

На правах рукописи

Львова Ирина Александровна

**ПЕРВИЧНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ**

Специальность: 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Жулев Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.С. Совлуков
кандидат технических наук, доцент
Б.Н. Сажин

Ведущая организация: ФГУП «Государственный рязанский приборный завод»

Защита состоится 22 июня 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «20» мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Получение информации о параметрах элементов систем управления, их изменениях в ходе работы и эксплуатации промышленного оборудования, приборов и всевозможных объектов представляет собой первоочередную задачу при оценке качества и надежности их работы. Поэтому разработка и создание высокоэффективных измерительных устройств, в частности – первичных преобразователей, в области измерения, контроля и оценки стабильности работы различного рода систем управления, а также изменения их состояния в ходе эксплуатации имеют приоритетное значение.

В настоящее время (и в перспективе) одной из актуальных и технически сложных задач является измерение угловых и линейных перемещений подвижных органов многочисленных систем автоматического управления различными объектами. Эту функцию выполняют преобразователи перемещений.

В целом к этому классу изделий, отличающемуся большим разнообразием, предъявляется совокупность самых различных и, как правило, высоких технических требований. К их числу в первую очередь относятся высокая точность, значительное быстродействие, малые габаритные размеры и масса, высокие устойчивость к эксплуатационным факторам и надежность, технологичность и низкая стоимость.

Современная промышленность выпускает широкий спектр преобразователей механических величин (в частности, перемещений) различных типов, основанных на различных физических принципах и имеющих определенные области применения. Наибольшей разрешающей способностью порядка 0,01-0,001 мкм обладают емкостные, индуктивные, фотоэлектрические, лазерные преобразователи, а также преобразователи на поверхностно-акустических волнах (ПАВ). Однако при решении определенных задач данные преобразователи имеют ряд недостатков. Лазерные и фотоэлектрические измерительные преобразователи требуют проведения измерений в зоне прямой видимости; сложны в изготовлении, что обуславливает их высокую стоимость; имеют высокие массогабаритные характеристики, что создает определенные трудности при встраивании этих преобразователей в системы управления. Емкостные, индуктивные, потенциометрические и ПАВ - преобразователи при достаточно высоких точности, разрешающей способности и приемлемых массогабаритных параметрах имеют некоторые ограничения по нижнему пределу рабочих температур.

Следует отметить, что в настоящее время значительными функциональными возможностями при исследовании параметров технологических процессов и различных систем управления обладают радиоволновые методы, которые активно используются на протяжении нескольких десятков лет. Основные принципы построения радиоволновых преобразователей изложены в работах В.В. Никольского, Я.Д. Ширмана, В.А. Викторова, Б.В. Лункина, А.С. Совлукова, Г.В. Глебовича. Выходными информативными параметрами являются резонансные частоты различных типов колебаний и добротность резонаторов, характеристики электромагнитных волн в направляющих системах. В качестве чувствительных элементов (ЧЭ)

радиоволновых преобразователей контактного и бесконтактного типов используются частично излучающие и открытые резонаторы, заперделные структуры. Однако при использовании данного типа преобразователей в ряде случаев повышение точности измерений физической величины достигается путем усложнения конструкции и тщательного подбора материалов. Это приводит к существенному росту стоимости изготовления преобразователей, увеличению массогабаритных параметров, что недопустимо, например, при использовании измерительных преобразователей в высокоточных системах управления движущимися объектами.

Указанных недостатков можно избежать, если использовать в качестве чувствительных элементов первичного преобразователя диэлектрические резонаторы, которые обладают рядом преимуществ: высокая добротность резонаторов даёт возможность существенно повысить точностные характеристики измерительных преобразователей; имеется возможность включения в схему автогенератора для получения непрерывного выходного сигнала; отношение сигнал-шум намного выше, чем у преобразователей других групп.

Поэтому необходимо рассмотреть вопросы проектирования первичных микроволновых преобразователей механических величин на основе диэлектрических резонаторов (ДР), работающих в частотном диапазоне 1...10 ГГц. При достаточно высокой добротности и стабильности частоты они отличаются технологичностью, относительно низкой стоимостью, универсальностью применения. Кроме того, использование микроволновых измерительных преобразователей в системе управления контролируемого объекта обеспечит: повышение чувствительности и точности измерения параметров; малые массогабаритные характеристики, а следовательно, простое встраивание этих преобразователей в технологические и управляющие системы; устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов в рабочем диапазоне температур; расширение рабочего диапазона до области криогенных температур.

Разрабатываемые первичные микроволновые преобразователи в силу указанных свойств могут применяться для контроля параметров высокоточных систем управления движущимися объектами, а также для проведения испытаний энергодвигательных установок ракетных комплексов, в том числе и при криогенных температурах.

Принцип действия данного типа преобразователей основан на изменении резонансной частоты в зависимости от воздействия на резонатор перемещающегося возмущающего тела. Причем форма и параметры материалов, из которых изготовлены ДР и возмущающий элемент, определяют диапазон измеряемой величины. В большинстве современных конструкций диапазонных колебательных систем (КС) на ДР перестройка частоты осуществляется посредством возмущения поля колебаний диэлектрического резонатора металлическим элементом. Обычно в таких системах ограничиваются малой полосой перестройки – порядка нескольких процентов от значения нижней частоты диапазона. Перестройка частоты в более широких пределах приводит к существенному ухудшению добротности и характеристик устройства, в котором она используется. Однако если использовать в качестве возмущающего элемента

диск из диэлектрика, то диапазон перестройки, а следовательно, и измеряемой величины можно увеличить в несколько раз.

Исследованию параметров и разработке методов анализа ДР низших типов колебаний посвящены работы В.А. Мальцева, Л.В. Алексейчика, И.И. Бродуленко, В.М. Геворкяна. Распространение колебаний высших типов в ДР и их математические модели освещены в работах Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппова. Методы измерения физических характеристик анизотропных материалов для ДР при криогенных температурах представлены в работах В.Н. Егорова, И.Н. Мальцевой и А.С. Воловикова. Развитие методов исследования электрических, физических и метрологических характеристик параметрических преобразователей на ДР осуществлялось группой ученых J.G. Hartnett, C.R. Locke, E.N. Ivanov, M.E. Tobar, A.G. Mann. Несмотря на то, что к настоящему времени проведено уже достаточно много исследований на предмет поиска эффективных методов моделирования и расчета колебательных систем на основе диэлектрических резонаторов, эта задача по-прежнему представляет значительный интерес ввиду многообразия их конструкций и сложности теоретического анализа.

Важным моментом при исследовании характеристик первичных преобразователей любого типа является анализ функции чувствительности. Для этого чаще всего используют теоретические модели электромагнитных устройств, которые в основном ведут к уравнениям, не имеющим известного точного решения, за исключением случая простых структур. Именно поэтому решение наиболее часто сводят к численным методам типа метода конечных разностей или конечного элемента. Однако они имеют существенные недостатки, особенно в случае анализа функции чувствительности, т.к. полностью численные методы влекут за собой периодически повторяющиеся вычисления, где единственная формула дает искомым результат, что значительно увеличивает вычислительные затраты.

Следует отметить, что в настоящий момент не существует единой методики расчета преобразователей механических величин на основе ДР, которая позволяет с высокой точностью анализировать и проектировать КС с резонаторами различной формы в соответствии с требованиями технических заданий. Необходимость создания такой методики обусловлена требованиями при разработке первичных микроволновых преобразователей механических величин, т.к. получение необходимых параметров путем многократной подгонки размеров элементов первичного преобразователя экономически нецелесообразно.

Таким образом, использование КС с ДР в микроволновом диапазоне длин волн в качестве первичных преобразователей позволяет создавать преобразователи перемещения и давления с очень высокой чувствительностью в широком диапазоне температур, вплоть до криогенных.

Принимая во внимание практическую важность вышеупомянутых вопросов, связанных с разработкой первичных микроволновых преобразователей на диэлектрических резонаторах, можно утверждать, что настоящая диссертационная работа посвящена актуальной теме.

Цель и задачи работы. Основной целью данной работы является разработка первичных микроволновых преобразователей механических величин на основе диэлектрических резонаторов по заданным требованиям, обеспечивающих повышение точности измерений, а также расширение области их применения. Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) провести анализ современного состояния устройств измерения параметров элементов систем управления, обосновать подходы к проектированию микроволновых преобразователей механических величин на основе ДР;
- 2) разработать методику расчета микроволновых чувствительных элементов на изотропных диэлектрических резонаторах в виде диска с металлическим элементом перестройки частоты;
- 3) провести моделирование КС с ДР и расчет функции чувствительности на основе метода поперечного резонанса;
- 4) исследовать зависимости характеристик чувствительного элемента от геометрических и физических параметров электродинамической системы;
- 5) провести моделирование обобщенной диэлектрической многослойной резонансной структуры методом частичных областей (ЧО), что позволит анализировать и проектировать КС с дисковыми и кольцевыми резонаторами, имеющими широкий спектр физических и геометрических параметров;
- 6) исследовать зависимость основных характеристик колебательных систем с диэлектрическими элементами перестройки частоты от их геометрических размеров и электромагнитных параметров;
- 7) разработать обобщенную методику проектирования микроволновых преобразователей механических величин на ДР, которая включает в себя расчет основных параметров преобразователей и позволяет провести оценку их потенциальных характеристик.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика расчета колебательной системы на основе цилиндрических изотропных диэлектрических резонаторов с использованием уточненной модели магнитных стенок во втором приближении, позволяющая в явном виде определять функцию преобразования и величину относительного диапазона перестройки частоты КС на ДР с металлическим возмущающим элементом для построения первичных преобразователей механических величин. Обоснованы преимущества применения ДР в высокочувствительных преобразователях механических величин.
2. Разработана аналитическая модель для оценки резонансной частоты цилиндрических изотропных многослойных ДР в качестве чувствительных элементов, основанная на методе поперечного резонанса. Предложенная модель отличается тем, что позволяет проводить анализ чувствительности КС относительно её геометрических и физических параметров с наименьшими вычислительными затратами и с погрешностью расчета порядка 1 % для колебания H_{018} и 10 % для колебаний высоких порядков.
3. Разработана методика расчета собственных частот микроволновых первичных преобразователей с неоднородным диэлектрическим заполнением на основе метода частичных областей, позволяющая производить электродинамический анализ КС на ДР, включающих в себя дисковые или

кольцевые диэлектрические элементы с общей осью симметрии. Входящий в предлагаемую методику расчетный алгоритм обладает высокой точностью (погрешность расчета 0,8 %), относительно быстрой сходимостью, минимальными вычислительными затратами.

4. Впервые на основе частных методик расчета предложен обобщенный подход к процессу проектирования первичных микроволновых преобразователей механических величин с использованием КС на основе ДР, который позволяет исследовать и разрабатывать функционально законченные измерительные устройства в соответствии с требованиями технического задания.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований предложены варианты конструкций первичных микроволновых преобразователей перемещения и давления, позволяющих проводить оценку параметров контролируемых объектов систем управления. Основными достоинствами данного типа устройств являются: погрешность измерения 0,1...0,2 %, высокая разрешающая способность (0,01 мкм), широкий диапазон рабочих температур, вплоть до криогенных, простота конструктивного исполнения, малые массогабаритные характеристики, устойчивость к дестабилизирующим факторам.

Практическая значимость работы. Представленные в работе модели и соответствующие методики расчета чувствительных элементов на основе ДР, предназначенные для анализа свойств первичных микроволновых преобразователей, могут быть применены при практическом проектировании конкретных устройств для измерения механических величин.

Методы исследований. В работе применялись методы расчета электродинамических систем: метод магнитных стенок, элементы теории возмущений, метод поперечного резонанса, метод частичных областей, уравнения Максвелла. Также использовались численно-аналитические методы анализа параметров систем, математические методы расчета параметров микроволновых устройств. При моделировании и исследовании резонансных систем использовались программные продукты *Matlab 6.5*, *Mathematica 5.0*, *CosmosXpress 2007*.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждаются:

- использованием строгих электродинамических моделей, адекватно отражающих особенности рассматриваемых резонансных структур;
- соответствием полученных теоретических результатов известным тестовым, ранее опубликованным в научно-технической литературе;
- проведенными экспериментальными исследованиями;
- апробацией основных результатов диссертации на XIV, XVII, XVIII всероссийских научно-технических конференциях "Методы и средства измерений физических величин", Нижний Новгород, 2006, 2007 гг.;
- актами внедрения результатов диссертационной работы на ФГУП ГРПЗ и в учебном процессе РГРТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 1 статья в инженерном инновационном издании, 4 статьи в межвузовских

сборниках, 3 тезиса докладов, 3 статьи в научно-технических журналах, включенных в перечень ВАК РФ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика расчета микроволновых чувствительных элементов на основе цилиндрических изотропных диэлектрических резонаторов с использованием модели магнитных стенок во втором приближении, позволяющая посредством функции преобразования в явном виде определять величину относительного диапазона перестройки частоты КС с металлическим возмущающим элементом в пределах 3...10 % с погрешностью 6...8 %.
2. Аналитическая модель для оценки резонансной частоты и функции чувствительности первичного преобразователя на основе цилиндрических изотропных ДР, основанная на методе поперечного резонанса, позволяющая проводить анализ чувствительности КС с погрешностью не более 1 % для основного типа колебания, не более 10 % для колебаний высших порядков с минимальными вычислительными затратами. Результаты анализа функции чувствительности изотропного чувствительного элемента относительно геометрических и физических параметров колебательной системы.
3. Методика расчета микроволновых измерительных преобразователей с неоднородным диэлектрическим заполнением на основе метода частичных областей, позволяющая проводить электродинамический анализ первичного преобразователя на ДР с диэлектрическим возмущающим элементом с погрешностью не более 0,8 %, а также расширить диапазон рабочих измерений в 2...4 раза.
4. Обобщенная методика проектирования микроволновых преобразователей механических величин на основе ДР, позволяющая исследовать и разрабатывать функционально законченные измерительные устройства в соответствии с требованиями технических заданий.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 85 наименований, приложений. Диссертация содержит 119 страниц основного текста, 33 страницы рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, обоснована их достоверность, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния техники микроволнового диапазона. Проведена классификация диэлектрических резонаторов и измерительных преобразователей. Приведен перечень известных физических эффектов и явлений, заложенных в принцип действия преобразователей физических величин. Сделан вывод о том, что решение задач измерительной техники в системах управления путем использования структур на основе ДР позволяет реализовать новые методы измерения физических величин в микроволновом диапазоне. Исключительно важным для практики является построение высокостабильных колебательных систем с высокочастотными

диэлектрическими резонаторами, а соответственно и разработка методик расчета таких колебательных систем, позволяющих с высокой точностью рассчитывать их основные параметры.

Во второй главе предлагается методика расчета резонансных частот первичного преобразователя на основе ДР с элементом перестройки в виде металлического диска. На первом этапе рассматривается уточненная расчетная модель для определения резонансной частоты уединенного ДР, учитывающая влияние установки резонатора на диэлектрическую подложку, что соответствует реальным конструктивным решениям устройств на микрополосковых линиях. На втором этапе рассматривается колебательная система с неоднородностью в виде металлического диска, механически жестко связанного с объектом измерений (рисунок 1).

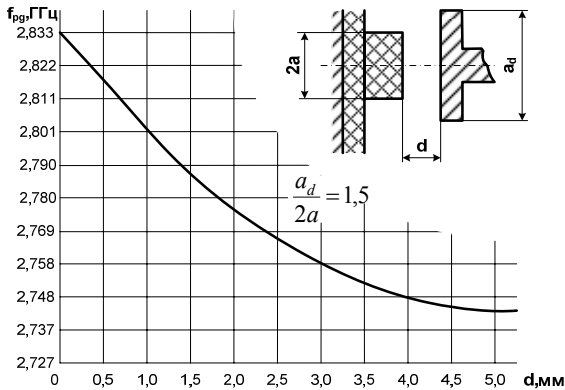


Рисунок 1 – Первичный преобразователь с неоднородностью в виде металлического диска, механически жестко связанного с объектом измерений

На основе метода магнитных стенок во втором приближении в сочетании с методом малых возмущений получена зависимость частоты перестройки первичного преобразователя от изменения положения подстроечного элемента:

$$f_{pg} = f_p \left\{ 1 + \frac{(a_d / 2a)^2}{4\varepsilon_r (2a / \lambda_p)} \exp(-2\zeta_3 d) \right\}, \quad (1)$$

где a_d – диаметр диска; d – расстояние между ДР и диском; a – радиус резонатора; λ_p – длина волны, соответствующая резонансной частоте f_p колебательной системы из ДР и подложки микрополосковой линии, на которую он установлен; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость резонатора; ζ_3 – волновое число вне резонатора.

Данная модель в явном виде устанавливает зависимость частоты f_{pg} от изменения геометрических размеров системы с погрешностью 6...8 %.

Предложена модель для анализа функции чувствительности измерительного преобразователя на основе диэлектрического резонатора методом поперечного резонанса. В основу методики заложено представление резонансной системы в виде цилиндрической изотропной многослойной диэлектрической структуры, аналогичной круглому волноводу, частично заполненному диэлектрическим материалом (рисунок 2).

Модель резонансной системы основана на аналогии с линиями передачи. Анализ многослойной структуры методом поперечного резонанса состоит в определении эквивалента линии передачи сложного сечения.

Волновое сопротивление Z_{ci} i -й эквивалентной линии передачи выражено через постоянную распространения γ_i следующим образом:

$Z_{ci} = j\omega\mu_0 / \gamma_i$ для H колебания и $Z_{ci} = \gamma_i / j\omega\epsilon_0\epsilon_{ri}$ для E колебания.

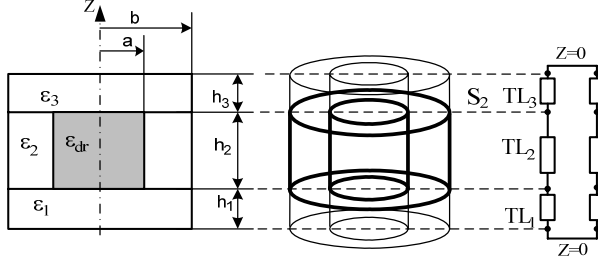


Рисунок 2 – Модель преобразователя с ДР в виде отрезка волновода круглой формы с диэлектрическим заполнением, основанная на аналогии с линиями передачи

Характеристики диэлектрического материала без потерь – магнитная проницаемость μ_0 и диэлектрическая постоянная ϵ_0 , ϵ_{ri} – действительные числа.

Для трехслойной структуры (рисунок 2) между характеристическими параметрами существуют следующие зависимости:

$$\gamma_1 = \alpha_1 = \left(\left(\frac{x_{nm}}{b} \right)^2 - k_0^2 \epsilon_1 \right)^{1/2}, \quad (2) \quad \gamma_3 = \alpha_3 = \left(\left(\frac{x_{nm}}{b} \right)^2 - k_0^2 \epsilon_3 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\gamma_2 = j\beta = j \left(k_0^2 \epsilon_{dr} - \xi_1^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где k_0 – волновое число в вакууме, $x_{nm} = \xi_1 a$ – корень m функции Бесселя первого рода и n -го порядка; α – постоянная затухания.

Для среднего неоднородного волновода соотношение (4) получено с учетом того, что распространение поля происходит вдоль стержня внутри и поле затухает экспоненциально вне стержня. В этом случае характеристическое уравнение связано с волновыми числами ξ_1 и ξ_2 в диэлектрической среде среднего слоя и может быть получено посредством метода поперечного резонанса:

$$\frac{J'_0(\xi_1 a)}{\xi_1 a} + \frac{P'_0(\xi_2 a)}{\xi_2 a} = 0 \quad \text{для } H_{0m} \text{ моды}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{dr} \frac{J'_0(\xi_1 a)}{\xi_1 a} + \epsilon_2 \frac{R'_0(\xi_2 a)}{\xi_2 a} = 0 \quad \text{для } E_{0m} \text{ моды}. \quad (6)$$

Здесь $P'_0(\xi_2 a)$ и $R'_0(\xi_2 a)$ получаются из (7) и (8) при $n = 0$:

$$P_n(\xi_2 r) = J_n(\xi_1 a) \left[\frac{K_n(\xi_2 r) I'_n(\xi_2 b) - I_n(\xi_2 r) K'_n(\xi_2 b)}{K_n(\xi_2 a) I'_n(\xi_2 b) - I_n(\xi_2 a) K'_n(\xi_2 b)} \right], \quad (7)$$

$$R_n(\xi_2 r) = J_n(\xi_1 a) \left[\frac{K_n(\xi_2 r) I_n(\xi_2 b) - I_n(\xi_2 r) K_n(\xi_2 b)}{K_n(\xi_2 a) I_n(\xi_2 b) - I_n(\xi_2 a) K_n(\xi_2 b)} \right]. \quad (8)$$

где $J_n(\cdot)$, $J_0'(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода и n -го порядка и соответственно её производная при $n = 0$; $I_n(\cdot)$ и $K_n(\cdot)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода соответственно и их производные $I_n'(\cdot)$, $K_n'(\cdot)$.

Если рассматривать электромагнитные процессы в резонансной системе в терминах импеданса отрезка эквивалентной линии передачи на границе раздела S_2 (рисунок 2), то Z_+ – импеданс короткозамкнутой линии передачи TL_3 , с учетом, что Z_- – импеданс линии TL_2 , нагруженной короткозамкнутой линией TL_1 .

Условие резонанса системы в данном случае записывается следующим образом:

$$Z_+ + Z_- = 0.$$

Или через электрическую длину линии:

$$\beta h = \arctg \left[\frac{\alpha_1}{\beta th(\alpha_1 h_1)} \right] + \arctg \left[\frac{\alpha_3}{\beta th(\alpha_3 h_3)} \right] \quad (9)$$

для колебаний типа H_{nm} , где β – фазовое число, $h = h_1 + h_2 + h_3$,

$$\beta h = \arctg \left[\frac{\varepsilon_{dr}}{\beta} \frac{\alpha_1}{\varepsilon_1} th(\alpha_1 h_1) \right] + \arctg \left[\frac{\varepsilon_{dr}}{\beta} \frac{\alpha_3}{\varepsilon_3} th(\alpha_3 h_3) \right] \quad (10)$$

для колебаний типа E_{nm} .

В результате получаем систему трансцендентных уравнений, состоящую из характеристического уравнения (5) или (6) и условия резонанса (9) или (10) в зависимости от типа колебаний. Вычисление резонансных частот производится из решения этой системы и опирается на численные методы (в частности, метод Ньютона).

Особенность представленной модели, а соответственно и методики расчета, заключается в сокращении вычислительных затрат при расчете функции чувствительности, что чрезвычайно важно при исследовании свойств микроволновых преобразователей с чувствительным элементом в виде ДР.

Чтобы вычислить функцию чувствительности, необходимо решить систему уравнений с двумя неизвестными f и x , которые так же как и сама функция чувствительности, зависят от параметров p_i резонансной структуры. Система в общем случае имеет следующий вид:

$$\begin{cases} F_1(f, x, \dots, p_i, \dots) = 0, \\ F_2(f, x, \dots, p_i, \dots) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Решение $f(p_1, \dots, p_n)$ – неявная функция; и хотя никакое точное символьное выражение не может быть найдено для этого решения, его частные производные могут быть вычислены символьным способом:

$$S_{p_i} = \frac{\partial f}{\partial p_i} = \frac{\frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial F_2}{\partial p_i} - \frac{\partial F_2}{\partial x} \frac{\partial F_1}{\partial p_i}}{\frac{\partial F_1}{\partial f} \frac{\partial F_2}{\partial x} - \frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial F_2}{\partial f}}. \quad (12)$$

Вычисление функции чувствительности S_{p_i} , которое состоит в нахождении значений частных производных на частоте резонанса f , определяется только вычислительными возможностями компьютера.

На основе приведенной методики исследовано влияние геометрических и электрических параметров структуры на чувствительность преобразователя на резонансных частотах $1...1,3$ ГГц к смещению верхней металлической пластины для основного типа колебания $H_{01\delta}$. Значение функции чувствительности составило примерно 10 кГц/мкм. Показано, что погрешность расчета составляет 1% для колебания $H_{01\delta}$, 10% для колебаний высоких порядков. Модель и соответствующие вычисления полезны для анализа общих свойств экранированных цилиндрических многослойных диэлектрических резонаторов, при использовании их в качестве первичных микроволновых преобразователей механических величин в системах управления.

В третьей главе предлагается методика расчета частот собственных колебаний микроволновых первичных преобразователей с неоднородным диэлектрическим заполнением (рисунок 3).

Процедура составления характеристического уравнения рассматриваемой колебательной системы базируется на методе частичных областей с разбиением резонансного объема на отрезки радиальных слоистых волноводов. Использование условий непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на границах частичных областей (ЧО) позволяет получить систему функциональных уравнений относительно неизвестных коэффициентов в разложениях полей в каждой ЧО. Проецируя данную систему на базис собственных функций краевых задач для выделенных частичных областей в виде радиальных слоистых волноводов, получаем бесконечную систему линейных однородных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно этих коэффициентов. Приравниваем к нулю главный определитель редуцированной СЛАУ и получаем характеристическое уравнение для нахождения собственных частот рассматриваемой резонансной структуры.

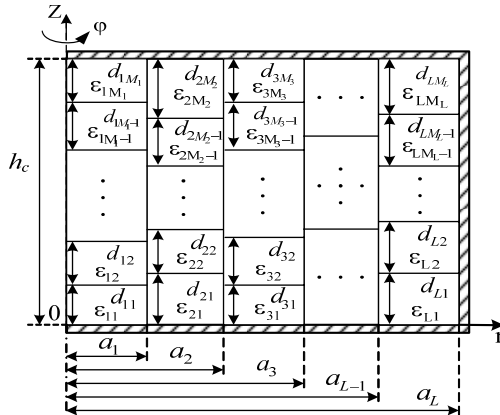


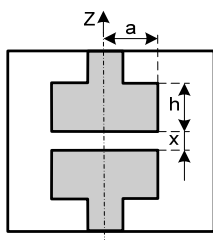
Рисунок 3 – Экранированный плоскопараллельный радиальный слоистый волновод

Поиск корней характеристического уравнения производится с использованием численного метода решения трансцендентных уравнений - метода половинного деления. При расчете спектра резонансных частот потери в диэлектрическом заполнении и металлических стенках экрана полагаются пренебрежимо малыми, т. е. экранирующие поверхности рассматриваются как

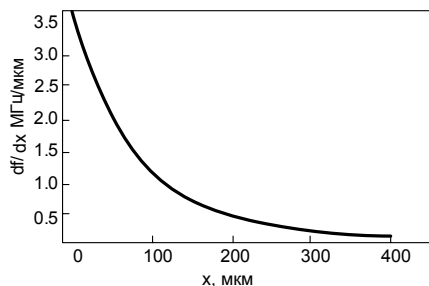
идеально проводящие, а диэлектрические проницаемости сред, заполняющих резонатор, считаются чисто действительными величинами.

Разработанная в данной главе методика расчета резонансных частот применяется для анализа конкретных резонансных структур при использовании их в качестве первичных преобразователей малых перемещений с диэлектрическими элементами перестройки частоты. На основе разработанной методики проведено численное исследование спектров собственных колебаний экранированных дискового и кольцевого диэлектрических резонаторов (ДДР и КДР), перестраиваемых диэлектрическими дисками, работающих на низшем симметричном магнитном колебании (H_{01}) в диапазоне частот 2,1...2,7 ГГц. Были рассчитаны зависимости ширины полосы перестройки и частотного интервала от величины диэлектрической проницаемости подстроечного диска (ПД), соотношения радиуса и высоты диэлектрического резонатора, а также соотношения высот ДР и ПД. Для преобразователя с кольцевым диэлектрическим резонатором также исследовалась зависимость диапазона перестройки от соотношения внешнего и внутреннего диаметров КДР. В результате исследований установлено, что диапазон перестройки ДДР диэлектрическим диском составляет 24 % от нижнего значения частоты (2,17 ГГц), а максимальный диапазон перестройки в системе с КДР составляет почти 50 %. Это позволяет увеличить диапазон измеряемых механических величин по сравнению с преобразователем с металлическим элементом подстройки в 2...4 раза.

Проведен расчет параметров первичного преобразователя на диэлектрических резонаторах из лейкосапфира, работающих на высших азимутальных колебаниях (АК) (рисунок 4), а также анализ функции чувствительности для данного типа преобразователей с целью достоверного её прогнозирования для любого расстояния между диэлектрическими дисками и определения геометрии, которая могла бы увеличить функцию чувствительности.



а



б

Рисунок 4 – Первичный преобразователь на основе аксиально-симметричных диэлектрических резонаторов, возбуждаемых на высших азимутальных колебаниях: а – схематичное изображение; б – функция чувствительности

Рассмотрена возможность оптимизации функции чувствительности с помощью выбора номера колебания в азимутальном направлении. Для представленной КС оптимальной является мода типа Е "шепчущей галереи" с азимутальным индексом номер 7 для резонатора диаметром 3 см. Значение

функции чувствительности составляет около 3,5 МГц/мкм, что является существенным достоинством при использовании преобразователя данного типа для измерения микроперемещений и давлений.

Использование лейкоапфира в качестве материала преобразователя позволяет расширить область применения разрабатываемого типа устройств до криогенных температур.

С использованием теоретических и экспериментальных данных, взятых из отечественных и зарубежных литературных источников, подтверждается высокая точность расчета частот преобразователя (погрешность вычислений 0,8 %) на ДР по разработанной в данной главе методике. Установлено, что основными составляющими погрешности являются неточность значений диэлектрических проницаемостей и ошибка определения параметров, характеризующих потери в материалах резонансной структуры. Поэтому проведен анализ существующих методов и предложены пути повышения точности определения диэлектрических параметров материалов с низкими потерями с использованием мод "шепчущей галереи" в диэлектрических резонаторах.

В четвертой главе на основе результатов методик расчетов первичных преобразователей с ДР различной формы и металлическими и диэлектрическими элементами перестройки частоты, предложенных в главах 2 и 3, представлен обобщенный подход к процессу проектирования микроволновых преобразователей механических величин на основе ДР. Обобщенная структура преобразователя механических величин представлена на рисунке 5.

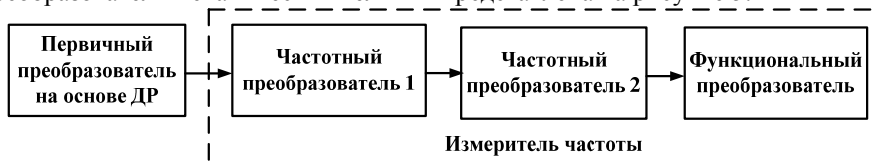


Рисунок 5 – Структура преобразователя механических величин

Первичный преобразователь на основе микроволнового ДР обеспечивает изменение резонансной частоты в зависимости от воздействия на резонатор перемещающегося возмущающего тела. Частотный преобразователь 1 ограничивает входной синусоидальный сигнал по амплитуде, запрещая прохождение отрицательной полуволны, а также ограничивает сигнал сверху на заданном уровне, что обеспечивает совместимость с TTL-уровнями логических сигналов. На следующем этапе реализуется перенос рабочих частот преобразователя в область рабочих частот цифровых устройств. Частотный преобразователь 2 выполняет измерение частоты, а функциональный преобразователь на завершающем этапе реализует вычисление перемещений.

Обобщенная методика расчета микроволновых преобразователей подобного типа приведена на схеме (рисунок 6). В предлагаемой методике основным критерием выбора чувствительного элемента является диапазон рабочих температур Δt . Если $\Delta t = (-60...+125)^\circ\text{C}$, то чувствительный элемент – ДР низшего типа колебаний (НК), иначе, при Δt близких к температуре жидкого азота (77 К) и до -60°C – ДР АК.

Выбор формы ЧЭ зависит от диапазона перестройки $\Delta f/f_n$ резонансной частоты всего первичного преобразователя, где f_n – начальная частота диапазона. Как показали проведенные в главах 2 и 3 исследования, если $\Delta f/f_n \approx (3...20)\%$, то в качестве чувствительного элемента целесообразно использовать дисковые ДР, а если $\Delta f/f_n \approx (20...50)\%$, то кольцевые ДР.

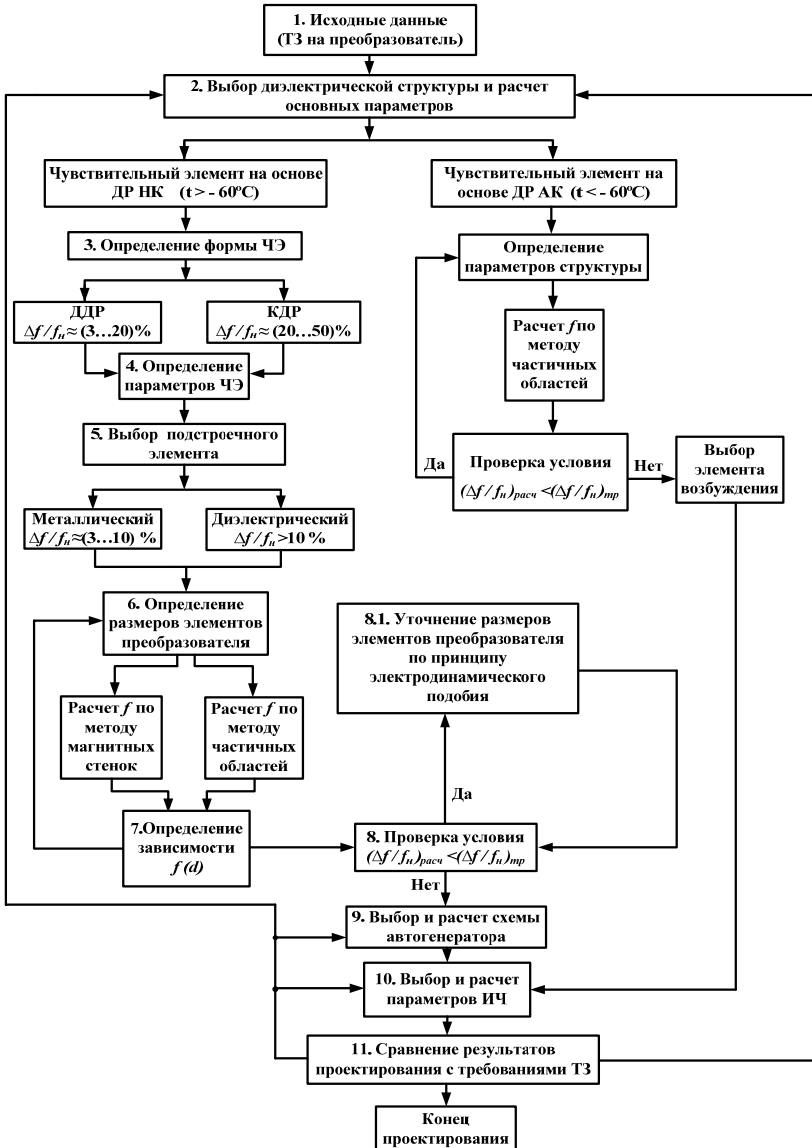


Рисунок 6 – Схема обобщенной методики проектирования микроволновых преобразователей механических величин

Выбор элемента подстройки также зависит от диапазона перестройки. Если $\Delta f/f_n \approx (3...10) \%$, то используем металлический элемент перестройки, а если $\Delta f/f_n > 10 \%$, то диэлектрический.

Расчет собственных частот преобразователя с ДР производится в зависимости от вида колебательной системы. Если преобразователь с подстроечным элементом (ПЭ) в виде металлического диска, то расчет производится по методу магнитных стенок во втором приближении. Если ПЭ из диэлектрика, то - по методу ЧО. Зависимость резонансной частоты преобразователя от смещения возмущающего тела позволяет определить относительный диапазон перестройки.

Далее необходимо выполнить проверку условия:

$$(\Delta f/f_n)_{расч} < (\Delta f/f_n)_{тр}, \quad (13)$$

где $(\Delta f/f_n)_{расч}$ - расчетное значение относительного диапазона перестройки; $(\Delta f/f_n)_{тр}$ - требуемое значение относительного диапазона перестройки в соответствии с требованиями технического задания.

Если это условие удовлетворяется, то необходимо провести уточнение параметров первичного преобразователя по принципу электродинамического подобия или изменить параметры преобразователя с учетом результатов исследований, проведенных в главах 2 и 3 настоящей работы. Данная процедура повторяется до тех пор, пока выполняется условие (13).

Для оценки метрологических характеристик и основных параметров разрабатываемого микроволнового преобразователя с заданной точностью проведен расчет измерителя частоты, который обеспечивает точность измерения перемещения не хуже $\pm 0,01$ мкм.

На основе представленной методики проектирования разработаны конструкции микроволновых преобразователей микроперемещений и давлений, а также проведена оценка их потенциальных характеристик. В частности, преобразователь микроперемещений на основе ДР из высокочастотной керамики ТБНС с параметрами $\epsilon_r=80$, $a=6,5$ мм, $h=7$ мм с металлическим (медным) элементом перестройки частоты диаметром 15 мм и толщиной 0,05 мм прошел испытания в составе стендового оборудования проверки лазерных систем управления по соответствующей методике, оформленной в виде протокола испытаний.

Установлено, что разработанный преобразователь имеет следующие параметры: относительная девиация частоты за счет изменения положения металлической пластины составляет величину порядка $3...5 \%$ от начального значения 2863 МГц; динамический диапазон устройств с использованием такого типа резонаторов можно оценить величиной 1,5; разрешающая способность по перемещению, учитывая, что интервал расстояний эффективного воздействия неоднородностей равен $1,5...3,5$ мм, составляет $(1,0...1,5) \cdot 10^{-8}$ м; точность измерений перемещений 5 мкм, что соответствует погрешности измерения 0,1–0,2 %; температурный коэффициент частоты для используемого в экспериментах ДР из керамики ТБНС равен $(1,8...2) \times 10^{-6}$ 1/°C в диапазоне температур $-60...+60$ °C; долговременная стабильность частоты $(5...100) \cdot 10^{-6}$ достигает величины порядка $10^{-7}...10^{-6}$ у лучших образцов.

Сравнительный анализ спроектированного преобразователя перемещений с преобразователями других типов, выпускаемых современной промышленностью, показал, что разработанный преобразователь прост в исполнении, не уступает по основным параметрам преобразователям других типов, а в ряде случаев имеет преимущество при работе на нижнем пределе температурного диапазона, чувствительности и точности измерения параметров; просто встраивается в управляющие системы; устойчив к воздействию дестабилизирующих факторов в рабочем диапазоне температур. С целью улучшения метрологических характеристик микроволновых преобразователей рассмотрена потенциальная возможность улучшения параметров преобразователя за счет выполнения корпуса совместно с упругим элементом и остальных частей конструкции из плавленого кварца. Одной из важнейших характеристик плавленого кварца является его чрезвычайно низкий коэффициент расширения: $5,5 \times 10^{-7}$ мм. Это свойство делает его крайне полезным для производства устройств, для которых необходима минимальная чувствительность к температурным изменениям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ современного состояния устройств измерения параметров элементов систем управления, обоснованы подходы к проектированию первичных микроволновых преобразователей механических величин на основе ДР.
2. Разработана методика расчета резонансных частот колебательной системы, работающей на колебании основного типа $H_{01\delta}$, на основе цилиндрических диэлектрических резонаторов с металлическим элементом перестройки частоты, основанная на модели магнитных стенок во втором приближении. Она позволяет в явном виде установить функцию преобразования (зависимость резонансной частоты от изменения геометрических размеров системы и её физических параметров) с погрешностью 6...8 %.
3. На основе метода поперечного резонанса разработана аналитическая модель расчета резонансной частоты цилиндрических многослойных диэлектрических чувствительных элементов, которая позволяет проводить анализ чувствительности относительно геометрических или физических параметров с минимальными вычислительными затратами. Погрешность расчета - 1 % для колебания $H_{01\delta}$, 10 % для колебаний высоких порядков.
4. На базе метода частичных областей разработана методика расчета частот собственных колебаний экранированного цилиндрического преобразователя с неоднородным осесимметричным диэлектрическим заполнением. Данная методика включает в себя алгоритм, обладающий относительно быстрой сходимостью, высокой точностью (погрешность вычислений 0,8 %), минимальными вычислительными затратами, т.к. не предполагает вычисления определителей высоких порядков, даже в случае сложных конфигураций первичного преобразователя.
5. Исследованы диапазонные свойства экранированных микроволновых колебательных систем на основе дисковых и кольцевых диэлектрических резонаторов, перестраиваемых диэлектрическими дисками. Установлено, что

максимально возможный диапазон перестройки частоты рабочего колебания (H_{01}) при использовании дисковых диэлектрических резонаторов из высокочастотной керамики не превышает 24 % от значения начальной частоты диапазона (2,17 ГГц), в то время как в кольцевых ДР, перестраиваемых диэлектрическими дисками из материалов с низкими потерями, возможно достижение относительной полосы перестройки до 50 %. Это позволяет расширить рабочий диапазон измерений по сравнению с металлическим элементом подстройки примерно в 2...4 раза (до 6...8 мм).

6. На основе частных методик расчета впервые разработана обобщенная методика проектирования микроволновых преобразователей механических величин на основе ДР, которая позволяет исследовать и разрабатывать функционально законченные измерительные устройства в соответствии с требованиями технических заданий.

7. На основе полученных результатов расчета первичных преобразователей на ДР разработаны конструкции микроволновых измерительных преобразователей микроперемещений и давлений, а также проведена оценка их потенциальных характеристик. Установлено, что спроектированные устройства на ДР надежны, просты в исполнении и не уступают по основным параметрам преобразователям других типов, а в ряде случаев имеют преимущество при работе на нижнем пределе температурного диапазона.

8. На основе проведенного диссертационного исследования решена важная научно-прикладная задача разработки первичных микроволновых преобразователей механических величин на основе диэлектрических резонаторов по заданным требованиям, обеспечивающих повышение точности измерений, а также расширение области их применения. Ее решение является определенным вкладом в теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств систем управления с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Васильев Е.П., Круглякова И.А. Особенности проектирования селективных и управляющих устройств для информационно-измерительных систем // Информационно-измерительная и биомедицинская техника. Рязань: РГРТА, 2005. С.115-122.
2. Васильев Е.П., Круглякова И.А. Анализ интерактивных методов параметрической оптимизации при проектировании микроволновых устройств для информационно-измерительных и управляющих систем // Информационно-измерительная и биомедицинская техника. Рязань: РГРТА, 2005. С.122-129.
3. Львова И.А. Методика расчета характеристик параметрического преобразователя перемещения на диэлектрическом резонаторе // Информационно-измерительная и биомедицинская техника. Рязань: РГРТУ, 2006. С.129-137.
4. Васильев Е. П., Круглякова И.А. Моделирование микроволновых датчиков на диэлектрических резонаторах // Материалы XIV всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин". Нижний Новгород, 2006. С.29-30.

5. Васильев Е.П., Жулев В.И., Львова И.А. Исследование чувствительности параметрического преобразователя перемещения на диэлектрическом резонаторе // Информационные технологии и телекоммуникации в образовании и науке. Рязань. РГРТУ. 2006. С.138-141.
6. Львова И. А. Методика моделирования диэлектрического резонатора с использованием метода поперечного резонанса // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин". Нижний Новгород. 2007. С.27-28.
7. Львова И.А. Исследование параметров преобразователя перемещения на диэлектрическом резонаторе // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин". Нижний Новгород. 2007. С.27-28.
8. Львова И.А. Анализ возможностей использования мод «шепчущей галереи» для измерения диэлектрических параметров материалов с низкими потерями // Перспективные проекты и технологии. Вып.2. 2008. С.32-41.
9. Васильев Е.П., Жулев В.И., Львова И.А. Проектирование измерительных преобразователей механических величин на объемных диэлектрических резонаторах // Датчики и системы. № 4 (119). 2009. С.9-12.
10. Львова И.А. Моделирование колебательной системы на основе диэлектрического резонатора для микроволновых измерителей физических величин // Вестник РГРТУ. Вып. 32. №2. Рязань. 2010. С.88-93.
11. Львова И.А. Исследование параметров колебательных систем для микроволновых измерительных преобразователей // Вестник РГРТУ. Вып. 36. №2. Рязань. 2011. С.120-122.

Львова Ирина Александровна

**ПЕРВИЧНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.05.2011. Формат бумаги 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.