Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национально исследовательский университет)
Факультет «Компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники»
Кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ.
Заведующий кафедрой
_____ Н.И. Войтович
10 июня 2016 года

Резонаторная антенна с оптимальной частично прозрачной стенкой

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-211000.2016.886 ПЗ ВКР

Руководитель проекта
Старший преподаватель
_____ В.А. Бухарин
9 июня 2016 года

Автор ВКР
студент группы КТУР–411
_____ М.В. Назаров
9 июня 2016 года

Нормоконтролёр
_____ Ю.А. Ташкинов
10 июня 2016 года

Челябинск 2016

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет КТУР
Кафедра КИПР
Специальность 211000.62

Утверждаю
Зав. кафедрой
Н. И. Войтович
«23» 02 2016 г.

ЗАДАНИЕ

по ВКР студента группы КТУР-411
Назарова Максима Валерьевича

1 Тема ВКР: Резонаторная антенна с оптимальной частично прозрачной стенкой.

2 Дата защиты ВКР в ГАК

Дата представления завершенной ВКР на кафедру 14 июня 2016 года.

Дата нормоконтроля 10 июня 2016 года.

3 Исходные данные к ВКР

3.1. Назначение: Резонаторная антенна с оптимальной частично прозрачной стенкой (далее резонаторная антенна) предназначена для использования в составе ГРМ радиомаячных систем посадки метрового диапазона волн ILS, обеспечивающих параметры по нормам ИКАО для РМС III категории, в том числе на аэродромах с высоким уровнем снежного покрова и на аэродромах со сложным рельефом местности.

3.2. Рабочая полоса частот 329…335 МГц.

3.3. Поляризация линейная горизонтальная.

3.4. Ширина амплитудной диаграммы направленности по уровню половинной мощности:

- в плоскости вектора напряжённости электрического поля не более 36°;
- в плоскости вектора напряжённости магнитного поля не более 40°.

3.5. Уровень боковых и задних лепестков не более 20 дБ.

3.6. Согласование: КСВН не более 1,2.

3.7. Входное сопротивление 50 Ом.

3.8. Максимальная входная мощность 500 Вт.

3.9. Требования к внешним воздействиям:

- ветровая нагрузка: максимальная скорость воздушного потока до 50 м/с.
- механическая синусоидальная вибрация с амплитудой ускорения 2 g на одной частоте из диапазона частот 20 до 40 Гц;
- атмосферное давление от $6 \cdot 10^4$ Па до $9 \cdot 10^4$ Па;
- повышенная и предельная температура окружающей среды 50°С;
- пониженная и предельная температура окружающей среды минус 50°С;
- относительная влажность воздуха 98% при температуре 25 °С;
- резонаторная антенна должна обеспечивать стабильные характеристики при выпадении дождя, града, сухого и мокрого снега, обледенении и налипании снега.

4 Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов).

4.10. Введение.

4.11. Анализ технического задания.

4.12. Обзор литературы и анализ состояния вопроса.

4.13. Постановка задачи исследования.

4.14. Расчётно-теоретический раздел.

4.14.1. Обзор САПР СВЧ.

4.14.2. Физическая модель резонаторной антенны. Формулировка математической модели, выбор и обоснование численного метода решения.

4.14.3. Численное моделирование резонаторной антенны.

4.15. Конструкторско-технологический раздел.

4.15.1. Разработка реальной конструкции резонаторной антенны по заданным параметрам.

4.16. Исследовательский раздел.

4.16.1. Исследование влияния параметров элементов резонаторной антенны на основные характеристики антенны.

4.16.2. Оценка влияния внешних воздействий на прочностные характеристики резонаторной антенны.

4.16.3. Анализ результатов и обобщение полученных зависимостей.

4.17. Заключение.

4.18. Список литературы.

4.19. Приложения.

5 Перечень графического материала (формат А1)

5.1. Сборочный чертёж резонаторной антенны – 1 л.

5.2. Плакат с геометрией и физической моделью резонаторной антенны – 1 л.

5.3. Плакат с амплитудными диаграммами направленности в плоскости вектора напряжённости электрического поля и в плоскости вектора напряжённости магнитного поля в рабочем диапазоне частот – 1 л.

5.4. Плакат с частотной зависимостью коэффициента направленного действия в рабочем диапазоне частот – 1 л.

5.5. Плакат с изображением напряжённо-деформированного состояния резонаторной антенны в рабочем диапазоне температур и скоростей воздушных потоков – 1 л.

7 Консультанты по разделам проекта

7.1. Расчётно-теоретический раздел: Войтович Н. И.

7.2. Конструкторско-технологический раздел: Кудрин Л.П.

Дата выдачи задания 5 февраля 2016 г.

Руководитель ВКР_____Бухарин В.А.

Задание принял к исполнению_____Назаров М.В.

ГРАФИК РАБОТЫ

по ВКР студента группы КТУР-411 Назарова Максима Валерьевича

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
1. Выдача задания ВКР	5 февраля	
2. Утверждение задания ВКР на кафедре	25 февраля	
3. Обзор литературы и анализ прототипов резонаторной антенны	29 февраля	
4. Обзор САПР, выбор и обоснование методов численного решения	7 марта	
5. Численное электродинамическое моделирование резонаторной антенны	21 марта	
6. Исследование влияния параметров элементов резонаторной антенны и внешних факторов на основные характеристики антенны	31 марта	
7. Разработка конструкции резонаторной антенны по результатам исследований	8 апреля	
8. Оформление основных разделов пояснительной записки ВКР	18 апреля	
9. Полностью готовая ВКР в черновом варианте	22 апреля	
10. Оформление графических материалов ВКР	29 апреля	
11. Чистовое оформление пояснительной записки ВКР	4 июня	
12. Нормоконтроль	10 июня	
13. Утверждение завершенной ВКР заведующим кафедрой	14 июня	

Заведующий кафедрой КиПР Н.И. Войтович

Руководитель проекта В.А. Бухарин

Студент М.В. Назаров

АННОТАЦИЯ

Назаров М. В. Резонаторная антенна с оптимальной частично прозрачной стенкой. – Челябинск: ЮУрГУ, КТУР; 2016, 51 с. 53 ил., библиогр. список – 24 наим., 2 прил., 5 листов плакатов ф. А1.

Проведено исследование влияния параметров частично прозрачной стенки на основные характеристики резонаторной антенны. Осуществлён параметрический синтез апертуры антенны, разработана конструкция и проведены исследования устойчивости характеристик антенны на внешнее воздействие факторов окружающей среды.

Выполнены численные эксперименты для проверки соответствия полученных электродинамических характеристик резонаторной антенны в заданном частотном и температурном диапазонах при воздействии внешних факторов окружающей среды. Численное моделирование осуществлялось в программном пакете ANSYS.

Требования технического задания были полностью выполнены.

					211000.2016.886.00.00 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Назаров М.В.		08.09.16	Резонаторная антенна с оптимальной частично прозрачной стенкой	Лит.	Лист 6 / Листов 51
Провер.		Бухарин В.А.		9.06.16			
Н. контр.		Ташкинов Ю.А.		9.06.16		ЮУрГУ Кафедра КиПР	
Утверд.		Войтович Н.И.					

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....8

1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ.....9
2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....10
3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....13
4 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....14
4.1 Обзор САПР СВЧ.....14
4.2 Физическая модель резонаторной антенны. Формулировка математической модели, выбор и обоснование численного метода решения.....15
4.3 Численное моделирование резонаторной антенны.....22
4.4 Анализ результатов и обобщение полученных зависимостей.....31
5 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....32
5.1 Разработка реальной конструкции резонаторной антенны по заданным параметрам.....33
6 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ.....35
6.1 Оценка влияния внешних воздействий на прочностные характеристики резонаторной антенны.....35
6.2 Анализ результатов и обобщение полученных зависимостей.....46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....48

ПРИЛОЖЕНИЯ
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЁЖ.....50
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПЕЦИФИКАЦИЯ.....51

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в электронике основной тенденцией является миниатюризация. Один из способов достичь уменьшения размеров антенны, сохранив при этом её характеристики, является использование объёмных резонаторов. Использование явления резонанса позволяет создавать антенны низкопрофильной конструкции, занимающей меньше места, чем традиционные схемы.

Ещё одним преимуществом резонаторных антенн является их простота. Так как отсутствует необходимость в использовании разветвителей мощности и передающих линий. Возбуждение осуществляется в одной точке.

Резонаторные антенны обладают высоким КПД и имеют узконаправленную диаграмму направленности (ДН) с низким уровнем боковых лепестков.

Из особенностей резонаторной антенны стоит отметить узкую полосу пропускания, в 3% и высокие требования к точности изготовления.

В выпускной квалификационной работе (ВКР) исследуется влияние частично прозрачной стенки на диаграмму направленности (ДН) резонаторной антенны (РА). Амплитудно-фазовое распределение (АФР) в апертуре антенны формируется путём изменения конфигурации отверстий в частично прозрачной стенке излучающей системы.

Созданная конструкция была проверена на устойчивость к воздействию внешних факторов окружающей среды. Проведено подробное аэрогидродинамическое исследование, включающее в себя обдув РА воздушным потоком под разными углами. Проверена устойчивость электродинамических характеристик РА в широком диапазоне температур.

1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

В ходе выпускной квалификационной работы необходимо провести параметрический синтез апертуры РА, исследование влияния различных элементов РА на согласование и форму диаграммы направленности (ДН) и проверить устойчивость конструкции к воздействию внешних факторов окружающей среды. В качестве прототипа РА в работе используется антенна, разработанная на кафедре КиПР.

Конструктивно РА представляет собой цилиндрический высокодобротный резонатор, одна из сторон которого является апертурой антенны в виде частично прозрачной поверхности (ЧПП). Эта поверхность выполнена в виде набора круглых отверстий различного диаметра, прорезанных в металлическом листе. Частично прозрачные поверхности могут выполняться в виде решёток и диэлектрических пластин, частично покрытых металлом [1].

Основной задачей, при создании любой антенны, является обеспечение необходимой формы ДН. Возбуждение токов на внешней поверхности апертуры РА реализуется посредством изменения диаметров отверстий в ЧПП. Форма амплитудного распределения зависит от коэффициента прозрачности ЧПП, и структуры поля во внутренней области резонатора.

ЧПП возбуждается стоячей волной основного колебания объёмного резонатора H_{111}. Поэтому фазовое распределение в апертуре равномерно, а амплитудное распределение в плоскости вектора Е постоянно, в плоскости Н спадающее к краям. Амплитудное распределение можно представить в виде формулы (1).

$$\frac{E}{E_0} = \left[1 - x^2\right]^n. \qquad (1)$$

где E – напряжённость поля в произвольной точке;

E_0 – максимальная напряжённость поля;

x – нормированная координата от центра антенны;

n – коэффициент характеризующий форму амплитудного распределения.

Рисунок 1.1 – Нормированное амплитудное распределение

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

2.1. Металлическая резонаторная антенна с высокоэффективной апертурой (FPCA) [3]

Данная РА представляет собой коробчатый резонатор, возбуждаемый патч антенной. Частично прозрачная стенка реализуется посредством одинаковых, крестообразных отверстий (рисунок 2.1). Размеры резонатора 2,86l ґ 2,86l . Центральная частота 14,92 ГГц.

Рисунок 2.1 – Внешний вид резонаторной антенны и её характеристики

2.2. Коробчатая РА. Частично прозрачная стенка с прямоугольными вырезами [4]

Данная РА представляет собой низкопрофильную антенну, состоящую из коробчатого резонатора. Частично прозрачной поверхностью этой антенны является металлическая пластина с квадратными отверстиями. Внешний вид и форма ДН изображены на рисунке 2.2.

Рисунок 2.2 – Внешний вид резонаторной антенны и форма ДН

2.3. РА с коробчатым и цилиндрическим резонаторами, возбуждаемая волноводом. Частично прозрачная стенка представлена решёткой или крестообразными отверстиями [5]

РА состоящая из нескольких типов резонаторов, имеет довольно сложную конфигурацию внутренней полости. Размер апертуры 2,5l ґ 2,5l , рабочая частота 2,5 ГГц. Внешний вид и форма ДН изображены на рисунках 2.3 и 2.4.

Рисунок 2.3 – Внешний вид резонаторной антенны

Рисунок 2.4 – ДН резонаторной антенны

2.4. РА с круглым резонатором [6]

Низкопрофильная резонаторная антенна X–диапазона (8...12 ГГц). Конструктивно состоит из двух цилиндрических резонаторов различного диаметра. Частично прозрачная стенка выполнена в виде множества круглых отверстий на металлическом листе. Конструктивно наиболее близка к РА, рассматриваемой в данной работе. Чертёж антенны и её характеристики изображены на рисунках 2.5 и 2.6.

Рисунок 2.5 – Чертёж резонаторной антенны

Рисунок 2.6 – ДН резонаторной антенны

Первые три варианта РА основаны на коробчатом резонаторе, частично прозрачная стенка у них имеет прямоугольные или крестообразные отверстия. Четвёртая РА [6] основана на паре цилиндрических резонаторов, обладает наиболее узкой ДН из всех рассматриваемых.

Все рассмотренные РА предназначены для работы в СВЧ диапазонах, этим объясняется их малые размеры.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно техническому заданию (ТЗ) необходимо разработать конструкцию резонаторной антенны с оптимальной частично прозрачной стенкой.

По ТЗ антенна должна иметь следующие характеристики:

1. Линейную горизонтальную поляризацию.
2. Ширину амплитудной ДН по уровню половинной мощности:
   - 2.1. В плоскости вектора напряжённости электрического поля не более 36°;
   - 2.2. В плоскости вектора напряжённости магнитного поля не более 40°.
3. Уровень боковых и задних лепестков должен составлять не более 20 дБ.
4. КСВН не более 1,2.
5. Входное сопротивление 50 Ом.
6. Максимальная мощность 500 Вт.
7. Требования к внешним воздействиям:
   - 7.1. Ветровая нагрузка: максимальная скорость воздушного потока до 50 м/с;
   - 7.2. Механическая синусоидальная вибрация с амплитудой ускорения 2 g на одной частоте из диапазона частот 20 до 40 Гц;
   - 7.3. Атмосферное давление от $6 \cdot 10^4$ Па до $9 \cdot 10^4$ Па;
   - 7.4. Повышенная и предельная температура окружающей среды 50°С;
   - 7.5. Пониженная и предельная температура окружающей среды минус 50°С;
   - 7.6. Относительная влажность воздуха 98% при температуре 25 °С;
   - 7.7. Резонаторная антенна должна обеспечивать стабильные характеристики при выпадении дождя, града, сухого и мокрого снега, обледенении и налипании снега.

4. РАСЧЁТНО-ТЕОРИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

4.1. Обзор САПР СВЧ

ANSYS HFSS (High Frequency Structural Simulator) – программа трехмерного моделирования электромагнитного поля методом конечных элементов. Выпускаемая компанией ANSYS.inc.

Это один из нескольких коммерческих инструментов, используемых для разработки формы антенн и сложных элементов ВЧ/СВЧ-схем, включая фильтры, линии передач и пр. HFSS используется при проектировании встроенных в кристалл пассивных элементов, корпусов интегральных схем, разводки печатных плат и биомедицинских устройств [7].

Основу решения трехмерных и двумерных задач электродинамики в HFSS составляет метод конечных элементов (МКЭ). Метод заключается в разбиении пространства на простейшие элементы – тетраэдры. Размер тетраэдров выбирается как можно меньше, чтобы поле в его пределах можно было описать простыми уравнениями с неизвестными коэффициентами. Коэффициенты находятся из уравнений Максвелла (2) и граничных условий. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно этих коэффициентов. Решение СЛАУ легко находится численным методом на ЭВМ [8].

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» имеет в своём распоряжении лицензионную версию программного продукта ANSYS, установленную на суперкомпьютере.

CST MICROWAVE STUDIO (MWS) – это программный продукт, предназначенный для трёхмерного электромагнитного моделирования высокочастотных устройств. Численные методы, используемые для решения этой программой, обладают высокой производительностью и эффективностью.

CST MWS позволяет проводить быстрый и точный анализ ВЧ и СВЧ устройств, например, антенн, фильтров, ответвителей, планарных и многослойных структур и т.д [10].

CST поддерживает метод конечных интегралов (FIT) – метод T. Weiland [12]. Этот метод используется интегральный оператор, он, в отличии от дифференциального оператора, ограничен, это даёт лучшую сходимость задачи. Этот метод подробно рассмотрен в пункте 4.2 данной работы [9].

XFDTD – программный продукт для решения электродинамических задач метод конечных разностей во временной области FDTD. Используется для решения системы уравнений Максвелла во временной области. В этом методе сложные уравнения преобразуются в форму, позволяющую решать их с применением ЭВМ. Метод FDTD является итерационным, значение компонент поля, на каждом шаге, находятся опираясь на предыдущий шаг [11].

4.2. Физическая модель резонаторной антенны. Формулировка математической модели, выбор и обоснование численного метода решения

Для проведения параметрического синтеза апертуры была построена физическая модель РА, она изображена на рисунке 4.1 и 4.2. Необходимыми условиями физического моделирования являются геометрическое подобие и физическое подобие модели: в пространственно-временных точках значения переменных величин, характеризующих явления для реального устройства, должны быть пропорциональны значениям тех же величин для модели.

При построении физической модели РА была проведена работа по упрощению реальной конструкции: были убраны все заклёпочные и болтовые соединения, а так же элементы конструкции, не оказывающие влияние на распределение полей в внутри антенны.

Реальные материалы, из которых изготовлена антенна, были заменены на идеализированные модели. Алюминиевый сплав, основной материал резонатора, заменяем на идеальный проводник электрического тока (PEC). Диэлектрические шайбы, поддерживающие центральную жилу коаксиального возбудителя, и стеклопластиковую проставку между стенками резонатора, заменяем на идеальный диэлектрик с соответствующей диэлектрической проницаемостью.

Рисунок 4.1 – Физическая модель резонаторной антенны

Рисунок 4.2 – Физическая модель резонаторной антенны в сечении

Для получения количественных характеристик необходимо перейти от физической модели к математической. Математическая модель – это набор уравнений, описывающих требуемое явление, в данном случае электродинамическую систему. Краевая задача представляет собой пространственно-временную систему уравнений Максвелла (2) с заданными начальными и граничными условиями: отсутствие сигнала в момент времени $t = 0$ и $E_t = 0$. Задача решается в строгой дифракционной постановке.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= \rho; \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0; \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \end{aligned} \qquad (2)$$

где ρ – плотность стороннего электрического заряда;

$\vec{B}$ – магнитная индукция;

$\vec{E}$ – напряжённость электрического поля;

$\vec{H}$ – напряжённость магнитного поля;

$\vec{j}$ – плотность тока проводимости;

$\vec{D}$ – электрическая индукция.

Однако, для данной задачи не представляется возможным получить полное аналитическое решение, поэтому поиск решения будет осуществляться численными методами. Система уравнений Максвелла, окружающее пространство, начальные и граничные условия представляют собой непрерывный континуум. При численном решении задачу в строгой постановке необходимо редуцировать к сеточной модели. Существует много методов редуцирующих краевую задачу к сеточной модели: проекционный, вариационный, метод наименьших квадратов и другие. Наиболее эффективным, современным методом является метод конечных интегралов.

Сеточная модель РА представлена на рисунках 4.3, 4.4 и 4.5.

Рисунок 4.3 – Сетка в плоскости вектора H

Рисунок 4.4 – Сетка в плоскости вектора E

При наложении сетки особое внимание стоит уделить коаксиальному возбудителю (см. рисунок 4.5).

Рисунок 4.5 – Сетка в сечении коаксиального возбудителя

Для решения данной использовался метод конечных интегралов (FIT). Этот метод впервые был предложен T. Weiland в 1976 году [12]. В этом методе используется система уравнений Максвелла в пространственно-временной интегральной форме (3).

$$\oint_{\partial A} \vec{H}\,d\vec{S} = \int_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \right) d\vec{A};$$

$$\oint_{\partial A} \vec{E}\,d\vec{S} = -\int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{A}; \qquad (3)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{D}\,d\vec{A} = \int_V \rho\,dV;$$

$$\oint_{\partial V} \vec{B}\,d\vec{A} = 0;$$

где $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r},t)$ – вектор напряжённости электрического поля;

$\vec{r}$ – радиус-вектор в точку наблюдения;

t – временная координата;

$\vec{H} = \vec{H}(\vec{r},t)$ – вектор напряжённости магнитного поля;

$\vec{B} = \vec{B}(\vec{r},t)$ – вектор индукции магнитного поля;

$\vec{D} = \vec{D}(\vec{r},t)$ – вектор индукции электрического поля;

$\vec{j} = \vec{j}(\vec{r},t)$ – объёмная плотность электрического тока;

$r = r(\vec{r},t)$ – объёмная плотность электрического заряда;

A – поверхность, опирающаяся на замкнутый контур $\P A$;

V – объём, ограниченный замкнутой поверхностью $\P V$.

Для численного решения системы уравнений определяется конечная область вычислений и строится сетка. В результате создания сетки область разбивается на множество малых элементов, или ячеек сетки. Графически такое разбиение представлено на рисунке 4.6.

Рисунок 4.6 – Дискретизация рабочей области: e_i – напряжённость электрического поля; b_i – индукция магнитного поля; h_i – напряжённость магнитного поля; d_j – индукция электрического поля (электрическое смещение).

Пространственная дискретизация уравнений Максвелла выполняется на двух ортогональных системах сеток. Одна сетка сдвинута относительно другой на половину шага дискретизации по каждой координате (см. рисунок 4.6). Напряжённость электрического поля e и индукция магнитного поля b расположены на основной сетке G. Электрическое смещение d, так же как и напряжённость магнитного поля **h** определены на второй сетке $\tilde{G}$ (обозначена значком тильда).

$$\oint_{\partial A_n} \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_{A_n} \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{Ce} = -\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{b}. \tag{4}$$

Уравнения Максвелла сформулированы для каждой грани ячейки отдельно, (см. рисунок 4.6). По закону Фарадея, интеграл по замкнутому контуру в левой части второго уравнения Максвелла может быть представлен в виде суммы четырёх напряжений сетки. Производная по времени от магнитного потока, определенного на внутренней грани ячейки, представляет правую часть второго уравнения Максвелла. В итоге, повторяя эту процедуру для всех возможных граней ячейки, получаем правило вычисления в матричной форме, представленное в виде топологической матрицы $\mathbf{C}$ как дискретного эквивалента ротора (рисунок 4.7):

Рисунок 4.7 – Редукция второго уравнения Максвелла к матричному уравнению

Применение рассмотренной схемы к закону Ампера (первому уравнению Максвелла) на второй сетке определяет соответствующий дискретный аналог оператора ротора $\tilde{\mathbf{C}}$. Дискретизация остальных уравнений приводит к дискретным эквивалентам операторов дивергенции S и $\tilde{S}$, принадлежащих к первой и второй сеткам, соответственно. Дискретные матричные операторы состоят из элементов «0», «1» и «-1», что составляет лишь топологическую информацию. В итоге получаем полную дискретизированную систему уравнений Максвелла (MGE):

$$\mathbf{Ce} = -\frac{d}{dt}\mathbf{b}, \qquad \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} = \frac{d}{dt}\mathbf{d} + \mathbf{j},$$
$$\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q}, \qquad \mathbf{Sb} = \mathbf{0}. \tag{5}$$

Аналогия между системой уравнений Максвелла в интегральной форме и MGE очевидна. Поразительной особенностью FIT является сохранение важного свойства непрерывности операторов градиента, ротора и дивергенции на поверхности граней сетки:

$$\mathbf{SC} = \tilde{\mathbf{S}}\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{0} \quad \text{Ы} \quad \mathbf{div\,rot} \in \mathbf{0}$$
$$\mathbf{C}\tilde{\mathbf{S}}^{T} = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{S}^{T} = \mathbf{0} \quad \text{Ы} \quad \mathbf{rot\,grad} \in \mathbf{0}. \tag{6}$$

При определении зависимости между напряжённостью и индукцией полей используют материальные уравнения. Интегральные соотношения аппроксимируются по плоскостям и объёму ячейки области. Следовательно, результирующие коэффициенты зависят от среднего значения параметров материала и пространственной дискретизации области:

$$\begin{aligned} \vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \quad & \mathbf{d} = \mathbf{M}_{\varepsilon}\mathbf{e}; \\ \vec{B} = \mu; \quad \Rightarrow \quad & \mathbf{b} = \mathbf{M}_{\mu}\mathbf{h}; \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}s; \quad & \mathbf{j} = \mathbf{M}_{\sigma} e + \mathbf{j}_S. \end{aligned} \tag{7}$$

Тот факт, что топологическая и метрическая информация, находятся в разных уравнениях, имеет важные теоретические, численные и алгоритмические результаты [13].

Разностные уравнения определяют электрическое и магнитное поля в данный момент времени на основании известных значений полей в предыдущие моменты времени при заданных начальных и граничных условиях. Вычислительная процедура представляет собой последовательный эволюционный процесс, развёрнутый во времени.

Известно, что алгоритмы, основанные на пространственно-временной дискретизации, обладают численной неустойчивостью. Однако, основываясь на MGE, можно показать, что метод конечных интегралов не имеет таких проблем [13]. Алгебраические свойства дискретной формулировки электромагнитного поля MGE позволяют использовать законы сохранения энергии и заряда, дают стабильный алгоритм расчёта во временной области.

4.3. Численное моделирование резонаторной антенны

Для удовлетворения требованиям технического задания по ширине ДН, уровню боковых лепестков и согласованию, был проведён параметрический синтез. Требования по форме ДН выполнялись посредством изменения диаметров излучающих отверстий. А согласование резонаторной антенны по входу достигалось изменением высоты цилиндрического резонатора и изменением коэффициента связи между резонаторами.

Основой для начала синтеза послужил один из вариантов РА, разработанной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. По договору между Министерством образования и науки Российской Федерации и Открытым акционерным обществом «Челябинский радиозавод «Полет» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) [14, с. 749]. Внешний вид этой РА показан на рисунке 4.8.

При анализе исходной РА было принято решение увеличить диаметр излучающей апертуры, с 1,56λ до 2λ. И была добавлена третья окружность с отверстиями. Исходная и полученная апертуры изображены на рисунке рисунок 4.9.

Рисунок 4.8 – Внешний вид резонаторной антенны без обтекателя

Упрощённая конструкция РА, созданной на данном этапе представлена на рисунке 4.10. Увеличение диаметра РА позволяет добиться достаточно низкого уровня боковых лепестков на ДН. Это достигается благодаря возможности более гибко изменять форму амплитудного распределения на поверхности апертуры.

Рисунок 4.9 – Апертура РА, исходный и окончательный варианты

Рисунок 4.10 – Упрощённая конструкция РА: 1 – частично прозрачная стенка; 2 – обтекатель; 3 – коаксиально-щелевой резонатор; 4 – боковая стенка (обечайка); 5 – задняя стенка; 6 – опора РА.

Работа РА основана на прохождении электромагнитной волны через частично прозрачную стенку. Волна в резонаторе представляет собой основную моду колебания H_{111}, которая возбуждается коаксиально-щелевым резонатором.

Согласно ТЗ входное сопротивление 50 Ом, максимальная входная мощность 500 Вт. Коаксиально щелевой резонатор основан на коаксиальной линии передачи (КЛП). Для нормального функционирования РА, необходимо, чтобы напряжённость электрического поля в КЛП не превышала $E_{кр} = 3 \cdot 10^6$ В/м. Для проверки этого был произведён расчёт. Максимальная мощность $P_{кр}$, которую можно передать через коаксиальный волновод, находится по формуле [15]:

$$P_{кр} = \frac{E_{кр}^2}{240\pi} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{2\ln(D/d)}{(D/d)^2}. \quad (8)$$

где $E_{кр}$ – критическая напряжённость поля в воздухе;

D – внутренний диаметр внешнего проводника, $D = 13{,}82$ мм;

d – наружный диаметр внутреннего проводника, $d = 6$ мм.

Полученная, после подстановки числовых значений в формулу (8), величина $P_{кр} = 563196$ Вт. Она превышает заданную более, чем на три порядка.

Следующей была проверена щель в коаксиально-щелевом резонаторе, эта часть возбудителя показана на рисунке 4.11. Ширина щели составляет $L = 5$ мм. В САПР на ней была измерена напряжённость электрического поля, она составила $E = 2{,}835 \cdot 10^6$ В/м. Это меньше, чем $E_{кр}$.

Рисунок 4.11 – Щель

Для составления общей картины влияния параметров частично-прозрачной стенки на форму ДН и согласование резонаторной антенны, были проведены серии расчётов. Изменениям одновременно подвергались все отверстия на одной

окружности (см. рисунок 4.12). Изменения формы ДН, в плоскостях E и H, представлены на рисунках 4.13 – 4.16.

Рисунок 4.12 – Расположение отверстий в апертуре РА

Рисунок 4.13 – ДН для центрального отверстия в плоскостях вектора E и H

Рисунок 4.14 – ДН для отверстий, расположенных на первой, от центра, окружности в плоскостях вектора E и H

Рисунок 4.15 – ДН для отверстий, расположенных на второй, от центра, окружности в плоскостях вектора E и H

Рисунок 4.16 – ДН для отверстий, расположенных на третьей, от центра, окружности в плоскостях вектора E и H

Для исследования влияния элементов апертуры на согласование РА, была рассмотрена частотная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты, для различных отверстий. Зависимости изображены на рисунках 4.17 – 4.20, рабочий диапазон частот выделен вертикальными оранжевыми линиями. Конфигурация отверстий показана на рисунке 4.12.

Рисунок 4.17 – Частотная зависимость КСВ от диаметра центрального отверстия

Рисунок 4.18 – Частотная зависимость согласования от диаметра отверстий, расположенных на первой, от центра антенны, окружности

Рисунок 4.19 – Частотная зависимость согласования от диаметра отверстий, расположенных на второй, от центра антенны, окружности

Рисунок 4.20 – Частотная зависимость согласования от диаметра отверстий, расположенных на третьей, от центра антенны, окружности

После анализа зависимостей (см. рисунки 4.13 – 4.20) была выбрана конфигурация отверстий, которая наиболее полно удовлетворяет условиям ТЗ.

Следующий этап параметрического синтеза заключается в согласовании резонаторной антенны. Было проведено исследование влияния сдвига короткозамыкателя вдоль оси КЛП. Сам короткозамыкатель расположен внутри коаксиально-щелевого возбудителя и представлен на рисунке 4.21.

Рисунок 4.21 – Место расположения короткозамыкателя

Для получения оптимального коэффициента связи резонаторов, положение короткозамыкателя варьировалось в широких пределах. Результаты расчётов представлены на рисунке 4.22.

Рисунок 4.22 – Частотная зависимость КСВ от сдвига короткозамыкателя

По графику (рисунок 4.22) видно, что положение короткозамыкателя существенно влияет на согласование. Уменьшение величины сдвига А, приводит к сужению рабочей полосы пропускания РА, но улучшает согласование. При увеличении А, происходит ухудшению согласования, но увеличивает ширину полосы пропускания.

При работе резонаторной антенны, в цилиндрическом резонаторе возникает стоячая волна, поэтому следующим этапом было проведено исследование влияния высоты цилиндрического резонатора (рисунок 4.23) на согласование антенны. результаты приведены на рисунке 4.24.

Рисунок 4.23 – Высота резонатора

Рисунок 4.24 – Частотная зависимость КСВ от высоты резонатора

После завершения процесса численного моделирования и анализа данных, были точно определены геометрические размеры, которые должна иметь резонаторная антенна. Можно переходить к созданию конструкции РА.

4.4. Анализ результатов и обобщение полученных зависимостей

Было исследовано влияние расположения отверстий в апертуре на ДН и согласование. Достигнуты оптимальные электродинамические характеристики резонаторной антенны (рисунки 4.25 и 4.26). В рабочем диапазоне частот 0,329…0,335 ГГц КСВ не более 1,2. Ширина ДН в плоскости вектора Е равна 35^0, ширина ДН в плоскости вектора Н равна $38{,}3^0$. Уровень боковых лепестков не более –21,3 дБ. По результатам исследования можно судить о полном соответствии полученной конструкции условиям ТЗ.

Рисунок 4.25 – Итоговый КНД и итоговый КСВ резонаторной антенны

Рисунок 4.26 – Нормированная ДН в рабочем диапазоне частот

5. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

5.1. Разработка реальной конструкции резонаторной антенны

Рисунок 5.1 – Внешний и внутренний виды антенны, без обтекателя: 1 – апертура; 2 – обечайка; 3 – опора РА; 4 – задняя стенка; 5 – коаксиально-щелевой возбудитель.

Для пластины с отверстиями и задней стенки был выбран лист толщиной 3мм из сплава Д16 ГОСТ 21631-76 [16]. Это термически упрочняемый сплав системы Al - Cu - Mg обладающий повышенной коррозионной стойкостью, широким диапазоном рабочих температур $-196...450°C$, с температурным коэффициентом линейного расширения $23\cdot10^{6}1/K$ [17].

Для обечайки используется лист толщиной 3мм из сплава АМг6 ГОСТ 21631-76. Это термически не упрочняемый сплав с высокими пластическими свойствами и хорошей свариваемостью, температурный коэффициент линейного расширения $24,7\cdot10^{6}1/K$ [17]. Так же из этого сплава изготавливаются: угловой профиль ГОСТ 8617-81 [18]; Трубки коаксиального резонатора ОСТ 1.92096-83 [19].

Обтекатель резонаторной антенны и диэлектрическая проставка изготавливаются из стеклопластика на основе стеклоткани ГОСТ 19170-2001 [20]. Внешний вид резонаторной антенны без обтекателя представлен на рисунке 5.1. РА предполагает крепление на раме.

Основная часть антенны – объёмный резонатор (рисунок 5.2), он представляет собой сборную конструкцию состоящую из: двух пластин, пункт 4 рисунок 5.2, одна из которых является полупрозрачной, между которыми находится обечайка, пункт 2 рисунок 5.2. Пластины и обечайка крепятся друг к другу двумя угловыми профилями, пункт 3 рисунок 5.2, на заклёпки ГОСТ 10299–80 [21], пункт 1 рисунок 5.2, и ГОСТ 10300–80 [22], пункт 5 рисунок 5.2. Со стороны апертуры на антенну крепиться стеклопластиковый обтекатель, пункт 6 рисунок 5.2, он служит для защиты от ветра и осадков.

Рисунок 5.2 – Фрагмент конструкции объёмного резонатора

Для выдерживания расстояния между торцами резонатора, внутрь помещается стеклопластиковая проставка в форме тонкостенного усечённого конуса (рисунок 5.3). Она носит название – опора РА.

Рисунок 5.3 – Стеклопластиковая проставка

Крепление опоры РА, пункт 1 рисунок 5.4, к стенкам резонатора, пункт 2 рисунок 5.4, осуществляется винтовыми соединениями пункты 3–6 рисунок 5.4.

Рисунок 5.4 – Способ крепления проставки

Для исключения температурных деформаций, жёсткое закрепление коаксиального возбудителя осуществляется только с одной стороны цилиндрического резонатора, что позволяет ему свободно смещаться не изгибаясь (рисунок 5.5).

Рисунок 5.5 – Способ крепления коаксиального возбудителя

Для выполнения пункта 7.3 ТЗ конструкция резонаторной антенны выполняется без герметично закрытых полостей.

6. ИСЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

6.1. Оценка влияния внешних воздействий на прочностные характеристики резонаторной антенны

В процессе эксплуатации резонаторная антенна подвержена влиянию факторов окружающей среды. Для учёта этих влияний было произведено компьютерное моделирование. Для более наглядного представления деформаций конструкции резонаторной антенны, на всех рисунках этого раздела, деформации увеличены.

6.2.1. Воздействие температуры окружающего воздуха на согласование резонаторной антенны

Резонаторная антенна, как резонатор с высокой добротностью, очень чувствительна к геометрическим размерам самого резонатора. Даже незначительное изменение размера может вызвать резкое ухудшение электродинамических характеристик резонаторной антенны.

Для повышения устойчивости к колебаниям температуры в конструкцию резонаторной антенны вводят стеклопластиковую проставку (рисунок 5.4, 1). Она, за счёт более низкого теплового коэффициента линейного расширения, выдерживает расстояние между торцевыми стенками цилиндрического резонатора.

Для удовлетворения пунктам 7.4 и 7.5 технического задания проведём компьютерное моделирование резонаторной антенны при температуре T_A, равной 50°С, ниже и выше нуля. Граничные условия: равномерная температура всей резонаторной антенны и коэффициент линейного расширения материалов (таблица 6.3).

Таблица 6.3 Параметры материалов

Название детали	Материал	ТКР, $\alpha \cdot 10^{-6}$
Проставка резонатора	Стеклопластик	4
Коаксиальный возбудитель и обечайка	АМг6	24,7
Торцевые пластины	Д16	23

Рисунок 6.1 – Деформирование апертуры резонаторной антенны при охлаждении T_A = - 50°С

Рисунок 6.2 – Деформирование апертуры резонаторной антенны при нагреве $T_A = 50°C$

Рисунок 6.3 – КСВ резонаторной антенны при разных температурах

При воздействии пониженных температур (рисунок 6.1) происходит смещение центральной части апертуры внутрь цилиндрического резонатора, так же происходит уменьшение диаметра самого резонатора. Эти деформации оказывают влияние на согласование резонаторной антенны – смещая КСВ вверх по частотному диапазону (рисунок 6.3).

Повышенная температура (рисунок 6.2) вызывает противоположные деформации – центральная часть апертуры смещается наружу, а КСВ вниз, по частотному диапазону (рисунок 6.3).

После анализа результатов моделирования можно сделать вывод о полном удовлетворении условий, заданных в техническом задании.

6.2.1. Воздействие ветра на резонаторную антенну с обтекателем и без обтекателя

В процессе эксплуатации резонаторная антенна находиться на открытом пространстве, на некоторой высоте от земли, такое расположение характеризуется определёнными ветровыми нагрузками [23]. В техническом задании, пункт 7.1, указана максимальная скорость ветра 50 м/с. Для этой скорости и будет произведён расчёт.

Используя габаритные размеры резонаторной антенны (рисунок 6.4) и параметры воздуха (таблица 6.4) был проведён аналитический расчёт, по методике, описанной в книге [24] и выполнено численное аэрогидродинамическое моделирование.

Рисунок 6.4 – Габаритные размеры резонаторной антенны

Таблица 6.4 Исходные данные для расчёта

Диаметр резонаторной антенны, мм	1846
Высота резонаторной антенны, мм	447
Температура воздуха, °С	25
Скорость ветра, n, м/с	50
Плотность воздуха, кг/м^3	1,293

Рассмотрено воздействие ветра на торцевую и боковую части резонаторной антенны, по нормали к поверхности. И найдена сила, действующая на конструкцию резонаторной антенны.

Площадь плоской поверхности апертуры антенны:

$$S = 2,676 м^2. \quad (9)$$

Плотность воздуха находится по формуле [24]:

$$r_в = \frac{1,293}{1 + 0,00367 Ч}; \quad (10)$$

где t – температура в °С;

$r_в$ – плотность воздуха.

Сила, с которой поток воздуха воздействует на плоскую поверхность апертуры антенны:

$$F = S r_в \frac{v^2}{2}; \quad (11)$$

$$F = 3962\,Н, \text{ при } t = 25\ °C. \quad (12)$$

Сила, с которой поток воздуха воздействует на боковую часть антенны:

$$F = r_в \frac{4}{3} ч \frac{v^2}{2}; \quad (13)$$

$$F = 814\,Н, \text{ при } t = 25\ °C. \quad (14)$$

Таблица 6.5 Результаты расчёта

Сила, действующая на торец антенны, Н	3962
Сила, действующая на боковую часть антенны, Н	814

Для проверки аналитического расчёта было проведено компьютерное моделирование. Были заданы следующие граничные и начальные условия: антенна в открытом пространстве, поток несжимаемого газа плотностью 1,293 кг/м^3 со скоростью 50 м/с. Направление потока в переднюю часть антенны, в боковую и под углом 45°.

Моделирование проводилось с обтекателем и без него. Несмотря на то, что обтекатель является обязательной частью конструкции, интересно провести исследование влияния ветрового давления на открытую апертуру резонаторной антенны, как на поверхность с низкой прочностью. В процессе моделирования влияние мачты и креплений, на обтекание воздухом резонаторной антенны, не учитывалось.

Анализ результатов моделирования. Обтекание воздухом резонаторной антенны с обтекателем, установленной по отношению к потоку: торцевой поверхностью (рисунок 6.5), боковой поверхностью (рисунок 6.6) и под углом 45° (рисунок 6.7). Аналогично, но без обтекателя рисунки 6.8 – 6.10.

Рисунок 6.5 – Результаты моделирования: а – деформация обтекателя; б – линии тока воздуха; в – распределение давления; г – распределение скоростей потока воздуха

Рисунок 6.6 – Результаты моделирования: а – деформация обтекателя; б – линии тока воздуха; в – распределение давления; г – распределение скоростей потока воздуха

Рисунок 6.7 – Результаты моделирования: а – деформация обтекателя; б – линии тока воздуха; в – распределение давления; г – распределение скоростей потока воздуха

Рисунок 6.8 – Результаты моделирования: а – деформация апертуры; б – линии тока воздуха; в – распределение давления воздуха; г – распределение скоростей потока воздуха

Рисунок 6.9 – Результаты моделирования: а – деформация апертуры; б – линии тока воздуха; в – распределение давления воздуха; г – распределение скоростей потока воздуха

Рисунок 6.10 – Результаты моделирования: а – деформация апертуры; б – линии тока воздуха; в – распределение давления воздуха; г – распределение скоростей потока воздуха

Таблица 6.6 Сводная таблица результатов расчёта

Направление потока	Сила, действующая на антенну, Н		
	Антенна с обтекателем	Антенна без обтекателя	Аналитический расчёт
С торца	3860	5517	3962
С боку	608	617	814
Под углом 45°	2306	3200	—

По результатам исследования (таблица 6.6) было установлено, что эксплуатация антенны без обтекателя возможна, так как не вызывает критической деформации апертуры. Однако в таком режиме присутствует дополнительная нагрузка на конструкцию при направлении потока воздуха с торца резонаторной антенны и под углом к ней.

Результаты для резонаторной антенны с обтекателем, полученные при компьютерном моделировании, совпадают с аналитическим расчётом (таблица 6.6).

6.2.1. Воздействие вибрации на резонаторную антенну

Резонаторная антенна представляет собой большую объёмную конструкцию, которая обладает пониженной жёсткостью. Поэтому было проведено компьютерное моделирование для проверки наличия резонансных частот, модальный и гармонические анализы. Результаты моделирования внесены в таблицу 6.7 и представлены на рисунках 6.11 – 6.15.

Таблица 6.7 Собственные резонансные частоты

Мода	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	41	54	56	61	61,5	62	65	66

Рисунок 6.11 – Колебания резонаторной антенны моды 1 и 2

Рисунок 6.12 – Колебания резонаторной антенны моды 3 и 4

Рисунок 6.13 – Колебания резонаторной антенны моды 5 и 8

Проведённый модальный анализ показал минимальную частоту, на которой возникает явление резонанса, 41 Гц. В ТЗ в пункте 7.2, указан диапазон частот от 20 Гц до 40 Гц. Поскольку собственные частоты РА не попадают в этот диапазон, исследование вибрационного воздействия было проведено на центральной частоте 30 Гц. Для этой частоты были заданы условия колебаний – гармонические с амплитудой 2g, приложенные к задней стенке РА. Графическое отображение представлено на рисунке 6.14.

Рисунок 6.14 – Деформация резонаторной антенны на частоте 30 Гц

Рисунок 6.15 – Эквивалентные напряжения в апертуре резонаторной антенны на частоте 30 Гц

На частоте колебаний 30 Гц наблюдается отсутствие резонанса (см. рисунок 6.14), деформации антенны не превышают одного миллиметра. Отображение напряжений по Мизесу показано на рисунке 6.15. Максимальное значение напряжений составляет 11,18 Мпа, это ниже предела текучести для данного материала. Следовательно РА не испытывает пластической деформации.

6.2. Анализ результатов и обобщение полученных зависимостей

Были рассмотрены конструкторско-технологические вопросы, обеспечивающие оптимальные характеристики резонаторной антенны. Проведено численное компьютерное моделирование влияния факторов окружающей среды на прочностные и электродинамические характеристики РА. По результатам исследования можно судить о полном соответствии полученной конструкции условиям ТЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы были изучены основы теории антенн, приобретены навыки в области моделирования резонаторных антенн. Проведён параметрический синтез апертуры резонаторной антенны. Исследование влияния различных параметров резонаторной антенны на её характеристики. Так же была выполнена проверка на работоспособность резонаторной антенны под влиянием факторов окружающей среды.

Достигнутые, в ходе синтеза, электродинамические параметры резонаторной антенны полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

В процессе работы широко использовались САПР. Autodesk Inventor был использован для разработки конструкции. ANSYS для проведения компьютерного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электродинамика антенн с полупрозрачными поверхностями: Методы конструктивного синтеза / Н.Н. Войтович, Б.З. Каценеленбаума, Е.Н. Коршунова и др.; под ред. Б.З. Каценеленбаума и А.Н. Сивова. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 176 с.
2. Антенны УКВ: в 2 ч. / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терёшин.; под ред. Г.З. Айзенберга. – М.: Связь, 1977. – 384 с.
3. Zhao, Y. Metallic febry-perot cavity antenna with slot type FSS and hybrid lateral boundaries for high aperture efficiency / Y. Zhao, Z. Zhang, Z. Feng // Tsinghua national laboratory for information science and technology tsinghua university. – 2009. – 4 с.
4. Djordjevic, A.R. Optimization of resonant-cavity antenna / A.R. Djordjevic, A.G. Zajic // School of electrical engineering, university of Belgrade. – 2005. – 5 с.
5. Muhammad, S.A. Purely metallic waveguide-fed fabry-perot cavity antenna with a polarizing frequency selective surface for compact solutions in circular polarization / S.A. Muhammad, R. Sauleau. – 2011. – 4 с.
6. Hristov, H.D. Some experiences with resonant cavity antennas-oscillators / H.D. Hristov, I.P. Gatzov, J.R. Urumov, G.S. Kirov //Technical university of Varna. – 1993. – P. 376–379.
7. An Introduction to HFSS: fundamental principles, concepts, and use // ANSYS, Inc. – 2013. – 45 с.
8. Банков, С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг. – М., 2004. – 283 с.
9. Бухарин В. А., Попов И. А. Введение в CST Microwave Studio: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 97 с.
10. CST Microwave studio: workflow & solver overview // Computer simulation technology AG. – 2010. – 110 с.
11. Банков, С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С.Е. Банков, А.А. Курушин. М., 2008. – 276 с.
12. Weiland, T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields / T. Weiland // Electronics and Communication, (AEU). – 1977. – V. 31. – P. 116–120.
13. Weiland, T. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods / T. Weiland // J. of Numerical Modelling. – 1996. – V. 9. – P. 295–319.
14. Бухарин, В.А. Поляризационные свойства резонаторной антенны / В.А. Бухарин, Н.И. Войтович // Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. Секция технических наук. – 2015. Вып. 67. – С. 745–749.
15. Устройства СВЧ: учеб. пособие / Д.М. Сазонов, А.Н. Гридин, Б.А. Мишустин; под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высшая школа, 1981. – 295 с.
16. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. ТУ. – М.: ФГУП Стандартинформ, 2008. – 39 с.

17. Алюминиевые сплавы: справочник / В.М. Белецкий; под ред. И.Н. Фридляндера. – Киев: Коминтех, 2005. – 366 с.
18. ГОСТ 8617–81. Профили прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. ТУ. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 32 с.
19. ОСТ 1.92096–83. Трубы бесшовные холоднодеформированные из алюминиевых сплавов. ТУ. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 23 с.
20. ГОСТ 19170–2001. Ткань конструкционного назначения. ТУ. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 22 с.
21. ГОСТ 10299–80. Заклёпки с полукруглой головкой классов точности В и С. ТУ. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
22. ГОСТ 10300–80. Заклёпки с потайной головкой классов точности В и С. ТУ. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
23. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. М.: Изд-во стандартов, 2005. – 55 с.
24. Математика для инженеров: учебник в 2 ч. / Г.М. Фихтенгольц; под ред. Е.В. Пулькина. – М.: Государственное научно-техническое издательство, 1931. – 488 с.