

## ОТЗЫВ

официального оппонента

**Дорофеева Игоря Олеговича**

на диссертационную работу **Ле Куанг Туена** по теме «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

### **Актуальность темы диссертационной работы.**

Измерение параметров диэлектриков – одна из важных составляющих при создании аппаратуры высоких и сверхвысоких частот. Для материалов с малыми потерями наиболее эффективны резонаторные методы. В дециметровом диапазоне длин волн подходящей конструкцией для измерительных задач является коаксиальный резонатор. Успешность реализации метода измерений зависит, прежде всего, от имеющейся электродинамической модели резонатора с образцом. Важными задачами являются также оптимизация конструкции резонатора, его геометрических размеров, возможность использования для измерений образцов стандартных размеров. Диссертационная работа Ле Куанг Туена посвящена решению данных проблем, поэтому ее тема, несомненно, является актуальной.

### **Соответствие темы диссертации научной специальности.**

Цель работы – разработка расчетной модели измерительного коаксиального резонатора с «укорачивающим» измерительным зазором для исследования свойств диэлектрических материалов и экспериментальное уточнение параметров расчетной модели.

Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, примененные методы получения новых научных сведений соответствуют паспорту специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» (технические науки).

**Общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 139 страниц машинописного текста, включая 58 рисунков, 18 таблиц и 3 приложения.

В тексте диссертации отражены все необходимые для квалификационной работы разделы, их содержание соответствует сформулированным целям и задачам исследования, а также содержат научные положения, выносимых на публичную защиту. Результаты математического моделирования подтверждены экспериментальными данными. Автореферат полно отражает основные результаты исследования, описанные в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе, в 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 работ в трудах российских и международных конференций.

### **Анализ содержания работы.**

Во введении указана актуальность работы, сформулированы цель работы и задачи исследований, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, а также о личном вкладе автора.

В первой главе проведен обзор научных работ, посвященных коаксиальным резонаторам различных типов, их электродинамическим моделям. На основании обзора определено, что закрытый цилиндрический коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью (КРУЕ) обладает высокой добротностью и обеспечивает высокий коэффициент заполнения образцом, что дает высокую чувствительность к диэлектрическим параметрам исследуемого образца. Кроме того, образцы для измерений в данном резонаторе могут иметь унифицированные размеры, пригодные для исследования одного образца диэлектрика в широком диапазоне частот.

Во второй главе описываются результаты аналитического и численного моделирования двойного КРУЕ. Предложено представление несимметричного двойного КРУЕ в виде двух одинарных КРУЕ различными высотами зазора и одинаковой резонансной частотой, равной частоте исходного резонатора. Рассмотрены квазистационарная и многоволновая модели расчета резонансной частоты такого резонатора. Программа для квазистационарной модели составлена в среде Mathcad14, программа для многоволновой модели методом частичных областей – в среде Octave. Кроме того, проведено численное моделирование с помощью пакета симуляции CST Studio Suite. Показано, что численная модель дает более точные результаты, однако счет занимает достаточно долгое время. Программы расчета для квазистационарной и многоволновой моделей считают быстрее, но менее точны.

Третья глава посвящена разработке и экспериментальному исследованию измерительного КРУЕ. В конструкции резонатора предусмотрено окно для ввода образца, оказывающее минимальное воздействие на добротность. Разработана и изготовлена конструкция КРУЕ с регулируемым зазором и его точным измерением. Изменение зазора происходит за счет прогиба торцевой стенки, выполненной в виде упругой медной мембраны с закрепленным на ней центральным цилиндрическим электродом. Конструкция резонатора защищена патентом РФ. Проведены экспериментальные исследования зависимости резонансной частоты и собственной добротности двойного КРУЕ от высоты зазора. Проведено также численное моделирование резонансной частоты, представлены относительные отклонения результатов численного расчета резонансной частоты от эксперимента. Показа-

но, что замена в расчетах конической деформированной мембраны на плоскую эффективную поверхность приводит к погрешности в расчете резонансной частоты не более 0,06 %.

В четвертой главе представлены исследования измерительного КРУЕ с диэлектрическим включением и измерения диэлектрических материалов в дециметровом диапазоне вблизи 500 МГц. Численным моделированием с помощью пакета CST Studio Suite проведена оценка влияния периферийной области измеряемого образца за пределами зазора. Показано, что при относительном диаметре образца  $\rho \geq 1,32$  знание его точного диаметра и его точного центрирования не требуется. Предложен способ понижения размерности задачи нахождения диэлектрической проницаемости. Показано, что измерения с гарантированным зазором между образцом и электродом дают более точные результаты, чем с плотным зажимом образца. Приводятся результаты измерения диэлектрических параметров ряда материалов с низкими потерями, проведен анализ погрешности измерений.

В Заключении диссертации приведены основные результаты, полученные в результате аналитического и численного моделирования двойного КРУЕ, в том числе с КРУЕ с диэлектрическим образцом. Также приводятся результаты экспериментального исследования защищенной патентом конструкции резонатора, оценки точности разработанных моделей. Отмечено, что результаты проведенных исследований используются в работах по расширению частотного диапазона Государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110-2012.

#### **Научная новизна полученных автором результатов, выводов и рекомендаций**

Автором диссертации сформулирована научная новизна полученных результатов в следующей редакции:

1. Впервые показано, что на основном колебании двойного КРУЕ в области межэлектродного зазора существует параллельная торцевым плоскостям поверхность, на которой радиальная компонента электрического поля обращается в нуль  $E_r=0$ . По этой поверхности двойной КРУЕ может быть разделен на два одинарных резонатора и представлен в виде двух одинарных КРУЕ с одинаковой резонансной частотой, равной частоте исходного резонатора.
2. Предложена и экспериментально реализована конструкция перестраиваемого измерительного КРУЕ с изменением межэлектродного зазора за счет прогиба торцевой стенки-мембраны. Новизна разработанной конструкции подтверждена патентом РФ на изобретение. Преимуществами резонатора являются высокая добротность (до 7400) и широкий диапазон перестройки резонансной частоты (65 ... 650 МГц) за

счет изменения зазора от замыкания электродов (нулевого зазора) до 5,2 мм и его измерение с разрешением 1 мкм.

3. Разработан новый способ определения точных внутренних размеров полых резонаторов на основе исследования их спектра резонансных частот. Способ применен для определения точных внутренних размеров разработанного измерительного КРУЕ, необходимых для оценки точности расчетных моделей резонатора.
4. Получены экспериментальные и расчетные зависимости смещения резонансной частоты разработанного КРУЕ от диэлектрической проницаемости, толщины  $t_e$  и др. параметров диэлектрического включения в зазоре КРУЕ.
5. Найден обобщенный безразмерный параметр  $x(\epsilon, t_e, t)$ , определяющий относительный сдвиг резонансной частоты разработанного КРУЕ  $\delta f(x)$  как функцию одной переменной  $x$ , что понижает размерность задачи расчета параметров диэлектрика в зазоре КРУЕ по смещению резонансной частоты. Предложены аппроксимирующие функции для  $\delta f(x)$  и методика диэлектрических измерений в КРУЕ.

#### **Значимость результатов работы для науки и практики**

**Теоретическая значимость работы.** Получены новые данные по распределению электромагнитного поля в двойном КРУЕ без диэлектрического диска в зазоре. Разработаны модели для расчета характеристик КРУЕ с экспериментальной оценкой их точности при независимом точном измерении величины «укорачивающего» зазора. Получены простые аппроксимирующие выражения для расчета диэлектрических параметров образцов в разработанном КРУЕ по относительному уходу резонансной частоты и изменению добротности после ввода образца в резонатор.

**Практическая значимость диссертационной работы,** безусловно, значительная, отмечается следующее.

Разработанный и зарегистрированный в Федеральной службе по интеллектуальной собственности как изобретение коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым емкостным зазором планируется к включению в состав государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110-2012 для расширения его частотного диапазона в область дециметровых волн.

Установка с коаксиальным резонатором данного типа и разработанная автором экспериментально-аналитическая модель резонатора используются в Особом конструкторском бюро.

торском бюро кабельной промышленности (АО «ОКБ КП», г. Мытищи) при входном контроле материалов изоляции радиочастотных кабелей.

Разработанная компьютерная программа расчета резонансной частоты двойного КРУЕ зарегистрирована в федеральном агентстве РФ по интеллектуальной собственности.

Результаты работы защищены патентом на изобретения Российской Федерации: № 2680109.

#### **Достоверность результатов работы подтверждается**

- корректным применением известных аналитических методов;
- корректным применением пакета численного моделирования СВЧ устройств CST Studio Suite;
- использованием для экспериментальных исследований скалярного анализатора цепей P2M-18 с подтвержденными метрологическими характеристиками;
- сравнением результатов измерения диэлектрических параметров в КРУЕ с результатами измерения этих же образцов на государственном первичном эталоне единиц комплексной диэлектрической проницаемости.

#### **Замечания по работе**

При анализе диссертационной работы и автореферата работы отмечу следующие недостатки.

По существу.

1. В работе рассмотрены аналитические модели коаксиальных резонаторов, которые дают наилучшие результаты для симметричных вариантов. Между тем численный расчет и экспериментальные исследования проведены для несимметричного резонатора с конкретным соотношением длин центральных проводников. Видимо несимметричный резонатор имеет преимущества, однако этот вопрос никак не обсуждается.
2. Отмечается, что в резонаторе с гофрированной стенкой смещение эффективной плоскости отражения должно быть минимальным при симметричном профиле гофра, в тоже время в конструкции используется гофра с односторонними канавками.
3. Численная модель резонатора строилась для идеально проводящих внешних стенок и медных внутренних проводников, а в экспериментальном экземпляре внешние стенки посеребрённые. При этом оценивается точность модели путем сопоставления расчетных и измеренных резонансных частот.

Редакционные.

1. В работе имеются грамматические ошибки и опечатки. Несмотря на то, что автор не является носителем русского языка, их количество велико (27).
2. В тексте цитируемые источники начинаются с номера 76. Замечены неверные номера ссылок на страницах 45 и 46.

### Заключение

Диссертационная работа Ле Куанг Туена оставляет очень хорошее впечатление, является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, имеющим научную значимость и практическую ценность. Работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения» о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, №842 (ред. от 18.03.2023). В диссертации решена актуальная задача научного направления в области резонаторных измерений параметров диэлектриков.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что Ле Куанг Туен заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Официальный оппонент,  
доцент кафедры радиоэлектроники  
Национального исследовательского  
Томского государственного университета,  
кандидат физико-математических наук  
(01.04.03 - Радиофизика),



Дорофеев Игорь Олегович  
тел.: +79050895206,  
e-mail: [idorofeev@mail.tsu.ru](mailto:idorofeev@mail.tsu.ru)

08.06.2023

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел.: (3822) 529-852, e-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru), Адрес официального сайта: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

Подпись Дорофеева И.О. заверяю:



Начальник отдела  
кадров Н.Г. ВАШЕР  
08.06.2023

