

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

**Фурманова Наталія Іванівна**



УДК 004.962, 621.372.54

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЙ  
МІКРОСМУЖКОВИХ ФІЛЬТРІВ НВЧ**

05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Фарафонов Олексій Юрійович**,  
Запорізький національний технічний університет,  
доцент кафедри "Інформаційні технології  
електронних засобів"

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Лобур Михайло Васильович**,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
завідувач кафедри "Системи автоматизованого  
проекткування";

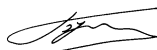
кандидат технічних наук, доцент  
**Євсєєв Владислав В'ячеславович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, доцент кафедри "Технологія та  
автоматизація виробництва радіоелектронних та  
електронно-обчислювальних засобів "

**Захист дисертації відбудеться 03.07.2015 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12.**

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий "29" травня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Р.А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток і мініатюризація елементної бази надвисокочастотної техніки вимагає істотного зменшення розмірів і частотно-селективних пристроїв (ЧСП), що функціонують в діапазоні 0,3...100 ГГц. Одним із шляхів вирішення цієї актуальної задачі є заміна порожнистих хвилеводних структур на смужкові та мікросмужкові структури. Области застосування мікросмужкових ліній передачі постійно розширюються, завдяки не тільки істотно меншим габаритам і вазі пристроїв, але і технологічності, а також дешевизні і можливості виготовлення на підкладках цілих вузлів і модулів. Однак мікросмужковим лініям передачі і пристроям на їх основі притаманні деякі недоліки у порівнянні з хвилеводами: в них суттєво більш високі погонні втрати; труднощі точного аналізу пристроїв; відкритий характер ліній не виключає можливість електромагнітних зв'язків між елементами схеми. Як відомо, частотно-селективні пристрої є найважливішими елементами техніки зв'язку та радіолокації. Постійна тенденція до підвищення функціональної складності і ступеня інтеграції високочастотних пристроїв поставила перед дослідниками в цій області проблему розроблення оптимальних конструкцій надвисокочастотних (НВЧ) фільтрів зі збереженням їх основних переваг: мініатюрності і надійності. Однак у зв'язку з особливостями поширення електромагнітних хвиль у мікросмужкових лініях (МСЛ) виникають значні труднощі при аналізі конструкцій на їх основі і особливо при проведенні синтезу пристроїв на МСЛ.

Розробленням мікросмужкових фільтрів у різні роки займались вітчизняні та закордонні вчені В.В.Конін, В.В.Тюрнев, Л.М.Карпуков, Н.Д.Малютін, І.Н.Прудіус, В.І.Оборжицький, J.S.Hong, M.J.Lancaster, T.Itoh, F.Medina, D.Ahn, J.S.Seok, В.Д.Разевіг, В.Ю.Потапов, В.Ю.Приходько та ін.

На теперішній час розроблені методи синтезу багатьох структур фільтрів НВЧ (наприклад, на основі фільтрів-прототипів нижніх частот, східчастих трансформаторів, використанні частотного перетворення Річардса), які дозволяють синтезувати ЧСП з високою точністю електричних параметрів (хвильові опори, електричні довжини). Однак при переході від електричних параметрів фільтра до геометричних параметрів топології виникають певні труднощі, пов'язані з недостатньою точністю існуючих моделей відрізків ліній передачі і різних неоднорідностей, а також з проблемами обліку дисперсії, впливу корпусу, провідності матеріалу провідників тощо.

Синтез мікросмужкового фільтра НВЧ традиційним способом може зайняти значний час, при цьому можливість фізичної реалізації розробленого ЧСП не зможе бути визначена з моменту початку роботи до розрахунку геометричних параметрів. Крім того, існуючі методики дозволяють реалізувати фільтри лише на добре відомих резонуючих структурах, у той час як синтез фільтрів на сучасних топологічних рішеннях викликає труднощі.

В той же час, незважаючи на велику кількість робіт, присвячених проектуванню мікросмужкових конструкцій, та пакетів програм для їх

моделювання та аналізу, на сьогодні відсутні програми, що дозволяють проводити синтез мікросмужкових фільтрів, що базується на квазістатичному аналізі топології. При цьому використовуються резонаторні структури, що активно застосовуються при проектуванні сучасних ЧСП, серед яких слід виділити одиночні та зв'язані мікросмужкові лінії, шпилькові резонатори, трикутні резонатори, дефективні заземлюючі структури, дефективні мікросмужкові структури, відрізки нерегулярних ліній зі східчастим або плавним переходом та ін. У зв'язку з великою кількістю варіантів конструктивного виконання та складними методиками розрахунку мікросмужкових фільтрів НВЧ їх проектування є складною задачею.

Тому в даній дисертаційній роботі необхідно розробити методи синтезу мікросмужкових фільтрів НВЧ, реалізувати їх у розробленій системі автоматизованого синтезу топологій та запропонувати шляхи розпаралелювання обчислювальних операцій. Для цього здійснюється порівняння різноманітних конструкцій фільтрів на мікросмужкових лініях з метою вибору найбільш перспективних, аналізуються методи синтезу ЧСП НВЧ діапазону, виконується розроблення методики точного розрахунку геометричних розмірів топології фільтрів, отриманих в результаті синтезу з використанням квазістатичного аналізу, пропонуються алгоритми синтезу мікросмужкових НВЧ фільтрів.

Інтегруючи інженерні методики в єдину систему проектування фільтрів, необхідно уніфікувати їх і представити у виді сукупності блоків, підпрограм з однотипними вхідними даними і результатами, що представляються у деякому стандартному виді, що підвищує вірогідність синтезу оптимального фільтра НВЧ діапазону. Вищесказане дає привід зробити висновок, що поставлене завдання є актуальним.

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

Дисертаційна робота виконана у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувались на кафедрі «Інформаційні технології електронних засобів» Запорізького національного технічного університету за напрямком «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»:

–ДБ 04419 «Розробка методів проектування радіоелектронних апаратів з урахуванням функціональних, конструктивних і технологічних обмежень» (2009-2012). Участь автора полягала у дослідженні впливу на вихідні функції радіоелектронних апаратів функціональних, конструктивних і технологічних обмежень (дослідження хвильових опорів мікросмужкових смуго-пропускаючих фільтрів) та у розробці методів утворення моделей врахування функціональних, конструктивних і технологічних обмежень на вихідні функції радіоелектронних апаратів (розроблення моделей для оптимізації мікросмужкових смугопропускаючих фільтрів);

–ДБ 04212 «Розробка методів проектування радіоелектронних апаратів з використанням інформаційних технологій». Участь автора полягала в дослідженні методик проектування та оптимізації НВЧ фільтрів та оцінки їх точності;

–ДБ 04410 «Об’єктно-орієнтовані методи проектування радіоелектронних апаратів» (2010-2012). Автором розроблено методи синтезу топологій мікросмужкових смугопрускаючих фільтрів на резонаторах шпилькового типу та трикутних резонаторах, вдосконалено існуючі методики проектування та розроблено методику проектування фільтрів на ділянках зв’язаних ліній з прямокутними отворами в екрануючому шарі.

ДБ 04412 «Розробка методів проектування радіоелектронних апаратів з використанням інформаційних технологій». Участь автора полягала в розробці методу синтезу мікросмужкових НВЧ фільтрів на відрізках нерегулярних ліній.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності проектувальних робіт шляхом розроблення методів синтезу та алгоритмів системи автоматизованого синтезу топологій мікросмужкових фільтрів НВЧ.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи синтезу мікросмужкових фільтрів, відмітити їх особливості та визначити області можливого застосування;
- дослідити конструкції мікросмужкових фільтрів НВЧ, реалізованих на різних резонаторних структурах, визначити перспективні конструкції з точки зору технологічності виготовлення, можливості мініатюризації, покращення частотних характеристик;
- розглянути існуючі пакети САПР мікросмужкових пристроїв, проаналізувати можливість синтезу фільтрів НВЧ;
- розробити методи проектування мікросмужкових фільтрів на резонаторних структурах, які не мають точних алгоритмів розрахунку, та методики, що уточнюють існуючі методи розрахунку геометричних розмірів топологій мікросмужкових фільтрів;
- розробити структуру, описати алгоритми системи проектування мікросмужкових фільтрів НВЧ, запропонувати способи оптимізації процесу синтезу.

**Об’єктом дослідження** є процес синтезу топологій та проектування мікросмужкових фільтрів НВЧ за заданими вихідними даними: особливостями частотних характеристик, габаритними розмірами плати, матеріалом підкладки.

**Предметом дослідження** є методи, моделі і алгоритми проектування конструкцій фільтрів НВЧ в мікросмужковому виконанні, синтез мікросмужкових фільтрів з використанням квазістатичного та електродинамічного методів.

**Методи дослідження.** У процесі вирішення поставлених задач застосовувались апарати теорії довгих ліній і методи аналізу мікросмужкових структур у квазістатичному наближенні, розрахунки за наближеними методиками на основі апроксимаційних формул з використанням ЕОМ, чисельні методи моделювання, квазістатичний аналіз, метод декомпозиції, метод колокації, метод генетичного алгоритму пошуку мінімуму, використання статистичних та експериментальних даних, узагальнення результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше розроблено метод синтезу мікросмужкових НВЧ фільтрів на трикутних резонаторах, що полягає у застосуванні квазістатичного аналізу для розрахунку трикутних резонаторів шляхом представлення топології у вигляді послідовності зв'язаних ліній, для яких розраховується матриця ємностей та визначаються S-параметри, що дає можливість проектувати фільтри на резонаторах трикутного типу;

– розроблено метод синтезу фільтрів на відрізках нерегулярних ліній передачі (НЛП), що полягає у комбінуванні фрагментів топології з використанням створеної бази даних, яка містить відомості про залежність частотних характеристик нерегулярних резонаторів від їх геометричних розмірів, для створення необхідної АЧХ. Це дає можливість поєднати теорію довгих ліній та резонаторні структури і синтезувати фільтри з розширеною смугою загородження і збільшеною селективністю у порівнянні з фільтрами зі ступінчатою зміною хвильового опору;

– удосконалено метод синтезу смугопр пропускаючих фільтрів на резонаторах шпилькового типу, який поєднує існуючі методи розрахунку фільтрів на напівхвильових резонаторах та квазістатичний аналіз топології, що дало можливість реалізувати фільтри як з вузькою, так і з понадширокою смугою пропускання внаслідок використання таких елементів, як щілина в екрануючому шарі та непаралельність ділянок зв'язаних ліній;

– удосконалено генетичний алгоритм пошуку рішень шляхом розпаралелення обчислень на основі запропонованих алгоритмів, які базуються на використанні самоорганізаційних карт Кохонена для попередньої кластеризації, що дало можливість додатково, поряд з частотним розпаралеленням, скоротити час проектування з застосуванням декількох комп'ютерів та отримати точніші результати.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено програму, яка дає можливість виконати розрахунок геометричних розмірів ділянки зв'язаних ліній з прямокутним отвором в екрануючому шарі під нею, що базується на квазістатичному аналізі поперечного перерізу мікросмужкової топології і генетичному алгоритмі пошуку рішень.

Проаналізовано залежність хвильових опорів мікросмужкового фільтра від товщини смужки, побудовано номограму для визначення оптимальної топології з урахуванням товщини мікросмужкової лінії; результати аналізу зведені у масив, який використовується в розробленій системі синтезу мікросмужкових фільтрів. Виконано проектування смугопр пропускаючого фільтра (СПФ) на шпилькових резонаторах з отворами в екрануючому шарі під ділянками зв'язаних ліній.

Запропоновано алгоритми для системи проектування мікросмужкових фільтрів НВЧ, що містить у собі велику кількість топологічних рішень та дає можливість синтезувати нові топології фільтрів, у тому числі з отворами в екрануючому шарі, з трикутними резонаторами, з відрізками нерегулярних ліній, а також з фрактальною реалізацією резонаторів.

Розроблено систему автоматизованого проектування для синтезу топологій фільтрів НВЧ, що має просту структуру і може взаємодіяти з іншими САПР НВЧ пристроїв. У розробленій САПР вперше реалізовано такі функції:

- автоматизований синтез топології фільтрів за вимогами до амплітудно-частотної характеристики з використанням різних резонуючих структур, у тому числі на трикутних резонаторах і на відрізках нерегулярних ліній;
- автоматизований вибір конструкції фільтра в залежності від частотних характеристик та додаткових вимог користувача.

Розроблена система синтезу топологій мікросмужкових фільтрів має у своєму складі бібліотеки даних, що містять інформацію щодо: залежності хвильових опорів мікросмужкового фільтра від товщини МСЛ; залежності ширини смуги пропускання від кута між непаралельними ділянками зв'язаних ліній у СПФ на шпилькових резонаторах; залежності розмірів відрізків нерегулярної лінії від їх геометричних розмірів та можливість реалізації на їх основі топологій фільтрів НВЧ. Це дає можливість синтезувати значну кількість топологій фільтрів, у тому числі таких, для яких немає точних методів та методик синтезу.

Результати виконаних досліджень впроваджено в практику проектування електронних апаратів КП «НВК «Іскра» і використовувались для удосконалення пристроїв, що розробляються на підприємстві. Запропоновані методи синтезу впроваджено у виробництво ТОВ НПФ "Вест Лабс Лтд". Наукові та практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для студентів Запорізького національного технічного університету з дисциплін “Математичне моделювання в САПР” напряму 6.050902 “Радіоелектронні апарати” і “Конструкції пристроїв НВЧ” спеціальності 7.05090201 “Виробництво електронних засобів”. Результати досліджень використовуються у дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертації отримані здобувачем самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [1] – створення методики проектування та аналізу мікросмужкових фільтрів на шпилькових резонаторах з отворами в екрануючому шарі; [2] – дослідження впливу товщини МСЛ на параметри фільтрів; [3] – дослідження впливу неоднорідності в екрануючому шарі у виді отвору на параметри фільтра з використанням квазістатичного аналізу топології; [4, 7] – оцінювання можливостей існуючих САПР, що використовують різні методи аналізу, при проектуванні фільтрів з отворами в екрані; [5] – дослідження особливостей моделювання перемичок у відгалужувачах Ланге; [6] – формування мети досліджень та перевірка отриманих даних за допомогою електромагнітного аналізу досліджуваних структур; [9] – аналіз неоднорідності у виді повороту МСЛ у фільтрах на резонаторах шпилькового типу; [10] – дослідження впливу особливостей топології СПФ на шпилькових резонаторів у вигляді непаралельних ділянок зв'язаних ліній на його частотні характеристики; [15] – аналіз можливостей використання паралельних обчислень при проведенні

квазістатичного аналізу мікросмужкових пристроїв; [16, 19] – використання карт Кохонена для попередньої кластеризації в генетичних алгоритмах та перевірка запропонованого удосконаленого методу пошуку рішень; [17] – метод проектування фільтрів на відрізку нерегулярної лінії з синусоїдальною зміною ширини з використанням квазістатичного аналізу; [18] – аналіз залежності частотних характеристик мікросмужкових фільтрів з фрактальною реалізацією резонаторів від кількості ітерацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на:

- міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» TCSET (м. Львів – с.м.т. Славське, 2010, 2012, 2014 рр.);
- міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» РТТ (м. Запоріжжя, 2010, 2012, 2014 рр.);
- міжнародних Кримських конференціях «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології» КриМіКо (м. Севастополь, АР Крим, 2012, 2013);
- міжнародному 18-ому молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» (м. Харків, 2014 р.);
- науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2014 р.);
- науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика» (м. Суми, 2014 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, опубліковано 19 наукових праць, у тому числі 5 статей у фахових наукових виданнях [1-5], у тому числі 2 статті у періодичних виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах [1, 2], 14 публікацій у матеріалах та тезах доповідей конференцій [6-19] (чотири праці без співавторів).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, п'яти додатків і списку використаних джерел (290 найменувань). Загальний обсяг роботи становить 247 сторінок, з них 219 основного тексту. Робота містить 132 рисунки та 8 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У ***вступі*** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, задачі дослідження, визначено наукову новизну дисертаційної роботи та практичну цінність отриманих результатів. Наведено структуру роботи, відомості про публікації, апробацію та впровадження результатів роботи.

У ***першому розділі*** проаналізовано існуючі методики синтезу мікросмужкових фільтрів та аналізу пристроїв НВЧ діапазону, причому особливу увагу приділено електродинамічному та квазістатичному методам аналізу. Досліджено можливості сучасних САПР мікросмужкових пристроїв в області синтезу фільтрів, можливостей і точності аналізу топологій класичних



і сучасних конструкцій фільтрів. Визначено, що найбільш точні результати при проведенні аналізу топологій мікросмужкових фільтрів отримані з використанням системи High Frequency System Simulator, що також має можливість оптимізації аналізованих конструкцій. Недоліками системи можна вважати відсутність блоку синтезу мікросмужкових фільтрів та бібліотеки основних елементів фільтрів у мікросмужковому виконанні. Серед інших розглянутих систем слід виділити Microwave Office, який має модуль розрахунку фільтрів, побудованих з використанням блоків, проте їх кількість обмежена, відсутня можливість доповнення бібліотеки, а при проектуванні топології фільтра за допомогою графічного редактора створення конструкції фільтра з нерегулярними лініями є неможливим. Іншим недоліком є значні витрати часу при проведенні аналізу структури та відсутність блоку синтезу.

Таким чином, постає задача розроблення системи синтезу топологій мікросмужкових фільтрів, що базується на використанні традиційних методик та квазістатичному аналізі топологій, та матиме вбудований конструктор топологій з можливістю додавання нових базових елементів, матиме можливість оптимізації та проведення синтезу топологій мікросмужкових фільтрів, у тому числі з використанням резонаторів шпилькового типу, трикутного типу, відрізків нерегулярної лінії та з фрактальною реалізацією резонаторів.

Проведено огляд існуючих методів та методик проектування мікросмужкових фільтрів НВЧ. Розглянуто особливості методів квазістатичного та електродинамічного аналізу та області їх застосування. Показано переваги квазістатичного аналізу для проведення синтезу конструкцій мікросмужкових фільтрів з використанням різних резонаторних структур. Визначено, що методи синтезу фільтрів з використанням фільтрів-прототипів нижніх частот дає найбільш точні результати, проте може бути уточнений за допомогою квазістатичного аналізу, який базується на інтегральному рівнянні:

$$\iint_{\Omega} \rho_s(x', y') G(x, y/x', y') dx' dy' = \Phi(x, y), \quad (1)$$

де  $\rho_s(x', y')$  – поверхнева щільність зарядів;  $G(x, y/x', y')$  – функція Гріна;  $\Omega$  – периметр поперечного перерізу провідника;  $\Phi(x, y)$  – потенціальна функція.

Перший розділ закінчується формулюванням мети дисертаційної роботи і задач дослідження. Зокрема, поставлено задачі розроблення уточнених методів проектування мікросмужкових фільтрів, створення алгоритмів синтезу фільтрів за вихідними характеристиками з використанням квазістатичного аналізу топології.

У *другому розділі* розглянуто методи та методики проектування, які уможливають синтез фільтрів, визначено можливість їх застосування для проектування ЧСП на різних резонаторних структурах. Спираючись на огляд літератури з тематики дисертаційної роботи та дослідження розробок вітчизняних підприємств, визначено найбільш розповсюджені та технологічно відпрацьовані конструкції фільтрів та визначено перспективні топологічні

рішення, що забезпечують зменшення габаритних розмірів, покращення придушення сигналів у смузі загородження тощо. Розглянуті конструкції фільтрів характеризуються значною варіативністю у виборі резонаторних структур і забезпечують реалізацію заданих частотних характеристик. Частина з них має широко застосовувані методики проектування, проте використання квазістатичного аналізу топології дозволило уточнити параметри елементів топології для отримання частотних характеристик, які точніше відповідають заданим. Для інших конструкцій, таких як фільтри на зв'язаних лініях та фільтри на резонаторах шпилькового типу з отворами, запропоновано уточнені методики проектування, що враховують неоднорідність структури у вигляді прямокутного отвору в екрануючому шарі підкладки.

В окрему групу винесено топології, які не мають описаних у літературі методик розрахунку, а їх проектування базується на проведених статистичних даних: фільтр на трикутних резонаторах і фільтр на відрізку НЛП. Тому постає задача розроблення методів синтезу топології фільтрів на неоднорідностях таких типів.

Для проведення досліджень точності методу декомпозиції з подальшим квазістатичним аналізом топології, було обрано конструкції мікросмушкових фільтрів, які містять у своєму складі резонатори зі ступінчатою зміною хвильового опору, шпилькові резонатори, відрізки зв'язаних ліній, у тому числі з отвором в екрануючому шарі, відрізки нерегулярної лінії передачі тощо. Обрані конструкції проаналізовано за допомогою декомпозиційного методу, визначено можливість проектування окремих ділянок за допомогою існуючих методик синтезу фільтрів.

Для розрахунку елементів непрямокутної форми запропоновано використання методу колокації, при цьому виконуються такі операції: на провіднику  $k$  обираємо 2 точки  $x_1^k$  та  $x_2^k$ :

$$\begin{aligned} x_1^k &= b_k - rw_k / 2, \\ x_2^k &= b_k + rw_k / 2, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $w$  – ширина провідника,  $b$  – координати його центра на комплексній площині,  $1 > r > 0.5$  – обрана константа (в роботі використано значення  $r=0.7$ ).

Прирівнявши потенціал в обраних точках заданим значенням  $\varphi_k$ , отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 (P_e^k(x_1^k, b_k, w_k) + P_o^k(x_1^k, b_k, w_k)) &= \varphi_k, \\ \sum_{k=1}^3 (P_e^k(x_2^k, b_k, w_k) + P_o^k(x_2^k, b_k, w_k)) &= \varphi_k, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $P_e$ ,  $P_o$  – потенціали парної та непарної базисної функції, відповідно.

Розв'язавши цю систему, ми зможемо розрахувати як власні ємності тонких провідників, так і часткові ємності. Порівняння результатів аналізу за допомогою методу колокації та з використанням сучасних систем електромагнітного моделювання показало, що точність розрахунку елементів непрямокутної форми сягає 92%.

Запропоновано методику аналізу пристроїв НВЧ з отворами в екрануючому шарі для одно- та багат шарових підкладок. Розраховані значення ємностей неоднорідностей можуть використовуватись для уточненого аналізу фільтрів на МСЛ.

Для мікросмужкових СПФ на резонаторах шпилькового типу розроблено метод синтезу та запропоновано алгоритми для синтезу топологій, що враховують можливість не лише зміни геометричних розмірів окремих резонаторів і їх взаємного розташування, але й оптимізацію топології шляхом введення щілини в екрануючому шарі, зміною кута між основою шпильки і ділянками зв'язаних ліній. З використанням цих алгоритмів стає можливим синтез фільтрів від вузько- до понадширокосмугових (ширина смуги пропускання від 2 до 28%, відповідно).

У *третьому розділі* досліджено можливість застосування генетичного алгоритму при оптимізації топології мікросмужкових фільтрів, отриманих в результаті синтезу з використанням квазістатичного аналізу. Використання генетичного алгоритму при проведенні багатопараметричної оптимізації топології дозволяє отримати точні значення геометричних розмірів елементів топології.

З використанням розробленої підпрограми розрахунку поперечного перерізу, що базується на генетичному алгоритмі пошуку рішень, можна визначити геометричні розміри ділянки зв'язаних ліній з отвором в екрануючому шарі (ширину мікросмужкових ліній, відстань між ними і ширину щілини в екрануючому шарі), при цьому можна домогтися варіантів конструкцій, які найточніше забезпечують необхідні вихідні параметри фільтра НВЧ, що синтезується.

Удосконалено метод пошуку рішень для розв'язку задачі оптимізації шляхом проведення початкової кластеризації з використанням самоорганізаційних карт Кохонена перед виконанням пошуку мінімуму генетичним алгоритмом. Такий підхід демонструє точніші результати синтезу топологій та дає можливість значно скоротити витрати часу завдяки можливості розпаралелювання обчислень на різних кластерах.

Крім того, розглянуто і запропоновано шляхи прискорення обчислень за допомогою паралельного виконання операцій при обчисленні оберненої матриці та за допомогою розподілення обчислень для виконання на різних процесорах або ЕОМ, що дає можливість скоротити час синтезу та оптимізації на 21-35% у залежності від типу резонаторної структури, яка входить до складу топології синтезованого фільтра НВЧ.

Проаналізовано залежність хвильових опорів на відрізках зв'язаних мікросмужкових ліній з отворами в екрануючому шарі від товщини металізації, створено номограму, результати якої можуть використовуватись для синтезу фільтрів. Крім того, отримані дані зведено у масив, що використовується у спеціалізованому програмному забезпеченні розробленої системи синтезу топології мікросмужкових фільтрів НВЧ.

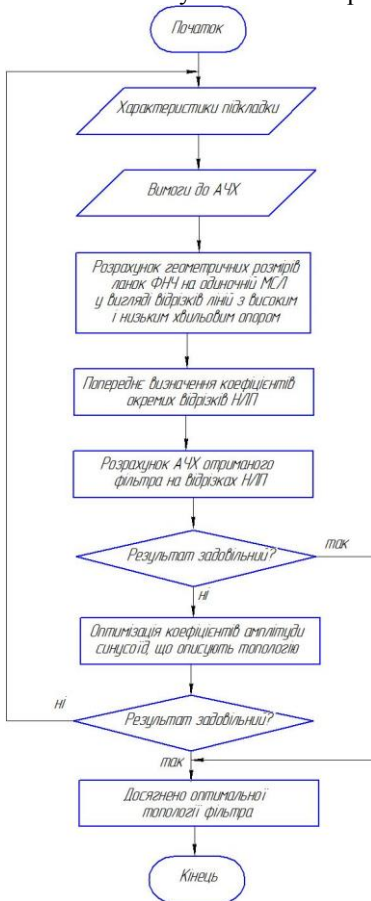


Рис. 1. Блок-схема алгоритму синтезу фільтрів на відрізках НЛП

коректність використання запропонованого методу синтезу фільтрів з використанням квазістатичного аналізу для проектування мікросмужкових фільтрів на основі відрізку НЛП.

Запропоновано метод синтезу мікросмужкових фільтрів на основі трикутних резонаторів, що базується на використанні квазістатичного аналізу, і полягає у представленні топології таких фільтрів у вигляді послідовності

Розглянуто можливість синтезу фільтрів на основі відрізка нерегулярної лінії передачі. Визначено, що збільшення базового елемента у виді відрізка нерегулярної лінії з синусоїдальною формою провідника для зміни центральної частоти СПФ не завжди дає бажаний результат, що може бути пояснено розузгодженням хвильових опорів, зміною не тільки параметрів елементів схеми заміщення, а й ланок еквівалентної схеми. Створено базу даних, де в якості базового елемента виступає відрізок нерегулярної лінії, форма якого описується синусоїдою.

Використання результатів аналізу дозволяє синтезувати фільтри на нерегулярних лініях, а уточнення геометричних розмірів топології відбувається за допомогою генетичного алгоритму пошуку рішень. Розроблено метод синтезу фільтрів на відрізку нерегулярної лінії, що базується на попередньому розрахунку за методиками для фільтрів нижніх частот зі ступінчатою зміною хвильового опору та квазістатичному аналізі (рис. 1).

Перевірка результатів на прикладі моделювання смугопропускаючого фільтра на відрізку НЛП добре співвідносяться з даними моделювання такої структури в системі HFSS (рис. 2), що свідчить про

зв'язаних ліній, для яких розраховуються матриці ємностей, після зшивання яких визначається амплітудно-частотна характеристика синтезованого фільтра, що дозволило проектувати фільтри резонатори трикутного типу.

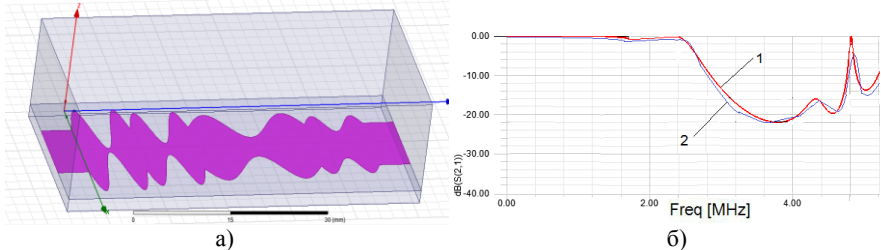


Рис. 2. Смугопропускаючий фільтр на чотирьох відрізках нерегулярної лінії передачі: а – модель мікросмужкового фільтра, що аналізується; б – АЧХ фільтра (1 – в системі HFSS; 2 – отримана в результаті квазістатичного аналізу топології)

Запропоновано методику синтезу топологій мікросмужкових фільтрів з фрактальною реалізацією резонаторів, що робить можливим проектування мікросмужкових фільтрів при необхідності отримання двох смуг пропускання (загородження) так, щоб друга смуга пропускання (загородження) мала центральну частоту нижче за  $2f_0$ .

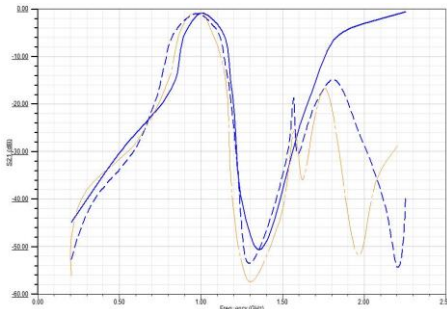


Рис. 3. АЧХ смугопропускаючого фільтра на шпилькових резонаторах з фрактальною реалізацією: суцільна лінія – нульова ітерація, пунктирна лінія – перша ітерація, штрих-пунктирна лінія – друга ітерація

Результати моделювання СПФ на резонаторах шпилькового типу з фрактальною реалізацією від нульової до першої ітерації наведено на рис. 3. Використання фрактальної реалізації фільтрів має обмеження, пов'язані із можливістю технологічної реалізації окремих елементів топології. Проте у ряді випадків цілком задовільних результатів щодо крутизни характеристики та покращення придушення у смузі загородження можна досягти вже на другій або третій ітерації, при цьому отримані в результаті проектування розміри елементів топології можуть бути реалізовані з використанням типових технологічних процесів.

У *четвертому розділі* описано розроблену систему проектування топологій мікросмужкових фільтрів SynFil, що базується на використанні методів синтезу за фільтрами прототипами нижніх частот, теорії довгих ліній та квазістатичному аналізі топології.

Особливістю системи SynFil є можливість синтезу топології фільтрів НВЧ як на резонаторних структурах, для яких є точні методики розрахунку

(такі як відрізки зв'язаних ліній), так і для структур, для яких немає таких методик і застосовується квазістатичний аналіз топології (наприклад, резонатори трикутного типу та відрізки нерегулярних ліній).

В розділі проаналізовано вимоги до розробленої системи автоматизованого синтезу топологій мікросмушкових фільтрів, наведено структуру розробленого спеціалізованого програмного забезпечення, визначено зв'язки між окремими елементами (рис. 4).

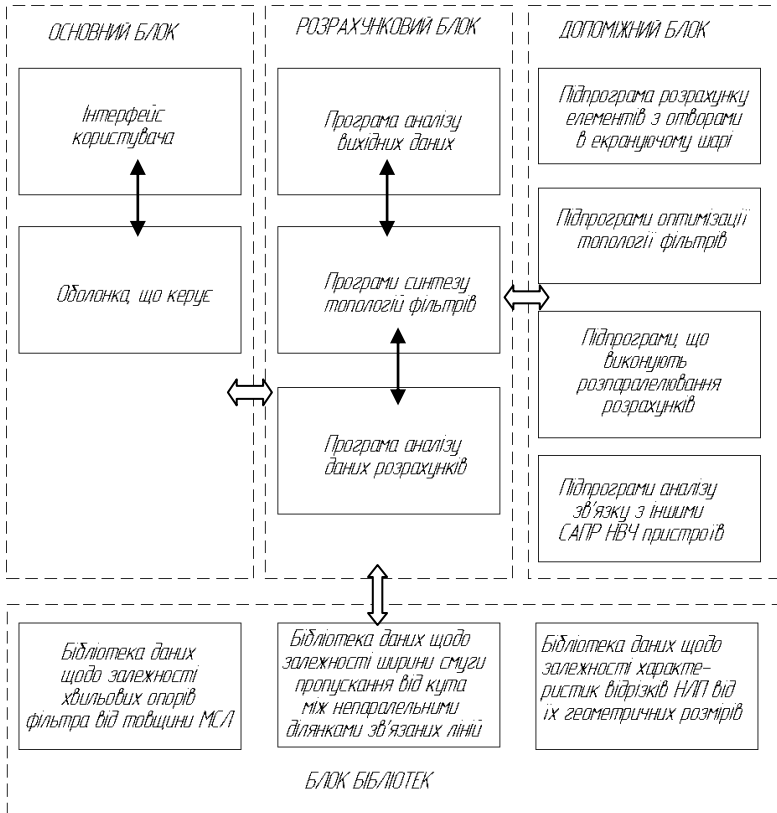


Рис. 4. Структура розробленої системи автоматизованого синтезу

На основі аналізу обмежень щодо параметрів елементів резонаторних структур, які реалізують фізично та технологічно, та відповідних методик проектування сформовано характеристики системи проектування.

Архітектура розробленої системи синтезу має модульну структуру, що дає можливість вносити зміни та доповнення до складу системи, розширювати її функції та використовувати різні мови програмування (так, для різних блоків було обрано C++ та VisualFortran).

Вихідними даними для системи синтезу топологій фільтрів НВЧ є бажані частотні характеристики фільтру, що синтезується, параметри підкладки та обмеження щодо геометричних розмірів окремих елементів, пов'язані з можливостями технологій, які використовують на конкретному виробництві.

Результатом роботи системи синтезу є амплітудно-частотна характеристика синтезованого фільтру НВЧ, тип використаної резонаторної структури, порядок фільтра, геометричні розміри окремих топологічних елементів.

Алгоритм роботи розробленої системи синтезу топологій фільтрів НВЧ такий.

Крок 1. Запускається програма для введення даних про тип фільтра, який необхідно синтезувати, його частотні характеристики та параметри підкладки.

Крок 2. Запускається програма, що аналізує введені дані.

Крок 3. Виконується вибір топологічного рішення – типу резонаторних структур, на яких буде реалізовано фільтр.

Крок 4. Підключається блок розрахунку геометричних розмірів топології, що включає в себе ряд програм, які стосуються конкретних топологічних рішень.

Крок 4.1. При розрахунку фільтрів, що реалізовані з використанням таких елементів, як щілина в екрануючому шарі, трикутні резонатори, шпилькові резонатори з непаралельними ділянками зв'язаних ліній чи відрізки нерегулярних ліній передачі підключаються додаткові програми, які виконують розрахунки з використанням квазістатичного аналізу топології. Так, при виконанні розрахунку щілини в екрануючому шарі застосовується генетичний алгоритм аналізу поперечного перерізу ділянки зв'язаних ліній, а при розрахунку топології фільтра на трикутних резонаторах – програми для об'єднання багатополосників після розрахунку  $S$ -матриці окремих елементів тощо.

Крок 4.2. Розрахунковий блок у разі вибору певних топологічних рішень може посилатися до бібліотек даних, що містять інформацію про залежність хвильових опорів від товщини мікросмушкової лінії, ширини смуги пропускання від кута між ділянками зв'язаних ліній та типу АЧХ від розмірів окремих ділянок відрізка НЛП.

Крок 4.3. Для прискорення розрахунків використовується блок розпаралелювання операцій на різних комп'ютерах, який визначає вид та об'єм розрахунків, що виконується кожною окремою ЕОМ.

Крок 5. Після проведення розрахунків запускається програма аналізу отриманих результатів. При їх відповідності заданим вимогам робота програми може бути завершена, в іншому випадку виконується перехід до наступного кроку.

Крок 6. Запускається блок оптимізації. В цьому разі відбувається уточнення даних для першого кроку і продовжується виконання роботи системи до отримання необхідних результатів.

Проведено оцінку швидкодії роботи системи синтезу топологій фільтрів НВЧ у залежності від задач, що розв'язуються. Використання розпаралелювання шляхом обчислення різних топологічних рішень під час синтезу фільтрів на окремих процесорах зменшує тривалість розрахунків на 39% у порівнянні з послідовним виконанням обчислень без використання розподілення задач.

Показано застосування розробленої системи проектування на прикладі синтезу мікросмужкового СПФ на резонаторах трикутного типу та СЗФ на відрізьку нерегулярної мікросмужкової лінії. Результати роботи підтверджені експериментально і актами впровадження.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання – підвищено рівень автоматизації проектувальних робіт шляхом розроблення методів автоматизованого синтезу топологій мікросмужкових фільтрів НВЧ з використанням резонаторів різних типів, які забезпечують розширення можливостей реалізації АЧХ фільтрів та покращення їх характеристик у порівнянні з проектуванням за існуючими методиками розрахунку з використанням теорії довгих ліній. Розроблені методи уможливають синтез фільтрів, що реалізовані з використанням резонаторів різних типів, таких як фільтри на шпилькових резонаторах, фільтрів з отворами в екрануючому шарі, фільтри на трикутних резонаторах, фільтри з фрактальною реалізацією резонаторів. При проведенні роботи отримано такі результати:

1. Проаналізовано існуючі методи синтезу фільтрів, визначено можливість їх застосування для різних видів резонаторних структур. Проведено огляд існуючих традиційних та сучасних конструкцій мікросмужкових фільтрів, виконано їх класифікацію за видом АЧХ та резонансними структурами, що використовуються в них. Значна кількість запропонованих конструкцій дозволяє знизити рівень паразитних смуг пропускання. Базовий елемент, що представляє собою ділянку зв'язаних ліній з прямокутною щілиною в екрануючому шарі, дає можливість розширити смугу пропускання СПФ, при цьому покращуються значення направленості та широкосмуговості. Запропоновано методіку аналізу пристроїв НВЧ з отворами в екрануючому шарі для одно- та багат шарових підкладок. Розраховані значення ємностей неоднорідностей можуть використовуватись для уточненого аналізу фільтрів на МСЛ.

2. Запропоновано метод синтезу топологій мікросмужкових фільтрів на трикутних резонаторах шляхом попереднього проведення квазістатичного аналізу та створення матриці ємностей неоднорідностей, що дає можливість проектувати різні типи фільтрів на трикутних резонаторах.



3. Розроблено метод проектування мікросмужкових смугопр пропускаючих фільтрів на резонаторах шпилькового типу, який включає використання отвору в екрануючому шарі та непаралельність ділянок зв'язаних ліній, що дає можливість отримати фільтри з шириною смуги пропускання від вузької до понадширокої та покращити придушення паразитних смуг пропускання у смузі загородження. Для цього проаналізовано залежність ширини смуги пропускання від кута між непаралельними ділянками зв'язаних ліній в СПФ на шпилькових резонаторах, результати зведено до масиву, що використовується в розробленій системі автоматизованого синтезу топологій мікросмужкових ліній.

4. Удосконалено метод пошуку рішень для розв'язку задачі оптимізації шляхом проведення початкової кластеризації з використанням самоорганізаційних карт Кохонена перед виконанням пошуку мінімуму генетичним алгоритмом. Такий підхід демонструє точніші результати синтезу топологій та дає можливість значно скоротити витрати часу завдяки можливості розпаралелювання обчислень на різних кластерах.

5. Вперше запропоновано метод синтезу топологій фільтрів на відрізках нерегулярних ліній, для яких немає точних методик розрахунку. Отримані в результаті проектування фільтри мають такі переваги, як мініатюрність, можливість видалення другого паразитного резонансу майже на дві октави, підвищена власна добротність першого робочого резонансу. Проаналізовано залежність властивостей частотних характеристик фільтрів, побудованих на відрізку неоднорідної мікросмужкової лінії, від його геометричних розмірів, а саме довжини і зміни ширини. Відрізки НЛП описано як базові елементи для проектування фільтрів і розглянуто за допомогою квазістатичного аналізу. Це дає можливість синтезувати топології фільтрів, для проектування яких немає точних методик розрахунку.

6. Проаналізовано залежність хвильових опорів мікросмужкового фільтра від товщини смужки, побудовано номограму для визначення оптимальної топології з урахуванням товщини мікросмужкової лінії; результати аналізу зведено у масив, який використовується у розробленій системі синтезу топологій мікросмужкових фільтрів. Виконано проектування СПФ на шпилькових резонаторах з отворами в екрануючому шарі під ділянками зв'язаних ліній.

7. Запропоновано методику синтезу топологій мікросмужкових фільтрів з фрактальною реалізацією резонаторів, що робить можливим проектування мікросмужкових фільтрів при необхідності отримання двох смуг пропускання (загородження) так, щоб друга смуга пропускання (загородження) мала центральну частоту нижче за  $2f_0$ . Також фрактальна геометрія при проектуванні мікросмужкових фільтрів може застосовуватися для зниження рівня паразитних смуг, при цьому таке рішення конструкції фільтра відрізняється відсутністю необхідності збільшення габаритних розмірів фільтра в цілому.

8. Розроблено систему автоматизованого синтезу топологій мікросмужкових фільтрів, що містить у собі велику кількість топологічних рішень для кожного типу фільтрів, має просту структуру і може взаємодіяти з іншими САПР НВЧ пристроїв. Для системи запропоновано алгоритми для проектування фільтрів НВЧ на різних резонаторних структурах. Розроблено алгоритм, що включає в себе розрахунок геометричних розмірів топології фільтрів на зв'язаних напівхвильових резонаторах на основі фільтрів-прототипів нижніх частот за відомими методиками, проведення розрахунків геометричних розмірів поперечного перерізу топології мікросмужкового СПФ на шпилькових резонаторах з отворами в заземлюючому шарі за допомогою підпрограми MaxFST, що базується на квазістатичному аналізі поперечного перерізу мікросмужкової топології та генетичному алгоритмі пошуку рішень. Це спрощує проектування мікросмужкових СПФ. Також для системи синтезу розроблено підпрограму, яка дає можливість виконати розрахунок геометричних розмірів ділянки зв'язаних ліній з прямокутним отвором в екрануючому шарі, що базується на квазістатичному аналізі поперечного перерізу мікросмужкової топології і генетичному алгоритмі пошуку рішень. Використання підпрограми дає можливість спроектувати СПФ з ширшою смугою пропускання, кращими характеристиками у смузі загородження і нижчими вимогами до допусків при виробництві, ніж у СПФ на зв'язаних лініях без отворів в екрануючому шарі. Розроблена підпрограма також продемонструвала точність результатів 94% при розрахунку СПФ на резонаторах шпилькового типу.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петрова Е. В. Разработка упрощённого алгоритма проектирования микрополосковых ППФ на шпилечных резонаторах с отверстиями в экранирующем слое на основе электродинамического анализа в программе Ansoft HFSS / Е. В. Петрова, Н. И. Фурманова, А. Ю. Фарафонов // Радиоелектроніка, Інформатика, Управління. – 2012. – № 1. – С. 14–18.
2. Фурманова Н. І. Дослідження залежності хвильових опорів мікросмужкових смугопропускаючих фільтрів на зв'язаних лініях з отворами в екрані від товщини смужки мікросмужкової лінії / Н. І. Фурманова, О. С. Антоненко, Е. М. Шинкаренко, О. Ю. Фарафонов, О. Ю. Воропай // Радиоелектроніка, Інформатика, Управління. – 2010. – № 1. – С. 34–39.
3. Мищенко М. В. Исследование влияния отверстия в экранирующем слое на значение емкостей неоднородностей топологии устройств на связанных микрополосковых линиях / М. В. Мищенко, А. Ю. Фарафонов, С. Н. Романенко, Н. И. Фурманова // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2013. – Вып. 173. – С. 53–57.
4. Фурманова Н. И. Сравнение программ проектирования на примерах

моделирования микрополосковых фильтров с отверстиями в экране / Н. И. Фурманова, А. Ю. Фарафонов, С. Н. Романенко, Э. Н. Шинкаренко, М. В. Мищенко // *Радіоелектроніка, Інформатика, Управління*. – 2012. – № 2. – С. 53–56.

5. Фарафонов А. Ю. Исследование влияния параметров переемычек на характеристики микрополоскового ответвителя Ланге / А. Ю. Фарафонов, Н. И. Фурманова // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2012. – Вып. 170. – С. 7–13.

6. Krishchuk V. Research of dependence PCMF's with the slots in the ground plane impedances on the microstrip line thickness / V. Krishchuk, N. Furmanova, O. Farafonov, E. Shynkarenko / *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії: Міжнар. конф. TCSET'2010 (Львів, Славське)*. – Львів : Вид-во Національного університету "Львів. політехніка", 2010. – С. 277.

7. Фурманова Н. И. Анализ микрополосковых фильтров с отверстиями в экране с помощью различных САПР / Н. И. Фурманова, А. Ю. Фарафонов, С. Н. Романенко / *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доп. V Міжнар. наук.-практ. конф. (22-24 вересня 2010 р., м. Запоріжжя)*. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – С. 198–200.

8. Furmanova N. Influence the bonding jumpers characteristics on the microstrip coupler Lange parameters / N. Furmanova / *Proc. of the Intern. Conf. TCSET 2012 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science"*. 21-24 February 2012 Lviv-Slavsko. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2012. – P. 538.

9. Mishchenko M. Synthesis and electrodynamical analysis of microstrip hairpin filters with slots in the ground plane / M. Mishchenko, N. Furmanova, A. Farafonov, K. Petrova, S. Romanenko / *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2012: матеріали XI Міжнар. конф., присвяченої 60-річчю заснування радіотехнічного факультету у Львівській політехніці, 21-24 лютого 2012 р., Львів, Славське*. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – С. 140.

10. Фарафонов А. Ю. Оптимизация шпилечных микрополосковых фильтров с отверстиями в экранирующем слое / А. Ю. Фарафонов, Н. И. Фурманова, С. Н. Романенко / *22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 9–14 сент. 2012 г.)*. – Севастополь : Вебер, 2012. – С. 553–554.

11. Фурманова Н. И. Оптимизация шпилечных микрополосковых фильтров путем изменения угла между участками связанных линий / Н. И. Фурманова / *22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 9–14 сент. 2012 г.)*. – Севастополь : Вебер, 2012. – Т. 1. – С. 555–556.

12. Фурманова Н. І. Оптимізація топології мікросмужкових фільтрів на шпилькових резонаторах з метою зменшення втрат / Н. І. Фурманова / Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф. (19-21 вересня 2012 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С. 67–68.

13. Фурманова Н. И. Проектирование микрополосковых полосно-пропускающих фильтров на треугольных резонаторах / Н. И. Фурманова / 23-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013): материалы конф. в 2 т. (Севастополь, 9–14 сент. 2013 г.). – Севастополь : Вебер, 2013. – Т. 1.– С. 685–686.

14. Фурманова Н. І. Побудова мікросмужкових фільтрів на основі фракталів / Н. І. Фурманова / Фізика, електроніка, електротехніка – 2014: Матеріали та програма наук.-техн. конф. (Суми, 21-26 квітня 2014 року). – С. 167.

15. Sitsilitsin Yu. Using of parallel computing for the quasi-static analysis of microstrip filters topology / Yu. Sitsilitsin, M. Mishchenko, N. Furmanova, O. Farafonov / Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proc. of the Intern. Conf. TCSET'2014. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 65.

16. Сіциліцин О. Ю. Розпаралелювання генетичних алгоритмів з використанням карт Кохонена / О. Ю. Сіциліцин, Н. І. Фурманова / Інформатика, математика, автоматика – 2014: Матеріали та програма наук.-техн. конф. (Суми, 21-26 квітня 2014 року). – С. 90.

17. Фурманова Н. И. Проектирование фильтров СВЧ на отрезке нерегулярной линии с помощью квазистатического анализа / Н. И. Фурманова, Ю. А. Сицилицин, Н. И. Швагер / 18-й Междунар. молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб.материалов форума. – Т. 1. – Харьков : ХНУРЭ, 2014. – С. 157–158.

18. Фарафонов О. Ю. Проектування фільтрів на основі фракталів / О. Ю. Фарафонов, Н. І. Фурманова / Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф. (17–19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – С. 313-314

19. Фурманова Н. І. Удосконалення методу пошуку рішень для розв'язку задачі оптимізації з використанням генетичного алгоритму шляхом попередньої кластеризації / Н. І. Фурманова, Ю. О. Сіциліцин / Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф. (17–19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – С. 315-316.

## АНОТАЦІЇ

**Фурманова Н.І. Математичне та програмне забезпечення автоматизованого синтезу топологій фільтрів НВЧ.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – “Системи автоматизації проектувальних робіт”. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2015.

В дисертаційній роботі вирішено важливе наукове завдання – розроблено та удосконалено методи синтезу топологій мікросмужкових фільтрів НВЧ. Розроблені методи дають можливість виконувати синтез фільтрів, що реалізовані з використанням резонаторів різних типів, таких як фільтри на шпилькових резонаторах, фільтрів з отворами в екрануючому шарі, фільтри на трикутних резонаторах, на відрізках нерегулярної лінії передачі, фільтри з фрактальною реалізацією резонаторів. Запропоновано алгоритми системи синтезу топологій мікросмужкових фільтрів, які забезпечують одержання топологій, що відповідають заданим вимогам, з використанням резонаторних структур, у тому числі таких, для яких немає точних методів та методик синтезу. Розроблена система автоматизованого синтезу топологій має досить високу швидкодію завдяки оптимальному поділу блоків програми з метою мінімальної взаємодії між ними, що забезпечує високу швидкість обчислень.

**Ключові слова:** мікросмужковий фільтр, резонатори шпилькового типу, трикутні резонатори, відрізок нерегулярної лінії, самоорганізаційна карта Кохонена.

**Фурманова Н. И. Математическое и программное обеспечение автоматизированного синтеза топологий микрополосковых фильтров СВЧ.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – “Системы автоматизации проектировочных работ”. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2015.

В диссертационной работе решено важное научное задание – разработаны и уточнены методы синтеза топологий микрополосковых фильтров СВЧ. Разработанные методы позволяют выполнять синтез фильтров, реализованных с использованием резонаторов различных типов, в том числе фильтров на резонаторах шпильчного типа, фильтров с отверстиями в экранирующем слое, фильтров на треугольных резонаторах, на отрезках линии передачи, фильтров с фрактальной реализацией резонаторов.

Предложен метод синтеза фильтров на шпильчных резонаторах с такими особенностями топологии, как наличие отверстия в экранирующем слое, непараллельность связанных линий, фрактальная реализация шпильчных резонаторов.

Разработан метод синтеза для фильтров на треугольных резонаторах, основанных на представлении топологии в виде последовательности отрезков связанных линий, последующем квазистатическом анализе и расчете матрицы емкостей и частотных характеристик синтезируемого фильтра.

Впервые разработан метод синтеза микрополосковых фильтров на отрезках нерегулярной линии передачи, для которых нет точных методик расчета. Проанализирована зависимость свойств частотных характеристик фильтров, построенных на отрезке нерегулярной линии передачи, от его геометрических размеров. Создана база данных, позволяющая получать требуемые частотные характеристики путем комбинирования на одной подложке нескольких отрезков нерегулярной линии передачи.

Усовершенствован метод поиска решений генетическим алгоритмом посредством предварительной кластеризацией с использованием самоорганизующихся карт Кохонена, что позволяет снизить аппаратно-временные затраты и распараллелить выполнение расчетных задач.

Разработанная система автоматизированного синтеза топологий имеет достаточно высокое быстродействие благодаря оптимальному разделению блоков программы с целью минимального взаимодействия между ними, что обеспечивает высокую точность расчетов.

**Ключевые слова:** микрополосковый фильтр, резонаторы шпилечного типа, треугольные резонаторы, отрезок нерегулярной линии, самоорганизующаяся карта Кохонена.

**Furmanova N. I. Software of the automated computer-aided synthesis of microwave filters' topologies.** – Manuscript.

Thesis for PhD degree on technical sciences in specialty 05.13.12 – "Computer aided design systems". – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2015.

In the dissertation resolved important scientific and technical problem - designed and improved synthesis methods of microwave filters' topologies.

The methods allow the synthesis of filters which are implemented using resonators of different types, such as hairpin resonators, slot in the ground plane, triangular resonators, non-uniform transmission line and fractal resonators.

Algorithms for system of synthesis of microstrip filters' topologies has proposed. They provide a need topologies comply to the given requirements, using resonating structures, including those for which no exact methods and techniques of synthesis. The method uses self-organizing maps Kohonen and makes it possible to reduce the requirements for hardware and time expenses to parallelize execution and computing tasks.

The developed system of automated topologies synthesis has enough high speed through the optimal division of programs blocks to minimal interaction between them, which provides high speed computing.

**Keywords:** microstrip filter, hairpin resonator, triangular resonator, non-uniform transmission line, self-organizing map.