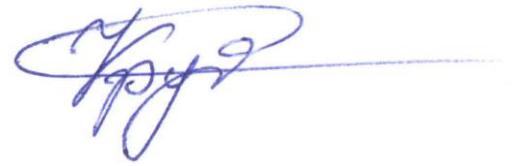


На правах рукописи



**Крутиев Сергей Владимирович**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ  
КОМПАКТНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ФИЛЬТРОВ НА  
СЛОЖНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМАХ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2019

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент  
Земляков Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты: Звездина Марина Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет», заведующая кафедрой «Радиоэлектроника».

Копытов Геннадий Филиппович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», заведующий кафедрой радиофизики и нанотехнологий.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (АО «ВНИИ «Градиент»).

Защита состоится «31» мая 2019 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 5, физический факультет ЮФУ, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 21 Ж и на сайте: <http://hub.sfedu.ru/diss/announcements/preliminary/>

Автореферат разослан «01» апреля 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.208.10  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Г.Ф. Заргано

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Волноводные СВЧ-фильтры находят широкое применение в современных системах локации, навигации и связи, особенно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, благодаря малым потерям и большой передаваемой мощности. Основным недостатком волноводных фильтров являются их значительные габаритные размеры и вес. Для решения данной проблемы можно использовать переход от классических объемных резонаторов к плоско-поперечным резонаторам, реализованным чаще всего с помощью тонких металлических резонансных диафрагм. В этом случае продольный размер фильтра будет определяться только длинами инверторов сопротивлений, реализованных, чаще всего, четвертьволновыми участками регулярного волновода. Стандартной волноводной резонансной диафрагмой является прямоугольное окно в плоско-поперечном металлическом экране. Недостатком такого резонатора является малая доступная добротность, что существенно ограничивает его применение при построении узкополосных фильтров и фильтров с высокой избирательностью. Для повышения добротности могут использоваться либо несколько прямоугольных окон в одной диафрагме, либо окно со сложной формой апертуры. Последний вариант открывает гораздо более широкие возможности по управлению как резонансной частотой контура, так и его добротностью. Более того, благодаря сложной конфигурации электромагнитного поля в апертуре диафрагмы удастся обнаружить новые электродинамические свойства, в частности, проявление свойств одновременно как параллельного, так и последовательного колебательного контура в рамках одной диафрагмы, что, например, позволяет создавать полосно-пропускающие фильтры с эллиптической характеристикой. Однако, при электродинамическом анализе свойств плоско-поперечной диафрагмы со сложной апертурой необходимо знать с высокой точностью характеристики электромагнитного поля в ней, а, следовательно, решать электродинамическую задачу на собственные значения для соответствующего волновода со сложной формой поперечного сечения, что заметно усложняет общую методику и алгоритм расчета.

При практической реализации тонкие плоско-поперечные металлические диафрагмы могут изготавливаться либо непосредственной фрезеровкой металлических пластин конечной толщины, составляющей обычно 1-2 мм для обеспечения необходимой прочности, либо путем нанесения металлизации на поверхность тонких диэлектрических пластин с малой диэлектрической проницаемостью. Металлизация диэлектрика позволяет не только добиться более высокой точности изготовления сложной апертуры, но и дополнительного уменьшения размеров проектируемых частотно-селективных устройств. Более того, благодаря замене стандартных волноводных инверторов в виде четвертьволновых связей более короткими участками сложной конфигурации можно построить цельную слоистую металлодиэлектрическую конструкцию фильтра, которая будет легко интегрироваться в волноводную линию и заменяться при необходимости.

Резонансные диафрагмы со сложной апертурой должны описываться более сложными эквивалентными схемами, чем стандартные прямоугольные окна. Корректное построение эквивалентной схемы сложной диафрагмы позволяет эффективно использовать хорошо известные инструменты схемотехнического синтеза для расчетов характеристик фильтров прототипов, причем не только фильтров Чебышева или Баттерворта, но и эллиптические фильтры с полюсами затухания в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ).

При проектировании и анализе СВЧ устройств часто используют коммерческие программы компьютерного моделирования. Такие программы реализуют сеточные численные методы и позволяют решать широкий спектр электродинамических задач, однако, даже для современных ПК процесс моделирования требует колоссального времени, а при синтезе многопараметрических устройств, особенно в отсутствии хорошего начального приближения, вообще не позволяют решить поставленную задачу.

Поэтому, развитие численно-аналитических методов расчета волноводных резонансных диафрагм сложного сечения и алгоритмов синтеза компактных полосно-пропускающих фильтров (ППФ) и полосно-заграждающих

фильтров (ПЗФ) на их основе является актуальной задачей для развития современных инфокоммуникационных систем.

**Целью диссертационной работы является:** развитие электродинамических методов анализа и синтеза сложных плоско-поперечных металлодиэлектрических частотно-селективных волноводных структур, и разработка новых конструкций компактных волноводных фильтров на их основе.

Для достижения данной цели решены следующие **задачи:**

- развитие электродинамических методов анализа волноводных металлических плоско-поперечных резонансных диафрагм со сложной апертурой, включая С-образные, U-образные, прямоугольные апертуры с Т- и L-образными металлическими гребнями.
- построение и анализ эквивалентных схем сложных волноводных резонансных диафрагм для реализации процедуры синтеза частотно-селективных устройств.
- разработка методик расчета, алгоритмов синтеза и новых конструкций компактных ППФ и ПЗФ на сложных металло-диэлектрических резонансных диафрагмах.
- разработка методик расчета, алгоритмов синтеза и новых конструкций компактных ППФ с эллиптической характеристикой на сложных металлических резонансных диафрагмах.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

- в исследовании и обобщении основных закономерностей частотных характеристик широкого класса сложных волноводных плоско-поперечных металлических и металлодиэлектрических резонансных диафрагм, позволяющих эффективно подбирать топологию по заданным требованиям к АЧХ, добротности и максимально передаваемой мощности.
- в методике проектирования новых компактных волноводных фильтров на сложных плоско-поперечных металлодиэлектрических резонансных диафрагмах.

- в методике проектирования новых компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой на плоско-поперечных L-гребневых металлических резонансных диафрагмах.
- в новых результатах синтеза и устройствах-прототипах компактных волноводных фильтров на плоско-поперечных резонансных диафрагмах со сложной апертурой.

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы.

Научная значимость работы определяется развитием численно-аналитических методов решения электродинамических задач анализа и синтеза компактных волноводных частотно-селективных устройств.

Практическую ценность представляют новые конструкции волноводных фильтров с эллиптической характеристикой и фильтров, изготовленных в виде цельной слоистой метало-диэлектрической структуры, на которые получены патенты РФ на полезную модель.

Тематика решаемых в диссертации задач поддержана грантом «Российского Фонда Фундаментальных Исследований» (№ 12-07-31003) под руководством автора.

Использование результатов проведенных исследований, подтверждено актами внедрения в АО «ВНИИ «Градиент» и в образовательный процесс физического факультета ЮФУ.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается сравнением с результатами расчетов прямыми численными методами, с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов и собственными экспериментальными данными, полученными при измерении изготовленных устройств-прототипов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Совокупность новых физических результатов, полученных при анализе электродинамических характеристик одиночных плоско-поперечных волноводных резонансных диафрагм со сложной апертурой, заключающихся в возможности управления их добротностью и резонансной ча-

стотой в широких пределах, а также в возможностях создания в рамках одной сложной диафрагмы комбинаций последовательных и параллельных колебательных контуров.

- Алгоритмы и программы синтеза волноводных фильтров, основанные на построении и анализе эквивалентных схем резонансных диафрагм со сложной апертурой, входящих в их состав.
- Уменьшение продольных размеров волноводных фильтров в результате использования плоско-поперечных металлодиэлектрических резонансных элементов со сложной апертурой и альтернативных волноводных инверторов сопротивлений, в частности, тонких емкостных диафрагм.
- Методика проектирования компактных волноводных полосно-пропускающих фильтров с эллиптической характеристикой на плоско-поперечных резонансных диафрагмах со сложной апертурой.
- Электродинамические модели и экспериментальные образцы новых компактных волноводных частотно-селективных устройств, реализованных на плоско-поперечных резонансных диафрагмах со сложной апертурой, позволяющие расширить область применения волноводных СВЧ устройств.

*Таким образом, диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для развития направления радиофизики – разработка методов электродинамического анализа и синтеза волноводных частотно-селективных устройств на сложных плоско-поперечных металлодиэлектрических резонансных диафрагмах.*

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях:

- Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо) (г. Севастополь, 2015 – 2018 гг.)
- Международная конференция «International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE» (г. Саратов, 2014, 2016, 2018 гг.)

- Всероссийская и международная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (п. Дивноморское, 2015, 2017 гг.);
- Международная конференция «Progress in electromagnetics research symposium, PIERS» (г. Шанхай, 2016 г., г. Санкт-Петербург, 2017 г.)
- Международная конференция «International conference on antenna theory and techniques, ICATT» (г. Одесса, 2013 г.)
- Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП» (г. Новосибирск 2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 31 печатная работа, в том числе: 10 статей в журналах из перечня ВАК, 3 патента РФ на полезную модель, 16 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях, 12 публикаций на английском языке, проиндексированных в международной научной базе Scopus.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит разработка и развитие электродинамических методов решения поставленных задач, разработка алгоритмов и программ, проведение численных и экспериментальных исследований и интерпретация полученных результатов.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 128 страниц, 67 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* проведен обзор литературных данных по тематике проектирования волноводных ППФ и ПЗФ. Проанализированы наиболее широко используемые топологии фильтров и показаны преимущества устройств, реализованных на тонких плоско-поперечных резонансных диафрагмах. Отмечена перспективность использования резонансных диафрагм со сложной

формой апертуры и показаны сложности электродинамического расчета характеристик таких волноводных элементов.

Приведено описание наиболее эффективного алгоритма электродинамического анализа характеристик сложных волноводных плоско-поперечных неоднородностей, включая комплексную проводимость и элементы матрицы рассеяния, основанного на методе интегральных уравнений и вариационных методах. Показано, что для обеспечения корректного вычисления характеристик сложных неоднородностей необходимо с высокой точностью решать краевую задачу для эквивалентных волноводов со сложной формой поперечного сечения. В частности, для волноводов, поперечное сечение которых представляется совокупностью смежных прямоугольных областей, данную задачу наиболее эффективно решать методом частичных областей с учетом особенности поведения электромагнитного поля вблизи острых металлических ребер. В главе приводится расчет критических волновых чисел и компонент электромагнитных полей для прямоугольных волноводов с Т- и L-образными металлическим гребнями.

Во второй главе проведены исследования электродинамических характеристик тонких одиночных плоско-поперечных металлических резонансных диафрагм со сложной апертурой. Представлены результаты анализа комплексной проводимости и АЧХ для следующих апертур: С-образной, U-образной, прямоугольной апертурой с Т-образными и L-образными металлическими гребнями (рис.1).

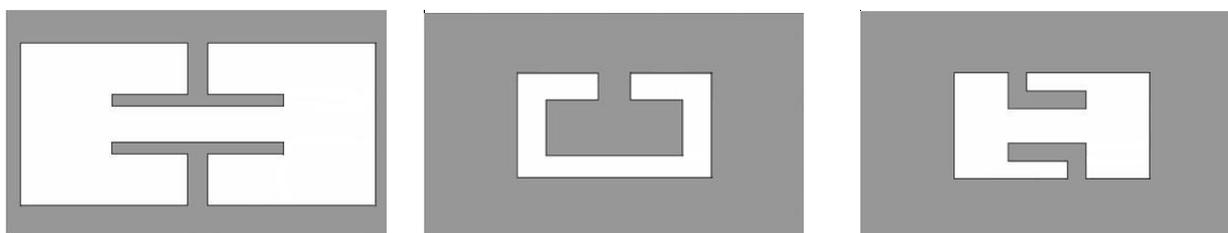


Рис. 1. Волноводные резонансные диафрагмы со сложной апертурой

На рис. 2а, в качестве примера, представлена рассчитанная зависимость мнимой части нормированной проводимости от частоты для резонансной диафрагмы с Т-образными гребнями в прямоугольном волноводе с попереч-

ным сечением  $23 \times 10$  мм, а на рис. 2б соответствующая АЧХ в элементах матрицы рассеяния. Как видно из рис. 2 такая диафрагма обладает резонансной частотой полного пропускания, т.е. ее эквивалентной схемой является параллельный колебательный контур, шунтирующий линию передачи. При этом ширина резонансной кривой по уровню  $-3$ дБ более чем в два раза меньше соответствующей ширины для прямоугольного резонансного окна.

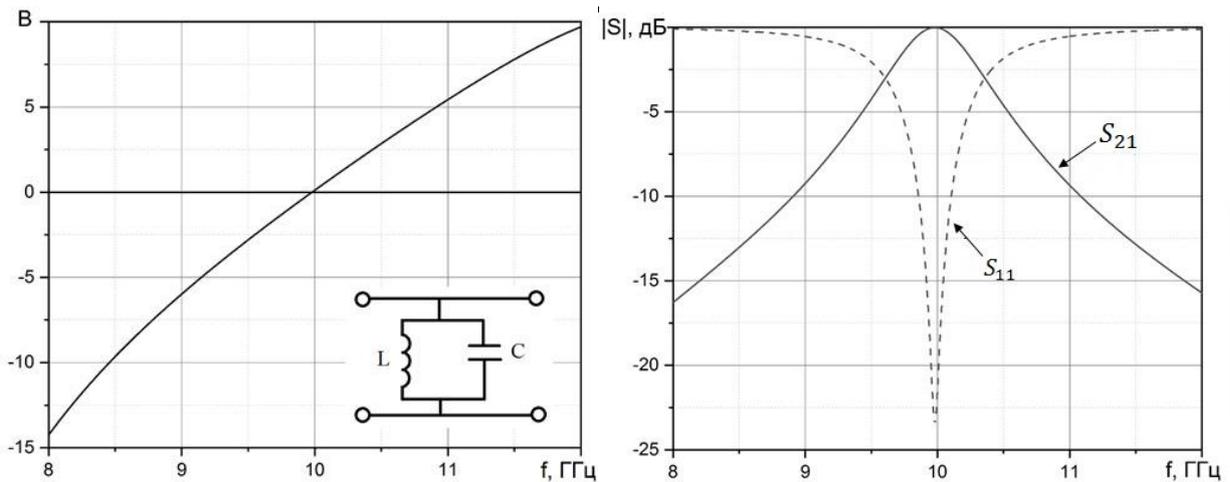


Рис. 2. Нормированная проводимость и АЧХ резонансной диафрагмы с Т-образными гребнями

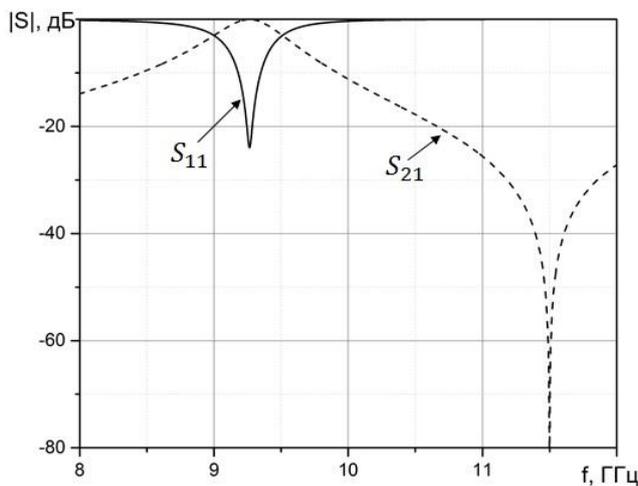


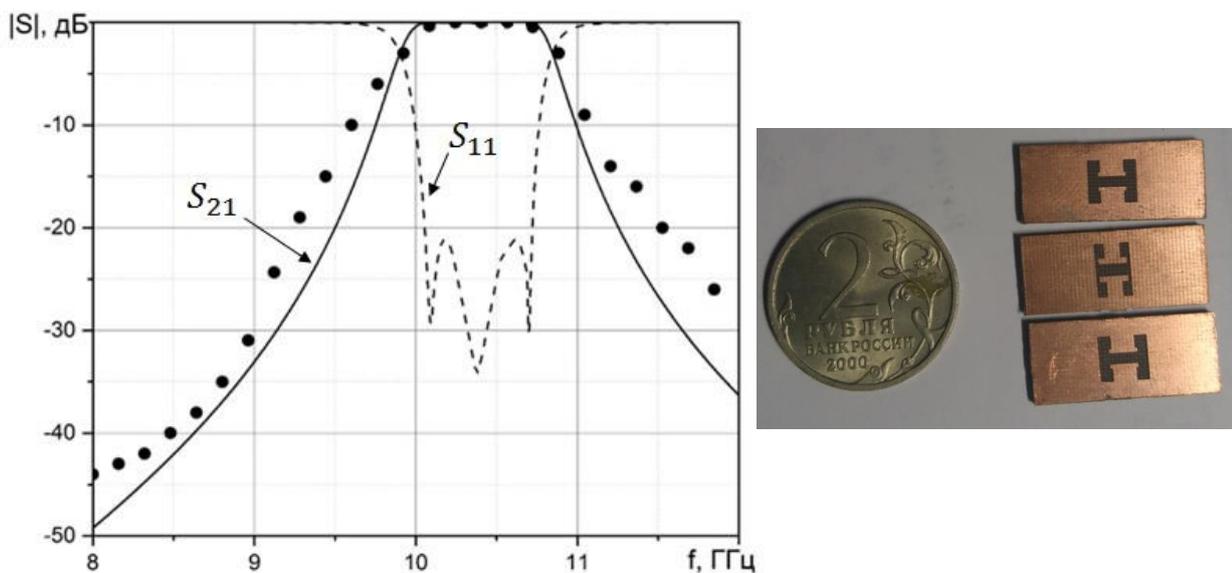
Рис. 3. АЧХ резонансной диафрагмы с L-образными гребнями

Сформулированы правила выбора апертуры диафрагмы, исходя из требований к резонансным частотам и добротности резонатора. Показано также, что плоско-поперечные диафрагмы с апертурой в виде прямоугольного окна с двумя L-образными гребнями (рис. 1) могут проявлять свойства как последовательного, так и параллельного резонанса (рис. 3), что позволяет использовать их при

проектировании, в том числе, и полосно-заграждающих фильтров.

В третьей главе решена задача синтеза ППФ и ПЗФ на плоско-поперечных метало-диэлектрических резонансных диафрагмах. В данной

главе рассмотрен способ изготовления резонансных диафрагм со сложной апертурой путем нанесения металлизации на поверхность тонкой диэлектрической пластины с малой диэлектрической проницаемостью. Данный подход позволяет обеспечить высокоточное производство и хорошую повторяемость сложного профиля аперттуры. Более того, удастся реализовать диафрагмы с малыми зазорами и толщинами металлических линий, что заметно расширяет диапазон возможных резонансных частот и добротностей каждого звена фильтра. Представлены результаты синтеза компактных ППФ и ПЗФ для следующих сложных апертур: С-образная, U-образная, прямоугольная аперттура с Т-образными металлическими гребнями, прямоугольная аперттура с L-образными металлическими гребнями. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами измерений АЧХ изготовленных фильтров-прототипов.



*Рис. 4. АЧХ и составные элементы 3-х звенного ППФ на резонансных диафрагмах с Т-образными гребнями*

Так на рис. 4 представлена АЧХ 3-х звенного ППФ с четвертьволновыми связями на Т-гребневых резонансных диафрагмах в волновде сечением 23\*10 мм. Результаты расчета приведены сплошной ( $|S_{21}|$ ) и пунктирной ( $|S_{11}|$ ) линиями, а результаты измерения экспериментального образца – маркерами.

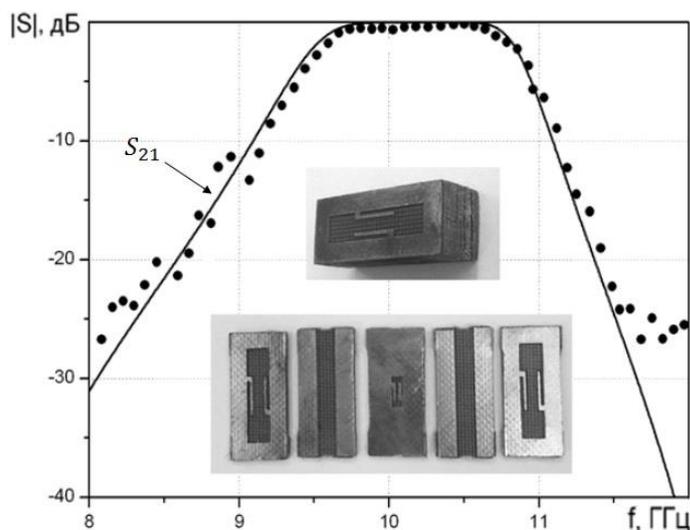


Рис. 5. АЧХ и составные элементы 3-х звенного слоистого ППФ на L-гребневых резонансных диафрагмах

Для достижения большей компактности устройств предложено заменить классические инверторы сопротивлений, реализованные четвертьволновыми отрезками регулярного волновода, более короткими сложными элементами. В частности, показано, что таким элементом может стать плоско-поперечная тонкая металлическая емкостная

диафрагма с согласующими участками длиной всего одна двенадцатая длины волны. Таким образом, удастся дополнительно до трех раз уменьшить продольный размер фильтра с сохранением его АЧХ. Предложена конструкция ППФ, в которой толщина диэлектрической подложки резонаторов подобрана таким образом, что все диафрагмы непосредственно прилегают друг другу, формируя цельную слоистую металлодиэлектрическую конструкцию (рис. 5). Такая конструкция обладает высокой прочностью, легко устанавливается и заменяется в волноводной линии, а также позволяет изготовление с использованием хорошо отработанной технологии производства многослойных печатных плат. Полученные фильтры можно отнести к разряду сверхкомпактных, поскольку их размер составляет менее половины рабочей длины волны.

В четвертой главе решена задача синтеза компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой. Эллиптические фильтры, обладающие пульсациями АЧХ не только в полосе пропускания, но и в полосе заграждения, позволяют значительно повысить избирательность волноводных частотно-селективных устройств. Для обеспечения нулей в АЧХ фильтра необходимо использовать в эквивалентной схеме фильтра последова-

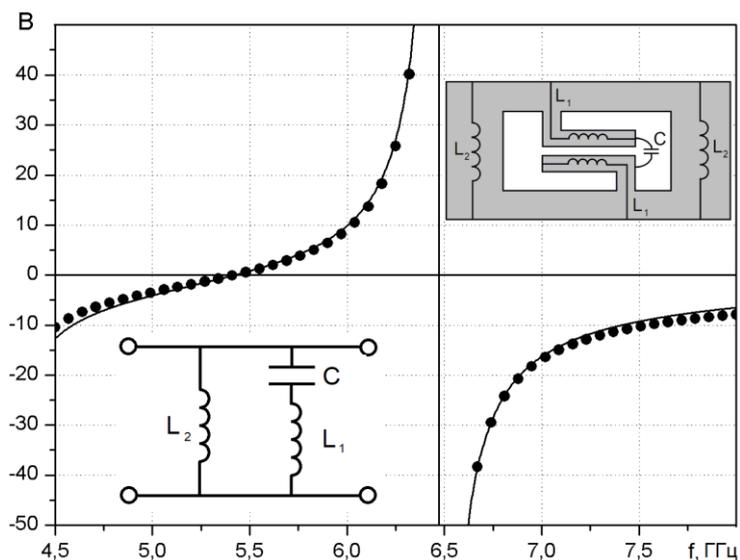


Рис. 6. Эквивалентная схема и зависимость проводимости от частоты для L-гребневой резонансной диафрагмы в прямоугольном волноводе сечением 35\*15 мм

тельные колебательные контура, включенные параллельно в длинную линию. На основании результатов исследования свойств одиночных резонансных диафрагм, показано, что наличие двух металлических L-образных гребней в прямоугольной апертуре тонкой металлической плоско-поперечной диафрагмы приводит к по-

явлению свойств последовательного или параллельного колебательного контура в зависимости от выбора геометрических размеров гребней. Построена и исследована эквивалентная схема данной резонансной диафрагмы на основе характерных свойств ее геометрии.

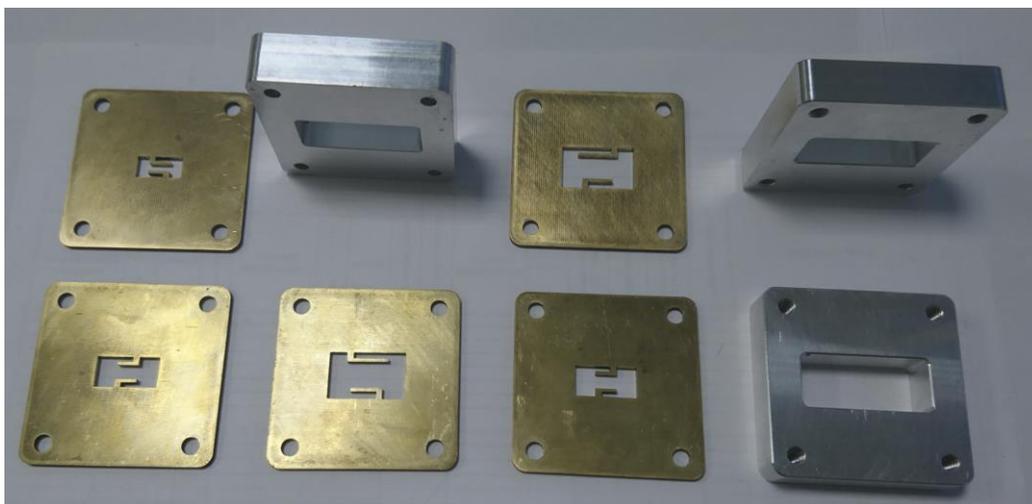


Рис. 7. Составные элементы 5-ти звенного эллиптического фильтра на резонансных диафрагмах

Показана возможность обеспечения однозначного соответствия (рис. 6) между электродинамической характеристикой проводимости диафрагмы (сплошная линия) и проводимостью ее эквивалентной электрической схемы

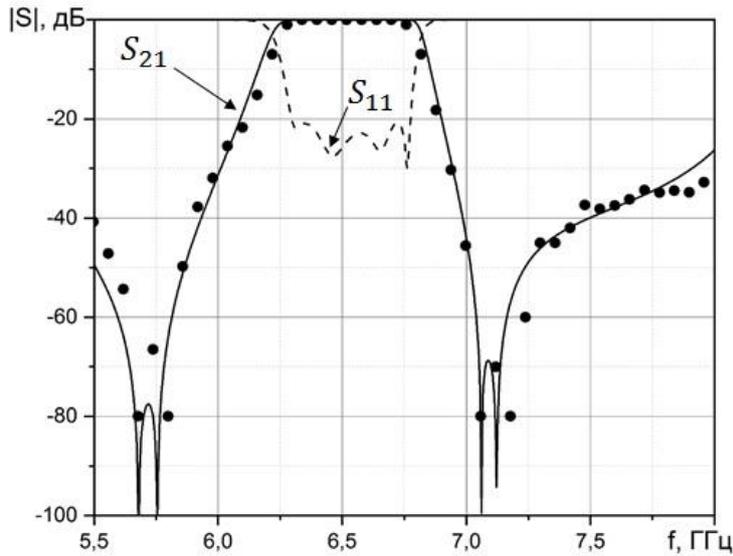


Рис. 8. АЧХ 5-ти звенного эллиптического фильтра на L-гребневых резонансных диафрагмах

элементами (маркеры). Таким образом, удается полностью обеспечить практическую реализацию радиотехнической схемы эллиптического фильтра на базе таких резонаторов. Более того, благодаря размещению пары последовательных колебательных контуров в рамках одной диафрагмы, путем использования гребней различного

размера в одной прямоугольной апертуре, дополнительно уменьшен продольный размер фильтра, за счет исключения согласующих волноводных участков инверторов сопротивлений. На рис. 7, в качестве примера, представлены составные элементы рассчитанного и изготовленного 5-ти звенного эллиптического фильтра для волновода с поперечным сечением 35\*15 мм. Проведено сравнение (рис. 8) результатов расчетов (сплошная и пунктирная линия) с результатами измерений (маркеры) АЧХ изготовленного фильтра-прототипа. Подтверждена высокая точность и эффективность предлагаемых методик.

В заключении сформулированы основные полученные результаты и выводы по диссертационной работе. Показаны пути дальнейших научных исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основным результатом диссертационной работы явилась разработка новых моделей и конструкций компактных волноводных ППФ и ПЗФ на основе развитых электродинамических методов и составленных высокоскоростных программных модулей анализа и синтеза сложных волноводных плоскопоперечных частотно-селективных структур.

Рассмотрена методика электродинамического анализа одиночных плоско-поперечных металлических резонансных диафрагм со сложной апертурой. Проведен анализ нормированной проводимости и характеристик рассеяния для следующих апертур: С-образной, U-образной, прямоугольной апертуры с Т-образными металлическими гребнями, прямоугольной апертуры с L-образными металлическими гребнями. Показаны преимущества данных типов резонансных диафрагм перед стандартными прямоугольными резонансными окнами, в частности, более широкие возможности по управлению как резонансной частотой контура, так и его добротностью, а также многорезонансные свойства.

Предложен подход к построению эквивалентной электрической схемы сложной резонансной плоско-поперечной диафрагмы, позволяющий эффективно описать ее электродинамические свойства. Установлены основные взаимосвязи между геометрическими параметрами сложной апертуры и значениями элементов эквивалентной схемы. Полученные результаты позволили эффективно использовать хорошо известные инструменты схемотехнического синтеза для расчетов характеристик фильтров прототипов, причем не только фильтров Чебышева или Баттерворта, но и эллиптических фильтров с полюсами затухания в амплитудно-частотной характеристике.

Рассмотрены два способа практической реализации плоско-поперечных резонансных диафрагм со сложной апертурой:

- путем нанесения металлизации на поверхность тонких диэлектрических пластин с малой диэлектрической проницаемостью.
- непосредственной фрезеровкой металлических пластин конечной толщины, составляющей обычно 1-2 мм для обеспечения необходимой прочности.

Показано, что металлизация диэлектрика позволяет добиться высокой точности изготовления сложной апертуры и реализовать диафрагмы с малыми зазорами и толщинами металлических линий, что заметно расширяет диапазон возможных резонансных частот и добротностей каждого звена

фильтра. Представлены результаты синтеза компактных ППФ и ПЗФ для данной технологии изготовления резонансных диафрагм. В частности, на основе прямоугольного волновода с поперечным сечением 23\*10 мм представлены трехрезонаторные фильтры с полосой пропускания 10% и уровнем затухания -20 дБ. Продольный размер фильтров составил 18 мм, что соответствует 0.6 рабочей длины волны.

Проведены сравнения амплитудно-частотных характеристик фильтров, синтезированных по разработанным алгоритмам и программам, с результатами компьютерного моделирования и измеренными характеристиками изготовленных экспериментальных образцов. Подтверждена высокая точность и эффективность предлагаемых методик.

Для большего сокращения продольного размера фильтров предложено вместо стандартных четвертьволновых отрезков волновода использовать в качестве инверторов сопротивлений плоско-поперечные тонкие металлические емкостные диафрагмы с согласующими участками длиной всего одна двенадцатая длины волны. Разработана конструкция полосно-пропускающего фильтра, в котором толщина диэлектрической подложки резонаторов подобрана таким образом, что все диафрагмы непосредственно прилегают друг другу, формируя цельную слоистую металлодиэлектрическую конструкцию. Полученная конструкция обладает высокой прочностью, легко устанавливается и заменяется в волноводной линии, а также позволяет изготовление с использованием хорошо отработанной технологии производства многослойных печатных плат. Представлены результаты синтеза и экспериментальный образец цельного трехрезонаторного фильтра на сложных резонансных диафрагмах для прямоугольного волновода с поперечным сечением 23\*10 мм с полосой пропускания 10% и уровнем затухания -20 дБ. Продольный размер фильтров составил 8 мм, что соответствует 0.26 рабочей длины волны. Полученный фильтры можно отнести к разряду сверхкомпактных, поскольку его размер составляет менее половины рабочей длины волны.

Решена задача синтеза компактных волноводных фильтров с эллиптической характеристикой. Для проектирования фильтров использованы резонансные диафрагмы с воздушным заполнением, изготовленные непосредственной фрезеровкой металлических пластин толщиной 2 мм. В качестве сложной апертуры диафрагмы выбрана апертура в виде прямоугольного окна с двумя металлическими L-образными гребнями. Показано, что такая диафрагма может при определённых геометрических размерах проявлять свойства как параллельного, так и последовательного колебательного контура, что дает возможность синтезировать фильтры, обладающие пульсациями АЧХ не только в полосе пропускания, но и в полосе заграждения. Представлены результаты синтеза и экспериментальные образцы трех- и пятизвенных эллиптических фильтров для прямоугольного волновода с поперечным сечением 35\*15 мм, полосой пропускания 7.5 и уровнем -20 дБ в полосе заграждения. Продольный размер фильтров составил 34 мм и 64 мм, а коэффициент прямоугольности по уровню -20 дБ – 0.7 и 0.8 соответственно.

Таким образом, представленные результаты позволяют говорить, что поставленная в диссертационной работе цель достигнута. Разработанные электродинамические методы анализа и синтеза компактных волноводных частотно-селективных устройств на плоско-поперечных резонансных диафрагмах со сложной апертурой обеспечивают развитие направления радиофизики СВЧ и КВЧ диапазонов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

### **Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК и базу Scopus:**

1. Крутиев С.В. SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития / Крутиев С.В., Гадзиева А.А., Заргано Г.Ф., Земляков В.В. // Физические основы приборостроения. -2012. - Т. 1, № 4 (5). - С. 4-13.
2. Крутиев С.В. Полосно-пропускающий СВЧ-фильтр на волноводах сложного сечения, интегрированный в многослойную микросхему с приме-

- нением SIW-технологии / Крутиев С.В., Гадзиева А.А., Земляков В.В. // Инженерный вестник Дона. - 2013. - № 1 (24). - С. 24.
3. Крутиев С.В. Полосно-пропускающие фильтры на плоско-поперечных сдвигах Н-волноводов, выполненные по SIW-технологии / Крутиев С.В., Заргано Г.Ф., Земляков В.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2013. - Т. 16, № 2. - С. 87-93.
  4. Крутиев С.В. Компьютерное моделирование полосно-пропускающих фильтров на волноводах сложного сечения, реализованных по SIW-технологии / Крутиев С.В., Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Гадзиева А.А. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2013. - Т. 18, № 9. - С. 36-41.
  5. Крутиев С.В. Электродинамический анализ и синтез компактных фильтров на L-гребневых волноводах / Крутиев С.В., Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Гадзиева А.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2013. - Т. 56, № 8-3. - С. 48-50.
  6. Крутиев С.В. Компактные селективные устройства на сложных L-гребневых диафрагмах в прямоугольном волноводе / Крутиев С.В., Земляков В.В., Заргано Г.Ф. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2014. - Т. 19, № 9. - С. 37-41.
  7. Крутиев С.В. Полосно-пропускающие фильтры на индуктивных диафрагмах в гребневых волноводах, реализованных по SIW-технологии / Крутиев С.В., Заргано Г.Ф., Земляков В.В. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2015. - Т. 20, № 6. - С. 33-37.
  8. Крутиев С.В. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах / Крутиев С.В., Земляков В.В., Заргано Г.Ф. // Радиотехника и электроника. - 2015. - Т. 60, № 12. - С. 1231.
  9. Крутиев С.В. Волноводные фильтры на сложных резонансных диафрагмах / Крутиев С.В., Земляков В.В., Клещенков А.Б. // Физические основы приборостроения. - 2016. - Т. 5, № 5 (22). - С. 51-63.

10. Крутиев С.В. Сложные резонансные диафрагмы в задачах проектирования компактных и узкополосных волноводных фильтров / Крутиев С.В., Клещенков А.Б., Земляков В.В. // Инженерный вестник Дона. - 2016. - № 1 (40). - С. 64.
11. Krutiev S. Complex geometry apertures for resonant diaphragms in rectangular waveguides / Krutiev S., Zemlyakov V., Tyaglov M. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. - 2018. - V.32, № 18. - P. 2470-2480.
12. Krutiev S. A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture / Krutiev S., Zemlyakov V., Tyaglov M., Shevchenko V. // International Journal of Circuit Theory and Applications. - 2019. - V. 47, № 1. - P. 55-64.

**Патенты и свидетельства о регистрации:**

1. Крутиев С.В., Земляков В.В., Заргано Г.Ф., Гаджиева А.А. Волноводный полосно-пропускающий СВЧ-фильтр // Заявка на полезную модель 2013153539/08. Патент RU 146668 U1, 03.12.2013. Опубликовано: 20.10.2014. Бюл. № 29.
2. Крутиев С.В., Земляков В.В., Заргано Г.Ф. Волноводный СВЧ-фильтр // Заявка на полезную модель 2014147951/08. Патент RU 158942 U1, 27.11.2014. Опубликовано: 20.01.2016. Бюл. № 2.
3. Крутиев С.В., Заргано Г.Ф., Земляков В.В., Клещенков А.Б. Волноводный СВЧ-фильтр // Заявка на полезную модель 2017141647. Патент RU 184986 U1, 29.11.2017. Опубликовано: 15.11.2018. Бюл. № 32.

