

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Угрюмова Андрея Витальевича «Полосковые резонаторы на подвешенной подложке и частотно-селективные устройства на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Основным направлением развития средств систем связи, радионавигации, радиолокации, измерительной и специальной радиоаппаратуры является улучшение характеристик входящих в них частотно-избирательных устройств. В настоящее время необходимы надежные и дешевые фильтрующие устройства, имеющие одновременно миниатюрные размеры и высокие частотно-избирательные свойства. Как известно, микрополосковые фильтры удовлетворяют всем приведенным требованиям и поэтому получили широкое распространение в СВЧ-технике. Однако такие фильтры, относящиеся к одним из самых миниатюрных, не позволяют достигать высоких частотно-селективных свойств устройств в нижней части дециметрового диапазона длин волн, а тем более в метровом диапазоне. Оригинальная конструкция регулярного двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке (ДПРПП) 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.

Исследованные в диссертации Угрюмова А. В. ДПРПП и разработанные на их основе конструкции миниатюрных частотно-селективных устройств, можно отнести к одному из наиболее перспективных направлений развития частотно-селективных СВЧ-устройств. Можно сказать, что результаты диссертационной работы Угрюмова А. В. вносят

существенный вклад в миниатюризацию и улучшение электрических характеристик полосковых СВЧ-устройств.

В диссертации исследованы собственные свойства (собственная добротность и спектр собственных частот) ДПРПП и показаны возможности разработки на их основе частотно-селективных устройств с электрическими характеристиками, во многом удовлетворяющими современным требованиям. Проведённые соискателем исследования являются актуальными и практически значимыми.

Автор корректно пользуется методами электродинамики СВЧ, в частности, метод конечного интегрирования и метод моментов для расчёта электрических характеристик, а также методами экспериментальных исследований СВЧ-устройств. Научные положения, выводы и рекомендации, сделанные в работе на основе результатов электромагнитного моделирования и проведенных экспериментов, являются логически обоснованными и достоверными.

Результаты проведенных автором диссертации исследований достаточно полно опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 3-х статьях в журналах из перечня ВАК и индексируемых базами WoS и Scopus.

Содержание диссертации изложено грамотным научно-техническим языком. Материал достаточно хорошо проиллюстрирован. Автор продемонстрировал хорошее знание предмета и методов исследования.

Анализ содержания диссертации показывает следующее.

В качестве наиболее значимых можно указать следующие новые научные результаты:

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. Что очень важно для получения широкой высокочастотной полосы заграждения.

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 многозвенных полосно-пропускающих фильтров подходит только одна, из четырёх возможных конфигураций свёрнутого двухпроводникового резонатора на подвешенной подложке.

**В первой главе** диссертации представлен 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 фильтров. Для них приводятся существующие на данный момент достигаемые характеристики и присущие таким фильтрам достоинства и недостатки.

**Во второй главе** представлено описание исследования собственных свойств регулярного ДПРПП в зависимости от его конструктивных параметров. Даны рекомендации для получения наибольшего значения собственной добротности и раздвижки частот основной и второй моды колебаний у резонаторов такого типа.

**В третьей главе** представлен метод для расширения высокочастотной полосы заграждения для конструкций фильтров на основе регулярного ДПРПП. Работоспособность данного метода подтверждается экспериментально двумя изготовленными макетами фильтров гармоник.

**В четвертой главе** представлено описание исследования влияния дополнительной гальванической связи на взаимодействие между регулярными ДПРПП. Описана конструкция сверхширокополосного полосно-пропускающего фильтра с использованием дополнительной гальванической связи между резонаторами на основе регулярного ДПРПП.

**В последней, пятой главе,** представлено исследование поведения собственных свойств и коэффициентов связи свёрнутых ДПРПП в зависимости от их конструктивных параметров. Приводится изготовленный макет высокоселективного миниатюрного полосно-пропускающего фильтра (ППФ) на основе таких резонаторов. Полученные по результатам электромагнитного моделирования амплитудно-частотные характеристики сравниваются с измеренными характеристиками макетов устройств.

Можно констатировать, что результаты, полученные Угрюмовым А. В. в диссертации, развивают теорию и практику разработки частотно-

селективных СВЧ-устройств. Автор посредством электромагнитного моделирования и изготовленных макетов устройств подтвердил выносимые на защиту положения.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В первом положении указано, что использование резонаторов с разной шириной полосковых проводников позволяет значительно расширить высокочастотную полосу заграждения, при этом в самом положении не приведены конкретные количественные значения увеличения полосы заграждения.

2. На странице 58, рисунок 3.5 приведено сравнение расчётной и измеренной АЧХ фильтра. Из рисунка следует, что расчётная и измеренная полоса пропускания совпадают, при этом измеренная побочная полоса пропускания значительно сдвинута вверх по частоте, за счёт чего полоса подавления расширилась. В тексте этот эффект отмечен, однако нет пояснений почему такой эффект происходит. Так же ни на этом, ни на последующих рисунках с характеристиками фильтров, не приведены графики расчётных/измеренных возвратных потерь, что не даёт полного представления о качестве рассчитанных/изготовленных фильтров.

3. На странице 65 приведены исходные геометрические размеры фильтра (ширина резонаторов, зазор между ними и высота экрана). Выбранные значения не являются очевидными, несмотря на ранее указанную связь между ними и характеристиками фильтра.

4. К сожалению, в диссертации не рассмотрены вопросы, связанные с применением предложенных топологий в многослойных структурах (PCB, LTCC технологии). Чрезвычайно интересным представляется использование предложенных топологий в многослойных печатных платах, где для спекания слоёв используется, так называемый, слой-препрег с отличной от основного диэлектрической проницаемостью. Надеюсь, автор продолжит дальнейшие исследования в этом направлении.

## **Заключение по диссертации**

Указанные выше замечания не являются критическими и не снижают ценности диссертационной работы Угрюмова А. В., которая по актуальности темы, научной новизне исследований и содержащимся в работе результатам, обоснованности и достоверности последних, их теоретической и практической значимости в целом заслуживает положительной оценки. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Считаю, что диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор, Угрюмов Андрей Витальевич, достоин присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

### **Официальный оппонент**

кандидат технических наук, начальник отдела СВЧ схемотехники, ДИИС Акционерного общества «Научно-производственная фирма «Микран»  
«18» декабря 2020 г.

 Дроботун Николай Борисович

634041, Томская обл., г. Томск, пр. Кирова, д. 51д

Тел. +79609757344, E-mail: [nikolay.drobotun@micran.ru](mailto:nikolay.drobotun@micran.ru)

Подпись Дроботуна Николая Борисовича заверяю

Начальник отдела кадров АО «НПФ «Микран»

«21» декабря 2020 г.

Ковалёва Анна Олеговна

