

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой КиПР

_____ Войтович Н.И.

_____ 2020 г.

РАЗРАБОТКА АНТЕННЫ С КРУГОВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ 11.04.03.2020.593.00 ПЗ

Руководитель работы

_____ Войтович Н.И.

_____ 2020 г.

Работу выполнил
студент гр. КЭ-224

_____ Дударев С.В.

_____ 2020 г.

Нормоконтролер

_____ Юнгайтис Е.М.

_____ 2020 г.

Челябинск 2020 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ	9
2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
3 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....	12
4 РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	33
4.1 Обзор программ СВЧ-моделирования	33
4.2 Выбор САПР для моделирования и обоснование выбора	36
4.3 Описание физической модели антенны.....	37
4.4 Описание математической модели антенны	43
4.5 Численное моделирование антенны.....	50
4.6 Анализ полученных результатов	61
5 КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ.....	62
5.1 Разработка конструкции антенны	62
5.2 Изготовления рабочего макета антенны.....	71
6 ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ.....	73
6.1 Описание измерительного оборудования.....	73
6.2 Измерение характеристик макета антенны	77
6.3 Анализ измеренных характеристик антенны	86
7 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРА НА КОНСТРУКЦИЮ АНТЕННЫ	87
7.1 Моделирование и расчёт ветровой нагрузки на антенну	87
7.2 Моделирование деформации антенны при воздействии ветровой нагрузки.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	99
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЁЖ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПЕЦИФИКАЦИЯ.....	106

использует частотный метод конечных элементов, что позволяет ему успешно решать стационарные задачи.

Конструкция разрабатываемой антенны создаётся в программном пакете Autodesk Inventor. В данном разделе формируется полноценная конструкция антенны, а также конструкторская документация на неё. Вначале создаются отдельные детали, далее они объединяются в сборку путём их соединения с помощью различных крепёжных элементов: пайки, клейки, болтовые соединения и др. На выходе имеем конструкторскую документацию в виде сборочного чертежа четырёх-вibratorной антенны.

Последним этапом является моделирование воздействия ветровой нагрузки на разработанную антенну. Моделирование проводилось в программном пакете ANSYS Fluent. Полученные результаты показали, что конструкция четырёх-вibratorной антенны выдерживает ветровые нагрузки – 50 м/с без серьёзного искажения конструкции.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		8

модели антенны, задание начальных и граничных условий задачи, настройка разбиения области решения на конечные элементы, настройка решателя. Полученные результаты численного моделирования станут основой для разработки антенны. Физическая модель антенны станет базой для разработки конструкции антенны.

Разработка конструкции антенны будет проводиться в программном пакете Autodesk Inventor в следующем порядке: создание деталей; создание сборки из ранее созданных деталей, путём их соединения с помощью различных операций – пайки, клейки, болтовых соединений и др. В конечном счёте получим сборочный чертёж четырёх-вibratorной антенны.

Далее проведём моделирование воздействия ветровой нагрузки на разработанную конструкцию антенны. Моделирование будет проводиться с помощью программного пакета ANSYS Fluent. С учётом данного моделирования будут сделаны поправки в конструкцию (если потребуются) антенны. То есть с помощью данного моделирования будет обеспечена обратная связь с конструкцией разрабатываемой антенны.

Последним этапом данной работы является раздел, посвящённый измерению характеристик разрабатываемой антенны. Будет предложена схема измерения и порядок измерения. Измеряются следующие характеристики: КСВН, ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		10

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной ВКР является разработка антенны с круговой диаграммой направленности с горизонтальной поляризацией поля излучения. Для того, чтобы достигнуть поставленную цель ВКР необходимо решить следующие задачи:

1. Провести обзор литературы и анализ состояния вопроса с целью выявить основные принципы формирования круговой ДН антенны при горизонтальной поляризации поля излучения, рассмотреть типы антенн с круговой диаграммой направленности, а также их преимущества и недостатки. На основе обзора литературы по возможности избежать в разрабатываемой антенне данные недостатки и использовать найденные преимущества.
2. Выполнить численное моделирование антенны в САПР СВЧ-моделирования. Провести параметрическое исследование антенны: выявить и исследовать влияние размерных параметров антенны на её характеристики.
3. Разработать компактную конструкцию антенны.
4. Разработать на основе проведённых исследований макет антенны. Провести сравнительную оценку его электродинамических характеристик с результатами моделирования.
5. Провести исследование влияния потока ветра со скоростью 50 м/с на конструкцию антенны.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

В данном разделе будут рассмотрены различные типы антенн: рамочные, щелевые, вибраторные, печатные и др. Главным критерием отбора антенн в обзоре литературы является круговая ДН. Большинство антенн для данного обзора литературы взяты из патентов, также имеются конструкции антенн из отечественных и зарубежных статей.

3.1. Поляризационно-изотропная антенна [1]

Данная антенна используется как ненаправленная УКВ приёмопередающая антенна. Антенна состоит из следующих частей: два плоских излучателя 1, 2 в виде квадратных рамок, расположенных перпендикулярно друг другу по оси симметрии (рис. 3.1); питающие коаксиальные кабеля 4, 5, 6, уложенные по рамке, внешний проводник (оплётка) кабелей подключена к вводным в рамку проводникам 3, а центральный проводник (жила) к противоположным концам проводников. Сторона рамки не должна быть меньше $0,25\lambda$.

Рисунок 3.1 – Структура поляризационно-изотропной антенны

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		12

На рис. 3.2. показаны экспериментальные диаграммы направленности данной антенны.

Рисунок 3.2 – Диаграммы направленности поляризованно-изотропной антенны

3.2. Антенна [2]

Данная антенна используется как приёмная и передающая. Антенна состоит из следующих частей: четыре прямоугольных взаимно перпендикулярных металлических пластины 1 (рис. 3.3) размером $n \cdot \lambda / 2$ на $n \cdot \lambda / 4$; на продольных сторонах пластин выполнены пазы 4 глубиной $\lambda / 4$; на торцах конструкции имеются кольцевые экраны 2, перпендикулярные пластинам; через ось симметрии проходят два коаксиальных цилиндра 2 и 3, электромагнитная волна возбуждается в 3 цилиндре.

Рисунок 3.3 – Внешний вид антенны

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		13

Антенна обладает круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости. Данная конструкция антенны позволяет значительно расширить рабочую полосу частот – до миллиметрового диапазона.

3.3. Приёмопередающая антенна КВ- и УКВ-диапазонов [3]

Данная антенна используется как приёмопередающая КВ- и УКВ-диапазонов. Антенна состоит из следующих частей: четыре взаимно перпендикулярных плеча 1 (рис. 3.4), имеющих вид петлеобразного проводника в угловом секторе α ; между каждым петлеобразным излучателем расположены изолированные проводники 2 в секторе β ; плечи антенны подключены к питающему фидеру 4 как показано на рис. 2.4. Размеры плеч L_D и L_{II} выбраны следующим образом: $L_D = L_{II} = 0,12...0,14\lambda$. Данная антенна обладает круговой ДН.

Рисунок 3.4 – Внешний вид антенны

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		14

3.4. Антенна ОВЧ [4]

Данная антенна используется для радиовещания на ОВЧ. Антенна состоит из следующих частей: два четвертьволновых плеча 1 и 2 (рис. 3.5), форма каждого из них в виде полукруга – вместе образуют окружность длиной полдлины волны; металлическая опора 3, расположенная вертикально и проходит через ось круга, образуемого плечами; с помощью диэлектрической планки 4 плечи антенны крепятся к вертикальной опоре. Концы плеч выполнены с перехлестом в 30-60°. Запитка антенны происходит в точках 7 и 8. Данная антенна обладает круговой ДН в горизонтальной плоскости: сплошная линия – моделирование, пунктирная - прототип (рис. 2.6).

а)

б)

Рисунок 3.5 – Внешний вид антенны: а) антенна в аксонометрической проекции, б) вид сверху

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		15

Рисунок 3.6 – ДН антенны в горизонтальной плоскости

3.5. Турникетная антенна [5]

Данная антенна используется на радиопередающих объектах, телевизионных станциях. Антенна состоит из следующих частей (рис. 3.7): два взаимно-перпендикулярных активных вибратора длиной полдлины волны, запитка которых происходит током со сдвигом фазы 90° ; четыре пассивных полуволновых взаимно-перпендикулярных вибратора, расположенных сверху и снизу от активного вибратора.

Рисунок 3.7 – Внешний вид антенны

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		16

При таком расположении вибраторов получается увеличить коэффициент усиления в горизонтальной плоскости на 4 дБ, а в вертикальной плоскости, наоборот, уменьшить на 5 дБ. Турникетная антенна обладает круговой ДН в горизонтальной плоскости (рис. 3.8).

Рисунок 3.8 – ДН турникетной антенны

3.6. Турникетная антенна [6]

Данная антенна используется на радиопередающих объектах, телевизионных станциях. Антенна состоит из следующих частей: четыре симметричных наклонных вибратора 1, 2 (рис. 3.9) длиной $0,15 \lambda$ и шириной $0,05 \lambda$, установленные в взаимно-перпендикулярных плоскостях; экран 3; симметрирующее устройство 4; трёхдецибелный направленный ответвитель 5; четыре пассивных вертикальных вибратора 6. С помощью взаимодействия полей активных и пассивных вибраторов достигается расширение ДН и расширение полосы рабочих частот антенны. Данная турникетная антенна обладает круговой ДН.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		17

а)

б)

Рисунок 3.9 – Внешний вид антенны: а) вид сверху, б) вид сбоку

3.7. Вложенная турникетная антенна [7]

Данная антенна используется для приёма/передачи сигналов со спутников системы Глонасс, GPS в диапазоне частот L спутников (приём - 1520-1560 МГц, передача – 1620-1660 МГц). Антенна состоит из следующих частей: плоский круглый отражатель 10 (рис. 3.10) диаметром 8 дюймов; две печатные двухсторонние платы 40а и 40б, зафиксированные с помощью пазов; с каждой стороны печатной платы имеется рисунок излучателей и питающих линий для двух частотных диапазонов (20а – излучатель одного диапазона с цепью питания 22а; 30а – излучатель другого частотного диапазона с цепью питания 32а), всего таких пар четыре. Ширина проводящих линий на печатных платах составляет 0,1 дюйм. В экране 10 выполнены отверстия для обеспечения соединения фидеров со схемами питания. Размеры излучателей составляют четверть длины волны, но могут быть и короче или длинней – в диапазоне $0,25-0,35\lambda$. Антенна обладает круговой ДН.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		18

а)

б)

Рисунок 3.10 – Внешний вид антенны: а) вид сверху, б) аксонометрическая проекция антенны

3.8. Антенна круговой поляризации квазишунтовой «клевер» с резонаторным питанием [8]

Структура данной антенны показана на рис. 3.11, она включает в себя следующие составные части: четыре имеющих различную форму проволочных вибратора и питающий кабель. Изогнутые вибраторы начинаются с линейных четвертьволновых участков из точки 5, расположенных попарно-перпендикулярно. После линейных участков одни вибраторы изгибаются на полдлины волны, другие на четверть длины волны и сходятся в общей точке 9. Между точками 5 и 9 происходит запитка антенны. Антенна обладает круговой ДН в горизонтальной плоскости (рис. 3.12).

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		19

Рисунок 3.11 – Схематический вид антенны

а) б)

Рисунок 3.12 – ДН антенны: а) в горизонтальной плоскости, б) в вертикальной плоскости

3.9. Кольцевая щелевая антенна [9]

Кольцевая щелевая антенна может быть использована для систем передачи информации, к которым предъявляется высокие требования к электромагнитной совместимости (ЭМС), массо-габаритным характеристикам, а также к степени обтекаемости конструкции. Это могут быть различные космические аппараты.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		20

На рис. 3.13 показан внешний вид кольцевой щелевой антенны. Антенна состоит из следующих частей: проводящий цилиндр, являющийся круглым волноводом; две круглые пластины, располагающиеся параллельно относительно друг друга, с вырезами под цилиндр; также на проводящем цилиндре могут располагаться другие активные устройства. На цилиндре имеются продольно прорезанные щели, которые в совокупности с параллельно установленными пластинами образуют щелевой резонатор.

Ширина щели намного меньше длины волны, а длина составляет полдлины волны; диаметр цилиндра выбирается до 0,35 рабочей длины волны, диаметр колец не превышает 1,35 длины волны.

Антенна обладает круговой ДН в горизонтальной плоскости.

Рисунок 3.13 – Внешний вид кольцевой щелевой антенны

Над щелевым излучателем могут быть размещены излучающие активные элементы, а под ними должны быть размещены элементы конструкции, обеспечивающие крепление антенны.

3.10. Всенаправленная антенна [10]

Всенаправленная антенна может быть применена в качестве передающей антенны на ОВЧ.

Данная антенна состоит из следующих частей: круглая плоская рамка 1 (рис. 3.14), размер которой составляет около длины волны; полуволновые

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		21

реактивности 2-5 в виде прямоугольно-изогнутых участков (меандров), включенных в разрывы рамки; проводники 14-21, соединяющие точку «запитки» с клеммами плеч антенны.

Прямоугольно-изогнутые участки не влияют на формируемую ДН, так как токи в них текут в противоположных направлениях. Также они обеспечивают нулевой потенциал под углом 45° , то есть в середине меандра. Таким образом, имеем четыре синфазно-запитанных четвертьволновых вибратора.

Рисунок 3.14 – Внешний вид всенаправленной антенны

Антенна обладает круговой ДН в горизонтальной плоскости (рис. 3.15 а), а в вертикальной плоскости имеет ДН, показанную на рис. 1.20 б. У приведенной антенны горизонтальная поляризация.

а) б)

Рисунок 3.15 – Диаграммы направленности: а) в горизонтальной плоскости, б) в вертикальной плоскости

3.11. Всенаправленная антенна [11]

Всенаправленная антенна может быть применена в качестве передающей антенны на ОВЧ.

Данная антенна состоит из следующих частей: круглая рамка 1 (рис. 3.16), диаметр которой составляет от 0,3 до 0,6 длины волны; в круглой рамке выполнены разрывы, в которые вставлены реактивные зигзагообразные элементы 2-5, напоминающие меандры; первый реактивный элемент расположен относительно центра круга под углом 45° , шаг расположения для остальных составляет 90° . Толщина проводников реактивных элементов намного меньше толщины рамки (не менее, чем в 5 раз). В прямых участках рамки токи синфазны, в реактивных участках токи противофазны и создают очень слабое излучение. Поэтому в создании ДН участвуют только прямые участки рамки.

а)

б)

Рисунок 3.16 – Всенаправленная антенна: а) внешний вид, б) вид сверху

Антенна обладает линейной поляризацией. ДН всенаправленной антенны представляет собой круг (рис. 3.17), ДН получена в результате численных экспериментов.

а)

б)

Рисунок 3.18 – Всенаправленная антенна Pagoda-2: а) аксонометрический вид антенны, б) ДН антенны

Рисунок 3.19 – Внешний вид антенны

3.13. Печатная антенна в форме цветка с высоким уровнем усиления [13]

Структура верхнего и нижнего слоя печатной антенны в форме цветка показана на рис. 3.20. Печатная плата изготовлена из материала Роджерс 4350 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,38$ и $tg\delta = 0,0037$. Размеры печатной платы составляют $30 \times 30 \times 1,5$ мм³. Размеры конфигурации антенны приведены на рис. 3.20.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		25

Излучающая часть представляет собой круглую область со ступеньками сверху и прорезью по середине. Круглое отверстие создаёт специальное распределение тока на поверхности антенны. Прямоугольный паз на обратной стороне печатной платы обеспечивает согласование в широком диапазоне частот.

На рис. 3.21 показаны характеристики согласования данной антенны: на первом рисунке показаны две характеристики коэффициента отражения – антенна без круглого отверстия (красный цвет), с круглым отверстием (черный цвет); на втором рисунке показаны характеристики согласования смоделированные и измеренные (черный цвет).

На рис. 3.22 показаны ДН в Е-плоскости и Н-плоскости. Как видно из рисунка в Н-плоскости практически круговая ДН.

а)

б)

Рисунок 3.20 – Структура печатной антенны: а) верхний слой, б) нижний слой

а)

б)

Рисунок 3.21 – Согласование антенны: а) влияние отверстия на согласование, б) сравнение моделирования и эксперимента

а)

б)

Рисунок 3.22 – ДН антенны: а) ДН в Е-плоскости, б) ДН в Н-плоскости

3.14. Широкополосная щелевая антенна с круговой поляризацией [14]

Антенна такого типа может применяться в метеорологических радиолокаторах, для обеспечения связи и передачи информации со спутников. Также данная щелевая антенна может работать в диапазонах Wi-fi, Bluetooth и S-диапазоне. На рис. 3.23 показана конструкция данной антенны. На рис. 3.15 а) показан верхний слой антенны, содержащий печатный рисунок. Линии внутри окружности обеспечивают широкую полосу частот антенны. На рис. 3.23 б) показан нижний слой антенны,

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		27

обеспечивающий возбуждение антенны. На рис. 3.23 в) показан изготовленный макет антенны.

Антенна работает в диапазоне частот 2,1-3,8 ГГц. На рис. 3.24 показана зависимость коэффициента отражения S_{11} от частоты для 3 случаев: эксперимент, расчёт в программе HFSS, расчёт в программе CST.

На рис. 3.25 показаны ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Сплошной линией показано моделирование, а пунктирной – эксперимент.

а)

б)

в)

Рисунок 3.23 – Широкополосная щелевая антенна с круговой поляризацией: а) верхний слой, б) нижний слой, в) прототип антенны

Рисунок 3.24 – Зависимость коэффициента отражения от частоты

а) б)

Рисунок 3.25 – Диаграммы направленности: а) в вертикальной плоскости, б) в горизонтальной плоскости

3.15. Перестраиваемая двухдиапазонная антенна на кремниевой подложке [15]

Данная антенна представляет собой печатную антенну на кремниевой подложке шириной 47 мм и длиной 50 мм (рис. 3.26). Линия питания

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		29

представляет собой копланарную линию шириной 0,92 мм с волновым сопротивлением 50 Ом. Антенна имеет форму круга диаметром 22,64 мм. На печатном рисунке антенны сделаны U- и I-образные пазы, которые обеспечивают широкополосность данной конструкции антенны. Изменяя длину вышеупомянутых вырезов можно регулировать (перемещать) полосу рабочих частот. Также имеются переключки S_1 и S_2 , включая и выключая которые можно регулировать полосу частот. Центральная частота данной антенны составляет 6,85 ГГц.

На рис. 3.27 показан график зависимости коэффициента отражения от частоты для нескольких случаев работы ключей S_1 и S_2 : чёрным цветом показан случай замыкания обоих ключей – имеем широкую рабочую полосу частот; синим и красным цветом показаны случаи, когда замкнут только один из ключей – имеем два диапазона рабочих частот; фиолетовым цветом показан случай, когда оба ключа выключены – также получается два диапазона частот.

Рисунок 3.26 – Внешний вид двухдиапазонной антенны

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		30

В данном обзоре приведены различные типы антенн: вибраторные, рамочные, щелевые, печатные и др. Источниками информации о вышеупомянутых антеннах являлись патенты, статьи, а также интернет ресурсы.

Рамочные и вибраторные антенны обладают достаточно простой конструкцией, но в горизонтальной плоскости ДН имеет достаточно большие отклонения от круга. Представленные щелевые антенны имеют достаточно простую и обтекаемую конструкцию – их можно использовать на объектах с повышенными требованиями к компактности и обтекаемости конструкции. Их характеристики не хуже, чем у рамочных и вибраторных. Из приведённых в обзоре антенн, наилучшей ДН обладает антенна типа квазишунтовый «клевер» - её ДН в горизонтальной плоскости почти совпадает с кругом. Но такая антенна имеет нестандартную конструкцию и требует дополнительных конструктивных элементов для защиты от ветровых воздействий.

В настоящее время стали очень популярны печатные антенны. Это можно несколькими факторами: точность воспроизведения печатного рисунка на плате достаточно высока; технология изготовления печатных антенн хорошо освоена и не представляет особых трудностей. В обзоре приведены антенны из статей [13, 14, 15] различных форм: в виде круга с вырезом, в виде цветка и в виде щели. Такие антенны обладает очень широкой полосой частот и достаточно хорошей сходимостью ДН с кругом. Но при этом у них имеется недостаток, который ограничивает их применение – это большая ветровая нагрузка на печатную плату при частотах меньше 1 ГГц (на таких частотах работает, представленная в работе антенна). Поэтому печатные антенны представляют интерес для высокочастотных приложений (более 2-3 ГГц).

Антенна, предложенная в данной работе будет обладать характеристиками, наилучшими для использования при достаточно сильных ветровых нагрузках, также ДН будет иметь достаточно хорошую сходимость с кругом.

программы входят модули различного назначения: системный модуль, схемотехнический модуль, модуль для топологического проектирования, электромагнитный модуль и др. Также данная программа предоставляет пользователю выбор метода решения: 3-D электромагнитное моделирование, линейно моделирование и метод гармонического баланса.

FEKO – программа электродинамического моделирования, разработанная фирмой EM Software and Systems [22, 23]. Данный программный пакет может решать широкий спектр электромагнитных задач – от простых СВЧ устройств (антенны, фильтры, делители) до сложных радиолокационных систем и комплексов. В программе FEKO имеются несколько типов решателей: решатель в частотной области, временной области, метод моментов (МOM), метод физической оптики и др. Таким образом, данный программный пакет способен решать широкий круг современных задач.

XFDTD – программа электродинамического моделирования, разработанная фирмой Remcom [24, 25]. С помощью данной программы можно разрабатывать различные СВЧ-устройства, упомянутые выше. Основным методом решения в программном пакете XFDTD является метод конечных разностей во временной области (FEM).

QuickWave-3D – программа электродинамического моделирования, разработанная фирмой QWED Company [26]. Данная программа предназначена для расчёта антенн, а также СВЧ-цепей. В программе реализован метод конечных элементов. Для задания геометрии модели в данной программе можно использовать три пути: выбор готовой параметрической модели антенны из библиотеки (библиотека содержит более 100 готовых моделей); задание с помощью примитивов; задание геометрии на специальном языке программирования UDO. Последний способ задания геометрии является отличительной особенностью данного пакета.

Sonnet Suites – программа электродинамического моделирования, разработанная фирмой Sonnet [27]. Программа предназначена для расчёта

					110403.2020.593.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		35

кораблей и др.). Метод физической оптики также позволяет найти поля, излучаемые и рассеиваемые электрически-большими объектами.

Гибридный метод представляет собой композицию частотного МКЭ с методом интегральных уравнений. Одним из главных преимуществ данного метода является использование конформных граничных условий (FI-BI). Это позволяет уменьшить область решения и таким образом уменьшить общее количество конечных элементов. Таким образом, данный метод позволяет решать задачи с большей точностью и с меньшими временными затратами.

Исходя из вышеперечисленных возможностей программного пакета HFSS можно сказать, что данная программа способна решать любые поставленные задачи, в том числе и задачу, рассматриваемую в данной ВКР.

4.3. Описание физической модели антенны

Физическая модель антенны – это модель, геометрия и форма которой соответствуют реальной антенне, но имеются некоторые упрощения, которые не влияют на суть происходящих в ней явлений и процессов. Основные критерии для физической модели следующие: соответствие геометрии и формы модели: соответствие геометрических размеров – размеры и форма физической модели должны совпадать с размерами реальной антенны; физическое соответствие – все значения величин, характеризующих физические явления и процессы во времени и пространстве для физической модели и реальной антенны должны совпадать. Физическая модель четырёх-вибраторной антенны показана на рис. 4.1.

Один из вибраторов

Линия питания

Рисунок 4.1 – Физическая модель четырёх-вибраторной антенны

При составлении физической модели сделаны некоторые упрощения, которые не влияют на характеристики согласования, ДН и др. Сделаны следующие упрощения:

1. Вместо меди, из которой будут сделаны проводящие плечи реальной антенны, используется идеально проводящий материал – PEC (Perfect electric conductor). Такое обозначение идеально проводящего материала широко используется во всех системах СВЧ-моделирования.
2. Вместо диэлектрического материала, используемого для реальной антенны в физической модели применяется идеальный диэлектрик с параметрами, как у реального.

3. Паяные швы, с помощью которых будут закрепляться составные части антенны, не учитываются в модели. Так как они не будут влиять на характеристики антенны.

Далее будут продемонстрирована четырёх-вибраторная антенна в разрезе для того, чтобы показать структуру антенны, а также её отдельные части и дать им качественную и количественную характеристику.

На рис. 4.2 показано сечение антенны в горизонтальной плоскости. Как видно из рисунка, антенна представляет собой полую трубку, изогнутую в виде круга с разрезами в точках возбуждения вибраторов. Возбуждение для вибраторов осуществляется с помощью четырёх линий питания – отрезки коаксиального кабеля РК 50-2-11 [37]. В разрезе плеч вибраторов с кабелей снимается внешняя металлическая оплётка и замыкается на плечи вибратора (на рисунке замыкание внешней оплётки кабеля на трубки показано в виде плоских круглых перемычек, соединённых с трубками).

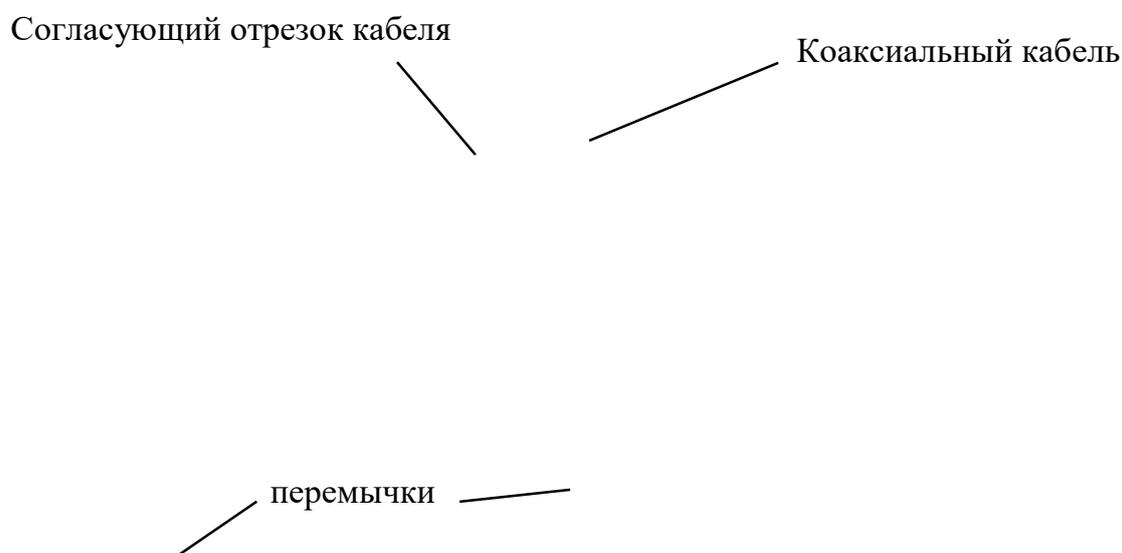


Рисунок 4.2 – Сечение антенны в горизонтальной плоскости

					110403.2020.593.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		39

Возбуждение антенны происходит с помощью согласующих отрезков коаксиального кабеля, находящихся в одной из двух трубок каждого вибратора. С помощью изменения длины отрезков кабеля в дальнейшем будет обеспечиваться согласование.

На рис. 4.3 показано сечение антенны в вертикальной плоскости. На рисунке хорошо виден четвертьволновой трансформатор сопротивлением 25 Ом. Трансформатор обеспечивает плавный переход с линии передачи 50 Ом на четыре параллельно соединённых пятидесятиомных кабеля с общим сопротивлением 12,5 Ом.

Разветвление
линий питания

Четвертьволновой
трансформатор

Рисунок 4.3 – Сечение антенны в вертикальной плоскости

Расчёт волнового сопротивления четвертьволнового трансформатора осуществляется по следующей формуле:

$$Z(\lambda / 4) = \sqrt{Z_1 Z_2} = \sqrt{Z_1 (Z_1 / 4)} = \sqrt{50 \cdot 12,5} = 25 \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		40

Далее будет внесено разъяснение размеров вибраторов антенны. У антенны имеется четыре вибратора. Диаметр антенны составляет 75 м, следовательно, длина окружности кольца составляет 235 мм (πd). Тогда длина каждого из четырех вибраторов должна составлять четверть длины кольца – 58 мм, что составляет $0,184\lambda$ ($\lambda = 315$ мм). Но в данном случае вибратор захватывает внутренние стенки прямых трубок, соединяющих кольцо с линией питания. На рис. 4.5 показано распределение токов, доказывающее, что длина вибраторов дополняется прямыми трубками и составляет 125 мм или $0,4\lambda$, то есть имеем практически полуволновые вибраторы.

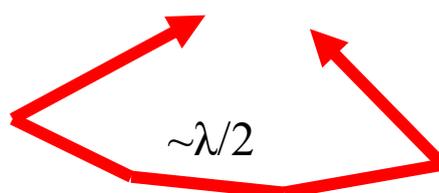


Рисунок 4.5 – Распределение токов на поверхности антенны

Таким образом, введя физическую модель четырёхвибраторной антенны получим выигрыш во времени расчёта ввиду отсутствия мелких конструкционных деталей и особенностей, не влияющих на результат расчёта.

4.4. Описание математической модели антенны

Для того, чтобы получить решение для поставленной задачи (найти распределение напряженности поля от угловых координат – ДН; найти матрицу рассеяния, характеризующую степень согласования антенны и др. параметры) необходимо составить математическую модель, с помощью которой будет решена данная задача.

Под математической моделью понимается некоторая совокупность уравнений, описывающих моделируемую систему, необходимых для решения краевой задачи. Краевая задача в общем случае подразумевает под собой нахождение решения системы дифференциальных уравнений при заданных граничных и начальных условиях. В нашем случае система дифференциальных уравнений представляет собой систему уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, \end{cases} \quad (4.3)$$

где \vec{E}, \vec{D} – напряжённость и вектор смещения электрического поля, \vec{H}, \vec{B} – напряжённость и индукция магнитного поля, \vec{j} – это плотность тока, ρ – плотность заряда.

Но для решения системы уравнений Максвелла в конкретной среде необходимо ввести так называемые «материальные уравнения», характеризующие параметры среды:

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \\ \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \\ \vec{j} = \sigma \vec{E}, \end{cases} \quad (4.4)$$

где ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, ε, μ – относительная электрическая и магнитная проницаемость, соответственно, σ – проводимость.

Также обязательным условием для краевой задачи является заданные граничные и начальные условия. Граничные условия на поверхности идеального металла (РЕС) выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} [\vec{n}_0, \vec{H}_\tau] = \vec{j}_s^3, \\ [\vec{n}_0, \vec{E}_\tau] = 0, \end{cases} \quad (4.5)$$

где \vec{E}_τ – тангенциальная компонента напряжённости электрического поля, \vec{H}_τ – тангенциальная компонента напряжённости магнитного поля, \vec{j}_s^3 – поверхностная плотность тока, \vec{n}_0 – нормаль к поверхности. То есть тангенциальная компонента вектора напряжённости электрического поля равна нулю на поверхности идеального проводника, следовательно, линии вектора \vec{E}_τ будут перпендикулярны к поверхности металла. А линии напряжённости магнитного поля, наоборот, будут иметь тангенциальную компоненту и располагаться «параллельно» металлической поверхности.

Аналитическое решение поставленной задачи представляет собой некоторую трудность ввиду того, что решение представляет собой бесконечный набор решений или множество. Поэтому такие задачи решают с помощью численных методов. Одними из самых эффективных методов являются частотный метод конечных элементов (МКЭ) и временной алгоритм. Первый метод хорош для решения стационарных задач, второй, наоборот, для нестационарных задач. В данной работе будет рассматриваться численный МКЭ.

Далее будет описан МКЭ для случая нахождения поля в области решения. Для векторов напряжённости электрического и магнитного полей можно задать следующие функционалы [29]:

$$\begin{cases} F(\vec{H}_{np}) = 0,5 \int_{\Omega} \left[\frac{(\text{rot} \vec{H}_{np})^2}{\varepsilon_r} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \mu_r \vec{H}_{np}^2 \right] \cdot d\Omega, \\ F(\vec{E}_{np}) = 0,5 \int_{\Omega} \left[\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \vec{E}_{np}^2 - \frac{(\text{rot} \vec{E}_{np})^2}{\mu_r} \right] \cdot d\Omega, \end{cases} \quad (4.6)$$

где $\vec{E}_{np}, \vec{H}_{np}$ – вводимые пробные функции, необходимые для обеспечения стационарности функционала, Ω – потенциальная область.

Далее область, в которой необходимо найти решение разбивается на конечные элементы – тетраэдры (рис. 4.6). Напряжённость электрического и магнитного полей находится в каждом из таких тетраэдров и получается общая картина, характеризующая решение данной задачи в заданной области.

Рисунок 4.6 – Тетраэдр с нумерацией узлов

В каждом из тетраэдров магнитное (и электрическое) поле будет аппроксимироваться следующим выражением [29]:

$$\vec{H} = \sum_{n=1}^M \vec{H}^n \eta_n(\xi), \quad (4.7)$$

где $\eta_n(\xi)$ – интерполяционные полиномы, необходимые для обеспечения стационарности функционала, величина n характеризует узловую точку тетраэдра, на которые разбита область решения. Из данной формулы видно, что пробная функция \vec{H}_{np} соответствует совокупности векторов \vec{H}^n ,

необходимых для нахождения значений напряжённости магнитного поля в каждом из узлов тетраэдра.

Далее подставим аппроксимированное значение напряжённости магнитного поля в каждом из тетраэдров (4.7) в выражение (4.6) и получим функционал, характеризующих один конечный элемент [29]:

$$F = 0,5H_s^m H_t^n \left(\frac{V}{\varepsilon_r} Q_{mn}^{ij} K_{ij}^{st} - V \mu r^2 \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \delta_{st} T_{mn} \right), \quad (4.8)$$

где H_s^m, H_t^n – компоненты вектора напряжённости магнитного поля \vec{H}^n , Q_{mn}^{ij}, T_{mn} – матрицы, не зависящие от геометрии тетраэдра, величина K_{mn}^{ij} является матрицей, содержащей вершины каждого из тетраэдров. Данные величины находятся по следующим выражениям [29]:

$$Q_{mn}^{ij} = 6 \int_{\Omega} \frac{\partial \alpha_m}{\partial \xi_i} \frac{\partial \alpha_n}{\partial \xi_j} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \quad (4.9)$$

$$T_{mn} = 6 \int_{\Omega} \alpha_m \alpha_n d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \quad (4.10)$$

$$K_{ij}^{st} = \delta_{st} \frac{\partial \xi_i}{\partial r_\omega} \frac{\partial \xi_j}{\partial r_\omega} \frac{\partial \xi_i}{\partial r_i} \frac{\partial \xi_j}{\partial r_s}, \quad (4.11)$$

где индексы m и n – характеризуют номера узлов тетраэдра; s, t, ω обозначают оси декартовых координат; i, j обозначают номера вершин тетраэдра.

Функционал для поля в одном конечном элементе можно переписать в матричном виде [29]:

$$F = 0,5H_c^T W H_c, \quad (4.12)$$

где W – симметричная матрица, описывающая один тетраэдр; H_c – вектор столбец, характеризующих компоненты поля в узлах тетраэдра.

Функционал для совокупности конечных элементов можно представить в следующем виде [29]:

$$F = 0,5H_c^T C^T W H_c C, \quad (4.13)$$

где C – прямоугольная матрица, связывающая поля отдельных элементов с полем совокупности конечных элементов.

Таким образом, можно выделить следующие этапы МКЭ: разбиение области решения на конечно-элементную сетку; нахождение требуемых полей для каждого конечного элемента; нахождение общего поля от всех конечных элементов.

В программном пакете HFSS реализован частотный МКЭ. Принцип его функционирования схож с описанным выше МКЭ. Наиболее важными особенностями этого метода являются: адаптивное изменение плотности сетки конечных элементов при решении (если не достигается сходимость решения – количество конечных элементов увеличивается и так до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность), возможность разбиения на конечные элементы даже самой трудной геометрии области решения.

На рис. 4.7-4.10 показана область решения, разбитая на конечно-элементную сетку, в плоскости вектора E и H .

Рисунок 4.7 – Сетка конечных элементов в плоскости вектора E

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		47

Рисунок 4.8 – Сетка конечных элементов в месте возбуждения одного из вибраторов в плоскости вектора E

Рисунок 4.9 – Сетка конечных элементов в плоскости вектора H

					110403.2020.593.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		48

Рисунок 4.10 – Сетка конечных элементов в месте разветвления в плоскости вектора H

На изображениях 4.7-4.10 область решения ограничивается «боксом», размеры которого параметрически изменяются в зависимости от размеров антенны, но расстояние от края антенны до границы «бокса» должно быть не меньше $\lambda/4$. На рис. 4.11 показана антенна и область, в которой будет найдено решение.

Рисунок 4.11 – Антенна и область, в которой находится решение

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		49

Граничные условия для данной задачи выбраны следующие:

1. На границу области решения наложены условия Radiating, подразумевающие под собой поверхность излучения.
2. Проводящие материалы заданы как идеальные проводники (PEC).
3. Для диэлектрических материалов задана диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь.

Таким образом, в данном разделе сформулирована математическая модель, используемая для расчёта характеристик исследуемой антенны.

4.5. Численное моделирование антенны

Целью данного раздела является получение требуемых характеристик для четырёхвибраторной антенны, требуемые в ТЗ характеристики:

1. ДН в горизонтальной плоскости – круг.
2. Согласование – КСВН не хуже 2.
3. Входное сопротивление антенны 50 Ом.
4. Поляризация - горизонтальная.

Для численного моделирования будет использована физическая модель четырёх-вибраторной антенны, описанная ранее в данной работе. На рис. 4.12 показана физическая модель антенны. Использование физической модели даёт разработчику преимущество во времязатратах на исследование, так как в модели число компонентов становится меньше, а на результаты моделирования это не оказывает большого влияния.

Рисунок 4.12 – Физическая модель четырёх-вibratorной антенны

Численное моделирование четырёх-вibratorной антенны заключается в следующих этапах:

- 1) Создание физической модели антенны. Это можно выполнить как в встроенном моделлере программы HFSS, так и в других системах проектирования (Inventor, Компас, SolidWorks и др.)
- 2) Задание характеристик материалам, используемым в данной модели. Проводящие материалы можно установить, как идеальные проводники (PEC), диэлектрическим материалом можно задать характеристики диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь или выбрать материал из имеющихся.
- 3) Задание типа сеточной модели конечных элементов, а также начальной плотности сетки. В процессе решения плотность конечных элементов будет увеличиваться до тех пор, пока не будет достигнута заданная сходимость (адаптивный алгоритм решения).
- 4) Задать граничные условия для решаемой задачи. Для большинства антенных задач граничные условия представляют собой поверхность излучения на каждой из граней, области решения.

- 5) Задать условия возбуждения. В данном случае в качестве возбуждения используется Lumped Port, возбуждающий коаксиальную линию, «запитывающую» антенну.
- 6) Заключительным этапом является задание полосы частот, в которой необходимо получить решение, а также настроек решателя (количество шагов решения, значение разности между итерациями решения и др.).

Все вышеперечисленные этапы моделирования четырёх-вибраторной антенны раскрыты ранее в разделах «Описание физической модели антенны», «Описание математической модели антенны». В данном разделе приводится обобщение данного материала, а также демонстрируются рассчитанные характеристики четырёх-вибраторной антенны.

На рис. 4.13 показана ДН четырёх-вибраторной антенны в вертикальной плоскости или в плоскости вектора H .

На рис. 4.14 показана ДН антенны в горизонтальной плоскости или в плоскости вектора E . Из графика видно, что ДН почти совпадает с кругом, но имеются небольшие отклонения от круга. Неравномерность ДН составляет 0,05 дБ:

$$\delta = F_{\max}(\theta) - F_{\min}(\theta) = 2,08 - 2,03 = 0,05 \text{ дБ.} \quad (4.14)$$

На рис. 4.15 показана объёмная ДН четырёх-вибраторной антенны. Также на иллюстрации приведена шкала, минимальное значение которой составляет -70,7 дБ, а максимальное составляет +2,08 дБ.

На рис. 4.16 показано распределение напряжённости электрического поля в горизонтальной плоскости в пределах области решения. Также на картинке дана шкала напряжённости электрического поля. Цветом, близким у красному, показаны участки с наибольшей напряжённостью поля, а синим показаны участки с наименьшей напряжённостью поля. Из иллюстрации видно, как возбуждается каждое из четырёх плеч исследуемой антенны, а далее поле из четырёх отдельных участков «складывается» в одно целое.

Рисунок 4.13 – ДН в вертикальной плоскости (в плоскости вектора H)

Рисунок 4.14 – ДН в горизонтальной плоскости (в плоскости вектора E)

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>53</i>

Рисунок 4.15 – Объёмная ДН четырёх-вibratorной антенны

Рисунок 4.16 – Распределение напряжённости электрического поля в
горизонтальной плоскости

					110403.2020.593.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		54

Рисунок 4.17 – Распределение напряжённости электрического поля в вертикальной плоскости

Суммарное поле как видно из рис. 4.16 имеет форму, близкую к кругу. При удалении от антенны, фронт поля начинает изменяться.

На рис. 4.17 показано распределение напряжённости электрического поля в вертикальной плоскости в пределах области решения. Из иллюстрации видно, что суммарное поле имеет ярко выраженный минимум около центра антенны, ДН, показанная на рис. 4.13 это доказывает.

Одной из важнейших энергетических характеристик антенны является согласование и её размерная характеристика – коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН). В ТЗ поставлено требование, чтобы КСВН в полосе частот 939,6-966,6 МГц не хуже, чем 2. На рис. 4.18 показан график КСВН от частоты.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		55

Рисунок 4.18 – Зависимость КСВН от частоты

Также на рис. 4.18 кроме зависимости КСВН от частоты показаны две вертикальных линии, которые показывают рабочий диапазон частот 939,6-966,6 МГц, требуемый в ТЗ на антенну. Из рисунка видно, что КСВН четырёхвibratorной антенны полностью удовлетворяет требованиям ТЗ.

На рис. 4.19 показана зависимость реальной и мнимой части входного сопротивления антенны от частоты. Пунктирными линиями показана рабочая область частот. Из иллюстрации видно, что на центральной частоте реальная часть входного сопротивления равна 49 Ом, а мнимая равна почти нулю.

На рис. 3.20 показана зависимость КНД от частоты для угла $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$. Вертикальными линиями показана рабочая полоса частот.

Рисунок 4.19 – Зависимость реальной и мнимой составляющих входного сопротивления от частоты

Рисунок 4.20 – Зависимость КНД от частоты

					110403.2020.593.00	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		57

Отдельной и достаточно важной задачей численного моделирования четырёх-вибраторной антенны является согласование. В рамках обеспечения хорошего согласования необходимо в рабочей полосе частот обеспечить КСВН не хуже 2.

Для четырёх-вибраторной антенны согласование обеспечивается с помощью изменения длины согласующих отрезков кабеля в каждом из плеч вибратора. На рис. 4.21 показана часть исследуемой антенны с одним из четырёх вибраторов. Внутри одного из плеч вибратора проложен коаксиальный кабель, проходящий далее через зазор между плечами вибратора. В зазоре у коаксиального кабеля удалена оболочка, а внешний проводник (металлическая оплётка) разрезана напополам и замкнута на каждое плечо (трубку) вибратора. Для обеспечения согласования необходимо подобрать определённую длину короткого отрезка коаксиального кабеля, находящегося во второй трубке вибратора.

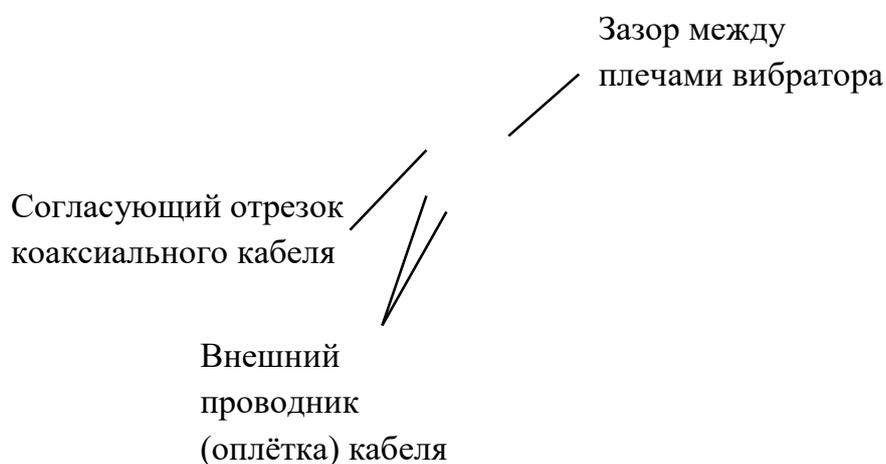


Рисунок 4.21 – Зависимость КНД от частоты

Таким образом, каждый из вибраторов антенны возбуждается с помощью коаксиальной линии передачи в режиме холостого хода (ХХ). Изменяя длину отрезка кабеля во втором плече вибратора, варьируем ёмкостную составляющую входного сопротивления вибратора и обеспечиваем нужное согласование. На рис. 4.22 показано влияние длины согласующего отрезка на степень согласования. Из рисунка видно, что отрезок длиной 5 мм обеспечивает наилучшую характеристику согласования.

Рисунок 4.22 – Зависимость КСВН от частоты при изменении длины согласующего отрезка кабеля во втором плече вибратора

Если необходимо изменить рабочую полосу частот в сторону более высоких частот или, наоборот, в сторону низких частот, то следует изменять размеры антенны. Определяющим размером в этом случае является диаметр кольца. Изменяя его в то количество раз, на сколько отличается новая центральная частота от старой, можно получить любую центральную частоту. Например, для того, чтобы сдвинуть частоту с 600 МГц на 1000 МГц нужно уменьшить диаметр кольца четырёх-вибраторной антенны в 1,66 раза.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		59

На рис. 4.23 показан график с характеристиками КВН при различных размерах четырёх-вibratorной антенны. Красным цветом показан график КСВН для центральной частоты 920 МГц (диаметр кольца увеличен в 1,04 раза), синим цветом показан график КСВН для центральной частоты 980 МГц (диаметр кольца уменьшен в 1,03 раза).

Рисунок 4.23 – Зависимость КСВН от частоты при изменении диаметра четырёх-вibratorной антенны

Таким образом, изменяя диаметр кольца можно передвигать рабочую полосу частот либо в сторону более низких частот, или, наоборот, в сторону высоких частот.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>60</i>

4.6. Анализ полученных результатов

В результате численного моделирования антенны получены такие характеристики как: ДН в горизонтальной плоскости, ДН в вертикальной плоскости, частотная зависимость КСВН и КНД. Также проведено параметрическое исследование некоторых параметров антенны.

ДН в горизонтальной плоскости представляет собой круг. Но имеются небольшие отклонения от идеального круга. Неравномерность ДН составляет 0,2 дБ, что является достаточно хорошим показателем.

ДН в вертикальной плоскости представляет собой сечение тора. То есть максимальное излучение направлено в горизонтальной плоскости, а в вертикальном направлении излучение отсутствует.

Частотная зависимость КСВН имеет ярко выраженный резонанс на частоте 952 МГц. Рабочая полоса частот (по уровню КСВН 2) составляет 32 МГц или 3,3 %.

Частотная зависимость КНД имеет достаточно гладкую форму. Максимальное КНД составляет 2,031 дБ.

Параметрическое исследование антенны показало, что диаметр решётки из четырёх вибраторов определяет положение рабочей полосы частот: при уменьшении диаметра рабочая полоса частот сдвигается в область высоких частот, а при увеличении – наоборот. Также установлено, что длина вложенного в одно из плеч отрезка коаксиального кабеля значительно влияет на согласование антенны.

5. КОНСТРУКТОРСКИЙ РАЗДЕЛ

5.1. Разработка конструкции антенны

После моделирования антенны в программе HFSS, в результате которого получили качественную физическую модель, необходимо разработать реальную конструкцию антенны. На рис. 5.1 показан внешний вид разработанной конструкции антенны.

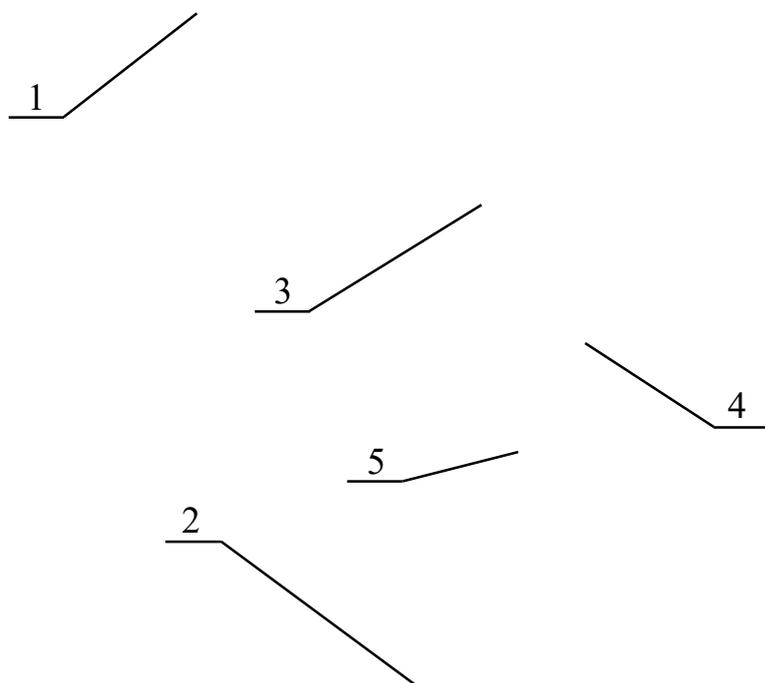


Рисунок 5.1 – Внешний вид конструкции разработанной антенны: 1 – обтекатель, 2 – решётка из 4 вибраторов, 3 – четвертьволновой трансформатор, 4 – глухая втулка, 5 – SMA разъём

При создании данной конструкции за основу взята физическая модель антенны, разработанная в главе «Расчётно-теоретический раздел» (рис. 4.1-4.3). Физическая модель является базой, от которой следует строить конструкцию антенны.

Конструкция включает в себя следующие основные элементы: обтекатель со съёмной верхней крышкой; решётку из четырёх вибраторов (каждый элемент представляет собой соединение прямого и радиального участка трубки); четвертьволновой трансформатор, внешний проводник которого представляет собой несущую деталь в виде трубки с пазами для крепления решётки из четырёх вибраторов; глухая втулка, в которую вставляется четвертьволновой трансформатор; разъём SMA, который крепится к нижней стороне глухой втулки и подключается к четвертьволновому трансформатору; для крепежа к четвертьволновому трансформатору глухой втулки и обтекателя используются винты с потайной головкой; для крепежа SMA разъёма к глухой втулке используются винты с полукруглой головкой.

Далее будут описаны и проиллюстрированы основные детали разработанной конструкции антенны.

В качестве разъёма используется высокочастотный (ВЧ) разъём SMA-KFD178 (рис. 5.2) [33]. Данный соединитель является розеткой. Для крепления разъёма предусмотрен фланец с четырьмя отверстиями под винты. ВЧ разъём SMA-KFD178 удобен тем, что у него есть участок коаксиальной линии без внешнего проводника – центральный проводник и диэлектрический изолятор. Которые можно использовать как пятидесятиомную линию передачи. Это позволило сократить количество деталей в конструкции, а также уменьшить вертикальные габариты антенны.

Для крепления ВЧ разъёма к глухой втулке используются винты с полукруглой головкой «Винт А.М2,5×0,45-6g×5» ГОСТ 17473-80 [34] диаметром 2,5 мм и длиной 5 мм (рис. 5.3).

Рисунок 5.2 – Внешний вид ВЧ разъёма SMA-KFD178

Рисунок 5.3 – Внешний вид винта для крепления разъёма

Глухая втулка показана на рис. 5.4. Эта деталь играет важную роль в конструкции антенны. В глухую втулку вставляется четвертьволновый трансформатор в виде цилиндрической детали, закрепляется он во втулке с помощью винтов с потайной головкой в четырёх местах по всей окружности. На торце глухой втулки имеется сквозное отверстие, в которое вставляется центральная жила с изолятором разъёма. Тем самым втулка играет роль внешнего проводника пятидесятиомной линии передачи. Также на нижнем торце втулки имеются четыре глухих отверстия с резьбой для крепления ВЧ разъёма с помощью винтов с полукруглой головкой. Снаружи на глухой втулке имеется резьба М25 с шагом 2 мм. То есть крепление антенны предусматривается с помощью ввинчивания в какую-либо конструкцию. Также можно предусмотреть несколько вариантов глухих втулок под различные способы крепления – с фланцем, с резьбой и др. То есть можно заменять втулку, исходя из требований к способу крепления. Это характеризует универсальность конструкции.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		64

Рисунок 5.4 – Внешний вид глухой втулки

Глухая втулка может быть изготовлена из медного прутка диаметром 25 мм. Обозначение прутка - Пруток ДКРВТ 25 НД М1 ГОСТ 1535-2006 [35].

Несущая деталь (рис. 5.5) представляет собой медный пруток (например, Пруток ДКРВТ 18 НД М1 ГОСТ 1535-2006) диаметром 18 мм со сквозным отверстием диаметром 8 мм. С одного конца трубки выполнены пазы диаметром 8 мм для установки решётки из четырёх вибраторов. Также на прутке имеются глухие отверстия диаметром 2,5 мм для крепления прутка к глухой втулке и для крепления обтекателя (отверстия ближе к пазам). Данная деталь представляет собой внешний проводник четвертьволнового трансформатора.

Рисунок 5.5 – Внешний вид несущей детали, являющейся внешним проводником четвертьволнового трансформатора

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		65

Изолирующая втулка (рис. 5.6) представляет собой стеклотекстолитовый стержень [36] диаметром 8 мм с сквозным отверстием диаметром 3 мм. Диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита составляет 5,5. Диаметр стержня подбирался исходя из того, что волновое сопротивление четвертьволновой коаксиальной линии должно быть 25 Ом. Данная деталь представляет собой диэлектрическую втулку, изолирующую внешний проводник от центрального проводника четвертьволнового трансформатора.

Рисунок 5.6 – Внешний вид изолирующей втулки

Центральный проводник (рис. 5.7) представляет собой медный пруток (например, Пруток ДКРВТ 3 НД М1 ГОСТ 1535-2006) диаметром 3 мм с глухим отверстием диаметром 1,3 мм и глубиной 4 мм. Эта деталь представляет собой центральный проводник четвертьволнового трансформатора. В глухое отверстие на нижнем торце проводника вставляется центральная жила от разъёма.

Рисунок 5.7 – Внешний вид центрального проводника четвертьволнового трансформатора

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		66

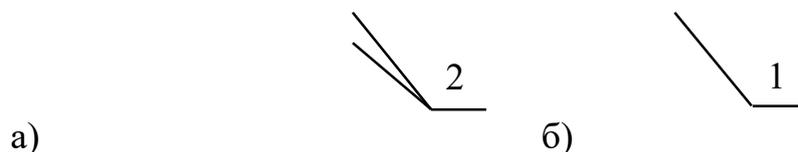


Рисунок 5.9 – Внешний вид элемента антенной решётки: а) изогнутая трубка, спаянная с прямой; б) сборка готового элемента АР: 1, 2 – внешняя оплётка кабеля, запаянная на трубку

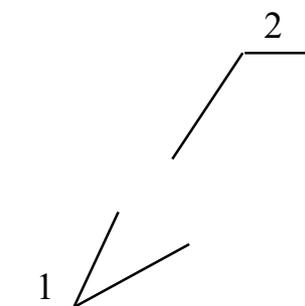


Рисунок 5.10 – Сечение одного из вибраторов АР: 1 – внешняя оплётка кабеля, запаянная на трубку, 2 – в зазоре с кабеля снята внешняя оплётка и изолятор

Также на рис. 5.10 видно, что радиочастотный кабель просунут во второе плечо вибратора не полностью. На основании исследований, проведённый в разделе 3 «Численное моделирование антенны» установлено, что отрезок кабеля, находящегося во втором плече вибратора, обеспечивает согласование антенны. Длина этого отрезка составляет 5 мм.

Для изготовления изогнутых трубок можно использовать медную трубу «Труба ДКРНМ 6x1 НД М2 Н ГОСТ 617-2006» [38]. Для изготовления прямых труб можно использовать медную трубу «Труба ДКРНМ 8x1 НД М2 Н ГОСТ 617-2006».

Обтекатель антенны представляет собой разборную конструкцию. Обтекатель состоит из двух частей – нижней и верхней. На рис. 4.11 показана нижняя часть обтекателя антенны. Из рисунка видны два паза для фиксации крышки обтекателя. Для того, чтобы надеть крышку, необходимо её вставить в пазы и повернуть против часовой стрелки. Для того, чтобы снять крышку - повернуть её по часовой стрелке и вынуть.

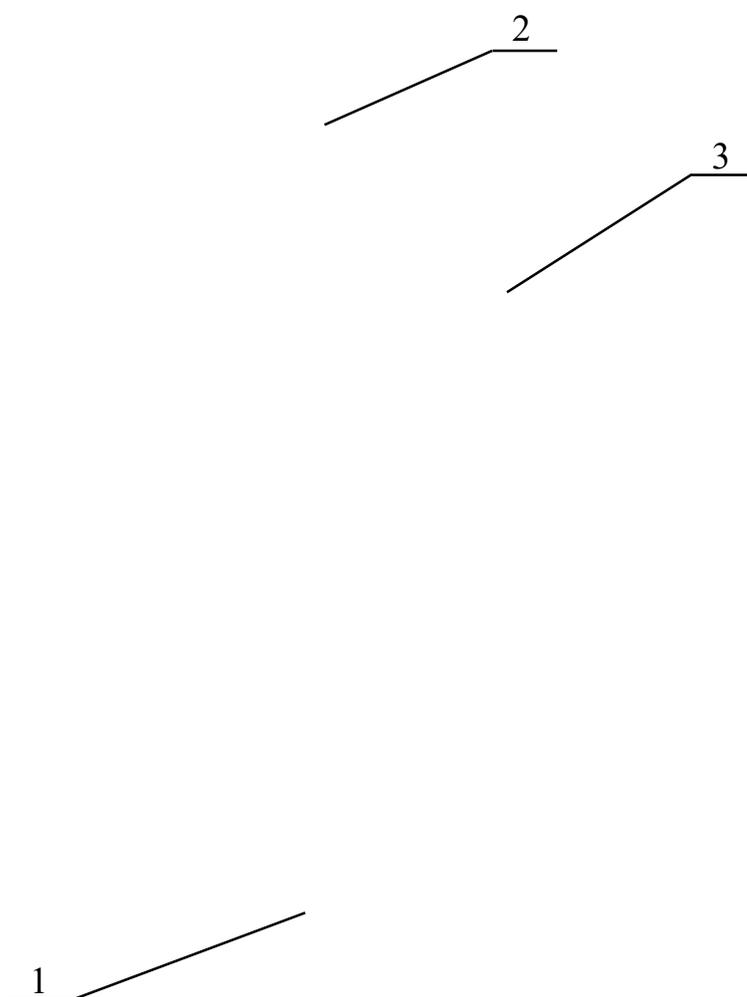


Рисунок 5.11 – Нижняя часть обтекателя антенны: 1 – отверстия для закрепления на антенне, 2 – паз для фиксации и закрепления крышки обтекателя, 3 – подставка для антенной решётки

На рис. 5.12 показана верхняя часть обтекателя или крышка. Отчётливо виден один из двух выступов, с помощью которых крышка фиксируется и закрепляется в пазе нижней части обтекателя.

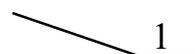


Рисунок 5.12 – Верхняя часть обтекателя антенны: 1 – выступ для фиксации и закрепления антенны в пазе

Обтекатель может быть изготовлен из различных изолирующих материалов, обладающих небольшой диэлектрической проницаемостью. Наиболее качественные материалы для изготовления обтекателя — это стеклопластик, различные виды керамики. Если климатические требования не экстремальные, то можно использовать менее качественные материалы, например, фторопласт. Данный материал обладает малой диэлектрической проницаемостью (1,9-2,1) и хорошо поддается обработке. То есть из фторопласта можно изготовить такой обтекатель путём обработки детали на станке с ЧПУ.

Также подобный обтекатель можно сделать с помощью вакуумной формовки [39]. Это процесс изготовления детали из листового полимера, при котором материалу задаётся форма матрицы (форма для вакуумной формовки) при воздействии вакуума и температуры. Применяются такие полимеры как: поликарбонат, полистирол, АБС-пластик, ПВХ, ПНД и др.

Для данной конструкции антенны разработан сборочный чертёж (Приложение А) и спецификация (Приложение Б).

5.2. Изготовление рабочего макета антенны

Изготовленный макет антенны показан на рис. 5.13. Конструкция макета антенны немного отличается от конструкции, представленной в разделе «Разработка конструкции антенны». Это связано с тем, что антенна изготавливалась вручную. Но физические принципы работы антенны не нарушены, то есть изготовленный макет антенны не нарушает физическую модель.

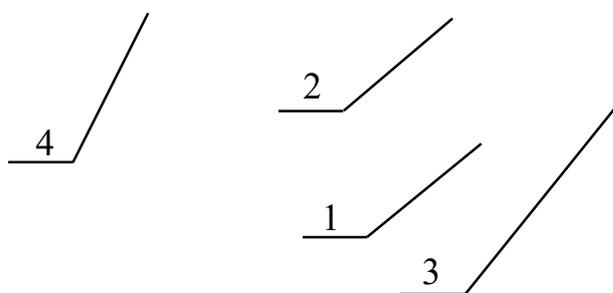


Рисунок 5.13 – Изготовленный макет антенны: 1 – элемент антенной решётки, 2 – в зазоре с кабеля сняты внешний изолятор и оплётка, 3 – место соединения центральных проводников АР и четвертьволнового трансформатора, 4 – ВЧ разъём типа «Экспертиза»

В качестве несущей детали взята медная трубка диаметром 22 мм с толщиной стенки 1,5 мм. В ней вырезаны четыре отверстия по всей длине окружности. Каждый из элементов АР представляет собой соединение прямого участка трубки и изогнутого: изогнутая трубка, изготовленная из медной трубы диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм, вставляется в отверстие прямой трубки, изготовленной из медной трубы диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм. Закрепляются эти две детали путём пайки.

После того, как трубки спаяны, в них прокладывается коаксиальный кабель. Для каждого элемента АР заготовлен отрезок коаксиального кабеля

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		71

длиной 150 мм, с обоих концов кабель разделан – снята изоляция и распущена оплётка. Также на расстоянии 4,5 мм от одного конца снята изоляция длиной 4 мм к противоположному концу кабеля. Оплётка в этом месте разделена пополам и распущена. При сборке каждого элемента АР четыре места с распущенной оплёткой кабеля запаяны на трубки. Далее собиралась АР целиком и вставлялась в отверстия основной трубки.

Четвертьволновой трансформатор выполнен в виде двух параллельно-соединённых пятидесятиомных кабелей длиной, рассчитанной по формуле (4.2). К параллельно-соединённым отрезкам кабеля присоединяется кабель с ВЧ разъёмом «Экспертиза»: центральные жилы и оплётки кабелей спаяны. Вся эта кабельная сборка устанавливается внутри основной трубки диаметром 22 мм. Центральные жилы параллельно-соединённых отрезков кабелей спаяны с четырьмя центральными жилами вибраторов АР. Внешняя оплётка кабелей припаяна на основную трубку. В трубку вставлена втулка, препятствующая ненужному перемещению кабельной сборки внутри трубки, а также фиксации кабеля.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		72

Таблица 6.1 – Основные характеристики «Обзор-103»

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измеряемых частот, МГц	0,3...1500
Время измерения (минимальное), мкс	200
Абсолютная погрешность при измерении модуля коэффициента передачи, дБ	$\pm(0,01 \times \text{модуль коэф. передачи} + 0,3)$
Абсолютная погрешность при измерении фазы коэффициента передачи, °	$\pm(3 + 0,05 \times \text{модуль коэф. передачи})$
Абсолютная погрешность при измерении фазы коэффициента отражения, °	$\pm(3 + 4 / \text{КСВН})$
Среднеквадратическое отклонение (СКО) для измерительного фильтра 1 КГц, дБ	0,001
Динамический диапазон для полосы частот 10...1500 МГц с измерительным фильтром 30 Гц, дБ	123, 135

Рисунок 6.1 – Измеритель ИККП «Обзор-103»

Автоматическое поворотное устройство (АПУ) «Радиант-AZ1000» используется для поворота антенны. Составными частями данного устройства являются: контроллер управления и поворотный механизм. Контроллер управления показан на рис. 6.2. Как видно из иллюстрации у него имеется дисплей с отображением заданного и текущего угла. То есть для того, чтобы обеспечить поворот на необходимый угол, его нужно задать как заданный (рис. 6.2). Поворотный механизм представляет собой конструкцию, показанную на рис. 6.3. В цилиндрическую трубу можно закрепить измеряемую антенну.

Рисунок 6.2 – Контроллер АПУ «Радиант-AZ1000»

Рисунок 6.3 – Поворотный механизм АПУ «Радиант-AZ1000»

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		75

В таблице 6.2 приведены основные технические характеристики данного устройства.

Таблица 6.2 – Основные характеристики АПУ «Радиант-AZ1000»

Наименование характеристики	Значение
Диапазон углов, °	0...360
Точность, °	0,3...1
Минимальный шаг измерения, °	0,3...1
Диаметр антенной мачты (максимальный), мм	50
Максимальная боковая нагрузка, кг	380
Максимальная вертикальная нагрузка, кг	80
Масса поворотного механизма и контроллера управления, кг	8,5

Рупорная антенна нужна для измерения сигнала, излучаемого четырёх-вибраторной антенной. Поляризация рупорной антенны такая же как у измеряемой антенны – горизонтальная. На рис. 6.4 показана рупорная антенна, используемая в данной работе для измерения.

Рисунок 6.4 – Рупорная антенна

Для измерения использовались коаксиальные кабели и разъёмы, антенна имеет радиочастотный разъём «РТС».

6.2. Измерение характеристик макета антенны

На рис. 6.5 показан собранный прототип четырёх-вибраторной антенны, разрабатываемой в данной работе. Для изготовления круглого кольца использовалась медная трубка наружным диаметром 6 мм и толщиной стенок 1 мм. Для изготовления «крестовины» антенны используется медная трубка наружным диаметром 8 мм и диаметром стенки 1 мм. В качестве трубки, к которой крепится «крестовина» с круглым кольцом взята медная трубка наружным диаметром 22 мм и толщиной стенки 1,5 мм.

Рисунок 6.5 – Макет разрабатываемой антенны

На рис. 6.6 показана схема измерения коэффициента передачи с измеряемой антенны на рупор и КСВН измеряемой антенны. «Вход 1» является выходом генератора, а «Вход 2» представляет собой выход приёмника измерительного прибора ИККП «Обзор-103». Обе антенны соединены с входами измерительного прибора коаксиальными кабелями.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		77

На рис. 5.8 показана фотография вышеописанной измерительной установки в одной из лабораторий кафедры «КиПР».

Рисунок 6.8 – Фотография измерительной установки в лаборатории кафедры «КиПР»

Результатами измерения являются такие характеристики как: КСВН, ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В таблице 6.3 приведены данные о ДН в горизонтальной плоскости на центральной частоте и на частотах, сдвинутых на 9 МГц в область низких и высоких частот. Величины в таблице приведены в дБ и представляют собой коэффициенты передачи с измеряемого макета антенны на измерительную рупорную антенну.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		79

Таблица 6.3 – Результаты измерений ДН в горизонтальной плоскости

Угол, °	S_{21} , дБ (Вход 2)		
	933 МГц	942 МГц	952 МГц
0	-19	-17,6	-20,2
10	-19	-17,6	-20,2
20	-19,1	-17,4	-20,2
30	-19,2	-17,5	-20,2
40	-19,4	-17,5	-20,2
50	-19,7	-17,6	-20,9
60	-19,9	-17,6	-21
70	-20,1	-17,6	-21,1
80	-20,2	-17,7	-19,3
90	-20,4	-17,8	-21,4
100	-20,5	-18	-21,5
110	-20,8	-18	-21,6
120	-20,8	-18,1	-21,5
130	-20,9	-18,2	-21,4
140	-21	-18,2	-21,3
150	-21	-18,3	-21,4
160	-20,9	-18,4	-21,3
170	-20,7	-18,4	-21,2
180	-20,6	-18,4	-21,1
190	-20,4	-18,4	-21,1
200	-20,3	-18,4	-21,1
210	-20,2	-18,4	-21,1
220	-20,1	-18,5	-21,2
230	-20,2	-18,6	-21,3
240	-20	-18,6	-21,4
250	-19,7	-18,6	-21,3
260	-19,7	-18,6	-21,3
270	-19,5	-18,6	-21,4

Продолжение таблицы 6.3

280	-19,4	-17,6	-21,1
290	-19,2	-18,5	-21
300	-19	-18,3	-21
310	-19	-18,2	-20,7
320	-19	-18,1	-20,6
330	-19	-18	-20,5
340	-18,9	-17,9	-20,4
350	-19	-17,7	-20,2

На рис. 6.9 показаны ДН в горизонтальной плоскости в полярной системе координат для трёх частот – центральной и частот, отличных от центральной на 9 МГц.

Рисунок 6.9 – Измеренная ДН макета разрабатываемой антенны в горизонтальной плоскости на трёх частотах

Из приведённых ДН в горизонтальной плоскости видно, что ДН немного отличается от круговой. Это может быть связано с погрешностями ручного изготовления и сборки антенны, с переотражением от предметов лаборатории и т.д.

В таблице 6.4 приведены экспериментальные данные по измерению ДН в вертикальной плоскости на центральной частоте. Приведённые величины характеризуют коэффициент передач с разработанного макета антенны на приёмную рупорную антенну. При этом измеряемый макет разработанной антенны повернут на 90° , то есть металлическое кольцо

Таблица 6.4 – Результаты измерений ДН в вертикальной плоскости

Угол, °	S_{21} , дБ (Вход 2)	Угол, °	S_{21} , дБ (Вход 2)
	942 МГц		942 МГц
0	-23	180	-24,4
10	-23,4	190	-24,4
20	-23,8	200	-24,2
30	-24	210	-23,9
40	-24,2	220	-23,7
50	-24,4	230	-23,4
60	-24,5	240	-23,2
70	-24,5	250	-23
80	-24,6	260	-22,8
90	-24,4	270	-22,6
100	-24,4	280	-22,6
110	-24,5	290	-22,5
120	-24,6	300	-22,5
130	-24,7	310	-22,4
140	-24,7	320	-22,4
150	-24,7	330	-22,4
160	-24,6	340	-22,6
170	-24,3	350	-22,7

с зазорами располагается перпендикулярно плоскости стола. Поэтому и измерительную рупорную антенну необходимо повернуть так, чтобы её поляризация стала вертикальной.

На рис. 6.10 показана ДН в вертикальной плоскости на частоте 942 МГц. Из рисунка видно, что ДН в вертикальной плоскости по характеру зависимости совпадает с расчётной, но имеются некоторые «скачки» и неровности, обусловленные отражением от лабораторной установки и от предметов помещения.

Рисунок 6.10 – Измеренная ДН прототипа разрабатываемой антенны в вертикальной плоскости на центральной частоте

На рис. 6.11 приведена зависимость КСВН от частоты. Видно, что центральная частота разработанного макета антенны составляет 942 МГц и отличается от центральной частоты расчётной модели на 10 МГц. Это связано с тем, что размеры изготовленного прототипа антенны получились больше размеров расчётной модели на 7 мм. При увеличении размеров антенны смещается полоса рабочих частот на столько, насколько отличаются

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		83

размеры. Это было рассчитано и показано (рис. 4.23) в третьей главе данной работы.

Рисунок 6.11 – Зависимость КСВН от частоты

На рис. 6.12 показана нормированная по среднеквадратическому значению ДН в вертикальной плоскости для эксперимента (чёрный цвет) и для моделирования в программе HFSS (красный цвет). Из графика видно, что характер зависимости тот же, но имеются достаточно сильные искажения. Эти искажения могут вноситься из-за переотражения сигнала от различных поверхностей, а также из-за достаточно большой погрешности собранного макета разрабатываемой антенны.

На рис. 6.13 показана нормированная по среднеквадратическому значению ДН в горизонтальной плоскости для эксперимента (чёрный цвет) и моделирования в программе HFSS (красный цвет). Из графика видно, что в направлении 0° экспериментальная ДН совпадает с моделированием. В остальных направлениях характер зависимости похож на моделирование, но имеет меньший уровень сигнала. Это может быть связано с неравномерностью распределения тока по металлическому кольцу антенны, возникшему из-за погрешности изготовления проводящего кольца и зазоров в нём.

Рисунок 6.12 – ДН в вертикальной плоскости: красная линия – моделирование в HFSS, чёрная - эксперимент

Рисунок 6.13 – ДН в горизонтальной плоскости: красная линия – моделирование в HFSS, чёрная - эксперимент

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		85

6.3. Анализ измеренных характеристик антенны

В данной главе описан эксперимент, в результате которого измерены такие характеристики разработанного макета антенны как: КСВН, ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В данном разделе приведена и описана схема измерительной установки. Все приборы и установки, входящие в состав схемы измерения, проиллюстрированы и описаны, для каждого прибора приводятся технические характеристики и возможности.

В результате эксперимента получено два набора чисел: коэффициенты передачи с разработанного макета антенны на измерительную рупорную антенну; КСВН, характеризующее разработанный макет антенны. По экспериментальным данным построены графические зависимости КСВН от частоты, ДН в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Также приведено сравнение экспериментальных характеристик разработанного макета антенны с характеристиками, полученными при моделировании в программном пакете HFSS. Центральная частота разработанного прототипа антенны сдвинута на 10 МГц относительно центральной частоты модели антенны в программе HFSS. Это связано с тем, что размер кольца антенны при изготовлении получился больше на 7 мм, чем у физической модели антенны. В 3 главе данной работы показано, что при увеличении/уменьшении диаметра кольца центральная частота КСВН сдвигается (рис. 4.23) в сторону низких частот (при увеличении размера) или в сторону высоких частот (при уменьшении размера).

Сравнение ДН экспериментальных и смоделированных в программном пакете HFSS показало, что характер зависимости тот же, но имеются отклонения, обусловленные погрешностью изготовления макета антенны, а также переотражением от объектов в лаборатории и др.

где v – скорость воздуха; S – площадь поверхности; ρ – плотность воздуха, рассчитываемая по следующей формуле [42]:

$$\rho = \frac{1,293}{0,00367 \cdot T + 1}, \quad (7.2)$$

где T – температура воздуха в °С.

Рассчитав по формуле (7.2) плотность воздуха для температуры плюс 40 °С получили 1,127 кг·м⁻³, а для температуры минус 60 °С плотность воздуха получилась 1,657 кг·м⁻³.

Рассчитав по формуле (7.1) силу, действующую на боковую поверхность антенны при температуре плюс 40 °С получили 17,6 Н, а для температуры минус 60 °С получили 25,9 Н. Как видно из расчётов, сила, действующая на боковую поверхность антенны, больше при отрицательных температурах.

Смоделируем задачу в программе ANSYS Fluent. Для этого будем использовать упрощённую модель антенны. На рис. 7.1 показано обтекание антенны воздушным потоком со скоростью 50 м/с при температуре плюс

Рисунок 7.1 – Обтекание воздушным потоком антенны при температуре плюс 40 °С

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		88

40 °С, линии на картинке – линии тока воздуха. Как видно из рисунка, конструкция обладает хорошей обтекаемостью.

На рис. 7.2 показано распределение давления, оказываемого воздушным потоком на антенну при температуре плюс 40 °С. На рис. 7.3 показано распределение скорости потока воздуха при той же температуре.

Рисунок 7.2 – Распределение давления воздуха при температуре плюс 40 °С

Рисунок 7.3 – Распределение скорости потока воздуха при температуре плюс 40 °С

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		89

Как видно из рис. 7.2 наибольшее давление оказывается на обтекатель антенны, так как он обладает наибольшей площадью поверхности. Максимальное давление составляет 1522 Па, переведём эту величину в силу:

$$F = S \cdot P = 0,0125 \cdot 1522 = 19 \text{ Н.} \quad (7.3)$$

Как видно из распределения скорости воздушного потока (рис. 7.3), максимальную скорость он приобретает на скруглённых участках обтекателя, так как там наименьшее сопротивление ветру. На плоских торцах обтекателя имеют место области с низкой скоростью воздушного потока, практически нулевая скорость. Это означает, что на конструктивную часть крепления антенны будет оказываться меньшая ветровая нагрузка.

На рис. 7.4 показано обтекание антенны воздушным потоком со скоростью 50 м/с при температуре минус 60 °С, линии на картинке – линии тока воздуха.

Рисунок 7.4 – Обтекание воздушным потоком антенны при температуре минус 60 °С

На рис. 7.5 показано распределение давления, оказываемого воздушным потоком на антенну при температуре минус 60 °С. На рис. 7.6 показано распределение скорости потока воздуха при той же температуре.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		90

Рисунок 7.5 – Распределение давления воздуха при температуре минус 60 °С

Рисунок 7.6 – Распределение скорости потока воздуха при температуре минус 60 °С

Как видно из рис. 7.5 наибольшее давление оказывается на скруглённую часть обтекателя, которая в этой проекции выглядит прямой. Максимальное давление составляет 2194 Па. Переведём эту величину в силу:

$$F = S \cdot P = 0,0125 \cdot 2194 = 27,5 \text{ Н.} \quad (7.4)$$

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		91

Как видно из рис. 7.6 так же, как и при высокой температуре на плоских торцах антенны имеются области с низкой скоростью воздушного потока, что обуславливает принятую конструкцию. Также видна, область низких скоростей ветрового потока за антенной.

Данные, полученные при моделировании и аналитическом расчёте ветровой нагрузки на боковую часть антенны, приведены в таблице 7.2. Видно, что результаты аналитического расчёта отличаются от моделирования на 6% для температуры минус 60 °С и на 8% для температуры плюс 40 °С. Это может быть связано с тем, что при аналитическом расчёте не учитывались некоторые характеристики среды, которые применяются в численном моделировании (например, вязкость воздуха при различных температурах и др.), также аналитический расчёт не принимает во внимание форму конструкции, которая безусловно влияет на результат.

Таблица 7.2. – Данные, полученные при моделировании и аналитическом расчёте

Температура, °С	Сила, действующая на боковую стенку	
	Моделирование	Аналитический расчёт
Плюс 40	19,0 Н	17,6 Н
Минус 60	27,5 Н	25,9 Н

Также необходимо получить и исследовать распределение давления и скорости ветрового потока в плоскости, перпендикулярной оси антенны. То есть будем исследовать аэродинамические свойства обтекателя в другой плоскости.

На рис. 7.7 показано распределение давления воздуха при температуре плюс 40 °С. Воздушный поток проходит снизу в вверх. Из рисунка видно, что максимальное давление оказывается на участок обтекателя сектором 60 °. Форма обтекателя в данной плоскости имеет форму круга, что способствует разделению ветрового потока на две части, которые соединяются на противоположной стороне обтекателя. Данная форма способствует малой ветровой нагрузки на обтекатель.

Рисунок 7.7 – Распределение давления воздуха при температуре плюс 40 °С

На рис. 7.8 показано распределение скорости воздушного потока при температуре плюс 40 °С. Из рисунка видно, что ветровой поток теряет скорость в нижней части обтекателя (нижний угловой сектор 60 °) и разветвляется на два потока, обтекающих антенну с двух сторон и соединяющихся в верхней части обтекателя (верхний угловой сектор 60 °).

Рисунок 7.8 – Распределение скорости потока воздуха при температуре плюс 40 °С

На рис. 7.9 показано распределение давления воздуха при температуре минус 60 °С. На рис. 7.10 показано распределение скорости воздушного потока при температуре минус 60 °С. Отличие данных зависимостей от

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		93

предыдущих лишь в том, что давление, оказываемое на антенну, на 30% больше.

Рисунок 7.9 – Распределение давления воздуха при температуре минус 60 °С

Рисунок 7.10 – Распределение скорости потока воздуха при температуре минус 60 °С

Таким образом, проведено моделирование воздействия ветра со скоростью 50 м/с при двух температурах – плюс 40 °С и минус 60 °С. Приведены картины распределения давления и скорости воздуха на разработанную антенну. Из анализа приведённых зависимостей можно сделать вывод, что конструкция антенны обладает достаточно хорошей

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		94

обтекаемостью. Это обусловлено формой обтекателя антенны, а также малыми размерами.

7.2. Моделирование деформации антенны при воздействии ветровой нагрузки

Далее необходимо рассчитать деформацию конструкции антенны при воздействии ветровой нагрузки. Для этого берётся модель, которая использовалась для расчёта ветровой нагрузки. Моделирование деформации будем проводить в модуле ANSYS Static Structural [41].

На рис. 7.11 показана деформация разработанной антенны при воздействии потока ветра скоростью 50 м/с при температуре плюс 40 °С. При моделировании антенна фиксировалась за наружную сторону глухой втулки (нижняя часть антенны). Максимальная деформация составляет 0,107 мм. На рисунке масштаб деформации увеличен в 100 раз для наглядности.

Рисунок 7.11 – Деформация антенны при воздействии ветрового потока скоростью 50 м/с при температуре плюс 40 °С

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		95

На рис. 7.12 показана деформация разработанной антенны при воздействии потока ветра скоростью 50 м/с при температуре минус 60 °С. Максимальная деформация составляет 0,195 мм. На рисунке масштаб деформации увеличен в 100 раз для наглядности.

Рисунок 7.12 – Деформация антенны при воздействии ветрового потока скоростью 50 м/с при температуре минус 60 °С

На рис. 7.13 показана деформация антенной решётки внутри обтекателя. Из иллюстрации видно, что два из четырёх элементов антенной решётки подвергаются большей деформации, чем остальные. Максимальная деформация элементов антенной решётки составляет 0,07 мм, что не влияет на работу антенны.

Результаты, полученные при моделировании деформации антенны при воздействии потока ветра со скоростью 50 м/с приведены в таблице 7.3. Из таблицы видно, что деформации, возникающие в антенне не значительны, и не приводят к нарушению работы антенны.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		96

Рисунок 7.13 – Деформация антенны внутри обтекателя при воздействии ветрового потока скоростью 50 м/с при температуре плюс 40 °С

Таблица 7.3. – Данные, полученные при моделировании деформации антенны

Температура, °С	Сила, действующая на антенну	Максимальная деформация
Плюс 40	19,0 Н	0,107 мм
Минус 60	27,5 Н	0,195 мм

Таким образом, в данном разделе ВКР проведено моделирование воздействия ветровой нагрузки 50 м/с при верхней и нижней температурах климатического исполнения УХЛ1 на разработанную конструкцию антенны. В результате моделирования установлено, что при ветровой нагрузке 50 м/с при температуре плюс 40 °С максимальная деформация антенны составит 0,107 мм, а при температуре минус 60 °С максимальная деформация составит 0,195 мм. Полученные при расчёте деформации никак не влияют на работу антенны. То есть конструкция антенны с аэродинамической точки зрения сделана правильно.

отдельных деталей, является простой. Разработан сборочный чертёж антенны и спецификация. Детали крепления являются съёмными и могут быть заменены другими под определенный тип крепления. Также обтекатель может быть заменён на другой – более подходящий в конкретных условиях использования. Конструкция имеет малые габариты и вес, что является положительным моментом.

На четвёртом этапе изготовлен макет антенны, измерены его характеристики: ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях, КСВН в рабочей полосе частот. Измеренные характеристики сравнены с характеристиками, смоделированными в HFSS.

На пятом этапе рассчитано и смоделировано воздействие ветровой нагрузки со скоростью 50 м/с при нижней и верхней температурах климатического исполнения УХЛ 1. Результаты моделирования показали, что воздействие такого ветрового потока на разработанную конструкцию антенны не вызывает значительных деформаций в антенне и не влияет на работу антенны. То есть конструкция антенны обладает достаточно высокой обтекаемостью.

Таким образом, цель и задачи исследования выполнены в полном объёме. ВКР включает в себя цикл этапов, начиная от идеи и заканчивая реализацией в виде чертежей и рабочего макета антенны.

Разработана антенна в виде кольцевой антенной решётки из четырёх полуволновых вибраторов, формирующая круговую ДН с горизонтальной поляризацией поля излучения. ТЗ на ВКР выполнено в полном объёме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2011248 Российская Федерация, МПК7 Н01Q 21. Поляризационно-изотропная антенна / В.П. Серков; А.И. Арбузов; В.П. Чернолес. – № 884626952; заявл. 26.12.1988; опубл. 10.10.2000, Бюл. № 28. – 5 с.
2. Пат. 2010406 Российская Федерация, МПК7 Н01Q21/06. Антенна / А.В. Белов; В.И. Гвоздев; Г.А. Кузаев; К.М. Федоров; А.Д. Христич; В.А. Шепетина. – № 894772347; заявл. 22.12.1989; опубл. 20.05.2002, Бюл. № 14. – 4 с.
3. Пат. 2101812 Российская Федерация, МПК7 Н01Q21/24. Антенна (варианты) / Н.Г. Фитенко; Е.С. Попов; В.П. Чернолес. – № 96113807/09; заявл. 09.07.1996; опубл. 10.01.1998, Бюл. № 32. – 14 с.
4. Пат. 2174273 Российская Федерация, МПК7 Н01Q9/26. Антенна / А.Л. Бузов; Л.С. Казанский; М.А. Минкин; В.В. Юдин. – № 2000106092/09; заявл. 13.03.2000; опубл. 27.09.2001, Бюл. № 27. – 8 с.
5. Пат. 2188485 Российская Федерация, МПК7 Н01Q21/26. Турникетная антенна / П.Н. Дагуров; А.В. Дмитриев; Ю.А. Андреев. – № 2000128968/09; заявл. 20.11.2000; опубл. 27.08.2002, Бюл. № 24. – 5 с.
6. Пат. 1305805 Российская Федерация, МПК7 Н01Q21/26. Турникетная антенна / Ф.И. Нагаев; Ю.А. Дробкин. – № 3925206; заявл. 05.07.1985; опубл. 23.04.1987, Бюл. № 24. – 4 с.
7. Пат. 2258286 Российская Федерация, МПК7 Н01Q21/26. Вложенная турникетная антенна / Х. Белл. – № 2002129103/09; заявл. 28.03.2001; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 22. – 17 с.
8. Пат. 190823 Российская Федерация, МПК7 Н01Q21/24. Антенна круговой поляризации квазишунтовой «клевер» с резонаторным питанием / В.И. Милкин; В.С. Полежаев; А.Е. Шульженко; Е.А. Щепина; И.С. Ющенко. – № 2019111617; заявл. 16.04.2019; опубл. 15.07.2019, Бюл. № 27. – 7 с.
9. Пат. 2620126 Российская Федерация, МПК7 Н01Q9/04. Кольцевая щелевая антенна / В.Д. Двурученский; А.Б. Захарченко; П.П. Телепнев;

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>100</i>

- А.Ю. Федотов. – № 2015157196; заявл. 31.12.2015; опубл. 23.05.2015, Бюл. № 15. – 4 с.
10. Пат. 71821 Российская Федерация, МПК7 H01Q9/00. Всенаправленная антенна / В.И. Милкин; П.С. Коновалов. – № 2007136082/22; заявл. 28.09.2007; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 22. – 12 с.
11. Пат. 2180151 Российская Федерация, МПК7 H01Q9/00. Всенаправленная антенна / А.Л. Бузов; Л.С. Казанский; М.А. Минкин; В.В. Юдин. – № 2000117158/09; заявл. 27.06.2000; опубл. 27.02.2002, Бюл. № 24. – 5 с.
12. DRONE-IPK. – <http://drone-irk.ru>.
13. Ranjan, P. Circularly slotted flower shaped UWB filtering antenna with high peak gain performance / P. Ranjan, S Raj, G. Tripathi, S. Tripathi // AEU - International Journal of Electronics and Communications. – 2017. – V. 81. – P. 209–217.
14. Rahimi, M. Wide band SRR-inspired slot antenna with circular polarization for wireless application / M. Rahimi, M. Maleki, M. Soltani, A.S. Arezomand, F.B. Zarrabi // International Journal of Electronics and Communications. – 2016. – V. 70, № 9. – P. 1199-1204.
15. Sharma, K. Reconfigurable Dual Notch Band Antenna on Si-Substrate integrated with RF MEMS SP4T Switch for GPS, 3G, 4G, Bluetooth, UWB and Close Range Radar Applications // K. Sharma, A. Karmakar, M. Sharma, A. Chauhan, S. Bansal, M. Hooda, A. K. Singh. AEU - International Journal of Electronics and Communications. – 2019. – V. 110. – P. 143–152.
16. Банков, С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг. – М., 2004. – 283 с.
17. Банков, С.Е. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М., 2009. – 736 с.
18. Интегратор технологий ANSYS. – <https://cae-expert.ru/product/ansys-hfss>.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>101</i>

19. CST Microwave studio: workflow & solver overview // Computer simulation technology AG. – 2016. – 127 с.
20. «Родник. Системный интегратор» Методы физической оптики. – http://www.rodnik.ru/product/sapr/sapr_svch/EM_Software_Systems/feko/po/
21. Дмитриев, Е.Е. Основы моделирования в Microwave Office 2009 / Е.Е. Дмитриев. М., 2010. – 176 с.
22. Altair FEKO. – <https://www.orcada.ru/product/altair/altair-feko.html>.
23. Банков, С.Е. Практикум проектирования СВЧ структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М., ЗАО НПП «РОДНИК», 2009. – 200 с.
24. Банков, С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С.Е. Банков, А.А. Курушин. М., 2008. – 276 с.
25. Научно-образовательный центр «Компьютерного моделирования и электронных САПР, антенн и устройств СВЧ». XFDTD. – https://rtf.sfedu.ru/noc1/soft_xfdtd.html.
26. QuickWave 3D. – https://www.qwed.com.pl/qw_3d.html.
27. Sonnet Suites. – https://cxem.net/software/sonnet_suite.php.
28. ANSYS HFSS. – https://www.orcada.ru/product/ansys/ansys_63.html.
29. Сильвестр, П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестр, Р. Феррари. – Москва: Мир, 1986. – 229 с.
30. Официальный сайт компании «Планар». – <http://www.planarchel.ru/>.
31. Измеритель комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103». – <http://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/OBZOR>.
32. Официальный сайт компании ООО ПКФ "МЕГАСЕРВИС". – <http://xn--80adyobadlt.xn--plai/>.
33. ООО «Амитрон Электроникс». – <http://amel.ru/>.
34. ГОСТ 17473-80. Винты с полукруглой головкой классов точности А и В. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 9 с.

					<i>110403.2020.593.00</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		102

35. ГОСТ 1535-2006. Прутки медные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2007. – 21 с.
36. ГОСТ 12652-74. Стеклотекстолит электротехнический листовой. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2008. – 31 с.
37. ГОСТ 11326.1-79. Кабель радиочастотный марки РК 50-2-11. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 7 с.
38. ГОСТ 617-2006. Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия. – М.: ИПК Стандартиформ, 2007. – 40 с.
39. Система. Обрабатывающий центр. – <https://frezaform.ru/>.
40. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: ИПК Стандартиформ, 2010. – 83 с.
41. Официальный сайт ANSYS. – <https://www.ansys.com>.
42. Фихтенгольц, Г.М. Математика для инженеров. Часть 1. / Г.М. Фихтенгольц. – Ленинград-Москва: Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. – 488 с.
43. Фихтенгольц, Г.М. Математика для инженеров. Часть 2. / Г.М. Фихтенгольц. – Ленинград-Москва: Государственное технико-теоретическое издательство, 1932. – 332 с.

