

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Факультет «Высшей школы электроники и компьютерных
наук» Кафедра «Конструирование и производство
радиоаппаратуры»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

_____ М.С. Воробьев
_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Н.И. Войтович
_____ 2017 г.

Разработка антенны контрольного выносного пункта глиссадного радиомаяка
системы ILS

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы
Доцент, к.т.н.

_____ Б.В. Жданов
_____ 2017 г.

Автор работы
Студент группы КЭ-273

_____ Р.С.Альметов
_____ 2017 г.

Нормоконтролёр
Инженер 1 категории

_____ Ю.А. Ташкинов
_____ 2017 г.

Челябинск 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ	9
2 ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
2.1 CST Microwave Studio	10
2.2 MATLAB	11
2.3 Выводы по разделу два	13
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
3.1 Создание модели логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027 изделия ГРМ СП-90	15
3.2 Получение характеристик электродинамической модели логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027.....	20
3.3 Сравнение экспериментальных и расчётных данных	29
3.4 Расчёт характеристик двухэлементной антенной решётки выносного контроля в программном пакете CST MWS.....	36
3.5 Предложения по изменению конструкции излучающего элемента с целью обеспечения КСВ менее 1,2 в полосе частот 328 – 336 МГц.....	39
3.6 Обзор и описание методов синтеза диаграммы направленности ..	41
3.6.1 Метод Вудворда – Лоусена	42
3.6.2 Метод Фурье	46
3.6.3 Генетический алгоритм оптимизации	49
3.7 Параметрический синтез антенны волновой канал с использованием программного пакета CST MWS	52
3.8 Выводы по разделу три	59
4 СОЗДАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ КВП-Г	60
4.1 Методика расчёта логопериодической антенны	61
4.2 Создание модели рассчитанной логопериодической антенны и получение результатов электродинамической модели	65
4.3 Описание конструкции конечной модели логопериодической антенны	71
4.4 Выводы по разделу четыре	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	77
ПРИЛОЖЕНИЯ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Рама. Спецификация	78
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Рама. Сборочный чертёж	79

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Втулка	80
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Вибратор	81
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Колпак	82
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Планка	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Лист технологический	84
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Фланец	85
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Перемычка	86
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Держатель	87
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Труба	88
ПРИЛОЖЕНИЕ М. Антенна КВП-Г. Спецификация	89
ПРИЛОЖЕНИЕ Н. Антенна КВП-Г. Сборочный чертёж	90
ПРИЛОЖЕНИЕ О. Крышка	91
ПРИЛОЖЕНИЕ П. Вставка	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Р. Крышка	93
ПРИЛОЖЕНИЕ С. Скоба	94
ПРИЛОЖЕНИЕ Т. Заглушка	95

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных требований к выполнению полетов является обеспечение безопасности при управлении воздушным судном как в воздухе, так и на земле. Обеспечение безопасности полетов воздушных судов выполняется комплексом организационных и технических мер и средств, выполняемые соответствующими Федеральными органами исполнительной власти в целом и конкретными должностными лицами. Средствами управления самолетов на земле являются средства радиотехнического обеспечения полетов и авиационная электросвязь. Таким образом, необходимо выполнение всех требований к составу, размещению, функционированию и периодическому контролю технических характеристик радиотехнических средств и авиационной электросвязи [1].

Контрольно-выносной пункт (КВП) предназначен для настройки радиомаяков и для непрерывного контроля положения линий курса (ЛК) и глиссады (ЛГ) и крутизны характеристики радиомаяков.

В состав КВП-К входят:

- две приемные антенны типа «волновой канал»;
- две мачты;
- два устройства контроля зоны (УКЗ).

В составе КВП-Г находятся те же устройства в одном экземпляре.

Антенна для контроля положения ЛК устанавливается на оси взлётно-посадочной полосы (ВПП), а антенна для контроля крутизны характеристики – в стороне от ЛК на расстоянии, определяемом шириной зоны курса.

КВП-Г устанавливается на удалении 27,5 – 48,5 м от передающих антенн ГРМ вдоль оси ВПП [2].

В существующем изделии ГРМ СП-90 в качестве приёмной антенны контрольно-выносного пункта используется логопериодическая антенна КВП-Г ТБИС.468571.027. Данная антенна обеспечивает ширину диаграммы

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		6

направленности по уровню -3 дБ в Н-плоскости равную 90^0 , а коэффициент стоячей волны (КСВ) в диапазоне частот 328 МГц – 336 МГц не более 2,5.

С целью уменьшить уровень излучения, направленный в землю, улучшить согласование, увеличить КПД и коэффициент разнослышимости сигнала (КРС), было предложено уменьшить ширину диаграммы направленности до 80^0 , обеспечить уровень заднего излучения менее -20 дБ и уменьшить КСВ до уровня не больше 1,2.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается:

- создать электродинамические модели антенны типа «волновой канал» и логопериодической антенны;
- применить алгоритм оптимизации на электродинамической модели антенны типа «волновой канал»;
- произвести необходимые расчёты для логопериодической антенны с целью обеспечить согласование в полосе частот 328 МГц – 336 МГц;
- выставить рассчитанные данные на электродинамической модели логопериодической антенны;
- выбрать лучший результат.

Подбор геометрических размеров элементов конструкции антенны путем практических экспериментов требует больших материальных и временных затрат. Поэтому на первом этапе работы актуальным является первоначальное численное моделирование, что стало возможным с появлением эффективных численных методов, специальных систем автоматизированного проектирования (САПР) и современных электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Это позволит существенно ускорить процесс разработки и исследования распределение излучающих элементов.

Применение САПР для электродинамического моделирования при проектировании антенн очень перспективно, поскольку исследование компьютерной модели позволяет получить все характеристики антенны. Современные программы для электромагнитного моделирования можно считать

виртуальными антенными лабораториями. Конечно, и здесь существуют свои проблемы, обусловленные несовершенством численных методов и ограниченностью аппаратных средств вычислительных машин, которые в значительной мере определяют скорость расчета.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		8

1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Целью настоящей работы является изменение конструкции существующей логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027 изделия ГРМ СП-90 или замена на новую антенну типа «волновой канал», и разработка конструкторской документации (КД) на новое изделие.

Требования, предъявляемые к новому изделию:

- 1) Величина КСВ в полосе частот 328 МГц – 336 МГц менее 1,2;
- 2) Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ в Н-плоскости равна 80° ;
- 3) Уровень заднего излучения менее -20 дБ.

В данной выпускной квалификационной работе будут созданы электродинамические модели логопериодической антенны и антенны типа «волновой канал», будет применён один из методов оптимизации на антенну типа «волновой канал» с целью выполнить предъявленные требования к изделию, также потребуется выполнить необходимые расчёты для логопериодической антенны с целью обеспечить согласование в полосе частот 328 МГц – 336 МГц.

Кроме создания электродинамической модели антенны, удовлетворяющей предъявленным требованиям к изделию, в работе требуется провести обзоры методов оптимизации (синтеза) антенн, обзоры существующих конструкции и исследование влияния некоторых конструктивных элементов на характеристики антенны.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		9

2 ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования антенн требуют значительных материальных затрат, поэтому актуальным стало создание численных моделей таких антенн. Модельные исследования в полной мере стали возможны лишь с появлением эффективных численных методов и современных высокоскоростных вычислительных машин.

2.1 CST Microwave Studio

CST Microwave Studio - это мощная программа трехмерного моделирования электромагнитного поля. Программа использует различные методы расчета поля (расчет переходного процесса во временной области, анализ в частотной области, метод нахождения собственных частот). Основной метод – расчет переходного процесса решает задачи возбуждения структуры радиоимпульсами, что отличает её от большинства других программных продуктов [3].

Программная среда CST Studio Suite представляет собой мощную платформу для решения электромагнитных задач. Удобный в использовании графический пользовательский интерфейс позволяет одновременно открывать для редактирования различные проекты, а также обеспечивает доступ к различным вычислительным устройствам пакета.

Не менее важная особенность Microwave Studio – возможность полной параметризации модели структуры (от геометрии до свойств материалов), которая использует переменные при определении каждого варьируемого параметра.

«Плюсы» CST Microwave Studio можно выделить в следующих разделах:

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		10

1) Наличие возможности выбора из нескольких решающих устройств, в том числе выбора различного типа сетки разбиения. Это делает программу достаточно гибким инструментом, позволяющим подобрать наиболее эффективный способ расчета широкого круга задач.

2) Реализуемый метод расчета во временной области исключительно устойчив. Использование временного решателя приближает процесс проектирования к реальному устройству так, что вычисляет форму отраженных и проходящих откликов на сигнал, подаваемый на вход устройства.

3) Гексагональная сетка разбиения, используемая в соответствующих решателях, в определенных задачах в значительной мере менее чувствительна к плотности сетки, чем тетраэдральная. Это позволяет получать оценочные результаты неплохой точности при относительно грубом гексагональном мешировании.

4) Граничные условия на гранях бокса пространства задачи также просто задаются в диалоге. При этом для расчета задач с излучением во внешнее пространство нет необходимости чертить воздушный бокс вокруг моделируемой структуры, соответствующие прослойки воздуха автоматически добавятся к структуре при выборе соответствующих граничных условий.

5) Возможность вычисления положения фазового центра антенн.

2.2 MATLAB

Основные преимущества MATLAB, выгодно выделяющие ее среди существующих ныне математических систем и пакетов (MathCad, Mathematica и др.), заключаются в следующем: система MATLAB специально создана для проведения именно инженерных расчетов: математический аппарат, используемый ею, предельно приближен к современному математическому аппарату инженера и ученого и опирается на вычисления с матрицами,

векторами и комплексными числами; графическое представление функциональных зависимостей здесь организовано в форме, требуемой именно инженерной документацией [4].

Язык программирования системы MATLAB очень прост, близок к языку Basic. Он содержит всего несколько десятков операторов. Незначительное количество операторов здесь компенсируется большим числом процедур и функций, смысл которых понятен специалистам с соответствующей математической и инженерной подготовкой.

В отличие от большинства математических систем, MATLAB является открытой системой – это означает, что практически все процедуры и функции MATLAB доступны не только для использования, но и для коррекции и модификации. MATLAB - система, которую пользователь может расширять по своему усмотрению созданными им программами и процедурами (подпрограммами). Её легко приспособить к решению нужных классов задач; очень удобна возможность, как составлять, собственные отдельные программы с целью многократного их использования для исследований, так и применять практически все вычислительные возможности системы в режиме чрезвычайно мощного научного калькулятора; это делает MATLAB незаменимым средством проведения научных и инженерных расчетных исследований; последние версии.

MATLAB позволяют легко интегрировать ее с текстовым редактором Word, что дает возможность использовать при составлении текстовых документов вычислительные и графические средства MATLAB. Возможности системы огромны, а по скорости выполнения задач она опережает многие другие подобные системы.

Относительные погрешности величин, полученных прямыми измерениями и участвующих в расчете искомой величины, должны быть малы по сравнению с единицей (на практике они не должны превышать 10%).

2.3 Выводы по разделу два

Среди всех ныне существующих программных пакетов для электродинамического моделирования, был выбран CST MICROWAVE STUDIO, так как это единственный программный пакет главным преимуществом которого является использование аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA). При моделировании трёхмерных структур, содержащих поверхности сложной кривизны, использование классической прямоугольной сетки разбиения приводит к необходимости использования слишком мелкой сетки и неоправданно большого числа ячеек. Однако и использование тетраэдральной сетки частично решает проблему и позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам, но требует особого внимания за тем, как модель разобьётся на тетраэдры. Технология PBA (рисунок 2.1) использует преимущества обоих перечисленных подходов, но обеспечивает беспрецедентный прирост производительности без потери точности вычислений.

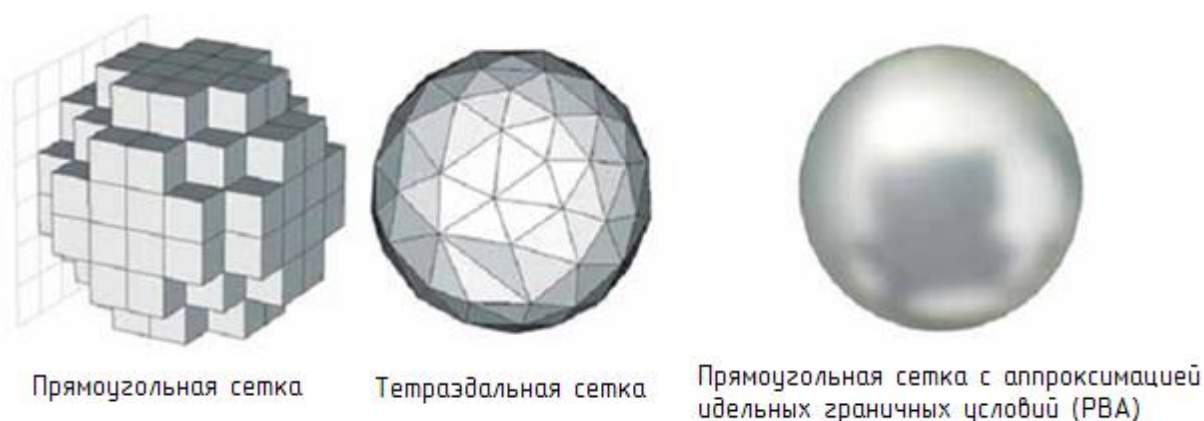


Рисунок 2.1 – Пример разбиения шара различными сетками

Среди математических пакетов был выбран MATLAB, так как именно ему было уделено не мало времени во время обучения, к тому же одноимённый язык программирования, используемый в данном пакете прикладных программ является довольно простым в изучении.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прежде, чем приступить к исследованиям, следует проверить, насколько точно совпадают результаты моделирования с характеристиками реальной антенны. Для этого была выбрана уже существующая логопериодическая антенна КВП-Г ТБИС.468571.027 изделия ГРМ СП-90. Схема экспериментальной установки (рисунок 3.1) будет состоят из: измеряемой логопериодической антенны, которая будет выполнять роль приёмной антенны, измерительного прибора, а также передающей антенны, поляризация которой должна совпадать с поляризацией приёмной антенны.

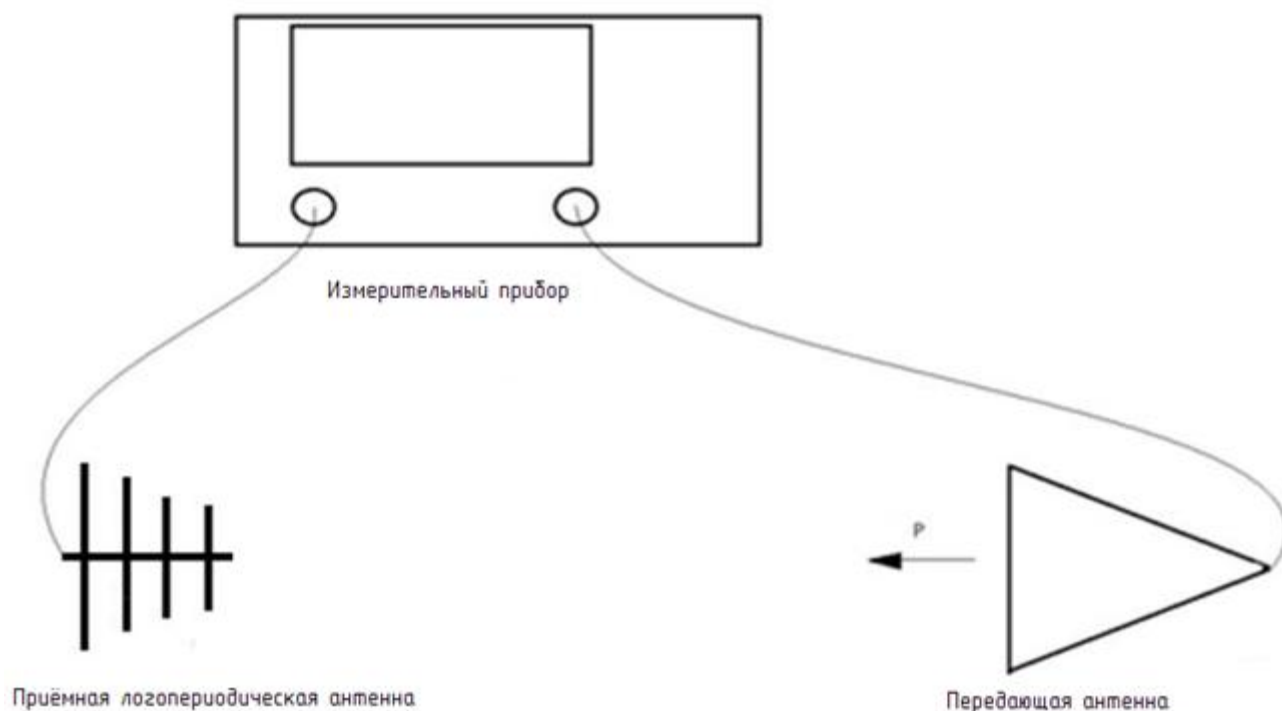


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки

В идеале, в ходе измерения диаграммы направленности, приёмная антенная должна вращаться в Н-плоскости относительно своего фазового центра, однако в эксперименте будет сложно реализовать это, не влияя на диаграмму направленности, поэтому антенна будет вращаться относительно крепления антенны, что скорее всего приведёт к неточности измерения диаграммы направленности.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

Лист
14

Что бы получить требуемые диаграммы направленности смоделируем логопериодическую антенну КВП-Г ТБИС.468571.027 в CST MWS.

3.1 Создание модели логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027 изделия ГРМ СП-90

Неопытные специалисты, принимаясь за работу, начинают моделировать электродинамическую модель в различных системах трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования типа Autodesk Inventor и SolidWorks, чтобы потом перенести модель в формат STEP и импортировать в CST MWS. Всё это было связано, в большей степени, с неудобством интерфейса программного пакета CST MWS. Однако, с 2013 года CST STUDIO SUITE изменили пользовательский интерфейс программного пакета в лучшую сторону. Интерфейс превратился в динамически обновляемые панели. Он нацелен на постоянное сопровождение разработчика во время всего рабочего процесса и предоставление ему все необходимые инструменты построения структур, моделирования, постобработки. Интерфейс также дополнен новыми возможностями в виде мастера конфигурации и интерактивного помощника, упрощающими процесс подготовки и конфигурирования нового проекта.

Так как у нас имеются все чертежи логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027, создание модели и выбор характеристик материалов для деталей не составит большого труда.

На рисунке 3.2 представлены все алюминиевые детали и детали из сплавов алюминия. Эта конструкция состоит из: 2 труб, 8 вибраторов, 1 держателя, 1 перемычки и 1 трубки. В конструкцию не были включены скобы и колпак на разъём для защиты от влаги, так как они практически не влияют на характеристики антенны, но увеличивают количество ячеек сетки, что приведёт к увеличению времени расчёта. Также не были смоделированы все возможные отверстия для креплений по той же причине.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		15

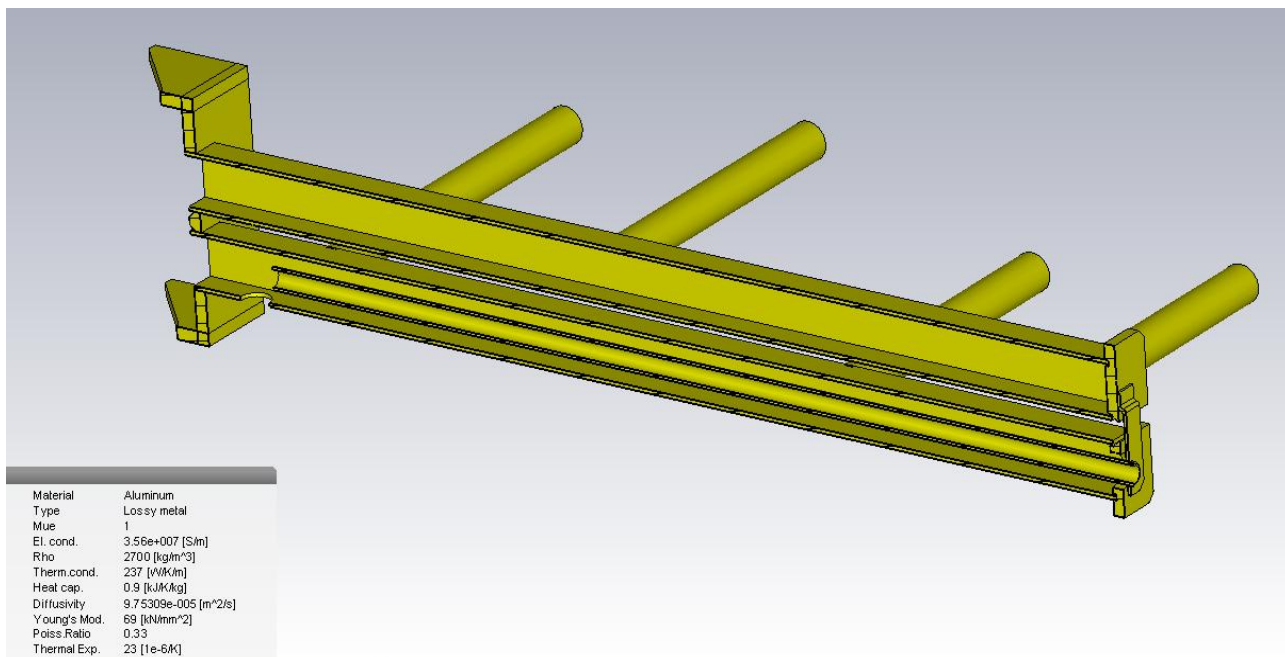


Рисунок 3.2 – Модель рамы логопериодической антенны

Задняя крышка (рисунок 3.3) изготовлена из стеклотекстолита марки СТЭФ-1 толщиной 1,5 мм, крепится двумя винтами к держателю.

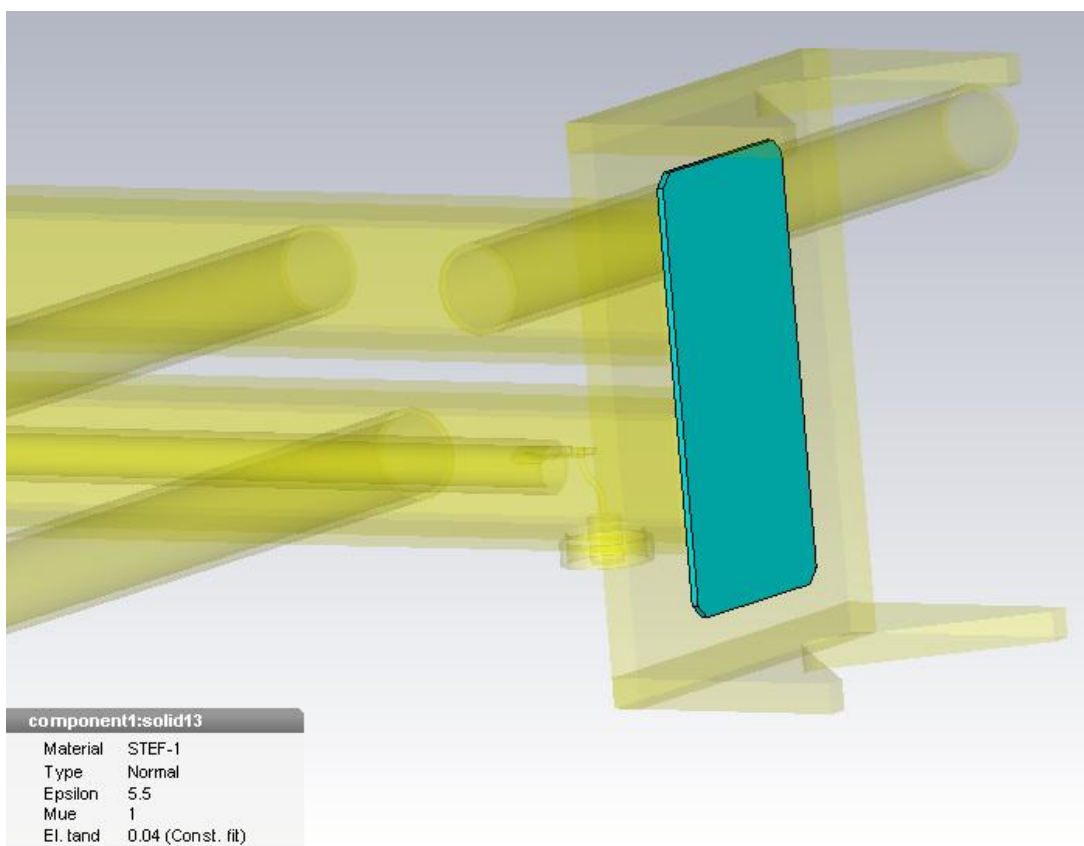


Рисунок 3.3 – Модель задней крышки

Лепесток (рисунок 3.4) изготовлен из листа АПМ-1М алюминий, плакированный медью, приваривается к трубке. Так как ток будет течь по поверхности, а деталь покрыта медью, было решено задать материал лепестка как медь (copper).

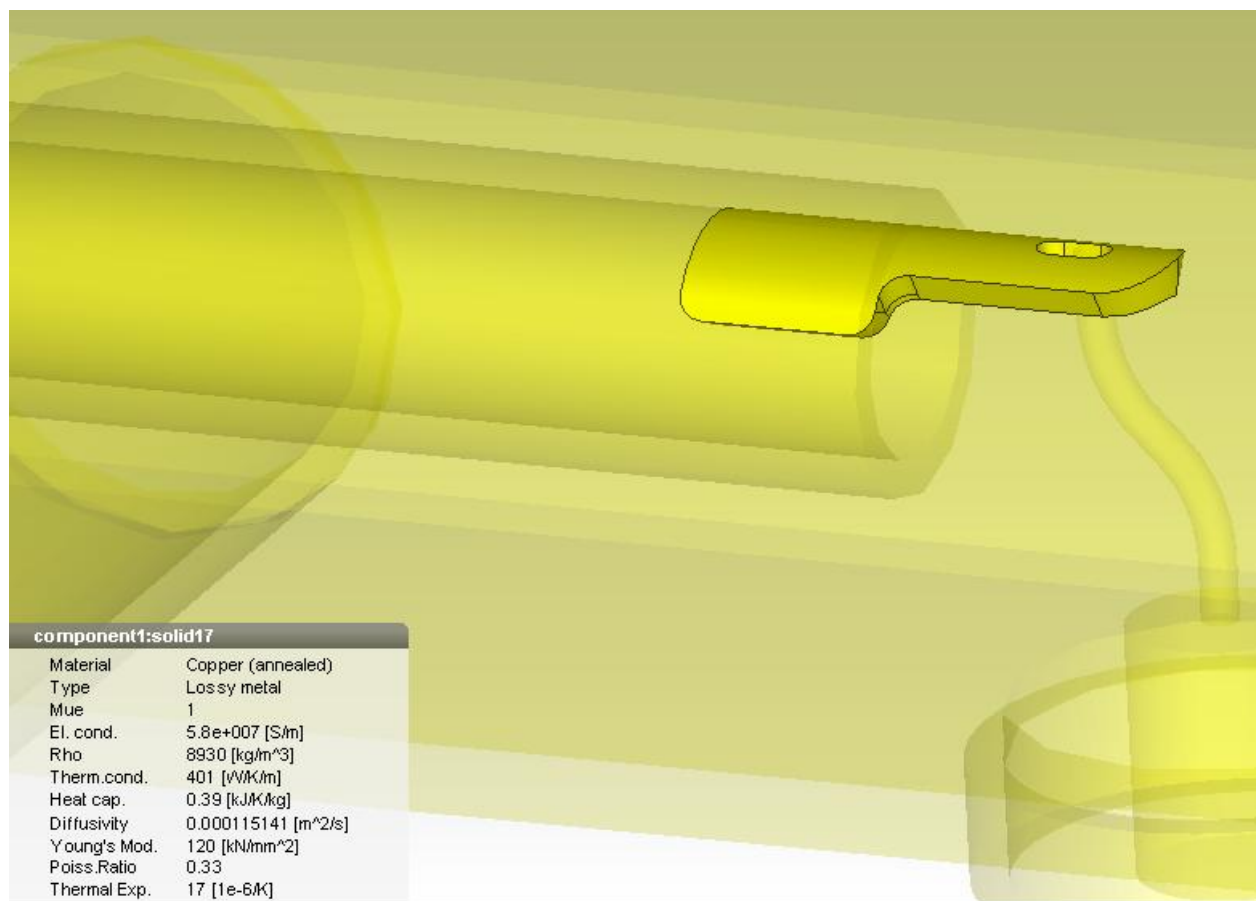


Рисунок 3.4 – Модель лепестка

Передняя крышка (рисунок 3.5) изготовлена из пресс-материала АГ-4В, волокнит на основе стеклянных нитей. Также возможно изготовление механически из капролона ПА блочного, марки «Б», высшего сорта. В электродинамической модели крышке заданы свойства стекловолокна.

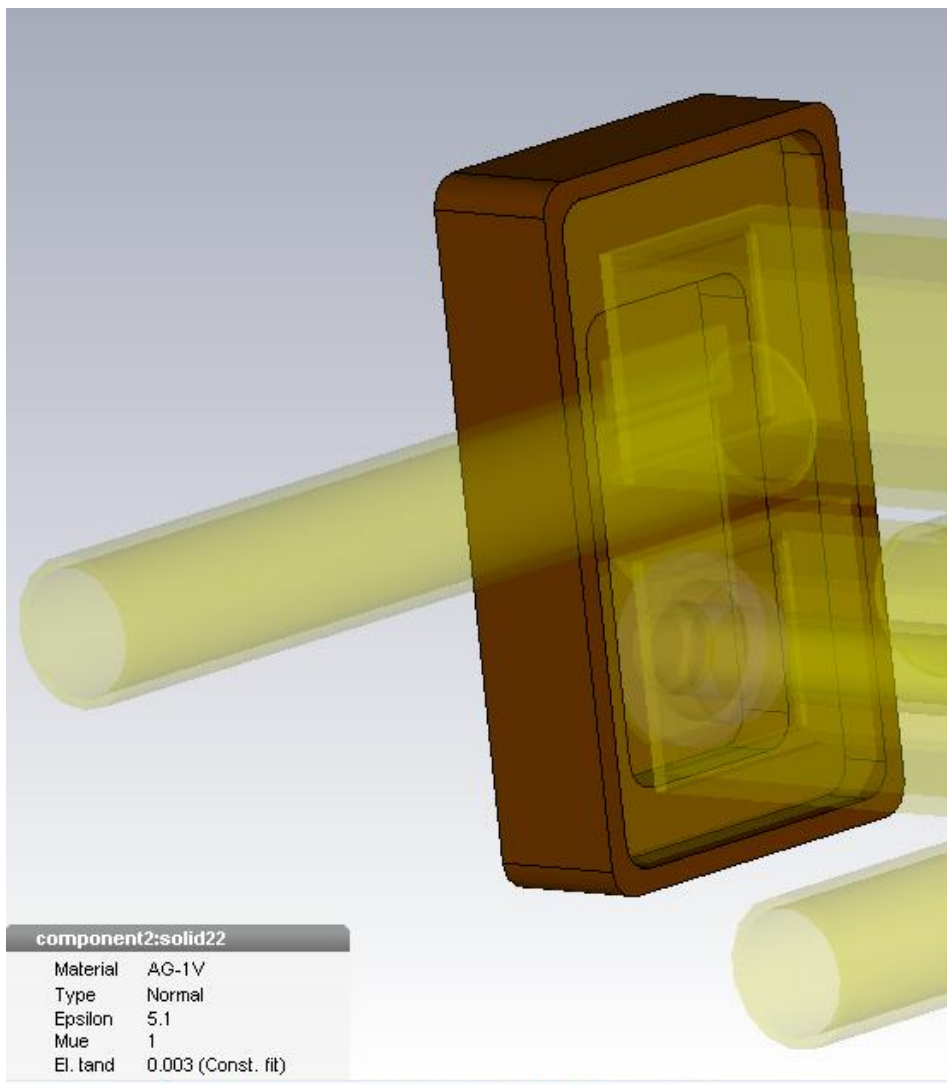


Рисунок 3.5 – Модель передней крышки

Заглушки (рисунок 3.6) изготовлены из стержня ПА-6 марка А.

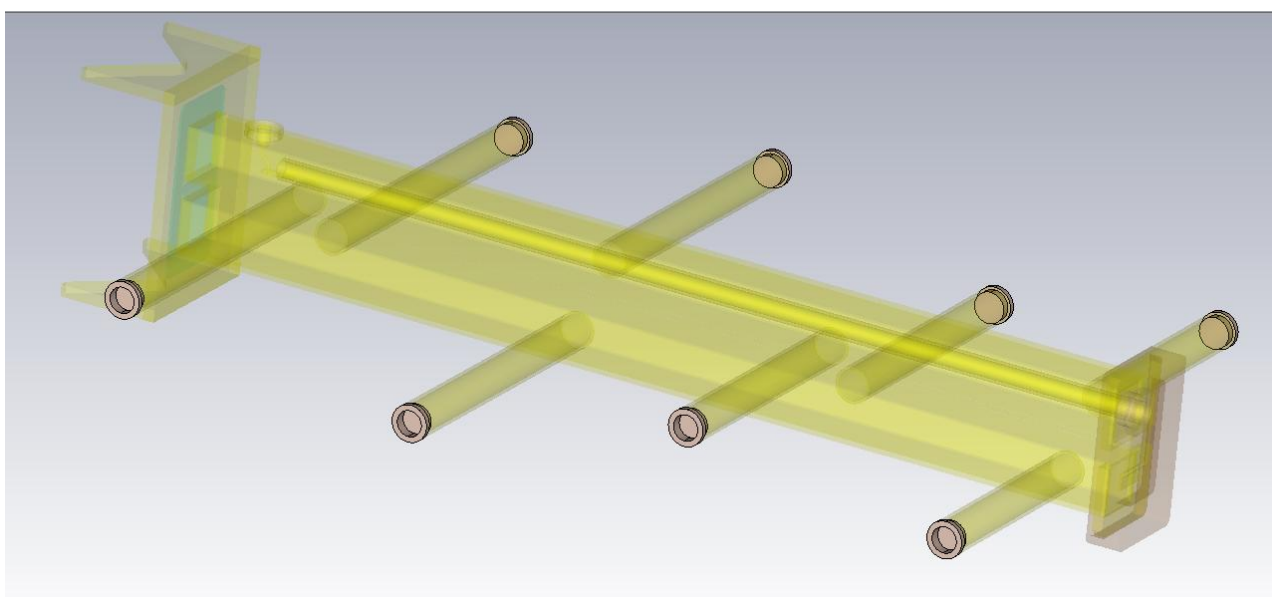


Рисунок 3.6 – Модель заглушек

В изделии используется розетка СР-50-165ФВ (рисунок 3.7) и проволока ММ-1,5, которая припаивается между жилкой розетки и лепестком.



Рисунок 3.7 – Розетка фланцевая приборная СР-50-165ФВ

Так как точно моделировать розетку нет необходимости, были найдены размеры жилки, диэлектрика и оплётки розетки и смоделирована коаксиальная линия, входящая в трубу (рисунок 3.8).

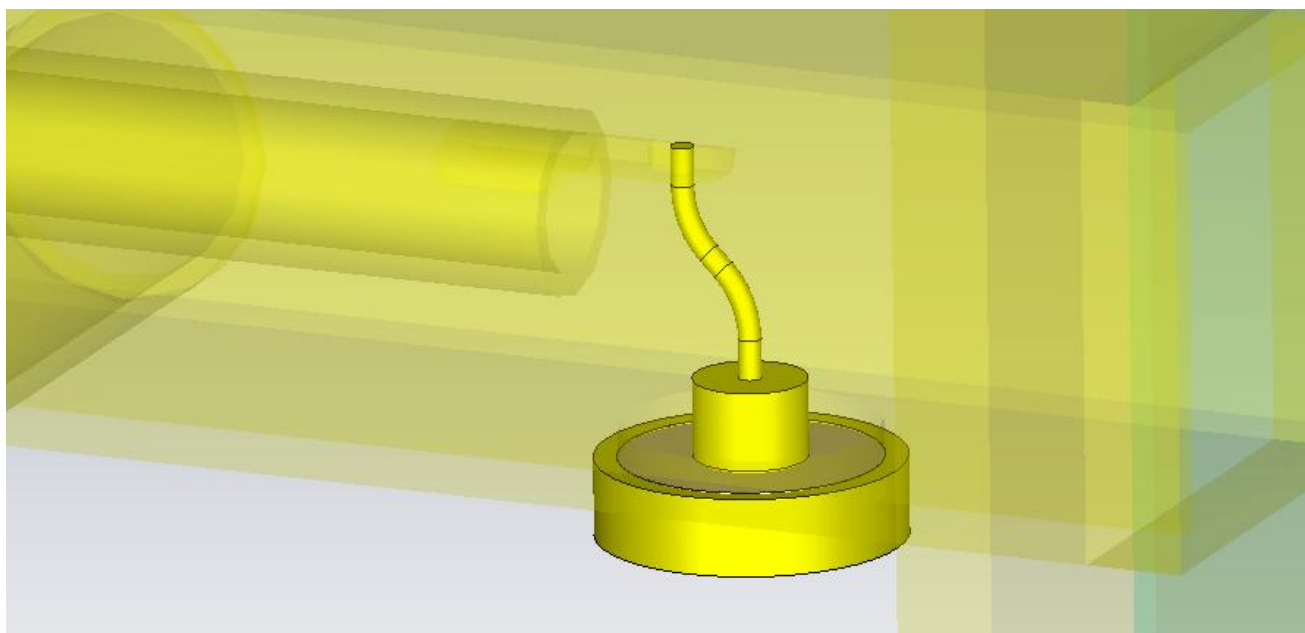


Рисунок 3.8 – Модель розетки и проволоки

В результате получили модель, изображённую на рисунке 3.9.

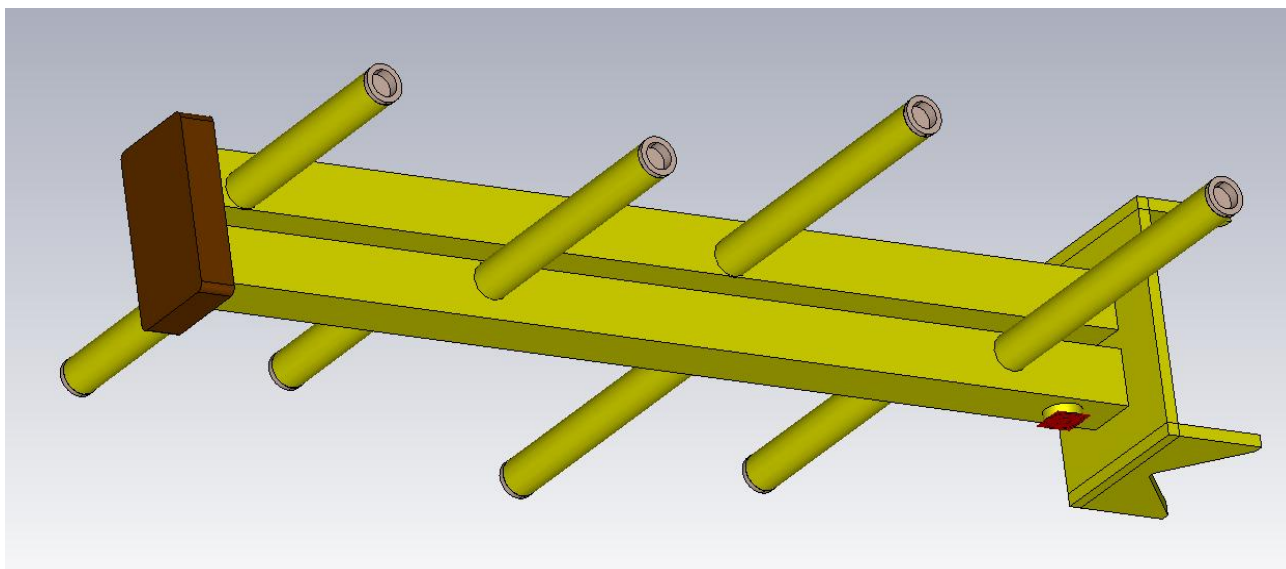


Рисунок 3.9 – Модель логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027, созданная по чертежам

3.2 Получение характеристик электродинамической модели логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027

Прежде чем приступить к решению данной задачи следует задать диапазон частот в котором будет решаться задача, установить характеристики окружающей среды, установить граничные условия, задать приемлемую сетку и требуемые нам мониторы поля.

Чтобы задать диапазон частот в котором будет решаться задача следует перейти по следующему пути «Simulation/Frequency» (Рисунок 3.10), в результате чего должно выскочить окошко «Frequency Range Settings» в котором зададим диапазон частот от 200 МГц до 460 МГц, диапазон рекомендуют задавать так, чтобы центральная частота находилась в требуемом нам диапазоне частот. Логопериодическая антенна КВП-Г работает в диапазоне 328 МГц – 336 МГц, в заданном нами диапазоне центральная частота 330 МГц, следовательно, рекомендация выполнена.

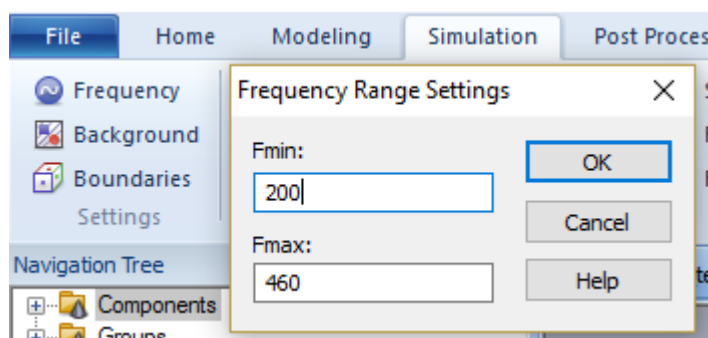


Рисунок 3.10 – Окно «Frequency Range Settings»

Окружающая среда по умолчанию ставится как вакуум, нам же потребуется заменить свойства окружающей среды на свойства воздуха, для этого следует перейти по следующему пути «Simulation/Background» (рисунок 3.11), в результате чего должно выскочить окошко «Background Properties», в данном окне следует нажать кнопку «Properties...» и должно появиться ещё одно окно «Background Material Parameters» (рисунок 3.12), где требуется нажать на кнопку «Copy Properties from Material...», далее выбираем «Air» (рисунок 3.13) и щёлкаем на «Ok».

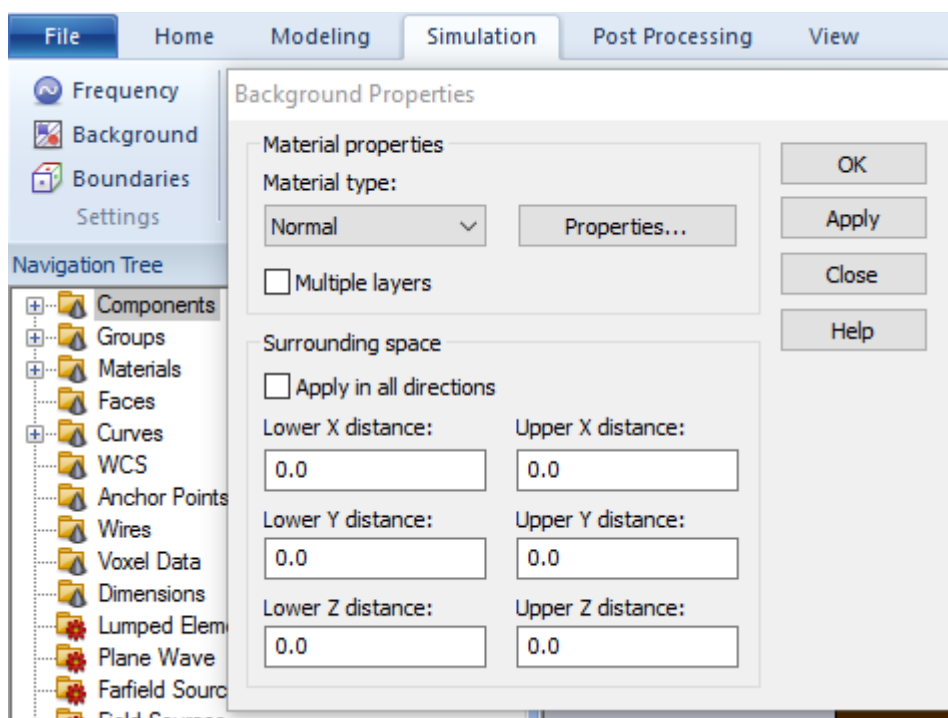


Рисунок 3.11 – Окно «Background Properties»

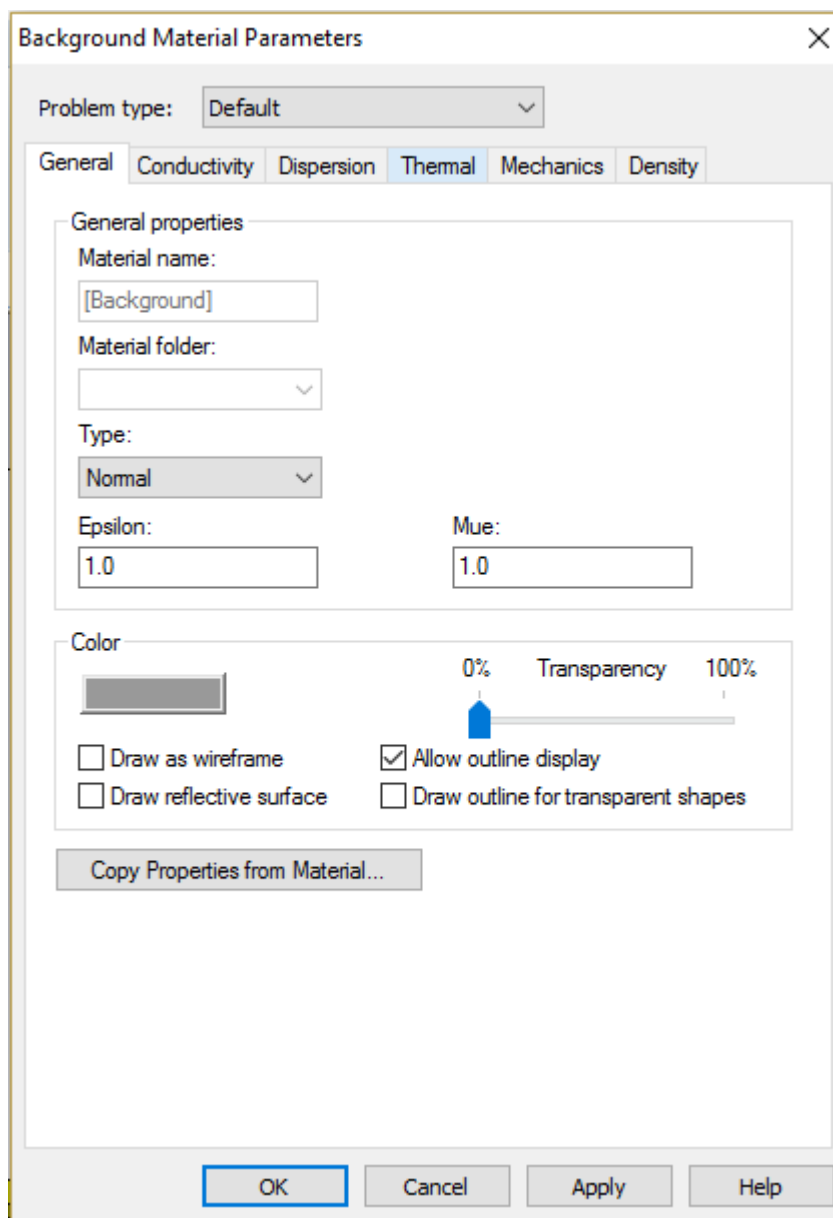


Рисунок 3.12 – Окно «Background Material Parameters»

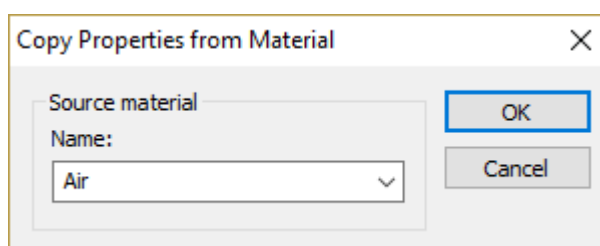


Рисунок 3.13 – Выбор материала для копирования свойств

Граничные условия в нашем случае по умолчанию были установлены на идеальный проводящий слой $\epsilon_t = 0$. Что бы изменить их следует перейти по следующему пути «Simulation/Boundaries», в результате должно появиться окно «Boundary Conditions» (рисунок 3.14), в данном окне следует установить галочку

на «Apply in all directions», что означает применить во всех направлениях, и задать «Type: open (add space)», то есть открытые граничные условия с добавлением пустого пространства, по умолчанию пустое пространство добавляется в размере 4 длин волн от центральной частоты заданного ранее диапазона частот, данного пространства нам хватит.

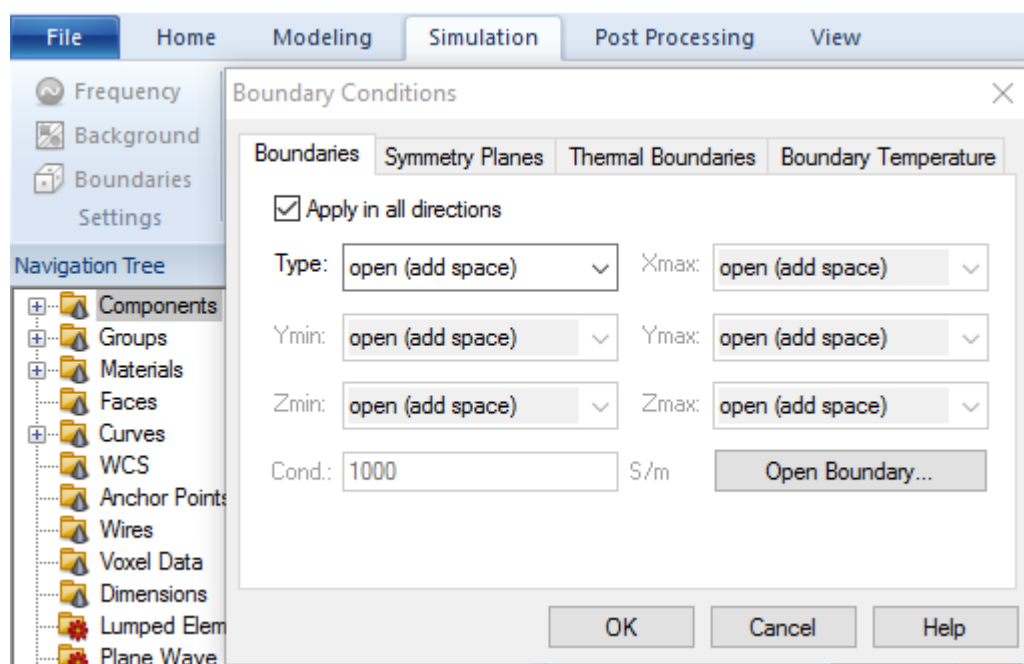


Рисунок 3.14 – Окно «Boundary Conditions»

Так как модель возбуждается с коаксиальной линии, применим волноводный порт для возбуждения волны в коаксиальной линии. Сигнал поданный на вход антенны изображён на рисунке 3.15.

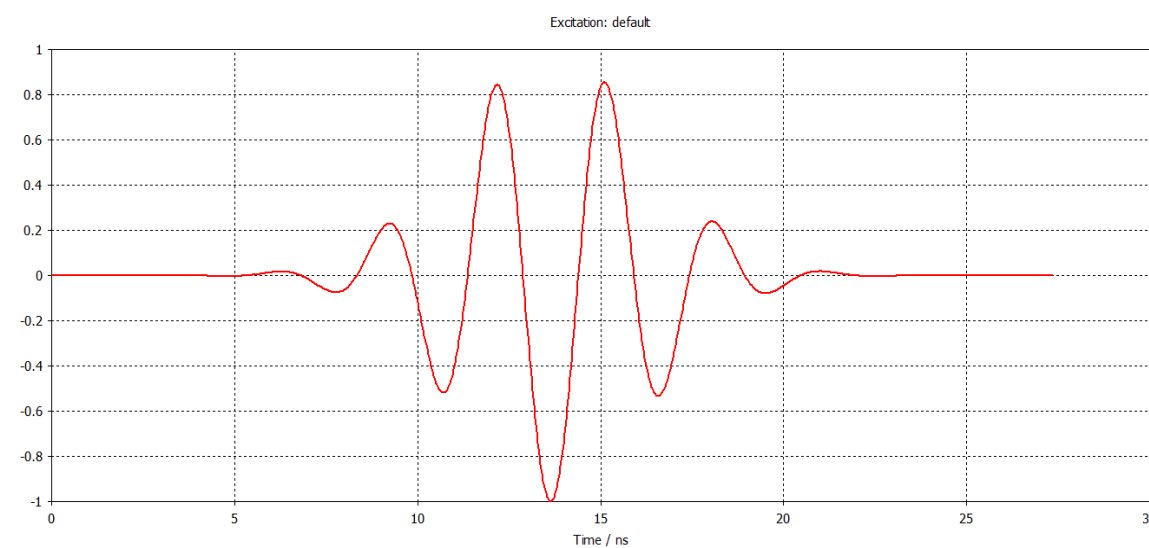


Рисунок 3.15 – Гауссовский сигнал, поданный на вход антенны

Как известно CST MWS раскладывает данный сигнал в спектр, в результате чего получается большое количество синусов и косинусов с различной амплитудой от 0,1 до 1 и частотами от 200 МГц до 460 МГц. Далее происходит решение 4-ёх мерных уравнений Максвелла в интегральном виде, методом конечных интегралов, для каждого синуса и косинуса. Одним из преимуществ разложения сигнала в спектр является следующее: сигнал, проходя по цепи, претерпевает изменения, усиление, задержку, отражение, модулирование, детектирование, изменение фазы. В результате чего на выходе получаем множество изменённых сигналов, которые в сумме дадут один изменённый сигнал с заданным спектром частот.

В результате решения получили следующие сигналы (рисунок 3.16):

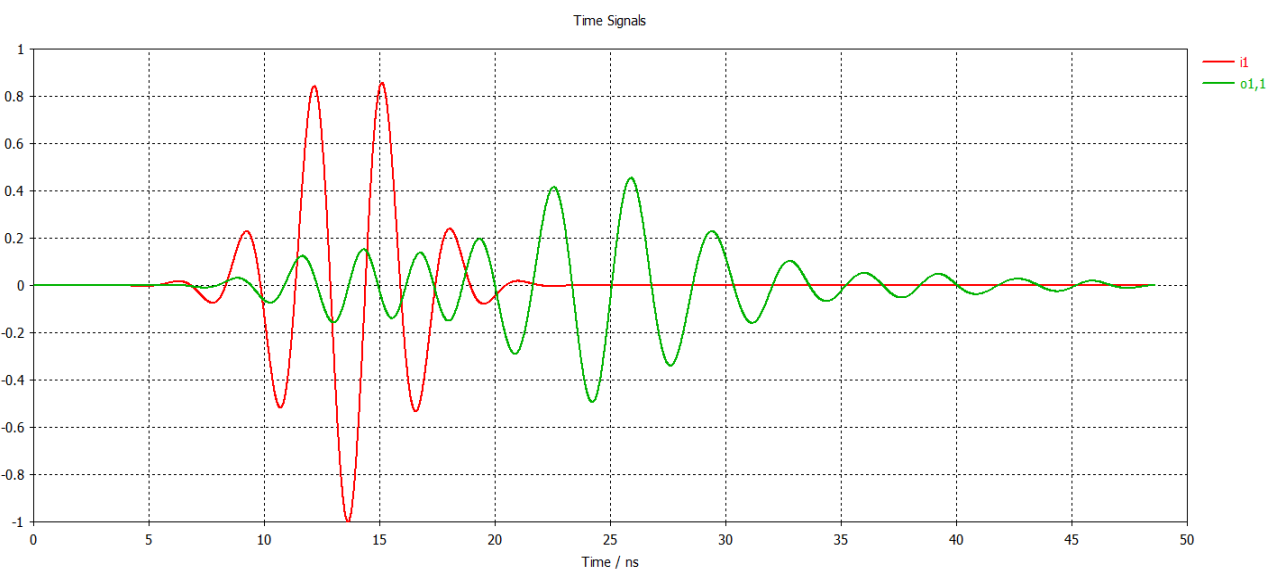


Рисунок 3.16 – Сигнал, поданный на вход и отражённый сигнал, вернувшийся на вход

По полученному S-параметру (рисунок 3.17) можно сделать вывод что антенна немного согласована на частоте 398,12 МГц. Однако, если прочитать технические требования на изделие, то там написано об уровне коэффициента стоячей волны (КСВ) в диапазоне частот 328 МГц – 336 МГц не выше 2,5 с погрешностью не больше 15%.

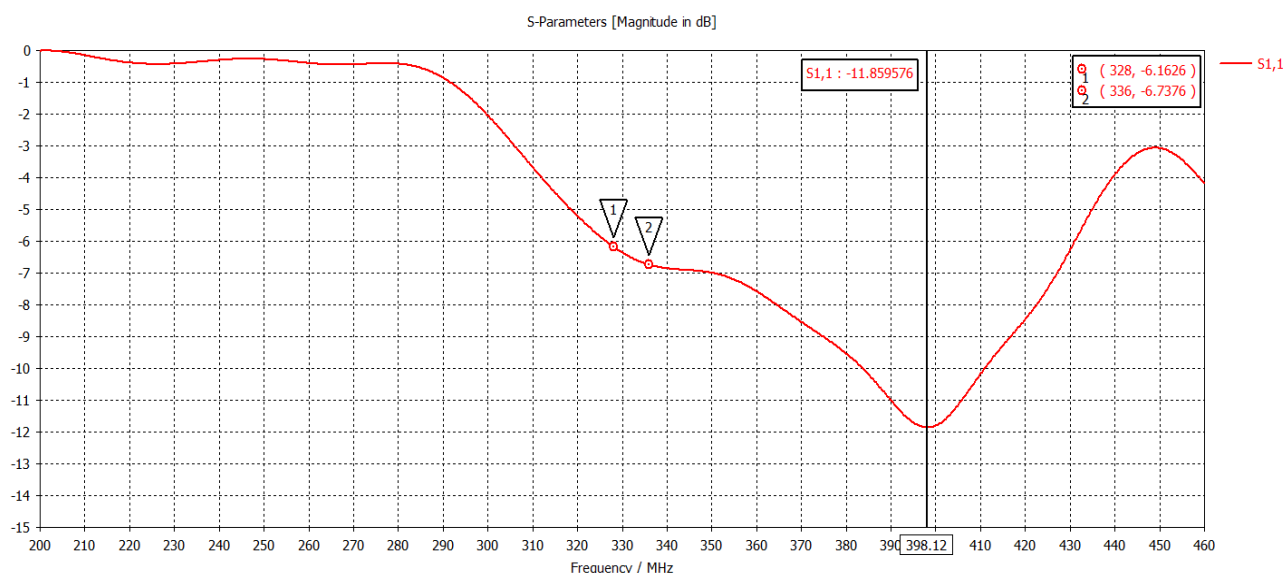


Рисунок 3.17 – Полученный S-параметр

Переведём полученный S-параметр в график зависимости коэффициента стоячей волны от частоты (рисунок 3.18).

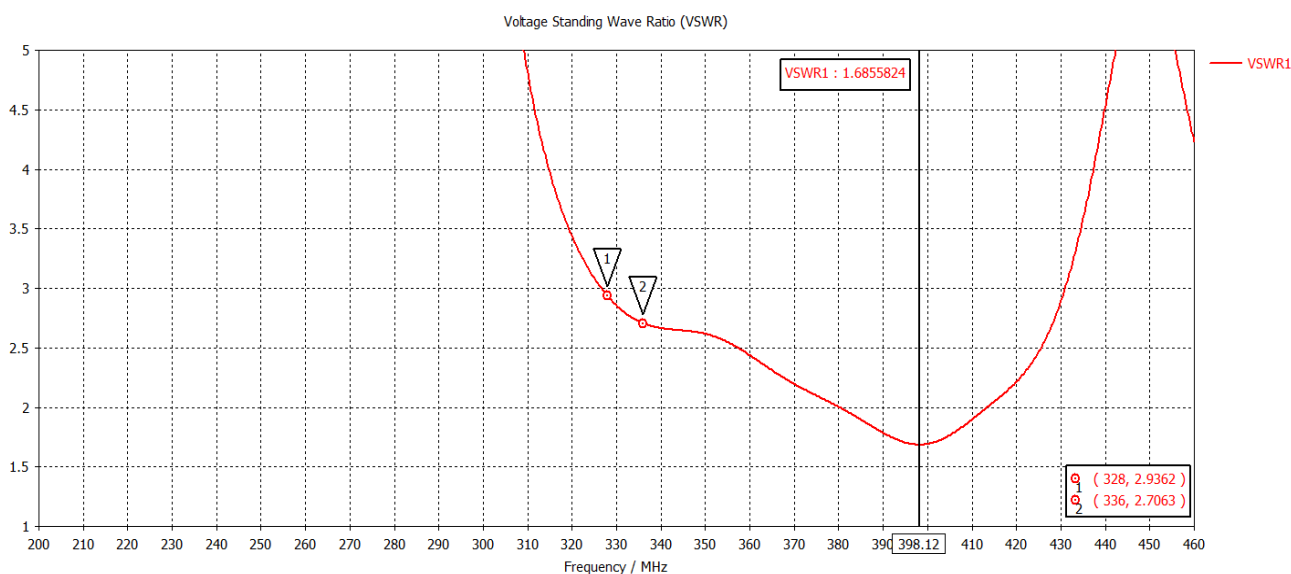


Рисунок 3.18 – Полученный КСВ (VSWR)

Можно сделать вывод, что с учётом некоторой систематической погрешности, полученный результат удовлетворяет техническим требованиям по КСВ, однако даже на частоте, на которой антенна согласована, она имеет уровень КСВ равный 1,69. Чтобы разобраться с этим требуется взглянуть на графики зависимости входного сопротивления от частоты (рисунок 3.19, рисунок 3.20).

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

Лист
25

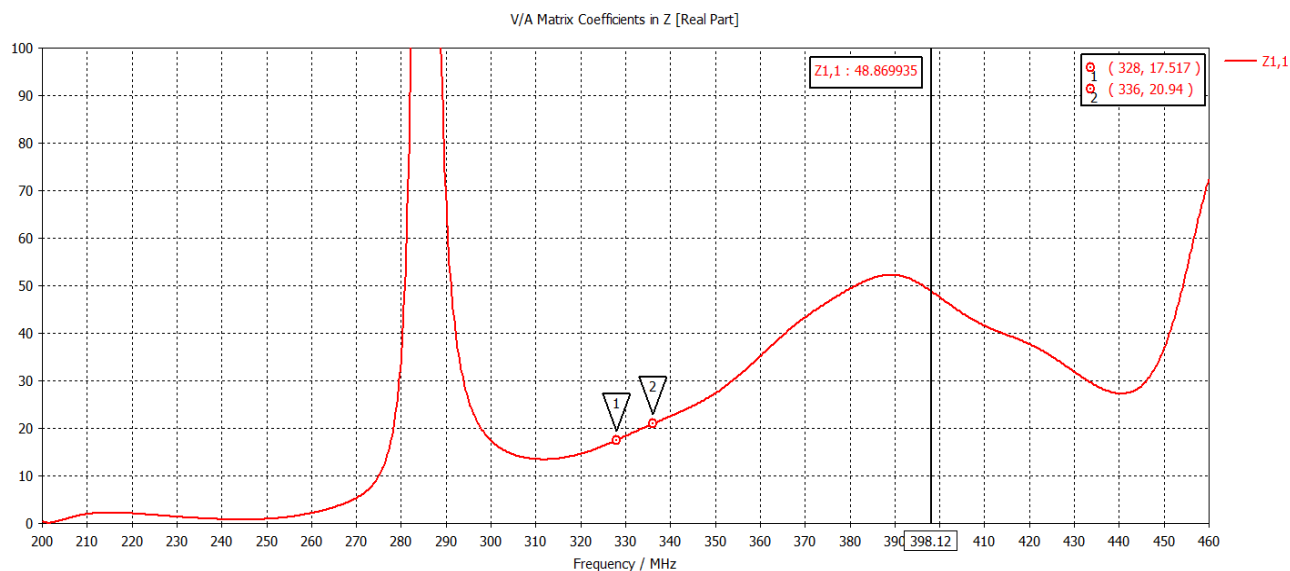


Рисунок 3.19 – Активное сопротивление

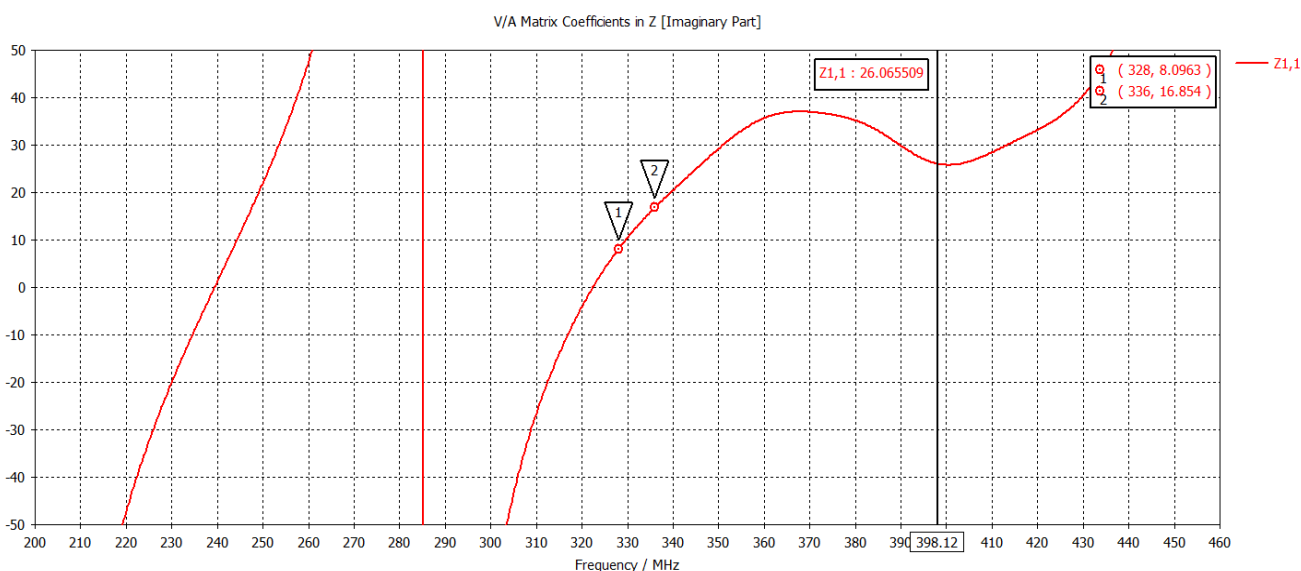


Рисунок 3.20 – Реактивное сопротивление

По графикам сопротивлений видно, что в нашем диапазоне частот 328 МГц – 336 МГц входное активное сопротивление отличается от 50 Ом больше чем в 2 раза, к тому же имеет индуктивный характер как в нашем диапазоне, так и на частоте 398,12 МГц. Индуктивный характер сопротивления вносится, скорее всего, наличием перехода от коаксиальной розетки к трубке, через проволоку и лепесток. Это можно легко проверить, установив порт в коаксиальной линии образованной трубкой (жилкой) и трубой (оплёткой). Волновое сопротивление линии можно заранее просчитать в программном пакете TXLINE, как известно, квадратная коаксиальная линия является аналогом

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

обычной коаксиальной линии, причём внешний диаметр квадратной коаксиальной линии берётся равным внутренней стороне квадрата (рисунок 3.21).

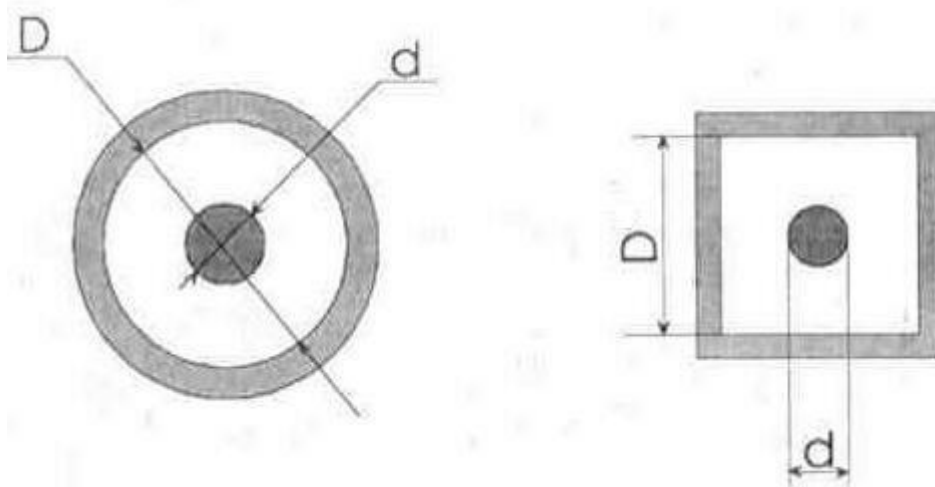


Рисунок 3.21 – Сравнение квадратной и обычной коаксиальных линий

Внешний диаметр трубки 12 мм, а внутренняя сторона квадрата 26 мм, диэлектрическое заполнение из воздуха. Зададим данные параметры в программном пакете TXLINE (рисунок 3.22), в результате получим волновое сопротивление равное 46,36 Ом.

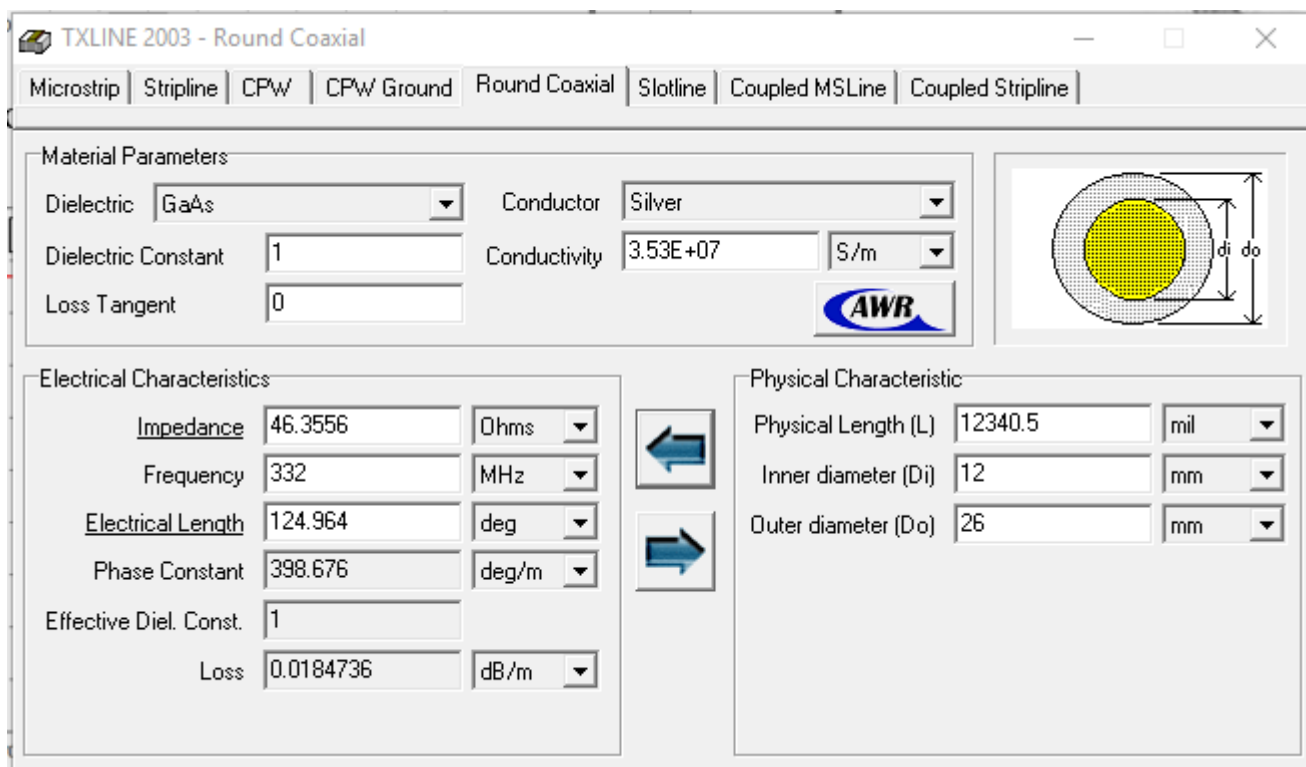


Рисунок 3.22 – Окно TXLINE

В CST MWS порт будет выглядеть следующим образом (рисунок 3.23).

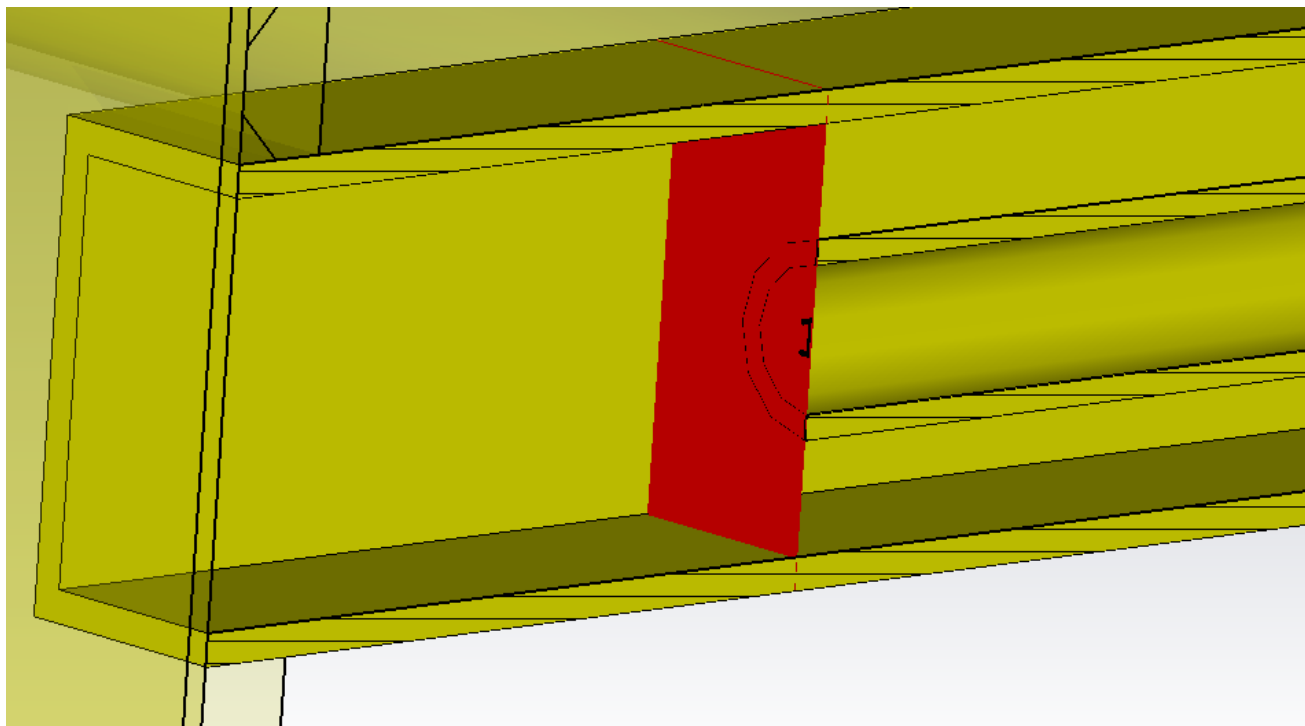


Рисунок 3.23 – Задание волноводного порта на квадратной коаксиальной линии

Произведя расчёт, мы получили следующие результаты (рисунок 3.24, рисунок 3.25).

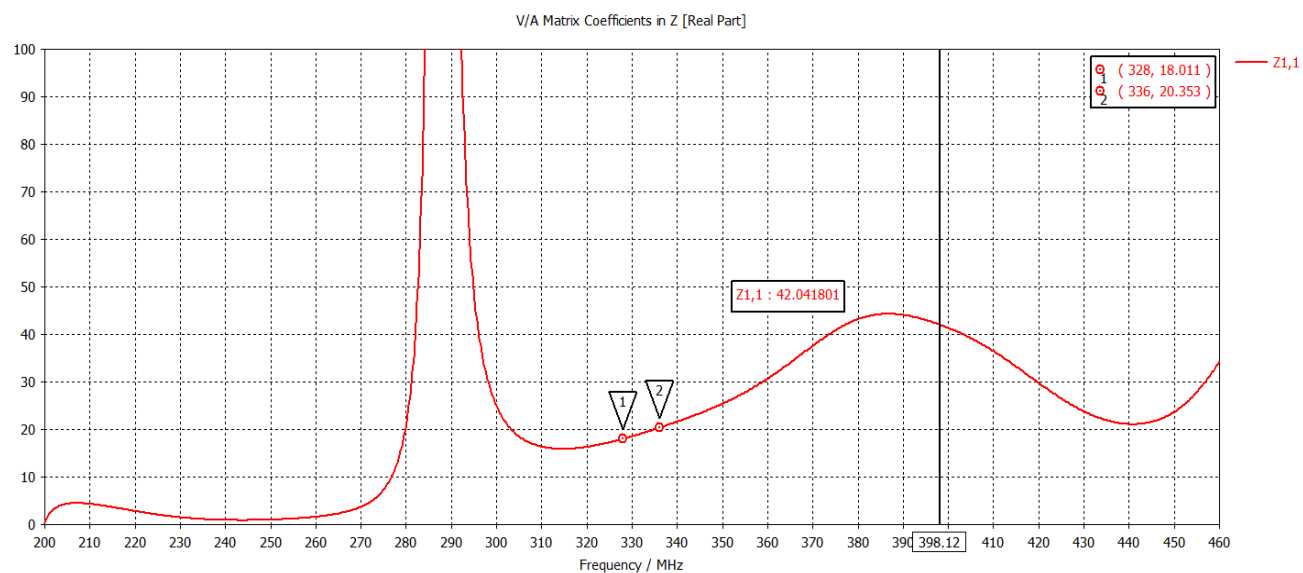


Рисунок 3.24 – Активное сопротивление на входе

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

Лист
28

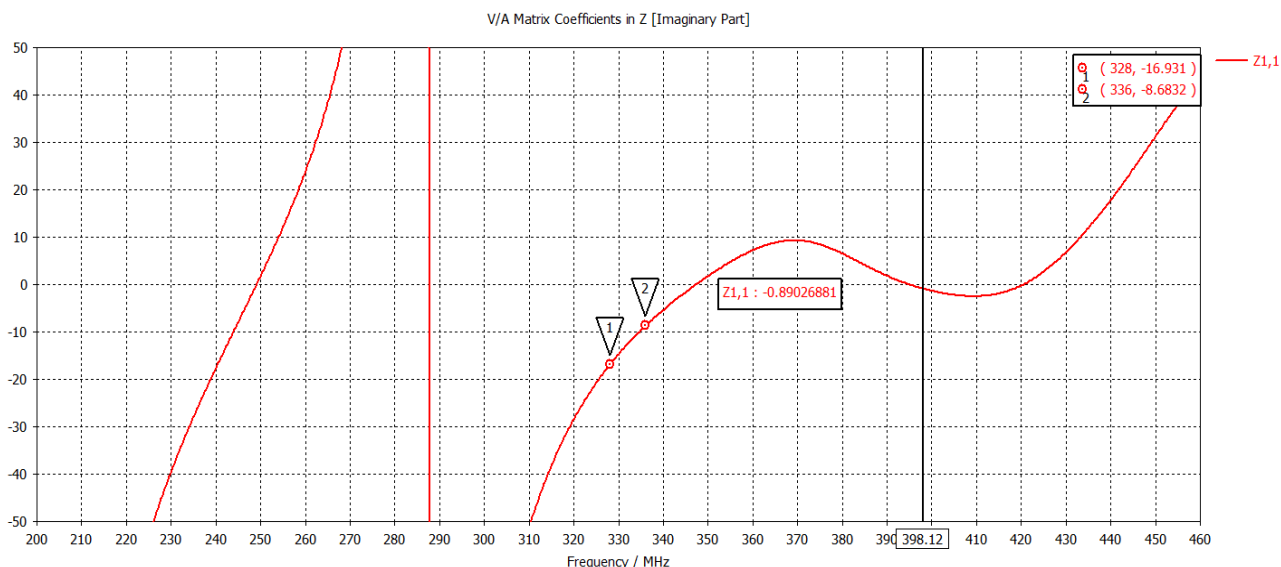


Рисунок 3.25 – Реактивное сопротивление на входе

Предположение о том, что проволока и лепесток вносят индуктивность, оказалось верным, выводы об это будут рассмотрены в другом подразделе.

3.3 Сравнение экспериментальных и расчётных данных

Приступим к сравнению результатов, полученных в CST MWS и на реальной логопериодической антенне КВП-Г ТБИС.468571.027, конкретно, будут сравниваться диаграммы направленности. Как говорилось ранее, при измерении диаграммы направленности на практике, довольно сложно организовать вращение логопериодической антенны вокруг фазового центра, не влияя на диаграмму направленности антенны, а вращение передающей антенны вокруг приёмной по определённому радиусу требует большой открытой местности. Поэтому на практике приёмная логопериодическая антенна будет вращаться относительно своего крепления. Чтобы сравнить как будут отличаться полуокружности по котором будет вестись измерение диаграммы направленности логопериодической антенны, требуется определить фазовый центр логопериодической антенны.

Фазовый центр антенны – это точка, в которую можно поместить одиночный излучатель сферической волны, эквивалентный рассматриваемой антенной системе в отношении фазы создаваемого поля.

В программном пакете CST MWS имеется инструмент для определения фазового центра антенны по диаграмме направленности. Для этого следует перейти к навигационному дереву «Navigation Tree», раскрыть папку «Farfields», щёлкнуть правой кнопкой мыши на интересующую нас диаграмму направленности (рисунок 3.26) и выбрать «Farfield Plot Properties...».

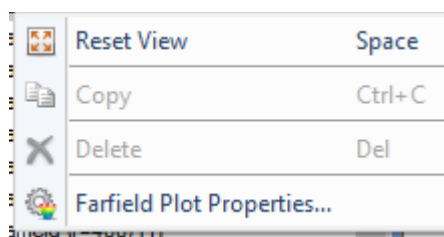


Рисунок 3.26 – Выпадающее окошко при щелчке правой кнопкой мыши

В результате должно открыться окно «Farfield Plot» (рисунок 3.27), в данном окне следует перейти ко вкладке «Axes» и выставить координаты «Theta» и «Phi» относительно диаграммы направленности аналогично тому, как показано на рисунке 3.28.

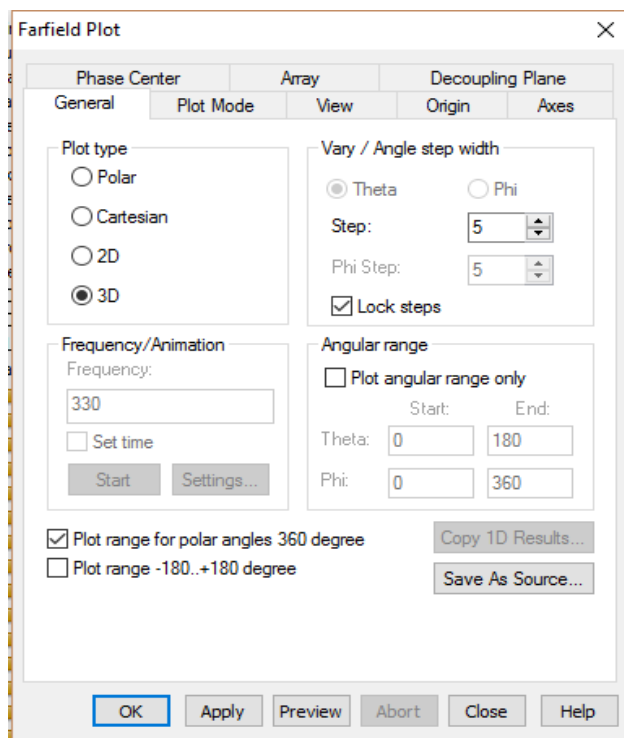


Рисунок 3.27 – Окно «Farfield Plot»

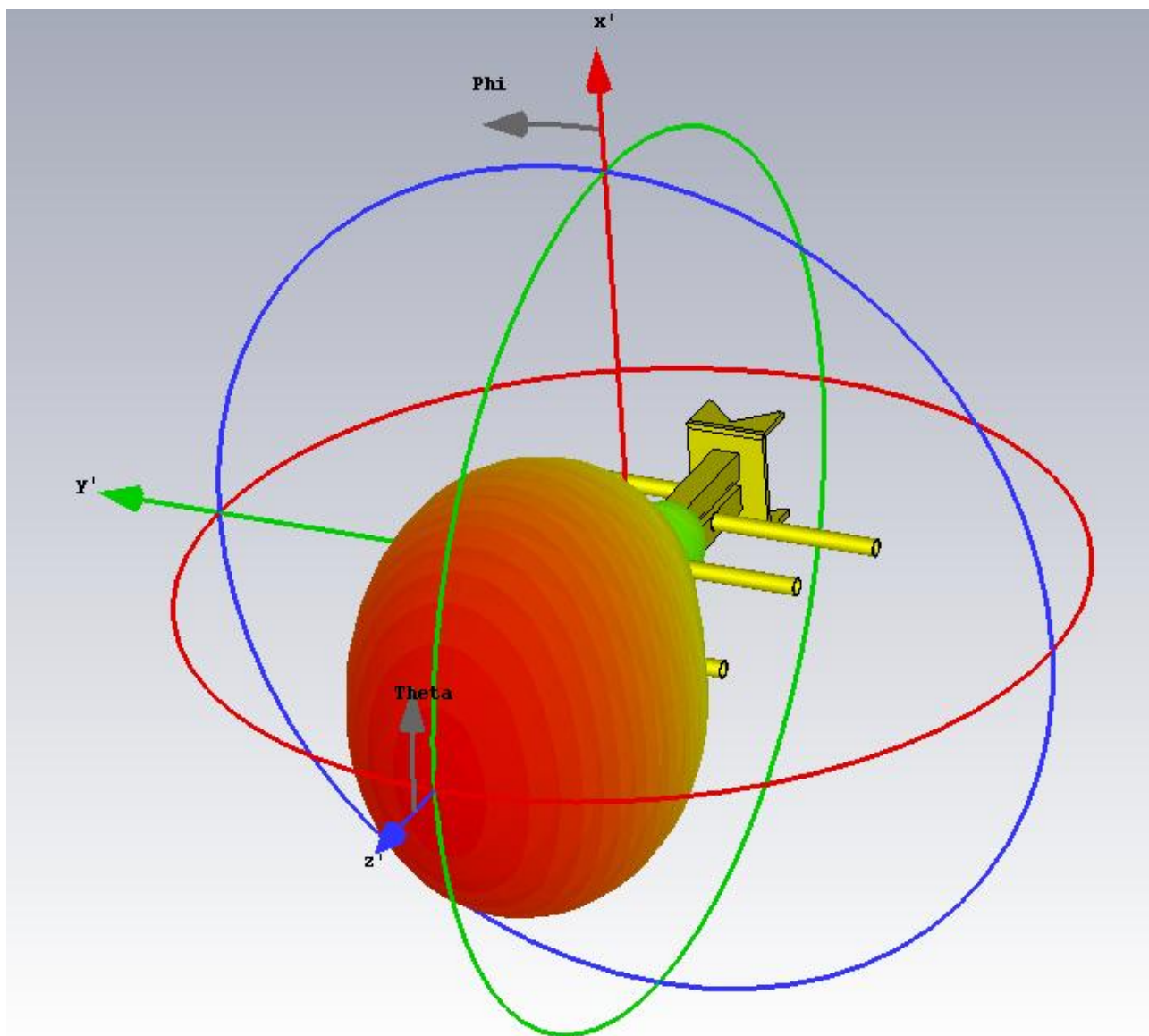


Рисунок 3.28 – Правильное выставление координат Theta и Phi относительно диаграммы направленности.

Далее перейдя ко вкладке «Phase Center» (рисунок 3.29), следует установить галочку на «Calculate phase center». В подокне «E-field component» следует указать поляризацию диаграммы направленности, «Theta» – поляризация вдоль оси Theta, «Phi» – поляризация вдоль оси Phi, «Boresight» – программа производит расчёт поля вдоль оси z' и извлекает вектор поляризации из этого поля, используя его для вычисления фазы. В подокне «Plane» следует указать плоскость, в которой будет рассчитываться фазовый центр, «Both» – обе плоскости, «E-plane» - в случае правильного расположения координат как показано на рисунке 3.28, это плоскость соответствует

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

горизонтальной плоскости в нашем случае, «H-plane» - в случае правильного расположения координат как показано на рисунке 3.28, это плоскость соответствует вертикальной плоскости в нашем случае. В подокне «Angular limit around z'-axis» следует указать угол вокруг оси z' в котором будет рассчитываться фазовый центр, обычно принято брать угол равный ширине диаграммы направленности по уровню -3 дБ. В нашем случае были выставлены параметры как показано на рисунке 3.29.

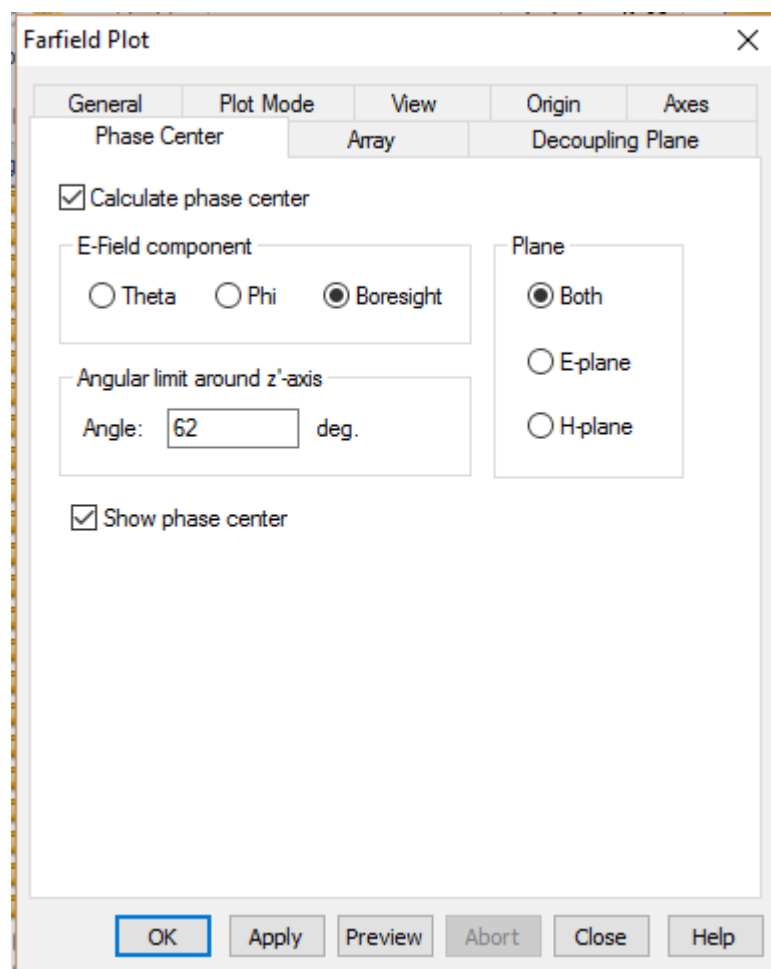


Рисунок 3.29 – Параметры «Phase Center»

Угол вокруг оси z' был выбран 62 градуса, так как диаграмма направленности вдоль оси z' не абсолютно симметричная, то есть ширина диаграммы направленности в E плоскости равняется 62 градусам, а в H плоскости 90 градусам. В результате чего, была выбрана наименьшая ширина диаграммы направленности. После нажатия на кнопку «Ок», в нижнем правом

углу в информационном окне появятся координаты фазового центра (рисунок 3.30) и погрешность расчёта координат фазового центра.

Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Monitor	farfield (f=330) [1]
Component	Abs
Output	E-Field(r=1m)
Frequency	330
Rad. effic.	0.9929
Tot. effic.	0.4520
E _{max}	1.000
Phase center	(-0.160813, 21.8245, 316.41) Sigma 2.24758

Рисунок 3.30 – Информационное окно с координатами фазового центра

Смоделируем сферу радиусом 2 мм и центром в координатах фазового центра (рисунок 3.31), чтобы показать на сколько удалён фазовый центр от крепления антенны.

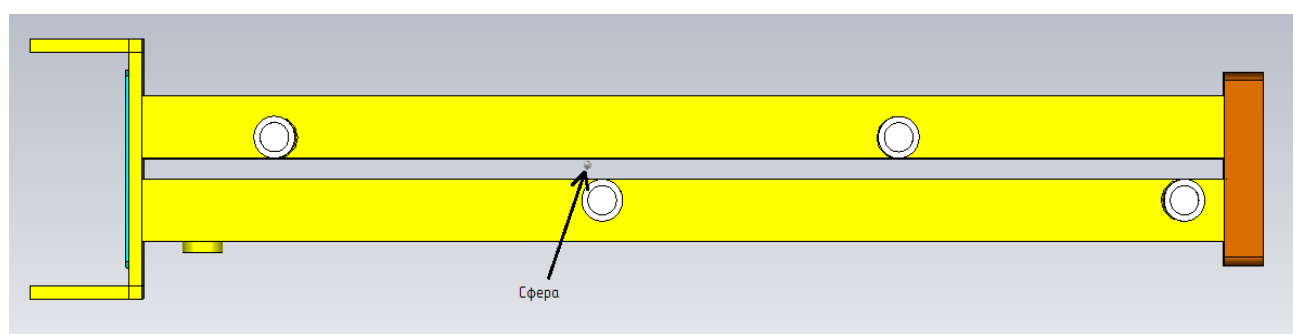


Рисунок 3.31 – Сфера с центром в координатах фазового центра

Теперь, получив координаты фазового центра, можно показать насколько будет отличаться полуокружности, по которой будет измеряться диаграмма направленности и по которой следует измерять диаграмму направленности (рисунок 3.32).

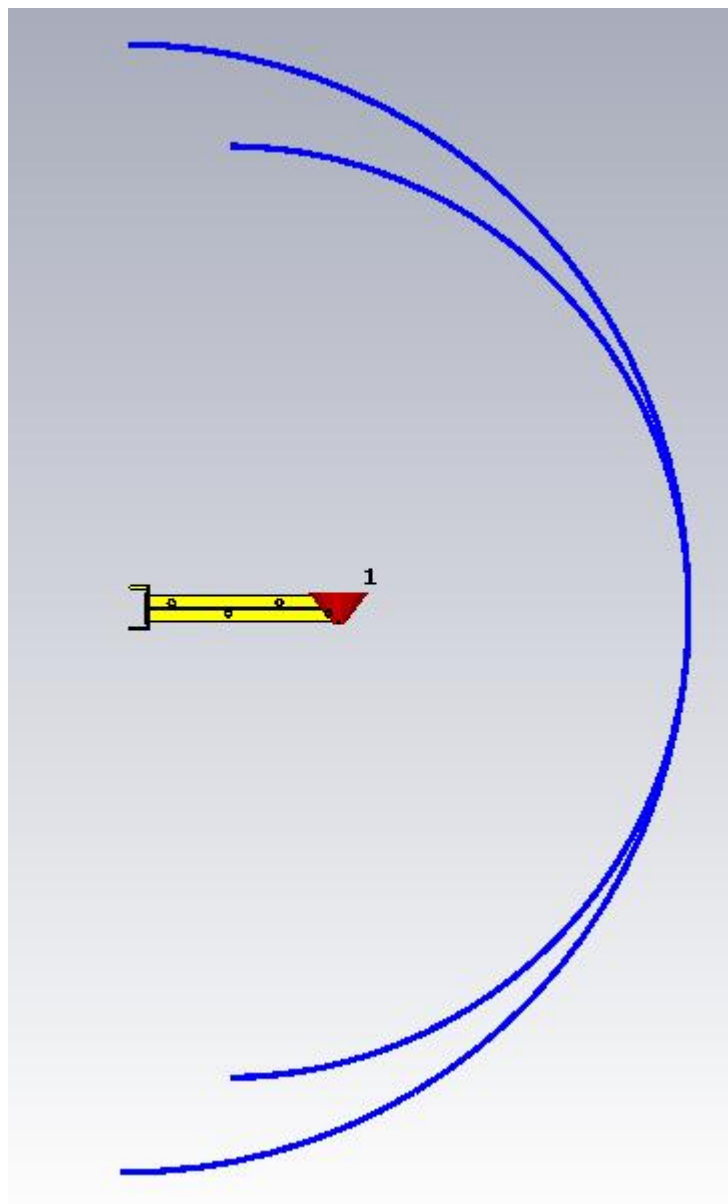


Рисунок 3.32 – Разница между полуокружностями с центром в креплении и с фазовым центром

Взглянув на рисунок 3.32, можно ожидать, что практически измеренная диаграмма направленности по ширине окажется уже настоящей диаграммы направленности, и к тому же охватит диапазон углов места больше 180 градусов. Наконец, приведём сравнение данных (рисунок 3.33) полученных экспериментально на практике, на модели в CST MWS, построив амплитуду E поля вдоль кривых указанных на рисунке 3.32, и на модели в CST MWS во вкладке «Farfields».

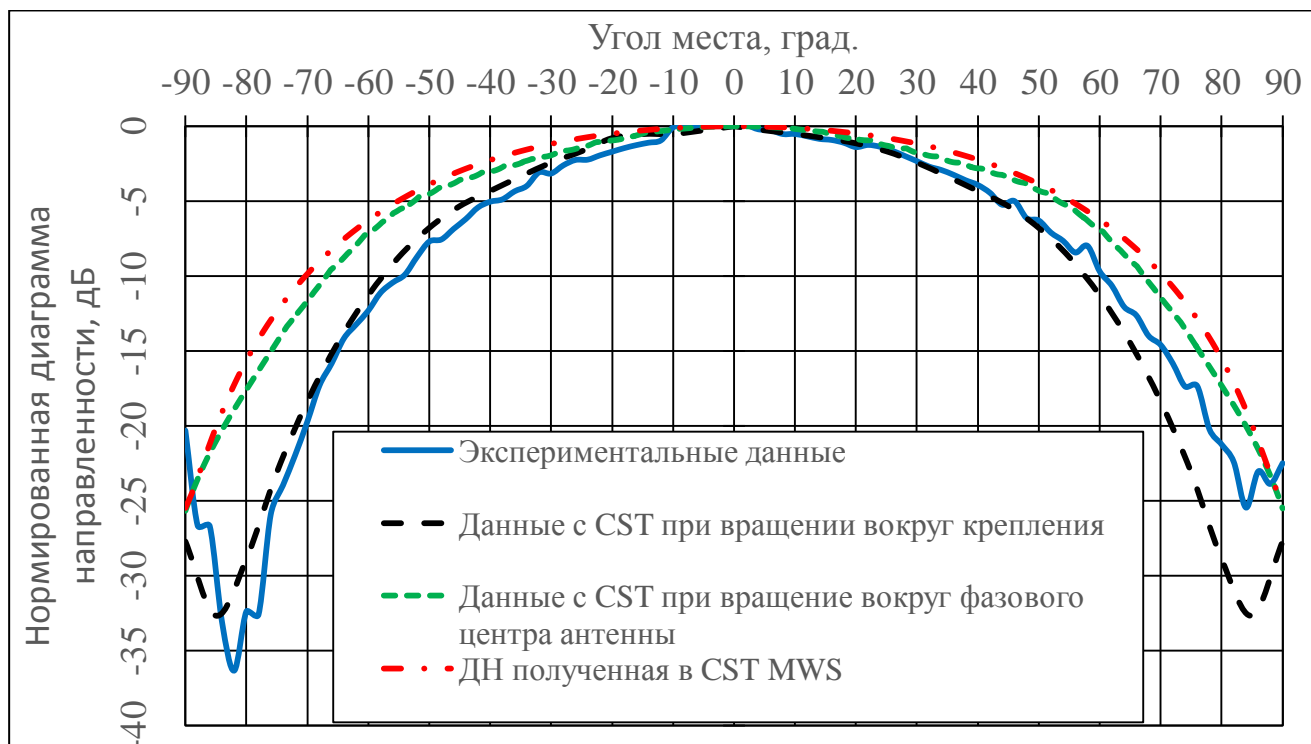


Рисунок 3.33 – Сравнение экспериментальных и расчётных данных

Как и ожидалось, полученные результаты показывают, что диаграмма направленности, измеренная экспериментально, с учётом систематической погрешности, практически совпадает с диаграммой направленности, измеренной в CST MWS путём замера E поля по окружности с центром в креплении антенны.

Также проведено сравнение диаграммы направленности, полученной в CST MWS во вкладке «Farfields» и диаграммы направленности, полученной путём замера E поля по окружности с центром в фазовом центре антенны. Малое различие результатов скорее всего связано с не абсолютно точным нахождением фазового центра, я выбирал угол вокруг оси z' по наименьшей ширине диаграммы направленности, CST MWS возможно выбирает угол по другому критерию.

По всему выше сказанному можно уверенно говорить о том, что можно доверять результатам, получаемым в CST MWS.

3.4 Расчёт характеристик двухэлементной антенной решётки выносного контроля в программном пакете CST MWS

В качестве излучающего элемента антенной решётки была применена логопериодическая антенна КВП-Г ТБИС.468571.027 изделия ГРМ СП-90, изображённая на рисунке 3.34.

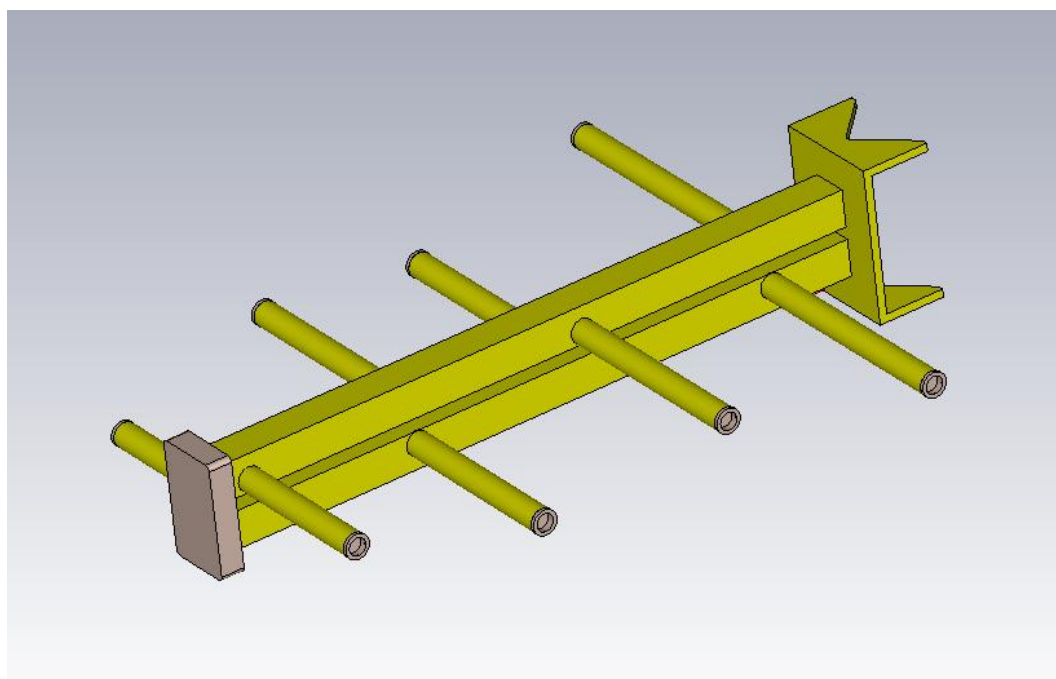


Рисунок 3.34 – Логопериодическая антенна КВП-Г ТБИС.468571.027

Было рассчитано и измерено два варианта антенной решётки:

1) В первом варианте излучающие элементы разнесены по вертикале на 660 мм, амплитуды напряжений на входах излучателей равны друг другу, сигнал на нижнем излучателе опережает по фазе сигнал на верхнем излучателе на 90 градусов (рисунок 3.35);

2) Во втором варианте излучающие элементы разнесены по вертикале на 400 мм, амплитуды напряжений на входах излучателей равны друг другу, сигнал на нижнем излучателе опережает по фазе сигнал на верхнем излучателе на 72 градуса (рисунок 3.36);

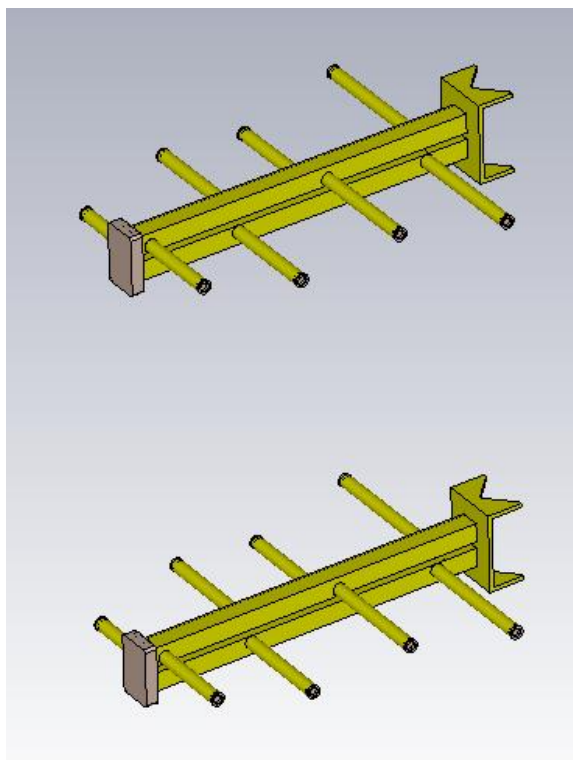


Рисунок 3.35 – Первый вариант антенной решётки

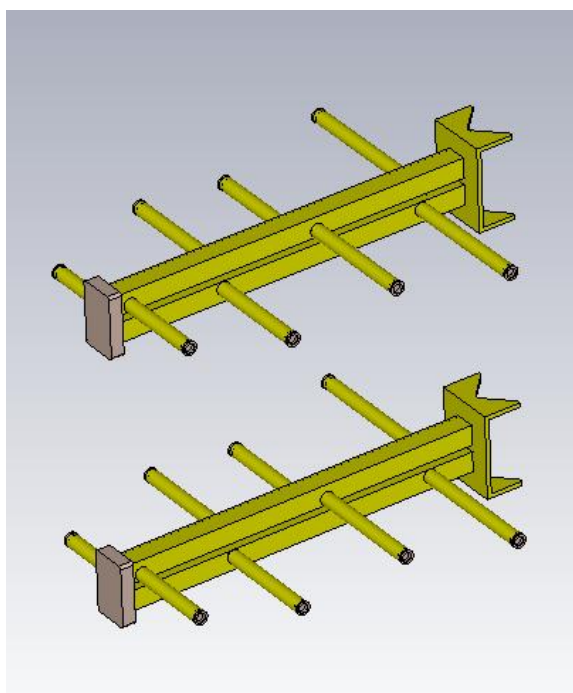


Рисунок 3.36 – Второй вариант антенной решётки

В экспериментальной установке добавилась ещё одна приёмная антенна и делатель подключенный к двум приёмным антеннам. Сравним расчётные и экспериментальные характеристики (рисунок 3.37, рисунок 3.38).



Рисунок 3.37 – Расчётная и экспериментальная диаграммы направленности первого варианта

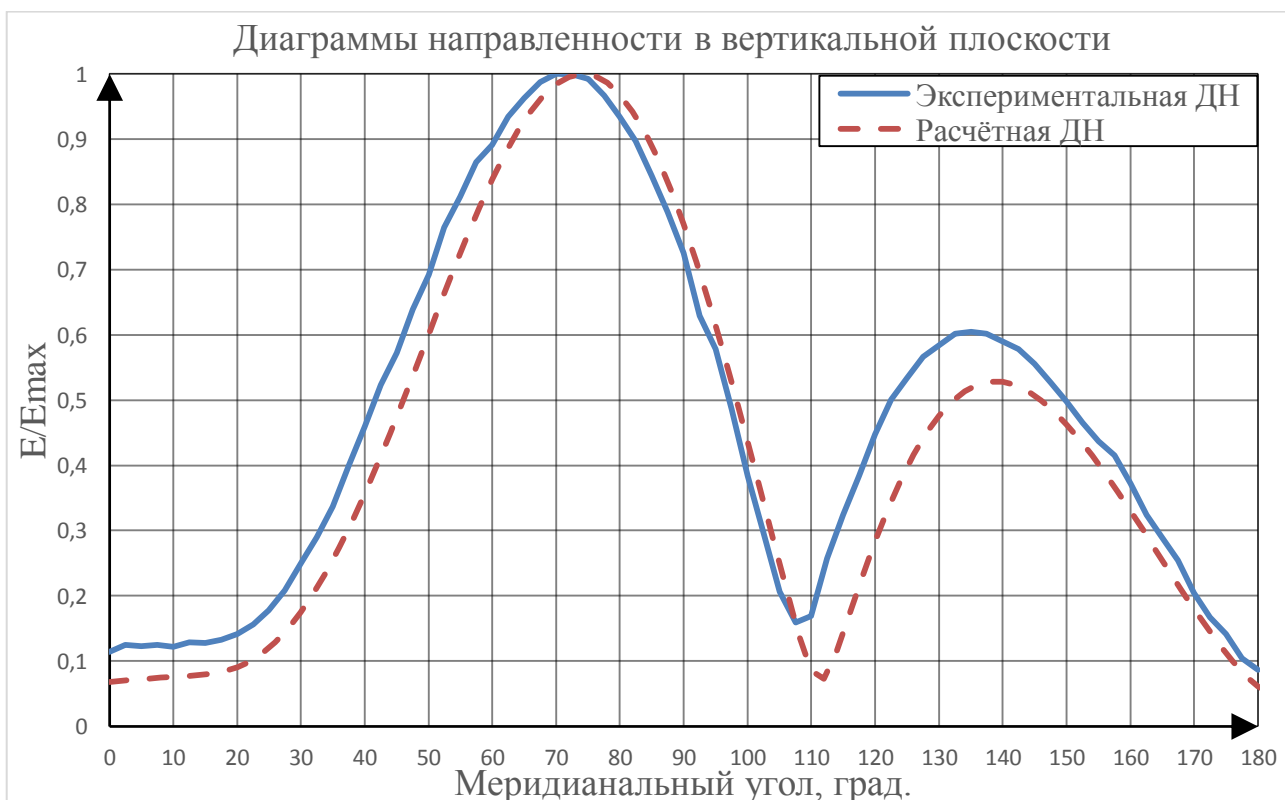


Рисунок 3.38 – Расчётная и экспериментальная диаграммы направленности второго варианта

По полученным результатам можно сказать, что в данном случае расчётная и экспериментальные диаграммы направленности отличаются по тем же причинам что и озвучивалось ранее, экспериментальная установка из двух излучателей во время измерения диаграммы направленности вращалась относительно точки отдалённой от фазового центра антенной решётки.

3.5 Предложения по изменению конструкции излучающего элемента с целью обеспечения КСВ менее 1,2 в полосе частот 328 – 336 МГц

Существующая логопериодическая антенна КВП-Г ТБИС.468571.027 согласована на частоте 398,12 МГц, а в полосе частот 328 – 336 МГц имеет КСВ на уровне 2,5 - 2,9. Самый простой вариант согласования существующей логопериодической антенны, увеличение длины вибраторов на величину равную отношению частоты 398,12 МГц к центральной частоте 332 МГц, для получения наименьшего КСВ в полосе частот 328 – 336 МГц. Но, ранее я упоминал о том, что при переходе от коаксиальной розетки к квадратному коаксиалу, из трубки и трубы, используется проволока и лепесток, которые вносят весомое индуктивное сопротивление порядка 26 Ом, что весомо влияет на КСВ, так как волновое сопротивление входа антенны равно 50 Ом. По этой причине, требуется изменение конструкции питания антенны, рассуждения по поводу этого изменения будут проводиться в другом разделе касающимся конструкции итогового изделия, в дальнейшем будут приводиться результаты, при питании антенны установкой волноводного порта в квадратную коаксиальную линию. В результате проведённого расчёта и моделирования рассчитанных длин вибраторов были получены следующие результаты (рисунок 3.39, рисунок 3.40, рисунок 3.41, рисунок 3.42):

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		39

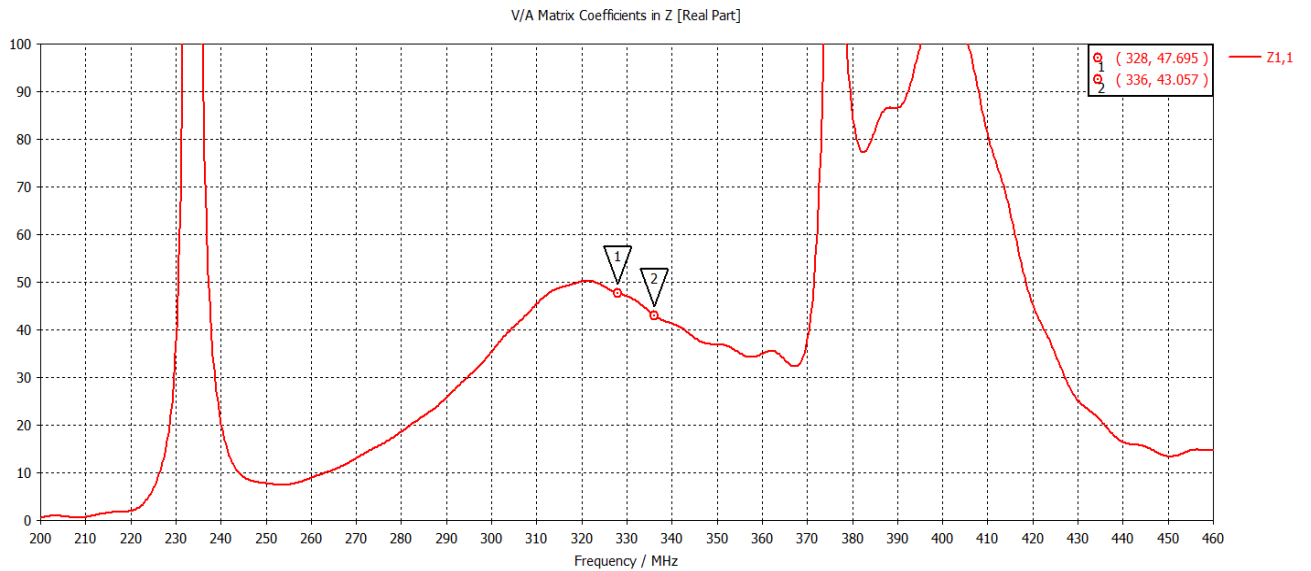


Рисунок 3.39 – Входное активное сопротивление изменённой конструкции

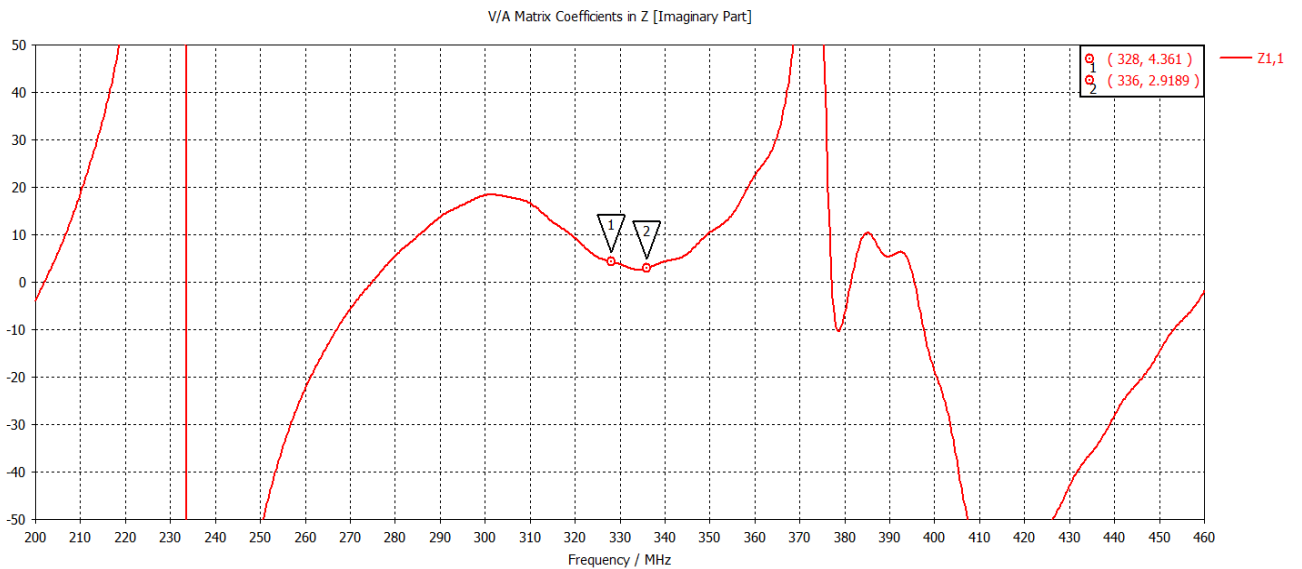


Рисунок 3.40 – Входное реактивное сопротивление изменённой конструкции

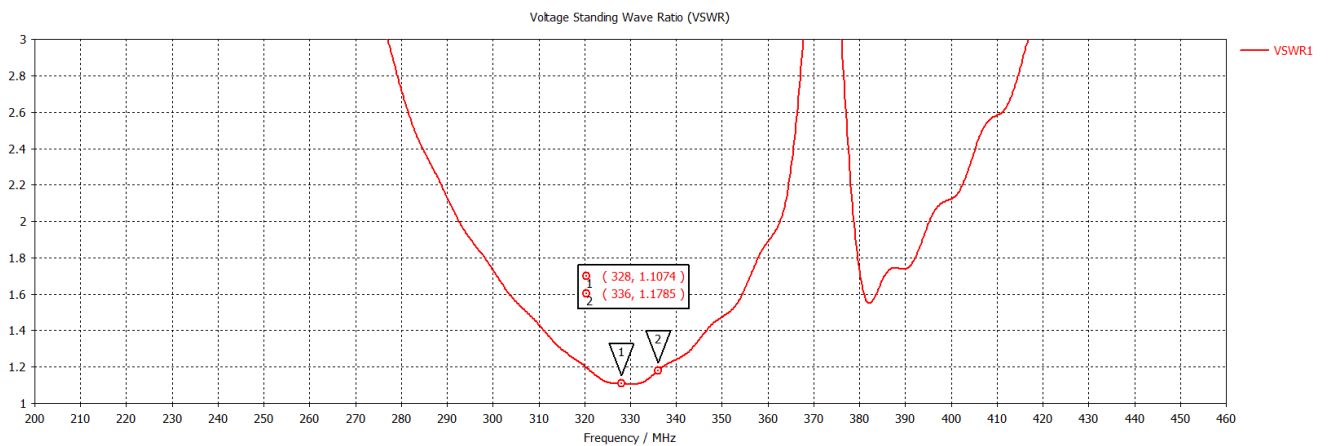


Рисунок 3.41 – КСВ изменённой конструкции

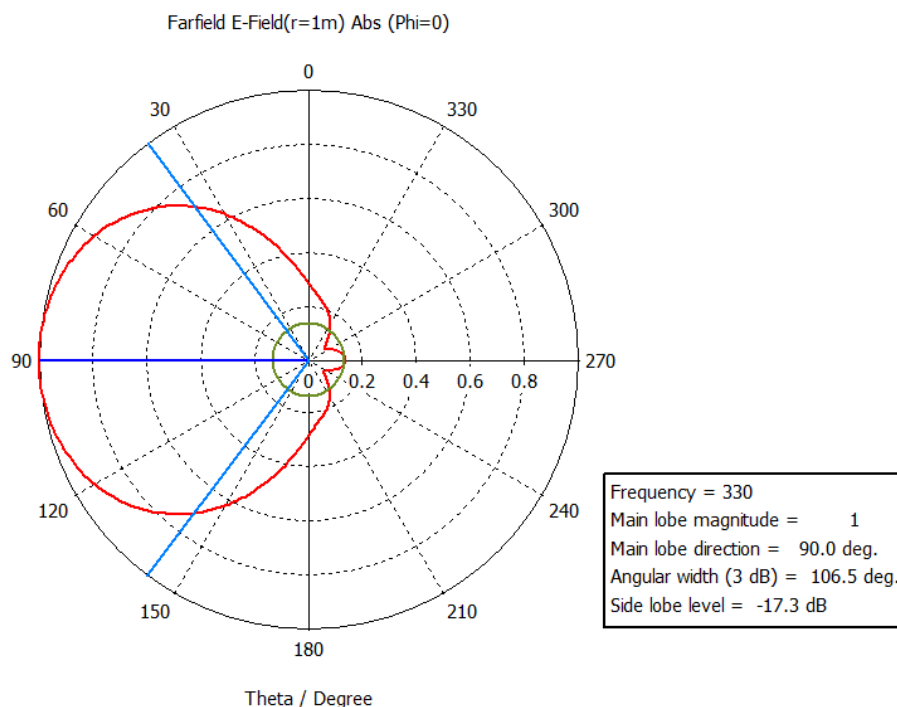


Рисунок 3.42 – ДН в Н плоскости изменённой конструкции

По полученным результатам видим, что удалось сместить согласование антенны в диапазон 328 МГц – 336 МГц, в результате чего в рабочем диапазоне уровень КСВ обеспечен ниже 1,2, однако, ширина диаграммы направленности в Н плоскости была увеличена на 15 градусов, что в итоге дало ширину диаграммы направленности по уровню -3 дБ равную 106,5 градусам, в то время как по техническому заданию следует уменьшить ширину диаграммы направленности до 80 градусов.

3.6 Обзор и описание методов синтеза диаграммы направленности

Синтез диаграммы направленности линейной антенной решётки заключается в определении лучших параметров антенной решётки для удовлетворения заданных требований.

Под параметрами антенной решётки можно понимать амплитудное распределение, фазовое распределение и расстояние между излучателями.

Под требованиями к диаграмме направленности можно понимать уровни диаграммы направленности в определённых углах места, коэффициент

направленного действия, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности и габариты линейной антенной решётки. Как правило требования включают в целевую функцию, подлежащую оптимизации в целях решения некоторой оптимизационной задачи.

Теорию и методы решения задачи оптимизации изучает математическое программирование. Математическое программирование – это область математики, разрабатывающая теорию, численные методы решения многомерных задач с ограничениями.

В настоящее время существует множество методов оптимизации и синтеза, в данной работе будет приведён обзор и описание следующих методов синтеза: метод Вудворда – Лоусена, метод Фурье и генетический алгоритм.

3.6.1 Метод Вудворда – Лоусена

Суть метода Вудворда-Лоусона заключается в том, что для того чтобы получить требуемую диаграмму направленности нужно взять сумму функций $\frac{\sin(\pi u)}{\pi u}$ с различным амплитудными коэффициентами и с главными лепестками, которые ориентированы под разными углами места θ_m . Из-за малого размера по величине боковых лепестков синтез оказывается достаточно простым [5, с. 111].

Пусть источник будет представлен путём сложения следующих констант источника тока длиной l :

$$i_m(z') = \frac{b_m}{l} e^{-jkz' \sin(\theta_m)}, \quad (3.1)$$

где b_m – амплитудные коэффициенты уровня ДН под определёнными углами места θ_m ;

k – волновое число;

z' – координата вдоль нити тока ($-\frac{l}{2} \leq z' \leq \frac{l}{2}$);

θ_m – угол места максимума парциальной диаграммы.

Тогда источник тока может быть задан так:

$$I(z') = \frac{1}{l} \sum_{m=-M}^M b_m e^{-jkz' \sin(\theta_m)}, \quad (3.2)$$

где M – коэффициент, который должен быть равен ближайшему целому числу к l/λ ;

$m = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$ для чётного M ;

$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$ для не чётного M .

Для перехода от линейного источника к линейной антенной решётке следует заменить l на Nd : где N – количество излучателей, а d расстояние между ними.

Диаграмма направленности каждого элемента или парциальная диаграмма задаётся следующей формулой:

$$f_m(\theta) = b_m \frac{\sin\left[\frac{N}{2}kd(\sin(\theta) - \sin(\theta_m))\right]}{N \sin\left[\frac{1}{2}kd(\sin(\theta) - \sin(\theta_m))\right]}. \quad (3.3)$$

Тогда множитель направленности антенной решётки будет записан так:

$$AF(\theta) = \sum_{m=-M}^M b_m \frac{\sin\left[\frac{N}{2}kd(\sin(\theta) - \sin(\theta_m))\right]}{N \sin\left[\frac{1}{2}kd(\sin(\theta) - \sin(\theta_m))\right]}. \quad (3.4)$$

Углы места максимума каждого элемента или каждой парциальной диаграммы рассчитываются по следующей формуле для не чётного M :

$$\sin(\theta_m) = m\Delta = m \frac{\lambda}{Nd}. \quad (3.5)$$

Или для чётного M :

$$\sin(\theta_m) = \begin{cases} \frac{2m-1}{2} \frac{\lambda}{Nd}, m = 1, 2, \dots \\ \frac{2m+1}{2} \frac{\lambda}{Nd}, m = -1, -2, \dots \end{cases} \quad (3.6)$$

Нормализованный коэффициент возбуждения каждого элемента антенной решётки задаётся по следующей формуле:

$$a_n(z') = \frac{1}{N} \sum_{m=-M}^M b_m e^{-jkz' \sin(\theta_m)}. \quad (3.7)$$

Модуль коэффициентов a_n даст амплитудное распределение, а аргумент a_n равен фазовому распределению.

Рассмотрим следующий пример: требуется получить уровень нормализованной амплитудной ДН равный 1 в диапазоне углов места от -45 градусов до 45 градусов, количество излучателей $N = 10$, расстояние между излучателями $d = \frac{\lambda}{2}$.

Найдём $M = \frac{Nd}{\lambda} = \frac{10\lambda}{2\lambda} = 5$, получилось не чётное значение, следовательно, $m = -5 \dots 5$ включая 0. Количество парциальных диаграмм равно 11.

Найдём углы места максимума каждой парциальной диаграммы по формуле (5), и все максимумы, входящие в диапазон углов места от -45 градусов до 45 градусов, приравнять к 1.

Далее рассчитав нормализованный коэффициент возбуждения каждого элемента антенной решётки по формуле (3.7) было получено следующее амплитудно-фазовое распределение (рисунок 3.43, рисунок 3.44):

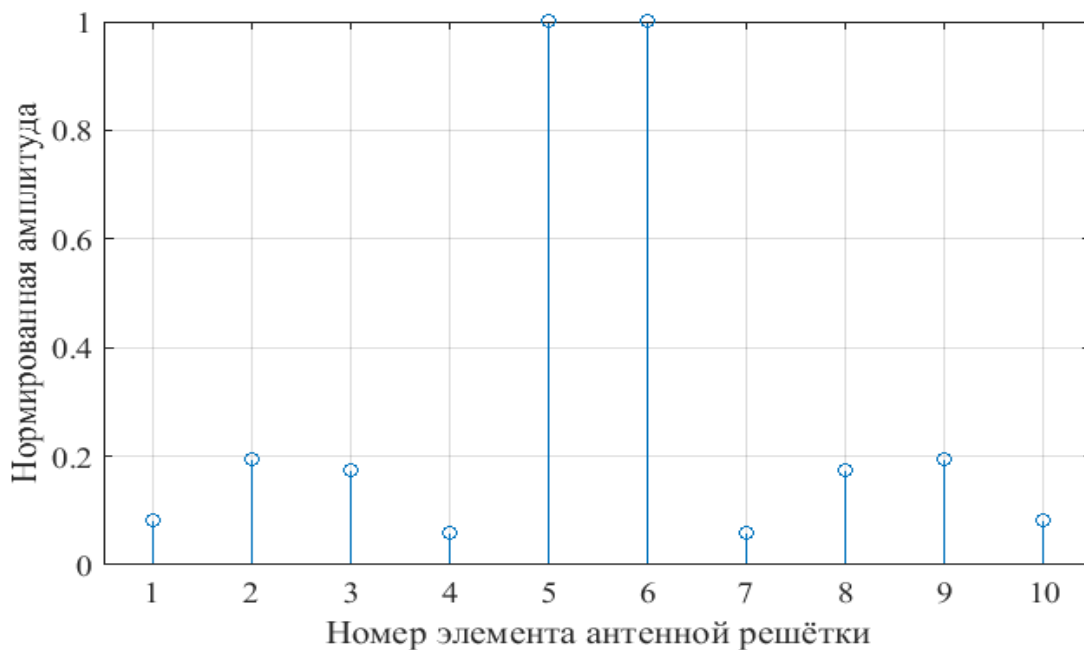


Рисунок 3.43 – Амплитудное распределение

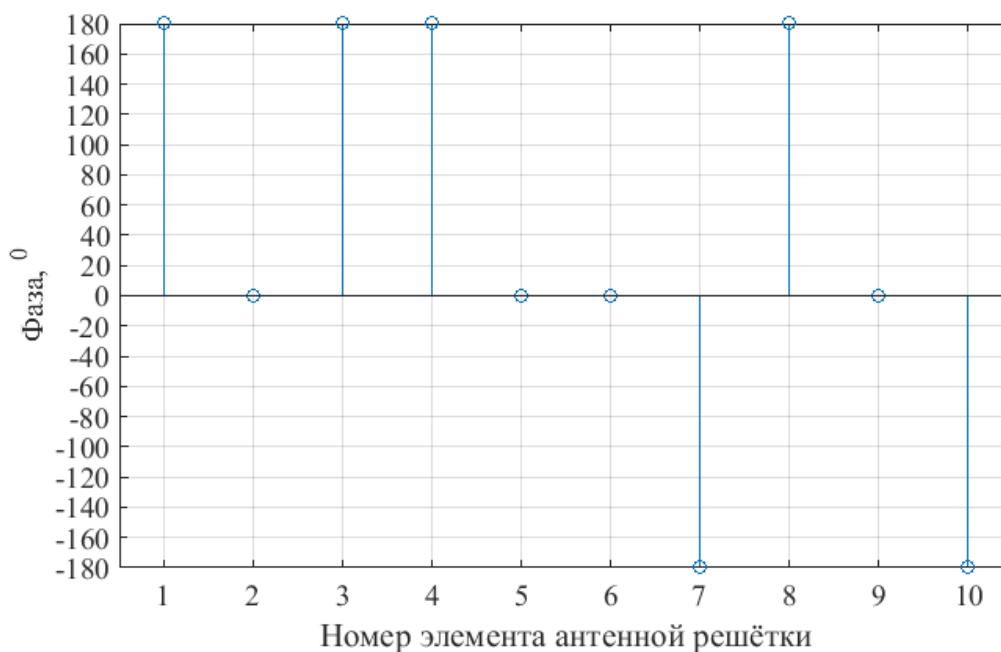


Рисунок 3.44 – Фазовое распределение

Подставив полученное АФР в формулу множителя направленности линейной антенной решётки были получены следующие графики (рисунок 3.45):

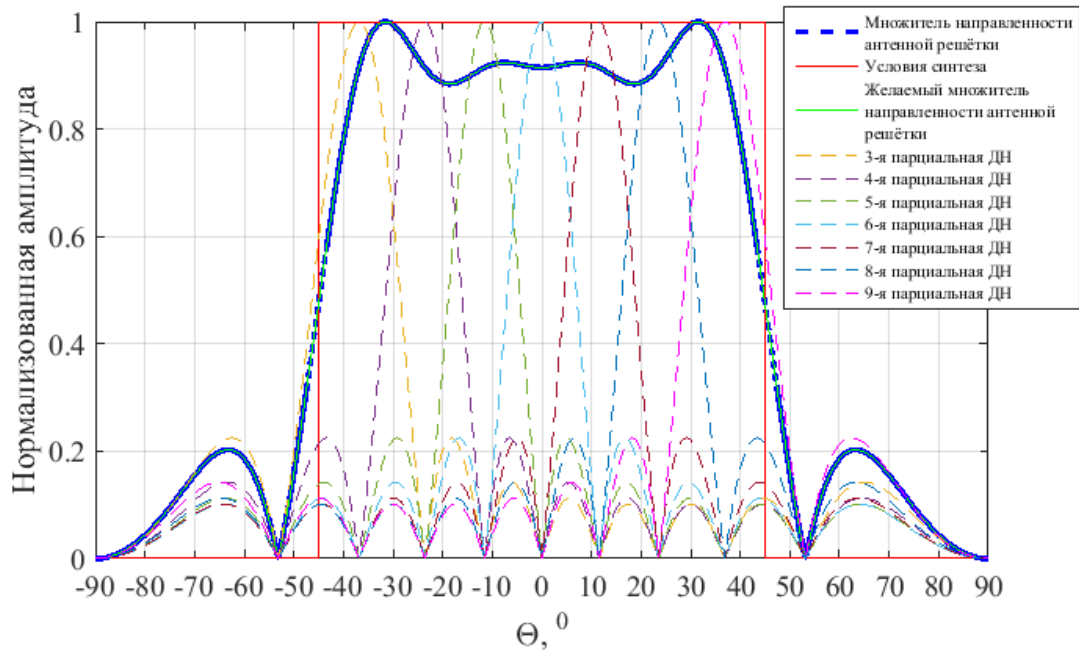


Рисунок 3.45 – Желаемый и полученный множители направленности антенной решётки

1-я, 2-я, 10-я и 11-я парциальные ДН не указаны т. к. амплитудные коэффициенты этих диаграмм равны 0.

3.6.2 Метод Фурье

Синтез методом Фурье основан на сопоставлении одной функции вещественной переменной другой функции вещественной переменной, которая описывает коэффициенты (амплитуды) при разложении исходной функции на элементарные составляющие – гармонические колебания с разными частотами (фазами) [5, с. 109].

Преобразование Фурье функции f вещественной переменной является интегральным и задаётся следующей формулой:

$$a(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-jxw} dx, \quad (3.8)$$

где $f(x)$ – исходная функция вещественной переменной x ;

$a(w)$ – новая функция вещественной переменной w .

С целью приспособить данную функцию к синтезу ДН линейной антенной решётки требуется заменить следующие коэффициенты:

- x на $kdsin(\theta)$;
- $f(x)$ на функцию желаемой ДН;
- Если количество элементов антенной решётки M не чётное то w на m ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M$),
- Если M чётное то w на $\frac{2m-1}{2}$ ($m = 1, 2, \dots, M$) и на $\frac{2m+1}{2}$ ($m = -1, -2, \dots, -M$).

В результате получим следующую формулу коэффициентов возбуждения каждого элемента антенной решётки для не чётного M :

$$a_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(kdsin(\theta)) e^{-jkdsin(\theta)m} d[kdsin(\theta)], m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M. \quad (3.9)$$

Или для чётного M :

$$a_m = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(kdsin(\theta)) e^{-jkdsin(\theta)\frac{2m+1}{2}} d[kdsin(\theta)], m = -1, -2, \dots \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(kdsin(\theta)) e^{-jkdsin(\theta)\frac{2m-1}{2}} d[kdsin(\theta)], m = 1, 2, \dots \end{cases}. \quad (3.10)$$

Модуль коэффициентов a_m даст амплитудное распределение, а аргумент a_m равен фазовому распределению.

Рассмотрим тот же самый пример, что и в предыдущем подразделе: требуется получить уровень нормализованной амплитудной ДН равный 1 в диапазоне углов места от -45 градусов до 45 градусов, количество излучателей $M = 10$, расстояние между излучателями $d = \frac{\lambda}{2}$.

Диапазон углов места θ . лежит в пределах от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$, приравняем желаемую функцию $f(kdsin(\theta))$ в диапазоне θ от $-\frac{\pi}{4}$ до $\frac{\pi}{4}$ к 1, в остальном

диапазоне приравняем к 0. Количество излучателей M чётное значит воспользуемся формулой (10).

Далее рассчитав коэффициенты возбуждения каждого элемента антенной решётки было получено следующее амплитудно-фазовое распределение (рисунок 3.46, рисунок 3.47):

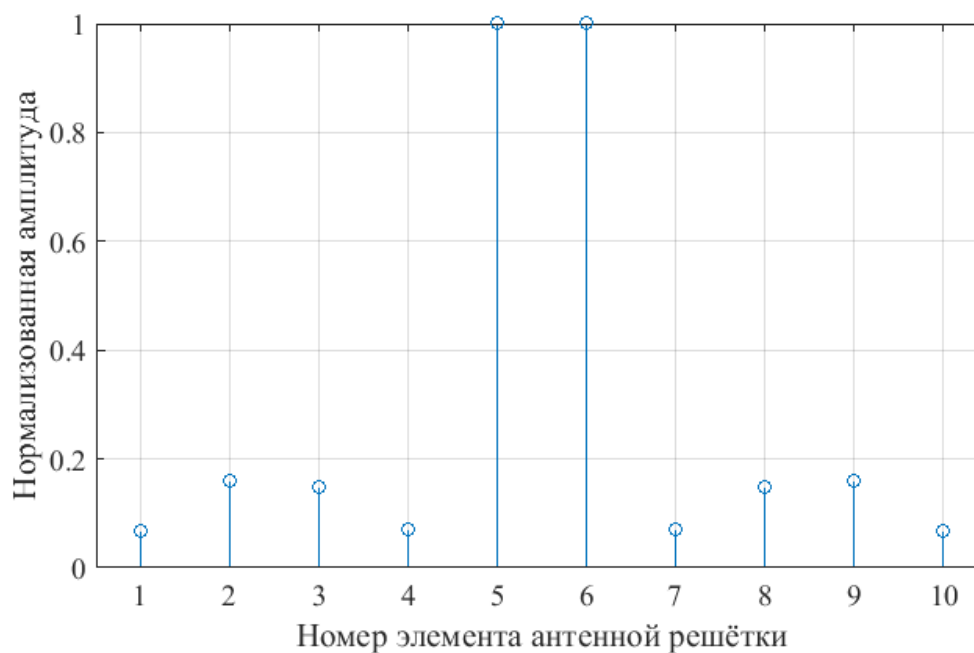


Рисунок 3.46 – Амплитудное распределение

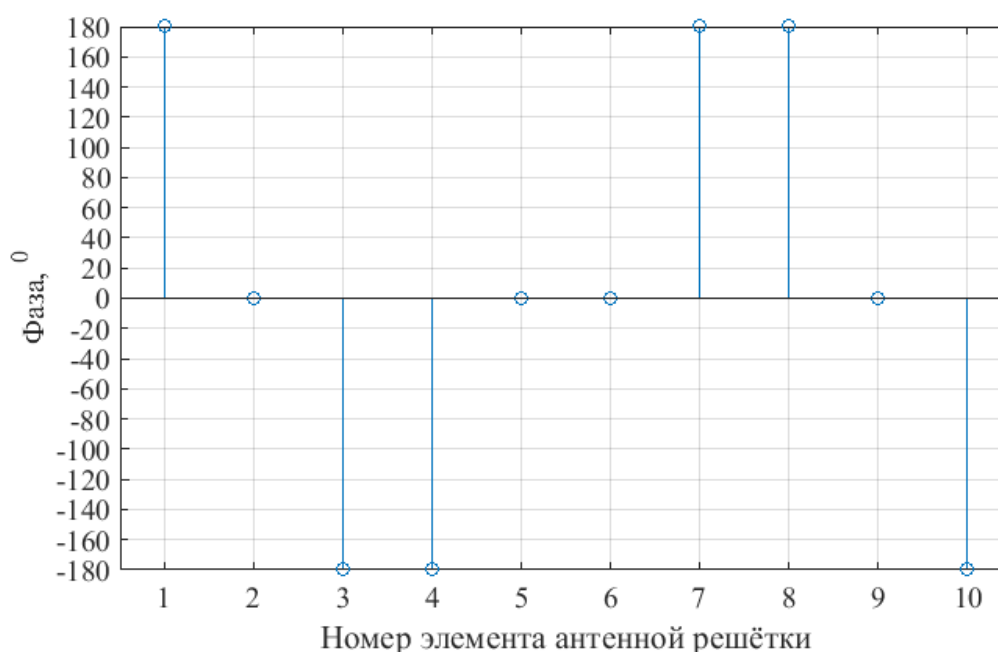


Рисунок 3.47 – Фазовое распределение

Подставив полученное АФР в формулу множителя направленности линейной антенной решётки был получен следующий график (рисунок 3.48):

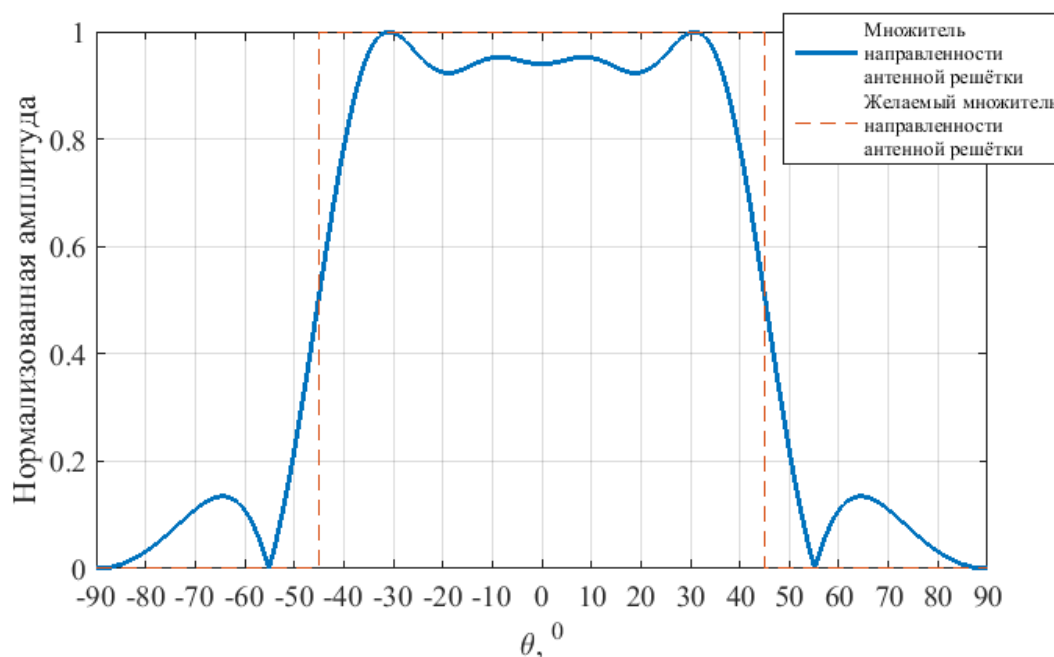


Рисунок 3.48 – Желаемый и полученный множители направленности антенной решетки

3.6.3 Генетический алгоритм оптимизации

Активно развивающийся в последнее время генетический алгоритм поиска можно использовать для решения задач оптимизации при проектировании фазированных антенных решеток (ФАР). Генетический алгоритм является эвристическим, и хотя оптимальность получаемых результатов для возможных вариантов решения не всегда может быть доказана, этот алгоритм достаточно быстро находит удовлетворительное решение при проектировании сложных антенных систем с использованием имеющихся на сегодняшний день вычислительных ресурсов. Генетический алгоритм представляет собой поиск оптимального решения путем случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе [6, с. 7].

Синтез ДН ФАР будем производить на основании минимизации целевой функции следующего вида:

$$\Psi(I_1, \dots, I_N, r_1, \dots, r_N, \Phi_1, \dots, \Phi_N) = \sum_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |F(\theta) - F^*|^2 \rightarrow \min, \quad (3.11)$$

где N – количество элементов линейной антенной решётки;

I_1, \dots, I_N – амплитуды возбуждения каждого элемента антенной решётки;

r_1, \dots, r_N – координата каждого элемента антенной решётки;

Φ_1, \dots, Φ_N – фаза возбуждения каждого элемента антенной решётки;

$F(\theta)$ – промежуточный множитель ДН линейной антенной решётки;

F^* – желаемый множитель ДН линейной антенной решётки.

Генетический алгоритм синтеза включает в себя следующие шаги:

1) Создание множества генотипов начальной популяции, то есть множества случайных наборов параметров $I_1^p, \dots, I_N^p, r_1^p, \dots, r_N^p, \Phi_1^p, \dots, \Phi_N^p$; $p = \overline{1:q}$, где q – размер популяции;

2) Оценка созданного множества генотипов при помощи функции приспособленности, то есть определение значений целевых функции $\Psi(I_1^p, \dots, I_N^p, r_1^p, \dots, r_N^p, \Phi_1^p, \dots, \Phi_N^p)$; $p = \overline{1:q}$;

3) Отбор наиболее приспособленных популяций, в рассматриваемом случае был отобран один наиболее приспособленный вариант с минимальным значением целевой функции;

4) Проверка критериев сходимости (количество итераций, отсутствие уменьшения целевой функции несколько итераций подряд), если один из критериев выполнен, то запомнить лучший набор параметров, иначе перейти к шагу 5;

5) Мутация, добавление случайного набора чисел d ко всем параметрам $I_1^p, \dots, I_N^p, r_1^p, \dots, r_N^p, \Phi_1^p, \dots, \Phi_N^p$; $p = \overline{1:q}$, соответствующих минимальной целевой функции, для получения нового множества набора параметров;

б) Переход к шагу 2.

Рассмотрим тот же самый пример, что и в предыдущем подразделе: требуется получить уровень нормализованной амплитудной ДН равный 1 в диапазоне углов места от -45 градусов до 45 градусов, количество излучателей $N = 10$, расстояние между излучателями $d = \frac{\lambda}{2}$.

В результате синтеза генетическим алгоритмом было получено следующее амплитудно-фазовое распределение (рисунок 3.49, рисунок 3.50):

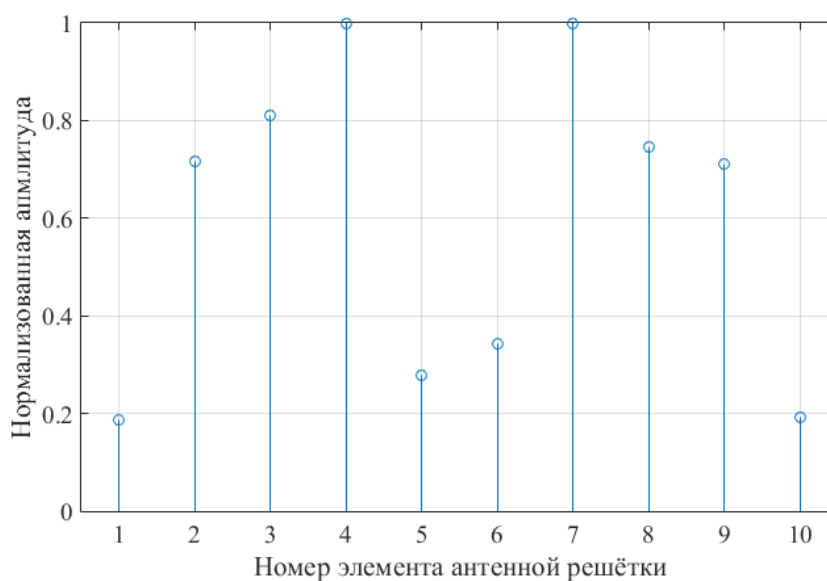


Рисунок 3.49 – Амплитудное распределение

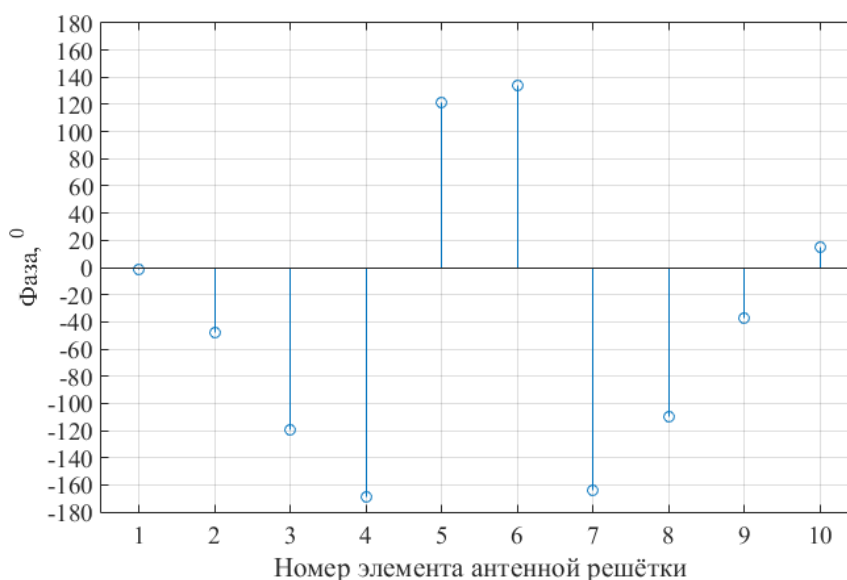


Рисунок 3.50 – Фазовое распределение

Подставив полученное АФР в формулу множителя направленности линейной антенной решётки был получен следующий график (рисунок 3.51):

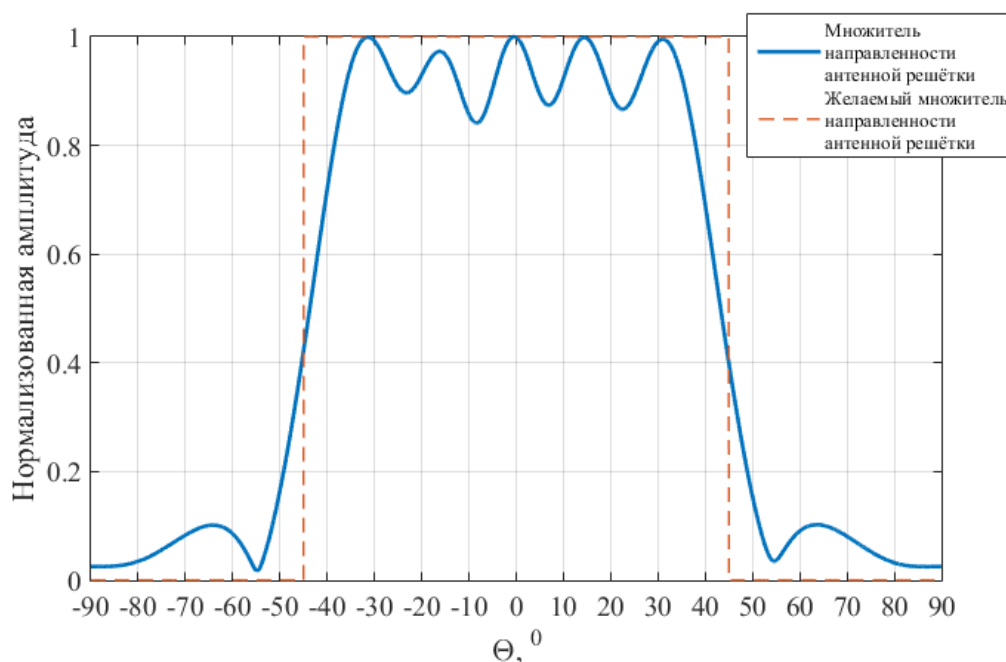


Рисунок 3.51 – Желаемый и полученный множители направленности антенной решётки

3.7 Параметрический синтез антенны волновой канал с использованием программного пакета CST MWS

В техническом задании были заданы следующие требования к диаграмме направленности: ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ равна 80 градусов. Уровень заднего излучения менее минус 20 дБ. Уровень коэффициента стоячей волны в диапазоне 328 МГц – 336 МГц менее 1,2.

Чтобы выполнить данные требования коэффициент направленного действия (КНД) антенны типа «волновой канал» должен быть в диапазоне 9-11 дБи, как известно пятиэлементный волновой канал даёт КНД около 9 дБи, по этой причине создадим в программном пакете CST MWS модель состоящую из 5 элементов, запараметризуем расстояние между ними, длины элементов и диаметры элементов.

В качестве метода оптимизации будет использоваться генетический алгоритм «Genetic Algorithm», с целью приступить к оптимизации требуется задать функционал или, иначе говоря, целевую функцию. Для этого потребуется воспользоваться таким инструментом, как шаблон базовых постпроцессов «Template Based Postprocessing». Данный инструмент находится по следующему пути «Post Processing/Template Based Postprocessing». В результате должно появиться окно данного инструмента (рисунок 3.52).

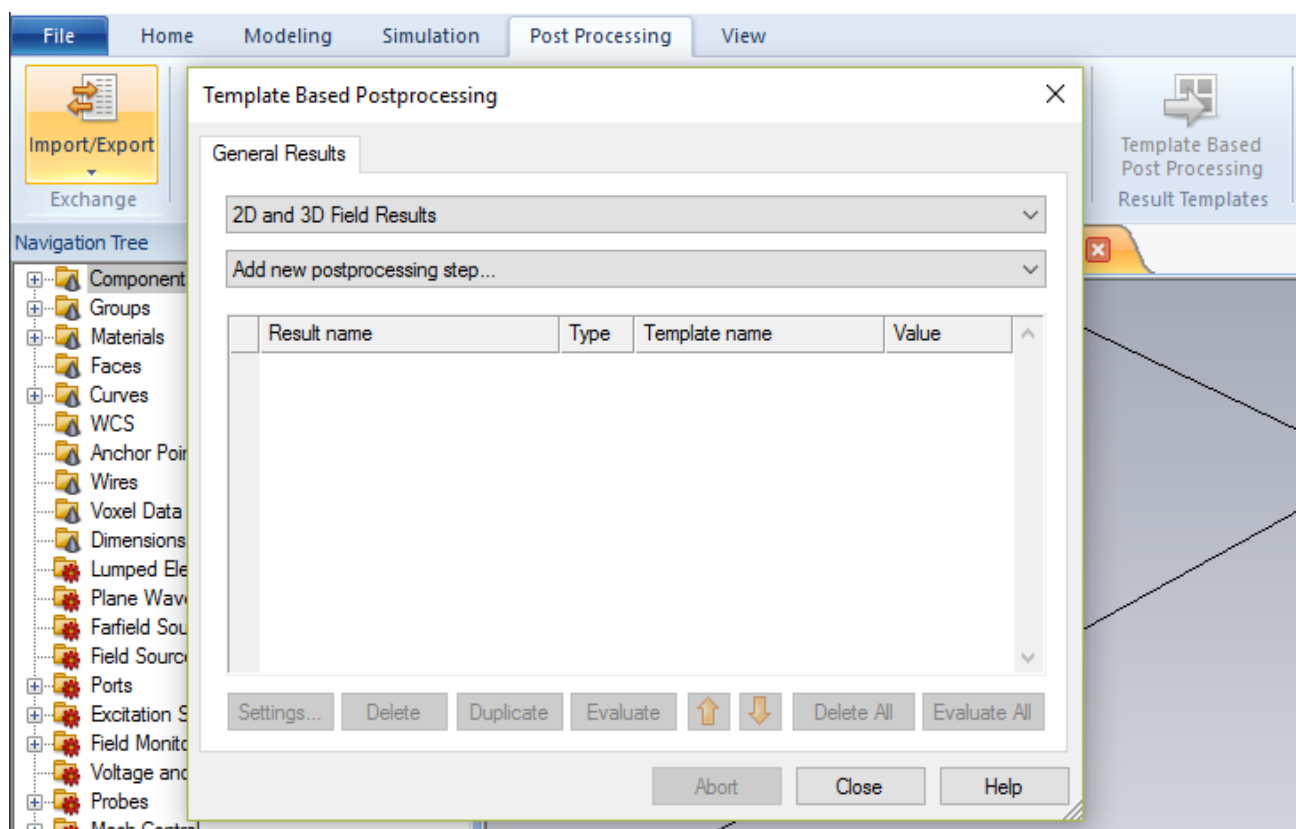


Рисунок 3.52 – Окно «Template Based Postprocessing»

В появившемся окне требуется выбрать в верхней закладке «Farfield and Antenna Properties», затем в нижней «Farfield Result» (рисунок 3.53), в результате должно появиться ещё одно окно «Farfield Result» (рисунок 3.54), в котором следует щёлкнуть на кнопку «Browse Results...» и выбрать диаграмму направленности на рабочей частоте, а во вкладке «Step size [deg]» указать шаг в градусах, с которым диаграмма направленности будет строиться для получения необходимого результат. Затем нажав на кнопку «All Settings...», должно появиться ещё одно окно с одноимённым названием (рисунок 3.55).

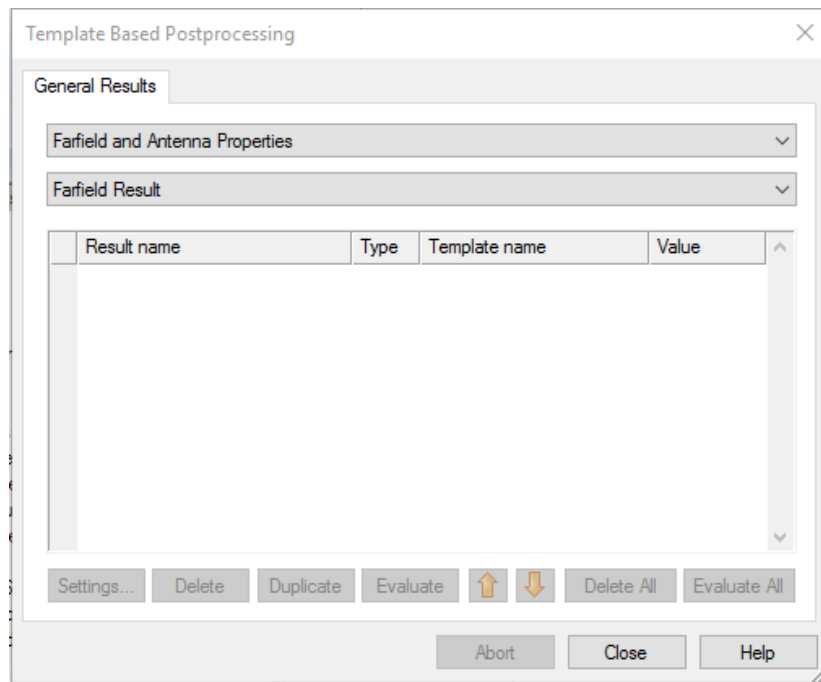


Рисунок 3.53 – Окно «Template Based Postprocessing» с необходимыми вкладками

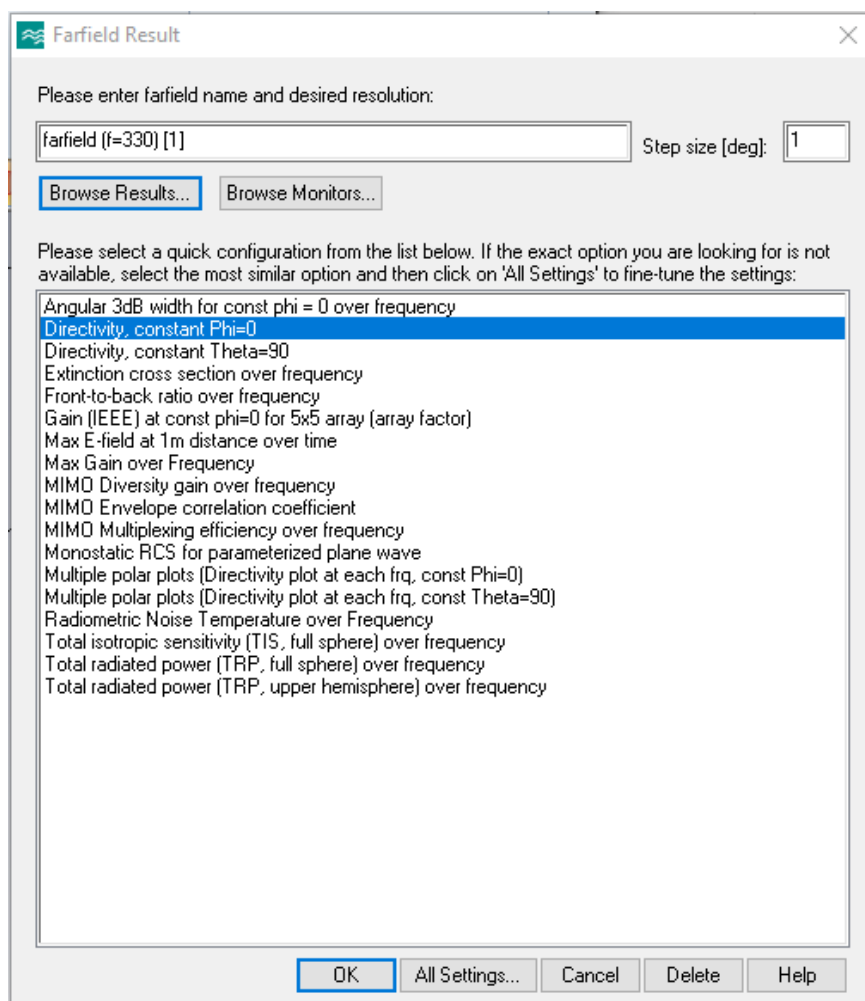


Рисунок 3.54 – Окно «Farfield Result» с необходимыми вкладками

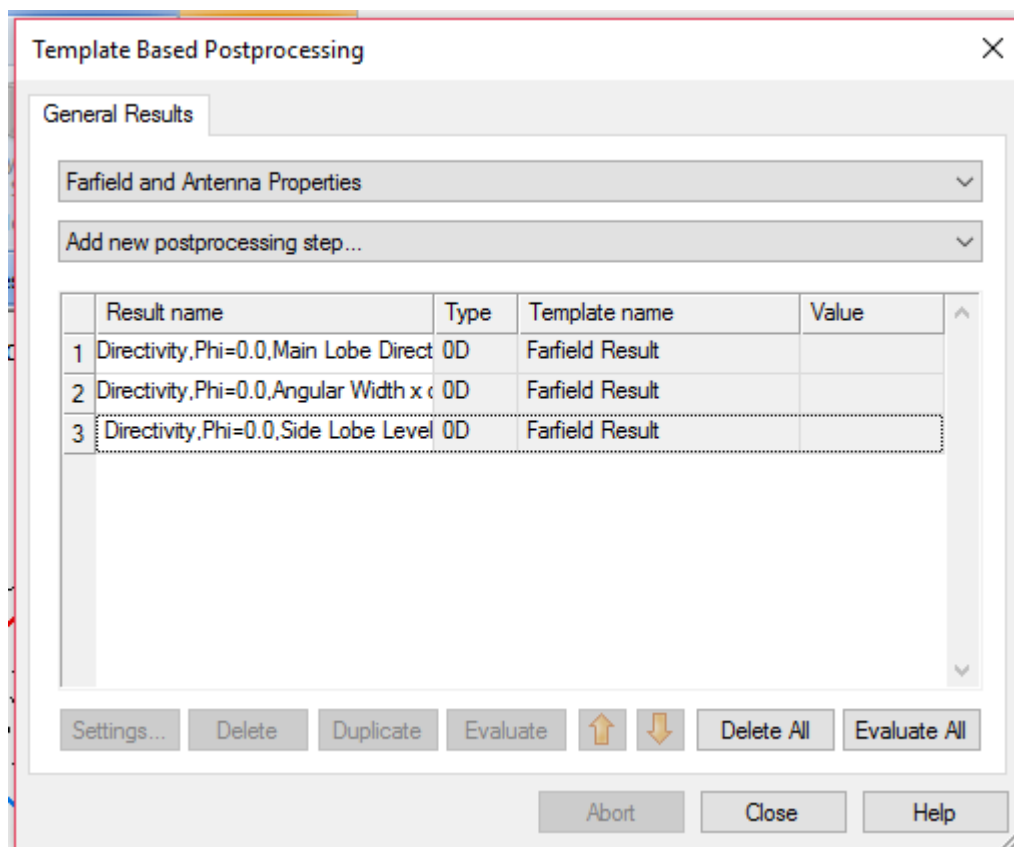


Рисунок 3.56 – Конечный результат шаблонов базовых постпроцессов

Перейдём к синтезу или другими словами к оптимизации. Инструмент оптимизации находится по следующему пути «Home/Optimizer» (рисунок 3.57) щёлкнув по данному инструменту откроется окно «Optimizer», во вкладке «Settings» необходимо выбрать алгоритм оптимизации «Genetic Algorithm» и выбрать все параметры, которые будут меняться, то есть расстояние между вибраторами, диаметры вибраторов и длины вибраторов. Во вкладке «Goals» необходимо выбрать установленные ранее шаблоны базовых постпроцессов и установить на них ограничения в соответствии с техническим заданием, направление основного лепестка на 0 градусов, ширина диаграммы направленности на 80 градусов и уровень боковых лепестков меньше -20 дБ.

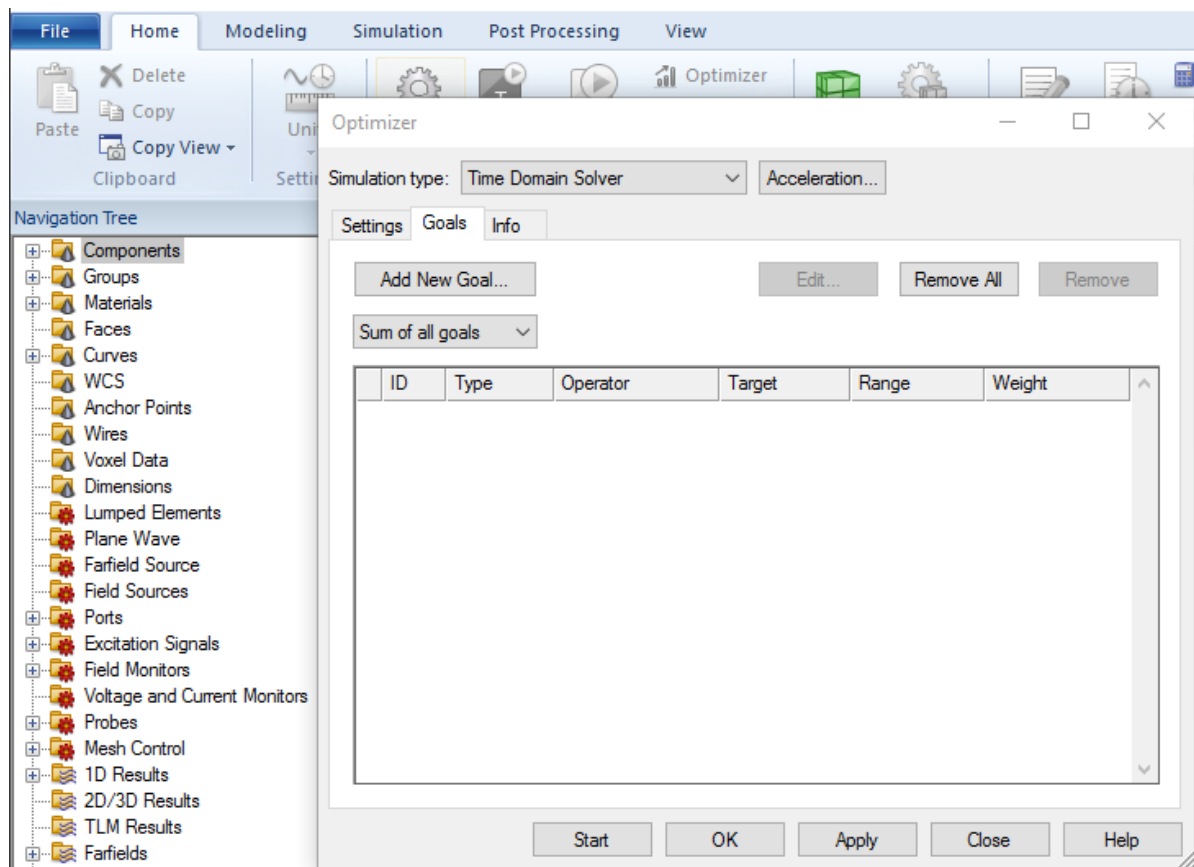


Рисунок 3.57 – Путь к окну «Optimizer» и само окно

После проделанного получил следующие результаты (рисунок 3.58, рисунок 3.59, рисунок 3.60):

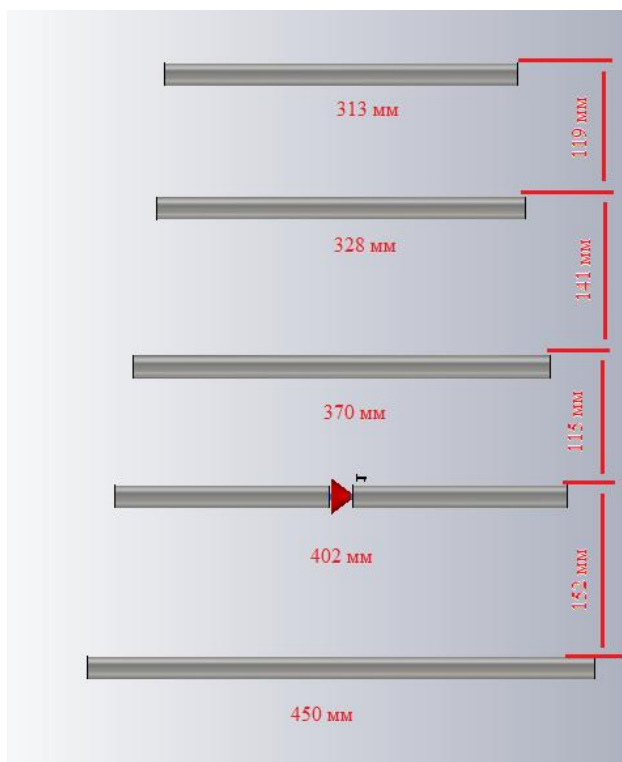


Рисунок 3.58 – Конструкция полученной антенны волновой канал

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

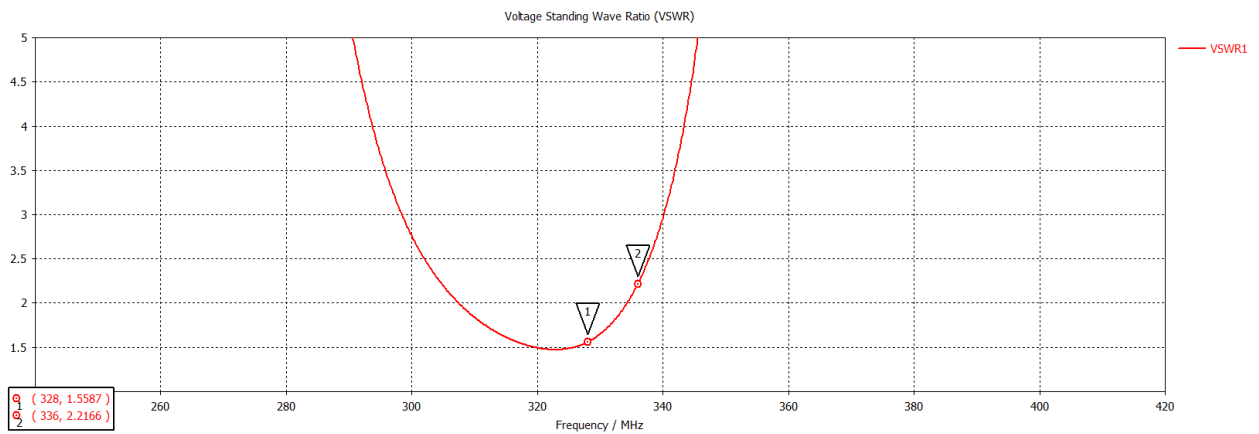


Рисунок 3.59 – КСВ полученной антенны волновой канал

Farfield E-Field(r=1m) Abs (Theta=-90)

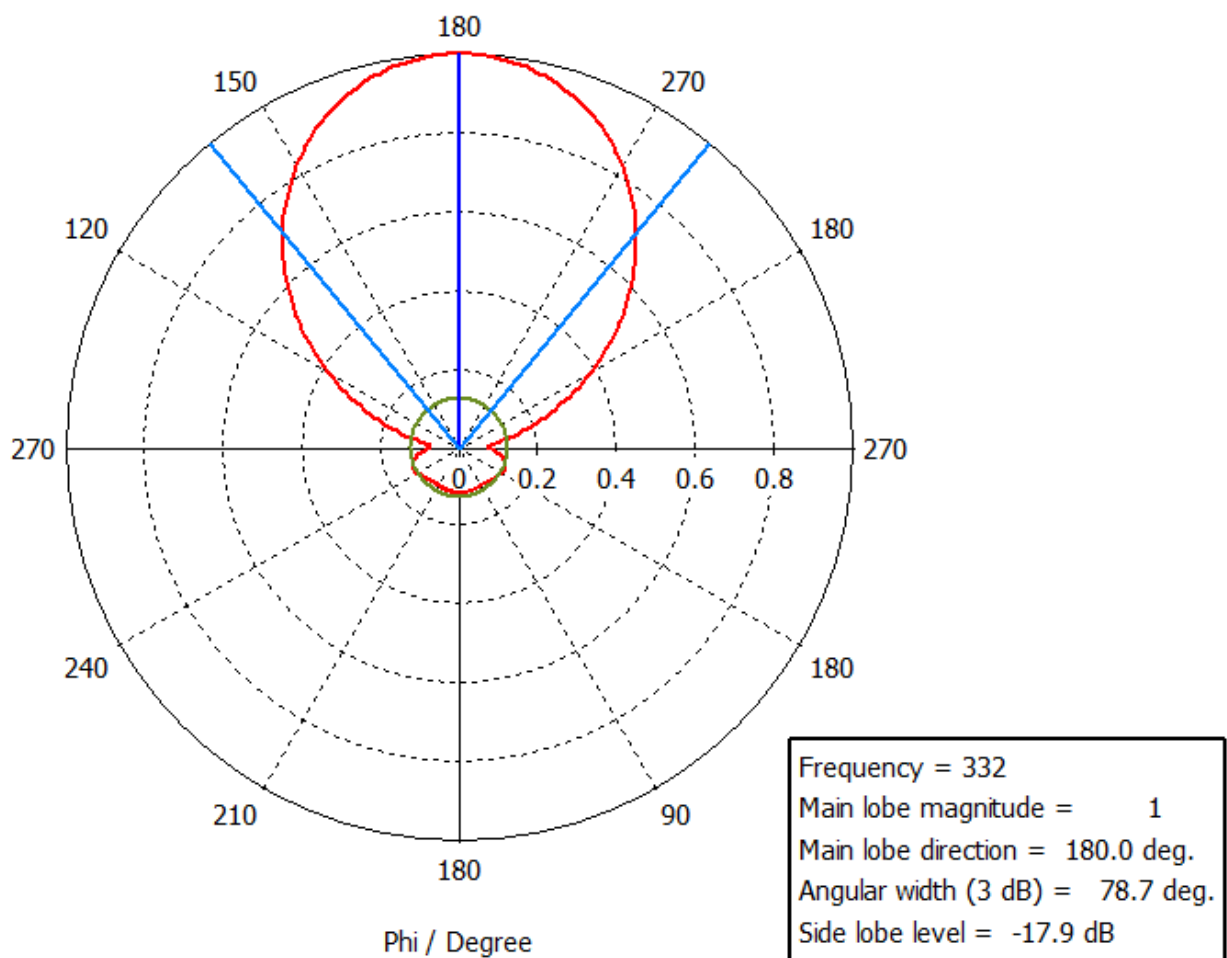


Рисунок 3.60 – ДН в Н-плоскости полученной антенны волновой канал

По полученным результатам видно, что согласование и уровень обратного излучения не удовлетворяют техническим требованиям на изделие. Скорее всего, чтобы снизить уровень обратного излучения необходимо применять рефлекторы особой формы, но их применение нивелирует всю

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

простоту конструкции антенны типа «волновой канал», к тому же данному типу антенны требуется симметрирующее устройство для питания от коаксиального кабеля. По этим причинам, следует отказаться от антенны типа «волновой канал» и заняться расчётом и изменением конструкции существующей логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027.

3.8 Выводы по разделу три

В данном разделе была смоделирована максимально точная трёхмерная модель логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027 по имеющимся чертежам в программном пакете CST MWS. После моделирования были сравнены результаты, полученные в программном пакете CST MWS с характеристиками, измеренными на реально существующей антенне КВП-Г. По полученным результатам был сделан вывод о том, что результаты, полученные в программном пакете CST MWS, оказались довольно близки к характеристикам, измеренным на реальной логопериодической антенне КВП-Г. Далее были смоделированы два варианта антенных решёток из двух излучателей с целью сравнения результатов полученных в программном пакете CST MWS и результатами измеренными на реальной решётке. В результате чего, сделали вывод, что результаты отличаются в связи с тем, что при измерении диаграммы направленности реальной логопериодической антенны КВП-Г, приёмная антенная решётка из двух излучателей вращалась относительно креплений, а не фазового центра антенной системы.

В дальнейшем были выдвинуты предложения по изменению конструкции антенны с целью обеспечить уровень коэффициента стоячей волны ниже 1,2 в полосе частот 328 МГц – 336 МГц, данные предложения были проверены в программном пакете CST MWS, в результате чего получили уровень коэффициента стоячей волны в рабочей полосе частот ниже 1,2, но полученная диаграмма направленности не удовлетворяла техническим требованиям, ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ стала больше чем была.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		59

На очереди была идея создания новой конструкции антенны типа «волновой канал». Для этого был проведён обзор существующих методов синтеза диаграммы направленности, среди которых был выбран один лучший. Далее была создана запараметризованная модель антенны типа «волновой канал» с целью применения к данной модели генетического алгоритма оптимизации для выполнения поставленных задач. Полученные результаты частично удовлетворяли техническим требованиям, однако, для получения уровня обратного излучения ниже -20 дБ необходимо применение рефлекторов особой формы, что нивелирует все преимущества простоты конструкции антенны типа «волновой канал», к тому же для питания данной антенны требуется симметрирующее устройство.

4 СОЗДАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ КВП-Г

Довольно широко развилось телевизионное вещание в диапазоне дециметровых волн (ДМВ). Поэтому большое значение приобрела задача создания простых приёмных телевизионных антенн ДМВ, обладающих необходимыми широкополосностью и коэффициентом усиления для обеспечения уверенного приёма в нескольких десятках километров от телецентра. Этим требованиям в полной мере отвечают логопериодические вибраторных антенны (ЛВА), имеющие не очень сложную конструкцию, значительную широкополосность и не нуждающиеся в какой-нибудь специальной настройке [7]. Однако в популярной литературе методика их расчёта дана схематично [8]. Конечно, точный расчёт ЛВА с учётом многих влияющих факторов довольно сложен, но существует и простая методика расчёта [9]. Она позволяет сконструировать антенны, задавшись такими параметрами, как коэффициент направленного действия и рабочий интервал частот.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		60

4.1 Методика расчёта логопериодической антенны

Известно, что у ЛВА длины вибраторов и расстояния между ними должны изменяться в геометрической прогрессии с знаменателем τ , а расстояние (в числе длин волн) между полуволновым, наибольшим, и соседним, меньшим, вибратором характеризуется параметром σ . Параметры τ и σ связаны между собой соотношением:

$$\sigma = 0,25(1 - \tau)ctg\alpha, \quad (4.1)$$

где α – представляет собой угол между осью антенны и линией, проходящей через концы вибраторов.

Выбор параметров τ и σ носит компромиссный характер и влияет на длину логопериодической антенны (длина L , Расстояние между наименьшим и наибольшим вибраторами).

Рекомендуется выбирать указанные параметры в соответствии с значением КНД по графику, изображённому на рисунке 4.1.

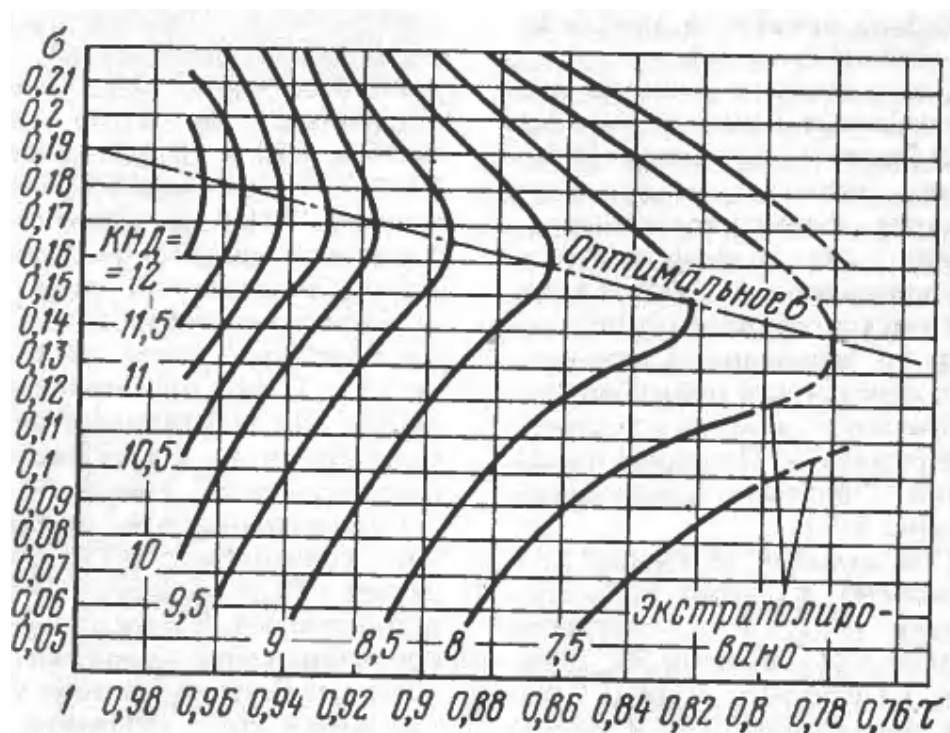


Рисунок 4.1 – График зависимости σ и τ от КНД антенны

На графике под оптимальным подразумевается значение σ , которому соответствует минимальное значение τ при заданном КНД антенны. Уместно ответить, что число вибраторов N в логопериодической антенне в основном зависит от значения τ (с увеличением τ возрастает N), а её размеры возрастают с увеличением σ . Кроме того, оптимальное значение σ соответствует минимуму коэффициента стоячей волны, а при больших значениях σ диаграмма направленности антенны становится многолепестковой.

Затем вычисляют угол α из приведённой формулы:

$$tg\alpha = \frac{1-\tau}{4\sigma}. \quad (4.2)$$

Для нахождения ориентировочной длины антенны L и числа вибраторов N находят ширину «активной» области антенны B_s , под которой понимают зону, где находится резонансный вибратор с двумя другими, примыкающими к нему, из соотношения:

$$B_s = BB_{ar}, \quad (4.3)$$

где $B = \frac{f_{max}}{f_{min}}$ – заданный коэффициент перекрытия рабочего интервала частот;

B_{ar} – коэффициент, характеризующий ширину «активной» области.

Коэффициент B_{ar} рекомендуется выбирать исходя из τ и α по графику, представленному на рисунке 4.2.

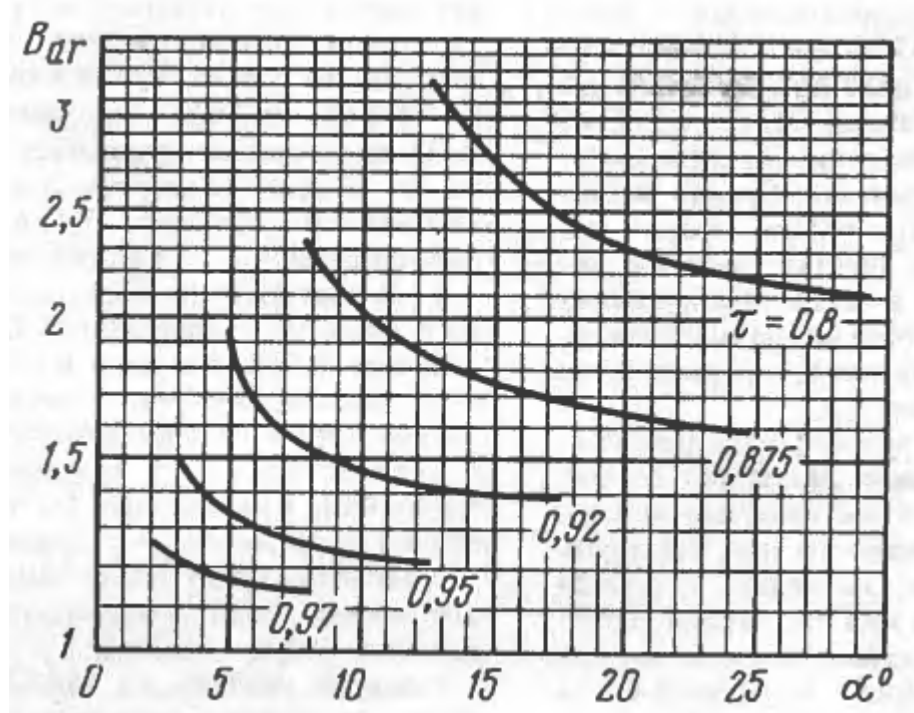


Рисунок 4.2 – Зависимость B_{ar} от τ и α

После этого, так как длина первого, самого длинного вибратора всегда равна $\frac{\lambda_{max}}{2}$, определяют длину антенны по формуле:

$$L = \frac{\lambda_{max}}{4} \left(1 - \frac{1}{B_s}\right) ctg \alpha. \quad (4.4)$$

Необходимое число вибраторов можно найти ориентировочно из соотношения:

$$N = 1 + \frac{lg B_s}{lg \frac{1}{\tau}}. \quad (4.5)$$

Затем округлить полученное значение до ближайшего целого числа. Вычисление параметров L и N желательно повторить несколько раз, варьируя значениями τ и σ в небольших пределах для минимизации длины антенны и числа её вибраторов.

Далее рассчитывают длину вибраторов, начиная с самого длинного, равного половине максимальной длины волны рабочего интервала частот, и расстояние между ними:

$$l_{n+1} = l_n \tau, \quad (4.6)$$

$$R_n = 0,5(l_n - l_{n+1}) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4.7)$$

Рассчитаем по описанной методике антенну в рабочем диапазоне частот 326 МГц – 332 МГц, имеющую КНД на уровне 9,5 дБи.

Минимальная частота 328 МГц соответствует максимальной длине волны 0,915 м.

В соответствии с рисунком 4.1, τ и σ равняются 0,895 и 0,165 соответственно.

Подставив полученные τ и σ в уравнение (4.2) получили $\alpha = 9,04^\circ$.

Коэффициент перекрытия рабочего интервала $B = 1,02$, а коэффициент, характеризующий ширину «активной» области был найден в соответствии с рисунком 4.2, $B_{ar} = 1,7$. Подставив полученные коэффициенты в уравнение (4.3), найдём ширину «активной» области антенны, $B_s = 1,74$.

После этого, найдём длину антенны L и количество вибраторов N по формулам (4.4) и (4.5) соответственно. $L = 0,612$ м, $N = 6$.

Далее, по формулам (4.6) и (4.7) были найдены длины всех вибраторов и расстояния между ними соответственно (рисунок 4.3).

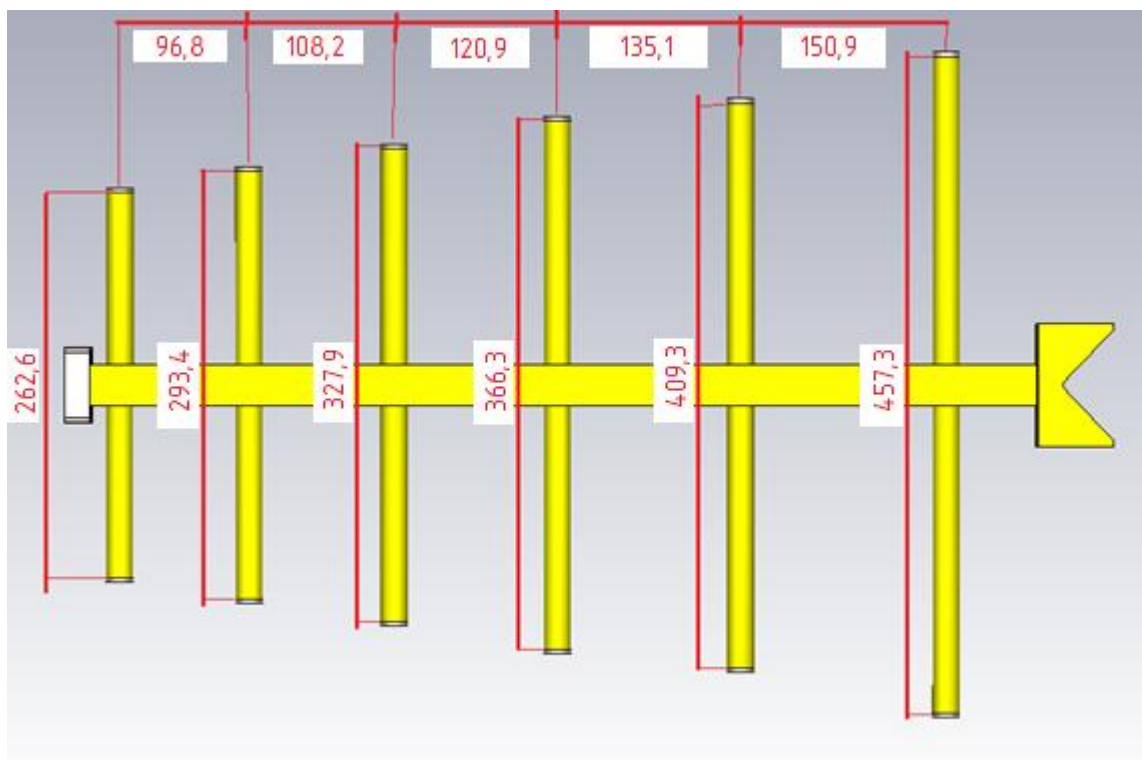


Рисунок 4.3 – Результаты расчёта параметров ЛВА

4.2 Создание модели рассчитанной логопериодической антенны и получение результатов электродинамической модели

Ранее говорилось о способе питания антенны и о том, что переход от коаксиальной розетки к квадратной коаксиальной линии из трубки и трубы через проволоку и лепесток, вносит весомое индуктивное сопротивление порядка 26 Ом. С целью избавиться от паразитного сопротивления, было решено изменить конструкцию питания антенны, то есть заменить фланцевую приборную розетку СР-50-165ФВ, проволоку, лепесток и трубку на фланцевую приборно-кабельную розетку SMA-РФКП-2.22-2-316 (рисунок 4.4) и гибкий коаксиальный кабель РК-50-2-22 (рисунок 4.5). Волновые сопротивления розетки и кабеля 50 ± 2 Ом. Рабочая частота розетки до 12 ГГц, уровень КСВ меньше 1,15 в рабочем диапазоне частот, коаксиальный кабель имеет внутренний проводник из медных посеребрённых проволок, сплошную изоляцию из фторопласта Ф-4, внешний проводник в виде оплётки из медных посеребрённых проволок и оболочку из

фторопласта Ф-4МБ. Коаксиальный кабель РК-50-2-22 должен будет припаиваться оплёткой к фланцу и внутренним проводником к перемычке. По этой причине потребуется нанести покрытие на фланец и перемычку с целью осуществления пайки.



Рисунок 4.4 – Фланцевая приборно-кабельная розетка SMA-РФКП-2.22-2-316



Рисунок 4.5 – Коаксиальный кабель РК-50-2-22

Производители коаксиальных кабелей РК-50-2-22 гарантируют сохранение параметров кабеля при радиусе изгиба кабеля не менее 15 мм, внутренняя сторона квадратной трубы 26 мм, то есть радиуса изгиба кабеля хватает.

В трёхмерной модели в программном пакете CST MWS место изгиба кабеля будет являться слабым местом при расчёте и потребует более точной сетки и увеличения времени расчёта, поэтому было решено в электродинамической модели вместо изогнутого кабеля применить выпрямленный кабель такой же длины (рисунок 4.6).

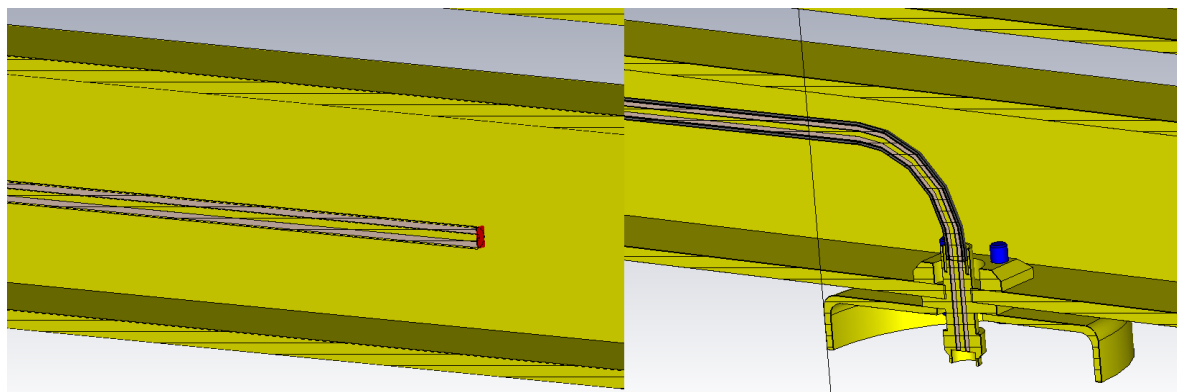


Рисунок 4.6 – Питание в электродинамической модели и реальная конструкция соответственно

Выполнив расчёт программном пакете CST MWS, были получены следующие результаты (рисунок 4.7, рисунок 4.8, рисунок 4.9, рисунок 4.10):

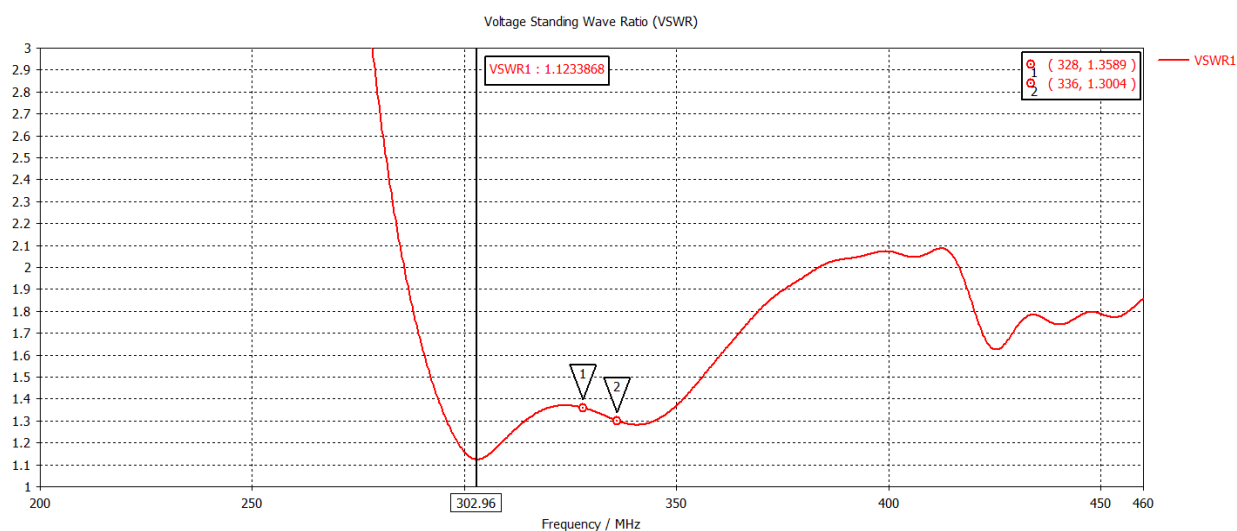


Рисунок 4.7 – КСВ рассчитанной антенны

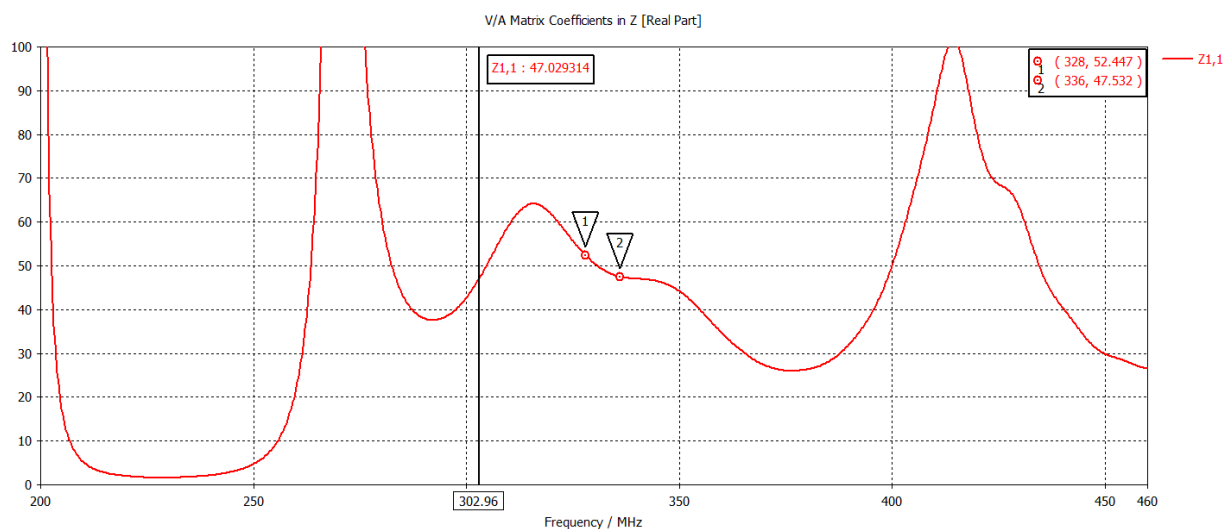


Рисунок 4.8 – Активное сопротивление на входе рассчитанной антенны

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

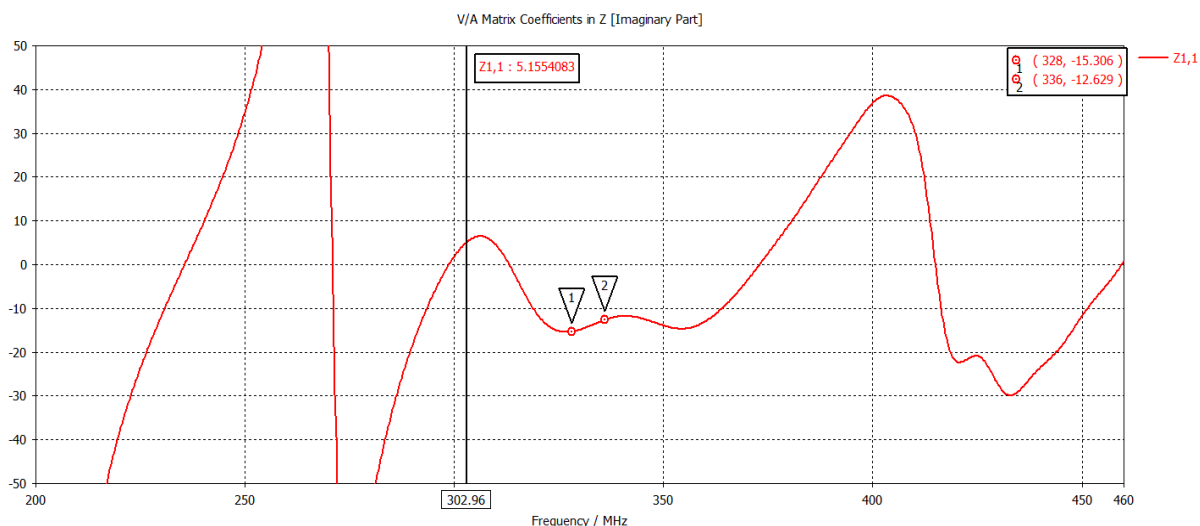


Рисунок 4.9 – Реактивное сопротивление на входе рассчитанной антенны

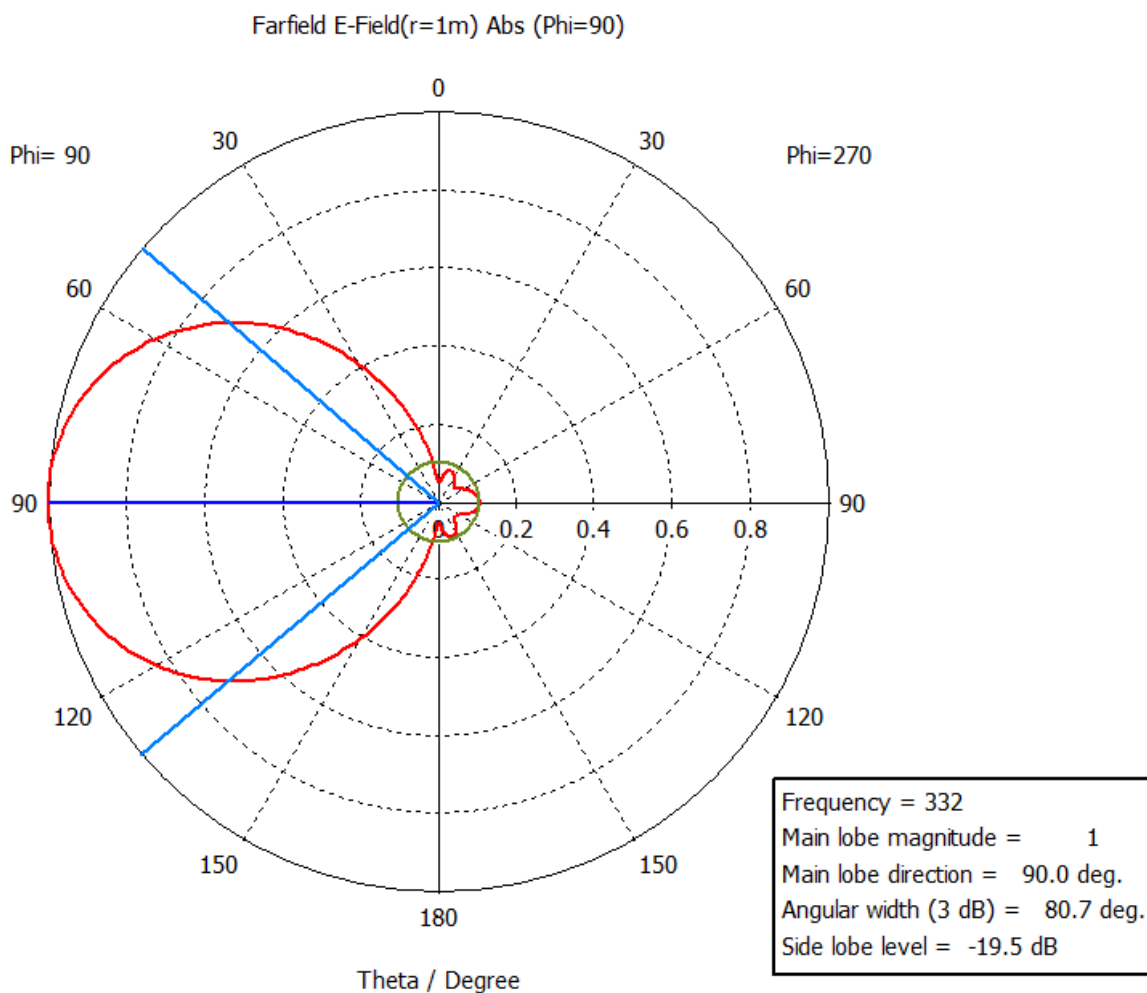


Рисунок 4.10 – ДН в Н плоскости рассчитанной антенны

Полученная диаграмма направленности с учётом погрешностей удовлетворяет техническим требованиям, однако, КСВ требует дополнительной корректировки. На частоте 302,96 МГц КСВ выглядит довольно

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

привлекательным, чтобы сместить данное КСВ на частоту 332 МГц, (центральная частота) скорее всего, потребуется увеличение длин вибраторов. Запараметризуем электродинамическую модель, конкретно, будут меняться длины вибраторов и запустим генетический алгоритм оптимизации. В результате получили следующие размеры вибраторов и характеристики (рисунок 4.11, рисунок 4.12, рисунок 4.13, рисунок 4.14, рисунок 4.15):

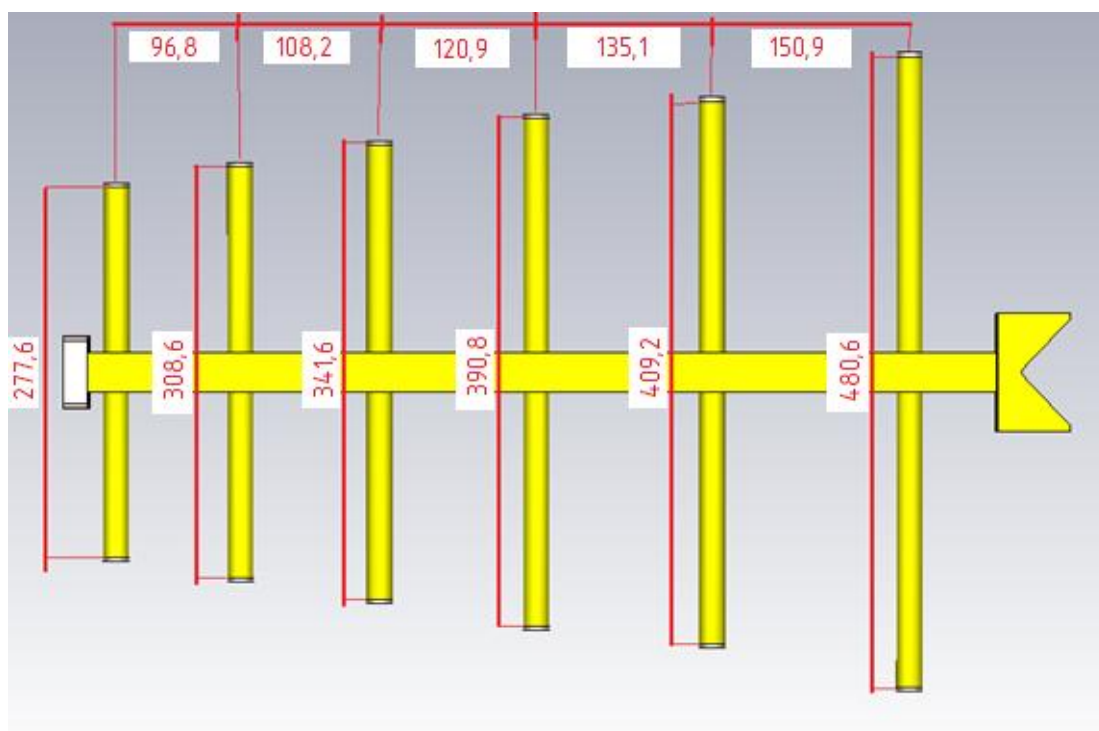


Рисунок 4.11 – Размеры вибраторов конечной модели логопериодической антенны

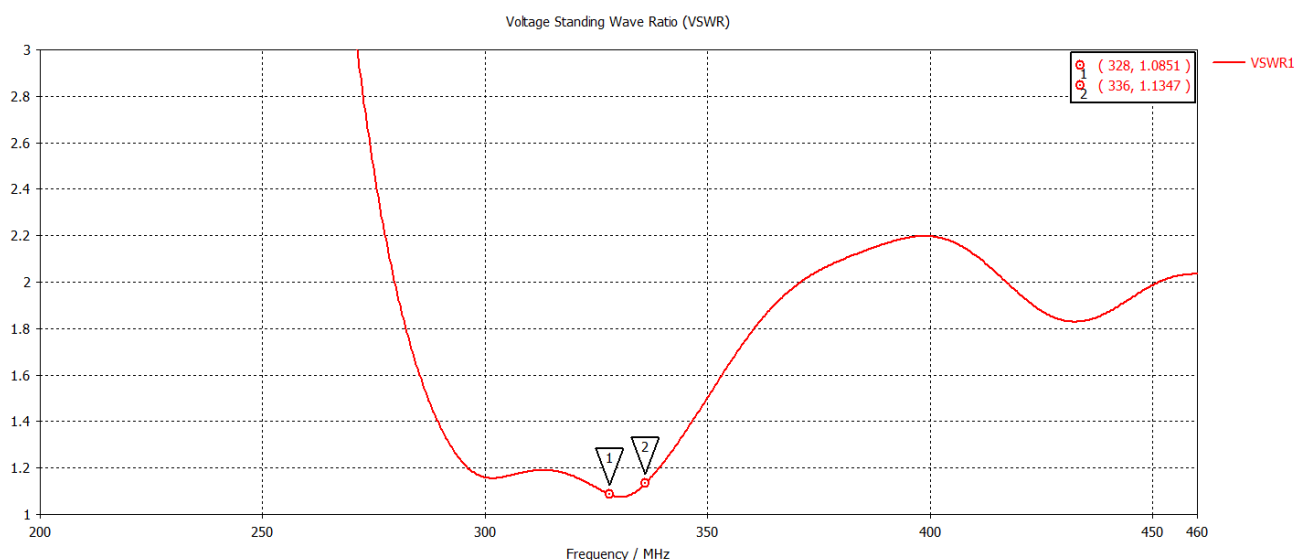


Рисунок 4.12 – КСВ конечной модели логопериодической антенны

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

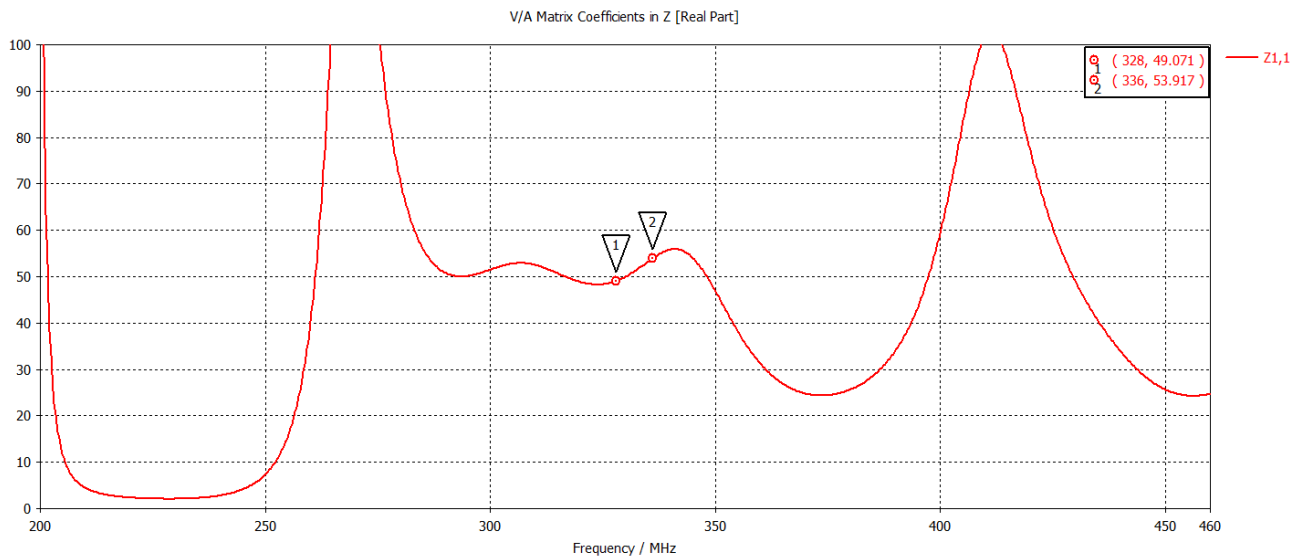


Рисунок 4.13 – Активное сопротивление на входе конечной модели логопериодической антенны

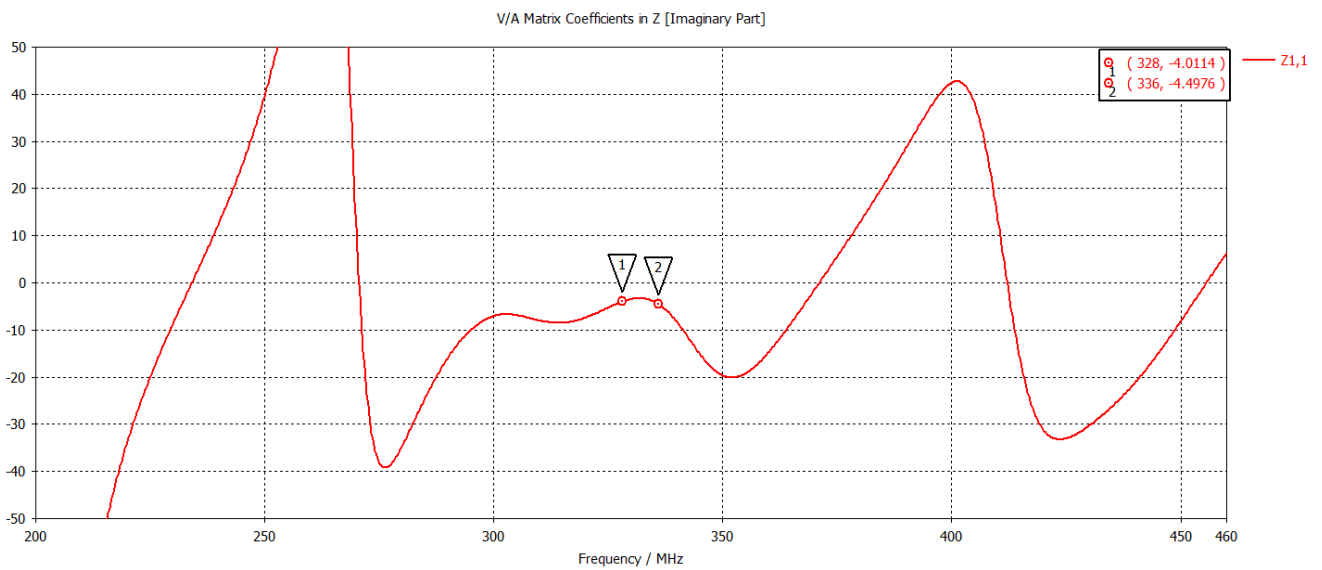


Рисунок 4.14 – Реактивное сопротивление на входе конечной модели логопериодической антенны

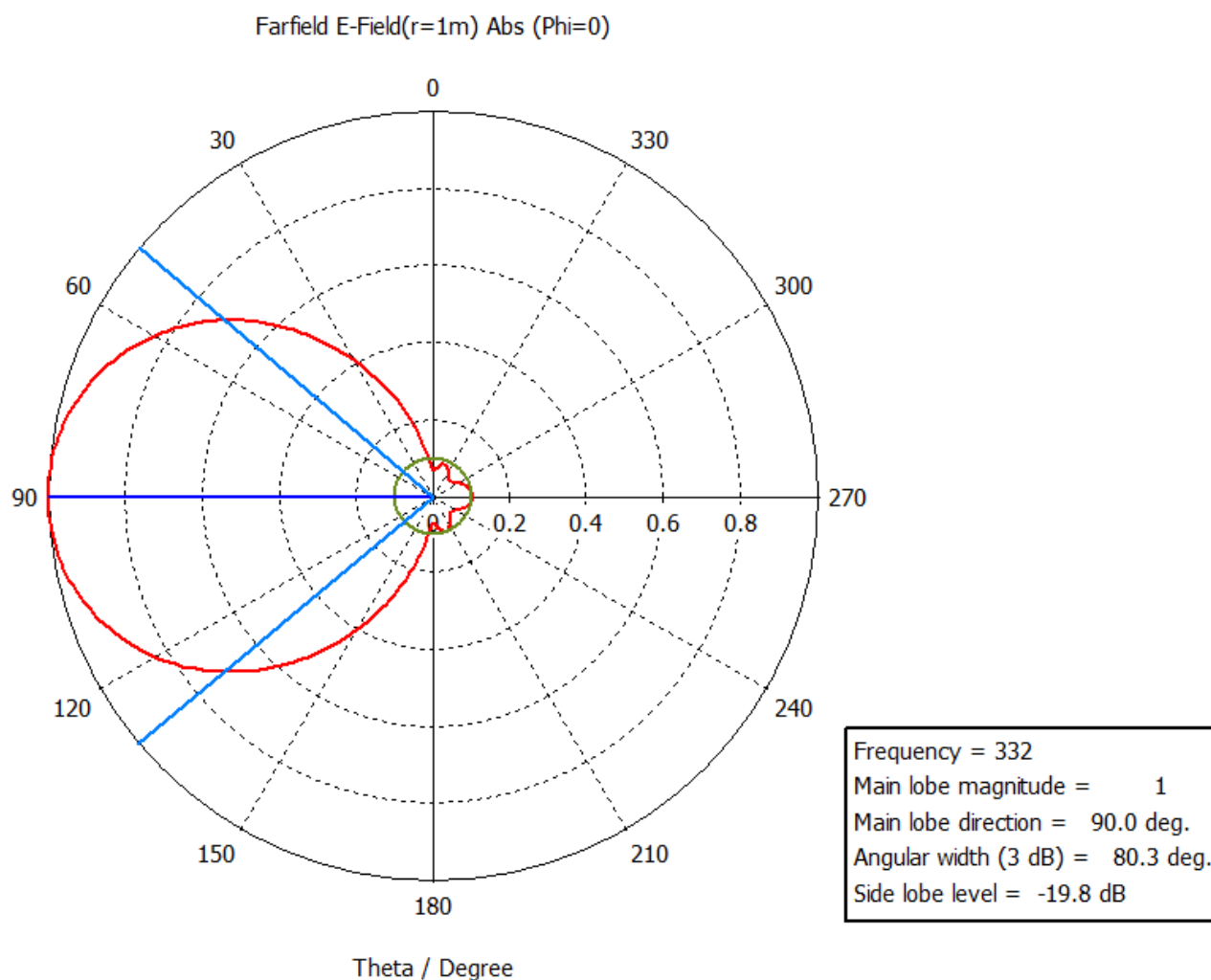


Рисунок 4.15 – ДН в Н плоскости конечной модели логопериодической антенны

Как и ожидалось для получения характеристик, удовлетворяющих техническим требованиям, следовало увеличивать длины вибраторов.

4.3 Описание конструкции конечной модели логопериодической антенны

В конечном итоге, была создана модель, характеристики которой с некоторой погрешностью удовлетворяют требованиям, предъявленным в техническом задании. Для достижения поставленной цели, пришлось увеличить количество вибраторов на 4 штуки, увеличить габариты антенны и изменить фидерную линию логопериодической антенны, точнее заменить фланцевую приборную розетку СР-50-165ФВ, проволоку, лепесток и трубку на фланцевую приборно-кабельную розетку SMA-РФКП-2.22-2-316 и гибкий коаксиальный

кабель РК-50-2-22. В результате чего были изменены конструкции 3 деталей, это перемычка (рисунок 4.16), втулка (рисунок 4.17) и фланец (4.18). В перемычке был уменьшен радиус отверстия и добавлено напыление для пайки с внутренним проводником коаксиального кабеля РК-50-2-22. Втулка была уменьшена в габаритах, а также было уменьшено отверстие под диэлектрическое заполнение коаксиального кабеля РК-50-2-22. Во фланце также было уменьшено отверстие, но под оплётку коаксиального кабеля РК-50-2-22, кроме этого, с внешней стороны фланца была прорезана фаска в отверстии и добавлено напыление для пайки фланца с оплёткой коаксиального кабеля. Других значительных изменений в конструкции произведено не было.

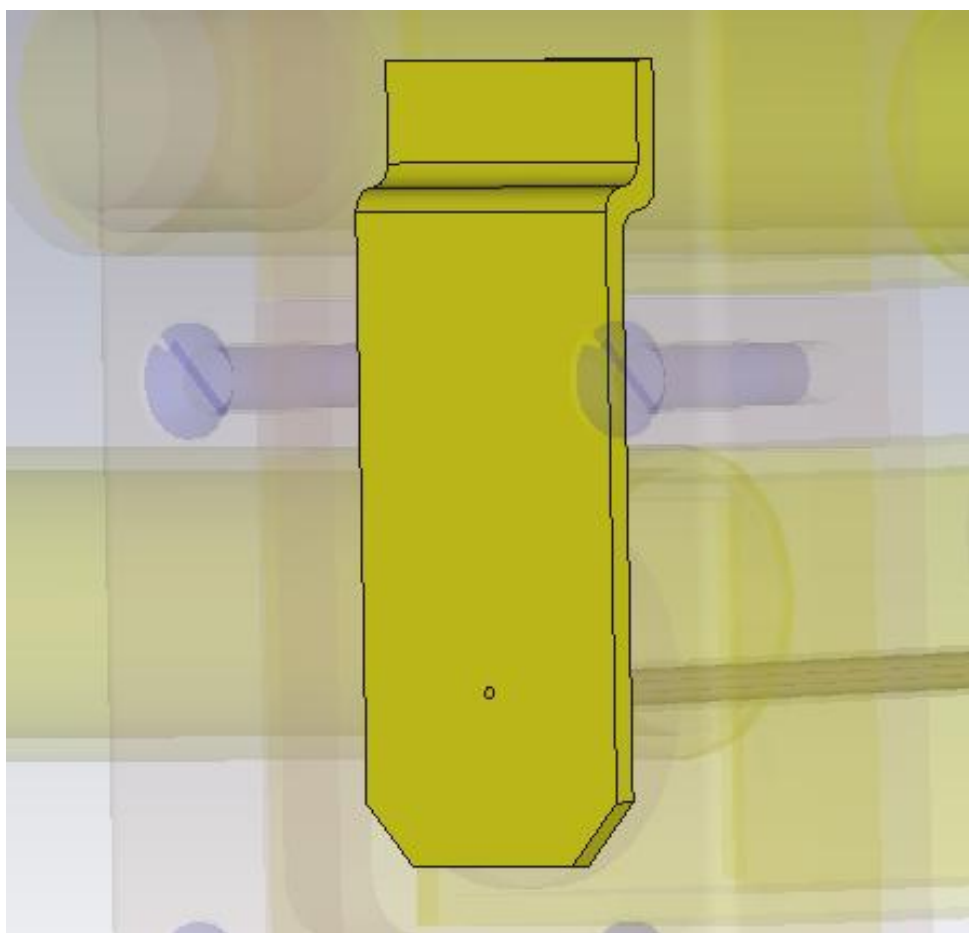


Рисунок 4.16 – Изменённая перемычка

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

Лист
72

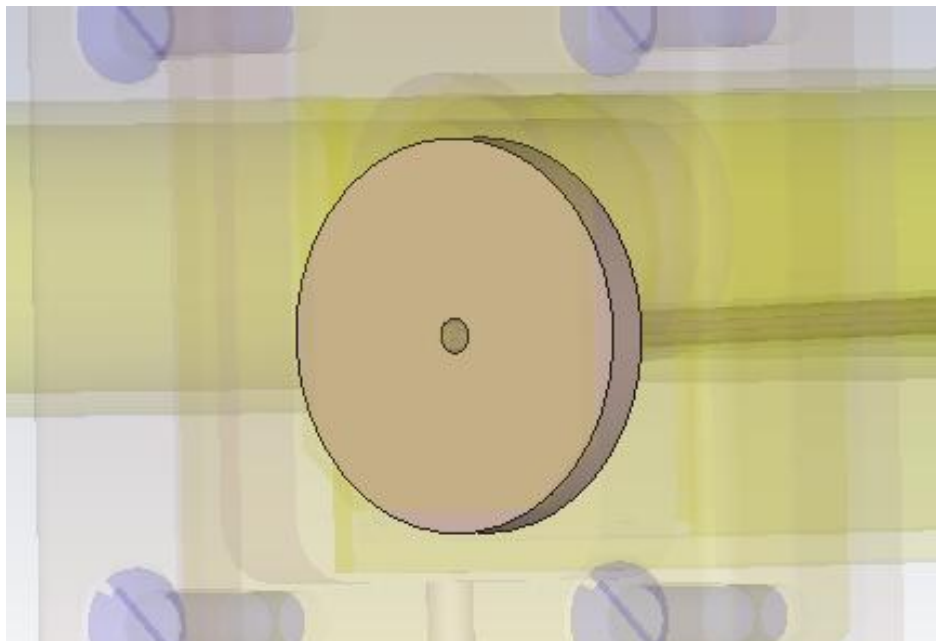


Рисунок 4.17 – Изменённая втулка

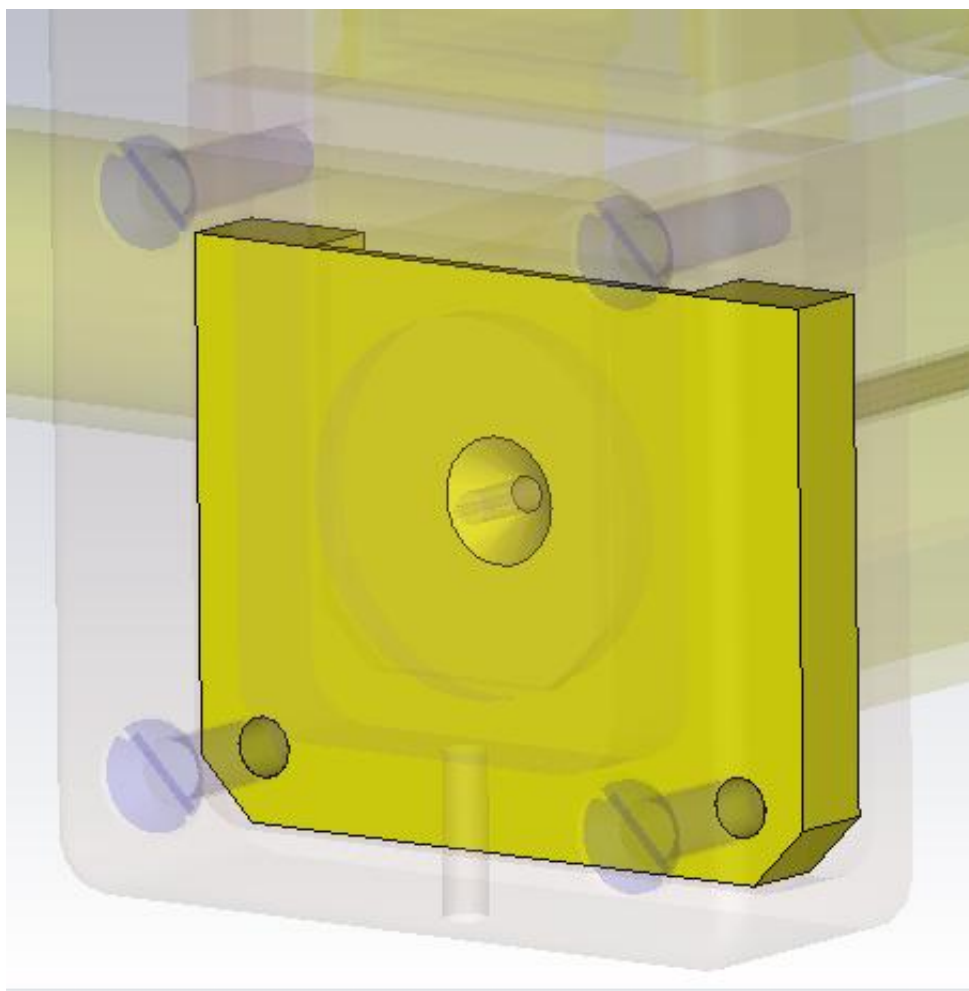


Рисунок 4.18 – Изменённый фланец

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ

Лист

73

Также были проведены несколько расчётов касающихся конструктивных особенностей таких как, усиление шва у основания вибраторов и допуск перпендикулярности оси вибраторов относительно труб.

Как выяснилось, усиление шва у основания вибраторов практически не влияет на характеристики логопериодической антенны, их наличие увеличивает входное активное сопротивление на 0,6 Ом и уменьшает входное реактивное сопротивление на 0,5 Ом, влияние на диаграмму направленности отсутствует.

Допуск перпендикулярности оси вибраторов относительно трубы, как оказалось, является важным параметром. При допуске в 3 мм на любом из вибраторов, входное реактивное сопротивление меняется в диапазоне ± 3 Ома, ширина диаграммы направленности меняется в диапазоне ± 2 градуса, а уровень обратного излучения в диапазоне ± 1 дБ. Всего же вибраторов 12, и при отклонении каждого из них хотя бы на 3 мм, приведёт к непредсказуемым изменениям характеристик антенны.

4.4 Выводы по разделу четыре

В данном разделе была описана методика расчёта ЛВА. Был проведён расчёт параметров ЛВА по описанной методике, в результате чего была построена электродинамическая модель ЛВА по рассчитанным параметрам.

Был решён вопрос, касающийся фидерной линии ЛВА, путём замены фланцевой приборной розетки CP-50-165ФВ, проволоки, лепестка и трубки на фланцевую приборно-кабельную розетку SMA-РФКП-2.22-2-316 и гибкий коаксиальный кабель РК-50-2-22.

После некоторых корректировок расчётной модели, была получена конечная модель ЛВА.

Также была описана конструкция конечной модели ЛВА и результаты исследования некоторых конструктивных особенностей антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении проделанной работы можно сделать следующие основные выводы.

Результаты, получаемые в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio, оказались довольно близки к результатам, полученным путём измерения характеристик существующей антенны.

Генетический алгоритм оптимизации вариационным методом оказался наиболее подходящим для моих целей.

Для удовлетворения требований, предъявляемым к диаграмме направленности, конкретно, к уровню обратного излучения, в антенне типа «волновой канал», требуется наличие рефлекторов специальной формы, что нивелирует всю простоту конструкции антенны данного типа.

Наиболее подходящим вариантом для удовлетворения требований, предъявленных в техническом задании, является изменение конструкции существующей логопериодической антенны КВП-Г ТБИС.468571.027, а именно, увеличение количества вибраторов на 4 штуки, корректировка длин вибраторов, расстояний между вибраторами и изменение фидерной линии логопериодической антенны, то есть замена перехода от приборной фланцевой коаксиальной розетки к квадратной коаксиальной линии из трубки и трубы через проволоку и лепесток на приборно-кабельную фланцевую коаксиальную розетку и коаксиальной кабель.

В конечном итоге, была получена модель, удовлетворяющая всем требованиям, предъявленным в техническом задании. Также по конечной модели логопериодической антенны был подготовлен комплект конструкторской документации.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		75

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АФР	– амплитудно-фазовое распределение
ВПП	– взлётно-посадочная полоса
ДН	– диаграмма направленности
КВП	– контрольно-выносной пункт
КНД	– коэффициент направленного действия
КСВ	– коэффициент стоячей волны
ЛВА	– логопериодическая вибраторная антенна
ЛНС	– линейная непрерывная система
САПР	– система автоматизированного проектирования
СВЧ	– сверхвысокие частоты
ТЗ	– техническое задание
ФАР	– фазированная антенная решётка
ЭВМ	– электронная вычислительная машина

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные авиационные правила. Радиотехническое обеспечение полетов и авиационная электросвязь. Сертификационные требования. М.: 1999.
2. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 30 декабря 2009 г. № 1215 «Об утверждении нормативных методических документов, регулирующих функционирование и эксплуатацию аэродромов экспериментальной авиации».
3. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков. – М.: Изд-во МЭИ, 2010. – 160 с.
4. Лурье, М.С. Применение программы MATLAB при изучении курса электротехники. Для студентов всех специальностей и форм обучения / М.С. Лурье, О.М. Лурье. – Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2006. – 208 с.
5. Хансен, Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ / Р.К. Хансен; пер. с англ. Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М.: Изд-во «Советское радио», 1966. – 535 с.
6. Альметов, Р.С. Разработка эффективных вычислительных методов в проектировании антенны систем / Р.С. Альметов, И.М. Бигильдин // Новые информационные технологии в науке: сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 1. – Уфа: Изд-во «Аэтерна», 2015. – С. 7-15.
7. Харченко, К. УКВ антенны / К. Харченко. – М.: ДОСААФ СССР, 1969. – 70 с.
8. Арбузов, А. Логопериодическая антенна уменьшенных размеров / А. Арбузов, В. Чернолес. – Изд-во «Радио», 1985. – С. 28-30.
9. Бененсон, Л.С. Сверхширокополосные антенны. Сборник статей / Л.С. Бененсон; пер. с англ. под. ред. Л.С. Бененсона. – М.: Изд-во «Мир», 1964. – С. 296-319.

					11.04.03.2017.058.00.00 ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		77