

На правах рукописи



Угрюмов Андрей Витальевич

**ПОЛОСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ НА ПОДВЕШЕННОЙ  
ПОДЛОЖКЕ И ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ  
УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в Институте физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Лексиков Александр Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Разинкин Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра теоретических основ радиотехники, профессор  
**Дроботун Николай Борисович**, кандидат технических наук; Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», департамент информационно-измерительных систем, группа разработки СВЧ узлов и монолитных интегральных схем, руководитель

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится «22» января 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.21, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 13а, ауд. 1-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «27» 11 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

### Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертационного исследования и степень её разработанности.** Важнейшими компонентами систем связи, радионавигации, радиолокации, измерительной и специальной радиоаппаратуры являются частотно-селективные устройства (ЧСУ) диапазона сверхвысоких частот (СВЧ). Особое место среди ЧСУ занимают фильтры. В настоящее время существует потребность в надежных и дешевых фильтрующих устройствах, имеющих одновременно миниатюрные размеры и высокие частотно-избирательные свойства. Вышеупомянутым требованиям по большинству параметров удовлетворяют фильтры на основе полосковых и микрополосковых резонаторов [1–3], которые повсеместно используются в СВЧ-технике.

К настоящему времени предложено множество конструкций фильтров на основе микрополосковых резонаторов (МПР). МПР надежны в работе и дешевы в производстве, миниатюрны, а также устойчивы к вибрационным воздействиям. Применение подложек с высоким значением диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r=20\dots 80$ ) позволило использовать МПР для фильтров нижней части диапазона ультравысоких частот (Ultra high frequency – UHF) [4, 5]. Однако на частотах ниже 500 МГц их размеры становятся, как правило, неприемлемо большими, даже на подложках с  $\epsilon_r=80$ . В этом диапазоне частот широко распространены фильтры на основе взаимодействующих LC-контуров [6, 7]. К сожалению, такие фильтры нетехнологичны и обладают меньшей устойчивостью к вибрационным нагрузкам. Одним из путей уменьшения размеров ЧСУ является поиск новых конструкций и новых принципов их построения, которые позволили бы создавать миниатюрные и технологичные устройства с характеристиками лучшими, чем у известных аналогов.

Фильтры на основе полосковых резонаторов на подвешенной полужке (ПРПП) [8, 9] сочетают в себе достоинства фильтров на МПР и сосредоточенных элементах. ПРПП немного уступают микрополосковым резонаторам в технологичности, но демонстрируют практически такую же вибро- и термоустойчивость. Также они имеют более широкую по сравнению с микрополосковыми высокочастотную полосу заграждения, конкурируя в этом плане с фильтрами на сосредоточенных элементах. Кроме того, ПРПП значительно превосходят МПР по собственной добротности (при одинаковой собственной частоте).

Оригинальная конструкция регулярного двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке (ДПРПП) [10] позволяет реализовать компактные фильтры даже в метровом диапазоне длин волн, с широкой (в несколько октав) высокочастотной полосой заграждения и высоким уровнем подавления в ней, а также малыми вносимыми потерями в полосе пропускания [11]. Несмотря на все достоинства регулярного ДПРПП, систематических исследований влияния конструктивных параметров такого резонатора на его собственные свойства (собственная добротность и спектр собственных частот) не проводилось. Для разработки ЧСУ с наилучшими характеристиками такие исследования являются необходимыми.

Исследование собственных свойств регулярных ДПРПП актуально также и с точки зрения развиваемых в настоящее время технологий печатных плат (Printed Circuit Board – PCB) и технологий осаждения тонких пленок (Atomic Layer Deposition – ALD), которые в настоящее время считаются очень перспективными для изготовления СВЧ-устройств.

Таким образом, исследование собственных свойств регулярного ДПРПП является важным и актуальным. Результаты исследований позволят проектировать различные ЧСУ на основе таких резонаторов с характеристиками, в большей степени удовлетворяющими современным требованиям, в сравнении с характеристиками устройств на основе микрополосковых резонаторов.

**Целью диссертационной работы** является исследование собственных свойств двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке с использованием электромагнитного моделирования и разработка миниатюрных конструкций частотно-селективных устройств на их основе. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Исследование зависимостей собственной добротности и спектра собственных частот регулярного двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r < 11$ , от его конструктивных параметров.

2. Разработка метода расширения высокочастотной полосы заграждения для фильтров на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке и исследование его возможностей. Создание фильтров гармоник на основе этого метода.

3. Исследование способа увеличения взаимодействия между регулярными двухпроводниковыми резонаторами на подвешенной подложке с помощью дополнительной гальванической связи и создание сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра на основе этого способа.

4. Исследование влияния конструктивных параметров свёрнутого двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке на его собственные свойства и на коэффициенты связи двухзвенных секций из таких резонаторов. Разработка миниатюрного полосно-пропускающего фильтра, на основе свёрнутого двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке.

5. Разработка методики приведения добротности резонатора к его собственной частоте, с целью сравнения свойств разнотипных резонаторов.

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

1. Впервые выявлены закономерности в поведении собственной добротности и спектра собственных частот регулярного двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r < 11$ . Показано, что в таком резонаторе можно добиться увеличения собственной добротности и отношения частоты второй моды колебаний к частоте первой моды колебаний как увеличивая ширину полосковых проводников и высоту экрана, так и уменьшая толщину подложки. Применение подложек с большим значением диэлектрической проницаемости позволяет увеличить отношение частоты второй моды колебаний к частоте первой моды колебаний.

2. Впервые разработан метод расширения высокочастотной полосы заграждения для полосно-пропускающих фильтров на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке. Показано что, существует оптимальное соотношение между шириной полосковых проводников резонаторов в фильтре гармоник, которое позволяет значительно расширить высокочастотную полосу заграждения.

3. Впервые выявлены закономерности в поведении коэффициентов связи между регулярными двухпроводниковыми резонаторами на подвешенной подложке с использованием дополнительной гальванической связи между ними. Разработана конструкция сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра с дополнительной гальванической связью между резонаторами, имеющего протяженную высокочастотную полосу заграждения.

4. Разработана методика приведения добротности резонатора к его собственной частоте, впервые позволившая сравнить добротности разнотипных резонаторов, имеющих различные собственные частоты.

5. Впервые исследованы собственные свойства свёрнутых двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке. Исследования показали, что для разработки миниатюрных и высокоселективных многосвязных полосно-пропускающих фильтров подходит только одна, из четырёх возможных конфигураций свёрнутого двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке.

### **Теоретическая значимость результатов диссертационной работы**

Научные результаты диссертационной работы вносят вклад в теоретические основы методов улучшения электрических характеристик СВЧ-устройств.

**Практическая значимость результатов диссертационной работы** результатов диссертационной работы:

1. Используя метод расширения высокочастотной полосы заграждения, разработаны и изготовлены две конструкции СВЧ фильтров гармоник на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке с высокочастотными полосами заграждения:  $7,9f_0$  по уровню минус 50 дБ и  $9,7f_0$  по уровню минус 60 дБ. В таких фильтрах высокочастотные полосы заграждения более чем в два раза протяжённее, чем в аналогичных фильтрах с резонаторами одинаковой ширины.

2. Разработана конструкция сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке с использованием дополнительной гальванической связи между резонаторами, имеющего 80% относительную ширину полосы пропускания и высокочастотную полосу заграждения  $6,4f_0$  по уровню минус 30 дБ. Применение дополнительной гальванической связи между регулярными двухпроводниковыми резонаторами на подвешенной подложке позволило разработать также фильтр с относительной шириной полосы пропускания на 27% большей, чем у аналогичного фильтра без дополнительной гальванической связи между резонаторами.

3. Разработан и изготовлен миниатюрный высокоселективный полосно-пропускающий фильтр на свёрнутых двухпроводниковых резонаторах на подвешенной подложке. Применение таких резонаторов позволило уменьшить площадь подложки изготовленного фильтра практически на 50%, по сравнению с аналогичным полосно-

пропускающим фильтром на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке.

4. На основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке разработаны и изготовлены миниатюрные диплексеры и высокоселективные полосно-пропускающие фильтры для работы в нижней части UHF диапазона и на стыке VHF/UHF диапазонов. Разработан высокоселективный фильтр нижних частот с частотой среза  $f_c=2$  ГГц на подвешенной подложке с широкой полосой заграждения.

**Методы диссертационного исследования.** В работе использованы методы электродинамики СВЧ, в частности, метод конечного интегрирования и метод моментов для расчёта электрических характеристик, а также методы экспериментальных исследований СВЧ-устройств.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование в структуре полосно-пропускающего фильтра на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке резонаторов с разной шириной полосковых проводников позволяет значительно расширить высокочастотную полосу заграждения.

2. Применение дополнительной гальванической связи между регулярными двухпроводниковыми резонаторами на подвешенной подложке позволяет проектировать сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры с протяженными высокочастотными полосами заграждения.

3. Использование методики приведения добротности резонатора к его собственной частоте позволяет сравнивать добротности разнотипных резонаторов, имеющих различные частоты.

4. Использование свёрнутых двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке, позволяет проектировать высокоселективные полосно-пропускающие фильтры, имеющие в два раза меньшие размеры подложки, по сравнению с фильтрами на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием апробированных методов расчета и верифицированного программного обеспечения электромагнитного моделирования, хорошим согласием характеристик моделей и измеренных экспериментальных макетов устройств, соответствием ряда полученных результатов ранее известным данным, а также использованием современной измерительной аппаратуры (ZVA 50 – фирмы Rohde & Schwarz).

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на X Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2014 г.), XII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2014 г.), XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2015 г.), XXV Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015 г.), XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2016 г.), VII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2017 г.), V Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2018 г.), Конкурс-конференция ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов. Секция «Физика» (Красноярск, 2019 г.), XXII Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2020 г.).

**Публикации по теме работы.** Всего по теме работы опубликовано 13 работ из них: опубликовано в журналах из перечня ВАК, индексируемых базами WoS и Scopus – 3 статьи; получено патентов на изобретение РФ – 2 шт.

**Личный вклад автора.** Все представленные в работе результаты получены лично автором или при непосредственном его участии: автор принимал участие в разработке методики приведения добротности резонатора к его собственной частоте; автор исследовал влияние конструктивных параметров регулярного ДПРПП на его собственные свойства; автор принимал участие в разработке и исследовании метода расширения высокочастотной полосы заграждения для фильтров на основе регулярных ДПРПП; автор разработал и исследовал конструкцию сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра (СШППФ) на основе регулярных ДПРПП с использованием дополнительной гальванической между ними; автор исследовал закономерности поведения собственных свойств свёрнутых ДПРПП от его конструктивных параметров; автор принимал участие в разработке и изготовлении различных конструкций ЧСУ на подвешенной полужке; автор проводил измерения характеристик изготовленных макетов устройств.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 5



приложений. Общий объем диссертации – 125 страниц, включая 55 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 118 наименований.

### Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертационной работы.

**Первая глава** диссертационной работы представляет собой обзор конструкций полосковых резонаторов, фильтров и диплексеров на подвешенной подложке. Задачей главы является описание способов миниатюризации резонаторов на подвешенной подложке, классификация различных конструкций фильтров на подвешенной подложке по их типу и ширине полосы пропускания, а также диплексеров на подвешенной подложке по способу построения. Особое внимание уделено способам построения фильтров гармоник и сверхширокополосных полосно-пропускающих фильтров. Для них приводятся существующие на данный момент достигаемые характеристики и присущие таким фильтрам достоинства и недостатки.

**Вторая глава** посвящена исследованию собственных свойств регулярного ДПРПП в зависимости от его конструктивных параметров. На рисунке 1 показана в продольном и поперечном сечении структура регулярного ДПРПП [10].

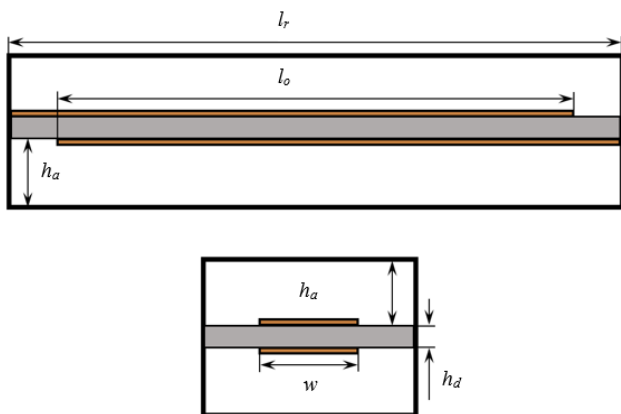


Рисунок 1 – Структура регулярного ДПРПП в продольном и поперечном сечениях

Резонатор состоит из диэлектрической подложки, подвешенной в металлическом корпусе на обеих сторонах которой нанесено по полосковому проводнику каждый из которых закорочен одним концом на корпус, причем на противоположных краях подложки. В данной главе с помощью электромагнитного моделирования в программе CST Studio Suite [12] исследовалось поведение

отношения частот двух первых мод  $f_2/f_1$ , собственной добротности резонатора  $Q_0$  (добротность 1 моды) и коэффициента связи  $k$  резонаторов в зависимости от таких параметров, как  $w$  – ширина полосковых проводников, образующих резонатор,  $h_d$  – толщина подложки,  $h_a$  – высота крышек корпуса над подложкой и  $l_o/l_r$  – величина относительного перекрытия полосковых проводников резонатора. Коэффициенты

связи между резонаторами определялись методом, аналогичным описанному в работе [13].

На рисунке 2 приведены полученные зависимости. Красная линия соответствует подложке с  $\epsilon_r=10,7$ , зеленая  $\epsilon_r=3,55$ , а синяя  $\epsilon_r=2,2$ . Из графиков видно, что, как и в работе [14], отношение частот растет как с увеличением ширины полосковых проводников и расстояния от подложки до экранов, так и с уменьшением толщины подложки. Коэффициент связи  $k$  уменьшается примерно в 2 раза с увеличением ширины полосковых проводников на порядок и растет с высотой экранов.

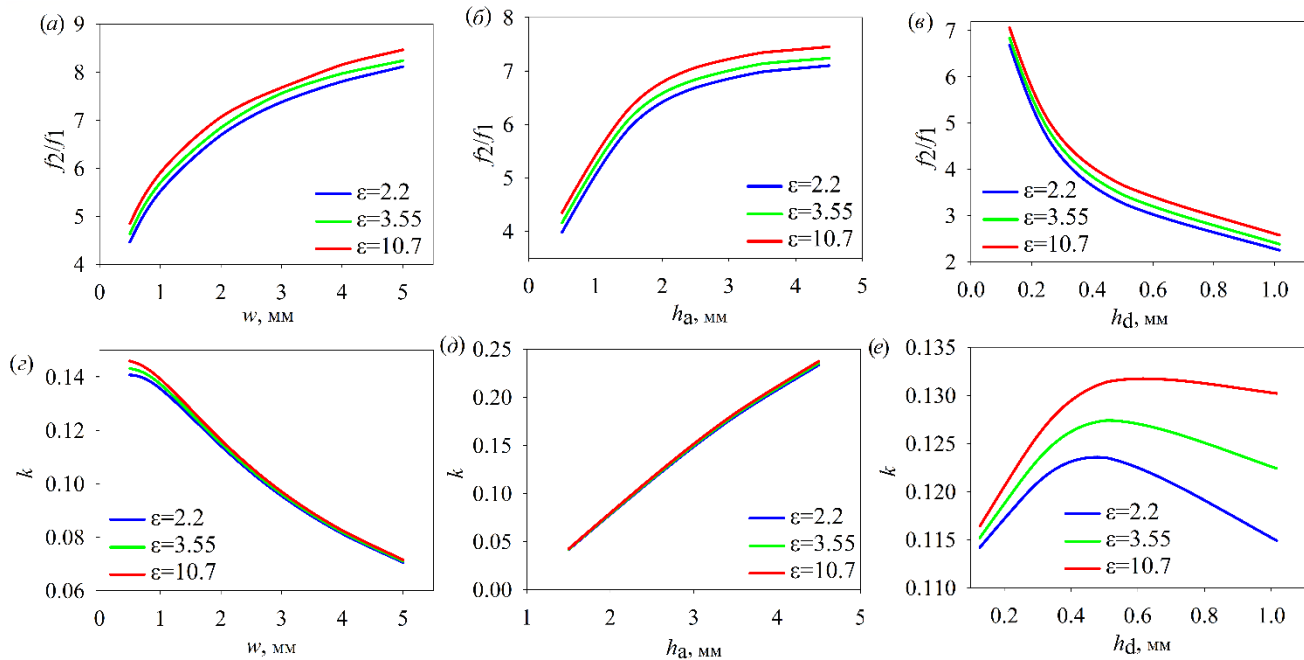


Рисунок 2 – Зависимости  $f_2/f_1$  (а, б, в) и  $k$  (г, д, е) от  $w$ ,  $h_a$  и  $h_d$ . Значения параметров, которые фиксировались:  $h_a=2.5$  мм,  $h_d=0.127$  мм,  $w=2$  мм,  $S=2$  мм.

Исследование собственной добротности резонатора показало, что характер ее зависимостей от  $w$ ,  $h_d$  и  $h_a$  подобен зависимостям  $f_2/f_1$ , при этом  $Q_0$  растет от 210 до 430 и от 200 до 370 при увеличении  $w$  и  $h_a$ , соответственно, но уменьшается с 350 до 340 при увеличении  $h_d$ .

**Третья глава** посвящена методу расширения высокочастотной полосы заграждения в конструкциях фильтров на основе регулярных ДПРПП. Регулярные ДПРПП, имеющие разную ширину проводника и настроенные на одинаковую фундаментальную частоту, имеют различающиеся частоты второй моды колебаний (Рисунок 2, а). Используя эту особенность, был разработан метод расширения высокочастотной полосы заграждения, заключающейся в том, что проводники

резонаторов в фильтре попарно имеют разную ширину полосковых проводников (центральные шире крайних). Таким образом, частоты основной моды колебаний всех резонаторов, формирующих фильтр, будут совпадать, а частоты второй моды в крайних и средних резонаторах будут разными, что приведет к «развалу» паразитной полосы пропускания и, как следствие, к увеличению уровня режекции в ней.

Для проверки этого метода проведено исследование поведения первой паразитной полосы пропускания фильтра в зависимости от ширины полосковых проводников, образующих его резонаторов. Синтезировался ряд четырехзвенных фильтров гармоник (Рисунок 3) на одну и ту же центральную частоту 500 МГц с одинаковой

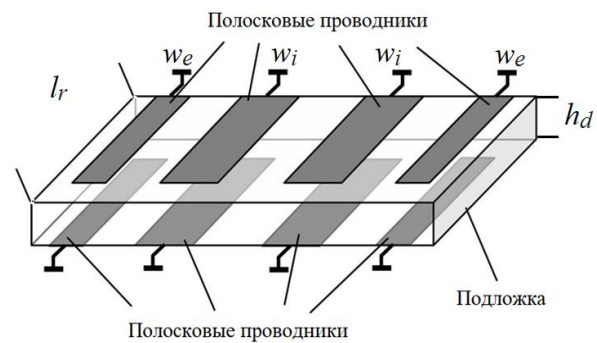


Рисунок 3 – Конструкция четырехзвенного фильтра гармоник на основе регулярных ДПРПП

относительной шириной полосы пропускания фильтра 10%. При этом ширина полосковых проводников крайних резонаторов  $w_e$  фиксировалась и составляла 2,0 мм, 2,4 мм или 2,8 мм. Для  $w_e=2,0$  мм ширина центральных проводников  $w_i$  варьировалась от 2,4 мм до 4 мм с шагом 0,4 мм; для  $w_e=2,4$  мм ширина центральных проводников  $w_i$  варьировалась от 2,8 мм до 4,4 мм с шагом 0,4 мм и для  $w_e=2,8$  мм ширина центральных проводников  $w_i$  варьировалась от 3,2 мм до 4,8 мм с шагом 0,4 мм. Всего 15 различных вариантов. В моделях фильтров использовалась диэлектрическая подложка толщиной  $h_d=0,5$  мм, с  $\epsilon_r=80$  и  $\text{tg}\delta=3 \cdot 10^{-4}$ . Высота экранов одинаковая, равна  $h_a=3$  мм.

На рисунке 4 представлены полученные зависимости максимальных значений коэффициента прохождения в первых паразитных полосах пропускания фильтров ( $S_{21 \max}$ ) от отношения  $w_i/w_e$  для трех фиксированных значений  $w_e$ . Видно, что самый минимальный уровень прохождения в высокочастотной полосе заграждения фильтра достигается при определенном отношении ширин резонаторов.

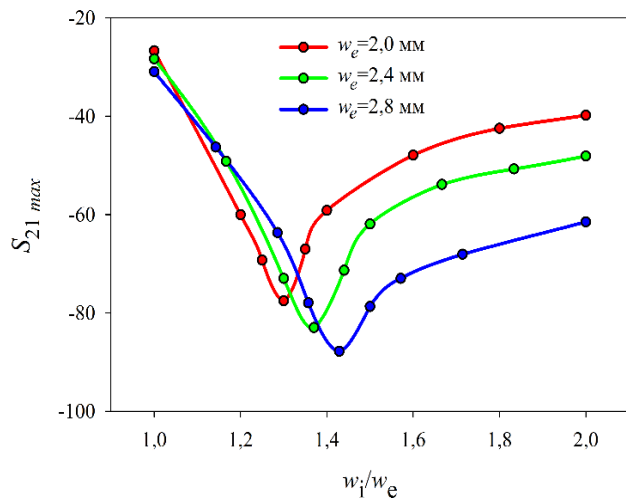
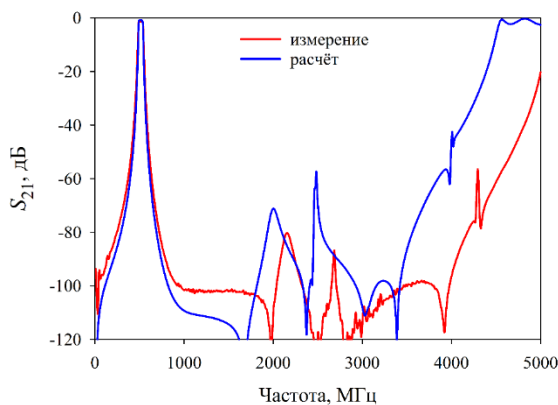


Рисунок 4 – Зависимости максимальных значений коэффициента прохождения в высокочастотных полосах заграждения фильтров ( $S_{21 \max}$ ) от отношения  $w_i/w_e$

Для экспериментальной проверки полученных результатов был разработан четырёхзвенный фильтр гармоник, конструкция которого была оптимизирована с учетом рекомендаций по расширению полосы заграждения, полученных выше. В качестве материала подложки использовалась керамика ТБНС ( $\text{BaSm}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ - $\text{BaNd}_2\text{Yi}_4\text{O}_{12}$ ) ( $\epsilon_r=80$ ,  $\text{tg}\delta=3 \cdot 10^{-4}$ ). Толщина подложки  $h_d=0,45$  мм. Расстояния между подложкой фильтра и крышками корпуса 3 мм. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтра и его фоторафия представлены на рисунке 5. Центральная частота полосы пропускания изготовленного фильтра  $f_0=514$  МГц, ее относительная ширина  $\Delta f/f_0=10,8\%$ . Высокочастотная полоса заграждения составляет  $7,9f_0$  по уровню минус 50 дБ.



(а)

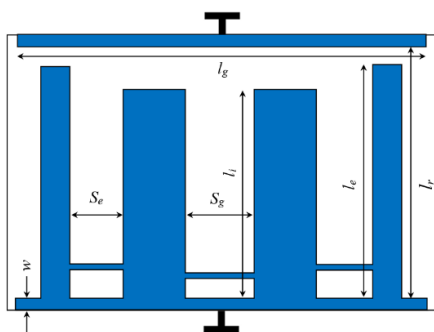


(б)

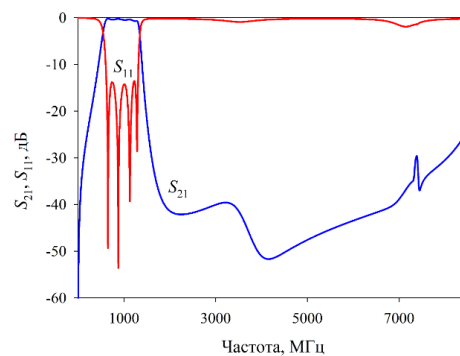
Рисунок 5 – Рассчитанная и измеренная АЧХ фильтра гармоник (а) и его фотография (б)

**Четвертая глава** посвящена описанию конструкции сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра на основе регулярных ДПРПП с использованием дополнительной гальванической связи между резонаторами.

Для построения СШППФ (относительная полоса пропускания более 30%) используют некоторые приемы, позволяющие увеличить взаимодействие между резонаторами. Наиболее простым во всех отношениях способом увеличения взаимодействия между микрополосковыми резонаторами является прием, заключающийся в использовании дополнительной гальванической связи между резонаторами [15]. В этом случае полосковые проводники соседних резонаторов соединяются между собой в определенных точках отрезками полосковых проводников (перемычек). В данной работе этот способ был апробирован применительно к регулярным ДПРПП: с помощью электромагнитного моделирования в программе CST Studio Suite был разработан СШППФ со следующими конструктивными параметрами. Диэлектрическая подложка толщиной  $h_d=0,127$  мм,  $\epsilon_r=10,2$  и  $\text{tg}\delta=22\cdot 10^{-4}$ . Высота экранов одинаковая, равна  $h_a=2,5$  мм. На рисунке 6 приведена топология полосковых проводников четырехзвенного СШППФ на одной из сторон подложки (на обратной стороне топология аналогична, с той лишь разницей, что отражена по горизонтальной оси) и его рассчитанная АЧХ. Фильтр имеет центральную частоту  $f_0=1000$  МГц и 80% относительную ширину полосы пропускания. Минимальные потери в полосе пропускания 0,2 дБ, а относительная ширина высокочастотной полосы заграждения  $6,4f_0$  по уровню минус 30 дБ. Это очень хороший результат, если сравнивать с литературными данными: в подавляющем большинстве предлагаемые там СШППФ имеют высокочастотные полосы заграждения, не превышающие по ширине полосу пропускания.



(a)



(б)

Рисунок 6 – Топология полосковых проводников четырехзвенного СШППФ (a) и его рассчитанная АЧХ (б)

**Пятая глава** посвящена исследованиям поведения собственных свойств и коэффициентов связи свёрнутых ДПРПП в зависимости от их конструктивных параметров. Описан изготовленный макет высокоселективного миниатюрного полосно-пропускающего фильтра (ППФ) на основе таких резонаторов. Полученные по результатам электромагнитного моделирования амплитудно-частотные характеристики сравниваются с измеренными характеристиками макета устройства.

Для миниатюризации регулярных ДПРПП использовалось сворачивание их полосковых проводников. На рисунке 7 представлены конструкция регулярного ДПРПП (*а*) и возможные варианты конструкций, свёрнутых ДПРПП (*б*, *в*, *г*, *д*).

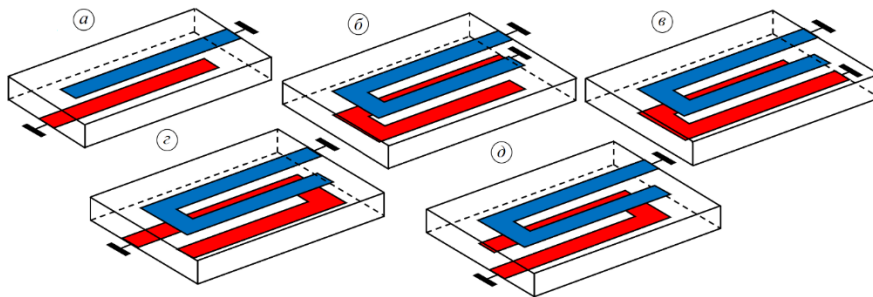


Рисунок 7 – Конструкции двухпроводниковых полосковых резонаторов на подвешенной подложке: регулярный ДПРПП (*а*) и четыре варианта свёрнутых ДПРПП (*б*, *в*, *г*, *д*)

Важно определить, какая конструкция является наиболее миниатюрной при прочих равных условиях. Поскольку собственная добротность зависит от частоты и размера (объема) резонатора [16], то сравнивать собственные добротности исследуемых резонаторов «напрямую» было бы некорректно. Поэтому резонаторы моделировались в одинаковых корпусах. Это позволило исключить влияние размеров резонатора на собственную добротность. С помощью электромагнитного моделирования были определены собственные добротности  $Q_0$  и частоты двух первых мод колебаний резонаторов ( $f_1$  и  $f_2$ ). Далее для исключения влияния собственной частоты резонатора на добротность был применен следующий подход.

В случае использования для полосковых резонаторов подложек с низким значением тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$  и экранирующих крышек, потерями в диэлектрике и потерями на излучение можно пренебречь. Тогда формула для собственной добротности резонатора  $Q_0$  имеет следующий вид:

$$Q_0 = 2\pi f_0 \frac{W_{st}}{P_J}, \quad (1)$$

где  $f_0$  – собственная частота,  $W_{st}$  – запасенная при резонансе электромагнитная энергия,  $P_J$  – мощность Джоулевых потерь.

Добротность полоскового резонатора с одной стороны пропорциональна частоте, а с другой стороны, поверхностное сопротивление полосковых проводников, а, следовательно, и потери в резонаторе пропорциональны квадратному корню из частоты (формула (2)).

$$P_J = a\sqrt{f_0}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – собственная частота,  $a$  – константа.

Поэтому можно предположить, что добротность полоскового резонатора пропорциональна квадратному корню из частоты (формула (3)).

$$Q_0 = 2\pi f_0 \frac{W_{st}}{a\sqrt{f_0}} = q\sqrt{f_0}, \quad (3)$$

где  $f_0$  – собственная частота,  $W_{st}$  – запасенная при резонансе электромагнитная энергия,  $a$  и  $q$  – константы.

Чтобы подтвердить справедливость формулы для нашего резонатора, с помощью электромагнитного моделирования в программе CST Studio Suite была определена частотная зависимость добротности резонатора конструкции (а) (Рисунок 7, а).

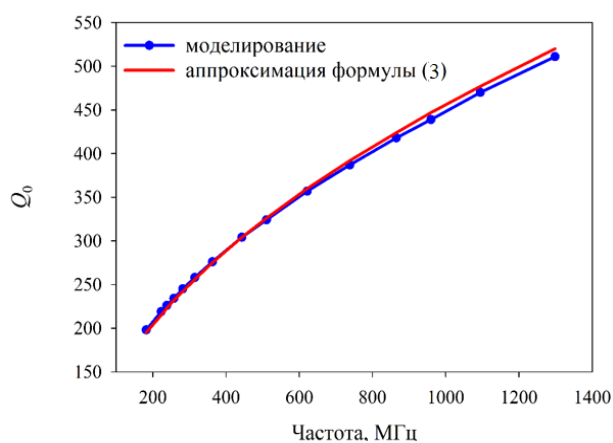


Рисунок 8 – Собственная добротность регулярного ДПРПП в зависимости от частоты

Вариация частоты осуществлялось путем изменения диэлектрической проницаемости подложки от 2,2 до 120. При каждом конкретном  $\epsilon_r$  резонатор в модели «подключался» в тракт со слабой связью, рассчитывалась его АЧХ, по которой определялась собственная добротность  $Q_0$ . Зависимости  $Q_0$  от частоты представлены на рисунке 8. Синяя кривая с круглыми маркерами получена с помощью



электромагнитного моделирования, красная кривая получена аппроксимацией уравнения (3), где,  $q = 14,42 \text{ МГц}^{-1/2}$ .

Видно, что с большой степенью точности  $Q_0$  регулярного ДПРПП пропорциональна квадратному корню из частоты, а, следовательно, можно скорректировать добротности резонаторов в соответствии с собственной частотой по следующей формуле:

$$Q_{ri} = Q_{0i}/k_i, \quad (4)$$

где  $k_i = \sqrt{f_i/f_0}$ ,  $Q_{0i}$  – собственная добротность  $i$  резонатора на свёрнутых проводниках,  $f_i$  – его собственная частота,  $f_0$  – собственная частота регулярного ДПРПП (рисунок 7, а), который в данном случае принят за эталон.

В моделях резонаторов использовалась подвешенная в корпусе подложка с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=80$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta=3 \cdot 10^{-4}$ , что соответствует керамике ТБНС, широко применяемой в СВЧ электронике. Толщина подложки  $h_d=0,5$  мм. Расстояние от подложки до экранов  $h_a=3$  мм.

В Таблице 1.1 приведены полученные вышеописанным способом характеристики исследуемых резонаторов.

Таблица 1.1 – Основные параметры исследуемых резонаторов

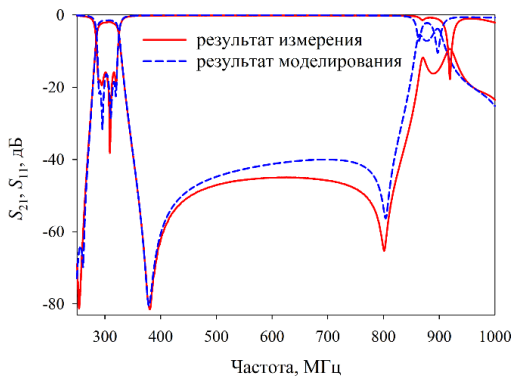
Конструкция	$f_1=f_0$ , МГц	$f_2$ , МГц	$Q_{0i}$	$k_i$	$Q_{ri}$	$f_2/f_1$
<i>а</i>	471	1449	231	1,00	231	3,08
<i>б</i>	687	1516	205	1,21	170	2,21
<i>в</i>	287	718	113	0,78	145	2,50
<i>г</i>	246	900	122	0,72	169	3,66
<i>д</i>	330	512	108	0,83	129	1,55

Из таблицы видно, что резонаторы конструкций (*в*) и (*г*) являются одновременно компактными (т. к. имеют наименьшую из представленных собственную частоту) и сравнительно добротными. Далее было проведено исследование коэффициентов связи между резонаторами конструкций (*в*) и (*г*). В результате исследований оказалось, что только резонатор типа (*в*) применим для разработки многозвенных фильтров на его основе.

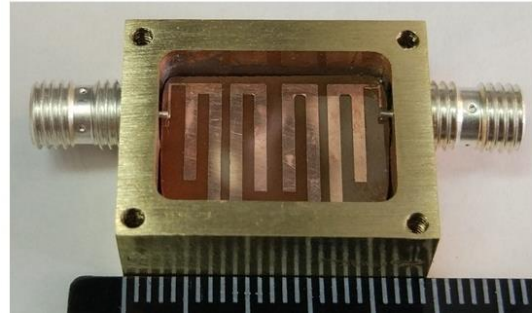
Для проверки полученных результатов на основе лучшей конструкции резонатора



был разработан и изготовлен макет четырёхзвенного ППФ с центральной частотой и полосой пропускания 305 МГц и 39 МГц соответственно. На рисунке 9 представлены АЧХ (а) и фотография изготовленного фильтра (б). Размеры подложки 18,7 мм × 13,2 мм. Оценка показала, что площадь подложки изготовленного фильтра практически на 50% меньше, чем для аналогичного фильтра на основе регулярных ДПРПП.



(а)



(б)

Рисунок 9 – (а) – АЧХ четырёхзвенного ППФ на основе резонаторов типа (б),  
(б) – фотография изготовленного фильтра

**В приложениях А–Г** приведено описание конструкций ЧСУ, разработанных на основе регулярных ДПРПП: высокоселективных ППФ для каналов L2 (1226...1254 МГц) и L1 (1574...1610 МГц), миниатюрных диплексеров для работы в нижней части UHF диапазона и на стыке VHF/UHF диапазонов, а также приведены их характеристики. Описана конструкция высокоселективного фильтра нижних частот (ФНЧ).

**В приложении Д** приведены патенты на изобретения.

### Основные результаты работы

1. Исследовано влияние конструктивных параметров регулярного двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке, выполненного на подложках с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r < 11$ , на его собственные свойства. Показано, что в таком резонаторе с увеличением ширины полоскового проводника и высоты крышки, так и с уменьшением толщины подложки происходит увеличение собственной добротности и отношения частоты второй моды колебаний к частоте первой моды колебаний.

2. Разработан метод расширения высокочастотной полосы заграждения для полосно-пропускающих фильтров на основе регулярного двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке. Используя оптимальное соотношение между ширинами полосковых проводников резонаторов в фильтре на основе таких резонаторов, можно значительно увеличить протяженность высокочастотной полосы заграждения. С применением этого метода разработаны конструкции фильтров гармоник. Разработанные фильтры более чем в два раза превосходят по протяженности высокочастотной полосы заграждения аналогичные фильтры с проводниками резонаторов одинаковой ширины.

3. Исследован способ увеличения взаимодействия между регулярными двухпроводниковыми резонаторами на подвешенной подложке с помощью дополнительной гальванической связи. Применение такого приёма позволяет разрабатывать сверхширокополосные полосно-пропускающие фильтры с высокой электрической прочностью. Разработана конструкция сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра с использованием дополнительной гальванической связи между резонаторами, имеющего протяженную высокочастотную полосу заграждения.

4. Разработана методика приведения добротности резонатора к его собственной частоте, впервые позволившая сравнить свойства разнотипных резонаторов, характеризующие их добротность.

5. Исследовано влияние конструктивных параметров свёрнутого двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке на его собственные свойства и на коэффициенты связи двухзвенных секций из таких резонаторов. Показано, что для разработки миниатюрных и высокоселективных многозвенных полосно-пропускающих фильтров подходит только одна из четырёх возможных конфигураций свёрнутого двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке. Разработана конструкция миниатюрного полосно-пропускающего фильтра на свёрнутых двухпроводниковых резонаторах на подвешенной подложке. Фильтр имеет в два раза меньшие размеры подложки по сравнению с аналогичным фильтром на основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке.

6. На основе регулярных двухпроводниковых резонаторов на подвешенной подложке разработаны миниатюрные конструкции высокоселективных полосно-пропускающих фильтров и диплексеров для работы в нижней части UHF диапазона и стыке VHF/UHF диапазонов. Разработан высокоселективный фильтр нижних частот на подвешенной подложке с широкой полосой заграждения.

### Список публикаций по теме работы

#### Статьи в журналах из перечня ВАК, индексируемые базами WoS, Scopus:

A1. **Угрюмов, А. В.** Исследование собственных свойств двухпроводникового полоскового резонатора на подвешенной подложке и моделирование сверхширокополосного фильтра на его основе / **А. В. Угрюмов**, А. О. Афонин, А. А. Лексиков, И. В. Говорун, А. А. Баскова, Ан. А. Лексиков // Сборник Трудов VII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики», Томск. – 2017. – С. 10–15.

A2. Leksikov, A. A. A Method of Stopband Widening in BPF Based on Two-Conductor Suspended-Substrate Resonators / A. A. Leksikov, A. M. Serzhantov, I. V. Govorun, A. O. Afonin, **A. V. Ugryumov**, An. A. Leksikov // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2018. – Vol. 72. – P. 11–16.

A3. Leksikov, A. A. Miniaturized Suspended-Substrate Two-Conductors Resonator and a Filter on Its Base / A. A. Leksikov, A. M. Serzhantov, I. V. Govorun, A. O. Afonin, **A. V. Ugryumov**, An. A. Leksikov // Progress In Electromagnetics Research M. – 2019. – Vol. 84. – P. 127–135.

#### Патенты РФ:

A4. Широкополосный полосковый фильтр: пат. 2626224 Российская Федерация: МПК H01P 1/203 / Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков А. А., **Угрюмов, А. В.**, Бальва Я. Ф., Лексиков Ан. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" – №2016138653; заявл. 29.09.2016; опубл. 24.07.2017.

A5. Высокоселективный полосковый фильтр нижних частот: пат. 2708342 Российская Федерация: МПК H01P 1/203 / Беляев Б. А., Сержантов А. М., Лексиков А. А., Дмитриев Д. Д., Бальва Я. Ф., Лексиков Ан. А., Савишников М. О., **Угрюмов А. В.**,

Подшивалов И. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский федеральный университет" – №2019110183; заявл. 05.04.2019; опубл. 05.12.2019.

#### **Другие публикации:**

А6. **Угрюмов, А. В.** Полосковый диплексер на подвешенной подложке для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS / **А. В. Угрюмов**, И. В. Говорун, А. А. Лексиков // XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники»: сборник научных трудов, Красноярск. – 2015. – С. 383–386.

А7. Leksikov, A. A. The Compact Suspended-Substrate Diplexer For GPS/GLONASS Radionavigation Systems / A. A. Leksikov, An. A. Leksikov, I. V. Govorun, A. O. Afonin, **A. V. Ugryumov**, A. V. Grebennikov // 25th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015), Sevastopol. – 2015. – P. 541–542.

А8. Лексиков, А. А. Миниатюрный полосковый диплексер на подвешенной подложке для радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS / А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков, И. В. Говорун, А. О. Афонин, **А. В. Угрюмов**, А. В. Гребенников // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2015. – С 150–152.

А9. Лексиков, А. А. Полосковый диплексер на подвешенной подложке для работы на стыке VHF/UHF диапазонов / А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков, И. В. Говорун, А. О. Афонин, **А. В. Угрюмов** // XIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск. – 2016. – С. 30–33.

А10. Лексиков, А. А. Полосковый фильтр гармоник на подвешенной подложке / А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков, А. М. Сержантов, А. О. Афонин, **А. В. Угрюмов** // Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск. – 2016. – С. 39–42.

А11. Лексиков, Ан. А. Миниатюризованный двухпроводниковый резонатор на подвешенной подложке и фильтр на его основе / Ан. А. Лексиков, А. А. Лексиков, **А. В. Угрюмов**, А. О. Афонин // Сборник Тезисов V Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации», Красноярск. – 2018. – С. 23–26.

A12. Угрюмов, А. В. Миниатюризованный двухпроводниковый резонатор на подвешенной подложке и фильтр на его основе / А. В. Угрюмов, А. А. Лексиков // Конкурс-конференция ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов. Секция «Физика»: сборник тезисов, Красноярск. – 2019. – С. 13.

A13. Угрюмов, А. В. Высокоселективный фильтр нижних частот / А. В. Угрюмов, Ан. А. Лексиков, А. А. Лексиков, И. В. Говорун, А. М. Сержантов, А. О. Афонин // XXII Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники»: сборник научных трудов, Красноярск. – 2020. – С. 76–80.

### Список цитируемой литературы

1. Pozar, D. M. Microwave Engineering / D. M. Pozar. – John Wiley, 2000. – 756 p.
2. Hong, J. S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications / J. S. Hong, M. J. Lancaster. – John Wiley, 2001. – 476 p.
3. Cameron, R. J. Microwave Filters for Communication Systems / R. J. Cameron, C. M. Kudsia, R. R. Mansour. – John Wiley, 2007. – 912 p.
4. Belyaev, B. A. Selective properties of microstrip filters designed on quarter-wave codirectional hairpin resonators / B. A. Belyaev, S. V. Butakov, N. L. Laletin, A. A. Leksikov, V. V. Tyurnev, O. N. Chesnokov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2006. – Vol. 51, №. 1. – P. 20–30.
5. Belyaev, B. A. Frequency-selective properties of a microstrip filter with irregular dual-mode resonators / B. A. Belyaev, I. A. Dovbysh, A. A. Leksikov, V. V. Tyurnev // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2010. – Vol. 55, №. 6. – P. 621–626.
6. Алексеев, Л. В. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов / Л. В. Алексеев, А. Е. Знаменский, Е. Д. Лоткова – М.: Связь, 1976. – 281 с.
7. Darwis, F. Design and Fabrication of 456 MHz Bandpass Filter / F. Darwis, D. P. Kurniadi. // Journal of Electronics and Communication Engineering. – 2012. – Vol. 4. – P. 38–41.
8. Малорацкий, Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л. Г. Малорацкий – М.: Советское Радио, 1976. – 216 с.
9. Калинина, Т. И. Зарубежная Техника - Фильтры на МПЛ / Т. И. Калинина. – М.: Электроника, 1989. – 49 с.

10. Полосно-пропускающий фильтр: пат. 2237320 Российская Федерация: МПК7 H01P 33/05 / Беляев Б. А., Лексиков А. А., Тюрнев В. В., Казаков А. В.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательское учреждение Институт физики им. Л. В. Киренского – №2003101747; заявл. 21.01.2003; опубл. 27.09.2004.

11. Belyaev, B. A. Strip-line filter with suspended substrate / B. A. Belyaev, A. A. Leksikov, V. V. Tyumev // 2005 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, Crimea, Ukraine. – 2005. – P. 506–507.

12. CST studio suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com> (дата обращения: 20.08.2020).

13. Hong, J. Theory and Experiment of Novel Microstrip Slow-Wave Open-Loop Resonator Filters / J. Hong, M. J. Lancaster // IEEE Transactions on microwave theory and technique. – 1997. – Vol. 45, №. 12. – P. 2358–2365.

14. Leksikov, A. A. Stripline Double-Wire Resonator on Suspended Substrate / A. A. Leksikov, F. G. Sukhin // 2006 16th International Crimean Microwave and Telecommunication Technology, Sevastopol, Crimea, Ukraine. – 2006. – P. 563–564.

15. Kikkert, C. J. Designing Low Cost Wideband Microstrip Bandpass Filters / C. J. Kikkert // TENCON 2005 – 2005 IEEE Region 10 Conference, Melbourne, Qld., Australia. – 2005. – P. 1 – 6.

16. Алмазов-Долженко К. И. Техническая электродинамика и устройства СВЧ / К. И. Алмазов-Долженко, А. Н. Королев. – М.: Научный мир, 2006. – 173 С.

Автор выражает благодарность А. А. Лексикову за руководство диссертационной работой. Также автор благодарит И. В. Говоруна за содействие, поддержку и помощь в работе. Благодарит сотрудников лабораторий Электродинамики и СВЧ-электроники и Научного приборостроения за ценные советы и помощь в работе.