

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Козлова Сергея Вячеславовича на диссертационную работу Тананы Ольги Валерьевны «Широкодиапазонные высокочастотные резонаторы проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонентов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии

1. Соответствие содержания диссертации специальности и отрасли науки

Целями диссертационной работы является разработка методик электродинамического расчета и конструкций широкодиапазонных резонаторов проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонентов, включая устройства согласования таких резонаторов с волноводными линиями передач, а также разработка рекомендаций по практическому применению широкодиапазонных резонаторов в технических средствах и системах СВЧ-диапазона, включая измерение электрофизических параметров радиоматериалов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены задачи по обоснованию и разработке конструкций широкодиапазонных высокочастотных цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа, разработана методика электродинамического расчета элементов связи СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми прямоугольными волноводами, разработаны устройства широкополосного согласования таких резонаторов на основе полупрозрачной решетки и отрезка нерегулярного волновода, экспериментально подтверждена возможность практического использования широкодиапазонных высокочастотных цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа в СВЧ-системах различного назначения, а также для исследования характеристик радиоматериалов в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц.

Объектом исследования выбран СВЧ-резонатор с двумя элементами связи и элементом частотной перестройки. Предмет исследования автором определен как методики электродинамического расчета, конструкции и экспериментальное исследование широкодиапазонных резонаторов проходного типа миллиметрового диапазона длин волн.

Исходя из перечисленного можно утверждать, что содержание диссертационной работы Тананы О.В. «Широкодиапазонные высокочастотные резонаторы проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонентов» соответствует п.1 – Разработка новых методов решения задач прикладной электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн и СВЧ устройств (включая излучающие, канализирующие и преобразующие устройства радиодиапазона), определения их предельно-достижимых характеристик, возможных путей построения; п. 3 – Разработка новых принципов построения

и конструирования антенных систем, активных и пассивных СВЧ устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других с существенно улучшенными параметрами; п. 6 – Разработка методов математического моделирования для проектирования и оптимизации антенных систем и СВЧ устройств широкого применения паспорта специальности 05.12.07 – антенны, устройства СВЧ и их технологии и отрасли науки – технические.

2. Актуальность темы диссертации

Актуальность совершенствования характеристик и разработки новых конструкций резонаторов СВЧ-диапазона очевидна. Резонаторы применяются как ключевые элементы колебательных систем генераторов СВЧ-сигналов и фильтрующих цепей на высокой частоте, а также при исследовании характеристик радиоматериалов. К резонаторам предъявляются требования по обеспечению высокой, до 10^5 , добротности работы в широком диапазоне частот с подстройкой частоты механическим или электронным способами, конструктивной простоты, стабильности параметров, особенно при изменении температуры, технологичности изготовления и, в ряде случаев, предельной мощности СВЧ-сигнала.

Наиболее сложным является вопрос проектирования и изготовления резонаторов все более активно осваиваемого миллиметрового диапазона длин волн. Это связано с малыми геометрическими размерами как самого резонатора, так и элементов фидерного тракта (волноводы, коаксиальные кабели) с элементами связи резонатора и фидера. Так, например, диаметр отверстия связи стандартного одномодового волновода с резонатором может составлять доли-единицы мм, что требует очень высокой точности изготовления СВЧ-устройства. Вместе с тем, спроектированные с использованием известных методик и сам резонатор и его устройство связи с трактом будут являться достаточно узкополосными, что не удовлетворяет современным требованиям.

На практике необходимы широкодиапазонные высокодобротные резонаторы миллиметрового диапазона длин волн с возможностью, как минимум, высокоточной механической перестройкой частоты с максимально высокой, приближающейся к 10^5 , нагруженной добротностью. Технической основой создания таких резонаторов является повышение точности изготовления СВЧ-устройств, применение новых видов радиопоглощающих материалов с углеродсодержащими или нано-компонентами и разработка новых методик электродинамического расчета СВЧ-устройств. В этой связи диссертация Тананы О.В., является актуальной и представляет несомненный практический интерес.

3. Степень новизны результатов диссертации и научных положений, которые выносятся на защиту

Полученные в диссертационной работе Тананы О.В. результаты обладают несомненной научной новизной, которая состоит в следующем:

- в предложенных вариантах конструкций высокодобротных резонаторов миллиметрового диапазона длин волн для обеспечения широкого диапазона рабочих частот использовано возбуждение различных, но однотипных высокодобротных колебаний вида H_{0mn} , $m \in [1; 2]$, $n \in [2; 13]$ с перестройкой с одного типа колебаний на другой, что позволило расширить диапазон рабочих частот резонатора до 1/2 октавы;

- в разработанных цилиндрических или открытых квазиоптических проходных резонаторах предложено применение радиопоглощающего углеродосодержащего материала, наносимого на заднюю поверхность плунжера и внутреннюю поверхность задней торцевой стенки в объемных резонаторах, или изготовление бокового корпуса открытого резонатора из колец такого же радиопоглощающего материала, что позволило повысить добротность в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц на 30%;

- при электродинамическом расчете элементов связи СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми прямоугольными волноводами учтены входные импедансы согласуемых элементов, что позволило определить величину волнового сопротивления устройств связи объемного резонатора с СВЧ-трактом по заданным величинам диапазона рабочих частот и полосы пропускания резонатора, рассчитать геометрические размеры элемента связи объемных резонаторов в рабочем диапазоне частот и обеспечить широкополосное согласование высокодобротных СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми волноводами в диапазоне частот до 1/2 октавы с коэффициентом стоячей волны не более 1,7.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, основывается на использовании классических методов электродинамики, теории СВЧ-устройств и математической статистики.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечена использованием современной высокотехнологичной аппаратуры – векторного анализатора цепей Anritsu MS4644B, измерителей КСВН, ослаблений панорамных P2-120, P2-121 и P2-122 и использованием апробированных методик измерения параметров волноводного тракта.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость результатов диссертации состоит в развитии методик электродинамического расчета СВЧ-резонаторов и устройств их связи со стандартными одномодовыми волноводами, причем несомненным достоинством предложенных методик является проведение расчетов преимущественно аналитическими

методами без использования трудоемкого численного электродинамического моделирования.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что: набор рассчитанных, спроектированных и экспериментально исследованных резонаторов диапазонов частот 25,95...37,5 ГГц; 37,5...53,57 ГГц; 53,57...78,33 ГГц использован для реализации трех измерительных стендов материальных параметров композитных сред с обеспечением погрешности измерений не более 2,5% и может быть использован при разработке радиотехнических средств миллиметрового диапазона длин волн; разработанные методики расчета могут быть использованы для проектирования новых образцов СВЧ-устройств – резонаторов совместно с устройствами связи миллиметрового диапазона длин волн.

Экономическая значимость полученных результатов заключается в сокращении времени и финансовых затрат на разработку СВЧ-резонаторов миллиметрового диапазона длин волн.

Социальная значимость результатов состоит в использовании полученных результатов в подготовке специалистов по СВЧ-технике миллиметрового диапазона длин волн.

Эффективность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, подтверждена внедрением ее результатов в серийно выпускаемые измерители флуктуаций ИФ-40СА в части модернизации резонаторов и переключателей Тг2.244.025, Тг2.242.004, что позволило повысить чувствительность измерений шумов на 6...8 дБ и улучшить эксплуатационные характеристик приборов, в НИОКР «Разработка математической модели и методики измерения параметров радиопоглощающих наноструктурированных материалов в СВЧ-диапазоне», а также в учебном процессе на кафедре физики Полоцкого государственного университета.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Основные положения и результаты диссертационных исследований в достаточной степени опубликованы в научной печати. По результатам диссертационных исследований опубликовано 31 работа.

К числу статей в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий по специальности 05.12.07 - антенны, СВЧ устройства и их технологии следует отнести следующие работы:

1–А. Решётчатые элементы связи высокочастотных резонаторов и прямоугольных волноводов в миллиметровом диапазоне / В.А. Карпович, Г.Я. Слепьян, В.Н. Скрасанов, В.Н. Родионова, О.В. Филипёнок (Танана) // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 11. – С. 1303–1308 (журнал входил в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный решениями

президиума ВАК Минобразования России № 21/3 от 6 мая 2005 г., № 22/4 от 13 мая 2005 г., № 28/25 от 17 июня 2005 г.; разделение по специальностям и отраслям науки в указанный период отсутствовало).

2–А. Элементы связи высокодобротных резонаторов с одномодовыми волноводами на основе нерегулярного волновода / Г.Я. Слепян, В.Н. Скрасанов, В.Н. Родионова, В.А. Карпович, М.П. Натаров, О.В. Филипёнок (Танана) // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 2. – С. 198–203 (журнал входил в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК РФ в редакции от июля 2007 г. с рекомендациями экспертного совета по радиотехнике и связи без деления по отраслям наук).

3–А. Радиопоглощающие свойства углеродных наноматериалов / С.А. Жданок, А.В. Крауклис, И.Ф. Буяков, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, О.В. Танана // Нанотехника. – 2011. – № 2. – С. 72–75 (журнал входил в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК РФ в редакциях от 25.02.2011 и от 17.06.2011; разделение по специальностям и отраслям науки, а также требования по наличию рекомендаций экспертного совета в указанный период отсутствовали).

4–А. Комплект измерительных СВЧ резонаторов / В.Н. Родионова, В.А. Карпович, О.В. Танана, Т.В. Гаевская // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 3. – С. 1–6 (журнал входил в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК РФ в редакциях от 25.02.2011 и от 17.06.2011; разделение по специальностям и отраслям науки, а также требования по наличию рекомендаций экспертного совета в указанный период отсутствовали).

5–А. Танана О.В., Карпович В.А., Слепян Г.Я. Метод определения комплексной диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов по электродинамическим параметрам СВЧ резонаторов // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 2. – С. 28–31 (журнал входил в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований в 2012 году», утвержденный приказом Председателя Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 1 февраля 2012 г. № 21 с изменениями и дополнениями, внесенными приказами Председателя Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 30 марта 2012 г. № 42, 30 апреля 2012 г. № 55, 10 июля 2012 г. № 84, 29 декабря 2012 г. № 160, 24 января 2013 г. № 13).

Статьи 1–А и 2–А были опубликованы также в переводном издании *Journal of Communications Technology and electronics*, статья 4–А – в переводном издании *Instruments and Experimental Techniques*. Кроме того, опубликованы 9 статей в рецензируемых научных журналах и сборниках научных трудов Национальной академии

наук Беларуси, 11 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций, получен 1 патент на полезную модель.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертаций, утвержденной Постановлением ВАК Республики Беларусь от 28.02.20214 № 3 (в редакции от 22.08.2022 № 5). Разделы «Общая характеристика работы» и «Заключение» автореферата дословно воспроизводят соответствующие разделы диссертации без изъятий и дополнений. Содержание автореферата полностью соответствует положениям и выводам, изложенным в диссертации.

8. Замечания по диссертации

1. На стр. 52 и в положении, выносимом на защиту, говорится о том, что для расширения диапазона рабочих частот резонатора осуществляется «переход с одного типа волны на другой», однако содержание, трудоемкость и область использования этого «перехода» в тексте диссертации не раскрыты. Такой «переход» за счет изменения положения плунжера может быть реализован в «односигнальных» задачах, в частности, при использовании резонатора для исследования диэлектрических характеристик материалов. Для «многосигнальных» задач из градуировочных графиков на рисунках 3.2 и 3.4 следует, что при фиксированном положении плунжера в резонаторе могут возникать от 1 до 6 мод на соответствующих частотах и при использовании такого резонатора как основы для полосно-пропускающего фильтра в радиотехнических средствах на этих частотах будут возникать побочные максимумы амплитудно-частотной характеристики.

2. В главе 2 приведены два различных варианта устройства связи резонаторов с одномодовым стандартным волноводом. Не ясно, какие преимущества и недостатки указанных вариантов и не сформулированы рекомендации по выбор конкретного варианта в зависимости от параметров резонатора и области его использования.

3. В тексте диссертации имеется ряд стилистических погрешностей, в ряде случаев затрудняющих возможность понимания, искажающий существо и полноту результатов исследования. В частности:

- глава 3 и особенно подраздел 3.1 недостаточно структурированы – не выделены отдельно цилиндрические и открыты резонаторы, технологические процессы, исходные данные, методики и результаты экспериментальных исследований, требования и метрологические характеристики используемых установок, характеристики РПМ, УВМ и т.д.;

- в подразделе 2.1 (стр. 31) при описании моделирования устройства связи резонатора с СВЧ-трактом утверждается: «Для определения минимума среднестатистического отклонения исходных данных от функции аппроксимации используется градиентный метод вариации искомых параметров»; однако никакие функции аппроксимации не вводились, а статистические подходы не использовались и, кроме того, термин «градиентный» далее не используется; исходя из текста раздела следует, что речь идет о выявлении взаимосвязей на основе аналитических выражений и параметрических исследованиях;

- на стр. 35 говорится о том, что «Моделирование выполнялось с помощью пакета «CST Microwave Studio», но сущность моделирования, входные и выходные данные не описаны; более того, все предыдущие выражения и последующие результаты получены аналитически;

- на стр. 56 утверждается, что радиопоглощающие покрытия были синтезированы специалистами ИТМО по требованиям, разработанным диссертантом; однако указанные требования и методика их обоснования отсутствуют как в тексте диссертации, так и в публикациях автора; в то же время методика обоснования требований сама по себе обладает научной ценностью.

4. Не ясно, каким образом автором получено выражение (2.7) на стр. 35; на стр. 36, утверждается, что на рисунке 2.4 приведены корни уравнения (2.7), но в подрисуночной подписи говорится о корнях уравнения другого уравнения.

Вместе с тем приведенные недостатки не снижают общее впечатление о работе, и не влияют на суть положений, выносимых на защиту, и на научную и практическую ценность полученных результатов.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Диссертация Тананы О.В. является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена важная научно-техническая задача. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Содержательная часть диссертации Тананы О.В., сформулированные выводы, положения, выносимые на защиту, и рекомендации по практическому использованию результатов исследования показывают, что соискатель владеет всеми требуемыми навыками, предъявляемыми по специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии. Работа соответствует всем требованиям, установленным к научно-квалификационным работам.

10. Заключение

Диссертационная работа Тананы О.В., выполненная под научным руковод-

ством доктора физико-математических наук, профессора Богуша В.А., является законченной научной квалификационной работой.

Исследования автора лежат в области изучения закономерностей распространения электромагнитных волн миллиметрового диапазона по линиям передач, СВЧ устройствам и средам и управления электромагнитными полями с помощью углеродосодержащих материалов, исследованию и разработке СВЧ устройств, имеют четкую практическую направленность и полностью соответствуют отрасли наук «технические» и специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии, по которой диссертация представлена к защите.

Текст диссертации и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК Республики Беларусь к диссертационным работам. Научные конференции и семинары, на которых докладывались и обсуждались результаты исследований, достаточны для объективной оценки этих результатов.

Таким образом, диссертационная работа Тананы Ольги Валерьевны «Широкодиапазонные высокодобротные резонаторы проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонентов» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 за новые научно обоснованные результаты теоретических и экспериментальных исследований, обеспечивающих решение важной прикладной задачи разработки СВЧ устройств, включающие:

– конструкции высокодобротных многомодовых цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц, отличающиеся использованием радиопоглощающего покрытия на основе порошкообразных углеродных наноматериалов, нанесенного на заднюю поверхность плунжера и внутреннюю поверхность задней торцевой стенки в цилиндрических резонаторах, или изготовлением бокового корпуса открытого резонатора из колец такого же радиопоглощающего материала, что обеспечивает уменьшение обратного рассеяния электромагнитного излучения до 50 дБ, снижение паразитных колебаний в объемных и радиационных потерь в открытых резонаторах и приводит к повышению добротности на величину до 30%;

– методики электродинамического расчета элементов связи резонаторов проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с одномодовыми прямоугольными волноводами на основе полупрозрачной решетки или плавнонерегулярного волновода, основанные на вариации геометрических параметров элементов связи с аналитическим определением характеристик связи и выбором рациональных параметров по требуемым значениям полосы пропускания резонатора, что позволяет

установить геометрические параметры элементов связи, обеспечивающих согласование в диапазоне частот до 1/2 октавы с коэффициентом стоячей волны не более 1,7;

– конструкции элементов связи на основе полупрозрачной решетки или отрезка плавнонерегулярного волновода для согласования высокодобротных широкодиапазонных резонаторов проходного типа с СВЧ-трактом, обеспечивающие значение добротности связи от 45 000 до 66 000 в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц.

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационных
радиотехнологий учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Козлов С.В.

