розгортку за частотою, необхідно скористатись діалоговим вікном Edit Sweep, у якому необхідно вказати діапазон частот.

Перед тим, як розпочати розрахунки, потрібно обрати елементи матриці розсіювання. Для цього, за допомогою діалогового вікна Traces обираємо категорію S-параметрів S(P2,P1) і встановлюємо умову введення елементів матриці у децибелах.

Після того, як всі елементи матриці будуть встановлені, розпочинаємо розрахунок. АЧХ мікросмушкового фільтру, що створений в системі Ansoft HFSS, зображена на рис. 3.2.

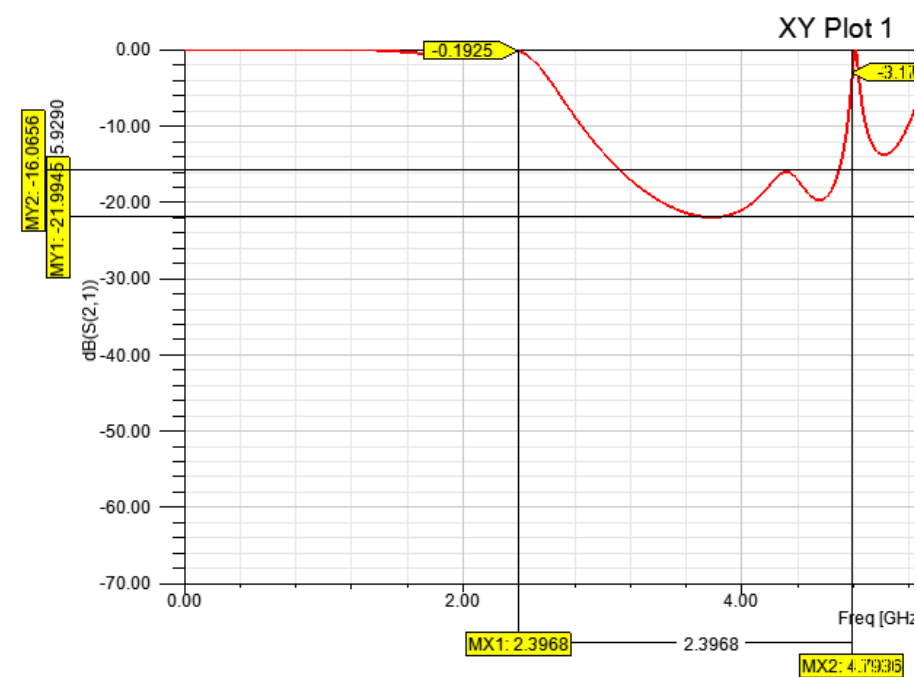


Рисунок 3.2 – АЧХ мікросмушкового фільтру на нерегулярних лініях в системі Ansoft HFSS

3.2 Оптимізація і параметризація конструкції мікросмушкового фільтру на нерегулярних лініях в системі HFSS

Програма Optimetrics, що входить до системи Ansoft HFSS, надає можливість визначити найкращий варіант топології, змінюючи геометричні розміри її елементів та параметри матеріалів.

Процес проектування починається зі створення початкової моделі, або номінальної конструкції, а потім задаються параметри конструкції, що змінюються. До цих параметрів може належати майже будь-який параметр, що має чисельне значення в HFSS. За допомогою HFSS можна виконати наступні типи досліджень номінального проєкту, при оптимізації конструкції [13]:

- Parametric (параметричний аналіз) – завдання одного або декількох змінних параметрів, що складають ряд значень в заданому діапазоні. HFSS виконує аналіз при кожній зміні параметрів;

- Optimization (оптимізація) – задається цільова функція і мета оптимізації. Optimetrics змінює значення параметрів проєкту поки задана мета не буде досягнута;

- Sensitivity (чутливість) – розрахунок чутливості характеристик до невеликої зміни заданих змінних;

- Tuning (налаштування) – змінні значення змінюються в інтерактивному (ручному) режимі, і для кожного положення конструкції, що налаштовується, розраховуються характеристики;

- Statistical (статистичне розподілення) – знаходження статистичного розподілення характеристик проєкту, що викликане випадковим розподіленням змінних.

Перед тим як перейти безпосередньо до процесу оптимізації, необхідно виконати параметричний аналіз. Для цього вводиться змінні A, K, які змінюються A(1-5) і відповідає за амплітуду синусоїди, K(3-60 з кроком 3) і відповідає за довжину фільтру і кількість хвиль на ділянці. В процесі аналізу виконується

розрахунок S-параметрів, таким чином визначається, як кожна зміна конструкції впливає на АЧХ вздовж частотної вісі.

Введення змінних проводиться наступним чином:

- у вікні редагування Properties замінюємо значення на A та K;
- у вікні Design Properties також визначається декілька змінних, які залежать від A та K;
- у програмі Optimetrics обираємо Parametric;
- у діалоговому вікні Setup Sweep Analysis обираємо змінну і встановлюємо діапазон значення;
- у вкладці Table отримуємо перелік всіх значень змінної, при яких буде вирішуватись задача, що дає змогу побачити варіації проекту і за необхідністю, вручну скорегувати величину змінної.

Далі необхідно є ввести нових змінних, які можна задати у вигляді частотної функції, або застосувати як змінну для того, щоб встановити цільову функцію. Ця функція може базуватися на основі будь-яких характеристик, наприклад значення поля, S-параметрів і власних чисел (резонансів).

Встановлення вихідної змінної проводиться у діалоговому вікні Output Variables наступним чином:

- у текстовому полі Name введемо довільне ім'я змінної «Power21»;
- зі списку Category обираємо S Parameter;
- зі списку Quantity обираємо S (WavePort2, WavePort1);
- зі списку Function обираємо модуль параметра: dB;
- за допомогою функції Insert Quantity Into Expression створюємо математичний вираз, що описує вихідну змінну;
- використовуючи функцію Edit Calculation Range встановлюємо частоту, на якій буде проводитись розрахунок вихідної змінної.

Установки, для вирішення параметричного аналізу перед оптимізацією, проведемо наступним чином:

- у діалоговому вікні Setup Optimization на вкладці General обираємо ParametricSetup1 зі списку Parametric Analysis;

– обираємо опцію *Solve the parametric sweep before optimization*; в цьому випадку програма виконає параметричний аналіз перед оптимізацією, а після оптимізації накреслить нову геометрію мікросмушкового фільтру з оптимальними параметрами;

– обираємо опцію *Update design parameter values after optimization* (підставлення величин параметрів після оптимізації).

За допомогою функції *Analyze* проводимо параметричний аналіз.

Після проведення параметричного аналізу переходимо безпосередньо до оптимізації мікросмушкового фільтру. Процес оптимізації проводиться у наступній послідовності:

- встановлення змінної у якості змінної оптимізації;
- вибір параметрів оптимізації;
- додавання цільової функції для встановлення оптимізації;
- виконання оптимізації.

Перед тим як запустити процес оптимізації, необхідно обрати змінну, яка буде змінюватись під час її проведення. Налаштування виконується у діалоговому вікні *Design Properties*. У вкладці *Local Variables*, обираємо *Optimization* і з переліку змінних обираємо змінну.

Встановлення оптимізації включає встановлення цільової функції, яка може містити одну або велику кількість цілей з урахуванням вагових коефіцієнтів кожної з цілей. Для цього, необхідно за допомогою програми *Optimetrics* у контекстному меню обрати *Optimization*. У діалоговому вікні, що з'явиться, у вкладці *Goal* необхідно обрати метод оптимізації.

Система *Ansoft HFSS* пропонує декілька методів оптимізації, пояснимо основні.

Sequential Nonlinear Programming (метод послідовного нелінійного програмування) – метод заснований на поліноміальній апроксимації. *SNLP* проводить оптимізацію у діапазоні неперервного простору, тобто не існують мінімального розміру кроку, і тому вказані в оптимізаторі змінні можуть приймати будь-яке значення у межах допустимих обмежень і точності

симулятору. Даний метод має прийнятну точність, захищає від шуму, або пригнічує його під час оптимізації.

Sequential Mixed Integer Nonlinear Programming (послідовне змішане цілочисельне нелінійне програмування) – цей метод побудований на основі методу SNLP, але має відмінність у тому, що змінні приймають лише дискретні значення.

Quasi Newton (метод Квазі-Ньютона) – даний метод розраховує градієнт цільової функції у процесі пошуку мінімуму цільової функції. Використовується у тих випадках, коли зміна значення цільової функції плавна і невелика.

Pattern Search (пошуковий метод) – оптимізатор реалізує симплекс-метод, який у процесі оптимізації використовує трикутники у двовимірному просторі або тетраедри у тривимірному просторі (симплекси). Використовується у тих випадках, коли нестабільність розрахунку, або чутливість у початковій точці цільової функції є істотною.

Genetic Algorithm (метод генетичного алгоритму) – це стохастичний метод оптимізації і пошуку, який базується на принципах генетики і використовується для розв'язання задач оптимізації за допомогою послідовного підбору, комбінування і зміни необхідних параметрів. При оптимізації з використанням генетичного алгоритму обробляються не показники параметрів самого завдання, а їх закодована форма. Також здійснюється пошук рішення у деякій популяції точок у визначеному діапазоні. Генетичний алгоритм використовує тільки цільову функцію і застосовує імовірнісні правила вибору [13].

В даному дипломному проєкті для оптимізації буде використовуватись метод генетичного алгоритму.

Після обрання методу оптимізації, необхідно задати значення цільової функції наступним чином:

- у діалоговому вікні Setup Optimization на вкладці Goal натискаємо Add. У таблиці Cost Function з'явиться новий рядок;
- в текстовому полі Calculation надрукуємо $\text{Power21} + 3$, це значить, що цільова функція буде розв'язуватись на рівні загасання -3дБ;

- у полі Calc. Range, за допомогою функції Edit Calc. Range, необхідно встановити частоту, на якій буде проводитись розрахунок цільової функції;
- у полі Condition треба встановити умову \geq (більше або дорівнює);
- в текстовому полі Goal встановимо значення 0 (нуль), або 1 (один), якому буде дорівнювати розв'язок цільової функції;
- на вкладці Variables обираємо змінну i у полі Starting Value встановлюємо її початкове значення, обираємо опцію Override - це вказує на те, що введене значення змінної буде використовуватись для початкового кроку оптимізації і відмінняє поточне значення змінної;
- встановлюємо мінімальне і максимальне значення, яке може приймати змінна.

Після встановлення всіх необхідних налаштувань переходимо до запуску процесу оптимізації. Для цього в дереві проєкту у розділі Optimetrics, обираємо установку Optimization Setup1 і натискаємо Analyze.

За допомогою функції View Analysis Results у вікні Post Analysis Display можливо спостерігати за зміною графіка залежності цільової функції відносно номера ітерації.

Після натискання Close, система HFSS змінить геометрію мікросмушкового шпилькового фільтра зі змінним кутом між ділянками зв'язаних ліній.

Отже, після проведення оптимізації було визначено, що для задоволення вихідних даних до дипломного проєкту необхідно розробити конструкцію фільтра на нерегулярних лініях, при якій глибина смуги загородження і її ширина буде більшою.

3.3 Можливості синтезу фільтрів на відрізках НЛП

Конструкція нерегулярної лінії передачі для запропонованого фільтру була створена на основі бази даних, яку ми отримали при дослідженні можливостей синтезу фільтрів на основі нерегулярних ліній. Деякі значення коефіцієнтів і характеристики, які ми отримали, приведені в Додатку А (табл. А.1, А.2).

Як видно з результатів аналізу, збільшення амплітуди синусоїди, і, відповідно, різниці між хвильовими опорами, призводить до збільшення крутизни амплітудно-частотної характеристики фільтра, побудованого з використанням базового елемента «відрізок синусоїдальної нерегулярної лінії».

Алгоритм синтезу фільтра на відрізку нерегулярної МСЛ залежить від таких особливостей топологічного рисунку, як:

- амплітуда та період синусоїди, що описує форму відрізка;
- кількість ліній;
- мінімальний та максимальний хвильові опори та їхня різниця;
- закон зміни хвильових опорів;
- загальні розміри структури.

На основі створеної бази даних, було розглянуто фільтр на НЛП на основі чотирьох базових елементів з різними середніми частотами в смузі загородження. Було вибрано елементи з табл. А.1 з номерами ітерацій 41, 31, 22, 11. Загальна довжина фільтра склала $15 \cdot \lambda$. Отримана структура представлена на рис. 3.3.

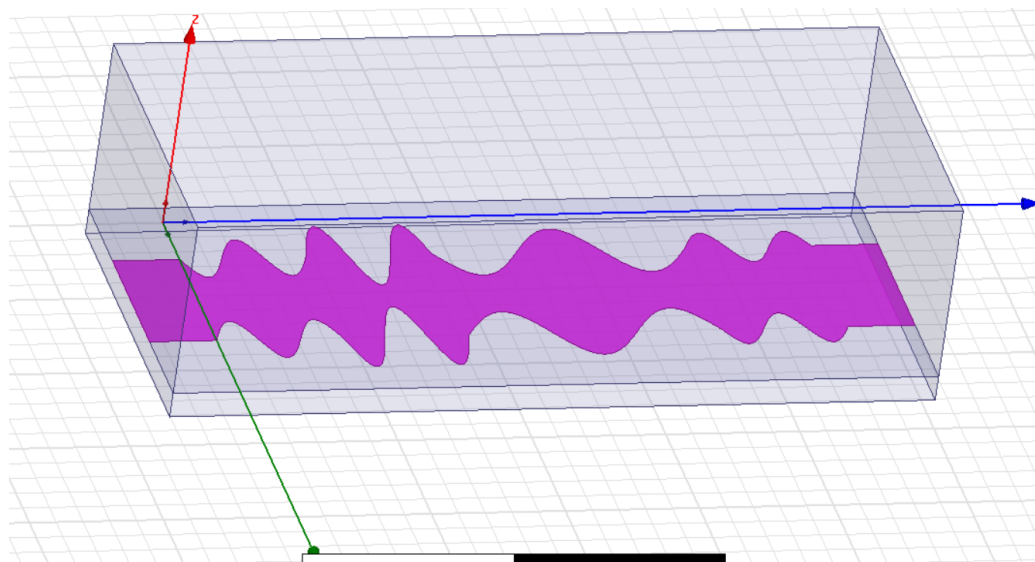


Рисунок 3.3 – Модель оптимізованого мікросмушкового фільтра на базі чотирьох неоднорідних ліній передачі

АЧХ модернізованого фільтру описана на рис. 3.4.

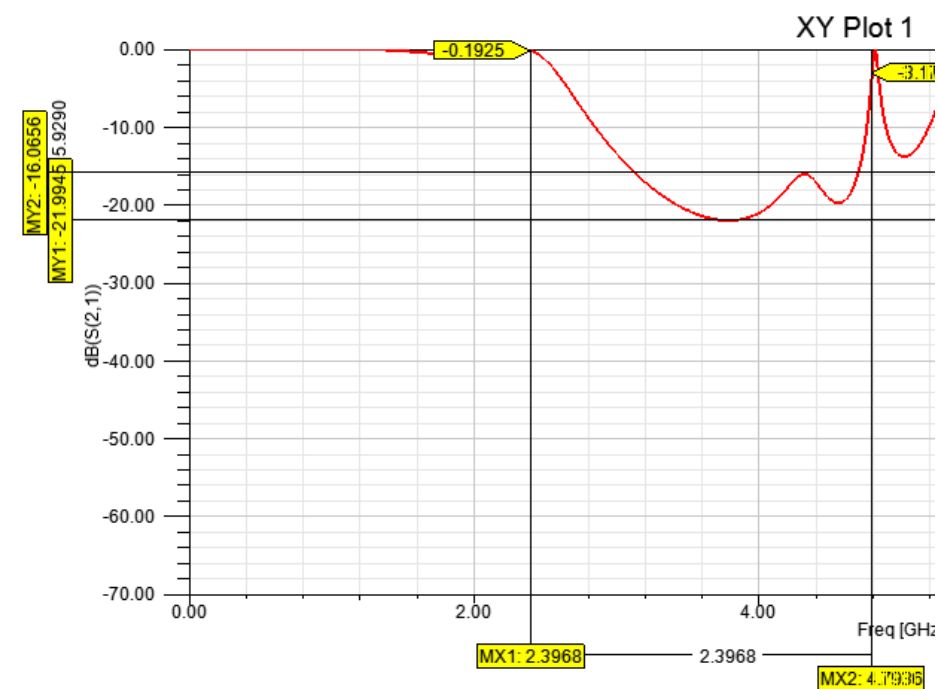


Рисунок 3.4 – АЧХ мікросмушкового фільтра на чотирьох відрізках нерегулярної лінії передачі

Довжина базового елементу визначає частотні властивості фільтра, побудованого з використанням базового елементу у вигляді відрізка нерегулярної лінії. Як видно з представлених результатів аналізу, збільшення довжини відрізка НЛП не завжди призводить до зменшення частоти зрізу (або центральної частоти – для СПФ), що характерно для фільтрів на відрізках зв'язаних мікросмушкових ліній. Це можна пояснити наступними причинами:

1) При зміні довжини регулярної структури (як, наприклад, відрізка зв'язаних ліній) її параметри однозначно змінюються, що призводить до зміщення робочої частоти фільтра. При зміні довжини нерегулярної структури (відрізка нерегулярної лінії) її параметри змінюються непрогнозовано.

2) У загальному випадку резонаторні структури можуть бути представлені як певна послідовність елементів (еквівалентна схема заміщення). При збільшенні розмірів топології відрізка нерегулярної лінії можуть бути змінені не лише параметри елементів схеми заміщення, але і сама еквівалентна схема

3) Для реалізації фільтруючих властивостей структура має бути узгоджена за хвильовими опорами в місцях зв'язку з лініями живлення окремих базових елементів і між собою. При зміні розмірів відрізка НЛП ця умова не завжди виконується, що призводить до значного погіршення частотних характеристик структури.

Було проведено параметризацію заданої структури, результати якої наведені в табл. А.3.

Результатом досліджень є виявлення можливості синтезувати фільтри за заданою частотною характеристикою та оптимізувати шляхом зміни коефіцієнтів передавальної функції.

Створена база даних містить інформацію про залежність розмірів окремих базових елементів від їх геометричних розмірів та можливість реалізації на їх основі фільтруючих структур.

Поєднання в топології одного фільтра декількох базових елементів з частотними характеристиками дозволяє синтезувати фільтри за заданими вимогами до АЧХ. Комбінація цих елементів топології на одній підкладці з урахуванням необхідності узгодження та відповідності хвильових опорів на межах об'єднання окремих частин дає можливість реалізувати фільтр з такими характеристиками.

Таким чином, нами створено базу даних, що містить у собі відомості про залежність амплітудно-частотної характеристики фільтрів від довжини базового елемента – відрізка нерегулярної лінії, та коефіцієнту, що визначає розкид хвильових опорів різних ділянок МСЛ. На основі цієї бази даних можливі синтез мікросмужкових фільтрів за рахунок вибору необхідної топології або комбінації декількох базових елементів на одній підкладці.

Додатковою перевагою топології мікросмужкового фільтра на відрізку нерегулярній лінії є те, що вона може виступати фазовим та / або амплітудним коректором.

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

4.1 Обґрунтування актуальності теми з позиції маркетингу

Розробка малогабаритних, надійних та якісних фільтрів представляє собою дуже важливу задачу. Майже кожен прилад НВЧ включає в себе електронний фільтр. Тенденція до мініатюризації апаратури та ускладнення її функцій, широке незгасаюче використання фільтрів в різних галузях життя сучасної людини роблять цю розробку актуальною та запитуваною на ринку електронних приладів.

Дослідження мікросмужкових фільтрів на основі нерегулярних ліній почалося досить нещодавно та носить інноваційний характер. Основна частина цих досліджень спрямована на вивченні саме фільтрів нижніх частот. У даній роботі була розглянута можливість проектування смугопропускаючого фільтру.

На даному етапі схожими дослідженнями розробок фільтрів займаються іноземні колеги з Америки, Франції та інших країн. Вони розглядають можливості синтезу фільтрів нижніх частот. У даній магістерській роботі приводяться можливості синтезу як фільтрів нижніх частот, так і смугопропускаючих, смугозагороджувальних та фільтрів верхніх частот.

Дані розробки носять військовий характер та усі дані засекречені.

Питанням дослідження фільтрів на нерегулярних лініях присвячено порівняно мало робіт. Загалом матеріал, викладений у навчальній літературі, носить загальний характер, а в різних статтях і публікаціях з даної тематики розглянуті більш вузькі питання проблеми. Однак, потрібний більш детальний облік сучасних умов при дослідженні проблематики зазначеної теми.

Актуальність цієї роботи обумовлена, з одного боку, досить великою зацікавленістю до теми в сучасній науці з боку державних підприємств радіотехнічного спрямування, з іншого боку, її недостатньою розробленістю та попитом на даний вид електронної апаратури.

4.2 Визначення трудомісткості та тривалості роботи

У науково-дослідницькій роботі проводиться розробка та електродинамічний аналіз конструкції мікросмушкових фільтрів з використанням нерегулярних ліній.

Основною умовою раціонального планування дослідження є скорочення термінів виконання при мінімальних витратах трудових, матеріальних і грошових ресурсів. Для цього вирішуються наступні питання: визначення трудомісткості і тривалості, витрат і ефективності дослідження.

Комплекс науково-дослідницьких робіт може бути розділений на етапи. Для кожного етапу необхідно вказати його найменування, трудомісткість, виконавців і тривалість робіт. У даній роботі беруть участь один молодший науковий співробітник і один старший науковий співробітник. Результати розподілу наведені в таблиці 4.1.

Через те, що важко встановити трудомісткість виконання робіт, у зв'язку з елементами незвичності, у процесі виконання більшості науково-дослідних робіт, використовується імовірнісний метод. При цьому використовують дві або три ймовірних оцінки часу. Ці оцінки є вихідними для розрахунку очікуваного часу виконання роботи за формулою (4.1):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (4.1)$$

де $t_{ож}$ - очікувана оптимальна оцінка часу виконання роботи, днів;

t_{min} - мінімально необхідний час на виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} - максимальні витрати часу на виконання роботи за несприятливих умов, днів.

Розраховані значення для кожного етапу занесені в табл. 4.1, де с.н.с. – старший науковий співробітник, м.н.с. – молодший науковий співробітник.

Таблиця 4.1 - Оцінка тривалості і трудомісткості етапів робіт

Етапи роботи	Тривалість, днів.	Розкид Р, днів	Виконавці		Часові оцінки, днів		
			Спеціальність	Кількість співробітників	t_{\min}	t_{\max}	t_{oc}
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Вивчення предметної області, обґрунтування необхідності дослідження	21	2,0	м.н.с.	1	18	25	21
2. Виконання наукових теоретичних розробок	17	1,0	с.н.с.	1	15	20	17
3. Побудова моделі фільтру на нерегулярній лінії в програмі HFSS	13	0,6	с.н.с.	1	12	15	13
4. Розрахунок параметрів моделі фільтра, побудова АЧХ	27	1,0	м.н.с.	1	25	30	27
5. Аналіз отриманих даних, корегування моделі	6	0,4	с.н.с., м.н.с.	2	5	7	6
6. Оптимізація моделі фільтра в програмі HFSS Ansoft, побудова АЧХ	11	0,4	с.н.с.	1	10	12	11
7. Узагальнення результатів дослідження	2	0,0	с.н.с.	1	2	2	2
8. Аналіз перспектив використання на основі отриманих даних	2		м.н.с.	1			
Разом	99	-	-	-	87	111	97

Ступінь правильності визначення перевіряється розрахунком дисперсії - розкиду між мінімальною і максимальною оцінками часу, що визначається за формулою (4.2):

$$\sigma = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{5} \quad (4.2)$$

Дана магістерська робота повинна виконуватися поетапно, в лінійній послідовності, так як без отримання необхідних результатів досліджень не можна виконати наступний пункт. Використовуючи дані табл. 4.1, будемо лінійний календарний графік (рис. 4.1) .

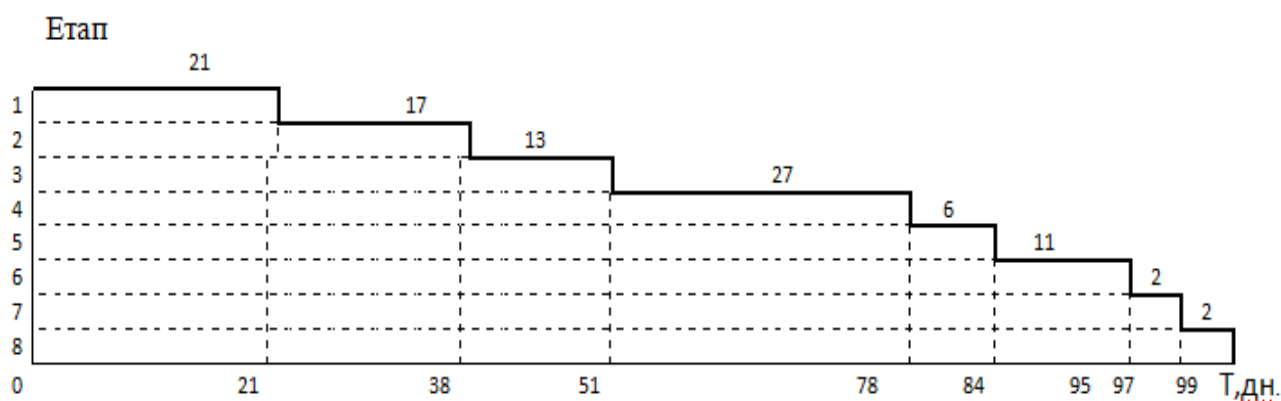


Рисунок 4.1 - Лінійний календарний графік

4.3 Розрахунок кошторису витрат на реалізацію проєкту

До складу витрат на реалізацію проєкту враховується вартість всіх ресурсів, необхідних для проведення комплексу робіт.

Але в даному випадку розрахунок багатьох із статей ускладнений через невизначеність, яка виражається в тому, що попередньо невідомо необхідну кількість деяких матеріалів, деталей, послуг, а також величини витрат. Тому використовуємо методика збільшених розрахунків, яка передбачає первинний розрахунок заробітної основної плати, а після цього - процентних частин інших

статей. Статті, витрати по яких можуть бути розраховані більш точно, розраховуються за звичайною методикою.

З метою визначення витрат на реалізацію проєкту слід скласти кошторис витрат (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Кошторис витрат на реалізацію проєкту

Статті витрат	Умовне позначення	Сума	
		грн	частка, %
Матеріали, покупні вироби і напівфабрикати	М	324,00	0,21
Спеціальне обладнання для реалізації проєкту	СО	89000,00	57,82
Амортизація	А	12000,00	7,80
Основна і додаткова заробітна плата виробничого персоналу	ЗП	29050,17	18,87
Відрахування на соціальне страхування (від суми основної і додаткової заробітної плати)	ВІДРАХ	6391,04	4,15
Загальновиробничі витрати	ЗВ	17166,00	11,15
Всього витрат на реалізацію проєкту	–	153931,21	100

4.3.1 Розрахунок вартості матеріалів

До статті витрат на матеріали включаються вартість основних і допоміжних матеріалів, необхідних для розробки проєкту. За період проведення науково-дослідних робіт співробітниками будуть використані наступні матеріали (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Використані матеріали

Найменування	Вартість, грн.	Кількість	Витрати, грн.
Папір, 1 пачка 200 аркушів	87,00	1	87,00
Диск DVD-R	15,00	10	150,00
Чорнило для заправлення картриджів HP PSC1410 Black, 100 мл	87,00	1	87,00
Усього	-	-	324,00

4.3.2 Спеціальне обладнання для реалізації проекту

У цій статті враховуються витрати на оренду, доставку і монтаж лабораторних установок, вимірювальних і регулювальних пристроїв, приладів, випробувальної апаратури тощо (табл. 4.4).

Балансова вартість обчислювальної техніки складає 12000 грн за один комп'ютер. Для проведення науково–дослідної роботи використовується 2 комп'ютера.

Таблиця 4.4 – Витрати на спеціальне обладнання

Оснащення	Вартість за одиницю, грн	Кількість, шт	Витрати, грн
Комп'ютер-моноблок Asus A6521DAK-BA013M	12000	2	24000
Програмне забезпечення HFSS	65000	1	65000
Всього			89000

Амортизаційні відрахування визначають за формулою (4.3):

$$A = \Phi_0 \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (4.3)$$

де Φ_0 - балансова вартість обчислювальної техніки, грн;

H_a - норма амортизаційних відрахувань на повне відновлення обчислювальної техніки, для ПК 50%. Щодо розрахунку витрат з амортизації, варто зазначити, що з 23.05.20 р. стартували зміни до пп. 14.1.138 Податкового кодексу, згідно з якими вартісний критерій для основних засобів змінено з 6000 грн на 20000 грн. Тож, ті матеріальні цінності, строк корисного використання яких – більше року, але вартість менша чи дорівнює 20000 грн, визнаються малоцінними необоротними матеріальними активами (далі – МНМА). Для них у пп. 138.3.3 ПК передбачено групу 11 «Малоцінні необоротні матеріальні активи», термін використання для яких не визначено. Отже, нарахування амортизації здійснюється за принципом 50/50 (при надходженні - 50% і 50% - при списанні) або ж 100% при надходженні.

Балансова вартість обчислювальної техніки становить 24000 грн.

Отримуємо:

$$A = 24000 \cdot 0,5 = 12000 \text{ грн.}$$

4.3.3 Розрахунок заробітної плати

Витрати на основну заробітну плату складаються з планового фонду заробітної плати всіх категорій працівників, зайнятих у розробці проєктованого пристрою. Розрахунок заробітної плати ведеться на основі відомостей про трудомісткість. Результати розрахунків зведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 - Розрахунок основної заробітної плати

Посада виконавця	Кількість людей	Місячний оклад, грн	Середньоденна заробітна плата, грн.	Кількість робочих днів	Сума зарплати, грн.
С.н.с.	1	6000	272,73	56	15272,88
М.н.с.	1	5000	227,27	49	11136,36
Усього		–	–	–	26409,24

Таблиця 4.6 - Основна і додаткова заробітна плата

Спеціальність виконавця	Додаткова заробітна плата, грн	Сума основної та додаткової заробітної плати, грн
С.н.с.	1527,29	16800,17
М.н.с.	1113,64	12250,00
Всього	1432,4	29050,17

4.3.4 Відрахування на соціальні заходи

Відрахування на єдиний соціальний внесок визначаються у розмірі 22 % від суми основної та додаткової заробітних плат.

Таким чином, відрахування на соціальне страхування становить:

$$\text{ВІДРАХ} = (\text{ЗП}_{\text{осн}} + \text{ЗП}_{\text{дод}}) \cdot 0,22, \quad (4.4)$$

де $\text{ЗП}_{\text{осн}}$ - основна заробітна плата, грн.;

$\text{ЗП}_{\text{дод}}$ - додаткова заробітна плата, грн.

$$\text{ВІДРАХ} = 29050,17 \cdot 0,22 = 6391,04 \text{ грн.}$$

4.3.5 Загальновиробничі витрати

До загальновиробничих витрат відносять витрати на загальне управління і загальногосподарські потреби (на заробітну плату апарату управління, канцелярські витрати та ін.), на утримання та експлуатацію будівель і споруд. Загальновиробничі витрати включаються у вартість проведення роботи непрямым шляхом - у відсотках від основної заробітної плати співробітників.

Загальновиробничі витрати складають 65% від основної заробітної плати співробітників, що в нашому випадку становить:

$$\text{ЗВ} = 26409,24 \cdot 0,65 = 17166 \text{ грн}$$

4.4 Бальна оцінка економічної ефективності науково-дослідної роботи

Наукові дослідження, прямий підрахунок економічної ефективності яких неможливий, оцінюють за допомогою бальної системи.

Бальна оцінка проводиться за такими показниками:

1) важливість розробки визначається з табл. 4.7:

Таблиця 4.7 - Шкала для оцінки важливості розробки K_1

№ п/п	Показник	Бали
1	Ініціативна робота, яка не є частиною комплексної програми або завданням відомчих органів	1
2	Робота, виконувана за договором про науково-технічну допомогу	3
3	Робота є частиною відомчої програми	5
4	Робота є частиною відомчої комплексної програми	7
5	Робота є частиною міжнародної комплексної програми	8

Обираємо $K_1 = 1$.

2) Можливість використання результатів розробки визначається за табл. 4.8.

Таблиця 4.8 - Шкала оцінки можливості використання результатів розробки K_2

№ п/п	Показник	Бали
1	У цьому підрозділі	1
2	У даній організації	3
3	У багатьох організаціях	5
4	У масштабах країни	8

Обираємо $K_2 = 5$.

3) Теоретична значимість і рівень новизни дослідження визначається за табл. 4.9.

Таблиця 4.9 - Шкала оцінки теоретичної значущості та рівня новизни дослідження K_3

№ п/п	Показник	Бали
1	Аналіз, узагальнення і класифікація відомої інформації. Подібні результати були відомі в досліджуваній області	2
2	Отримання нової інформації, яка доповнює знання про сутність досліджуваних процесів, не знаних в досліджуваній області	3
3	Отримання нової інформації, яка змінює уявлення про сутність досліджуваних процесів, невідомих раніше	5
4	Створення нових теорій, методик	6
5	Отримання інформації, яка сприяє формуванню напрямів, невідомих раніше	8

Обираємо $K_3 = 3$.

4) Складність розробки визначається за табл. 4.10.

Таблиця 4.10 - Шкала оцінки показників складності дослідження K_4

№ п/п	Показник	Бали
1	Робота виконується одним підрозділом, витрати менше 10000 грн	1
2	Робота виконується одним підрозділом, витрати 10000-50000 грн	3
3	Робота виконується одним підрозділом, витрати 50000-100000 грн	5
4	Робота виконується одним підрозділом, витрати 100000-500000 грн	7
5	Робота виконується кількома організаціями, витрати більше 500000 грн	8

Обираємо $K_4 = 5$.

Загальна оцінка встановлюється як добуток коефіцієнтів:

$$B = 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 5 = 75 \text{ балів}$$

Питомий ефект (ПЕ) на кожен бал - 2000 грн.

Загальний ефект (E) від розробки становить:

$$E = 20000 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (4.5)$$

$$E = 20000 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 5 = 150000 \text{ грн .}$$

Економічна ефективність науково-дослідної роботи визначається за допомогою коефіцієнта ефективності, який характеризує частину загального ефекту від розробки, який припадає на одну грн. Витрат (собівартості НДР):

$$K_e = \frac{E}{K_{\text{ндр}}} \quad (4.6)$$

$$K_e = 150000 / 153931,21 = 0,97$$

Термін окупності $T_{\text{ок}}$ проекту розраховується за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{K_e} \quad (4.7)$$

$$T_{\text{ок}} = 1 / 0,97 = 1,03 \text{ року}$$

4.5 Висновки

У даному розділі був проведений аналіз і обґрунтування економічної ефективності науково-дослідної роботи. Розраховано, що для проведення дослідження необхідно близько 99 днів. При цьому сумарні витрати на дослідження становлять 153931,21 грн, з них:

- спеціальне обладнання для реалізації проекту 89000,00 грн, що складає 57,82%;

- основна і додаткова заробітна плата виробничого персоналу - 29050,17 грн (18,87%);

- загальновиробничі витрати – 23678,32 грн (14,76%);

- амортизація – 12000 грн (7,80%);

- відрахування на соціальне страхування – 6391,04 грн (4,15%);

- матеріали, покупні вироби і напівфабрикати – 324,00 грн (0,21%).

Обґрунтованість ефективності дослідження підтверджується розрахованим коефіцієнтом економічної ефективності, який становить 1,01.

У м. Запоріжжя даний проект може бути реалізований на КП НПК «Іскра».

Розробка є досить конкурентоспроможною у плані вихідних характеристик, розмірів та використаних матеріалів і технології виготовлення.

Під час проведення розрахунків були розраховані витрати на реалізацію проекту. Розрахунок витрат та економічної ефективності показав, що розроблений проект окупиться за 12,5 місяців.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпек

При проєктуванні фільтрів надвисоких частот на основі комбінації відрізків нерегулярних ліній інженерами були використані комп'ютери, камери, які знаходяться в конструкторському бюро розміром 15 на 10 метрів. Під час роботи на інженерів постійно або періодично впливали такі небезпечні та шкідливі фактори:

- широкий спектр випромінювання від дисплея;
- невідповідність нормам параметрів мікроклімату;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- незадовільне освітлення робочих зон, внаслідок виходу з ладу або забрудненості освітлювальних приладів, що може призвести до погіршення зору або механічних травм;
- підвищена яскравість монітора (недостатня освітленість);
- - знижена контрастність;
- тривале перебування в тому ж положенні, і повторення тих самих рухів призводить до синдрому тривалих статичних навантажень (СТСН);
- невідповідність ергономічних характеристик обладнання нормованим величинам;
- забруднення повітря шкідливими речовинами і пилом;
- монотонність праці;
- небезпека виникнення пожежі.

Аналізуючи ризик потенційних небезпек, можна додати такі:

- недостатня професійна підготовка працівників, причина – низький рівень професійних знань та навичок та відсутність проведення усіх необхідних інструктажів з охорони праці, що може призвести до аварійних ситуацій;
- можливість ураження електричним струмом при виконанні частини дослідних робіт на робочій зоні, що може бути пов'язано з порушенням правил

електробезпеки, зокрема, відсутність захисного заземлення, частково оголені дроти, що можуть привести до електричних травм або летальних наслідків.

- нервово-психічні навантаження в наслідок специфіки виконуваних робіт, що призводить до захворювань загального характеру;
- механічне травмування в наслідок не раціонального розташування робочих місць;
- небезпеки, які пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях.

5.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Правила електробезпеки регламентуються правовими і технічними документами, нормативно-технічною базою. Знання основ електробезпеки обов'язково для персоналу, який обслуговує ЕОМ і електроустаткування.

Небезпека електричного струму на відміну від інших посилюється тим, що людина не в змозі без спеціальних пристроїв виявити напругу на відстані, а також швидкоплинністю ураження - небезпека з'ясовується тільки, коли людина вже вражена.

Для фахівців, які постійно мають відношення до використання і обслуговування ЕОМ, так і для працівників, які тільки їх використовують, встановлені п'ять кваліфікаційних груп з електробезпеки.

Згідно класифікації приміщень за ступенем безпеки ураження електричним струмом визначених у Правилах улаштування електроустановок, конструкторське бюро відноситься до категорії приміщень без підвищеної небезпеки, тому що відносна вологість повітря не перевищує 75%, температура не більше 27°C, відсутня хімічно агресивне середовище [80].

Виділяють три системи засобів і заходів забезпечення електробезпеки:

- система технічних засобів і заходів;
- система електрозахисних засобів;
- система організаційно-технічних заходів і засобів.

Технічні засоби і заходи з електробезпеки реалізуються в конструкції ЕОМ при їх розробці, виготовленні і монтажі відповідно до чинних нормативів.

За своїми функціями технічні засоби і заходи забезпечення електробезпеки поділяються на дві групи:

- технічні заходи і засоби забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи ЕОМ;
- технічні заходи і засоби забезпечення електробезпеки при аварійних режимах роботи ЕОМ.

Одним з найбільш небезпечних виробничих факторів при роботі з ПК, є електричний струм. Для попередження ураження електричним струмом проводяться організаційні та технічні заходи.

Заходи щодо забезпечення електробезпеки розроблено відповідно до ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [81].

Електрична мережа вмикається і вимикається за допомогою пускової апаратури (рубильником).

До роботи з блоком допускаються особи, які мають посвідчення на право роботи з електроустановками, що вивчили матеріальну частину блоку.

З метою підвищення рівня безпеки, в залежності від призначення, умов експлуатації і конструкції, в електроприладах застосовується одночасно більшість з перерахованих технічних засобів і заходів.

У відповідність з главою 1.7 ПУЕ «1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки» існують такі загальні вимоги до електроустановок:

- струмопровідні частини електроустановки не повинні бути доступними для випадкового прямого дотику до них, а доступні для дотику відкриті і сторонні провідні частини не повинні перебувати під напругою, що становить небезпеку ураження струмом, як у нормальному режимі роботи електроустановки, так і в разі пошкодження ізоляції;
- для запобігання ураження електричним струмом у нормальному режимі слід застосовувати окремо або в поєднанні такі заходи захисту від прямого дотику:
 - основну ізоляцію струмопровідних частин;

- огорожі та оболонки;
- бар'єри;
- розміщення поза зоною досяжності.

Для додаткового захисту від ураження електричним струмом в разі прямого дотику в електроустановках напругою до 1 кВ можна застосовувати пристрій захисного відключення (УЗО).

Дисплей комп'ютера здатний накопичувати статичний заряд. Небезпека зарядів статичного електрики виявляється у можливості виникнення електричних зарядів у просторі, впливі на обслуговуючий персонал та порушенні нормального ходу робочого процесу. Вплив статичної електрики на обслуговуючий персонал позначається у розрядах статичних зарядів через людину та вплив електростатичного поля. Безпосередньо струм розряду не є небезпечним, оскільки час його протікання через тіло людини малий (дорівнює декільком мілісекундам). Такі короткочасні імпульси можуть викликати електричні удари.

Основні організаційно-технічні заходи і засоби щодо попередження електротравм регламентуються ДСТУ Б В.2.5-82:2016 [81], за якими відповідальність за організацію безпечної експлуатації ЕОМ покладається на власника.

Згідно з чинними вимогами власник повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію ЕОМ (далі - відповідальний за електрогосподарство);
- створити і укомплектувати відповідно до потреб електротехнічну службу;
- розробити і затвердити посадові інструкції працівників;
- створити на підприємстві такі умови, щоб працівники, на яких покладено обов'язки з обслуговування ЕОМ відповідно до діючих вимог, своєчасно здійснювали їх огляд, профілактичні заходи.

Для зниження рівня статичної електрики передбачено екранування джерела статичної електрики (монітора) захисним екраном і заземлення екрану.

У електричних схемах передбачено пристрій, який централізовано відключає від джерела живлення все електричне обладнання. У конструкторському бюро всі мережеві розетки мають надписи зі значенням напруги і застережливий знак.

5.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці

До основних завдань ергономічної організації робочого місця згідно з ДСТУ ISO 13406-2:2006. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами з плоским екраном відносяться:

- визначення просторових параметрів робочого місця і його елементів, які відповідають антропометричним характеристикам контингенту працюючих;
- оптимальне розміщення елементів робочого місця відносно користувача на основі аналізу його діяльності [83].

Обладнання і організація робочого місця працюючих з ПК забезпечує відповідність конструкції всіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями [83].

При розміщенні обладнання витримуються необхідні проміжки між обладнанням, відстані від стін, які забезпечують свободу пересування людей, зручність виконання робіт і безпеку працюючих. Робочі місця операторів ПК, а так само ділянки підготовки технічних носіїв інформації розташовані в ряди. Розташування місць може бути дворядним, трирядним, чотирирядним, а також прямим і поперечним.

На організацію роботи впливає конструкція і параметри основного і допоміжного обладнання, які відповідають вимогам ергономіки: оптимальному розподілу функцій у системі людина – машина. Конструкція обладнання відповідає антропометричним і психофізіологічним даним організму працюючого. Витримані допустимі параметри санітарно-гігієнічних умов праці, а також безпеки експлуатаційного обладнання.

Конструкція робочого столу забезпечує оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання, враховуючи конструктивні особливості. Висота робочої поверхні столу регулюється в межах 680-800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу становить 725 мм. Модульними розмірами робочої поверхні столу для ПК слід вважати: ширину 800, 1000, 1200, 1400 мм, глибину 800 і 1000 мм, при нерегульованій його висоті, рівної 725 мм.

Робоче місце обладнане підставкою для ніг, яка має ширину не менше 300 мм, глибину не менше 400 мм, регулювання по висоті в межах до 150 мм і по куту нахилу опорної поверхні підставки до 20 град. Підставка має рифлену поверхню.

Конструкція робочого стільця (крісла) підтримує раціональну робочу позу при роботі з ПК, дозволяє змінювати позу з метою зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової області і спини для попередження стомлення. Робочий стілець (крісло) є підйомно – поворотним і регульованим по висоті і кутам нахилу сидіння і спинки, а також відстані від переднього краю сидіння.

Конструкція стільця повинна забезпечувати максимум результатів праці. Досягти цього можна, лише освоївши раціональні методи і прийоми праці на робочому місці. Тільки вони дозволяють виконати задану роботу якісно, у мінімальний термін і без зайвої напруги.

Специфіка роботи таких працівників полягає у великих зорових навантаженнях разом з маленькою активністю, монотонністю виконаних операцій, вимушеною робочою позою. Ці фактори негативно позначаються на самопочутті працюючого.

При організації робочого місця дуже важливим фактором є робоча поза працівника, тобто положення його корпусу, голови, рук і ніг по відношенню до знарядь праці. Якщо працівник працює сидячи, йому потрібно забезпечити правильну і зручну посадку, яка досягається пристроєм опори для спини, рук, ніг, правильною конструкцією сидіння, яке сприяє рівномірному розподілу маси тіла.

Усі матеріальні елементи робочого столу ділять на предмети постійного, тимчасового користування з урахуванням цього розташовують у видатного порядку на місцях постійного зберігання, що це економить трудові руху і сили працюючого.

Клавіатуру комп'ютера краще розташовувати на відстані 10-15 мм від краю столу, тоді зап'ястя рук будуть спиратися на стіл. Бажано придбати спеціальну підставку під зап'ястя, що, як стверджують медики, допоможе уникнути хвороби кистей.

Для ефективного використання маніпулятора типу «миша» застосовується спеціальний «килимоч» – планшет. Килимоч – планшет задовольняє основним критеріям: по-перше, добре тримається на поверхні столу, по-друге, матеріал верхньої поверхні планшета забезпечує вільне ковзання миші.

Введення текстової інформації з клавіатури полегшують підставки для документів. Вони можуть або кріпитися до монітора, або встановлюватися безпосередньо на столі. Багато підставки оснащені лінійками для виділення рядка.

Інструмент, обладнання та предмети праці знаходяться на відстані 560-750 мм на рівні рук працівника, оскільки їх використання не призводить до зайвих рухомим нахилам. Важливим елементом раціонального планування робочого місця є облік індивідуальних антропометричних психофізіологічних даних працюючого.

Робочі місця обладнані відповідними меблями та інвентарем, які відповідають найбільш комфортабельним умов роботи і вимог фізіології, психології та естетики [84].

Для нормальної експлуатації машин електронної та обчислювальної техніки і високопродуктивної праці робітників та інженерно-технічного персоналу в процесі проєктування пристрою передбачений наступний комплекс заходів:

- забезпечення оптимального мікроклімату;
- застосування оптимального освітлення;

- створення оптимальних умов праці на робочому місці;
- зниження психоемоційного і фізичного навантаження.

Оптимальні норми температури повітря в робочій зоні конструкторського бюро в холодний і перехідний періоди року при I категорії робіт (легкої) згідно ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень - 20 ... 23°C, відносна вологість - 60 ... 40%, швидкість руху повітря - 0.2 м/с. У теплий період року температура - 21 ... 24 °С, відносна вологість - 60 ... 40%, швидкість руху повітря - 0,2 м/с [85].

Для забезпечення вищевказаних параметрів передбачено застосування вентиляції - природної (аерації і провітрювання), механічної (загальнообмінної, місцевої припливної та витяжної), кондиціювання повітря.

У приміщенні застосована система кондиціювання згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», а також регулярно проводиться провітрювання. В приміщенні регулярно здійснюється вологе прибирання [86].

Для комфортної роботи співробітників кожне приміщення забезпечено елементами природного та штучного освітлення, відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Оскільки тривала робота за комп'ютером чи документами при поганому рівні освітленості може призвести до перенапруження органів зору [87].

Зазвичай використовують природне бокове одностороннє освітлення в день, а у ввечері – загальне рівномірне штучне освітлення. Робоче місце розміщене так, щоб природне світло було з лівого боку та уникати потрапляння прямого світла в очі. Також у працівників є можливість для корегування рівня природнього освітлення за допомогою жалюзі або штор. Оскільки яскраве світло в районі периферійного зору може збільшити навантаження на органи зору та призвести до швидкої втоми, освітлення є рівномірним, тобто ступінь освітленості приміщення та яскравість монітору комп'ютера повинні бути приблизно однаковими [9].

Коефіцієнт пульсації не перевищує 5 %. Рівень освітлення робочого столу в зоні розташування документів знаходиться в межах 300 – 500 лк. Освітлювальні прилади приміщення не повинні створювати відблисків на поверхні екрана, а освітлення екрана має не перевищувати 300 лк.

Правильно спроектоване та встановлене освітлення здатне покращити умови праці працівників, полегшити роботу органів зору, знизити втому, підвищити продуктивності та швидкості роботи, а недостатнє освітлення приміщення призводить до настання передчасної втоми, послабленню уваги та напруженню зору.

Підвищення рівню шуму погіршує умови праці та негативно впливає на організм людини. В результаті у робітників спостерігаються підвищений рівень стомленості, роздратованість, сильні головні болі, зниження концентрації уваги, нервово-психічне навантаження. Тривала дія інтенсивного шуму (вище 80 дБА) на слух людини призводить до його часткової або повної втрати [88].

Основними джерелами шуму на робочих місцях в конструкторських бюро є принтери, кондиціонери, системи вентиляції та комп'ютери, в яких джерелами шуму є вентилятори, що охолоджують систему. Рівень шуму та вібрацій на робочих місцях осіб, що працюють за персональним комп'ютером, визначають відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Для забезпечення дотримання допустимих рівнів шуму на робочих місцях застосовуються засоби звукопоглинання, вибір яких обґрунтовується спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

5.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

5.4.1 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з протипожежної безпеки для конструкторського бюро обладнаного ПК з ВДТ розроблені згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [90].

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщенні, обладнаному ПК з ВДТ:

- згідно ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [90] у приміщенні, обладнаному ПК з ВДТ можлива пожежа класу – А та Е;

- відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [91], воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [90] воно має II ступінь вогнестійкості.

У разі виникнення пожежі у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері. Відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Обладнання, силові та освітленні мережі приміщення, обладнаного ПК з ВДТ відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [80], та мають ступінь захисту ізоляції обладнання IP44 яка відповідає класу пожежанебезпечної зони П-Па до якої належить приміщення.

Для виявлення початкової стадії загоряння, швидкого й точного оповіщення служби пожежної охорони про час і місце виникнення пожежі встановлені системи автоматичної пожежної сигналізації (АПС). Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні обладнаному ПК з ВДТ встановлена система пожежної й охоронної сигналізації, яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика [88].

Оскільки приміщення що обладнане ПК з ВДТ має площу 150 м², тому відповідно до вимог п. 3.8 розділу «Типові норми належності вогнегасників»

ДСТУ 4297:2004 «Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги» [88] для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 8 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3,5 кг. і більше, на 20 м² площі приміщення). Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

Розрахуємо стаціонарну установку для гасіння пожежі вуглекислотою у виробничому приміщенні, якщо

- об'єм приміщення $W_{\text{п}} = 550 \text{ м}^3$;

- коефіцієнт $K_{\text{в}} = 1,5$, який враховує особливості процесу газообміну, витік вуглекислоти через нещільність та пройоми приміщення;

- довжина трубопроводу від установки до місця гасіння загорання $L = 80 \text{ м}$.

1. Необхідна маса вогнегасної газової суміші визначається за рівнянням:

$$G_{\Gamma} = G_{\text{в}} * W_{\text{п}} * K_{\text{в}} + G_0,$$

де $G_{\text{в}}$ – вогнегасна концентрація газового складу для вуглекислоти; $G_{\text{в}} = 0,7 \text{ кг/м}^3$;

G_0 - кількість вуглекислоти, що залишається в установці після закінчення її роботи; $G_0 = 0,2 * G_{\Gamma}$, кг:

$$G_{\Gamma} = G_{\text{в}} * W_{\text{п}} * K_{\text{в}} + 0,2 * G_{\Gamma}$$

$$0,8 G_{\Gamma} = G_{\text{в}} * W_{\text{п}} * K_{\text{в}}$$

$$G_{\Gamma} = (G_{\text{в}} * W_{\text{п}} * K_{\text{в}}) / 0,8 = (0,7 * 550 * 1,5) / 0,8 = 722 \text{ кг}.$$

2. Розрахуємо необхідну кількість робочих балонів $N_{\text{б}}$ із вуглекислотою в установці за рівнянням:

$$N_{\text{б}} = G_{\Gamma} / V_{\text{б}} * \rho * \alpha_{\text{н}}, \text{ шт.},$$

де $V_{\text{б}}$ – об'єм балону (л). Приймаємо $V_{\text{б}} = 25 \text{ л}$, при цьому в балоні міститься 15,6 кг вуглекислоти;

ρ - питома вага вуглекислоти, $\rho = 0,625 \text{ кг/л}$;

$\alpha_{\text{н}}$ - коефіцієнт наповнення, $\alpha_{\text{н}} = 0,85$.

$$N_{\text{б}} = 722 / (25 * 0,625 * 0,85) = 54,36 \approx 55 \text{ шт}.$$

3. Розрахуємо пропускну здатність трубопроводу.

$$F = 10^{-4} \sqrt{\frac{P \cdot \gamma}{2 \cdot A \cdot L}}; \text{ (кг/с);}$$

де P – питомий тиск вуглекислоти на початку трубопроводу (в балоні),
Н/м²,

$$P = 49 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$$

A – питомий опір трубопроводу при діаметрі труби 40 мм, ($A = 0,035$);

γ – щільність вуглекислоти на початку трубопроводу (в балоні), $\gamma = 2900$
кг/м³

$$F = 10^{-4} \sqrt{\frac{P \cdot \gamma}{2 \cdot A \cdot L}} = 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{4,9 \cdot 10^6 \cdot 2900}{2 \cdot 0,035 \cdot 80}} = 5,03 \text{ кг/с.}$$

Таким чином, необхідна маса вуглекислоти $G_r = 722$ кг, кількість робочих балонів $N_6 = 55$ штук, пропускна здатність трубопроводу $F = 5,03$ кг/с.

5.4.2 Заходи з цивільного захисту

Організація навчання працюючого та непрацюючого населення діям у надзвичайних ситуаціях.

Надзвичайна ситуація – порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат (Закон України «Про цивільну оборону»).

Порядок здійснення навчання населення діям у надзвичайних ситуаціях затверджено відповідною постановою Кабінету Міністрів України від 26 червня 2013 р. № 444. Цей Порядок визначає механізм організації навчання населення діям у надзвичайних ситуаціях (далі - навчання населення), його структуру, види та форми. Навчання населення здійснюється:

- за місцем роботи - працюючого населення;
- за місцем навчання - дітей дошкільного віку, учнів та студентів;
- за місцем проживання - непрацюючого населення.

Організація навчання населення покладається на працюючого та непрацюючого - на ДСНС, Раду міністрів Автономної Республіки Крим, місцеві державні адміністрації, органи місцевого самоврядування, а дітей дошкільного віку, учнів та студентів - на МОН.

Навчально-методичне забезпечення навчання населення здійснюється ДСНС разом з МОН. Навчання населення складається з:

- навчання безпосередньо на підприємствах, в установах та організаціях;
- навчання за межами підприємств, установ та організацій керівного складу і фахівців з питань цивільного захисту та пожежної безпеки;
- практичної підготовки під час проведення спеціальних об'єктових навчань і тренувань з питань цивільного захисту;
- навчання під час здобуття відповідного освітнього рівня у навчальних закладах системи освіти;
- самостійного вивчення інформації про дії в умовах надзвичайних ситуацій.

Навчання працюючого населення здійснюється безпосередньо на підприємстві, в установі та організації згідно з програмами підготовки працівників до дій у надзвичайних ситуаціях, а також під час проведення спеціальних об'єктових навчань і тренувань з питань цивільного захисту. Програми підготовки працівників до дій у надзвичайних ситуаціях розробляються і затверджуються підприємствами, установами, організаціями на підставі програм та організаційно-методичних вказівок з підготовки населення до дій у надзвичайних ситуаціях, що розробляються і затверджуються ДСНС, Радою міністрів Автономної Республіки Крим, місцевими державними адміністраціями, органами місцевого самоврядування. Програми навчання з питань пожежної безпеки погоджуються із ДСНС.

Програми підготовки працівників до дій у надзвичайних ситуаціях поділяються на:

- загальної підготовки працівників підприємств, установ та організацій;

- спеціальної підготовки працівників, що входять до складу спеціалізованих служб і формувань цивільного захисту;
- додаткової підготовки з техногенної безпеки працівників об'єктів підвищеної небезпеки;
- пожежно-технічного мінімуму для працівників, зайнятих на роботах з підвищеною пожежною небезпекою;
- прискореної підготовки працівників до дій в особливий період.

Підготовка працівників до дій у надзвичайних ситуаціях передбачає:

- за програмою загальної підготовки працівників підприємств, установ та організацій - вивчення інформації, що міститься у планах реагування на надзвичайні ситуації, про дії в умовах загрози і виникнення надзвичайної ситуації, а також оволодіння навичками надання першої допомоги потерпілим, користування засобами індивідуального і колективного захисту;

- за програмою спеціальної підготовки працівників, що входять до складу спеціалізованих служб і формувань цивільного захисту, - ознайомлення з обов'язками, навичками користування та матеріальною частиною техніки, приладів і табельного майна таких служб і формувань, засобами захисту, вивчення порядку приведення їх у готовність, проведення рятувальних та інших невідкладних робіт;

- за програмою додаткової підготовки з техногенної безпеки працівників об'єктів підвищеної небезпеки - поглиблення знань з питань техногенної безпеки, джерел небезпеки, що за певних обставин можуть спричинити виникнення надзвичайної ситуації на об'єкті підвищеної небезпеки, та небезпечних речовин, що виготовляються, переробляються, зберігаються чи транспортуються на його території;

- за програмою пожежно-технічного мінімуму для працівників, зайнятих на роботах з підвищеною пожежною небезпекою, - підвищення рівня загальних пожежно-технічних знань, вивчення правил пожежної безпеки з урахуванням особливостей виробництва, ознайомлення з протипожежними заходами та діями у

разі виникнення пожежі, оволодіння навичками використання наявних засобів пожежогасіння;

- за програмою прискореної підготовки працівників до дій в особливий період - навчання способам захисту від наслідків надзвичайних ситуацій, спричинених застосуванням засобів ураження в особливий період, що здійснюється підприємствами, установами та організаціями, які продовжують роботу у воєнний час, і розпочинається одночасно з уведенням в дію планів цивільного захисту на особливий період.

Навчання працівників на підприємстві, в установі та організації здійснюється шляхом:

- курсового навчання, що передбачає формування навчальних груп і здійснюється в навчальних класах або на об'єктах навчально-виробничої бази підприємства, установи та організації;

- індивідуального навчання, що передбачає вивчення теоретичного матеріалу самостійно та у формі консультацій з керівниками навчальних груп або іншими особами.

Навчальні групи комплектуються переважно з працівників, що входять до складу спеціалізованих служб і формувань цивільного захисту.

На підприємствах, в установах та організаціях із чисельністю працівників 50 і менше осіб навчання може здійснюватися шляхом проведення інструктажів за програмою загальної підготовки працівників, які проводяться особами з питань цивільного захисту, призначеними в межах штатної чисельності суб'єкта господарювання [92].

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі проведено огляд сучасного стану мікросмушкових фільтрів на нерегулярних лініях передачі, було проведено дослідження можливостей синтезу мікросмушкових фільтрів на основі нерегулярних ліній та можливостей створення мікросмушкових фільтрів ФНЧ, ФВЧ, СЗФ, СПФ.

Було виконано такі задачі, як аналіз існуючих конструкцій мікросмушкових фільтрів на НЛП, огляд чисельних методів опису структур з метою визначення конструкцій, для яких існує математичний апарат, визначення обмежень в моделюванні фільтрів на відрізках НЛП, отримання бази даних для синтезу МСФ на НЛП, розробка конструкцій МСФ з використанням комбінацій відрізків НЛП. Виконано класифікацію існуючих мікросмушкових фільтрів.

Запропоновано конструкцію мікросмушкового фільтру нижніх частот на чотирьох відрізках нерегулярної лінії, за допомогою якої можна отримати необхідні параметри АЧХ, а саме розширення смуги загородження.

Результатом досліджень є виявлення можливості синтезувати фільтри за заданою частотною характеристикою та оптимізувати шляхом зміни коефіцієнтів передавальної функції.

Створена база даних містить інформацію про залежність розмірів окремих базових елементів від їх геометричних розмірів та можливість реалізації на їх основі фільтруючих структур.

Поєднання в топології одного фільтра декількох базових елементів з частотними характеристиками дозволяє синтезувати фільтри за заданими вимогами до АЧХ. Комбінація цих елементів топології на одній підкладці з урахуванням необхідності узгодження та відповідності хвильових опорів на межах об'єднання окремих частин дає можливість реалізувати фільтр з такими характеристиками.

Додатковою перевагою топології мікросмушкового фільтру на відрізок нерегулярній лінії є те, що вона може виступати фазовим та / або амплітудним коректором.

Таким чином, нами створено базу даних, що містить у собі відомості про залежність амплітудно-частотної характеристики фільтрів від довжини базового елемента – відрізка нерегулярної лінії, та коефіцієнту, що визначає розкид хвильових опорів різних ділянок МСЛ. На основі цієї бази даних можливі синтез мікросмужкових фільтрів за рахунок вибору необхідної топології або комбінації декількох базових елементів на одній підкладці.

Проведено аналіз програмного забезпечення, що використовувалося в дипломній роботі. За допомогою системи електродинамічного моделювання і проєктування Ansoft HFSS була проведена параметризація фільтрів на нерегулярних лініях для того, щоб отримати АЧХ фільтру. Напрямок подальшої роботи пов'язаний із дослідженням можливостей проведення оптимізації топології фільтрів за допомогою скриптів.

Наведено економічне обґрунтування проведення науково-дослідної роботи. Запропоновано заходи щодо охорони праці при проведенні проєктувальних робіт за викладеними у роботі методиками.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем / М.З. Згуровский, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук и др.: В 2 т.– К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003 - Т.2:Устройства передающего и приёмного трактов. Проектирование устройств и реализация систем.– 616 с.
2. Гипсман А.И., Красноперкин В.М., Самохин Г.С., Силин Р.А. Современные методы и результаты квазистатического анализа полосковых линий и устройств // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 1 (1602). - М.: ЦНИИ "Электроника", 1991. - 102 с.
3. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: "Сов. радио", 1972. - 232 с.
4. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. I / Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.: Пер с англ. Под общ.ред. Алексева Л.В., и Кушнера Ф.В.– М.: "Связь", 1971. - 440 с.
5. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. 2 / Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.: Пер с англ. Под общ. ред. Алексева Л.В., и Кушнера Ф.В. - М.: "Связь", 1971. - 496 с.
6. Da-C. Chang, C.-Wen Hsue. Wide-band equal-ripple filters in nonuniform transmission lines // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2002. - Vol.50, № 4. - P. 1114 - 1119.
7. Hong J.-S., Lancaster M.J. Aperture-coupled microstrip open-loop resonators and their applications to the design of novel microstrip bandpass filters // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 1999. - Vol.47, № 9. - P. 1848 - 1855.
8. Roberts P. P., Town G.E. Design of microwave filters by inverse scattering // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 1995. - Vol.43, № 4. - P. 739 - 743.
9. Полосковые линии и устройства сверхвысоких частот. / Под ред. В.М. Седых. - Харьков: "Вища школа", ХГУ, 1974. - 276 с.
10. Микроэлектронные устройства СВЧ. Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алёхин и др. Под ред. Г.И. Веселова. - М.: "Высш. шк.", 1988 - 280 с.

11. Воробьев В.В. Щелевые линии передачи и компланарные волноводы для интегральных СВЧ схем // Зарубежная радиоэлектроника. - 1972. - № 5. - С. 93 - 116.
12. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: "Сов. радио", 1967.- 651 с.
13. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 256 с.
14. М. Николаев. Компактные микрополосковые фильтры с повышенной селективностью // Современная электроника. - 2008. - № 1. - с. 28–30.
15. G. Mur. " Метод конечных разностей для решения электромагнитных задач анализа неоднородностей волновода. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-22, pp. 54-57. Январь. 1974
16. H.E. Green, " Численное решение некоторых важных задач линии передачи, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-13, pp. 676-692, сентябрь. 1965.
17. P. Sylvester. Конечные элементы для инженеров - электриков, Издательство Кембриджского Университета. Нью-Йорк. 1983.
18. P. Daly, " Анализ микрополосковой линии методом конечных элементов, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-19. Pp. 19-25. Январь. 1971.
19. A.F. Thomson и A. Gopinath, " Вычисление индуктивности неоднородности микрополосковой линии, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech.. vol. MTT-23, pp. 648-655, август. 1975.
20. B. M. A. Rahman и J. B. Davie. " Анализ волноводных задач методом конечных элементов оптических и СВЧ диапазона, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-32, pp. 20-28, январь. 1984.
21. P. Sylvester,. " Анализ микроволновых схем методом конечных элементов. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech.. vol. MTT-21. Pp. 104-108, февраль 1973.
22. R.L. Ferrari, " Анализ трехмерных электромагнитных устройств методом конечных элементов ", 15-ая Евр. Микроволновая Конференция. , pp. 1064-1069, сентябрь. 1985.

23. M. A. Rahman и J. B. Davies, " Уточнение функции Пенальти решения волновода конечными элементами. " " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-32, pp. 922-928. Август. 1984.
24. A. Brebbia, Метод граничных элементов для инженеров, Изд-во Pentech, Лондон, 1978.
25. S. Kagalmi и I. Fukai. " Прикладная программа метода граничных элементов к проблемам электромагнитного поля, " " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT 12, pp. 455-461, апрель. 1984.
26. W. J. R. Hofer и A. Ros, " Параметры линии с подвешенной подложкой, рассчитываемые методом TLM, " IEEE MTT-S Международный СВЧ симпозиум, pp. 341-343, апрель - май. 1979
27. S. Aktar zad и P. B. Johns, " Трехмерный компьютерный анализ методом матрицы линии передачи микрополосковых резонаторов. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech vol. MTT-23 pp. 990-997. Декабрь 1975.
28. W. J. R. Hofer, " Теория и применение метода матрицы линии передачи , " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-33, pp. 882-893. Октябрь. 1985.
29. W. C. Chew и J. A. Kong. " Резонанс симметричных типов волн, в дисковом микрополосковом резонаторе. " J- Math. Phys., vol. 21. Pp. 582-591, Март. 1980
30. R. F. Harrington, Расчет полей методом моментов, Macmillan, Нью-Йорк, 1968.
31. E. Yalnashita и R. Mittra, " Вариационный метод для анализа микрополосковых линий " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-16, pp. 251-156 августа. 1968.
32. D. S. Jones. Теория электромагнетизма, Pergamo, Нью-Йорка. 1964.
33. R. W. Jackson и D. M. Pozer, " Полно - волновой анализ неоднородностей микрополосковой линии: открытого конца и отверстия, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-33, pp 1036-1042. Октябрь. 1985.
34. V. C. Shih и K. G. Gray, " Сходимость численных решений ступенчатых проблем неоднородностей волновода модальным анализом, " IEEE MTT-S Int Microwave Symp. Тезисы, pp, 233-235, Май 1983.

35. T. S. Chu, T. Itoh, и Y.-C. Shih. " Сравнительное изучение методик согласования мод для проблем неоднородностей микрополосковой линии, " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-33, pp. 1018-1023, Октябрь. 1985.
36. G. Kowalski и R. Pregla, " Дисперсионные характеристики экранированной полосковой линии с конечной толщиной проводника. " *Arch. Elektron. Ubertragungstech*, vol. 215, pp. 193-196 апрель. 1971.
37. R. Sorrentino и T. Itoh. Поперечный анализ резонанса неоднородностей линий с подвешенной подложкой. " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 1633-1638 декабря. 1984
38. U. Schulz и R. Pregla, " Новая методика для анализа дисперсионных характеристик планарных волноводов и применение её к микрополосковой линии с настройкой septums, " *Radio Sci.*, vol. 16. Pp. 1173-1178. Ноябрь - декабрь. 1981.
39. S. B. Worm и R. Pregla. " Анализ гибридных типов волн произвольных СВЧ структур произвольной формы методом линий. " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32. Pp. 191 - 196. Февраль 1984.
40. Y.-C. Shih, T. Itoh, и L.O. Vui, " Автоматизированное проектирование фильтров Е-плоскости миллиметровых волн. " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31. 135-142, февраль 1983,
41. T.-C. Shih, T. Itoh, " Анализ каскадных и скачковых неоднородностей микрополосковой линии методом обобщенной матрицы рассеяния. " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-34. Pp. 280-284. Февраль 1986.
42. T. Itoh. " Анализ микрополосковых резонаторов. " *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-22. Pp. 946-952. Ноябрь 1974.
43. R. H. Jansen, "Универсальный метод расчета характеристик экранированных, замкнутых и открытых элементов СВЧ и миллиметровых линии передачи, ориентированный на пользователя" *Microwaves, Opt., Acoust.*, vol. 3, pp. 14-22, январь. 1979.

- 44.L. P. Schmidt, T. Itoh, И Н. Hofmann. " Характеристики односторонних структур линий с подвешенной подложкой с произвольно размещенными отверстиями ", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-29. Pp. 352-355. Апрель. 1981.
- 45.J. Voukamp и R.H. Jansen. " Высокочастотные характеристики микрополосковой линии с открытым концом в микроволновых интегральных схемах, с учетом утечки энергии. " " 14-ая Евр. СВЧ конференция. Тезисы, pp. 142-147. Сентябрь. 1984.
- 46.T. Itoh, "Имитансный метод в спектральной области для расчета дисперсионных характеристик рассеяния произвольных печатных линий передачи. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech vol. MTT-28. Pp. 733-736. Июль 1980.
- 47.A. A. Oliner. "Эквивалентные цепи для неоднородностей в балансных линиях передачи. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. MTT-3, pp. 134-143 1955.
- 48.I. Wolff и N. Knoppik. " Прямоугольные и дисковые микрополосковые конденсаторы и резонаторы, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-2: 857-864. Октябрь. 1974.
- 49.G. Komp. "Частотные характеристики смещенной микрополосковой линии, " Electron. Lett., vol. 11. Pp. 537-538. Октябрь. 1975.
- 50.T. Okoshi и T. Miyoshi, " Расчет планарной интегральной схемы СВЧ, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-20 pp. 245-252. Апрель. 1972
- 51.R. Sorrentino, " Планарные схемы, модели волноводов, и метод сегментации, " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-33. Pp. 1057 - 1066, Октябрь 1985.
- 52.T.Okoshi, Y.Uehara и T. Takeuchi. " Метод сегментации и его применение к анализу планарных СВЧ схем. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-24, pp. 662-668, Октябрь. 1976.
- 53.P. C. Sharma и K. C. Gupta. " Декомпозиционный метод для анализа двумерных СВЧ схем. " IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-29, pp. 1094-1098, Октябрь. 1981.

- 54.Сахарова, Т.М. Расчет частотных характеристик рабочего затухания электрических фильтров / Т.М. Сахарова – М.: Изд-во «Связь», 1968. – 327 с.
- 55.Лер, А.М. Диапазонные аналоговые фильтры : Сборник статей журнала «Отбор и передачи информации» / А.М. Лер, Б.И. Швецкий. – №34, 1972.
- 56.Херреро, Д. Синтез фильтров / Д. Херреро, Г. Уиллонер. Пер. с англ. Ред. И.С. Гоноровского. – М. Изд-во «Советское радио», 1971. –232 с.
- 57.Иццоки, Я.С. Нелинейная радиотехника / Я.С. Иццоки. – М.: Советское радио, 1955. – 508 с.
- 58.Чурабо, Д.Д. Детали и узлы приборов. Конструирование и расчет: Справочное пособие / Д.Д. Чурабо. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
- 59.Фельдштейн, А.Л. Синтез четырёхполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – М.: "Связь", 1965. – 352 с.
- 60.Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т Корн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 832 с.
- 61.Роудз, Дж.Д. Теория электрических фильтров: / Дж.Д. Роудз. Пер. с англ. Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. радио, 1980. –239 с.
- 62.Лэм, Г. Аналоговые и цифровые фильтры / Г. Лэм. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
- 63.Зааль, Р. Справочник по расчету фильтров / Р. Зааль. Пер. с нем. под ред. Н.Н. Слепова. – М.: Радио и связь, 1983. – 752 с
- 64.Справочник по расчету и проектированию АРС-схем / Под ред. А.А. Ланнэ. – М.: Радио и связь, 1984.–335 с.
- 65.Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : (изд. 3-е) / С.И. Баскаков.– М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
- 66.Матханов, П.Н. Основы синтез линейных электрических цепей / П.Н. Матханов.– М.: Высшая школа, 1976. – 208 с.: ил.
- 67.Бобало, Ю.Я. Основи теорії електронних кіл / Ю.Я. Бобало, Б.А. Мандзій, П.Г. Стахів, Л.Д. Писаренко, Ю.І. Якименко. – Л.: Вид-во "Магнолія плюс", 2006. – 296 с.

68. Нефедов, В.И. Основы радиоэлектроники и связи / В.И. Нефедов, А.С. Сигов – М.: Высшая школа, 2009. – 735 с.
69. Куцко, Т.Ю. Расчёт полосовых фильтров / Т.Ю. Куцко. – М., Л.: "Энергия", 1965. – 192 с.
70. Cohn, S.B. Parallel-coupled transmission-line-resonator filters / S.B Cohn // IRE trans. microwave theory tech. – 1958. – Vol.6. – P. 223–231.
71. Ханзел, Г.Е. Справочник по расчету фильтров / Г.Е. Ханзел. Пер. с англ. под ред. А.Е. Знаменского. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.
72. Фельдштейн, А.Л. Синтез систем с распределёнными постоянными методами теории цепей / А.Л. Фельдштейн // Радиотехника. – 1960. – Т. 15, № 11. – С. 11–22.
73. Петров А.С., Влостовский Э.Г. Синтез класса микрополосковых фильтров с параллельно связанными резонаторами // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. - № 7. - С. 60 – 66.
74. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление / Е.П. Котов, В.Д. Каплун, А.А. Тер-Маркарян, В.П. Лисицын, Ю.И. Фаянс / Под ред. Е.П. Котова, В.Д. Каплуна. – М.: "Сов. радио", 1979. – 248 с.
75. Малорацкий, Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л.Г. Малорацкий, Л.Р. Явич. – М.: "Сов. радио" 1976. – 216 с.
76. Фельдштейн, А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов – М.: Сов. радио, 1967. – 651 с.
77. Кац, Б.М. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами / Б.М. Кац, В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн; Под ред. В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
78. Козловский, В.В. Устройства на неоднородных линиях / В.В. Козловский, В.И. Сошников. – К.: Техніка, 1987. – 191 с., ил.
79. Синтез устройств СВЧ на неоднородных линиях / В.В. Козловский, В.И. Сошников, В.А. Бычковский, П.М. Баранов, А.В. Згурский. - К.: Техніка, 1991. - 160 с.

- 80.Правила улаштування електроустановок [Текст] : ПУЕ-2017. – На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21. – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
- 81.ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. - Київ, ДП "УкрНДНЦ", 2016. – 109 с.
- 82.ДСТУ ISO 13406-2:2006. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами з плоским екраном. Частина 2. Ергономічні вимоги до дисплеїв з плоским екраном / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше; чинний від 2007-10-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2007. 117 с.
- 83.НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Державні санітарні правила і норми [Текст]. – Харків : Форт, 2018. – 48 с.
- 84.Курс лекцій по «Эргономике». Ю.М. Мадиевский. – Под ред. д-ра. техн. наук., проф. Березуцкого В.В. – Х.: НТУ «ХПИ» , 2015. – 294 с
- 85.ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. / Харків: Форт, 2000 – 24 с.
- 86.ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» / Київ Мінрегіон України, 2013. – 240 с.
- 87.ДБН В.2.5-28:2018. Природне та штучне освітлення. Посібник: проблеми природного і штучного освітлення. / К: Етін, 2019. – 180 с.
- 88.Грибан В. Охорона праці / В. Грибан, А. Негодченко. К. : Центр навчальної літератури, 2017. – 280 с.
- 89.ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку / МОЗ України, 1999 – 24 с.
- 90.ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги». / Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 39 с.
- 91.Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Текст] : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. –

На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2016. – 66 с.

92.Васійчук В.О., Гончарук В.Є., Качан С.І., Мохняк С.М. Основи цивільного захисту: Навч. посібник / Львів, 2010.- 384 с.

ДОДАТОК А

Результати проведених розрахунків параметризації та оптимізації топології мікросмужкового фільтра НВЧ на основі нерегулярних ліній

Таблиця А.1 – Значення коефіцієнтів рівняння синусоїди $X(t)=A*(-\sin(3/K*(t)))$, що описує форму базового елемента з довжиною $K*\pi$

№ ітерації при параметризації	А	К	Тип фільтру, що може бути реалізований з використанням елемента	Частота зрізу за рівнем -15дБ, ГГц
1	2	3	4	5
1	1	3	СЗФ	9,25
2	1	6	СЗФ	8,15
3	1	9		
4	1	12		
5	1	15		
6	1	18		
7	1	21		
8	1	24		
9	1	27		
10	1	30	СЗФ	17,75
11	2	3	СЗ-НЧ	7,20
12	2	6		
13	2	9	СЗФ	7,20
14	2	12		
15	2	15		
16	2	18		
17	2	21		
18	2	24		
19	2	27		
20	2	30		
21	3	3	ФНЧ	5,60
22	3	6	СЗФ	6,45
23	3	9	СЗФ	6,50
24	3	12		
25	3	15		
26	3	18		
27	3	21		
28	3	24		
29	3	27		
30	3	30		
31	4	3	НЧ-СП	4,60

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5
32	4	6		
33	4	9		
34	4	12		
35	4	15		
36	4	18		
37	4	21		
38	4	24		
39	4	27		
40	4	30		
41	5	3	ФНЧ	3,80
42	5	6		
43	5	9		
44	5	12		
45	5	15		
46	5	18		
47	5	21		
48	5	24		
49	1	33	СЗФ	14,35
50	1	36	СЗФ	14,35
51	1	39		
52	1	42		
53	1	45		
54	1	48	СЗФ	14,33
55	1	51		
56	1	54		
57	1	57		
58	1	60		
59	2	33		
60	2	36		
61	2	39		
62	2	42	СЗФ	13,95
63	2	45		
64	2	48		
65	2	51		
66	2	54		
67	2	57	НЧ-СЗ	11,35
68	2	60		
69	3	33	СЗФ	8,30
70	3	36		
71	3	39		
72	3	42		
73	3	45		

Продовження табл. А.1.

1	2	3	4	5
74	3	48		
75	3	51		
76	3	54		
77	3	57		
78	3	60		
79	4	33		
80	4	36		
81	4	39	СЗФ	10,30
82	4	42		
83	4	45		
84	4	48		
85	4	51		
86	4	54		
87	4	57		
88	4	60		
89	5	27		
90	5	30		
91	5	33		
92	5	36		
93	5	39		
94	5	42		
95	5	45		
96	5	48		
97	5	51		
98	5	54		
99	5	57		
100	5	60		

Таблиця А.2 – Значення АЧХ при зміні коефіцієнтів А та К

№	К	А	АЧХ	Середня частота СЗ, ГГц
1	2	3	4	5
1	3	1	СЗФ	9,25
2	3	2	ФНЧ	7,90
3	3	3	ФНЧ	6,50
4	3	4	ФНЧ	5,50
5	3	5	ФНЧ	4,90
6	6	1		
7	6	2		
8	6	3		
9	6	4		

Продовження табл. А.2

1	2	3	4	5
10	6	5	ФНЧ	3,90
11	9	1		
12	9	2	СЗФ	7,20
13	9	3	СЗФ	6,60
14	9	4		
15	9	5		
16	12	1		
17	12	2		
18	12	3		
19	12	4		
20	12	5		
21	15	1		
22	15	2		
23	15	3		
24	15	4		
25	15	5		
26	18	1		
27	18	2		
28	18	3		
29	18	4		
30	18	5		
31	21	1		
32	21	2		
33	21	3		
34	21	4		
35	21	5		
36	24	1		
37	24	2	СЗФ	7,15
38	24	3	СЗФ	6,50
39	24	4		
40	24	5		
41	27	1		
42	27	2	ФВЧ	1,00
43	27	3	ФВЧ	1,00
44	27	4		
45	27	5	ФВЧ	2,00
46	30	1	ФВЧ	1,00
47	30	2		
48	30	3		
49	30	4	ФВЧ	2,00
50	30	5		

Таблиця А.3 – Результати параметризації синтезованої структури

№ ітерації	Значення коефіцієнтів				Середня частота СЗ, ГГц	Глибина СЗ, дБ
	А	В	С	Д		
1	2	3	4	5	6	7
1	4,5	3,5	2,5	1,5	3,90	-16,0
2	4,5	3,5	2,5	2	4,05	-16,0
3	4,5	3,5	2,5	2,5	4,05	-16,5
4	4,5	3,5	3	1,5	4,00	-17,0
5	4,5	3,5	3	2	4,00	-17,5
6	4,5	3,5	3	2,5	3,90	-17,0
7	4,5	3,5	3,5	1,5	3,90	-18,5
8	4,5	3,5	3,5	2	3,90	-17,0
9	4,5	3,5	3,5	2,5	3,90	-17,0
10	4,5	4	2,5	1,5	4,00	-17,0
11	4,5	4	2,5	2	4,00	-17,0
12	4,5	4	2,5	2,5	4,00	-17,0
13	4,5	4	3	1,5	3,90	-17,7
14	4,5	4	3	2	4,00	-19,9
15	4,5	4	3	2,5	4,00	-19,9
16	4,5	4	3,5	1,5	4,00	-19,9
17	4,5	4	3,5	2	3,80	-19,7
18	4,5	4	3,5	2,5	3,80	-19,7
19	4,5	4,5	2,5	1,5	4,20	-16,0
20	4,5	4,5	2,5	2	4,20	-15,5
21	4,5	4,5	2,5	2,5	4,20	-13,0
22	4,5	4,5	3	1,5	4,30	-15,3
23	4,5	4,5	3	2	4,30	-15,3
24	4,5	4,5	3	2,5	4,30	-20,0
25	4,5	4,5	3,5	1,5	3,90	-20,5
26	4,5	4,5	3,5	2	4,10	-21,0
27	4,5	4,5	3,5	2,5	3,60	-19,7
28	5	3,5	2,5	1,5	3,60	-19,7
29	5	3,5	2,5	2	3,60	-19,7
30	5	3,5	2,5	2,5	3,60	-19,7
31	5	3,5	3	1,5	3,60	-20,5
32	5	3,5	3	2	3,60	-19,7
33	5	3,5	3	2,5	3,60	-19,7
34	5	3,5	3,5	1,5	3,60	-22,0
35	5	3,5	3,5	2	3,60	-22,0
36	5	3,5	3,5	2,5	3,60	-22,0

Продовження табл. А.3

1	2	3	4	5	6	7
37	5	4	2,5	1,5	3,90	-20,6
38	5	4	2,5	2	3,90	-20,6
39	5	4	2,5	2,5	3,90	-21,0
40	5	4	3	1,5	3,90	-21,0
41	5	4	3	2	3,90	-22,5
42	5	4	3	2,5	3,90	-22,5
43	5	4	3,5	1,5	3,80	-23,0
44	5	4	3,5	2	3,80	-24,0
45	5	4	3,5	2,5	3,80	-22,0
46	5	4,5	2,5	1,5	3,80	-22,0
47	5	4,5	2,5	2	3,80	-22,0
48	5	4,5	2,5	2,5	3,80	-22,0
49	5	4,5	3	1,5	3,80	-23,5
50	5	4,5	3	2	3,80	-23,5
51	5	4,5	3	2,5	3,80	-23,5
52	5	4,5	3,5	1,5	3,80	-23,5
53	5	4,5	3,5	2	3,70	-24,6
54	5	4,5	3,5	2,5	3,80	-24,6
55	5,5	3,5	2,5	1,5	3,80	-24,6
56	5,5	3,5	2,5	2	3,80	-24,6
57	5,5	3,5	2,5	2,5	3,80	-24,6
58	5,5	3,5	3	1,5	3,80	-25,5
59	5,5	3,5	3	2	3,80	-25,5
60	5,5	3,5	3	2,5	3,80	-25,5
61	5,5	3,5	3,5	1,5	3,70	-27,0
62	5,5	3,5	3,5	2	3,70	-27,0
63	5,5	3,5	3,5	2,5	3,70	-25,0
64	5,5	4	2,5	1,5	3,70	-25,0
65	5,5	4	2,5	2	3,70	-25,0
66	5,5	4	2,5	2,5	3,70	-26,7
67	5,5	4	3	1,5	3,70	-26,7
68	5,5	4	3	2	3,70	-27,0
69	5,5	4	3	2,5	3,70	-27,0
70	5,5	4	3,5	1,5	3,70	-27,0
71	5,5	4	3,5	2	3,70	-27,7
72	5,5	4	3,5	2,5	3,70	-27,0
73	5,5	4,5	2,5	1,5	3,70	-27,0
74	5,5	4,5	2,5	2	3,70	-27,0

Продовження табл. А.3

1	2	3	4	5	6	7
75	5,5	4,5	2,5	2,5	3,70	-27,0
76	5,5	4,5	3	1,5	3,70	-28,0
77	5,5	4,5	3	2	3,70	-28,0
78	5,5	4,5	3	2,5	3,70	-28,8
79	5,5	4,5	3,5	1,5	3,70	-29,0
80	5,5	4,5	3,5	2	3,70	-29,0
81	5,5	4,5	3,5	2,5	3,80	-22,0