

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**МАМЕДОВ ДОВЛЕТ БАЙРАМОВІЧ**



УДК 004.891: 621.372.852.1: 621.372.413

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ  
КОНСТРУКЦІЙ НВЧ-ФІЛЬТРІВ НА ОСНОВІ ЧАСТКОВО  
ЗАПОВНЕНИХ ХВИЛЕВОДНО-ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ**

05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, с.н.с  
**Ющенко Олександр Георгійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри «Систем інформації»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Карпуков Леонід Матвійович**,  
Запорізький національний технічний університет,  
завідувач кафедри захисту інформації

доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Бутрим Олександр Юрійович**,  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна,  
провідний науковий співробітник,  
професор кафедри теоретичної радіофізики

Захист відбудеться 2 грудня 2016 о 13-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «\_\_» жовтня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В. М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надвисокочастотний (НВЧ) та крайвисокочастотний (КВЧ) діапазони традиційно використовуються для формування інформаційних каналів в космічній техніці, комп'ютерних мережах і мережах мобільного зв'язку. Одной з багатьох вимог при конструюванні приймачів станцій є досягнення високого рівня вибіркової, тобто здатності радіоприймача виділяти з усіх різних за частотою надходячих сигналів, тільки ті, на частоту яких він налаштований. Оскільки число передавальних радіостанцій, які впливають на антену приймача велике, він повинен мати здатність у багато разів послаблювати прийом сигналів тих заважаючих станцій, які навіть трохи відрізняються по частоті від прийнятої, тому характеристики станцій значно залежать від електричних параметрів багатоланкових смугових фільтрів, що встановлюються в приймачах цих станцій. Серед відомих фільтрів конструкції на основі частково заповнених хвилеводно-діелектричних резонаторів (ХДР) з використанням лейкосапфіра або кварцу, займають особливе місце внаслідок високих показників якості, як наприклад, висока власна добротність, рідкісний спектр паразитних смуг, високий рівень потужності, що передається.

Часткове заповнення в Н-площині хвилеводу дозволяє реалізувати коливання квазі- $H_{101}$ , такі конструкції фільтрів дозволяють максимально віддалити паразитну смугу фільтра: до подвоєною робочої частоти і вище. Часткове заповнення в Е- площині хвилеводу дозволяє реалізувати коливання  $LM_{101}$ , добротність таких фільтрів в півтора – два рази вище добротності фільтрів з частковим заповненням в Н-площині, однак, паразитная смуга у цих конструкцій ближче до робочої, ніж у них. Розробці методу інтелектуального синтезу та оптимізації відзначених НВЧ-фільтрів і присвячена дисертаційна робота.

Традиційно завдання параметричного синтезу НВЧ-фільтрів вирішувалася шляхом застосування параметрів прототипної схеми теорії ланцюгів в якості вихідних для процедури оптимізації з використанням ітераційних методів. Такий підхід і програмне забезпечення на його основі мали низьку ефективність пошуку глобального екстремуму цільової функції, що призвело до необхідності використання нових методів штучного інтелекту. Сучасні системи автоматизованого проектування НВЧ-пристроїв, такі як AWR Microwave Office, CST Microwave Studio, AnSoft High Frequency System Simulator, Sonnet Suites и  $\mu$ Wave Wizard, для вирішення завдання параметричного синтезу використовують штучні нейронні мережі і евристичні алгоритми, такі як: генетичні, мурашині, сорнякові та інші. Дані методи є універсальними, але не враховують специфіку проєктованих пристроїв, що в свою чергу призводить до таких наслідків, як різке зростання «процесорного часу» і неможливість отримання оптимального рішення в прийнятному часовому інтервалі. В цілому слід розуміти, що низька продуктивність цих методів обумовлена тим, що переважна більшість варіацій (як, наприклад, отримання нової популяції в генетичних алгоритмах), або випадкове змінення

параметрів оптимізації в градієнтних методах є необґрунтованими з точки зору електродинаміки процесів.

Тому актуальною стає розробка альтернативного методу інтелектуального синтезу, який спирається на формалізовані знання провідного експерта в даній області та строгі електродинамічні моделі пристроїв, що оптимізуються. Дані знання є основою експертної системи (ЕС), ключова ідея якої полягає в аналізі амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), яка розраховується на основі рішення електродинамічної задачі розсіювання електромагнітної хвилі  $H_{10}$  на багатоланцюговій резонансній структурі, що утворена ланцюжком зв'язаних резонаторів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з основними напрямками розвитку телекомунікацій України, визначеними в Законах України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні», «Про Концепцію Національної програми інформатизації», «Про Національну програму інформатизації», постановою Верховної Ради України «Про основні завдання впровадження інформаційних технологій».

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Системи інформації» факультету «Комп'ютерних та інформаційних технологій» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Результати роботи використані при розробці високочутливої НВЧ-апаратури в рамках науково-дослідної роботи «Розробка, виготовлення і постачання радіоастрономічної приймальної системи (РПС) для оснащення антен малих радіотелескопів», шифр «Квазар-М-Сатурн», номер державної реєстрації 0112U007540 від 22.11. 2012 р., в якій дисертант був виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка методу інтелектуального синтезу та оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР, що спирається на технології штучного інтелекту, а саме експертні системи та строгі математичні моделі пристроїв, що оптимізуються.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

1. Аналіз предметної області, існуючих методів оптимізації та програмного забезпечення проектування НВЧ-пристроїв.

2. Розробка методу інтелектуального синтезу багатоланкових НВЧ-фільтрів на основі ХДР з частковим заповненням в Н- і Е- площинах, що спирається на строгі електродинамічні моделі.

3. Розробка строгих математичних моделей багатоланкових НВЧ-фільтрів з ХДР частково заповненими в Н- та Е- площинах на основі методів узагальненої матриці розсіювання і часткових областей, дослідження збіжності розроблених моделей.

4. Розробка програмного забезпечення автоматизованого проектування НВЧ-фільтрів на базі розробленої експертної системи і математичних моделей.

5. Експериментальне підтвердження працездатності розробленого методу, вирішення практичних завдань синтезу і оптимізації НВЧ-фільтрів, порівняння розрахованих конструкцій з відомими аналогами.

**Об'єктом дослідження** є процес автоматизованого проектування НВЧ-фільтрів на основі хвильоводно-діелектричних резонаторів з частковим заповненням в Н- і Е- площинах.

**Предметом дослідження** є метод інтелектуального синтезу та оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР.

**Методи дослідження.** Завдання дисертаційної роботи вирішувалася із застосуванням чисельно-аналітичних методів електродинаміки НВЧ (метод узагальненої матриці розсіювання, метод часткових областей), методів штучного інтелекту (експертні системи), сучасних методів і технологій програмування (ООП, C ++ / CLI).

**Наукова новизна роботи.** Встановлені в дисертації наукові положення є суттєвим доповненням знань, необхідних для розвитку високоякісної елементної бази радіотелекомунікаційних технологій України та світу, а саме рішення задачі автоматизованого проектування багатоланцюгових фільтрів на основі частково заповнених ХДР. У дисертаційній роботі отримані наступні результати, які характеризуються науковою новизною:

1. Вперше розроблено метод інтелектуального синтезу багатоланкових НВЧ-фільтрів на основі ХДР з частковим заповненням в Н- і Е- площинах, що спирається на строгі електродинамічні моделі та який, на відміну від існуючих, не вимагає від конструктора проведення аналізу чутливості структури, вказівки допусків і параметрів що впливають на цільову функцію; зміна параметрів структури, яка оптимізується, відбувається на підставі експертної оцінки, що зводить до мінімуму число фізично необґрунтованих ітерацій пошуку екстремуму цільової функції.

2. Вперше розроблено строгі математичні моделі оригінальних багатоланкових НВЧ-фільтрів з частково заповненими ХДР, відмінністю яких є використання методів узагальненої матриці розсіювання і часткових областей, що дає можливість врахування довільної кількості хвиль в позамежному хвильоводі.

3. Вперше розроблено спосіб оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР за такими параметрами як: коефіцієнт прямокутності, частотне положення полюса загасання АЧХ фільтра, максимальна частотна відстань до паразитного смуги, який спирається на новий метод інтелектуального синтезу і дозволяє значно зменшити час проектування цих конструкцій.

**Практичне значення отриманих результатів.** Використання розробленого методу інтелектуального синтезу та оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів з частково-заповненими ХДР, що опирається на строгі математичні моделі дозволяє проектувати фільтри з високою точністю і значно

зменшити час проектування. На базі запропонованого методу створено програмне забезпечення Sapphire CAD для автоматизованого проектування НВЧ-фільтрів на основі ХДР.

Розроблені строгі математичні моделі, які спираються на метод узагальненої матриці розсіювання, дають можливість проектування фільтрів з високою точністю навіть в міліметровому діапазоні хвиль, оскільки ці моделі дозволяють враховувати будь-яку кількість хвиль в позамежному хвилеводі.

Показана можливість технічної реалізуємості смугових фільтрів, на основі частково-заповнених ХДР в КВЧ діапазоні, що відповідають ультрасучасним стандартам ECMA-387, WirelessHD, IEEE 802.15.3c та IEEE 802.11ad.

Проведено порівняльний аналіз показників якості спроектованих фільтрів із фільтрами на іншій елементній базі.

Наукові і практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для студентів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» з дисциплін «Технічна електродинаміка», «Чисельні методи в інформатиці» напряму 6.050101. Результати досліджень використовуються в дипломному проектуванні, що підтверджується відповідним актом впровадження.

Розроблене програмне забезпечення введено в практику проектування НВЧ-фільтрів на ПАТ «НВП Сатурн», що підтверджується відповідним актом впровадження.

**Достовірність** нових наукових результатів і висновків дисертаційної роботи підтверджується:

- обґрунтованістю як припущень, прийнятих при електродинамічному моделюванні задач розсіювання, так і методів математичної фізики;
- відповідністю результатів проектування тим, що спираються на інші моделі;
- збігом результатів експериментальних та чисельно-аналітичних досліджень конструкцій фільтрів;
- результатами практичного використання запропонованого методу синтезу та оптимізації конструкцій фільтрів.

**Особливий внесок здобувача.** Дисертаційне дослідження є самостійно виконаною роботою, в якій відображені особистий авторський підхід і особисто отримані теоретичні, експериментальні і прикладні результати, що відносяться до проектування оригінальних багатоланцюгових НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР. У працях, опублікованих у співавторстві автору належить ряд наукових і практичних результатів: на основі технологій штучного інтелекту, а саме ЕС, розроблений метод інтелектуального синтезу і оптимізації оригінальних конструкцій багатоланкових НВЧ-фільтрів з частково заповненими ХДР [1, 4–5, 12, 14–15], використовуючи методи узагальненої матриці розсіювання і часткових областей розроблено математичні моделі НВЧ-фільтрів з частковим заповненням в Н- і Е- площинах [6–7, 13, 16],

створені на їх основі динамічно приєднувані бібліотеки. Запропонований метод реалізований у вигляді програмного забезпечення – системи автоматизованого проектування НВЧ-фільтрів Sapphire CAD [8]. Розроблен спосіб оптимізації оригінальних конструкцій НВЧ-фільтрів з частково заповненими ХДР [3, 9, 11], проведено порівняльний аналіз з відомими аналогами фільтрів на мікросмушкових резонаторах [2, 10].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи були докладені на міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми інформатики і моделювання», м. Харків 2010 – 2011, 2013, університетської науково-практичної студентської конференції «Інформаційні технології та інтелектуальна власність», м. Харків 2013, міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», м. Харків 2014 року, міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем», м. Дніпропетровськ 2014 року, науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів «Інформатика, управління і штучний інтелект», м. Харків, 2014 – 2015, а також увійшли в замовну пленарну доповідь наукового керівника на міжнародній конференції: International Conference and Exhibition on Satellite, At August 17-19, 2015 Houston, Texas, USA (відзначена грамотою оргкомітету як така, що є значним науковим вкладом).

**Публікації.** За результатами наукових дисертаційних досліджень автор опублікував 16 наукових праць, з яких 5 статті – в спеціалізованих фахових виданнях, 2 у зарубіжних журналах «Wireless Engineering and Technology» і «Electrical and Electronic Engineering», 8 публікацій у збірниках наукових праць конференцій, 1 авторське свідоцтво Державної служби інтелектуальної власності України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 150 сторінок; з них 40 рисунків по тексту; 1 рисунок на 1 окремої сторінці; 14 таблиць по тексту; списку використаних джерел зі 150 найменувань на 14 сторінках, 4 додатки на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність теми дисертації, сформульовано її мету і задачу, визначено об'єкт, предмет і методи, визначено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, надано відомості про публікації у фахових виданнях, наукових журналах, збірниках праць конференцій, авторські свідоцтва, окреслено структуру та обсяг дисертації.

У **першому розділі** викладені основні положення машинного проектування НВЧ-пристроїв, описані ключові етапи конструювання із застосуванням комп'ютера, а саме: моделювання, аналіз і оптимізація.

Розглядаються відомі методи оптимізації та сучасне програмне забезпечення проектування НВЧ-пристроїв.

Головним недоліком існуючих методів оптимізації є необґрунтованість переважної більшості варіацій параметрів з точки зору електродинаміки процесів. Сучасне програмне забезпечення проектування НВЧ-пристроїв таке як AWR Microwave Office, Microwave Studio від компанії CST, HFSS, Sonnet Suites,  $\mu$ Wave Wizard, не враховує специфіку об'єктів, що конструюються, через що оптимізація пристрою стає неможливою, користувачеві пропонується самостійно провести аналіз чутливості пристрою, вказати системі параметри і допуски, що впливають на цільову функцію. Ці програмні комплекси мають високу вартість, вимагають високу кваліфікацію конструктора, використовують повільні універсальні методи оптимізації, в яких проектуємий пристрій розглядається як чорний ящик; апріорні властивості і характерні особливості технічного завдання не враховуються, а кінцевий результат не має оцінки похибки проектування.

Проводиться постановка задачі синтезу та оптимізації НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР (рис. 1).

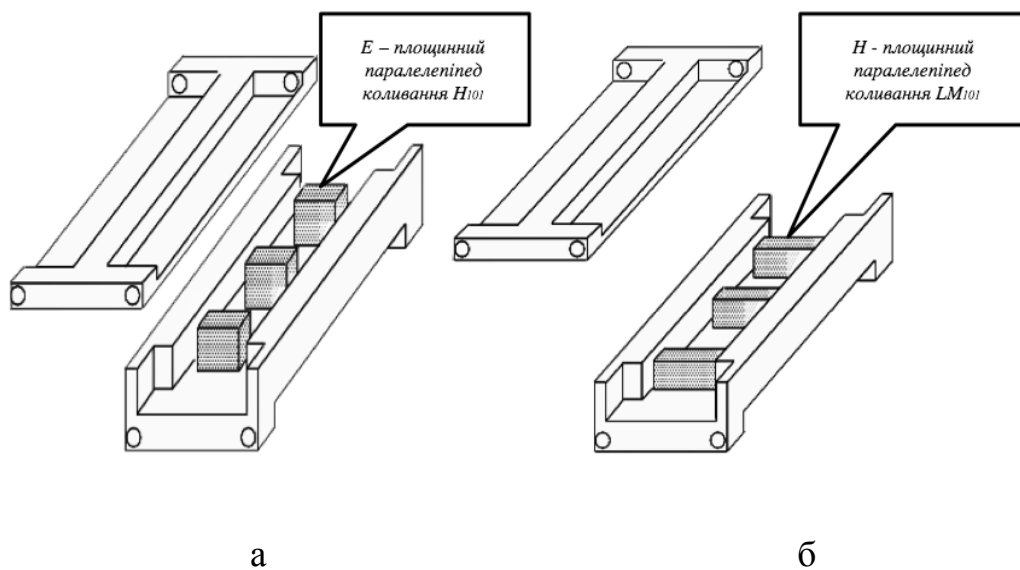


Рис 1. Конструкції оригінальних смугових фільтрів на ХДР з частковим заповненням в Н- площині: коливання  $H_{101}$  (а), Е- площині: коливання  $LM_{101}$  (б)

В кінці розділу підводиться підсумок стану проблеми, формулюються цілі та завдання дослідження.

У **другому розділі** на основі технологій штучного інтелекту, а саме експертних систем, розроблено метод синтезу та оптимізації оригінальних конструкцій багатоланцюгових НВЧ-фільтрів з частково заповненими ХДР в Н- і Е- площинах. Описано спосіб ітераційної оптимізації за такими параметрами як: коефіцієнт прямокутності, частотне положення полюса загасання АЧХ фільтра, максимальна частотна відстань до паразитного смуги. Наведено етапи створення ЕС і процес проектування НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР.



Основною ідеєю ЕС є моделювання процесу розуміння поточної амплітудно-частотної характеристики фільтра експертом. Знання експерта повинні бути достатні для того, щоб зрозуміти як потрібно змінити геометрію фільтра, щоб його характеристика при кожній зміні одного з параметрів наближалася від поточного стану до заданого. Отже, фільтри, які підлягають оптимізації, являють собою ланцюжок частково-заповнених ХДР на позамежному хвилеводі. Одноланковий фільтр, який включається в основний тракт (регулярний хвилевід), показаний на рис. 2.

Основна мода  $H_{10}$  регулярного хвилеводу при падінні на цю неоднорідність відбивається на всіх частотах, крім тих, що відповідають резонансам діелектричного вкладника. На частотах цих резонансів, по довжині резонатора укладається  $n$ - напівхвиль. На рис. 3 показано розподіл електричної компоненти основних коливань: синфазного  $H_{101}$  і протівофазного  $H_{102}$ .

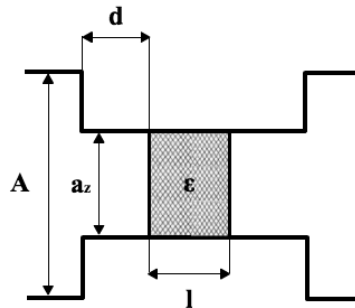


Рис. 2. Одноланковий смуговий фільтр (вид зверху):  $L$  – довжина резонатора;  $d$  – довжина вхідної ділянки позамежного хвилеводу;  $\epsilon$  – діелектрична проникність резонатора

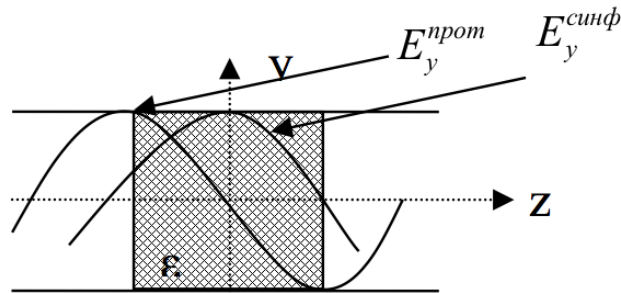


Рис. 3. Розподіл електричної компоненти поля синфазного і протівофазного коливань

Для основного коливання буде справедливим наближене співвідношення, отримане із визначення частоти за умови, що по довжині резонатора вкладається приблизно половина довжини хвилі коливання

$$f^{H_{101}} \approx \frac{1}{2l\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Звідси ми виводимо логічне правило – чим більше довжина резонатора, тим менше частота і, навпаки. Аналогічні залежності частоти від діелектричної проникності (пропорційні кореню частоти). Розрахункові значення підтверджують зроблені висновки (рис. 4, рис. 5).

Із залежності частоти ХДР від діелектричної проникності, робимо висновок – якщо є розрахований варіант конструкції фільтра із деяким

значенням  $\varepsilon$ , то в разі переходу до розрахунку із більшим його значенням, нам необхідно шукати довжину резонатора за умови, що вона буде менше, ніж в попередньому випадку і, навпаки.

Оскільки, для формування смуги пропускання фільтра використовуються декілька резонаторів, то розглянемо динаміку частот зв'язку двох ХДР (рис. 6, рис. 7).

Як видно з рис. 7 при  $L$  рівному нулю частоти із синфазним і протифазним зв'язком переходять в частоти з синфазного і протифазного коливаний резонатора подвоєної довжини, відповідно, а при середніх значеннях  $L$  відмінність в частотах зв'язку значна, а при великих значеннях  $L$ , внаслідок затухаючого характеру поля, частоти зв'язку коливаний збігаються з частотою одиночного резонатора.

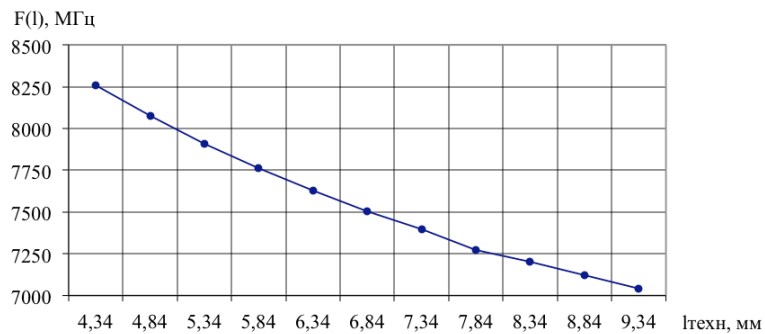


Рис. 4. Типова залежність резонансної частоти ХДР від довжини резонатора  $l$

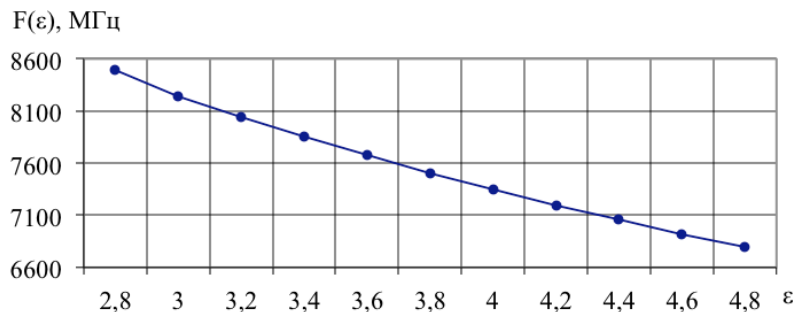


Рис. 5. Типова залежність резонансної частоти ХДР від величини діелектричної проникності  $\varepsilon$

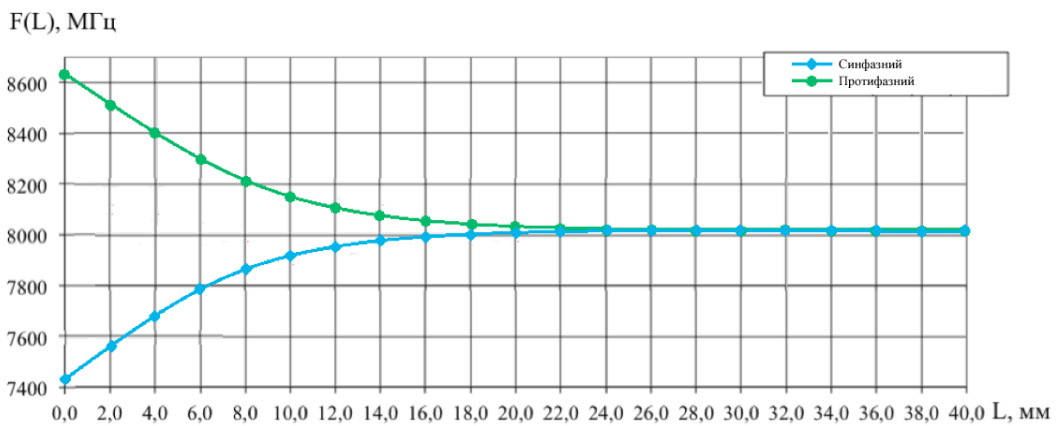


Рис. 6. Типова залежність частот зв'язку ХДР від відстані  $L$  між ними

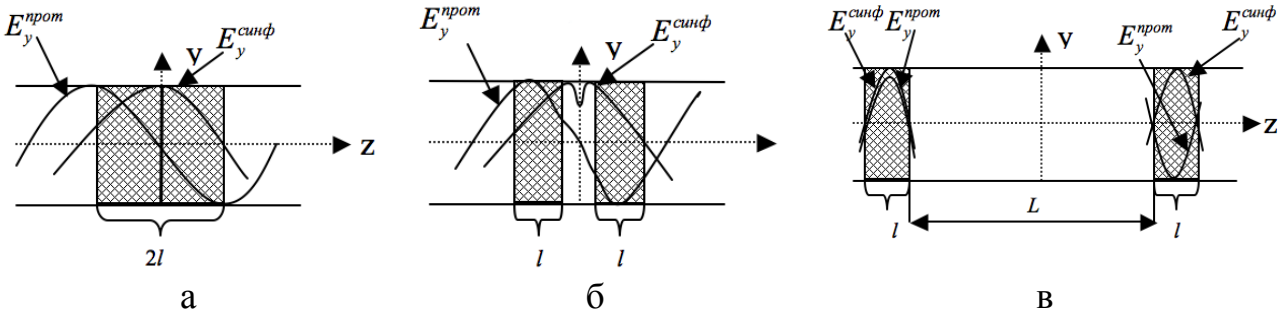


Рис. 7. Схематична будова електричної компоненти поля при різних значеннях проміжку зв'язку  $L$ : при  $L = 0$  (а), при середніх значеннях  $L$  (б), при великих значеннях  $L$  (в)

Із аналізу динаміки частот зв'язку можна сформулювати такі логічні правила: чим менше відстань між резонаторами, тим більше їх взаємний зв'язок, а також відмінність в частотах зв'язку і ширше смуга пропускання фільтра і, навпаки.

Таким чином, тут показано як на підставі електродинамічного аналізу одиночного і пов'язаних ХДР формулюються основні правила бази знань ЕС, що моделює процес розуміння експерта. Істинність логічних умовиводів в кінцевому рахунку, перевіряється здатністю інтелектуальної системи до синтезу конструкцій фільтрів із заданою формою АЧХ.

База знань розробленої ЕС містить базу правил у вигляді продукцій і базу фактів. Правила виражаються у вигляді тверджень типу:

IF: <умова 1>, <умова 2>, ..., <умова N>,

THEN: <висновок 1>, <висновок 2>, ..., <висновок N>

Нижче наведені деякі фрагменти бази правил, створеної в процесі концептуалізації і формалізації.

Правило 1.

IF: проводиться оптимізація одноланкового фільтра, пік АЧХ широкий (ширина смуги за рівнем 3 дБ > 1% від робочої частоти);

THEN: збільшити довжину вхідних ділянок поза межного хвилеводу.

Правило 2.

IF: проводиться оптимізація одноланкового фільтра, поточна частота менше заданої;

THEN: зменшити довжину центрального резонатора

Правило 3.

IF: проводиться оптимізація одноланкового фільтра, поточна частота більше заданої;

THEN: збільшити довжину центрального резонатора.

Розроблена експертна система є статичною, оскільки завдання, яке вона вирішує, а саме проектування НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР, не передбачає врахування змін навколишнього середовища. Область застосування цієї системи – проектування НВЧ-пристроїв. Етапи оптимізації одноланкового фільтра наведено на рис. 8, етапи оптимізації  $n$ -ланкових фільтрів на прикладі триланкової конструкції представлені на рис. 9.

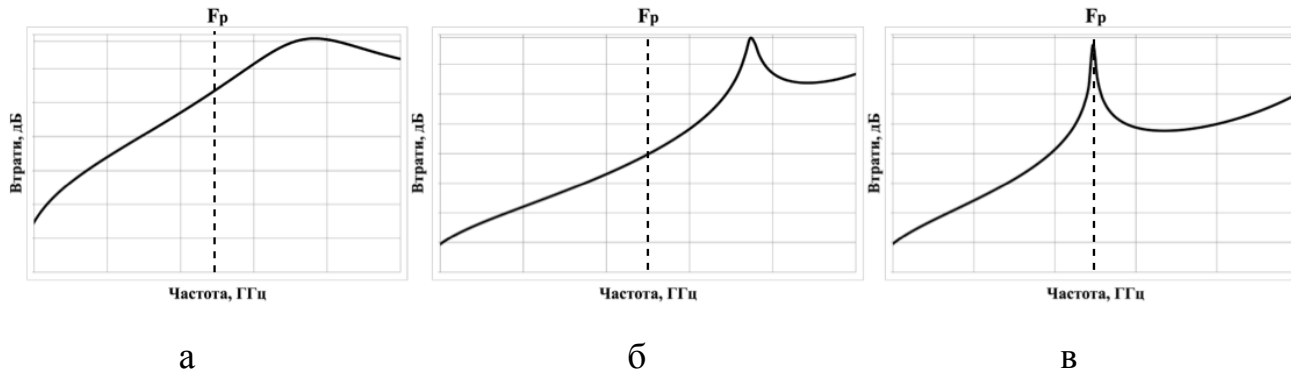


Рис. 8. Етапи оптимізації одноланкового фільтра: розрахунок первісної АЧХ (а), формування піку АЧХ (б), настройка фільтра на задане значення робочої частоти (в)

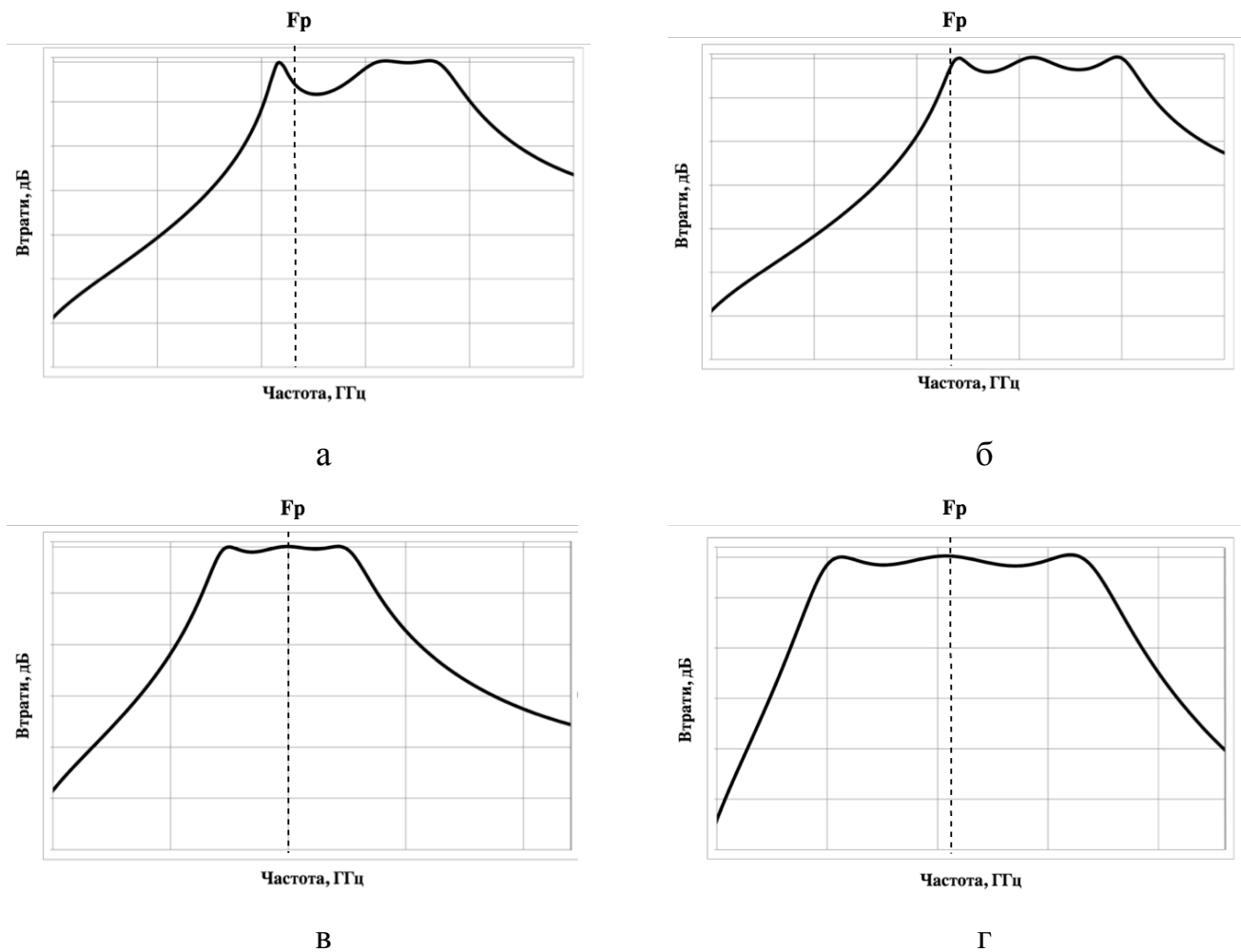


Рис. 9. Етапи оптимізації  $n$ -ланкових фільтрів на прикладі триланкової конструкції: розрахунок первісної АЧХ - виявлений провал ліворуч (а), коригування рівня провалів (б), настройка фільтра на задане значення робочої частоти (в), настройка фільтра на задане значення ширини смуги пропускання (г)

В кінці розділу продемонстрована ефективність розробленого методу, показано, що зміна параметрів відбувається виключно обґрунтовано з точки зору електродинаміки процесів, система не виробляє непотрібних варіацій, тим самим можна судити стосовно апіорної ефективності методу з точки зору витрачаємого машинного часу.

У **третьому розділі** представлені строгі математичні моделі НВЧ-фільтрів із частковим заповненням в Н- і Е- площинах (рис. 10). Ці моделі побудовані на основі розв'язання задачі розсіювання методами узагальненої матриці і часткових областей.

Дані моделі дозволяють підвищити точність проектування НВЧ-фільтрів, оскільки дозволяють враховувати не тільки хвилі, що поширюються, але і згасаючі, що є особливо важливим при конструюванні пристроїв в міліметровому діапазоні.

Рішення задачі розсіювання зводиться до визначення зв'язку між амплітудами минулих і падаючих хвиль:  $A_m^{M+1}$ ,  $B_m^{M+1}$  і  $A_m^1$ ,  $B_m^1$ . Для цього необхідно розрахувати набіги фаз різних типів хвиль на ділянці однорідного полого хвилеводу.

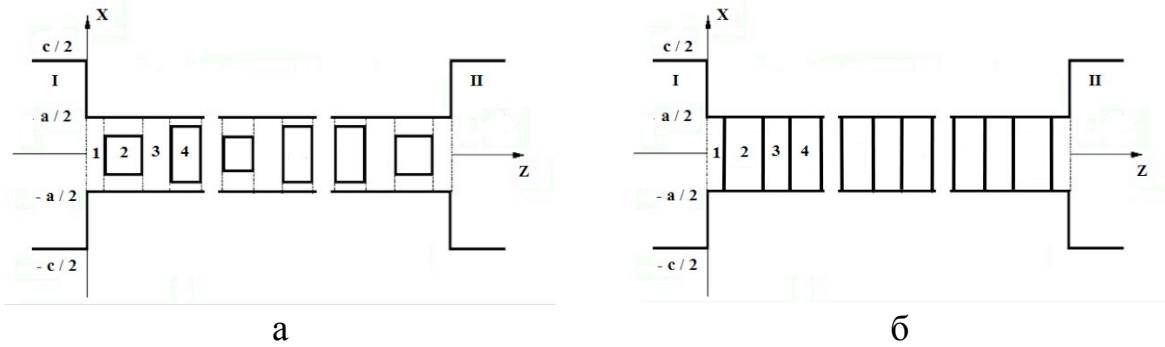


Рис. 10. Геометрії задачі: (а) – часткове заповнення по ширині (Н-хвилі), (б) – часткове заповнення по висоті (LM-хвилі) хвилеводів, де на рисунку: I – регулярний хвилевід, 1 – позамежний хвилевід, 2 - частково заповнений діелектриком

Матриці відображення і проходження структури з частково заповненими ХДР в Н-площині визначаються формулами:

$$[R] + [T] = 2[Inm] \left( \begin{array}{l} ([T_{11}] + [T_{21}] + [E_2^-])([QI_{11}] + [QI_{21}]) + \\ + ([T_{12}][E_2^-] + [T_{22}][E_2^-] + [I])([QI_{12}] + [QI_{22}]) \end{array} \right) [Imn] - [I],$$

$$[R] - [T] = 2[Inm] \left( \begin{array}{l} ([T_{11}] + [T_{21}] - [E_2^-])([QI_{11}] + [QI_{21}]) + \\ + ([T_{12}][E_2^-] + [T_{22}][E_2^-] - [I])([QI_{12}] + [QI_{22}]) \end{array} \right) [Imn] - [I].$$

$$[R] = 2[Inm] \left( \begin{array}{l} ([T_{11}] + [T_{21}])([QI_{11}] + [QI_{21}]) + \\ + ([T_{12}][E_2^-] + [T_{22}][E_2^-])([QI_{12}] + [QI_{22}]) \end{array} \right) [Imn] - [I],$$

$$[T] = 2[Inm] \left( ([E_2^-])([QI_{11}] + [QI_{21}]) + ([QI_{12}] + [QI_{22}]) \right) [Imn].$$

Власне елементи  $R_{11}$  і  $T_{11}$  визначають коефіцієнт відображення і проходження основної хвилі широкого хвилеводу. Тут фігурують такі матриці:

$$[QI] = [Q]^{-1} = \begin{pmatrix} [QI_{11}] & [QI_{12}] \\ [QI_{21}] & [QI_{22}] \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} [Inm]_{nm} &= I_{nm}, [Imn]_{mn} = I_{mn}, \\ [E_2^-] &= \exp(-i\gamma_{1m}l_2)\delta_{mk}, \\ [\gamma_0] &= \gamma_{0n}\delta_{nm}, n=1,2,\dots,N_{\max}, m=1,2,\dots,M_{\max}. \end{aligned}$$

Блоки матриці передачі структури з частково заповненими ХДР в Е- площині можуть бути обчислені через блоки матриці розсіювання за формулами

$$\begin{aligned} T^{(1,1)} &= S^{(1,2)} - S^{(1,1)} [S^{(2,1)}]^{-1} S^{(2,2)}, \\ T^{(1,2)} &= S^{(1,1)} [S^{(2,1)}]^{-1}, \\ T^{(2,1)} &= -[S^{(2,1)}]^{-1} S^{(2,2)}, \\ T^{(2,2)} &= [S^{(2,1)}]^{-1}. \end{aligned}$$

Матриці розсіювання в цьому випадку обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} AS^{(2,2)} &= I - X^T X, \\ AS^{(2,1)} &= 2X^T, \\ S^{(1,2)} &= 2XA^{-1} = S^{(2,1)T}, \\ S^{(1,1)} &= S^{(1,2)}X^T - I, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} X &= W_1^{-1/2} M W_2^{1/2}, \\ A &= I + X^T X, \end{aligned}$$

$M = \{M_{kn}\}_{k=1, n=1}^{N_1, N_2}$  – матриця моментів.

$$M_{kn} = 4 \int_0^{a/2} dx \int_0^{b/2} dy \left[ \vec{e}_n^{(2)} \times \vec{h}_k^{(1)} \right] \cdot \hat{z}, \quad k=1,2,\dots,N_1, \quad n=1,2,\dots,N_2.$$

Також проведено дослідження збіжності розроблених моделей з метою встановлення необхідної кількості хвиль, які враховуються в позамежному хвилеводі. Встановлено, що для фільтра з частковим заповненням в Н- площині достатня точність (похибка менше 0,2%) розрахунку забезпечується при обліку шести хвиль, а для фільтра з частковим заповненням в Е- площині семи хвиль.

**Четвертий розділ** присвячений програмної реалізації запропонованого методу інтелектуального синтезу та оптимізації НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР, а саме розробці системи автоматизованого проектування (САПР) НВЧ-фільтрів – Sapphire CAD. Проведено аналіз вимог розробленої системи, представлений і описаний користувальницький інтерфейс розробленої системи (рис. 11).

Визначено методологію та мову програмування, а саме об'єктно-орієнтоване програмування та мова C++, обрано середовище інтегрованої розробки (Ліцензія на програмне забезпечення: середовище інтегрованої розробки Microsoft Visual Studio 2012, операційну систему Microsoft Windows 7, отримана згідно підписки Microsoft DreamSpark для викладачів, аспірантів і студентів НТУ «ХПІ» на 2014/2015 і 2015/2016 навчальні роки). Програмно

реалізовані математичні моделі НВЧ-фільтрів на основі ХДР з частковим заповненням в Н- і Е- площинах і представлені у вигляді динамічно приєднуваних бібліотек.

Проведено тестування і впровадження розробленого програмного забезпечення. Виділено мінімальні вимоги роботи системи і сформульовані подальші шляхи розвитку.

У **п'ятому розділі** проведено експериментальне дослідження результатів проектування системи Sapphire CAD, а саме порівняння розрахованих конструкцій фільтрів з експериментальними зразками. Експеримент показав, що розбіжність між розрахованими і вимірюваними частотами не перевищує 2% і підтверджує працездатність розробленого методу інтелектуального синтезу і оптимізації НВЧ-фільтрів на ХДР і створеного на його основі програмного забезпечення Sapphire CAD. Проведено порівняння розрахованих системою Sapphire CAD НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ВДР із відомими сучасними аналогами на мікросмушкових резонаторах (рис. 12).

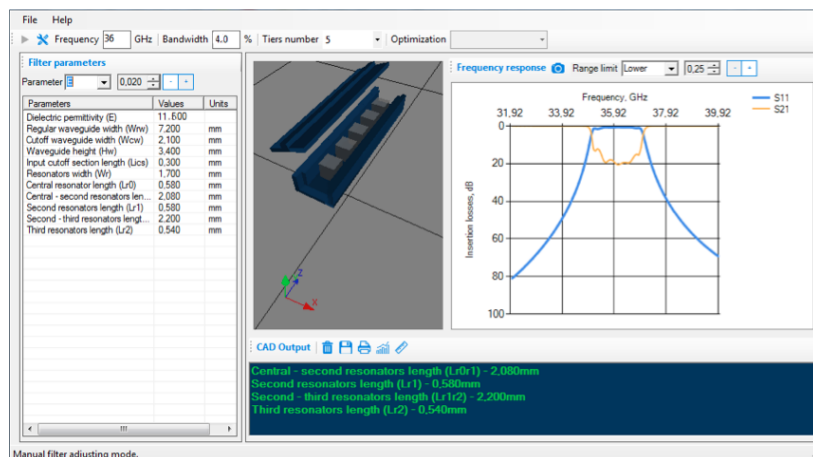


Рис. 11. Користувальницький інтерфейс САПР СВЧ-фільтрів на основі ХДР Sapphire CAD

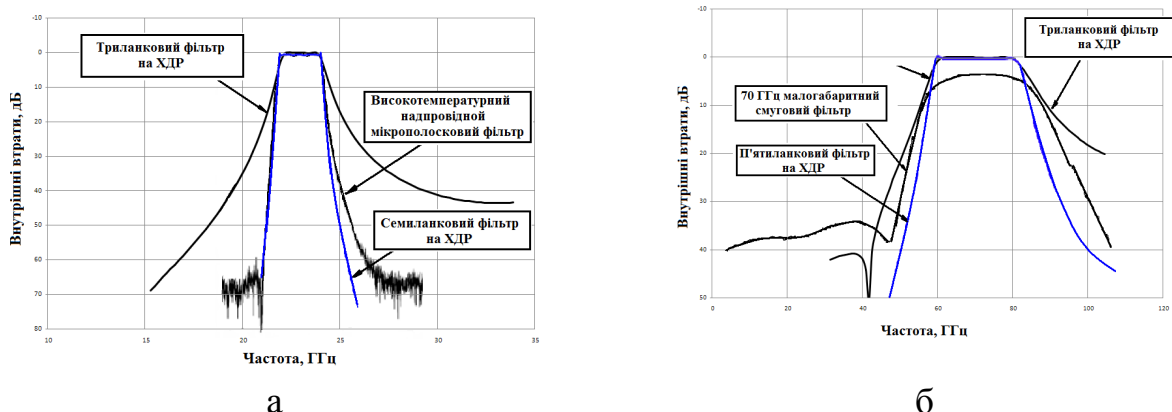


Рис. 12. Порівняльні АЧХ фільтрів на основі ХДР та високотемпературного надпровідного мікрополоскового фільтра для частоти 23 ГГц (а), малогабаритного смугового фільтра для частоти 70 ГГц (б)

За допомогою розробленого програмного забезпечення – системи автоматизованого проектування оригінальних багатоланцюгових НВЧ-фільтрів

Sapphire CAD розрахований смуговий фільтр для багаточастотної радіоастрономічної приймальної системи оснащення антен радіотелескопів для частоти 31,0 ГГц, а також фільтри для сучасних радіорелейних станцій міліметрового діапазону хвиль для частот 73,5 та 83,5 ГГц.

У додатку наведені листинги коду основних класів проекту системи проектування НВЧ-фільтрів Sapphire CAD, свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму, акти впровадження і використання.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача: розробка нового методу інтелектуального синтезу і оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР, що спирається на технології штучного інтелекту, а саме експертні системи та строгі математичні моделі, і створенні на його базі програмного забезпечення автоматизованого проектування цих пристроїв.

1. На основі технологій штучного інтелекту, а саме експертних систем, розроблений метод інтелектуального синтезу та оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів з частково-заповненими ХДР в Н- і Е- площинах, що спирається на їх строгі електродинамічні моделі. Описано етапи створення експертної системи і процес еволюційного проектування багатоланцюгових НВЧ-фільтрів. Обґрунтовано електродинамічну основу бази знань. На відміну від універсальних методів оптимізації, які не враховують специфіку проєктованих пристроїв, а зміна параметрів здійснюється на методі проб і помилок, в результаті чого більшість варіацій виявляються марними, запропонований метод інтелектуального синтезу і оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів спирається на базу знань, яка формалізована у взаємодії із провідним фахівцем і являє собою набір кваліфікованих логічних правил. Таким чином зміна параметрів структури відбувається на підставі експертної оцінки, а число фізично не обґрунтованих ітерацій пошуку екстремуму цільової функції зводиться до мінімуму. На відміну від відомих систем проектування НВЧ-пристроїв розроблена система не потребує проведення аналізу чутливості, апріорного визначення параметрів і допусків, що впливають на цільову функцію, оскільки зміна параметрів відбувається згідно з базою знань, а кінцевий результат має оцінку похибки розрахунків.

2. Розроблено строгі математичні моделі оригінальних багатоланцюгових НВЧ-фільтрів із частково-заповненими хвилеводно-діелектричними резонаторами на основі методів узагальненої матриці розсіювання і часткових областей. Дані моделі дозволяють підвищити точність проектування фільтрів, оскільки вони дозволяють враховувати не тільки хвилі, що поширюються, але і згасаючі теж. З метою встановлення необхідної кількості хвиль, які враховуються в позамежному хвилеводі проведено дослідження збіжності чисельних результатів розроблених моделей.



3. Описано процес розробки програмного забезпечення Sapphire CAD – інтелектуальної САПР НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених ХДР в Н- і Е- площинах. Зроблено аналіз вимог розробленої системи, на основі якого складена специфікація вимог програмного забезпечення Sapphire CAD. Аргументовано вибір моделі і методології розробки, представлений і описаний користувальницький інтерфейс розробленої системи. Визначено методологія і мову програмування, обрано середовище інтегрованої розробки. Запрограмовані математичні моделі НВЧ-фільтрів на основі ХДР з частковим заповненням в Н- і Е- площинах і представлені у вигляді динамічно приєднуваних бібліотек. Проведено тестування і впровадження розробленого програмного забезпечення, а також визначені мінімальні вимоги роботи системи.

4. Проведено експериментальне дослідження результатів проектування системи Sapphire CAD. Експеримент показав, що розбіжність між розрахованими і вимірюваними частотами не перевищує одного відсотка (похибки вимірювань), і підтверджує працездатність розробленого методу інтелектуального синтезу і оптимізації НВЧ-фільтрів на ХДР і створеного на його основі програмного забезпечення Sapphire CAD.

5. Проведено порівняння розрахованих системою Sapphire CAD НВЧ фільтрів на основі частково заповнених ХДР з відомими сучасними аналогами на мікросмушкових резонаторах. Порівняння показало, що фільтри, які засновані на ХДР, істотно перевершують мікрополоскових по селективним властивостям, але поступаються за ціновим і габаритному критеріям.

6. За допомогою розробленого програмного забезпечення – САПР НВЧ-фільтрів Sapphire CAD розрахований смуговий фільтр для багаточастотної радіоастрономічної прийомної системи оснащення антен радіотелескопів для частоти 31,0 ГГц, а також фільтри для сучасних радіорелейних станцій міліметрового діапазону для частот 73,5 і 83,5 ГГц.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ющенко О. Г. Intellectual CAD for Three-Tier Wide Band WDR Filters / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов, Д. М. Зайцев // WET. – 2012. – №1. – С. 30–35.
2. Ющенко О. Г. Comparative Characteristics of Bandpass Filters Based on WDR and Microstrip Resonators / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // EEE. – 2012. – №2. – С. 7–10.
3. Ющенко О. Г. Intellectual CAD of Mm Waves WDR Filters With Increased Stop Band Attenuation / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов, // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 21, – С. 238–245.
4. Ющенко О. Г. Ultra-Wideband Five-Tier LM-Mode Filters Optimized with Knowledge-Based CAD System / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 27, – С. 170–180.

5. Ющенко О. Г. Evolutionary Design of Seven-Tier LM-Mode Filters Optimized with Original Knowledge-Based CAD System / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21, – С. 159–170.
6. Мамедов Д. Б. Электродинамическая модель СВЧ-фильтра с квази- $H_{10n}$  модами на основе обобщенной матрицы рассеяния / Д. Б. Мамедов, О. Г. Ющенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 62, – С. 95–102.
7. Мамедов Д. Б. Исследование сходимости метода матрицы рассеяния в задаче расчета СВЧ-фильтров с квази- $H$  модами / Д. Б. Мамедов, О. Г. Ющенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 76. – С. 34–38.
8. Мамедов Д. Б. Microwave Filters Knowledge Based CAD («Sapphire CAD»): авт. св-во №59541 / Д. Б. Мамедов, О. Г. Ющенко // заявл. 06/03/2015; опубл. 06/05/2015.
9. Ющенко О. Г. Интеллектуальная САПР трехзвенных широкополосных СВЧ-фильтров с LM модами / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов, // Проблеми інформатики і моделювання. Тези десятої міжнародної науково-технічної конференції. Секція «Молоді вчені». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 35.
10. Ющенко О. Г. Показатели качества полосовых фильтров на основе волноводно-диэлектрических и микрополосковых резонаторов / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // Проблеми інформатики і моделювання. Тезиси одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Секція «Молоді вчені». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – С. 91.
11. Мамедов Д. Б. Интеллектуальная САПР ВДР LM-модовых фильтров со спектральной оптимизацией / Д. Б. Мамедов, О. Г. Ющенко // Інформаційні технології та інтелектуальна власність. Тези доповідей VI Університетської науково – практичної студентської конференції магістрантів. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 70–71.
12. Ющенко О. Г. Интеллектуальная САПР семизвенных СВЧ-фильтров с LM модами / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // Проблеми інформатики та моделювання. Тези тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Секція «Молоді вчені». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 53.
13. Мамедов Д. Б. Математическая модель СВЧ фильтра с квази- $H_{101}$  модами на основе обобщенной матрицы рассеяния / Д. Б. Мамедов, О. Г. Ющенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.IV (21-23 травня 2014 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 46.
14. Мамедов Д. Б. Математическое и программное обеспечение интеллектуальной САПР СВЧ-фильтров / Д. Б. Мамедов, О. Г. Ющенко // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем: Тези

доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 169–170.

15. Ющенко О. Г. Метод экспертных систем для задач параметрической оптимизации СВЧ-КВЧ устройств / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // Информатика, управління та штучний інтелект. Тезиси науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – С. 94.

16. Ющенко О. Г. Математическая модель СВЧ-фильтров с  $LM_{101}$  модами на основе метода обобщенной матрицы рассеяния / О. Г. Ющенко, Д. Б. Мамедов // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали другої науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХП», 2015. – С. 111.

### АНОТАЦІЯ

**Мамедов Д. Б. Интеллектуальный синтез та оптимізація конструкцій НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених хвилеводно-діелектричних резонаторів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття ступеня кандидата наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2016.

Дисертація присвячена розробці метода інтелектуального синтезу та оптимізації конструкцій НВЧ-фільтрів на основі частково заповнених хвилеводно-діелектричних резонаторів.

На основі експертної системи та строгих математичних моделей розроблено метод синтезу та оптимізації конструкцій багатоланкових НВЧ-фільтрів з частково-заповненими діелектричними резонаторами в H- і E-площинах. Розраховані математичні моделі структур НВЧ-фільтрів на основі узагальненої матриці розсіювання. Описано процес розробки програмного забезпечення Sapphire CAD – інтелектуальної системи проектування НВЧ-фільтрів на ХДР. Проведено тестування системи і експериментальне підтвердження отриманих результатів. Порівнено показники якості фільтрів на ХДР з відомими аналогами на мікросмушкових резонаторах.

**Ключові слова:** НВЧ-фільтри, метод інтелектуального синтезу та оптимізації, хвилеводно-діелектричні резонатори, експертні системи, математичні моделі, проектування пристроїв НВЧ.

### АННОТАЦИЯ

**Мамедов Д.Б. Интеллектуальный синтез и оптимизация конструкций СВЧ-фильтров на основе частично заполненных волноводно-диелектрических резонаторов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание степени кандидата наук по специальности 05.12.07 – антенны и устройства микроволновой техники. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке метода интеллектуального синтеза и оптимизации конструкций СВЧ-фильтров на основе частично заполненных волноводно-диэлектрических резонаторов.

На основе технологий искусственного интеллекта, а именно экспертных систем, разработан метод синтеза и оптимизации конструкций СВЧ-фильтров с частично-заполненными ВДР в Н- и Е- плоскостях. В отличие от универсальных методов оптимизации, которые не учитывают специфику проектируемых устройств, а изменение параметров осуществляется на методе проб и ошибок, в результате чего большинство вариаций оказываются бесполезными, предложенный метод интеллектуального синтеза и оптимизации конструкций СВЧ-фильтров опирается на базу знаний, которая разработана во взаимодействии с ведущим специалистом и представляет собой набор квалифицированных правил. Таким образом, изменение параметров оптимизируемой структуры происходит на основании экспертной оценки, а число физически не обоснованных итераций поиска экстремума целевой функции сводится к минимуму. В отличие от известных систем проектирования СВЧ-устройств разработанная система не нуждается в проведении анализа чувствительности, указании параметров и допусков, оказывающих влияние на целевую функцию, так как изменение параметров происходит согласно базе знаний.

Разработаны математические модели СВЧ-фильтров с частично-заполненными волноводно-диэлектрическими резонаторами на основе методов обобщенной матрицы рассеяния и частичных областей. Данные модели позволяют повысить точность проектирования фильтров, поскольку они позволяют учитывать не только распространяющиеся, но и затухающие волны.

Описан процесс разработки программного обеспечения Sapphire CAD – интеллектуальной САПР СВЧ-фильтров на основе частично заполненных ВДР в Н- и Е- плоскостях, проведено тестирование системы и экспериментальное исследование результатов проектирования.

Произведено сравнение рассчитанных системой Sapphire CAD СВЧ-фильтров на основе частично заполненных ВДР с известными современными аналогами на микрополосковых резонаторах.

**Ключевые слова:** СВЧ-фильтры, интеллектуальный синтез и оптимизация, волноводно-диэлектрические резонаторы, экспертные системы, математические модели, проектирование устройств СВЧ.

#### ABSTRACT

**Mamedov D. B. Intellectual synthesis and optimization of microwave filters designs based on the partially filled waveguide-dielectric resonators. – The manuscript.**

PhD thesis by the speciality 05.12.07 – Antennas and microwave devices engineering. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2016.

The thesis work is devoted to intellectual synthesis and optimization of microwave filters based on the partially filled waveguide-dielectric resonators method development.

On the basis of an expert system and strict mathematical models a method of synthesis and optimization of microwave filter designs with partially filled waveguide-dielectric resonators in H- and E- planes is developed. Mathematical models of this structures of microwave filters based on the generalized scattering matrix method are produced. The process of software Sapphire CAD – intellectual system of microwave filters based on the WDR design development is described. Testing of the system and experimental verification of the results are made. A comparison of the quality parameters of the filters based on the WDR with known analogues based on the microstrip resonators is performed.

**Keywords:** microwave filters, intellectual synthesis and optimization, waveguide-dielectric resonators, expert systems, mathematical models, microwave devices design.

Підписано до друку 27.10.2016 р. Формат 60х90/16.  
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.  
Друк – різнограф. Ум. друк. аркушів. 0,9  
Наклад 100 прим. Зам. № 789619

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ»  
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16  
ЄДРПОУ 31235131 від 19.12.2000 р.