

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Лексикова Андрея Александровича «Многослойные многопроводные полосковые резонаторы и устройства частотной селекции сигналов на их основе», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.03 – Радиоп физика.

### Актуальность темы

Тема диссертации представляет интерес, прежде всего, для специалистов-разработчиков частотно-селективных устройств диапазонов метровых, дециметровых и сантиметровых длин волн. Материалы диссертации могут быть полезными также более широкому кругу специалистов, работающих в области создания систем и устройств радиолокации, навигации, радиопротиводействия, приборостроения и связи, где для решения проблем формирования и обработки радиосигналов востребованы устройства фильтрации, выполненные на основе полосковых, многослойных и многопроводных линий передачи. Эти устройства, изготовленные по планарной технологии, обладают целым рядом достоинств, среди которых необходимо указать их малые габариты, технологичность в производстве, низкую стоимость и высокие электрические характеристики, и поэтому находят широкое применение.

Данное научное направление радиотехники за прошедшие десятилетия своего становления и развития накопило достаточно богатый опыт в создании различных полосковых и микрополосковых устройств. К настоящему времени разработаны и широко используются различные методы анализа и расчёта частотно-избирательных устройств, делителей и сумматоров мощности, фазовращателей, переключателей и многих других СВЧ устройств на базе полосковых линий. Изданы книги и справочники по расчёту, выпущено большое число научных монографий, вышло и продолжает выходить огромное число публикаций, посвящённых развитию теории и техники полосковых и микрополосковых устройств. Разработано большое число пакетов универсальных программных продуктов по электродинамическому моделированию (ЭДМ) СВЧ устройств различных фирм: EMPro для 3D ЭДМ и Momentum для планарного 3D ЭДМ компании Agilent Technologies, интегрированный пакет Microwave Office компании AWR, системы полного ЭДМ CST Microwave Studio компании CST, QuickWave-3D компании QWED и EMPIRE компании IMST и др.

Мощный стимул к дальнейшему развитию этого направления в последнее время связан с широким распространением телекоммуникационных технологий, повсеместным внедрением систем и устройств радиолокации, радионавигации и связи. Данная тенденция последнего времени вызвала сильную загрузку практически всех диапазонов частот и привела к существенному ухудшению электромагнитной обстановки в окружающем нас пространстве. Данная ситуация накладывает все возрастающие требования к



характеристикам полос пропускания и заграждения частотно-селективных устройств, которые необходимо использовать во вновь создаваемых радиосистемах.

В создавшихся условиях востребованными являются принципиально новые методы проектирования полосковых и микрополосковых частотно-селективных устройств, а также технические решения, заложенные в их конструкции, обладающие качественно более высокими показателями, чем ранее использовавшиеся. Кроме того, очевидно, является нерешенным на сегодня целый круг практических задач. Среди них одной из важнейших стоит задача создания миниатюрных фильтров и диплексеров, обладающих высокими частотно-селективными свойствами, для диапазонов дециметрового и особенно метрового диапазонов длин волн. В этих диапазонах размеры резонаторов при традиционной реализации зачастую оказываются неприемлемо большими, а их добротность – недостаточно высокой. Другая задача связана с созданием более совершенных полосковых устройств диапазонов сантиметровых и миллиметровых длин волн, использующих новые виды материалов и принципы построения, которые позволили бы создавать миниатюрные и технологичные устройства с характеристиками лучшими, чем у известных аналогов.

Поэтому не вызывает сомнений, что поиск новых подходов и принципов построения таких устройств, обладающих улучшенными массогабаритными и электрическими характеристиками, новых технологий для их изготовления и методики расчета, является **важной и актуальной проблемой** современной радиофизики и радиотехники. Задачи реализации предложенного в диссертации А.А. Лексикова концептуального подхода и его научное обоснование требуют выполнение целого ряда сложных исследований, а также разработки различных цепей частотной селекции и согласования сигналов с требуемыми характеристиками. Такая работа неизбежно связана с получением новых научных результатов, имеющих отношение к данному научному направлению. При этом в диссертации рассматриваются не только возможности создания новых конструкций фильтров и диплексеров различного типа, но и возможности новых технологий для их изготовления, а также методики синтеза устройств на связанных многопроводных резонаторах по заданным характеристикам. Следует согласиться также с тем, что тема диссертации является действительно проблемной и соответствует докторскому уровню.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Представленная для анализа диссертационная работа состоит из введения и четырех глав, заключения и списка использованных источников.

**Во введении** дана общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, дается краткое содержание диссертационной работы.

**В первой главе** представлен обзор существующих подходов к проектированию полосно-пропускающих фильтров и диплексеров. Описаны волноводные конструкции, в частности, структуры на основе интегрированных в диэлектрическую подложку волноводов. Представлены различные решения с применением диэлектрических, коаксиальных и планарных резонаторов, обладающих технологичностью, низкой себестоимостью, широким диапазоном рабочих частот и ширины полос пропускания. Рассмотрены существующие способы дальнейшей миниатюризации устройств, увеличения крутизны склонов их частотных характеристик, а также описаны методы расширения высокочастотной полосы заграждения. Отдельно рассмотрены три основных подхода к согласованию каналов диплексеров. Показана актуальность поиска новых конструкций таких устройств и новых принципов их построения, которые позволили бы создавать миниатюрные и технологичные устройства с характеристиками лучшими, чем у известных аналогов.

**Во второй главе** на примере множества разработанных автором диссертации оригинальных конструкций частотно-селективных устройств метрового и дециметрового диапазонов и результатов электромагнитного моделирования всесторонне рассмотрен предложенный им концептуальный подход к проектированию полосно-пропускающих фильтров и диплексеров, основанный на применении многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов (ММПР) вместо традиционных однопроводных резонаторов.

**Третья глава** посвящена изложению результатов решения ряда радиофизических задач общей проблемы влияния технологии производства миниатюрных высокоселективных устройств частотной селекции сигналов на их параметры. При этом решена одна из весьма сложных задач – поиск технических решений, снижающих влияние препрегов, используемых для склеивания слоев при совместном прессовании печатных плат, на собственные частоты мод колебаний резонаторов и, соответственно, изменение характеристик изготавливаемых устройств. Решение этой задачи найдено путем электродинамического моделирования в среде CST Studio Suite и выполнения большого числа измерений характеристик макетов частотно-селективных устройств при вариации параметров слоев препрега и перебора вариантов соседних слоев. При этом показано, что использование симметричной относительно поверхностей препрега двойной металлизации проводников, можно значительно снизить его влияние на характеристики резонаторов. Приведено описание большого числа конструкций разработанных устройств, в которых также успешно решен ряд задач технологии изготовления частотно-селективных СВЧ устройств.

**Четвертая глава** посвящена решению задачи разработки диплексеров, в частности, проблеме согласования каналов диплексеров с общим входом (выходом) и способам построения диплексеров с применением ММПР по технологии многослойных печатных плат. Полученные решения позволили значительно улучшить массогабаритные и электрические характеристики предложенных диплексеров.



**В заключении** изложены итоги выполненных исследований.

Основные научные положения разработанной в диссертации теории электромагнитно-связанных резонаторов основываются на известных достижениях фундаментальных и прикладных научных дисциплин математики, электродинамики и теории электрических цепей. В своей работе диссертант грамотно пользуется математическим аппаратом, общепринятыми понятиями и терминами в математике, радиотехнике и радиофизике, а также современными программными средствами ЭДМ СВЧ устройств.

На основе разработанных положений, а также электродинамического моделирования и экспериментальных исследований различных образцов и способов возбуждения связанных резонаторов, анализа большого числа данных вычислений амплитудно-частотных характеристик функций передачи частотно-селективных устройств соискателем получен комплекс **новых научных результатов**. Наиболее важными среди них на мой взгляд являются предложенный подход к построению различных полосковых частотно-селективных устройств СВЧ, обеспечивающий расширение высокочастотной полосы заграждения устройств, который заключается в применении в конструкции фильтра резонаторов с разной шириной полосковых проводников. Кроме того, интересными представляются разработанные полосно-пропускающие фильтры, которые более чем в два раза превосходят по протяженности высокочастотной полосы заграждения обычные фильтры. Выполнены моделирование и экспериментальные исследования большого числа разработанных устройств, оригинальность которых защищена патентами на изобретения и полезные модели.

Опираясь на защищаемые положения и полученные результаты работы, соискатель сформулировал разработчикам **рекомендации** по расчёту и методике настройки различных устройств СВЧ, которые приведены во всех разделах диссертации, посвящённых описанию конкретных устройств. Обоснование этих рекомендаций диссертантом выполнено достаточно убедительно, аргументировано и не вызывает сомнений.

#### **Оценка новизны и достоверности научных положений и результатов диссертации**

На мой взгляд, защищаемые положения и связанные с ними результаты работы, а также вытекающие из них рекомендации вполне оригинальны. Для подтверждения достоверности теоретических положений, результатов моделирования и расчетов автором выполнено большое число экспериментальных исследований и разработок частотно-избирательных устройств. Многие полученные результаты сопоставляются с результатами, которые получены и опубликованы другими авторами. Проектирование фильтров и диплексеров осуществлялось на современном уровне, использовался параметрический синтез с применением пакета CST Microwave Studio по заданной центральной частоте и ширине полосы пропускания, а также по заданному уровню потерь на отражение в ней и иным параметрам.



**Оформление диссертации** соответствует требованиям, установленным Министерством образования Российской Федерации. Автореферат диссертации полностью соответствует её содержанию и структуре. Изложение материалов диссертации последовательно и логично, термины и определения, используемые автором, являются понятными и общепринятыми в научной и технической литературе. Некорректных ссылок и заимствований в работе не обнаружено.

Материалы диссертации достаточно **полно опубликованы** в печати и доложены на международных, всероссийских, региональных и отраслевых научно-технических конференциях. Изложение материала последовательное и логичное, употребляемые термины и определения общеприняты в научной и технической литературе. Содержание работы соответствует специальности, по которой она представлена.

### **Замечания по работе**

Выполненный анализ диссертации показал, что ее автор, к сожалению, в полной мере не освоил методику оценки своей научной работы, а также составления и написания Общей характеристики диссертации, следствием чего явились следующие мои замечания.

1. Выбранное автором название темы диссертации подходит больше к названию монографии. Название же диссертации должно интегрировать в себе объект, предмет и цель исследований, а также соответствовать паспорту специальности.

В авторской формулировке цель диссертации «размыта», а объект и предмет исследований вообще не определены.

Считаю, что название диссертации следовало бы сформулировать следующим образом: «Разработка, исследование и создание новых электродинамических систем и устройств фильтрации, формирования и передачи радиосигналов на основе многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов». Из этого названия естественно вытекает цель диссертации: «Разработка, исследование и создание новых малогабаритных и технологичных частотно-селективных устройств фильтрации, формирования и передачи радиосигналов метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн на основе многослойных многопроводниковых полосковых резонаторов».

2. Из методических рекомендаций написания диссертаций известно, что число сформулированных задач должно совпадать с количеством глав.

Задачи, как известно, определяют основные этапы работы на пути к достижению цели, а также содержание глав и параграфов диссертации. При выделении этих задач автору работы, как правило, проще структурировать и обосновывать основные пункты научных положений и результатов, доказывать их новизну и достоверность.

Однако в данной работе полного согласования между задачами и главами

нет. Общее число задач восемь, а глав – четыре. Кроме того, первая глава осталась вне «Задач».

3. Согласно п. 10 Положения ВАК научные результаты и положения являются основными объектами публичной защиты в диссертационном совете. Именно они наполняют диссертационную работу юридическим содержанием и с методической точки зрения являются квинтэссенцией работы.

Поэтому в «Общей характеристике работы» раздел «Положения и результаты, выносимые на защиту» является основным, и его логично переместить выше остальных разделов, характеризующих результаты работы: «Новизна», «Достоверность», «Теоретическая и практическая значимость работы». При этом последние должны доказывать, развивать и дополнять своим содержанием именно научные положения и результаты.

4. В ряде мест в диссертации упоминается красивое слово «концепция» в различных словосочетаниях: «Предложенная концепция создания...» (стр. 9), «Для дальнейшего развития концепции...» (стр. 83), «Сформулирована концепция построения...» (стр. 153, стр. 305). Конечно, для докторской диссертации наличие концепции вполне естественно и даже необходимо. Именно концепция должна красной линией проходить через всю диссертацию, быть, как говорится, ее несущим стержнем.

Однако сущность концепции в диссертации, к сожалению, нигде не раскрыта и не представлена в качестве одного из пунктов научных положений. Хотя содержательно концепция проектирования частотно-селективных устройств в работе прослеживается.

5. Научные положения, выносимые на защиту, хотя и отвечают в некоторой степени критерию научности, но, к сожалению, не соответствуют критерию основательности. Они в основном отражают не получение нового знания о предмете исследований, а конструкторско-технологические и производственные достижения в результате реализации конкретных устройств.

Например, «...фильтры на многопроводниковых резонаторах миниатюрны и обладают высокими частотно-селективными характеристиками» (см. п. 1); «...позволяет создавать сверхминиатюрные частотно-селективные устройства» (см. п. 2); «...отличаются высокой повторяемостью характеристик» (см. п. 3); «...обладают наибольшей развязкой» (см. п. 4).

Первое положение в данной работе должно раскрывать концепцию диссертационной работы, а последующие – должны развивать и дополнять первое положение. Как пример правильного, по моему мнению, написания нескольких научных положений привожу следующие их формулировки.

1) **Концепция** создания малогабаритных полосковых частотно-селективных устройств диапазонов метровых, дециметровых и сантиметровых длин волн, основанная на переходе от традиционных однопроводниковых полосковых резонаторов к структуре многопроводниковой, является базовой для создания принципиально новых электродинамических систем и устройств фильтрации, формирования и передачи радиосигналов с улучшенными показателями качества. При этом многопроводниковая структура, состоящая из



отрезков полосковых проводников, разделенных тонкими диэлектрическими слоями и имеющих сильную электромагнитную связь друг с другом, окружена экранирующим металлическим слоем, причем слои, содержащие проводники резонаторов, отделены от верхнего и нижнего экранов дополнительными диэлектрическими слоями.

1.1) Изменения числа проводников в структуре многопроводниковых резонаторов или толщины диэлектрических слоев, вызывают изменения характеристик резонаторов в широких пределах. Так, частота первой (рабочей) моды колебаний многопроводниковой структуры существенно понижается, а ее собственная добротность возрастает в корень квадратный из числа резонаторов раз по сравнению с резонансной частотой и собственной добротностью одиночного резонатора при прочих равных условиях. В зависимости от конструкции резонаторов и применяемой для их изготовления технологии один или оба диэлектрических слоя с низкой диэлектрической проницаемостью и малыми диэлектрическими потерями могут быть заменены на воздушный зазор между структурой и металлической крышкой.

1.2) Короткое замыкание свободных концов не соседних проводников в многослойной многопроводниковой структуре приводит к запрету на возбуждение мод с промежуточными частотами и, как следствие, к разряжению спектра собственных частот резонатора, значительно расширяя полосу высокочастотного заграждения.

1.3) Применение межслойных перемычек в фильтре на основе структуры многопроводниковых резонаторов позволяет создавать фильтры с шириной высокочастотной полосы заграждения свыше  $11 \cdot f_0$ , при этом отсутствие паразитных резонансов в полосе заграждения приводит к ее углублению на 40 дБ с каждым новым резонатором в структуре.

1.4) Подключение T- и Г-образных полосковых проводников между резонаторами фильтра, приводит к существенному увеличению емкостного взаимодействия резонаторов, что позволяет не только значительно уменьшить размеры узкополосных фильтров на подвешенной подложке, но и сформировать на АЧХ нули коэффициента передачи вблизи полосы пропускания. Эти полюсы затухания обеспечивают более высокую крутизну склонов АЧХ по сравнению с традиционными конструкциями полосковых фильтров.

2) Нанесение на поверхность диэлектрических слоев зеркальной относительно препрега топологии проводников приводит практически к полному исключению влияния разброса параметров препрега на электрические характеристики частотно-селективных устройств, изготавливаемых по технологии многослойных печатных плат.

2.1) Совместное использование дополнительных емкостной и индуктивной связей между элементами и звеньями в конструкции фильтров, выполненных на основе многослойных многопроводных структур, позволяют проводить точную подстройку полосы заграждения по аналогии с тем, как проводится настройка обратных потерь в полосе пропускания. При этом

реализуется как повышения крутизны низкочастотного склона АЧХ фильтра верхних частот, или уменьшения неравномерности в полосе заграждения, так и значительного подавления в требуемой полосе частот в полосе заграждения без применения дополнительных звеньев в структуре фильтра.

2.2) Осаждение на поверхность многослойной многопроводниковой структуры, изготавливаемой по технологии печатных плат, экранирующего слоя гальванической меди на десятки процентов уменьшает массу и размеры частотно-селективных устройств.

3) Электрическая цепь для согласования общего порта с каналами микрополоскового диплексера, выполненная в виде нерегулярного П-образного замкнутого одним концом на экран проводника, обеспечивает практически полную независимость настройки каналов.

Как видно из сформулированных здесь девяти положений, предпосылки для написания автором полноценных положений в диссертации безусловно есть. Для этого достаточно обратиться к ее тексту, выводам по главам и Заключение.

6. В анализируемой диссертации научная новизна положений и результатов исследований лишь декларируется и слабо соотносится с пунктами этих положений и результатов. Отсутствует сопоставительный анализ с предшествующим уровнем достижений в данном направлении, выводами и результатами исследований, опубликованных в литературе, диссертациях, патентах и пр.

7. В заголовках глав и разделов оригинальной части диссертации слово «Метод» или его синоним «Способ» встречаются семь раз. При этом в выводах к главам и в Заключении диссертации это слово и связанные с его понятием формулировки попадают только дважды в Заключении (см. п/п. 6 и 7 на стр. 304 и 305).

Однако методы, безусловно, значимые при оценке работы, автором диссертации, к сожалению, не получили своего развития в ее тексте и не представлены в качестве новых научных положений или результатов в Общей характеристике работы.

В качестве результатов работы в выводах не представлены также научно обоснованные методики, алгоритмы и рекомендации по проектированию устройств по заданным исходным данным.

8. Результаты диссертационных исследований, сконцентрированные в выводах и Заключении, должны удовлетворять критериям, прежде всего, научности, а также основательности и инновационности. В данной работе целый ряд выводов вызывают вопросы в отношении соответствия указанным критериям. Многие выводы автором формулированы в виде аннотаций, без раскрытия сути. Такой подход создал препятствия самому соискателю грамотно охарактеризовать свою работу.

В некоторых выводах вообще отсутствует научная составляющая, например: «Экспериментально было показано, что на одной многослойной печатной плате можно реализовать устройства с широким диапазоном частот,



применяя только один тип резонаторов, в частности, был полностью перекрыт дециметровый диапазон длин волн, при этом за счет новых конструкций резонаторов на основе двухспиральных структур был охвачен еще и метровый диапазон длин волн» (см. стр. 247).

9. Во введении диссертации следовало бы отразить вклад ведущих учёных в развитие данного научного направления. Текст диссертации вычитан и отредактирован, по моему мнению, недостаточно. Местами встречаются жаргонизмы, неудачные словосочетания и пропуски слов в предложениях. Например, «раздвижка частот» (стр. 82); «концепция полоскового резонатора», «концепция многослойного многопроводникового полоскового резонатора» (стр. 82); «из ряда пар растолкнувшихся резонансов», «величина расталкивания» (стр. 85); «раздвижка частот» (стр. 89); «зазоры зависят от величины коэффициентов связи» (стр. 92), «проверка пригодности адекватности описанного способа» (стр. 101), «отличаются уникальной миниатюрностью» (стр. 306).

Аналогичные замечания относятся к оглавлению диссертации (см. стр. 2). В первой главе под общим названием «Полосно-пропускающие фильтры и способы улучшения их характеристик» словосочетание «Полосно-пропускающие СВЧ-фильтры...», повторяющееся подряд с первого по пятый разделы, вполне можно было вообще исключить или заменить на аббревиатуру.

Все отмеченные замечания имеют редакционно-методический характер и существенно не снижают оценку качества выполненных исследований в целом и не влияют на впечатление от масштаба теоретической и особенно прикладной ценности работы А.А. Лексикова. Кроме того, из результатов диссертации и сделанных разработок различных частотно-селективных устройств виден большой объём перспективных работ в этом направлении.

### **Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения ВАК**

Исходя из выполненного выше анализа, резюмирую, что диссертация Лексикова Андрея Александровича представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, которая отличается своим внутренним единством структуры и содержания. В ней на основании выполненных автором теоретических, моделирующих и экспериментальных исследований разработаны положения, позволившие научно обосновать новую концепцию создания малогабаритных полосковых частотно-селективных устройств для диапазонов метровых, дециметровых и сантиметровых длин волн. На базе этой концепции предложены методы расчета импедансных и передаточных характеристик фильтров и диплексеров.

Предложено большое число оригинальных технических решений и разработок, касающихся реализации частотно-селективных устройств. В результате этого получены важные практические результаты, состоящие в создании устройств с качественно новыми функциональными возможностями и с улучшенными характеристиками, которые представляют практический

