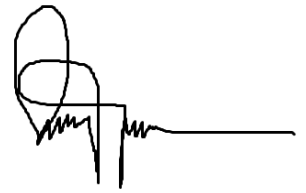


На правах рукописи



Ле Куанг Туен

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА**

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИрННТУ)

Научный руководитель:

Егоров Виктор Николаевич

доктор физико-математических наук,
доцент ФГБОУ ВО «ИрННТУ»

Официальные оппоненты:

Горбачёв Анатолий Петрович

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Дорофеев Игорь Олегович

кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (НИТГУ)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук** (ИТПЭ РАН) (г. Москва)

Защита состоится 27 июня 2023 года в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/1mspkdif>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д-р. физ.-мат. наук



Мандель Аркадий Евсеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Резонансные устройства СВЧ широко применяются в антенно-фидерной и микроволновой технике. Основными характеристиками резонаторов являются резонансная частота f_0 и собственная добротность Q_0 . В частотно-задающих и частотно-избирательных системах добротность определяет кратковременную стабильность частоты источника гармонического сигнала и ширину полосы пропускания фильтров. В измерительной технике высокодобротные резонаторы обеспечивают высокую точность и чувствительность измерения различных величин, в частности, диэлектрических параметров материалов.

Диэлектрики с малым поглощением электромагнитных волн используются в антенных обтекателях, в качестве волноведущих и излучающих структур, изоляции кабелей, радиопрозрачных окон и др. Предельно достижимые характеристики микроволновых устройств и систем существенно зависят от применяемых диэлектриков. Важными требованиями к диэлектрикам в кабелях, антенных обтекателях и других применениях являются невысокие значения относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon \leq 2 \div 10$ и очень малые значения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta \leq 4 \cdot 10^{-4}$. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ требует точных исходных данных по диэлектрическим параметрам применяемых материалов. Наиболее точные исследования слабопоглощающих диэлектриков в диапазонах низких, высоких и сверхвысоких частот (НЧ, ВЧ, СВЧ) проводят резонансными методами с использованием измерительных устройств с сосредоточенными параметрами на НЧ и ВЧ и с распределенными параметрами на СВЧ.

В дециметровом диапазоне волн сложность таких исследований связана с необходимостью иметь измерительный резонатор с собственной добротностью $Q_0 \geq 5000$ и высоким коэффициентом заполнения резонатора исследуемым образцом приемлемых, предпочтительно стандартных, размеров. Другая сложность связана с переходом от устройств и методов измерения на основе цепей с сосредоточенными параметрами R, L, C к методам СВЧ диапазона на основе устройств с распределенными параметрами. Исследование измерительных резонаторов дециметрового диапазона и разработка их расчетных моделей являются актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Теория измерительных резонаторов в квазистационарном приближении и методы измерений на их основе разработаны достаточно полно, но не обеспечивают необходимой точности. Строгое электродинамическое рассмотрение имеет свои сложности и ограничения. Аналитические модели с представлением поля рядами по собственным функциям резонатора эффективны для резонаторов простых правильных форм в отсутствии изломов проводящих поверхностей в виде ребер (внешних углов). Численные методы моделирования в современных универсальных программных пакетах требуют значительных вычислительных ресурсов. Их возможности в расчете полей в узких щелях и зазорах неясны из-за сопоставимости раз-

мера зазора и шага сетки разбиения. И аналитические и численные методы в конкретной реализации нуждаются в надежной экспериментальной оценке точности результатов расчета. Ресурсоемкие расчеты в программных пакетах численного моделирования требуют достаточно простых аналитических аппроксимаций для доступного практического использования результатов таких расчетов.

Наиболее перспективным типом измерительного резонатора в дециметровом диапазоне представляется цилиндрический коаксиальный резонатор с «укорачивающей» емкостью - измерительным зазором (КРУЕ). Однако его аналитическая теория и модели численного расчета в литературе представлены недостаточно и не имеют надежной оценки точности. Для диэлектрических измерений используются образцы с диаметром, меньшим диаметра центрального электрода КРУЕ. Это уменьшает коэффициент заполнения резонатора, требует знания точного диаметра образца и его точного центрирования в измерительном зазоре. Применение измеряемых образцов с диаметром, превышающим диаметр центрального электрода КРУЕ, может упростить процесс измерения. Высокая крутизна зависимости резонансной частоты КРУЕ от величины измерительного зазора делает бессмысленной экспериментальную оценку точности расчетных моделей без точного измерения величины «укорачивающего» зазора внутри резонатора в собранном состоянии. Таким образом, разработка в дециметровом диапазоне волн экспериментально-аналитической модели измерительного коаксиального резонатора с «укорачивающей» емкостью при диаметре исследуемого образца, превосходящем диаметр центрального электрода, представляет актуальную задачу. Составной частью этой задачи является практическая реализация измерительного резонатора с максимально достижимой добротностью.

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

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ типов коаксиальных резонаторов, их конструкций и методов расчета, а также применения в измерительных установках дециметрового диапазона волн.

2. Разработка аналитической модели КРУЕ на основе численного моделирования и экспериментальных исследований с повышенной точностью для расчета резонансных характеристик.

3. Разработка экспериментальной конструкции высокодобротного КРУЕ дециметрового диапазона для исследования свойств слабопоглощающих диэлектрических материалов.

4. Точное определение внутренних размеров разработанного резонатора, в частности, высоты измерительного зазора t для оценки точности расчета резонансной частоты по разработанным моделям.

5. Оценка факторов, вызывающих отклонения экспериментальных характеристик КРУЕ от их расчетных значений и уточнение модели КРУЕ.

6. Поиск аппроксимирующих выражений для простого аналитического расчета диэлектрических параметров исследуемых образцов по их размерам, резонансной частоте и добротности КРУЕ с измеряемым образцом.

7. Контрольные измерения диэлектрической проницаемости ряда слабопоглощающих материалов в дециметровом диапазоне электромагнитных волн.

Научная новизна

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_ε и др. параметров диэлектрического включения в зазоре КРУЕ.

5. Найден обобщенный безразмерный параметр $x(\varepsilon, t_\varepsilon, t)$, определяющий относительный сдвиг резонансной частоты разработанного КРУЕ $\mathcal{F}(x)$ как функцию одной переменной x , что понижает размерность задачи расчета параметров диэлектрика в зазоре КРУЕ по смещению резонансной частоты. Предложены аппроксимирующие функции для $\mathcal{F}(x)$ и методика диэлектрических измерений в КРУЕ.

Теоретическая значимость

1. Получены новые данные по распределению электромагнитного поля в двойном КРУЕ без диэлектрического диска в зазоре, дающие основания для выбора наиболее подходящих собственных функций в аналитическом описании КРУЕ.

2. Разработаны модели для расчета характеристик КРУЕ с экспериментальной оценкой их точности при независимом точном измерении величины «укорачивающего» зазора.

3. 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. Вид аппроксимирующей функции пригоден для применения в КРУЕ других размеров.

Практическая значимость

1. Разработанный и зарегистрированный в Федеральной службе по интеллектуальной собственности как изобретение коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым емкостным зазором имеет собственную добротность 7400 на частоте 650 МГц и позволяет проводить наиболее точные измерения диэлектрических параметров слабопоглощающих диэлектриков в дециметровом диапазоне волн. Резонатор планируется к включению в состав государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110-2012 для расширения его частотного диапазона в область дециметровых волн. Точность результатов измерения в разработанном резонаторе удовлетворяет требованиям по метрологическим характеристикам.

2. Установка с коаксиальным резонатором данного типа и разработанная автором экспериментально-аналитическая модель резонатора используются также в Особом конструкторском бюро кабельной промышленности (АО «ОКБ КП», г. Мытищи) при входном контроле материалов изоляции радиочастотных кабелей.

3. Разработанная компьютерная программа расчета резонансной частоты двойного коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью позволяет точно определить положение «электрической стенки» в зазоре двойного КРУЕ с заданными размерами и резонансную частоту этого резонатора. Программа зарегистрирована в федеральном агентстве РФ по интеллектуальной собственности.

Методы исследования

При выполнении работы проводились экспериментальные, теоретические исследования, численный расчет, математическое моделирование и аппроксимации полученных зависимостей аналитическими выражениями. В теоретических исследованиях использовались квазистационарное приближение КРУЕ с сосредоточенными параметрами, электродинамический метод частичных областей с многоволновым представлением поля, моделирование в пакете симуляции CST Studio Suite 2017 и аппроксимации в программной среде Mathcad. Программы расчета составлены в средах Mathcad и Octave. Экспериментальные исследования проводились на скалярном анализаторе цепей P2M-18 в стандартном режиме измерения модуля S -параметров. Внутренние размеры резонатора, в т.ч. высота зазора между электродами, измерялись по специальной методике на основе анализа спектра резонансных частот и с применением высокоточных инструментов.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчет резонансной частоты двойного КРУЕ может быть сведен к расчету двух одинарных КРУЕ с общей резонансной частотой, равной частоте двойного КРУЕ. Квазистационарный расчет в таком подходе дает приближенные значения «укорачивающих» зазоров в одинарных КРУЕ и резонансной частоты. Результаты квазистационарного расчета являются хорошими началь-

ными приближениями для строгой электродинамической модели методом частичных областей (ЧО).

2. Оценка точности расчетных моделей КРУЕ требует точных внутренних размеров резонатора в собранном состоянии, в особенности, высоты межэлектродного зазора. Полученные в работе оценки точности различных подходов к расчету КРУЕ основаны на размерах экспериментального КРУЕ, измеренных по специальной методике. Погрешность расчета резонансной частоты методом ЧО с многоволновым представлением поля в предложенной модели КРУЕ не более 0,2 %.

3. Разработанная конструкция КРУЕ с регулируемым измерительным зазором обеспечивает уникальную для заданных размеров добротность 7400, регулировку измерительного зазора и перестройку резонансной частоты в пределах от 65 МГц до 650 МГц.

4. Измерения диэлектрических свойств материалов в КРУЕ по разработанным в диссертации расчетным соотношениям обеспечивают эталонный уровень точности в дециметровом диапазоне волн. Чувствительность измерения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ составляет $5 \cdot 10^{-5}$, что достаточно для исследования существующих диэлектриков с наименьшим поглощением.

Достоверность результатов исследования обеспечивается известными методами теоретического исследования, широко используемым программным пакетом численного моделирования СВЧ устройств CST Studio Suite и программами аппроксимаций данных в среде Mathcad. Экспериментальные исследования проводились на скалярном анализаторе цепей P2M-18 с подтвержденными метрологическими характеристиками. Наиболее критичный размер резонатора – высота зазора между электродами измерялся электронным индикатором перемещения с разрешением 1 мкм. Другие внутренние размеры резонатора измерялись предварительно обычным образом и уточнялись по его спектру резонансных частот. Результаты измерения диэлектрических параметров в КРУЕ по полученным аппроксимациям сравнивались с результатами измерения этих же образцов на государственном первичном эталоне единиц комплексной диэлектрической проницаемости.

Апробация результатов

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на XV Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и связи» (Иркутск, 2016 г.), XX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2017 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Прикладные исследования в области физики» (Иркутск, 2021 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 работ: 4 статьи из перечня ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых Scopus, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 доклада в трудах Всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации. Содержание диссертации изложено на 139 страницах, включая 58 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 78 наименований. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты получены при непосредственном участии автора или лично автором. Автором совместно с научным руководителем выяснено распределение электромагнитного поля в КРУЕ и выбраны подходы к расчету его резонансных характеристик. Автором написаны и протестированы программы для ЭВМ в среде Mathcad и Octave для расчета резонансных характеристик резонатора, проведены математическое моделирование КРУЕ в пакете CST Studio Suite 2017 и экспериментальные исследования.

Постановка задач для экспериментальных исследований, анализ и обобщение экспериментальных данных выполнены совместно с научным руководителем, д.ф.-м.н. В. Н. Егоровым.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общие сведения по теме исследования и обоснована ее актуальность.

В первой главе представлен обзор основных типов коаксиальных резонаторов и методов расчета их характеристик. Проанализированы закрытые и открытые коаксиальные резонаторы, их конструкции и области применения. Закрытый цилиндрический коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью (КРУЕ) имеет преимущества для исследований диэлектриков в дециметровом диапазоне. Измеряемые образцы при этом могут иметь унифицированные размеры, пригодные для исследования одного образца диэлектрика в диапазоне от НЧ до частот терагерцового диапазона. Резонатор обладает высокой добротностью и обеспечивает высокий коэффициент заполнения образцом, что дает высокую чувствительность к диэлектрическим параметрам. Проанализированы методы расчета закрытых коаксиальных резонаторов: квазистационарное приближение, метод частичных областей, метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной области. Проанализированы конструкции измерительных приборов на основе коаксиальных резонаторов.

Во второй главе излагаются сведения о результатах разработки новых подходов к расчету двойного КРУЕ: модель квазистационарного приближения с разделением двойного КРУЕ на два, многоволновая модель и численное моделирование. Отличием разработанных подходов с квазистационарной и многоволновой моделями от существующих работ является представление несимметричного двойного КРУЕ в виде двух одинарных КРУЕ различными высотами зазора и одинаковой резонансной частотой, равной частоте исходного резонатора.

На основной (низшей) TEM -моде поле в коаксиальных частях находится в противофазе и в поперечном сечении резонатора в области зазора при некотором $z_0 = L_d + t_d$, ($t - t_d = t_u > 0$) в пределах $0 \leq r \leq b$, имеется плоскость – "электрическая" стенка – с радиальной компонентой электрического поля

$E_r(z_0)=0$ на всей плоскости поперечного сечения (рис. 1). Это граничное условие на виртуальной поверхности позволяет разделить двойной КРУЕ с низшей *ТЕМ*-модой на два одинарных (рис. 1).

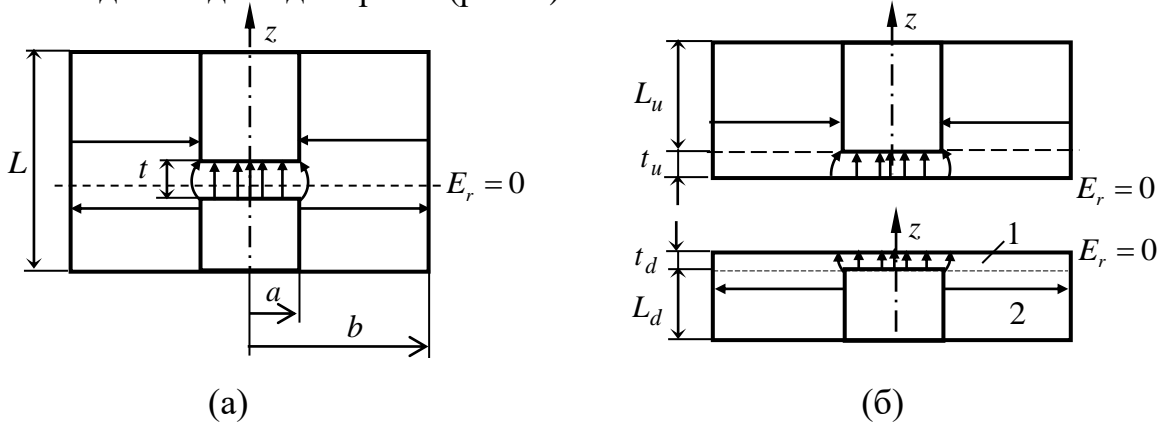


Рис. 1. Двойной КРУЕ (а) и его представление в виде двух одинарных КРУЕ (б)

Условие $E_r(z_0)=0$ конкретизирует зависимость поля от координаты z и ограничивает вид функций, пригодных для представления поля. В модели квазистационарного приближения области резонатора с коаксиальными выступами рассматриваются как разделенные зазором высотой t закороченные на одном конце и разомкнутые на другом конце отрезки коаксиальных линий длиной L_d и L_u (рис. 1а) с модой *ТЕМ*. В приближении идеальной проводимости стенок резонатора входные сопротивления нижней и верхней коаксиальных частей в плоскостях $z=L_d$ и $z=L_d+t$ будут соответственно $Z_d = jX_d = j\rho \cdot \operatorname{tg}(kL_d)$, $Z_u = jX_u = j\rho \cdot \operatorname{tg}(kL_u)$, где $\rho = 60\sqrt{\mu/\varepsilon} \ln(b/a)$ - волновое сопротивление коаксиальных частей резонатора, a, b - радиусы центрального электрода и корпуса, $k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu} = 2\pi/\lambda$ - волновое число, λ - длина *ТЕМ*-волны, $\omega = 2\pi f$ - частота, ε, μ - относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды в резонаторе. Далее среда полагается немагнитной ($\mu = 1$, $\varepsilon \geq 1$). При длине коаксиальных частей резонатора менее $\lambda/4$ они имеют индуктивное входное сопротивление $X_{d,u} > 0$. Коаксиальные части резонатора соединены через зазор высотой t с емкостным сопротивлением $jX_c = -j/(\omega C_\Sigma)$, где C_Σ - полная емкость области зазора, включая т.н. "боковую" емкость.

Для основной *ТЕМ*-моды зазор в исходном двойном резонаторе можно представить в виде двух последовательно соединенных емкостей $C_d(t_d)$, $C_u(t_u)$ - зазоров в каждом одинарном резонаторе высотой t_d, t_u . Величины зазоров $t_d, t_u = t - t_d$ определяются равенством резонансных частот двух одинарных КРУЕ между собой и частоте исходного двойного КРУЕ. С учетом условия $E_r(z_d)=0$ на "электрической" стенке приводит к системе уравнений

$$\rho g[k(\omega)L_{d,u}] - 1/[\omega C_{d,u}(t_d)] = 0 \quad (1)$$

для двух одинарных КРУЕ, которая дает общую для одинарных КРУЕ резонансную частоту ω и величину зазора t_d , а также $t_u = t - t_d$. Емкости $C_{d,u}$ включают кроме емкостей плоских конденсаторов также "боковые" емкости. Результаты экспериментального исследования показали погрешность расчета резонансной частоты в квазистационарном приближении около 6 % , что неприемлемо для эталонных измерений.

В многоволновой модели расчет резонансной частоты двойного КРУЕ проведен методом частичных областей (ЧО). Вначале рассмотрены одинарные КРУЕ с коаксиальной частью длиной L_d, L_u и соответствующей высотой зазора t_d, t_u . Частоты одинарных КРУЕ монотонно возрастают с ростом зазоров, при этом росту t_d соответствует убывание $t_u(t_d) = t - t_d$. При изменении t_d частоты нижнего и верхнего одинарных КРУЕ $f_d(t_d), f_u(t_u(t_d))$ будут меняться противоположным образом и совпадут при некотором зазоре t_{d0} . Точка $f_d(t_{d0}) = f_u(t_u(t_{d0})) = f_0$ даст значение резонансной частоты двойного КРУЕ f_0 и величину t_{d0} , т.е. положение стенки $z_{d0} = L_d + t_{d0}$.

Рассмотрена часть двойного резонатора - одинарный КРУЕ с высотой центрального электрода L_d и высотой зазора t_d (рис. 1б). Резонатор плоскостью $z = L_d$ разделен на две ЧО: волноводную 1 и коаксиальную 2. Электромагнитное поле одинарного КРУЕ представлено аналогично предложенному в работе. Поле в волноводной области 1 при $L_d \leq z \leq L_d + t_d, 0 \leq r \leq b$ представлено спектром волн E_{0q} . Компоненты поля в области 1 выразятся функциями

$$\begin{aligned} E_{z,1} &= \sum_{q=1}^{\infty} B_q J_0(u_q r) \cosh[\beta_q (z - L_d - t_d)], \\ H_{\varphi,1} &= j \sum_{q=1}^{\infty} \frac{k}{u_q} B_q J_1(u_q r) \cosh[\beta_q (z - L_d - t_d)], \\ E_{r,1} &= - \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\beta_q}{u_q} B_q J_1(u_q r) \sinh[\beta_q (z - L_d - t_d)], \end{aligned} \quad (2)$$

где B_q - амплитуды; $u_q, \beta_q = \sqrt{u_q^2 - k^2}$ - поперечное и продольное волновые числа в области 1, $q = 1, 2, 3, \dots$; $J_0(u_q r), J_1(u_q r)$ - функции Бесселя нулевого и первого порядка. Поле в коаксиальной области 2 представлено суммой TEM -моды и спектра высших волноводных E_{0m} -мод коаксиальной линии

$$\begin{aligned} E_{z,2} &= \sum_{s=1}^{\infty} C_s Z_0(\chi_s r) \cosh(\gamma_s z), \\ H_{\varphi,2} &= j C_0 \frac{a \cos(kz)}{2\pi r} + j \sum_{s=1}^{\infty} \frac{k}{\chi_s} C_s Z_1(\chi_s r) \cosh(\gamma_s z), \\ E_{r,2} &= C_0 \frac{a \sin(kz)}{2\pi r} - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\gamma_s}{\chi_s} C_s Z_1(\chi_s r) \sinh(\gamma_s z), \end{aligned} \quad (3)$$

где $Z_0(\chi_s r) = J_0(\chi_s r) - \frac{J_0(\chi_s a)}{N_0(\chi_s a)} N_0(\chi_s r)$, $Z_1(\chi_s r) = J_1(\chi_s r) - \frac{J_1(\chi_s a)}{N_1(\chi_s a)} N_1(\chi_s r)$, $s = 1, 2, 3, \dots$
 $\chi_s, \gamma_s = \sqrt{\chi_s^2 - k^2}$ - поперечное и продольное волновые числа в области 2;
 $N_0(u_q r)$, $N_1(u_q r)$ - функции Неймана порядка 0 и 1; C_0, C_s - амплитуды;

При расчете используется Q собственных волн E_{0m} для волноводной ЧО1 и S собственных волн E_{0m} (кроме TEM -волны) для коаксиальной ЧО2. Условия $E_{r,1}(L_d) = E_{r,2}(L_d)$, $H_{\varphi,1}(L_d) = H_{\varphi,2}(L_d)$ на границе ЧО1,2 при $z = L_d$ дают:

$$\sum_{q=1}^Q \frac{\beta_q}{u_q} B_q J_1(u_q r) \sinh(\beta_q t_d) - C_0 \frac{a \sin(kL_d)}{2\pi r} + \sum_{s=1}^S \frac{\gamma_s}{\chi_s} C_s Z_1(\chi_s r) \sinh(\gamma_s L_d) = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{q=1}^Q \frac{k}{u_q} B_q J_1(u_q r) \cosh(\beta_q t_d) - C_0 \frac{a \cos(kL_d)}{2\pi r} - \sum_{s=1}^S \frac{k}{\chi_s} C_s Z_1(\chi_s r) \cosh(\gamma_s L_d) = 0. \quad (5)$$

После стандартной процедуры ортогонализации из (4),(5) получается Q и $1+S$ линейных однородных уравнений соответственно и система из $M=Q+1+S$ линейных однородных уравнений относительно амплитуд B_q, C_0, C_s мод, используемых для представления поля в ЧО1, 2 одинарного КРУЕ. Определитель матрицы D обращается в 0 на резонансной частоте. Для расчета двойного КРУЕ необходимо найти по одной и той же программе резонансные частоты f_d, f_u (нули определителей) одинарных КРУЕ и величину t_d , при $f_d = f_u$.

Численное моделирование проведено с помощью пакета симуляции CST Studio Suite, вычисление в котором выполняется по процедурам, основанным на методах: метод конечных элементов (FEM), метод конечных разностей во временной области (FDTD), и т.д. Алгоритмы расчета резонансной частоты двойного КРУЕ реализованы для резонатора с точно измеренными размерами (табл. 3). Программа для квазистационарной модели составлена в среде Mathcad14, для многоволновой модели методом ЧО – в среде Octave.

Сходимость расчетной частоты одинарного КРУЕ исследована при неизменном числе волн $S = 60$ в ЧО2 с ростом числа волн Q в ЧО1 (рис. 2а) и при числе волн $Q = 60$ в ЧО1 с ростом числа волн S в ЧО2 (рис. 2б).

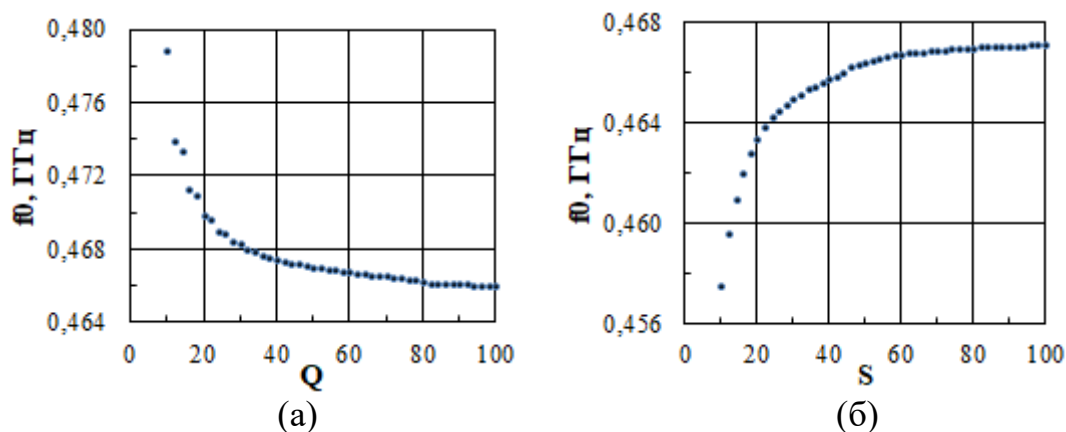


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты от числа волн Q в волноводной области 1 (а) и от числа волн S в коаксиальной области (б)

Результаты расчета резонансных частот одинарных резонаторов f_d, f_u и отклонения $\Delta f = f_d - f_u$ при изменении высоты зазора t_d приведены в табл. 1. В табл.2 приведены экспериментальная резонансная частота, результаты квазистационарного расчета, расчета по многоволновой модели методом ЧО и численного моделирования. Из табл. 1,2 видно, что существует точка равенства частот одинарных КРУЕ с различными L_d, L_u и зазорами $t_d, t_u = t - t_d$ как в квазистационарном приближении, так и в многоволновой модели.

Табл. 1. Зависимость расчетных f_d, f_u одинарных КРУЕ от зазора t_d ($Q = S = 70$)

t_d , мм	0,790976	0,790977	0,790978	0,790979	0,790980
f_d , ГГц	0,4667079	0,4667081	0,4667084	0,4667086	0,4667088
f_u , ГГц	0,4667086	0,4667085	0,4667083	0,4667082	0,4667081
Δf , кГц	-0,7	-0,4	0,1	0,4	0,7

Табл. 2. Экспериментальная резонансная частота $f_{эксн}$ и расчетные $f_{расч}, t_{d0}, t_{u0}$

$f_{эксн}$, ГГц	Модель	$f_{расч}$, ГГц	δf , %	t_{d0} , мм	t_{u0} , мм
0,467648	квазистационар.	0,495473	5,9	0,801	1,358
	многоволн. с ЧО	0,466708	0,2	0,79098	1,36802
	CST Studio Suite	0,467470	0,038		

Численная модель показывает преимущество по точности. Это преимущество получено за счет значительного объема вычислений, которые требуют большого объема оперативной памяти, высокой скорости процессора и большого времени расчетов. Для достижения результата (табл. 2) потребовалось 120 мин. Квазистационарная модель и многоволновая модель с ЧО в данной реализации уступают по точности, но имеют преимущество в скорости расчета. Многоволновая модель с ЧО требует 30 мин, квазистационарная – доли сек.

Численным моделированием в CST Studio Suite проведено детальное изучение структуры поля и вида поверхности с нулевой радиальной компонентой электрического поля $E_r = 0$ при $a \leq r \leq b$ в области зазора в двойном КР с различным положением зазора z_3 (рис. 3).

Во второй главе сделаны следующие выводы. Квазистационарная модель и многоволновая модель методом ЧО с приближенным представлением двойного КРУЕ в виде двух одинарных, могут успешно применяться для расчета резонансной частоты КРУЕ в задачах с допустимой погрешностью от 6 до 0,2%. Численное моделирование КРУЕ в пакете CST Studio Suite дополняет и уточняет другие модели и представляется необходимым в эталонных диэлектрических измерениях.

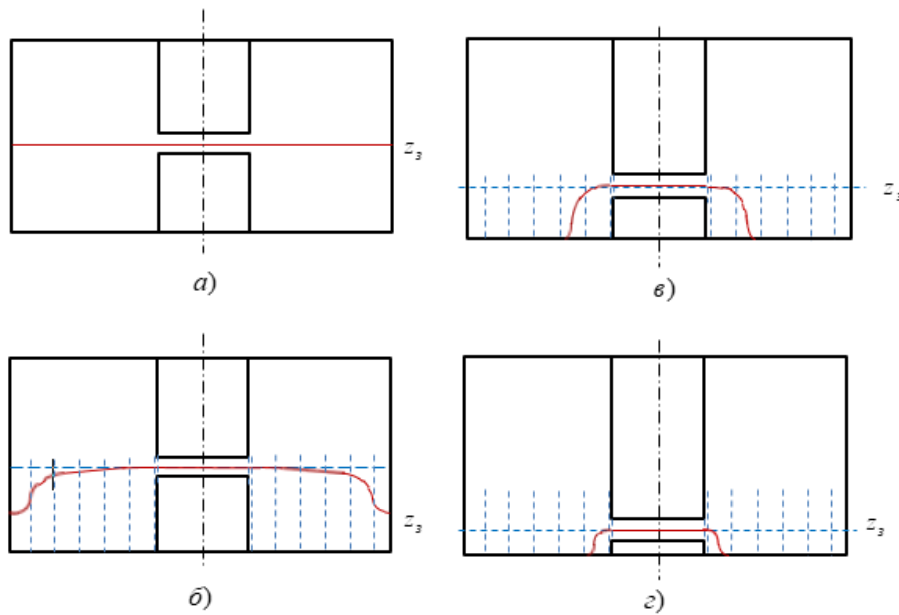


Рис. 3. Поверхность с $E_r = 0$ в КРУЕ при различном положении зазора z_3 :

(а) $L/2$;

(б) $L/2 \left(1 - \frac{2}{L/2} \right)$;

(в) $L/2 \left(\frac{2}{4} \right)$;

(г) $L/2 \left(\frac{1}{4} \right)$.

В третьей главе описана разработка измерительного КРУЕ и его экспериментальное исследование. Основными элементами конструкции резонатора являются посеребренный цилиндрический корпус и медные соосные цилиндрические электроды с измерительным зазором между ними. Окно в корпусе резонатора для ввода образца выполнено в виде щели, перпендикулярной измерительному зазору и параллельной оси резонатора. Щель параллельна линиями поверхностного тока в стенке корпуса и не вносит потерь энергии на излучение из резонатора, что позволило реализовать максимальную добротность.

Необходимым условием эталонных диэлектрических измерений является точное определение высоты зазора между электродами и толщины образца. Разработана и изготовлена конструкция КРУЕ с регулируемым зазором (КР-500Р) и его точным измерением (рис.4). Изменение зазора происходит за счет прогиба торцевой стенки в виде упругой медной мембраны с закрепленным на ней центральным цилиндрическим электродом. Применение стенки-мембраны для регулировки зазора имеет преимущество перед деформируемым электродом в виде сильфона. Торцевая стенка -мембрана содержит несколько гофр, практически не меняет своего импеданса при деформации и не вносит неконтролируемый сдвиг в резонансную частоту в отличие от электрода -сильфона с глубокими впадинами на ребристой поверхности, которая существенно замедляет волну и удлиняет путь токов по электроду. Конструкция резонатора защищена патентом РФ.

При деформации торцевой стенки-мембраны величина зазора регулируется от 0 (замыкания) до 5,2 мм. Замыкание электродов в собранном состоянии резонатора позволяет точно измерить его высоту по резонансной частоте получаемого полуволнового коаксиального резонатора и иметь опорную плоскость для измерения зазора. Микрометрическим винтом верхний электрод перемещается до образования необходимого измерительного зазора, высота которого индицируется на цифровом микрометре с разрешением 1 мкм.

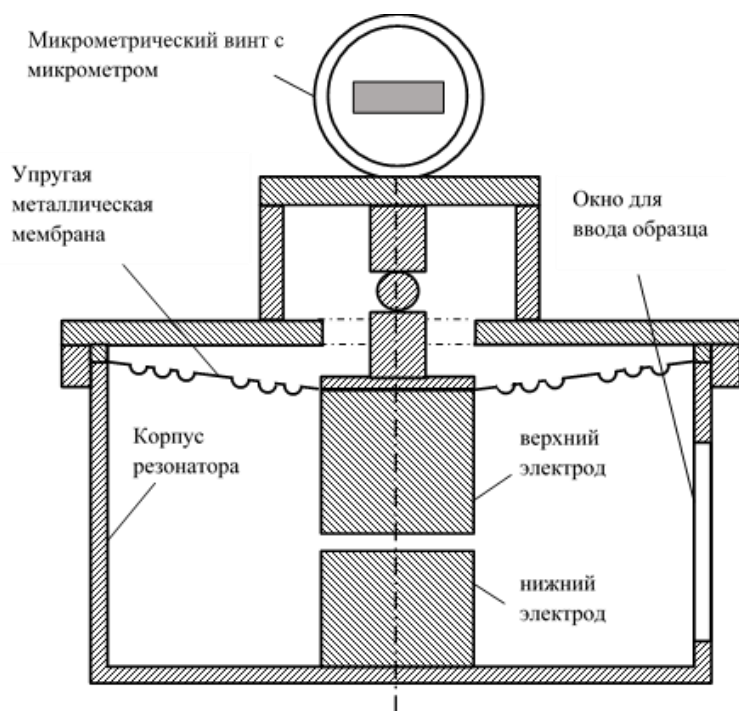


Рис. 4. Коаксиальный измерительный резонатор с регулируемым зазором КР-500Р

В окончательном варианте резонатора резонансная частота основной TEM -моды перестраивается от 65 МГц при минимальном зазоре до 650 МГц при зазоре 5,2 мм.

Проведены экспериментальные исследования зависимости резонансной частоты $f_0(t)$ и собственной добротности $Q_0(t)$ двойного КРУЕ от зазора (рис.5). Крутизна резонансной частоты в

диапазоне высоты зазора 0,01 мм... 0,1 мм составляет $\Delta f_d / \Delta t_d \approx 600$ МГц/мм, в диапазоне 0,5 мм...1,0 мм – ~ 160 МГц/мм, и в диапазоне 2,0 мм...5,2 мм – ~ 80 МГц/мм. Большая чувствительность резонансной частоты к высоте зазора подтверждает важность его точного измерения для оценки реальной точности расчетной модели. В известных работах это не рассмотрено. Оценка реальной точности расчета резонансной частоты КРУЕ различными способами невозможна также без знания точных внутренних размеров резонатора. Диаметр $2a$ и длины L_d, L_u цилиндров-электродов измерены с помощью микрометра в разобранном резонаторе. Измерение внутреннего диаметра $2b$ цилиндрического корпуса проводилось по спектру резонансных частот объемного резонатора - исходного КРУЕ без центральных электродов (табл. 3).

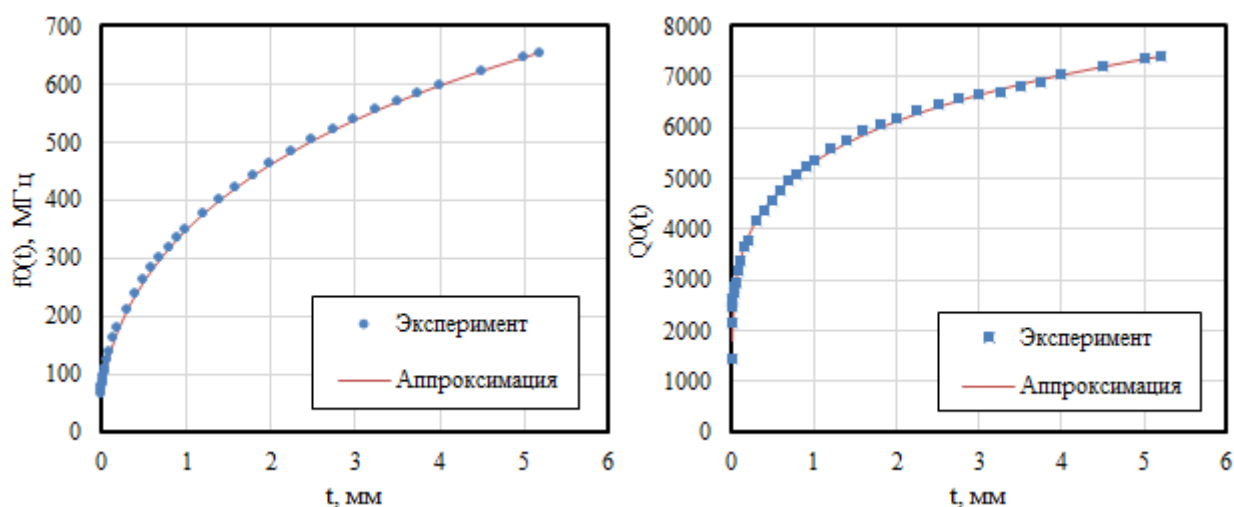


Рис. 5. Экспериментальные зависимости резонансной частоты и собственной добротности от высоты зазора

Резонатор КР-500Р имеет отклонения от идеального цилиндра, такие как эллиптичность корпуса, гофр и прогиб стенки-мембраны. Оценка их влияния является важной при задании размеров для расчетных моделей. Влияние гофра оценено независимо от влияния прогиба мембраны. Оценка влияния гофра проведена при плоском состоянии мембраны (без прогиба) с соответствующей высотой зазора $t=2,159$ мм. В расчётных моделях для конструкции резонатора с регулируемой высотой зазора эффективная высота верхнего электрода уменьшается относительно истинной из-за смещения плоскости отражения гофром на торцевой стенке-мембране. Укорочение уточнялось численным расчетом и составило 1,036 мм при глубине канавок гофра 1,7 мм.

Табл. 3. Внутренние размеры измерительных КРУЕ, мм

	$2b$	$2a$	L_d	L_u	t	$L = L_d + t + L_u$
КР-500М	152,2	38,0	26,1	38,57	3,354	68,024
КР-500Р	152,167	38,029	25,520	39,391	2,159	67,070

Конический прогиб стенки-мембраны в реальных резонаторах возможно заменить в расчетах на плоскую поверхность на эффективной высоте L_t , которую можно рассчитать из условия равенств потоков энергии внутри трубок радиусом $a \leq r \leq r_t$ и $r_t \leq r \leq b$, где r_t - радиус окружности, по которой эффективная плоская стенка пересекает реальную коническую поверхность мембраны (рис. 6). Для эффективной высоты L_t получена формула:

$$L_t = L_0 \left(\frac{r_t - a}{b - a} \right) + (L_d + L_u) \left(\frac{b - r_t}{b - a} \right), \quad (6)$$

где $L_0 = L_d + t_0 + L_u$, $r_t = \sqrt{ab}$.

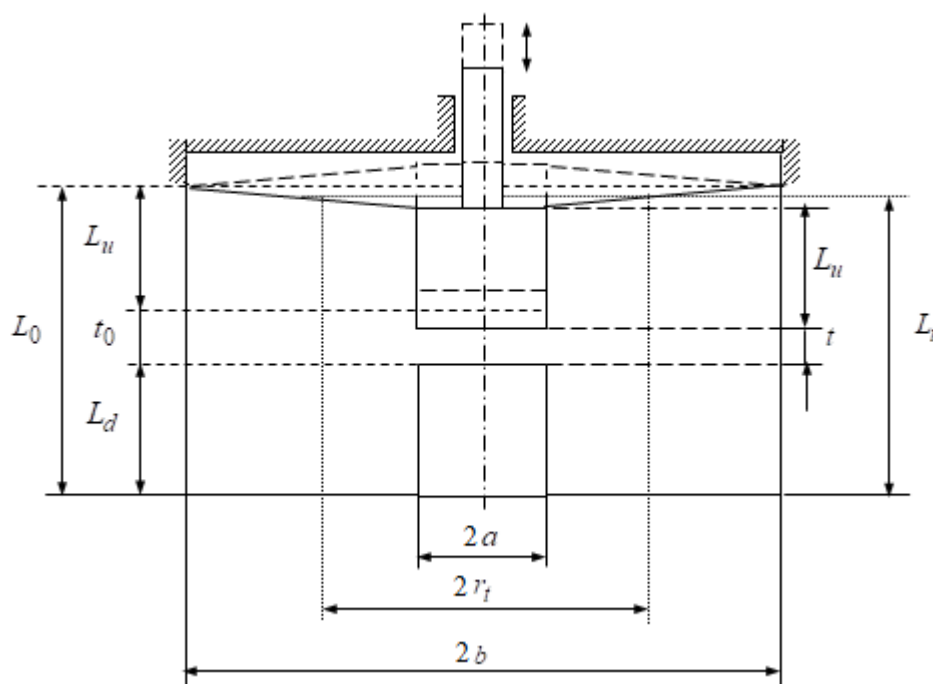


Рис. 6. Деформация стенки-мембраны и эффективная высота резонатора L_t

Численное моделирование резонансной частоты проведено при $t=1,0\div 3,2$ мм. Замена в расчетах конической деформированной мембраны на плоскую эффективную поверхность на высоте в соответствии с (8) 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. Для измерения дисковый образец с помощью держателя вводится в резонатор через неизлучающее окно (рис. 7), плоскость образца поворачивается на 90° и образец помещается в измерительный зазор. Центрирование образца в зазоре обеспечивают три тонкие диэлектрические нити, параллельные центральному электроду. В отверстиях верхней крышки резонатора установлены видеокамера с подсветкой внутреннего объема резонатора для наблюдения процесса ввода-вывода образца. В качестве основного выбран широко используемый типоразмер в виде диска стандартного диаметра $d_\varepsilon=50$ мм, превышающий диаметр электродов $d=38,029$ мм.

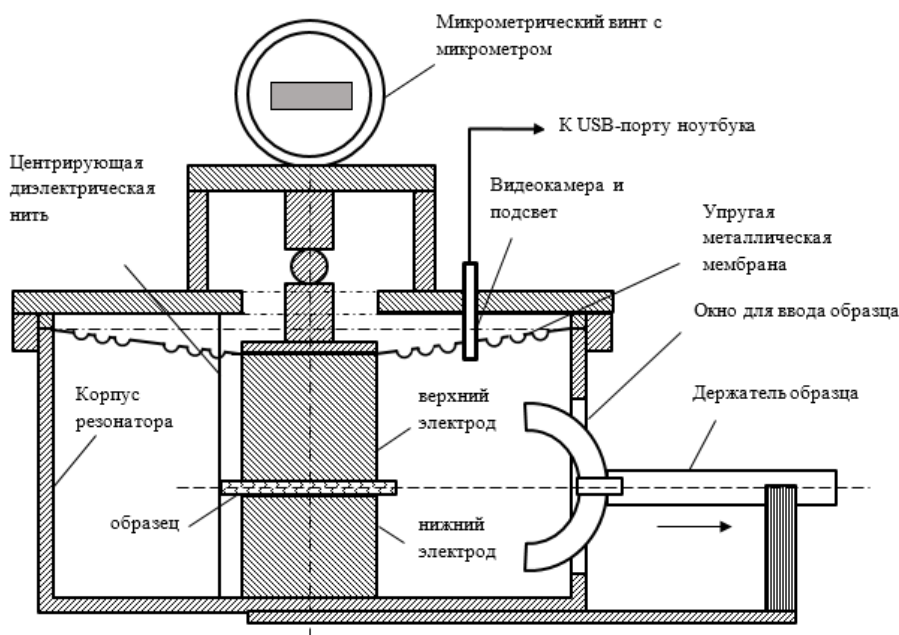


Рис. 7. Измерительный КР-500Р с диэлектрическим образцом

Значение ε рассчитывается по резонансной частоте резонатора с образцом f_ε и без образца f_0 . В расчеты входят явно или неявно размеры резонатора, величина зазора t , толщина образца

t_ε и его диаметр d_ε . Численным моделированием с помощью пакета CST Studio Suite проведена оценка влияния периферийной области измеряемого образца за пределами зазора. Моделирование резонансной частоты проведено при зазоре $t=t_\varepsilon$ и диаметре образца $2a \leq d_\varepsilon \leq 50$ мм. Сдвиг резонансной частоты $\delta f_d(\rho), \%$ как функция относительного диаметра образца $\rho = d_\varepsilon/2a$ показан на рис. 8. При $\rho \geq 1,32$ ($d_\varepsilon \geq 50$ мм), зависимость резонансной частоты от диаметра диэлектрического образца с $3,8 \leq \varepsilon \leq 10,4$ практически отсутствует. Это подтверждает высокую концентрацию электрического поля в измерительном зазоре и резкое убывание поля во внешней области электродов. Поэтому при относительном диаметре образца $\rho \geq 1,32$ знание точного диаметра d_ε и точного центрирования образца не требуется.

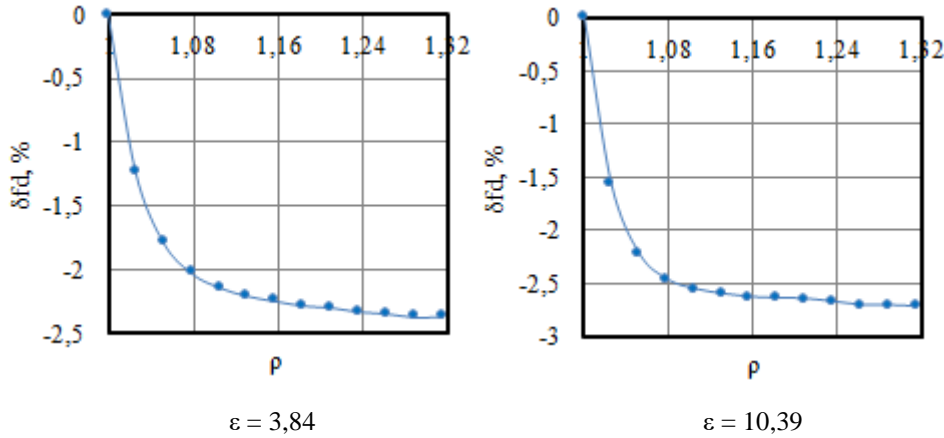


Рис. 8. Относительное смещение резонансной частоты периферийной частью образца с различной проницаемостью

Для резонатора с конкретными и известными

размерами t_ε и $d_\varepsilon \geq 50$ мм, ($\rho \geq 1,32$) включая зазор t , измеряемое значение ε будет определяться через частоту резонатора с образцом f_ε . При прочих неизменных параметрах f_ε зависит от толщины образца t_ε , его проницаемости ε и высоты зазора t : $f_\varepsilon = f_\varepsilon(\varepsilon, t_\varepsilon, t)$ или для относительного сдвига $\delta f = (f_0 - f_\varepsilon)/f_0 = \delta f(\varepsilon, t_\varepsilon, t)$. Использование численного моделирования в пакете CST Studio Suite при каждом измерении является непрактичным. Для практического применения КР-500Р необходимы точные аппроксимирующие выражения для зависимости $\delta f = \delta f(\varepsilon, t_\varepsilon, t)$. Аппроксимация по трем переменным существенно сложнее одномерной, поэтому желательно свести зависимость δf к функции одной переменной x , содержащей некоторую комбинацию исходных трех: $\delta f(x) = \delta f[x(\varepsilon, t_\varepsilon, t)]$.

Подход основан на интегрировании коэффициента заполнения резонатора (относительной доли электрической энергии в образце) из его дифференциального определения: $K_{1E} = -2(\varepsilon/f_\varepsilon)(\partial f/\partial \varepsilon)$. При известном K_{1E} это определение рассматривается как дифференциальное уравнение для f_ε и δf . Выражение для K_{1E} находится в квазистационарном приближении в соответствии с эквивалентной схемой резонатора с образцом (рис. 9). Область зазора с диэлектриком представлена как три последовательно соединенных конденсатора с емкостями: C_d - емкость микрозазора между нижней поверхностью диэлектрика и нижним электродом, C_ε - емкость конденсатора с диэлектриком, C_u - емкость зазора между верхней поверхностью диэлектрика и верхним электродом (рис. 9). Расчет энергии, запасенной в каждом из конденсаторов, дает коэффициент заполнения

$$K_{1E} = \frac{W_\varepsilon}{W_d + W_\varepsilon + W_u} = \frac{C_d C_u}{(C_u + C_d)C_\varepsilon + C_u C_d}$$

где $C_d \approx \varepsilon_0 \frac{S}{t_d}$, $C_\varepsilon \approx \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{t_\varepsilon}$, $C_u \approx \varepsilon_0 \frac{S}{t - t_\varepsilon - t_d}$, W_d, W_ε, W_u - емкости конденсаторов и энергия в них, $t = t_d + t_\varepsilon + t_u$.

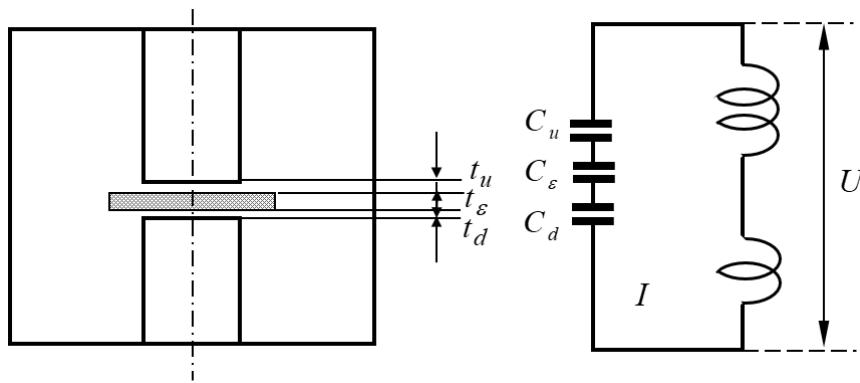


Рис. 9. Коаксиальный резонатор с диэлектриком и его эквивалентная схема

Получены выражения для K_{1E} и δf в квазистационарном приближении через ε и относительную тол-

щину образца $\tau = t_\varepsilon/t$, $0 \leq \tau \leq 1$:

$$K_{1E} \approx \frac{\tau}{\varepsilon(1-\tau) + \tau}, \quad (7)$$

$$\delta f \approx x(\varepsilon, \tau) = 1 - \sqrt{\frac{\tau}{\varepsilon} + (1-\tau)}. \quad (8)$$

Переменная $x(\varepsilon, \tau)$ в (8) обладает важными свойствами: $x(1, \tau) = 0$ и $x(\varepsilon, 0) = 0$, что соответствует нулевому частотному сдвигу резонатора: $\delta f = 0$ при $\varepsilon = 1$ и при $\tau = 0$ т.е. $t_\varepsilon = 0$. При толщине образца $t_\varepsilon < t$, ($\tau < 1$) коэффициент заполнения монотонно убывает с ростом ε образца (рис. 10).

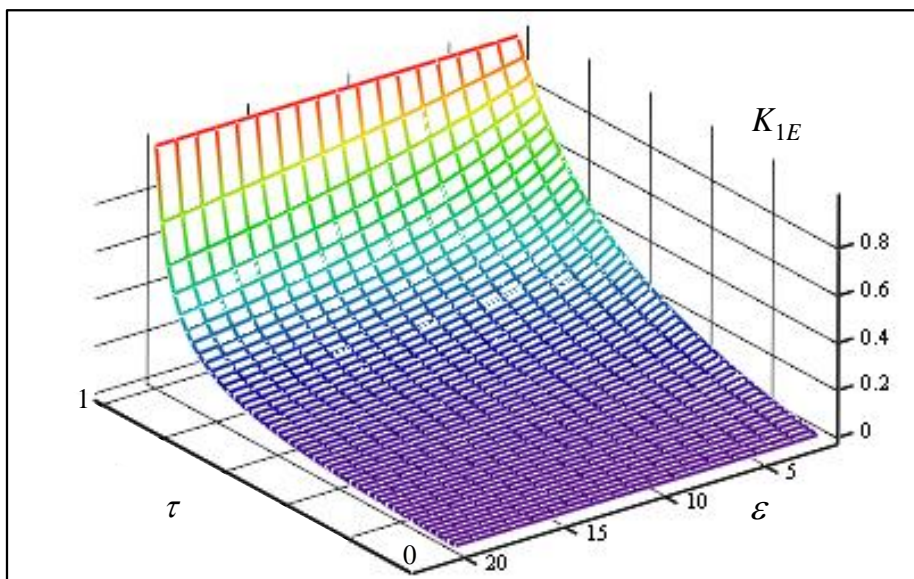


Рис. 10. Коэффициент заполнения $K_{1E}(\varepsilon, \tau)$

Выяснено, что зависимость относительного частотного сдвига δf резонатора с диэлектриком от параметра $x(\varepsilon, \tau)$ из (8) близка к линейной и определяется только этим параметром (рис. 11).

К1e

Для диэлектрических измерений экспериментальная зависимость $\delta f_{ex}(x)$ аппроксимируется полиномом по степеням параметра $x(\varepsilon, \tau)$ из (8)

$$\delta f_{ex}(x) = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4$$

Процедура измерения диэлектрических параметров состоит в измерении резонансной частоты f_0, f_ε и собственной добротности Q_0, Q_ε резонатора с зазором t_0 без образца и с диэлектрическим образцом толщиной t_ε при том же зазоре t_0 , расчете относительного сдвига резонансной частоты

$\delta f_{ex} = (f_0 - f_\varepsilon) / f_\varepsilon$. Из параметра $x(\tau, \varepsilon)$ в (8) $\varepsilon = \tau \left[(1-x)^2 - (1-\tau) \right]^{-1}$. Для измерения ε зависимость $\delta f_{ex}(x)$ обращена относительно x как $x(\delta f_{ex})$ и аппроксимирована полиномом по степеням δf_{ex} . В табл. 4 приведены результаты измерения параметров ε , $\text{tg} \delta$ образцов с $t_\varepsilon \approx 2,5$ мм в КР-500Р на частотах 0,2...0,45 ГГц и их аттестованные значения на частотах 2-7 ГГц.

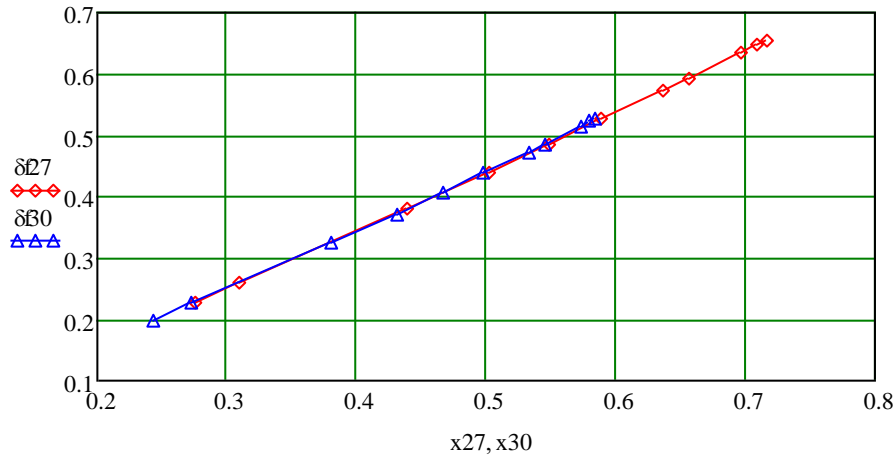


Рис. 11. Зависимость сдвига резонансной частоты δf_{ex} от обобщенного параметра $x = 1 - \sqrt{\tau/\varepsilon + (1-\tau)}$, эксперимент при $t = 2,7$ мм, (переменные $\delta f_{27}, x_{27}$) и $t = 3,0$ мм, (переменные $\delta f_{30}, x_{30}$), $\varepsilon = 2 \dots 100$, $t_\varepsilon = 2,5$ мм

Из результатов табл.4 видно, что отклонение измеренных значений ε от аттестованных не превосходит 0,3 % при $2 \leq \varepsilon \leq 15$ и не более 2% при $20 \leq \varepsilon \leq 100$. Отклонение растет с ростом ε и снижением по этой причине коэффициента заполнения K_{1E} . Чувствительность КР-500Р по $\text{tg} \delta$ позволяет контролировать диэлектрические потери при $\text{tg} \delta < 0,5 \cdot 10^{-4}$.

Оценка погрешности результатов измерений в терминах неопределенности предусматривает два способа: статистический (тип A) и иной (нестатистический - тип B). Измеряемая величина $y = \varepsilon$ в общем случае рассчитывается по входным величинам $u_i = \delta f, t, t_\varepsilon, \dots$. Величина $y = \text{tg} \delta$ рассчитывается по входным величинам $u_i = Q_0, Q_\varepsilon$ и константам K_{1E}, η . Расширенная относительная неопределенность результата U выражается через относительные неопределенности $U_{A,B}$ по типам A и B

$$U = k \sqrt{U_A^2 + U_B^2}, \quad (9)$$

где k -коэффициент охвата. Для нормального закона распределения возможных значений измеряемой величины обычно принимают коэффициент $k = 2$ при доверительной вероятности $p = 0,95$ и $k = 3$ при $p = 0,99$. Составляющая u_A находилась расчетом диэлектрических параметров для нескольких диэлектрических образцов по 11 измерениям резонансных частот и собственных добротностей. Составляющая u_A (СКО) результатов не превышает 0,1 % по ε и не

превышает 2 % по $\operatorname{tg} \delta$ в диапазоне $\varepsilon = 2 \dots 20$. В таблице 5 приведены рассчитанные неопределенности результатов измерения образцов из таблицы 4.

Табл.4. Экспериментальные результаты

материал	$\varepsilon_{\text{изм}}$	$\varepsilon_{\text{атт}}$	$\delta\varepsilon, \%$	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4_{\text{изм}}$	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4_{\text{атт}}$	K_{1E}
При $t = 3,000$ мм						
фторопластФ-4	2,042	2,043	-0,05	2,5	2,1	0,600
полиэтилен	2,293	2,292	0,04	30,2	20,7	0,582
кварц	3,812	3,812	0,00	0,5	0,8	0,492
керамика КО-1	5,254	5,263	-0,17	0,3	0,7	0,427
ситалл СТ-38	7,147	7,164	-0,24	2,3	1,7	0,362
керамика В10	9,871	9,900	-0,29	0,4	1,0	0,300
керамика МТ15	15,33	15,362	-0,21	0,4	0,5	0,228
При $t = 2,700$ мм						
керамика В20	19,948	19,937	-0,06	0,4	0,6	0,332
керамика В45	43,56	43,75	-0,45	0,5	0,7	0,200
керамика В80	80,67	79,59	1,4	1,2	2,5	0,113
керамика В100	99,14	99,94	-0,8	1,8	4,7	0,095

Табл. 5. Неопределенности $U_{\varepsilon}, U_{\operatorname{tg} \delta}$ результатов при $t = 3,000$ мм и $t = 2,700$ мм

при $t = 3,000$ мм					при $t = 2,700$ мм				
материал	ε	$U_{\varepsilon}, \%$	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$	$U_{\operatorname{tg} \delta}, \%$	материал	ε	$U_{\varepsilon}, \%$	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$	$U_{\operatorname{tg} \delta}, \%$
Ф-4	2,042	0,24	2,5	9	В20	19,95	1,3	0,40	36
полиэтилен	2,293	0,26	30,2	7	В45	43,56	5,3	0,52	100
кварц	3,812	0,41	0,5	27	В80	80,67	9,9	1,2	79
КО-1	5,254	0,58	0,3	49	В100	99,14	12	1,8	67
СТ-38	7,147	0,81	2,3	13					
В10	9,871	1,2	0,4	63					
МТ15	15,33	1,8	0,4	79					

Из таблицы 5 видно, что расширенная относительная неопределенность измеренных значений ε растет с ростом ε и снижением коэффициента заполнения K_{1E} . Расширенная относительная неопределенность измеренных значений $\operatorname{tg} \delta$ также растет с ростом ε и с уменьшением самой величины $\operatorname{tg} \delta$ (снижением уровня диэлектрических потерь). При очень малых $\operatorname{tg} \delta \sim 10^{-5}$ неопределенность оказывается значительной, что характерно и для других методов и измерительных резонаторов. Она принимает обычные значения 7-15 % при $\operatorname{tg} \delta \geq 10^{-4}$ и коэффициентах заполнения $K_{1E} \geq 0,3$.

Действующий в настоящее время стандарт ГОСТ 8.358-79 определяет методы измерения в дециметровом диапазоне волн с погрешностью ε до 4 % для $\varepsilon \leq 20$ при значениях $\operatorname{tg} \delta \geq 1 \cdot 10^{-4}$. Стандарт ГОСТ 27496.2-87 (МЭК-377-2-77) рекомендует КР с электродом в виде сиффона и уступает предложенному в

данной работе резонатору по добротности и по наименьшим измеряемым диэлектрическим потерям. По данному стандарту область значений $\varepsilon \leq 10$.

Таким образом, результаты исследования разработанного резонатора и методики измерения в нем показывают существенное повышение точности измерения в более широком диапазоне измеряемых величин.

Заключение

В диссертации проанализированы коаксиальные резонаторы различных типов и предложен коаксиальный резонатор с измерительным укорачивающим зазором, регулируемым по высоте за счет деформации упругой торцевой стенки-мембраны с электродом. Использование неизлучающего окна для ввода диэлектрического образца в резонатор обеспечило близкую к теоретической добротность. Конструкция защищена патентом на изобретение.

Проанализированы распределение поля в резонаторе, расчетные модели коаксиальных резонаторов и подходы к их расчету. Показано, что в средней плоскости межэлектродного зазора в симметричном резонаторе имеется плоскость — «электрическая стенка» с нулевой радиальной электрической компонентой, разделяющая двойной симметричный резонатор на два одинарных с той же самой резонансной частотой. Численным моделированием выяснено, что в несимметричном резонаторе эта поверхность смещается в зазоре в сторону короткого электрода и остается плоскостью в центральной области межэлектродного зазора. Во внешней области центральных электродов эта поверхность становится криволинейной, изгибаясь к торцевой стенке с коротким электродом.

Малость электрической компоненты во внешней области электродов позволяет приближенно пренебречь кривизной виртуальной «электрической стенки», считать ее плоской и разделить несимметричный двойной резонатор на два одинарных с суммарной высотой, равной высоте исходного двойного резонатора и общей резонансной частотой. На основе данного предположения разработана многоволновая электродинамическая модель несимметричного двойного резонатора. Модель реализована в виде компьютерной программы, зарегистрированной в Федеральной службе по интеллектуальной собственности России.

Практически реализована конструкция измерительного коаксиального резонатора для диэлектрических измерений с регулировкой и точным измерением межэлектродного зазора. Экспериментально получен диапазон перестройки резонансной частоты от 65 МГц до 650 МГц при изменении зазора от нескольких мкм до 5,2 мм. Использование неизлучающего окна для ввода диэлектрика позволило достичь собственной добротности резонатора 7400 и обеспечить чувствительность по диэлектрическим потерям до 10^{-5} .

Проведена оценка точности расчетов резонансной частоты по квазистационарной модели, по разработанной автором многоволновой модели в методе частичных областей (ЧО) и численным моделированием в программном пакете CST Studio Suite относительно эксперимента. С целью корректного сравнения расчетов с экспериментом внутренние размеры резонатора в собранном состоянии определены с высокой точностью по специальной методике. Погрешность расчета резонансной частоты методом ЧО с многоволновым представлением

поля в предложенной модели не более 0,2 %. Численный расчет позволяет получить достаточную для практики точность, но требует значительных компьютерных ресурсов. Его точность падает при расчетах структур с узкими зазорами и высокой концентрацией поля в них.

Исследованы вопросы применения реализованной конструкции резонатора для диэлектрических измерений. Впервые предложено использовать для измерений образцы диэлектриков с диаметром, большим диаметра центрального электрода резонатора. Выяснено соотношение между диаметром образца и электрода, при котором изменения в периферийной части образца практически не влияют на резонансную частоту. Это позволило снизить требования к точности измерения диаметра образца и к точности его центрирования.

Исследование зависимости резонансной частоты от диэлектрической проницаемости и толщины образца при различной величине зазора проведено в квазистационарном приближении и численным моделированием. Найден обобщенный параметр, содержащий высоту зазора, толщину образца, его диэлектрическую проницаемость и однозначно определяющий относительный сдвиг резонансной частоты резонатора с диэлектриком при проницаемости диэлектрика 2...100. Численным моделированием резонатора с последующей аппроксимацией найдено аналитическое выражение для относительного частотного сдвига в виде полинома по степеням обобщенного параметра.

Экспериментальное исследование возможности измерения диэлектрических параметров в разработанном резонаторе показало высокую воспроизводимость и точность результатов, превосходящую достижимую в стандартных методиках и устройствах. Показана возможность измерения значений проницаемости до 100. Результаты проведенных исследований использованы в работах по расширению частотного диапазона Государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Егоров В.Н., Зуев Я.О., Костромин В.В., **Ле Куанг Туен**, Романов Б.С. Измерение малых диэлектрических потерь полимерных материалов в дециметровом диапазоне волн // Кабели и провода, 2017. – Т. 368, № 6. – С. 12-14
2. Егоров В.Н., Токарева Е.Ю., **Ле Куанг Туен**. Измерение внутренних размеров сверхвысокочастотных объёмных резонаторов // Измерительная техника, 2020. №10. – С. 65-72. DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-10-65-72>
3. Egorov V.N., Tokareva E.Yu. & **Tuyen, L. Q.** Measurement of the Inner Dimensions of Microwave Cavity Resonators // Measurement Techniques. – 2021. – Vol. 63. – P. 839–847. DOI: [10.1007/s11018-021-01862-z](https://doi.org/10.1007/s11018-021-01862-z)
4. Егоров В.Н., **Ле Куанг Туен**. Новый подход к расчету коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью // Известия ВУЗов. Физика, 2021. – Т. 64, № 6 (763). – С. 164-169. DOI: [10.17223/00213411/64/6/164](https://doi.org/10.17223/00213411/64/6/164)
5. V. N. Egorov and **Le Quang Tuyen**. New approach to calculating the double coaxial resonator with a shortening capacitance // Russian Physics Journal. – Vol. 64, No. 6. October, 2021 (Russian Original No. 6, June, 2021). – P. 1153-1159. DOI: [10.1007/s11182-021-02435-x](https://doi.org/10.1007/s11182-021-02435-x)

6. Егоров В.Н., Ле Куанг Туен. Численное и экспериментальное исследование коаксиального резонатора с измерительным зазором // Радиотехника, 2022. – Т.86, № 6. – С. 141-150. DOI: [10.18127/j00338486-202206-17](https://doi.org/10.18127/j00338486-202206-17)

7. Егоров В.Н., Ле Куанг Туен. Коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым емкостным зазором // Патент на изобретение № RU 2680109. – Оpubл. 15.02.2019 г. – Бюллетень №5

8. Ле Куанг Туен, Егоров В.Н. Коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью // Современные проблемы радиоэлектроники и связи. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Иркутск, 19 мая 2016 г., Иркутск: Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, 2016. – С. 167-174

9. Ле Куанг Туен. Исследование коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью // Современные проблемы радиоэлектроники. XX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Красноярск, 4-5 Мая 2017 г. Сборник научных трудов. – С. 375-379

10. Ле Куанг Туен, Егоров В.Н. Измерительный коаксиальный резонатор дециметрового диапазона электромагнитных волн для исследования диэлектриков // Всероссийская научно-практическая конференция «Прикладные исследования в области физики» Иркутск, 10 Марта 2021 г. Сборник статей – С. 65-71

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619275 Программа расчета резонансной частоты несимметричного коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью. Авторы Ле Куанг Туен, Егоров В. Н. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 марта 2021 года