

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ

Заведующий кафедрой СВЧ и КР

Проф., канд. физ.-мат. наук

_____ С. Н. Шарангович

«___» _____ 2021 г

СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА

Бакалаврская работа по направлению 11.03.01 «Радиотехника»

Профиль «Микроволновая техника и антенны»

СОГЛАСОВАНО

Консультант по проектированию

Студент гр. 147-3

Инженер – конструктор

_____ Рукавишников Ю.В.

ООО НПК «ТЕСАРТ»

«___» _____ 2021 г.

_____ Залевский А. А.

«___» _____ 2021 г.

Руководитель

Заведующий кафедрой РСС

канд. техн. наук, доцент

_____ Фатеев А.В.

«___» _____ 2021 г.

Томск 2021

Реферат

Пояснительная записка 94с., 124 рис., 42 источника, 15 табл.

ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ, EMPRO, СВЧ, AWR, TXLINE, КОПЛАНАРНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧ, ВАЦ, СИСТЕМА, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА, FIELDFOX, E-CAL.

Целью работы является разработка системы распределения мощности СВЧ-диапазона.

В процессе работы создавалась модель системы распределения мощности, разрабатывались печатные платы (ПП), проводились измерения с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ).

Моделирование выполнялось в программах систем автоматизированного проектирования (САПР) EMPro и AWR. Расчёт и вспомогательные операции выполнялись в Mathcad, TXline. Проектирование принципиальной схемы и топологии платы осуществлялось в Altium Designer. Измерение изготовленный плат проводилось с помощью *FieldFox* и лабораторного источника питания от компании *Keysight*.

Пояснительная записка написана в текстовом редакторе Microsoft Word 2016.

Abstract

Explanatory note 94 p., 124 fig., 42 sources, 15 tab.

POWER DIVIDER, TRANSFER RATIO, EMPRO, MICROWAVE, AWR, TXLINE,
COPLANAR TRANSMISSION LINE, VAC, SYSTEM, DESIGN, PCB, FIELDFOX, E-CAL.

The aim of the work is to develop a system for the distribution of microwave power.

In the process, a model of a power distribution system was created, printed circuit boards (PCBs) were developed, measurements were carried out using a vector network analyzer (VNA).

The modeling was carried out in the programs of computer-aided design (CAD) systems EMPro and AWR. Calculation and auxiliary operations were performed in Mathcad, TXline. The design of the schematic diagram and layout of the board was carried out in Altium Designer. Measurement of the manufactured boards was carried out using *FieldFox* and a *Keysight* laboratory power supply.

The explanatory note was written in a text editor Microsoft Word 2016.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники(СВЧиКР)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. Кафедрой СВЧиКР

Шарангович С.Н.
(Ф.И.О.)

_____ (подпись)

«____» ____ 20 ____ г.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускную квалификационной работы

студенту гр.147-3 радиотехнического факультета

Рукавишникову Юрию Витальевичу

1 Тема работы: Система распределения мощности СВЧ диапазона (утверждено приказом по университету от _____ 2021 г. №_____)

2 Срок сдачи работы на кафедру «____» ____ 2021 г.

3 Цель работы: Разработка системы распределения мощности СВЧ диапазона.

4 Назначение: Система используется для распределения мощности от гетеродина к излучаемым антеннам и смесителям многоканального приемника ЦАР радара СВЧ диапазона и калибровки системы.

5 Требуемые технические характеристики:

5.1 Система должна работать в диапазоне рабочих частот $24,125 \pm 0,125$ ГГц;

5.2 Система должна иметь вес не более 1 кг;

5.3 Габаритные размеры системы не более 170 мм в длину, 170 мм в ширину, 2 мм в высоту;

5.4 Система должна иметь два входных порта, первый для калибровки системы, второй для основного сигнала, при входной мощности 10 дБ;

5.5 Входные порты системы реализовать через разъем типа 3,5 мм;

5.6 Система должна переключаться с входного основного порта на входной калибровочный порт;

- 5.7 Сигнал с калибровочного входа на выходах смесителей должен быть менее минус 30 дБ;
- 5.8 Изоляция между портами у переключателя должна быть более 25 дБ;
- 5.9 Управление переключателями должно осуществляться с помощью напряжения;
- 5.10 Управление переключателей реализовать через отдельный разъем;
- 5.11 Время переключения не медленнее 15 нс;
- 5.12 Для усиления мощности использовать усилители с регулируемым коэффициентом усиления;
- 5.13 В системе должно быть реализовано два выхода: калибровочный и основной;
- 5.14 Выходы основного и калибровочного канала должны быть реализованы через разъем 3,5 мм;
- 5.15 Коэффициент передачи с основного входного порта на выход основного порта не менее 5 дБ;
- 5.16 Мощность с выхода калибровочного порта не менее минус 6 дБ;
- 5.17 Система должна переключаться с выходного основного порта на выходной калибровочный порт;
- 5.18 Должна быть реализована подача мощности к 16 смесителям;
- 5.19 Мощность, подводимая к смесителям в диапазоне от 0 до 10 дБ;
- 5.20 Подводимая мощность к 16 смесителям должна быть реализована через разъем SMP;
- 5.21 На всех выходах и входах системы не должно присутствовать постоянное напряжение;
- 5.22 Система должна иметь отверстия для последующего крепления;
- 5.23 Потребляемое напряжение не более 12 В;
- 5.24 Потребление не более 15 Вт.

6 Вопросы, подлежащие разработке:

- 6.1 Аналитический обзор литературы по теме делители мощности;
- 6.2 Определения типа диэлектрика для реализации системы в данном частотном диапазоне с заданным весовым требованием;
- 6.3 Подбор компонентов и разъемов под заданное техническое задание;
- 6.4 Создание рабочей модели системы распределения мощности в САПР с электромагнитным расчётом;
- 6.5 Проектирование системы распределения мощности с последующем созданием макета;

6.6 Измерение макета системы распределения мощности на векторном анализаторе цепей;

6.7 Сравнение результатов электромагнитного моделирования и полученных результатов при измерении.

7 По результатам ВКР представить следующую документацию

7.1 Электрические принципиальные схемы системы;

7.2 Перечень элементов принципиальной электрической схемы системы.

8 Содержание пояснительной записи

8.1 титульный лист;

8.2 реферат;

8.3 лист задания с подписью преподавателя;

8.4 содержание;

8.5 введение;

8.6 обзор литературы по заданной тематике;

8.7 основная часть;

8.8 интерпретация результатов и выводы по проделанной работе;

8.9 список использованной литературы.

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Заведующий кафедрой РСС

Фатеев А.В.

(Подпись)

«____» ____ 2021 г.

Задание согласовано:

Консультант:

Залевский .А.А.

(Подпись)

Инженер-конструктор

ООО НПК «ТЕСАРТ»

Задание принял к исполнению:

Рукавишников Ю.В.

(Подпись)

«____» ____ 2021 г.

Содержание

1	Введение	9
2	Обзор литературы и технических требований системы	10
2.1	Приемо-передающее устройство переднего обзора.....	10
2.2	Обзор требуемых характеристик системы.....	11
2.3	Реализация системы распределения мощности.....	11
2.4	Обзор литературы по делителям мощности	13
2.5	Делитель мощности Уилкинсона.....	16
3	Расчёт линии передачи для реализации системы	17
3.1	Выбор материала подложки	17
3.2	Расчёт копланарной линии передачи.....	18
4	Подбор компонентов системы	20
4.1	Компоненты СВЧ тракта	20
4.2	Компоненты цепи питания	24
4.3	СВЧ разъемы.....	27
4.4	Разъемы питания, переключения и компоненты	28
5	Моделирование СВЧ устройства	29
5.1	Обзор программы EMPro.....	29
5.2	Моделирование пассивного делителя мощности	33
5.3	Моделирование «маленькой» платы деления мощности	36
5.4	Моделирование «большой» платы деления мощности	40
5.5	Моделирование платы «коммутации».....	41
5.6	Полученные значение моделирования системы.....	45
6	Проектирование печатной платы	47
6.1	Обзор программы Altium Designer.....	47
6.2	Создание принципиальной электрической схемы плат деления мощности.....	49
6.3	Создание принципиальной электрической схемы платы «коммутации»	52
6.4	Создание топологий плат деления	54
6.5	Создание топологии платы «коммутации»	60
6.6	Полученные данные после проектирования печатных плат	63
7	Измерение системы распределения мощности.....	65
7.1	Оценка потребления системы	65
7.2	Обзор ВАЦ <i>FieldFox</i>	67
7.3	Калибровка ВАЦ	67

7.4 Измерение параметров изготовленного образца системы с помощью ВАЦ.....	70
8 Сопоставление результатов моделирования и измерения.....	77
9 Полученные параметры образца системы распределения мощности	80
10 Заключение.....	84
Сокращения, обозначения, термины и определения.....	85
Список используемой литературы.....	86
Приложение РТФ.469335.001.Э3	
Плата деления	90
Приложение РТФ.469335.002.ПЭ3	
Плата деления	91
Приложение РТФ.469335.003.Э3	
Плата коммутации	92
Приложение РТФ.469335.004.ПЭ3	
Плата коммутации	93

1 Введение

В настоящее время область применения радиоэлектронных средств расширяется, комплексы радиосистем становятся все более сложными, это полностью относится и к радиотехнике СВЧ диапазона. В связи с расширением физических возможностей радиоэлектронной аппаратуры во многих случаях необходимо излучать, но и принимать СВЧ сигнал.

Делители и сумматоры мощности СВЧ являются наиболее распространёнными устройствами в радиоприемных и радиопередающих системах. Распространённость данных устройств связано с простотой конструкции, малыми габаритами и легкостью расчёта. Данные устройства являются взаимными. С помощью делителей можно производить равномерное деление или неравномерное. Делители применяются в антенных решетках, для разделения сигнала гетеродина на смесители, для сложения мощностей генераторов и т.д.

Задачей данной работы является изучение тематической литературы, реализация модели системы распределения мощности СВЧ диапазона, разработка топологии системы, снятием параметров системы и сравнение результатов эксперимента и моделирования, тем самым закрепить теоретические и практические знания.

Данная система распределения будет использована для распределения мощности от гетеродина к излучаемым антеннам и смесителям многоканального приемника ЦАР радара СВЧ диапазона и калибровки системы.

2 Обзор литературы и технических требований системы

2.1 Приемо-передающее устройство переднего обзора

Приемо-передающее устройство переднего обзора представляет собой радиотехническую систему, в которой совокупность модулей, предназначенных для передачи и приема сигнала, с последующей обработкой сигнала. По направленности действия данное приемопередающее устройство относится к переднему обзору т.е. предназначено для обнаружения препятствий в заданном секторе относительно технического средства. Данная система должна обеспечивать соотношение сигнал/шум не менее 20 дБ для цели с ЭПР 5 м² на дальности 300 м.

Ниже приведена структурная схема работы приемопередающего устройства переднего обзора. (рисунок 2.1)

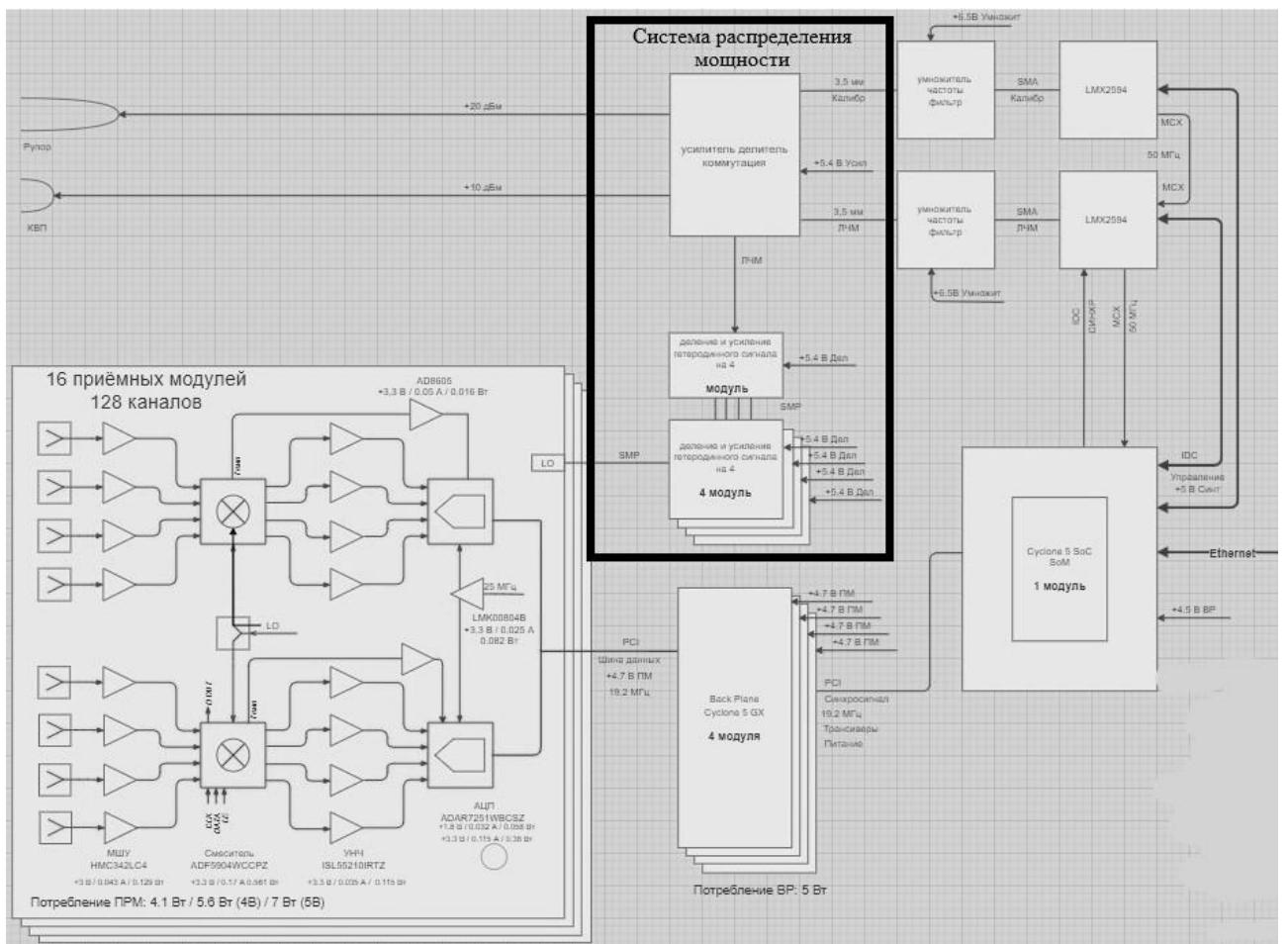


Рисунок 2.1 – Структурная схема приемопередающего устройства

Из рисунка 2.1 видно, что в данном устройстве используются:

- синтезаторы частоты;
- удвоители частоты;
- система распределения мощности;
- передающие антенны;

- приемные антенные решетки;
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП);
- усилители мощности;
- делители мощности;
- программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС).

Анализируя представленную структурную схему можно сделать вывод, что требуется система распределения мощности с двумя входными портами для подключения синтезаторов и удвоителей частоты, два выходных основных порта для передающих антенн и 16 выходных каналов, для распределения сигнала гетеродина на приемные модули.

2.2 Обзор требуемых характеристик системы

Исходя из предоставленного технического задания, формируются следующие требования:

1) Данная система будет реализована с помощью копланарной линии передачи. Преимущества реализации с помощью копланарной линии передачи связаны:

- с наименьшими потерями в рабочем диапазоне частот системы;
- с массогабаритными требованиями,
- с требованиями крепления системы.

2) Данная система будет иметь два переключателя, которые реализуют переключение:

- с основного входного канала на калибровочный входной канал,
- с выходного основного канала на выходной калибровочный канал.

3) Будут использованы: топологические делители мощности, усилители мощности (УМ), переключатели, коаксиально-микрополосковые переходы (КМП).

4) Для реализации системы будет произведен подбор компонентов для удовлетворения требуемых технических характеристик (ТТХ).

2.3 Реализация системы распределения мощности

Перед проектированием выше понятая система была реализована на 3 разных по конфигурации плат. Данное решение было принято для:

- уменьшения помех по питанию;
- универсальности и гибкости системы;
- легкой замены вышедшей из строя печатной платы;
- более лучшего теплоотвода;

- использования 4, 8, 12 или 16 приемников.

Первая печатная плата «коммутация» включает реализацию таких функций, как:

- переключение между основным и калибровочным входом;
- переключение между основным и калибровочным выходом;
- входных разъемов основного и калибровочного канала;
- выходных разъемов основного и калибровочного канала;
- разъема SMP для соединения с платой деления гетеродина,
- делителя мощности.

Вторая печатная плата имеет название большая плата деления мощности включает реализацию таких функций, как:

- усиление сигнала с платы «коммутации»
- деление мощности на 4 порта;
- выходные разъемы типа SMP для подключения 4 плат.

Третья печатная плата будет иметь название маленькая плата деления мощности, данных плат будет 4 штуки, включающая реализацию таких функций, как:

– функциональная часть остаётся от большой платы деления, но при этом реализация платы будет в ограниченных размерах, так чтобы платы имели подключение к большой плате деления с определенным шагом.

На рисунке 2.2 указана реализация системы с разбиением на отдельные платы.

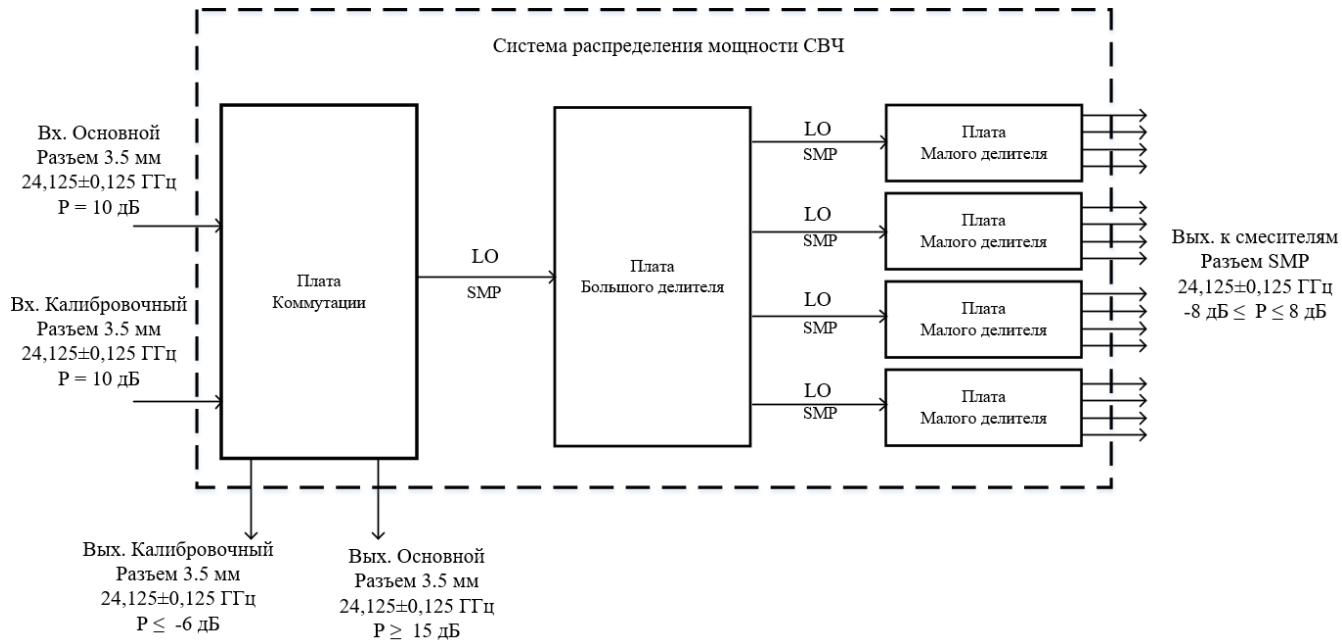


Рисунок 2.2 – Реализация системы

2.4 Обзор литературы по делителям мощности

Выше было сказано о использовании топологических ДМ, а в данном разделе будут рассмотрены характеристики ДМ, а также виды реализации ДМ.

Делитель мощности СВЧ – это СВЧ устройство с тремя портами, которое разделяет входную мощность на два или более портов, либо же суммирует подаваемую мощность с двух и более портов. В идеальном ДМ, сигнал подаваемый на порт 1, в равной мере разделяется между двумя выходными портами (плечами) при разделении мощности. При подаче сигналов на 1 и 2 порт происходит суммирование мощности. Поскольку сумматор выполняет функцию, обратную делителю, отсюда следует, что делители и сумматоры в большинстве случаев являются устройствами с идентичными топологиями.

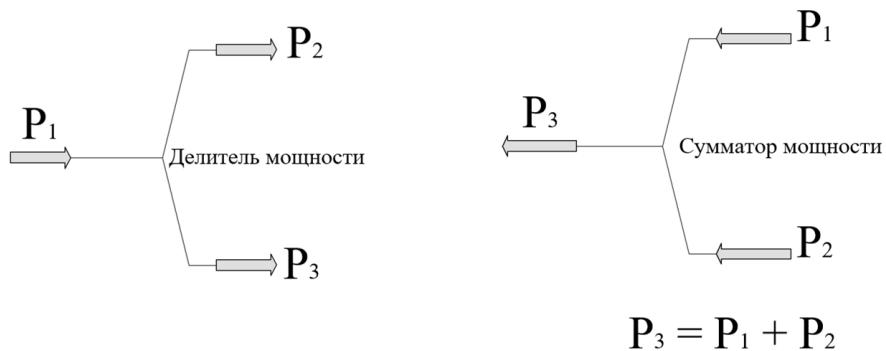


Рисунок 2.3 – Делитель и сумматор мощности

Для описания ДМ используют предпочтительно S-параметры, которые можно рассчитать по формулам, так же снять при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ). Матрица рассеяния, называемая S-матрицей, описывает отношения напряжений на входном порте устройства к напряжениям на отражающих портах устройства, принимая во внимание и амплитуду, и фазу [1]. Шестиполюсник может быть описан в виде матрицы рассеяния:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Для ДМ сопротивления подводящих ЛП должны быть согласованы для получения минимального отражения в каждом канале. Для идеального согласования, коэффициенты диагональных элементов равняются нулю, следовательно, матрица переписывается в виде:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Передача сигнала между любыми двумя каналами происходит с равными потерями мощности, если только это равномерное деление. Это означает, что элементы равны и имеют симметрию относительно главной диагонали, матрица преобразуется в вид:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Матрица рассеивания для идеального ДМ:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & 0 & 0 \\ S_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Из матрицы (2.4), видно то, что идеальный ДМ не имеет отраженных волн, т.е. ЛП согласованна с входным и выходными портами ДМ, а также, что плечи 2 и 3 развязаны.

Для идеального случая сумма квадрата каждого элемента в строке равняется единице. Это указывает на то, что энергия так или иначе преобразовывается в другие формы:

$$|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 = 1. \quad (2.5)$$

Для характеристики ДМ используют такие параметры, как:

- 1) коэффициент деления мощности;
- 2) вносимые потери при делении;
- 3) КСВ;
- 4) развязки между выходными портами (плечами) ДМ;
- 5) разность фаз между выходными портами (плечами) ДМ.

В качестве делителей мощности можно использовать [2]:

- 1) Т-образного разветвителя,
- 2) мостовые схемы,
- 3) резистивные делители мощности.

Существует большое количество реализаций ДМ, и каждая реализация будет зависеть от таких параметров как:

- 1) центральная частота;
- 2) рабочий диапазон частот;
- 3) развязка между портами;
- 4) вес и габариты;
- 5) точность.

Т-образный ДМ указан на рисунке 2.4.

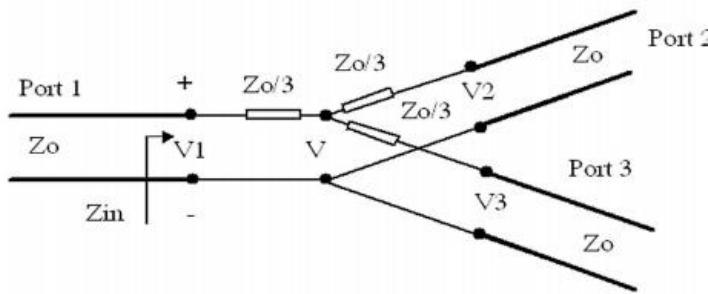


Рисунок 2.4 – Представление Т-образного делителя мощности

Из рисунка 2.2, видно то, что данный делитель представлен как три ЛП, с входным сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом и имеющие скачок сопротивления, который имеет длину равную четверти длины волны.

ДМ можно реализовать с использованием, НО (рисунок 2.5 – 2.6).

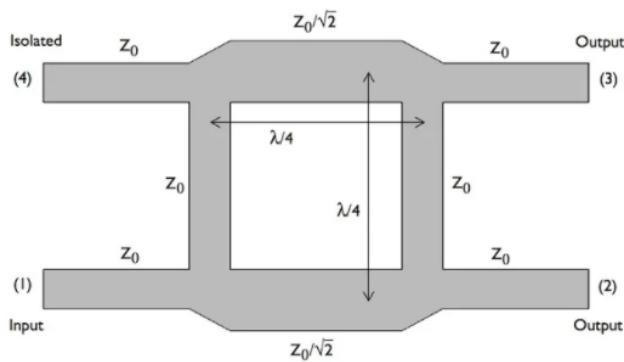


Рисунок 2.5 – Шлейфный НО

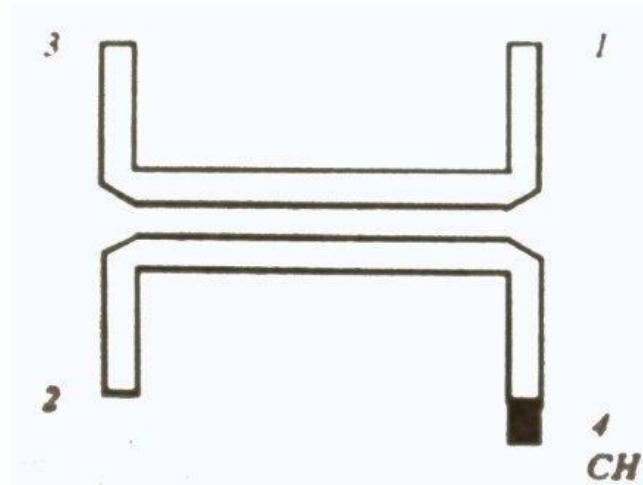


Рисунок 2.6 – ДМ на основе одноступенчатого НО

При подключении СН к 4 порту шлейфного НО, получается шлейфный ДМ. Особенность данного делителя в том, что выходные сигналы будут сдвинуты на 90 градусов по фазе. Из-за данной особенности ДМ относится к квадратурным. Имеют довольно узкий диапазон частот. Для реализации ДМ на основе одноступенчатого, НО, используется СН на 4 порте. В данном ДМ коэффициент деления мощности зависит от ширины и зазора между ЛП.

2.5 Делитель мощности Уилкинсона

При рассмотрении литературы по ДМ, был выбран делитель мощности Уилкинсона. ДМ Уилкинсона берет свое название от Эрнеста Уилкинсона, инженера-электронщика, который первоначально разработал его в 1960-х годах. Уилкинсон опубликовал свою идею в журнале IRE Trans. по микроволновой теории и технике, в январе 1960 года под названием: "N-портовый делитель мощности".

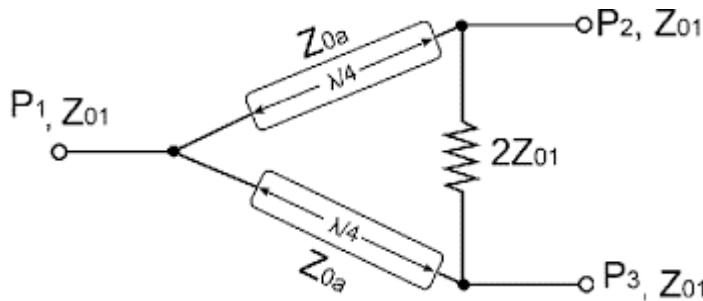


Рисунок 2.7 – ДМ Уилкинсона

Структура данного делителя проста, состоит из:

- входной линий с волновым сопротивлением 50 Ом,
- четвертьволновых отрезков ЛП с волновым сопротивлением 70 Ом,
- сопротивления равным 100 Ом.

Плюсы данного ДМ:

- простота исполнения данного делителя, как на СВЧ, так и на более низких частотах;
- небольшие потери, которые в основном связаны с резистором на 100 Ом;
- большая развязка между плечами.

Минусы данного ДМ:

- малый рабочий диапазон частот - это связано с тем, что используются четвертьволновые ЛП, из-за этого рабочий диапазон частот ограничен. Есть модели имеющие широкий диапазон частот, но из-за таких решений увеличивается стоимость ДМ;
- топологическая реализация на частотах до 3 ГГц, имеют довольно большие размеры, из-за этого топологическая реализация данных ДМ используется на частотах выше 3 ГГц.

3 Расчёт линии передачи для реализации системы

3.1 Выбор материала подложки

Подложка является одной из важных составляющих для реализации системы, так как свойства подложки влияет на параметры ЛП, технологический процесс, конструирования ЛП в целом. Наиболее важными параметром подложки является относительная и эффективная диэлектрическая проницаемость, так как они определяют длину волн в ЛП, которая в свою очередь влияет на размеры ЛП. Для минимизации ЛП используют относительную диэлектрическую проницаемость (ϵ_r) как можно выше, но также при большой ϵ_r снижаются потери, вызванные излучение ЛП. Есть минусы большого ϵ_r , которые связаны с возбуждением поверхностных волн, но для того чтобы не было паразитных поверхностных волн уменьшают толщину подложки.

Второй по значимости является параметр тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$), который определяет погонные диэлектрические потери из-за, которых может существенно вносить вклад в общие потери в ЛП.

Не надо забывать о теплопроводности и электрическую прочность материала, так как при размещении таких компонентов как усилители мощности (УМ). В месте размещения УМ плата нагревается и из-за неравномерного нагрева платы появляются механические напряжения, которые приводят к тепловому пробою.

Из вышеупомянутых факторов и материалов, которые есть у компании Резонит, которая производит печатные платы, выбирается материал *Rogers4350B*. [3] Параметры данного материала указаны в таблице 3.1 [4].

Таблица 3.1 – Параметры материала *Rogers4350B*

Параметры	Значения
ϵ_r	3.66 (с 8 до 40 ГГц)
$\operatorname{tg}\delta$	0.0037 (10ГГц)
Толщины, мм	0.203; 0,305; 0,508; 0,813; 1,524
Теплопроводность, Ватт/м/°К	0.65 (80°C)
Объёмное сопротивление Мом/см	$1.2 \cdot 10^{10}$
Поверхностное сопротивление, МОм	$5.7 \cdot 10^9$
Электрическая прочность, кВ/мм	31.2
Коэффициент теплового расширения, ppm/°C	X = 10 (с -55 до 288 °C) Y = 12 (с -55 до 288 °C) Z = 32 (с -55 до 288 °C)

3.2 Расчёт копланарной линии передачи

ДМ должен работать на частоте 24.125 ГГц, из-за данного требования выбирается копланарная линия передач, так как на данной частоте имеет наименьшие потери, наименьшая электромагнитная связь между соседними линиями.

Зная частоту, можно найти длину волны в диэлектрике.

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.1)$$

Для выбранного материала производится расчёт копланарной линии передачи по формулам 3.2 – 3.7 [5]. Копланарная линия передачи указана на рисунке 3.1.

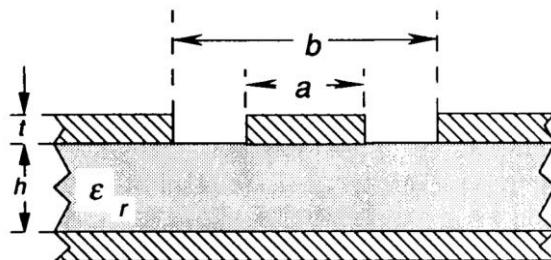


Рисунок 3.1 – Копланарная линия передач

$$Z_0 = \frac{60 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}, \quad (3.2)$$

$$k = \frac{a}{b}, \quad (3.3)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad (3.4)$$

$$k_1 = \frac{\tanh(\frac{\pi \cdot a}{4 \cdot h})}{\tanh(\frac{\pi \cdot b}{4 \cdot h})}, \quad (3.5)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1}, \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1 + \epsilon_r \cdot \frac{K(k')}{K(k)} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}{1 + \frac{K(k')}{K(k)} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}, \quad (3.7)$$

где, ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость, a – ширина проводящего полоска, b – ширина полоска и два зазора между земляными поверхностями, k – коэффициенты, $K(x)$ – эллиптический интеграл первого рода. Полученные результаты расчётов по формулам выше, указаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчётные параметры копланарной линии

Параметры	Значение
a_{50} , мм (для 50 Ом ЛП)	0.5
b_{50} , мм (для 50 Ом ЛП)	0.9
a_{70} , мм (для 70 Ом ЛП)	0.25
b_{70} , мм (для 70 Ом ЛП)	0.65
h , мм	0.254
ϵ_{eff}	2.69
λ , мм	6.5

Для проверки полученных параметров ЛП использовался калькулятор TXline. Окно калькулятора указано на рисунке 3.2. Полученные параметры в калькуляторе и расчётные указаны в таблице 3.3.

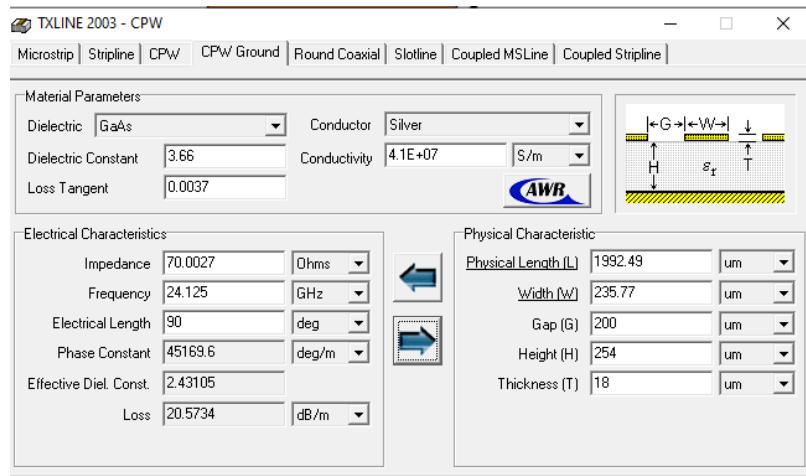


Рисунок 3.2 – Окно калькулятора TXline

Таблица 3.3 – Параметры копланарной линии

Параметры	Расчёт	TXline
a_{50} , мм (для 50 Ом ЛП)	0.5	0.474
b_{50} , мм (для 50 Ом ЛП)	0.9	0.874
a_{70} , мм (для 70 Ом ЛП)	0.25	0.235
b_{70} , мм (для 70 Ом ЛП)	0.65	0.635
h , мм	0.254	0.254
ϵ_{eff}	2.69	2.58
t , мм	-	0.018

Из таблицы видно, что расчёт является приблизительны и не сильно заметная разница с калькулятором.

4 Подбор компонентов системы

Исходя из технического задания (ТЗ) должны быть выбраны следующие компоненты системы:

- переключатель;
 - усилитель;
 - аттенюатор;
 - СВЧ-резисторы;
 - стабилизатор напряжения;
 - инвертор напряжения;
 - разъем 3,5 мм;
 - разъем SMP;
 - разъем для подачи питания;
 - разъем для подачи сигнала переключения;
 - базовые компоненты (резисторы конденсаторы).

4.1 Компоненты СВЧ тракта

Так как в ТЗ указывался пункт о переключении с основного канала на калибровочный, стояла задача найти переключатель, подходящий под требуемые технические характеристики (TTX) системы. Переключатель был выбран от компании Analog Device HMC547ALC3 [6]. В таблице 4.1, указаны TTX системы и технические характеристики (TX) переключателя. Функциональная схема (ФС) переключателя указана на рисунке 4.1.

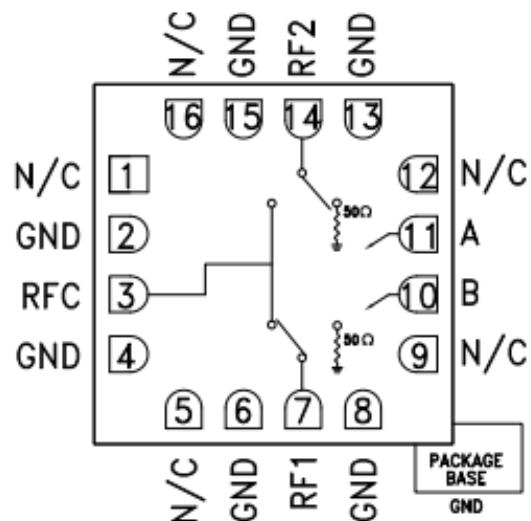


Рисунок 4.1 – ФС переключателя HMC547ALC3

Данный переключатель так же имеет особенность, при переключении одного из канала, второй канал переключается на согласованную нагрузку.

Таблица 4.1 – ТТХ системы из ТЗ и TX переключателя HMC547ALC3

Параметр	Пункт ТЗ	TTX	TX переключателя HMC547ALC3
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	от 0 до 28 ГГц
Изоляция	5.8	более 25 дБ	34 дБ
Тип осуществление переключателя	5.9	с помощью напряжения	с помощью напряжения (0 В , +5 В)
Время переключения	5.11	Не медленнее 15 нс	Время переключения 3нс

Из-за потерь в системе, вызванных ДМ, было решено использовать усилитель мощности (УМ). УМ выбирался так же от компании Analog Device. Это связано с тем, что есть разные виды УМ у компании, есть подробная инструкция по разводке и управлению усилителей, а также это связано с доступностью усилителей данной компании. Был выбран усилитель HMC863ALC4 [7]. В таблице 4.2, показаны ТТХ системы и TX усилителя HMC863ALC4. ФС данного усилителя расположена на рисунке 4.2.

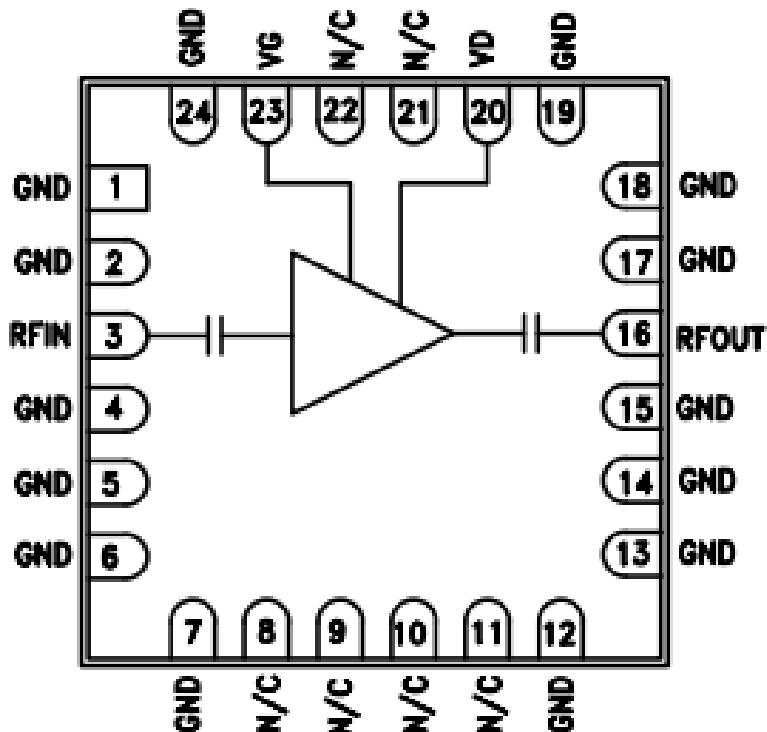


Рисунок 4.2 – ФС усилителя HMC863ALC4

Данная серия УМ была выбрана, так как у неё есть разделительные конденсаторы по входу и выходу.

Таблица 4.2 – ТТХ системы из ТЗ и TX усилителя HMC863ALC4

Параметр	Пункт ТЗ	TTX	TX усилителя мощности HMC863ALC4
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	от 0 до 28 ГГц
Усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (КУ)	5.12	Усилитель с регулируемым КУ	Подстройка КУ реализуется при изменении напряжения смещения затвора (V_g). При изменении V_g , изменяется ток потребления (I_{dd}), указанно на рисунке 4.3
Наличие постоянного напряжения на ЛП	5.21	На всех выходах и входах системы не должно присутствовать постоянное напряжение;	По входу и выходу стоят разделительные конденсаторы
Потребляемое напряжение	5.23	Потребляемое напряжение не более +12 В	Потребляемое напряжение +5 В

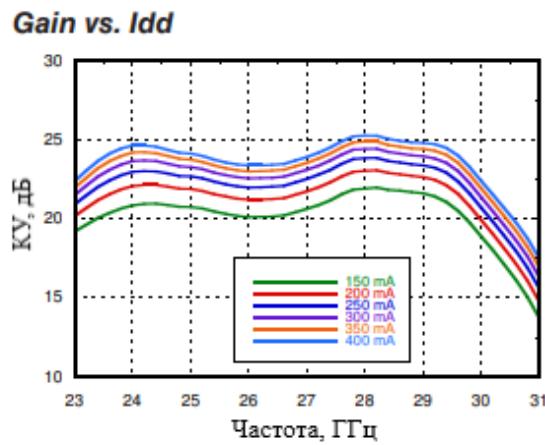


Рисунок 4.3 – График КУ от тока потребления усилителя

Для того чтобы усилители оставались в линейном режиме, а также для регулировки мощности было принято решение использовать аттенюаторы. Аттенюаторы выбирались по критериям доступности, простоты и универсальности. Под данные параметры подходил аттенюатор от компании Analog Device HMC652. ФС данного аттенюатора указана на рисунке 4.4. Данный аттенюатор выполнен по схеме Т-образной. Данная линейка аттенюаторов является широкополосной. Аттенюатор обеспечивает уровни затухания: 2, 3, 4, 6 дБ [8]. В таблице 4.3, показаны ТТХ системы и TX аттенюатора HMC652.

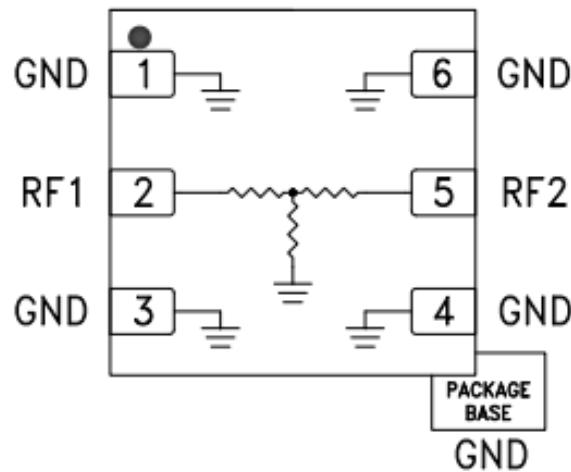


Рисунок 4.4 – ФС аттенюатора HMC652

Таблица 4.3 – ТТХ системы из ТЗ и TX аттенюатора HMC652

Параметр	Пункт ТЗ	TTX	TX аттенюатора HMC652
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	от 0 до 25 ГГц

В данной системе будут использованы ДМ Уилкинсона, по расчётом там используется резистор в 100 Ом. В заданном частотном диапазоне простые *surface mounted device* (SMD) резисторы не подходят, так как они будут иметь очень большие паразитные емкости и индуктивности. Для того чтобы резистор на данных частотах вел себя как резистор, а не как индуктивность или конденсатор выбираются специальные СВЧ-резисторы от компании *Vishay* линейки FC. Данный резистор имеет корпус 0402 SMD [9]. Модель резистора на СВЧ представлена на рисунке 4.5. В таблице 4.4, показаны ТТХ системы и TX резистора линейки FC.

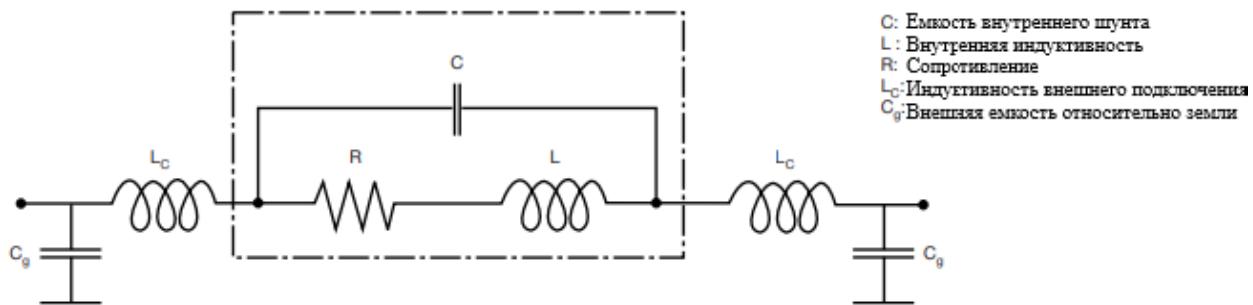


Рисунок 4.5 – Модель резистора на СВЧ

Таблица 4.4 – ТТХ системы из ТЗ и TX резистора линейки FC

Параметр	Пункт ТЗ	TTX	TX резистора линейки FC
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	от 0 до 40 ГГц

4.2 Компоненты цепи питания

Так как в системе будут использованы УМ для них подводится питающее напряжение питания. Для работы УМ в одном режиме без перебоев используются стабилизаторы напряжения. Стабилизаторы поддерживают выходное напряжение на фиксированном уровне, при значительных изменениях входного напряжения. В данной работе использовались стабилизаторы компании Analog Device: LT3029, ADM7171, LT3045, LT3093. Стабилизаторы делились на линейные, импульсные, по отрицательному питанию и по положительному питанию.

LT3029 линейный стабилизатор по положительному питанию, имеющий ряд особенностей [10]:

- двухканальный стабилизатор;
- выходной ток на канал составляет 500 мА;
- диапазон входного напряжения от 1,8 В до 20 В;
- регулируемый выходное напряжение, начинающееся с 1,215 В;
- имеется защита от обратного заряда с выхода на вход;
- имеется ограничение по току и тепловое отключение.

Типичное применение стабилизатора указано на рисунке 4.6.

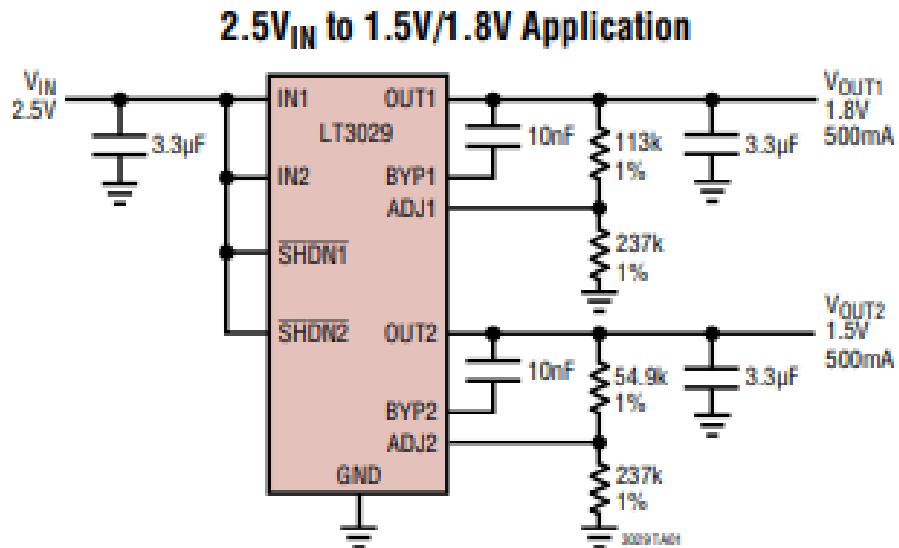


Рисунок 4.6 – Типичное применение стабилизатора LT3029

LT3045 линейный стабилизатор по положительному питанию, имеющий ряд особенностей [11]:

- одноканальный стабилизатор;
- максимальный выходной ток 500 мА;
- диапазон входного напряжения от 1,8 В до 20 В;
- регулируемое выходное напряжение;

- имеется ограничение по току и тепловое отключение;
- имеется функция быстрый запуск.

Типичное применение стабилизатора указано на рисунке 4.7.

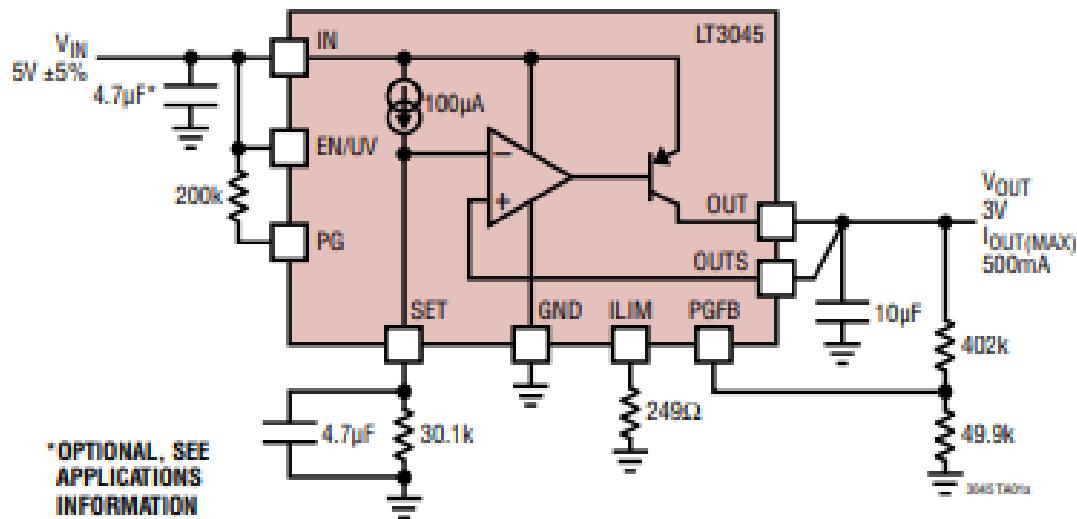


Рисунок 4.7 – Типичное применение стабилизатора LT3045

LT3093 линейный стабилизатор отрицательного напряжения, имеющий ряд особенностей [12]:

- выходной ток 200mA;
- работает в широком диапазоне входного напряжения от -1.8 В до -20 В;
- регулируемое выходное напряжение;
- регулируемый предел по току;
- диапазон выходного напряжения от 0 до -19.5 В;
- имеется функция быстрого запуска.

Типичное применение стабилизатора указано на рисунке 4.8.

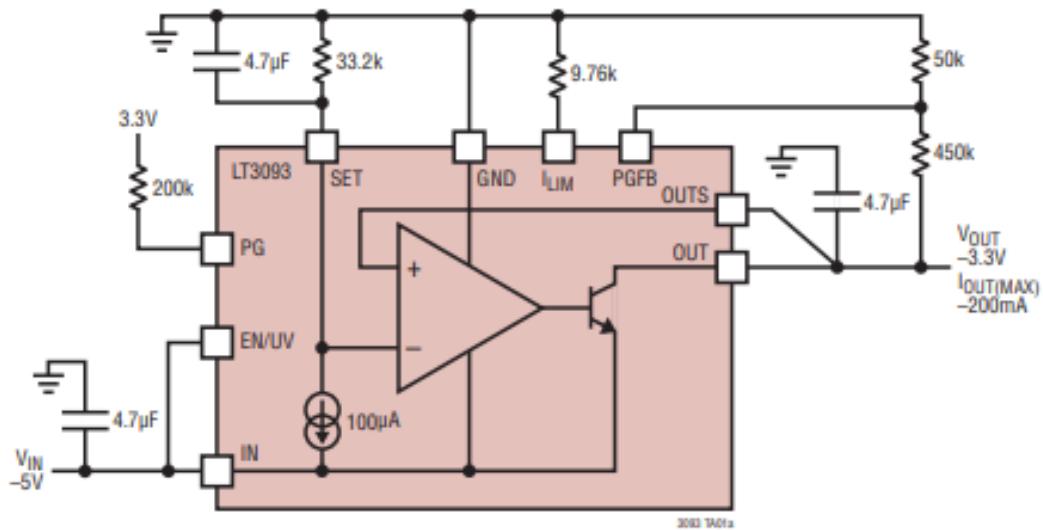


Рисунок 4.8 – Типичное применение стабилизатора LT3093

ADM7171 линейный стабилизатор по положительному питанию, имеющий ряд особенностей [13]:

- работает в диапазоне входного напряжения от 2.3 В до 6.5 В;
- регулируемый предел по току;
- имеется внутреннее ограничение по току на 1 А;
- имеются микросхемы с фиксированным и регулируемым выходным напряжением.

Типичное применение стабилизатора указано на рисунке 4.9.

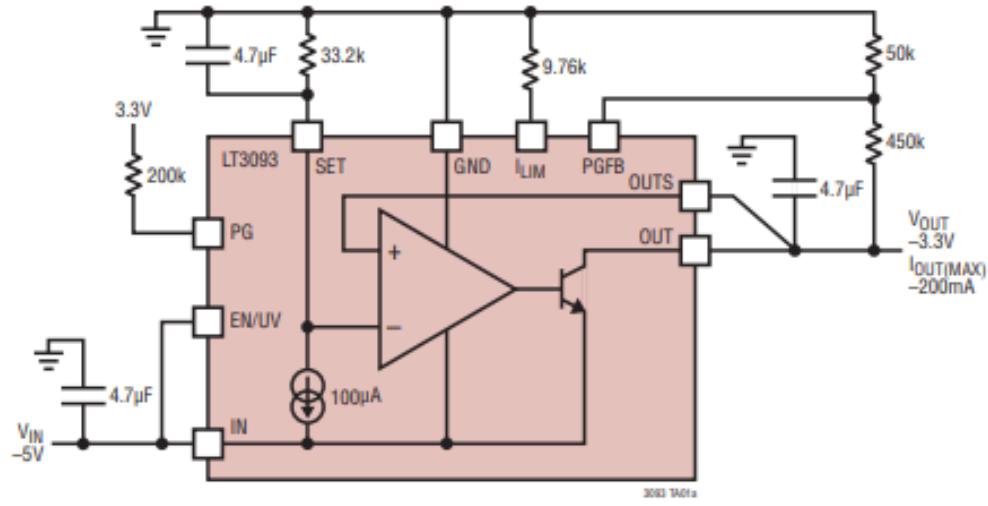


Рисунок 4.9 – Типичное применение стабилизатора ADM7171

Усилитель использует, кроме положительного напряжения, отрицательное напряжение (напряжение смещения затвора) было решено использовать инвертор входного напряжения. Инвертор был выбран от фирмы Texas Instruments TPS60403. Основные характеристики инвертора [14]:

- максимальный выходной ток 60 мА;
- диапазон входного напряжения от 1,6 В 5,5 В;
- встроенный активный диод Шоттки для запуска в нагрузку.

Типичное применение инвертора указано на рисунке 4.10.

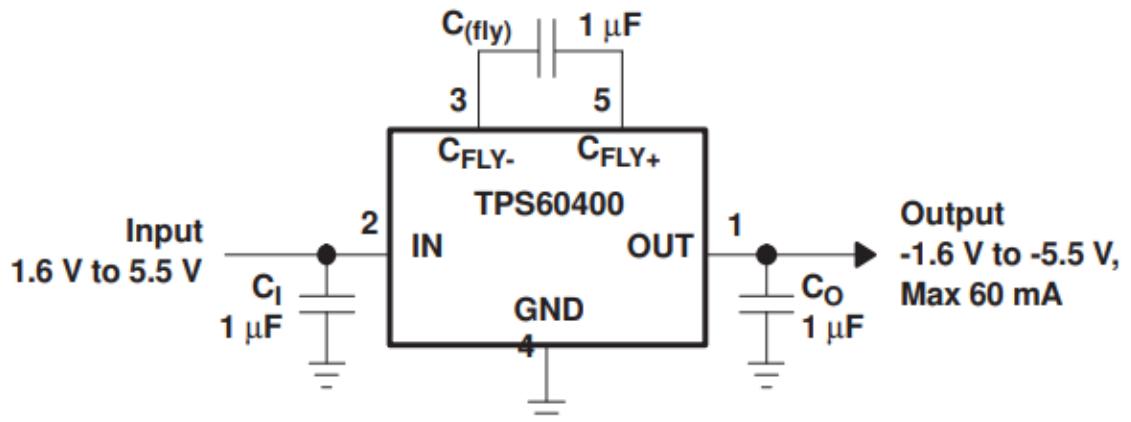


Рисунок 4.10 – Типичное применение инвертора напряжения TPS60403

4.3 СВЧ разъемы

Для реализации выходных и входных соединений типа 3,5 использовались коаксиально-микрополосковые переходы (КМП) серии ПКМ1-32 от компании Микран. Выбор пал на данный разъем из-за его доступности и подходящих характеристик в большом частотном диапазоне. Вид данного КМП указан на рисунке 4.11. В таблице 4.5, показаны ТТХ системы и ТХ КМП ПКМ1-32 [15].



Рисунок 4.11 – Внешний вид КМП ПКМ1-32

Таблица 4.5 – ТТХ системы из ТЗ и ТХ КМП ПКМ1-32

Параметр	Пункт ТЗ	ТТХ	ТХ КМП ПКМ1-32
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	от 0 до 32 ГГц
Тип разъемов входных портов	5.5	Входные порты системы реализовать через разъем типа 3,5 мм	Коаксиальный разъем типа 3,5 мм
Тип разъемов выходных портов	5.14	Выходы основного и калибровочного канала должны быть реализованы через разъем 3,5 мм;	Коаксиальный разъем типа 3,5 мм

Все остальные радиочастотные выходы системы реализованы с помощью КМП от компании Rosenberger, типа SMP, 19S202-40ML5-NM. Разъем от данной компании был выбран из-за своих размеров и также из-за типа крепления, на торце платы [16]. Модель Данного разъема указана на рисунке 4.12, а его ТХ указаны в таблице 4.6.



Рисунок 4.12 – Внешний вид КМП, типа SMP, 19S202-40ML5-NM

Таблица 4.6 – ТТХ системы из ТЗ и ТХ 19S202-40ML5-NM

Параметр	Пункт ТЗ	ТТХ	ТХ КМП 19S202-40ML5-NM
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	от 0 до 26.5 ГГц
Тип разъема выходных портов	5.16	Подводимая мощность к 16 смесителям должно быть реализована через разъем SMP	Коаксиальный разъем типа SMP

4.4 Разъемы питания, переключения и компоненты

Разъем для подачи питания выбран 4 пиновый, от компании Molex 43650-0415. Внешний вид данного разъема указан на рисунке 4.13 [17].



Рисунок 4.13 – Внешний вид разъема под питание 43650-0415.

Разъем для подачи сигнала переключения выбирался из имеющихся разъемов. В данной работе использовался разъем от компании Connfly electronic IDCS-16MS. Данный разъем имеет большую изоляцию между контактами и имеет предельный ток 1 А. Внешний вид данного разъема представлен на рисунке 4.14 [18].



Рисунок 4.14 – Внешний вид разъема для сигнала переключения

В данной работе будут использоваться только компоненты SMD. Разных корпусов от 0201 до 1806. Большая часть конденсаторов и резисторов будут использованы от компании Murata [19].

5 Моделирование СВЧ устройства

В данной работе использовалась САПР EMPro. Данная программа была выбрана по причине удобного интерфейса, поддерживаемости большого количества форматов файлов.

EMPro является программой для трехмерного электромагнитного моделирования различных устройств СВЧ – от волноводов до антенных решёток. Программа позволяет решить задачу несколькими методами и дает высокую точность расчета. Диапазон длин волн, в котором программа наиболее эффективно работает – от коротковолнового до миллиметрового.

Устройства, которые можно смоделировать с помощью САПР EMPro, являются:

- различные линии передачи;
- волноводные и микрополосковые направленные ответвители (НО);
- делители и сумматоры мощности;
- одно- и многослойные микрополосковые структуры;
- коаксиально-волноводные и коаксиально-полосковые переходы;
- различные типы антенн.

5.1 Обзор программы EMPro

При открытии программы EMPro выбирается вкладка *New Project* (рисунок 5.1).

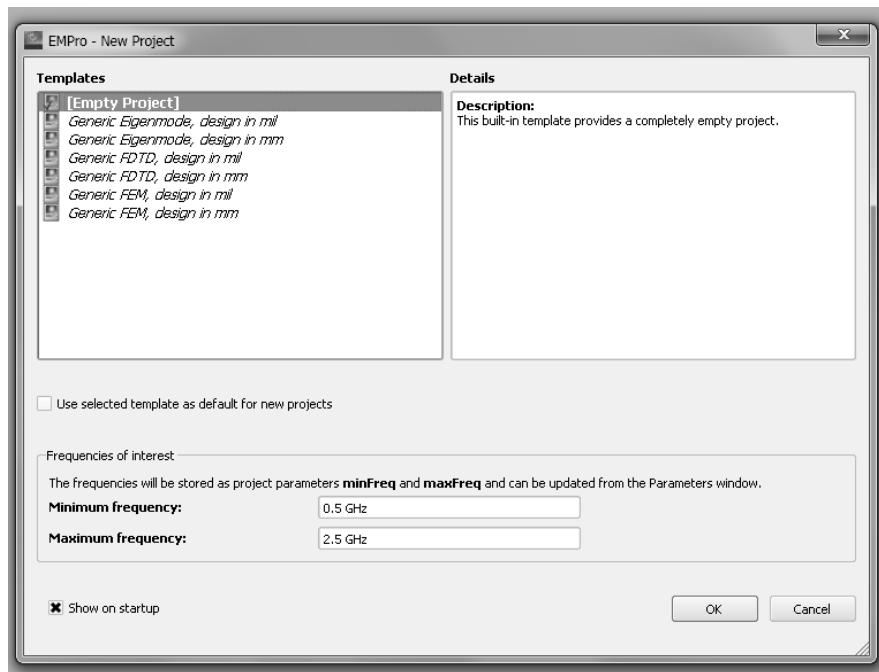


Рисунок 5.1 – Вкладка для начала создания проекта и выбора типа моделирования и параметров проекта

Программа предлагает выбрать следующие варианты создания проекта и методов моделирования:

- [Empty Project] – пустой проект, в котором не заданы начальная и конечная частота и метод расчета.
- Generic Eigenmode, design in mil/mm – расчет при выборе этого варианта основан на двух методах:
 - расширенный метод подпространств Крылова (ASK), позволяющий наиболее быстро находить собственные моды резонансных экранированных структур без потерь;
 - метод Якоби-Девидсона (JDM), позволяющий находить собственные моды и собственные добротности резонансных экранированных структур с потерями.
- Generic FDTD, design in mil/mm – расчет, основанный на методе конечных разностей во временной области. Является одним из наиболее популярных методов численной электродинамики, основанный на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме.
- Generic FEM, design in mil/mm – расчет, основанный на методе конечных элементов. Это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. В этом методе область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов).

В данном окне (рисунок 5.1) выбирается диапазон частот на котором будет производится моделирование.

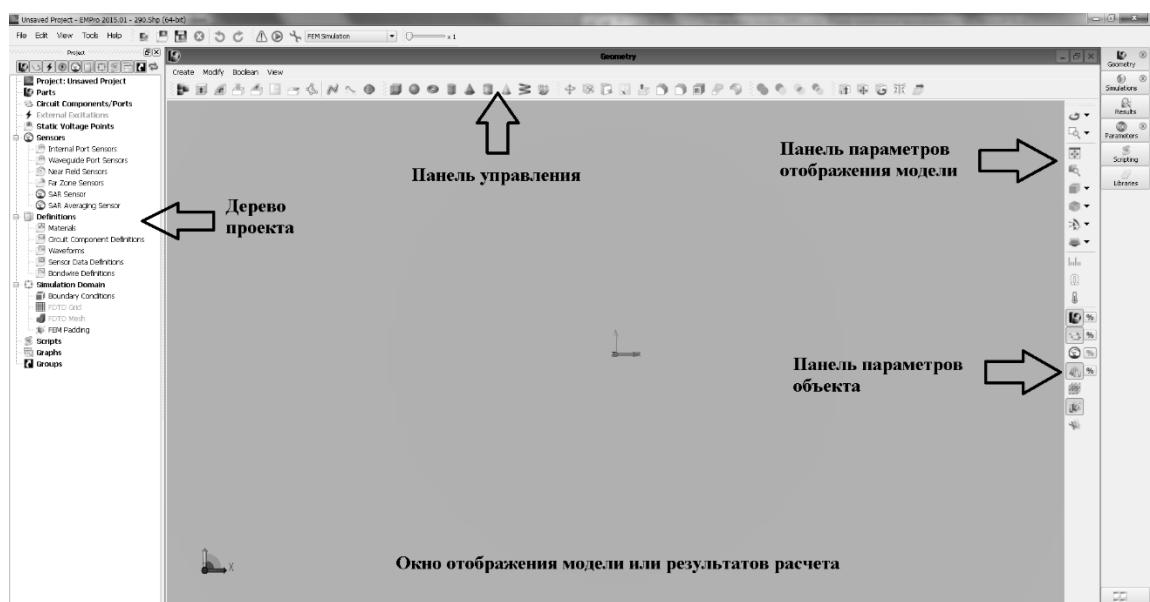


Рисунок 5.2 – Интерфейс программы EMPro

Интерфейс программы схож с САПРами других компаний. Данный интерфейс является дружелюбным и интуитивно понятным. Для создания новой модели в EMPro выбирается *Create → Geometry* и выбрать элемент стандартной формы (параллелепипед, круг и др.). Из

элементов стандартной формы можно создавать элементы криволинейной формы (рисунок 4.3).

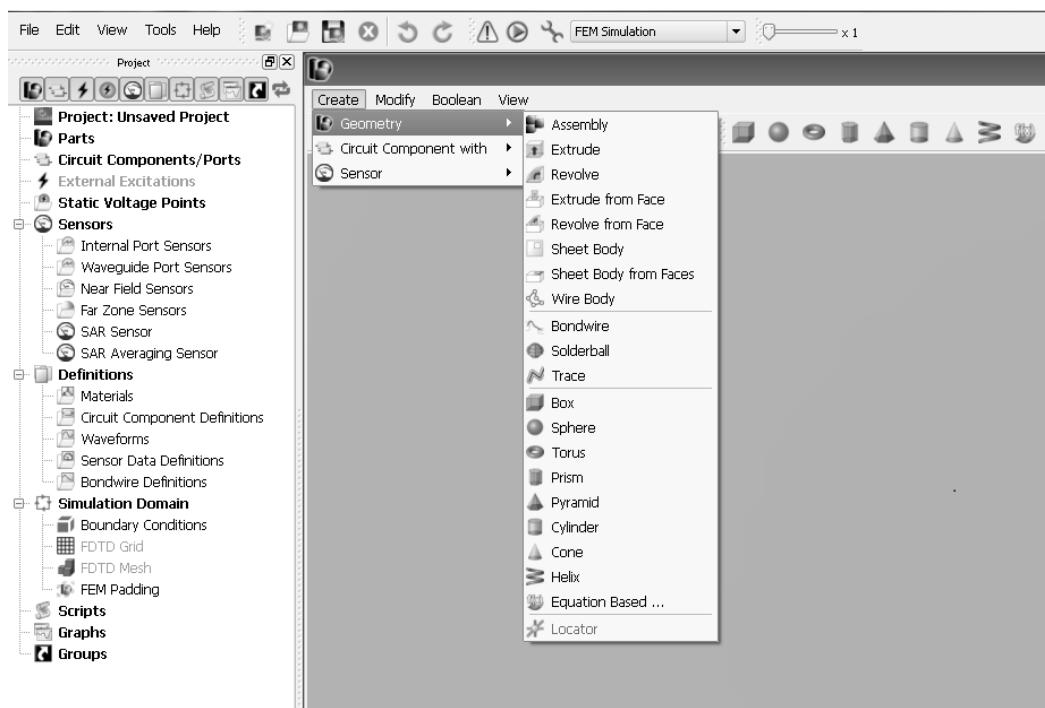


Рисунок 5.3 – Путь в меню для создания модели

Из списка, указанного на рисунке 5.3, выбирается стандартный объект, прямоугольный параллелепипед (*Box*): можно задать его размеры, название элемента, его расположение в пространстве (рисунок 5.4 а и б).

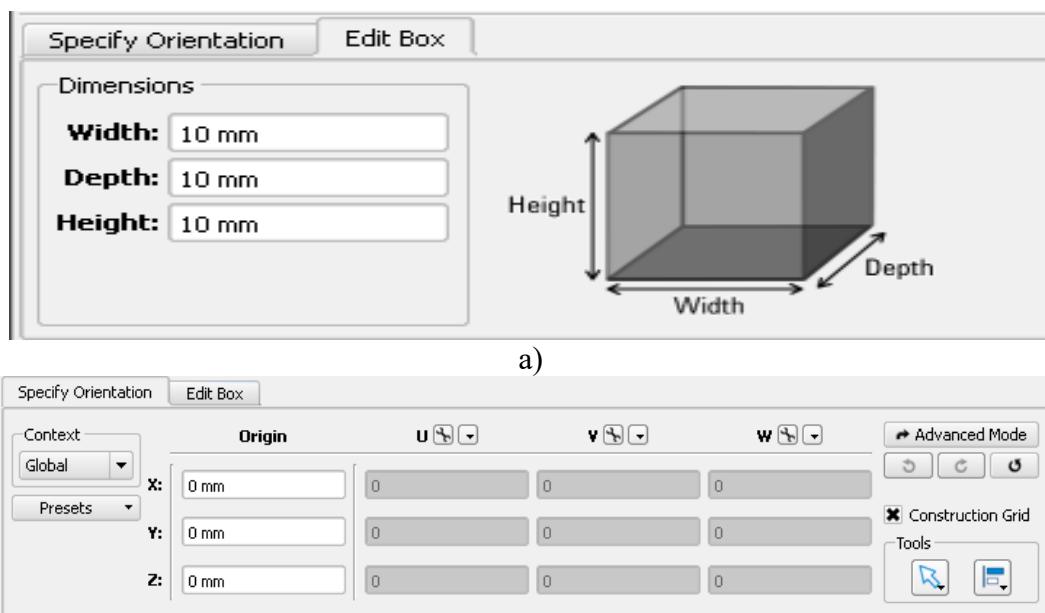


Рисунок 5.4 – Окно свойств объекта Specify Orientation(a), Edit Box(б)

После создания интересующей структуры используются порты для моделирования. В данном САПР существуют такие виды портов, как:

- дискретные (*New Circuit Component*) задаются как порты источника напряжения, источника тока, а также для расчета S-параметров;
- волноводные (*Waveguide Port*) порты моделируют бесконечно длинные волноводы, соединенный со структурой. Волноводные порты обеспечивая расчет с очень низкими уровнями отражений. Позволяют генерировать, кроме основного типа колебаний также и высшие типы волн;
- коаксиальные (*Coaxial Circuit Port*) порты задаются через выбор грани, к которой будет прикреплен порт, или точки на периметре коаксиала. В большинстве случаев нужно учитывать основной тип колебаний коаксиальной линии.

После создания структуры и установки портов, определенного типа, производится моделирование, результаты моделирования указаны на рисунке 5.5.

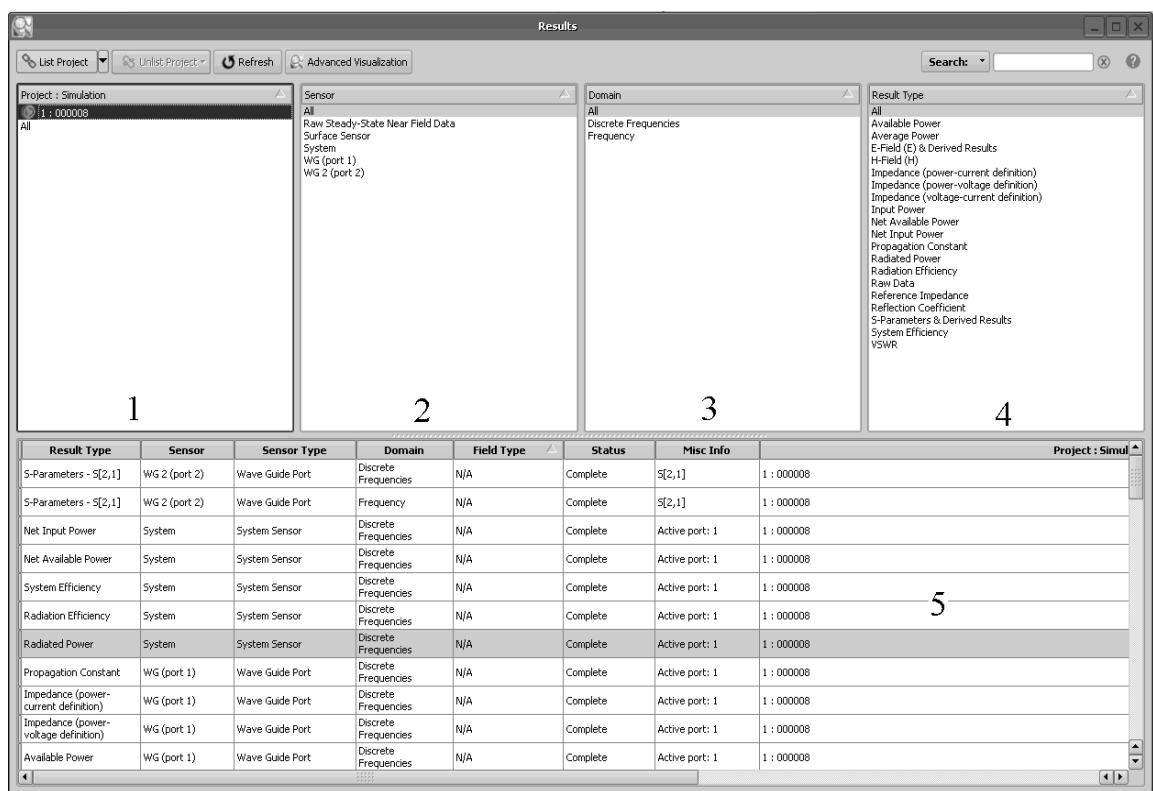


Рисунок 5.5 – Окно результатов вычислений

В первой области выбирается результаты по порядку моделирования Во-второй области выбирается порт. Третья область необходима для выбора результатов на дискретных частотах или во всей полосе частот. Четвертая область отвечает за выбор типа данных для анализа. В пятой области указаны доступные результаты для отображения на графике.

Для более подробного ознакомления функций и возможности программы можно ознакомится в источниках [20], [21], [22].

5.2 Моделирование пассивного делителя мощности

В данном пункте создаётся модель пассивного ДМ, а именно двух и четырёхплечевого с расстоянием между портами 7 мм. Максимальные размеры платы 27 мм шириной и длинной 55мм.

Использовав расчётные данные из раздела 3, создаётся простая модель ДМ Уилкинсона. Модель ДМ указана на рисунке 5.6.

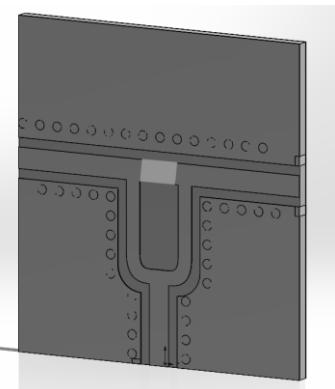


Рисунок 5.6 – Модель двуплечего ДМ

Характеристики данного ДМ указаны на рисунках 5.7 – 5.8.

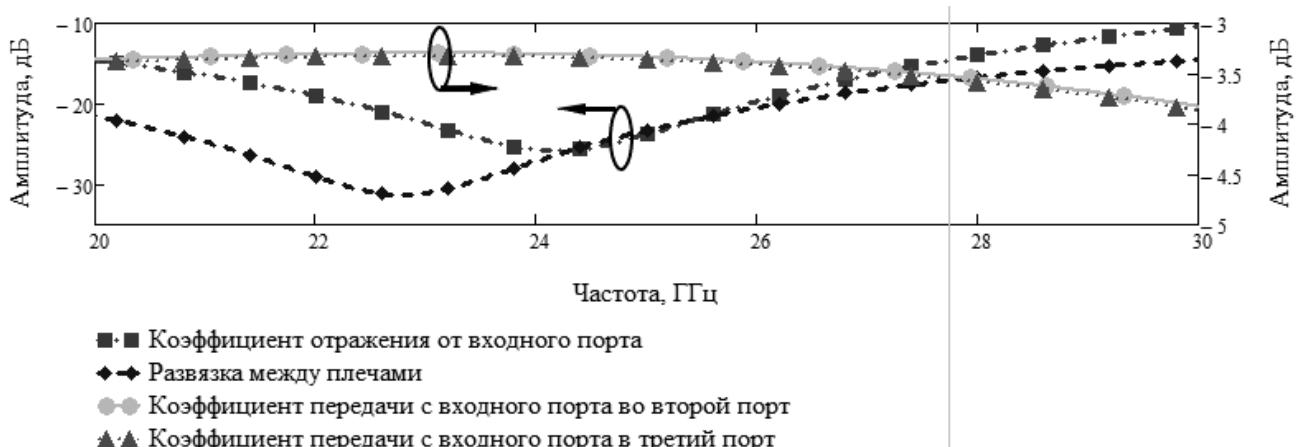


Рисунок 5.7 – Полученные после моделирования частотные характеристики

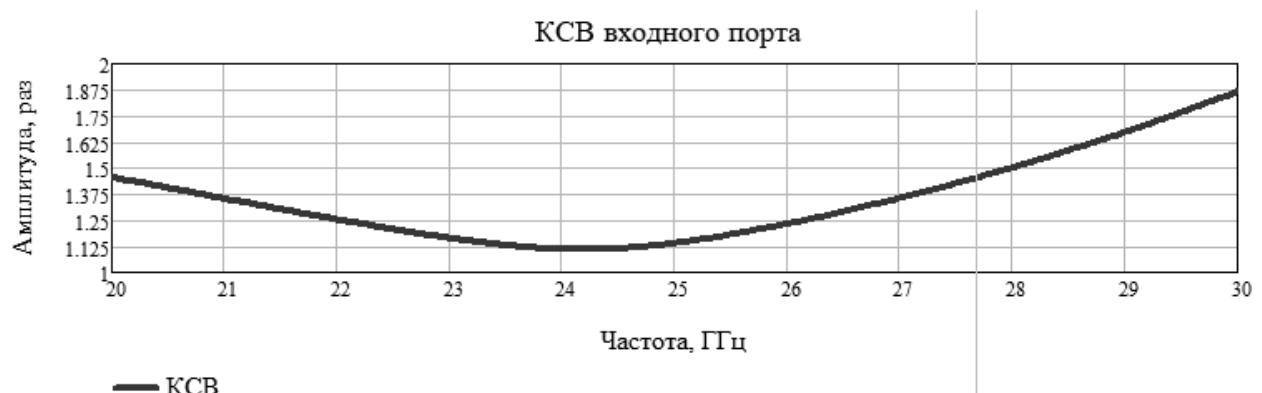


Рисунок 5.8 – Частотная зависимость КСВ входного порта

По полученным данным (рисунок 5.7 и 5.8) видно:

- происходит деление сигнала пополам т.е. по уровню -3 дБ, но и также есть потери, связанные с распространением сигнала вдоль ЛП;
- большая развязка между плечами делителя, как и утверждалось в теории;
- данный делитель работает и согласован в диапазоне частот $24,125 \pm 0,125$ ГГц.

Четырёхплечий ДМ представляет собой совокупность двуплечих ДМ и имеет параллельную схему подключения, для равного деления мощности. Параллельная схема представлена на рисунке 5.9. Модель четырёхплечий ДМ указана на рисунке 5.10.

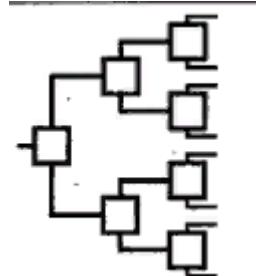


Рисунок 5.9 – Параллельная схема подключения ДМ

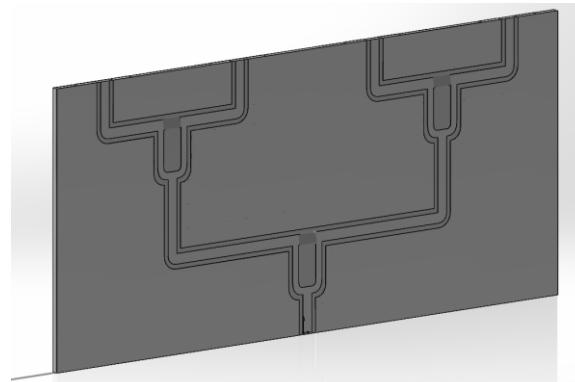


Рисунок 5.10 – Четырёхплечий ДМ

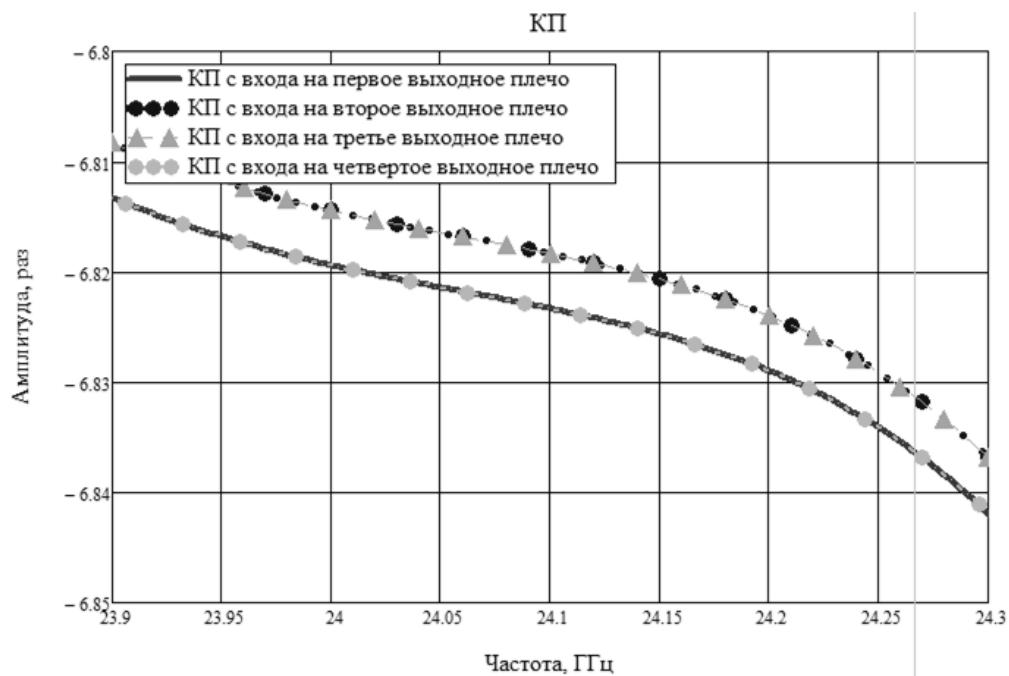


Рисунок 5.11 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи (КП)

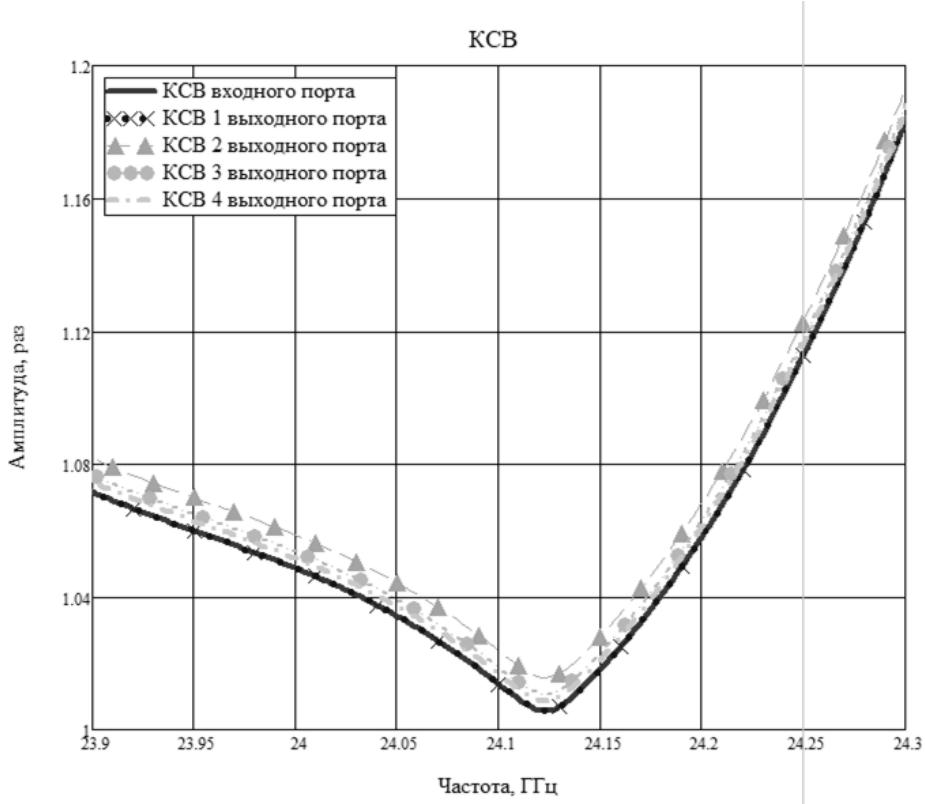


Рисунок 5.12 – Частотная зависимость КСВ входного и выходных портов

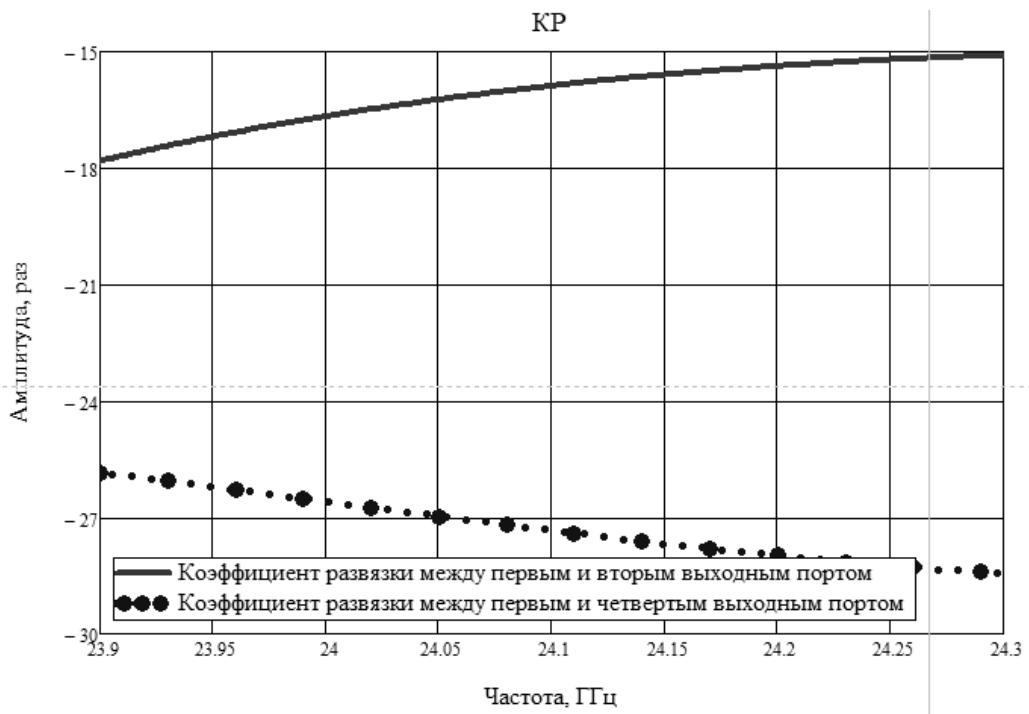


Рисунок 5.13 – Частотная зависимость коэффициента развязки между портами

Из рисунков 5.11 – 13 отмечаются факты:

- КП у данного делителя сходится с теоретическим, т.е. при двойном делении мощности сигнала по полам получается минус 6 дБ, а за счёт потерь деление происходит на уровне минус 6.8 дБ;
- данный делитель согласован и работает в диапазоне частот $24,125 \pm 0,125$ ГГц.

5.3 Моделирование «маленькой» платы деления мощности

Выходные порты данной печатной платы имеют шаг в 7 мм. Данный шаг был выбран из-за того, что смеситель располагался на плате с приемными антеннами и таких плат будет 16 штук, тем самым образовывать плоскую antennную решетку. Данная antennная решетка должна иметь шаг 7 мм, для получения требуемых характеристик и диаграммы направленности. Габариты модели составляют: ширина 55 мм, длина 27 мм, высота 1,2 мм. Модель «маленькой» платы деления мощности указана на рисунке 5.14.

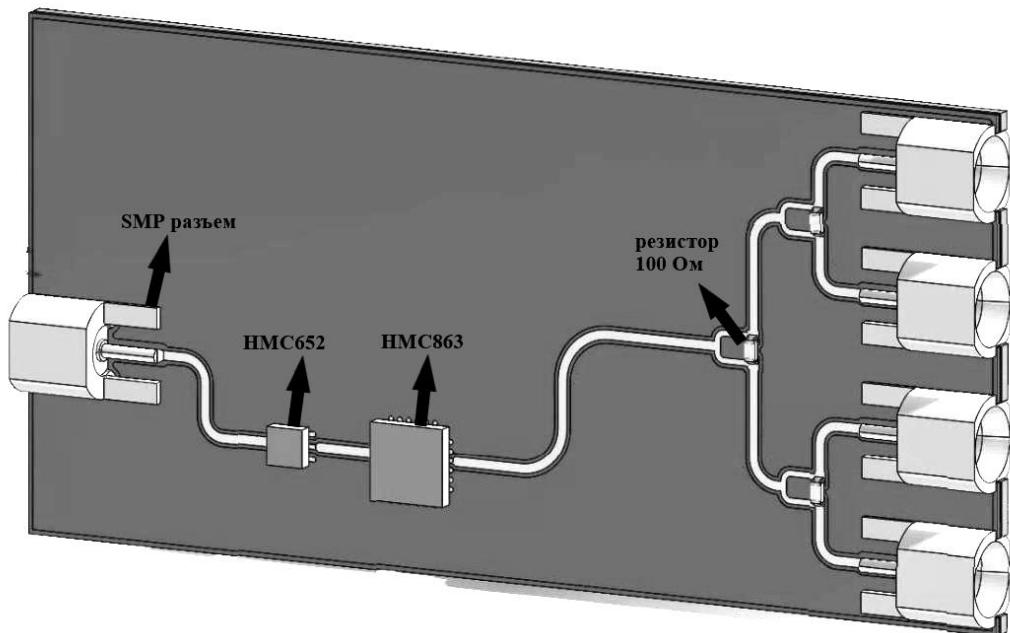


Рисунок 5.14 – Модель «маленькой» платы ДМ

Из рисунка 5.14, видно на данной плате были использованы:

- КМП, типа SMP;
- УМ;
- аттенюатор;
- СВЧ-резисторы.

Модель КМП было сделана по документам данных от компании *Rosenberger*. После чего были подобраны параметры диэлектрика и модели так чтобы модель совпадала с ТХ предоставляющая производитель [16]. Модель МКП указан на рисунке 5.15.

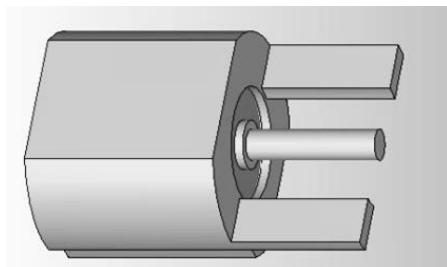


Рисунок 5.15 – Модель КМП 19S202-40ML5-NM

Модель УМ была сделана с теми же материалами, которые предоставляет производитель. Были использованы с S параметрами данного УМ [7]. Был использован материал олово, которое соединяет копланарную линию передачи и пины УМ, чтобы добавить неравномерность за счёт пайки. Модель усилителя показана на рисунке 5.16.

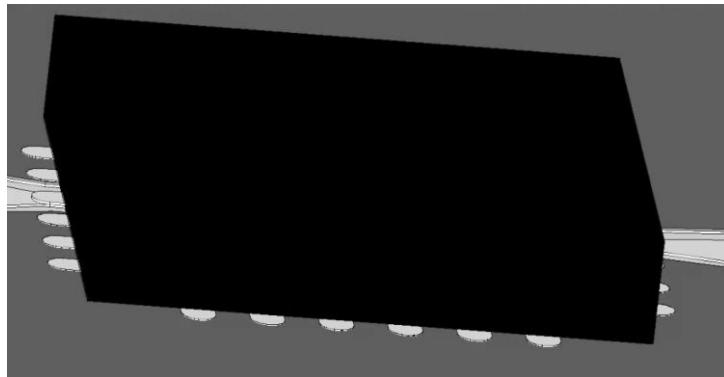


Рисунок 5.16 – Модель усилителя НМС 863

Перед УМ стоит аттенюатор, который нужен для того чтобы регулировать выходную мощность и так же чтобы УМ не переходил в режим насыщения. Модель аттенюатора была создана, как и модель УМ, т.е. с использованием документации, с подгруженными S-параметрами и с использованием олова [8]. Модель аттенюатора указана на рисунке 5.17.

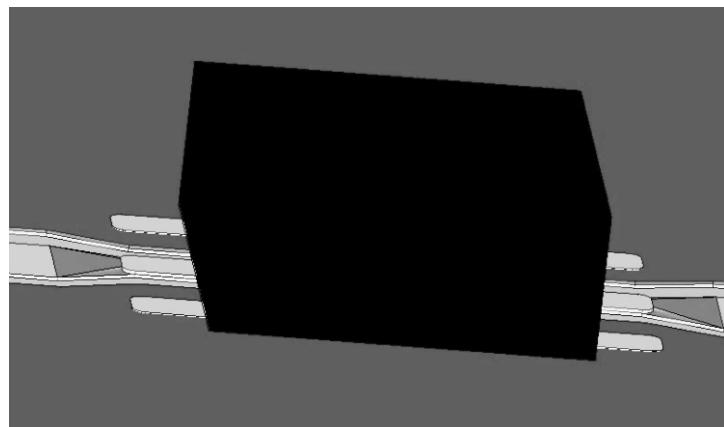


Рисунок 5.17 – Модель аттенюатора НМС652

Была создана модель резистора с добавлением припоя, также с подгруженными параметрами от производителя резистора. Модель СВЧ-резистора показана на рисунке 5.18.

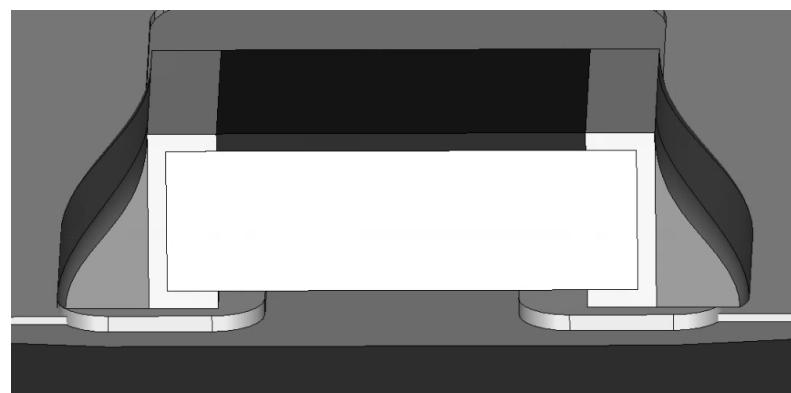


Рисунок 5.18 – Модель СВЧ-резистора

Характеристики данных резисторов указаны на рисунках 5.19 [9].

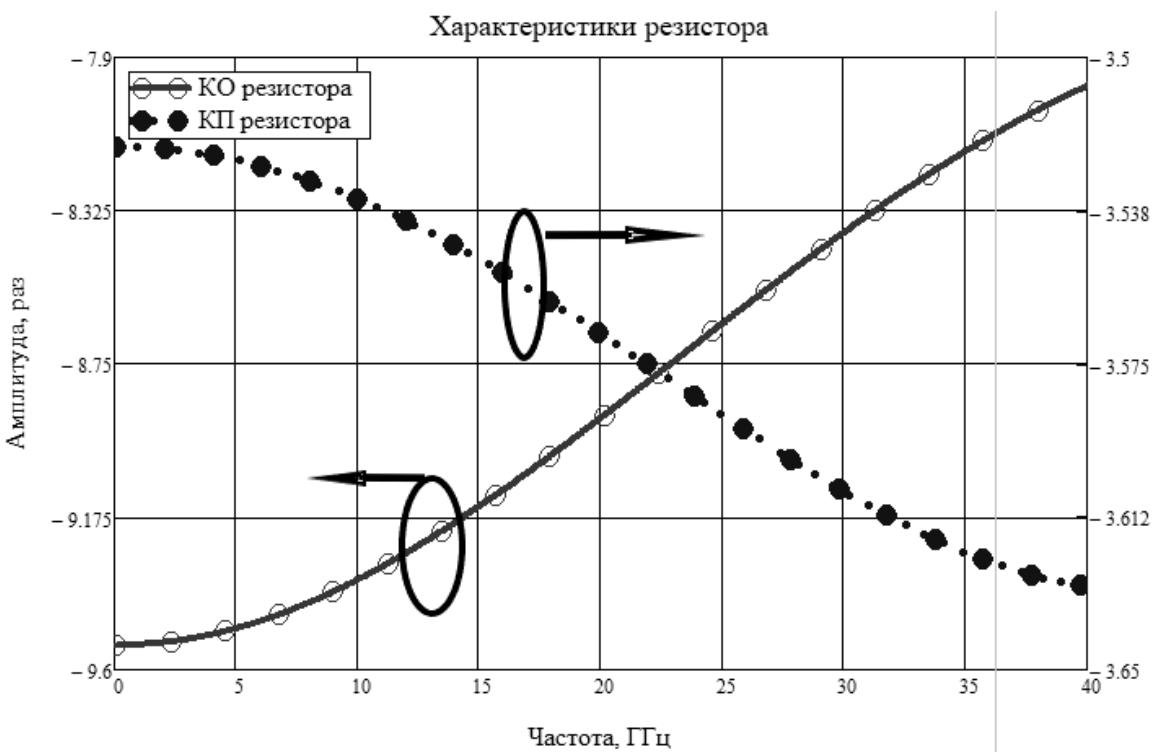


Рисунок 5.19 – Частотная зависимость модуля КП и КО СВЧ-резистора

Для того чтобы подгружать *S*-параметры в модель в EMPro, была использована программа AWR. Из EMPro экспорттировали файл с *S*-параметрами, после чего подгружен в AWR. Из файла *S*-параметрами был создан новый компонент. Также в AWR были подгружены файлы усилителей, аттенюаторов и резисторов. Схематичный лист в AWR с подгруженными файлами и портами, которые есть в модели, указан на рисунке 5.20.

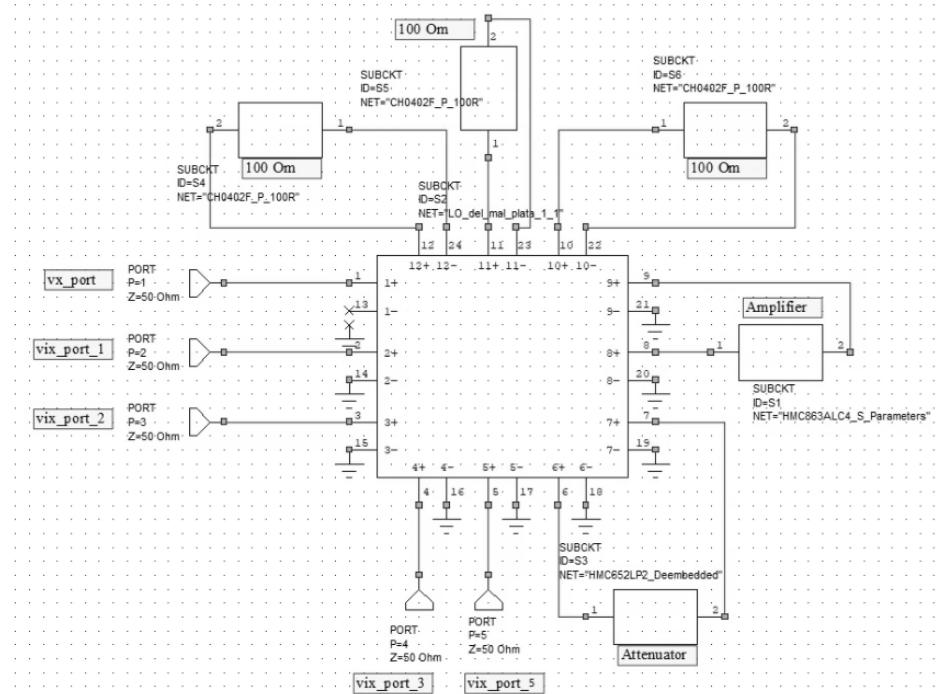


Рисунок 5.20 – Схематичный лист с подгруженными параметрами

Был перестроен стек платы и использовались материалы которые указаны в таблице 5.1.

Стек был изменен для придачи плате жесткости, а также для последующей разводки платы.

Таблица 5.1 – Стек платы

	Материал	Толщина, мм
Верхний проводящий слой (Top Layer)	Медь	0.018
Первое ядро	Rogers 4350 B	0.254
Второй проводящий слой (Mid Layer 1)	Медь	0.018
Изоляционная прокладка	FR-4	0.125
Третий проводящий слой (Mid Layer 2)	Медь	0.018
Второе ядро	FR-4	0.71
Нижний проводящий слой (Bottom Layer)	Медь	0.018

Результаты моделирования, со всеми моделями и файлами упомянутые выше, указаны на рисунках 5.21 – 5.22.

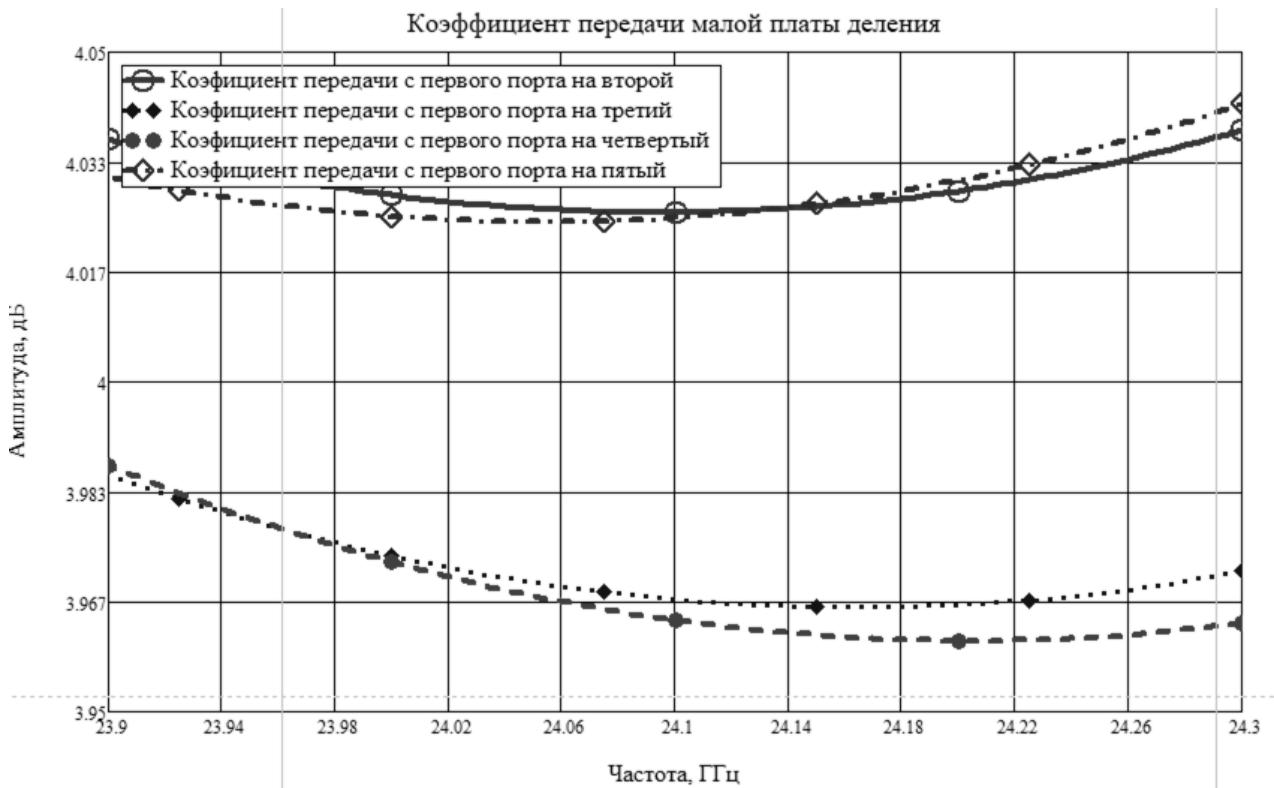


Рисунок 5.21 – Частотные зависимости КП маленьского делителя мощности

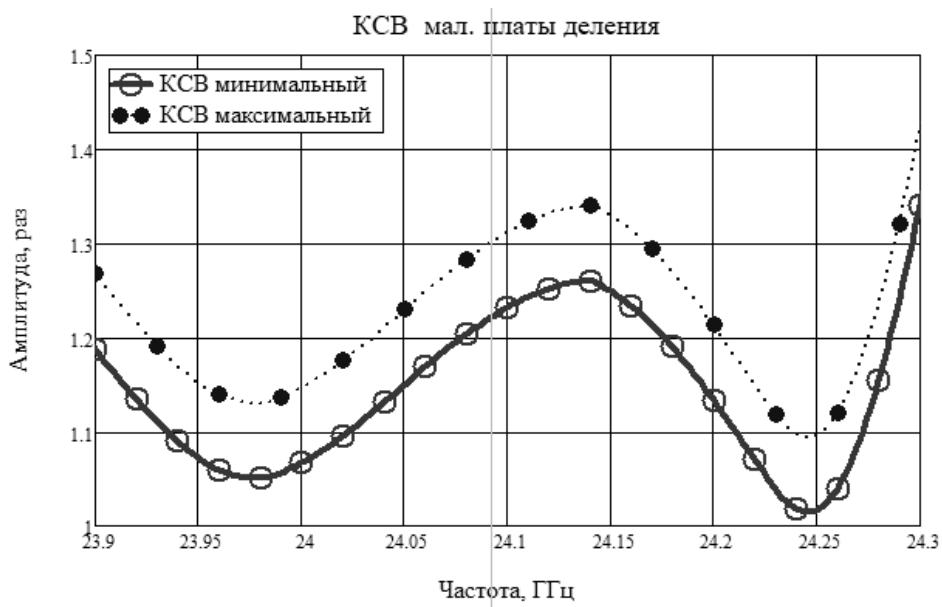


Рисунок 5.22 – Частотная зависимость максимального и минимального значения КСВ портов

По полученным графикам 5.21 – 22, подводится вывод:

- КП находится на уровне 4 дБ. Данное значение можно будет регулировать в пределах ± 5 дБ, с помощью аттенюатора или изменения напряжения смещения затвора (V_g) УМ;
- КСВ платы деления находится на уровне 1.35, это значение входит в приемлемый интервал. Приемлемый интервал считается от 1 до 2.

5.4 Моделирование «большой» платы деления мощности

Как и упоминалось в п. 4.5, данная плата будет иметь такие же компоненты, как и плата маленького делителя мощности. Единственное отличия данной платы от маленькой, тем что её выходные порты будут размещены с шагом 28 мм, 1 мм используется как запас по ходу т.к. производство является не точным. За счёт такого разноса можно уменьшить широкую сторону платы. Габариты данной модели печатной платы: ширина 40мм, 111мм, высота 1,2 мм. Модель большой платы деления указана на рисунке 5.23.

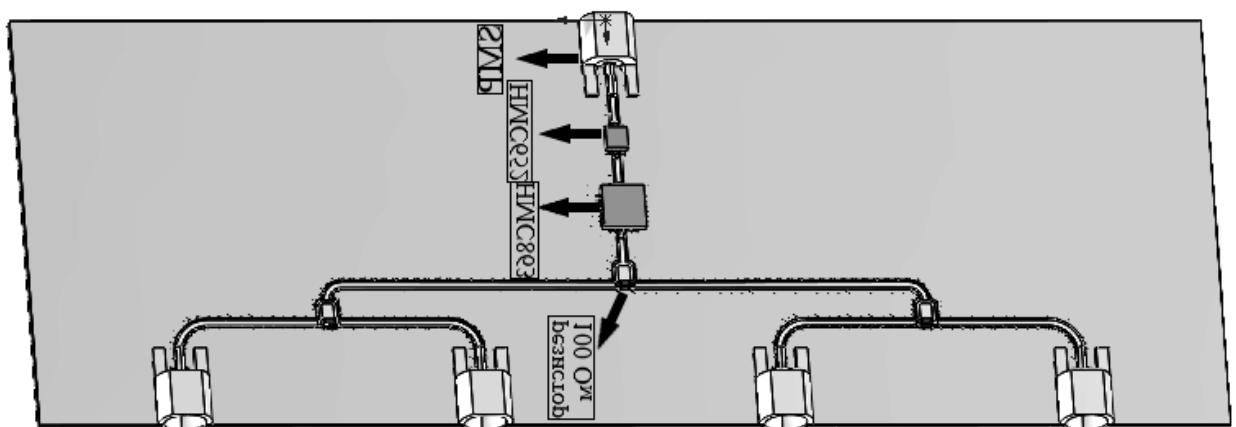


Рисунок 5.23 – Модель большой платы деления

Результаты, полученные после моделирования, указаны на рисунках 5.24 – 25.

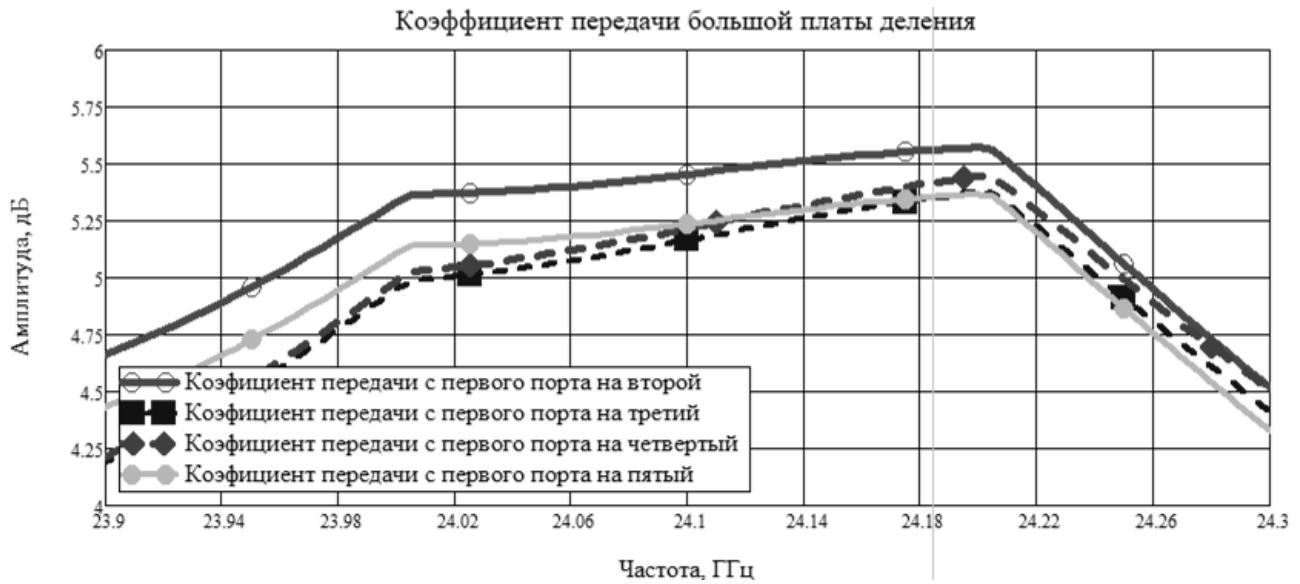


Рисунок 5.24 – Частотная зависимость КП большого делителя мощности

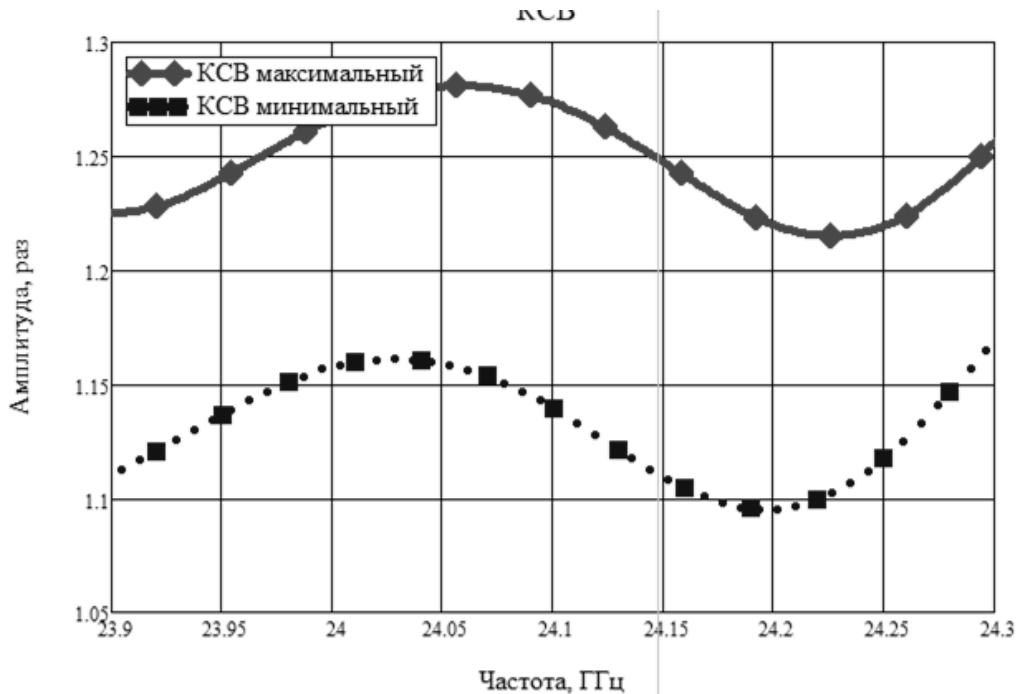


Рисунок 5.25 – Частотная зависимость максимального и минимального значения КСВ портов

По полученным графикам (рисунок 5.24 – 25) подводится вывод:

- КП находится на уровне 5 дБ. Данное значение можно будет регулировать в пределах ± 3 дБ, с помощью аттенюатора или изменения напряжения смещения затвора (V_g) УМ;
- КСВ платы деления не более 1.3, это значение находится в приемлемом интервале.

5.5 Моделирование платы «коммутации»

Данная плата имеет отличие от выше построенных моделей. Данное отличие связано с переключение калибровочного и основного входного сигнала, а также переключение

основного и калибровочного выхода системы. Габаритные размеры модели платы «коммутации»: ширина 40 мм, длина 100мм, высота 1,2 мм. Модель платы «коммутации» указана на рисунке 5.26.

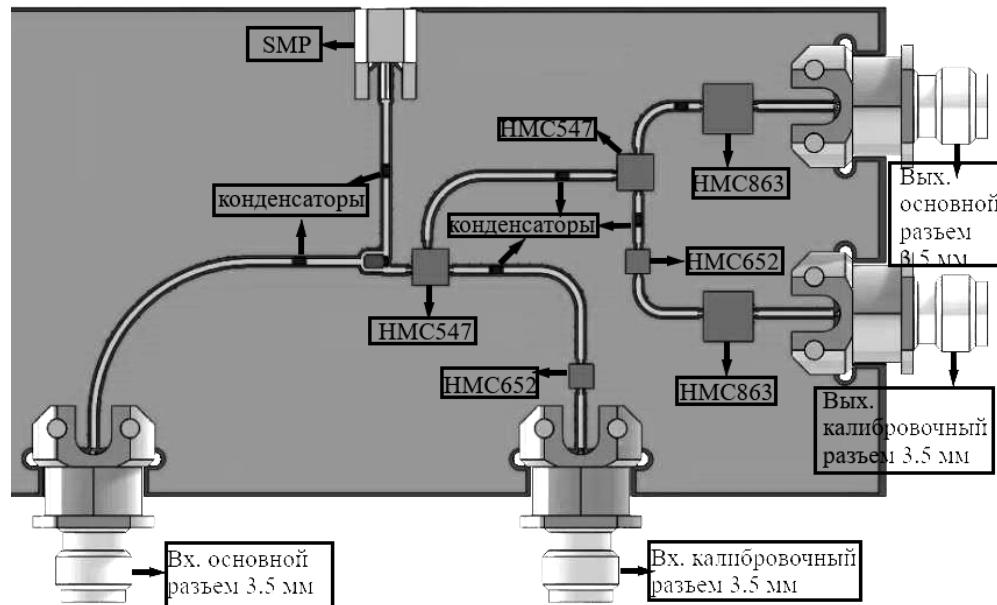


Рисунок 5.26 – Модель платы «коммутации»

Конденсаторы имели 3D модель, как и у СВЧ-резистора, указанная на рисунке 5.18. Использованы S-параметры конденсатора и подгружены в модель. Была создана модель КМП ПКМ1-32. Данная модель создавалась по техническим документам указанных на сайте изготовителя [15]. Модель КМП указана на рисунке 5.27.

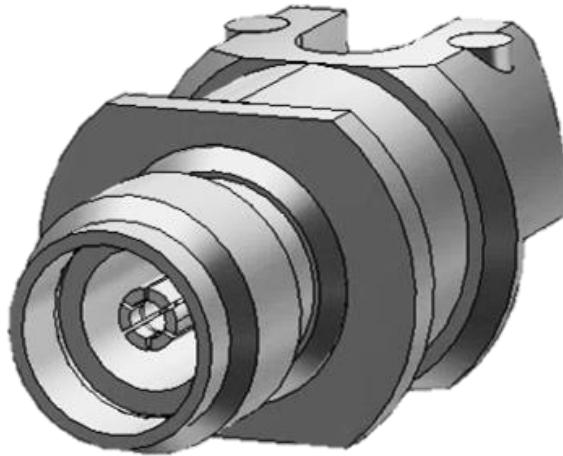


Рисунок 5.27 – Модель КМП ПКМ1-32

Модель переключателя была сделана с теми же материалами, которые предоставляет производитель. Были использованы с S параметрами данного переключателя, при разных положениях ключей. [6] Был использован материал олово, которое соединяет копланарную линию передачи и пины переключателя. Модель переключателя показана на рисунке 5.28.

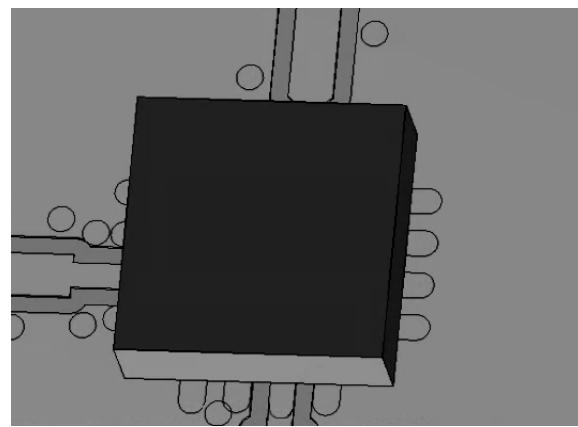


Рисунок 5.28 – Модель переключатель HMC547

Схематичный лист в AWR с подгруженные файлами и портами, которые есть в моделе, указаны на рисунке 5.29.

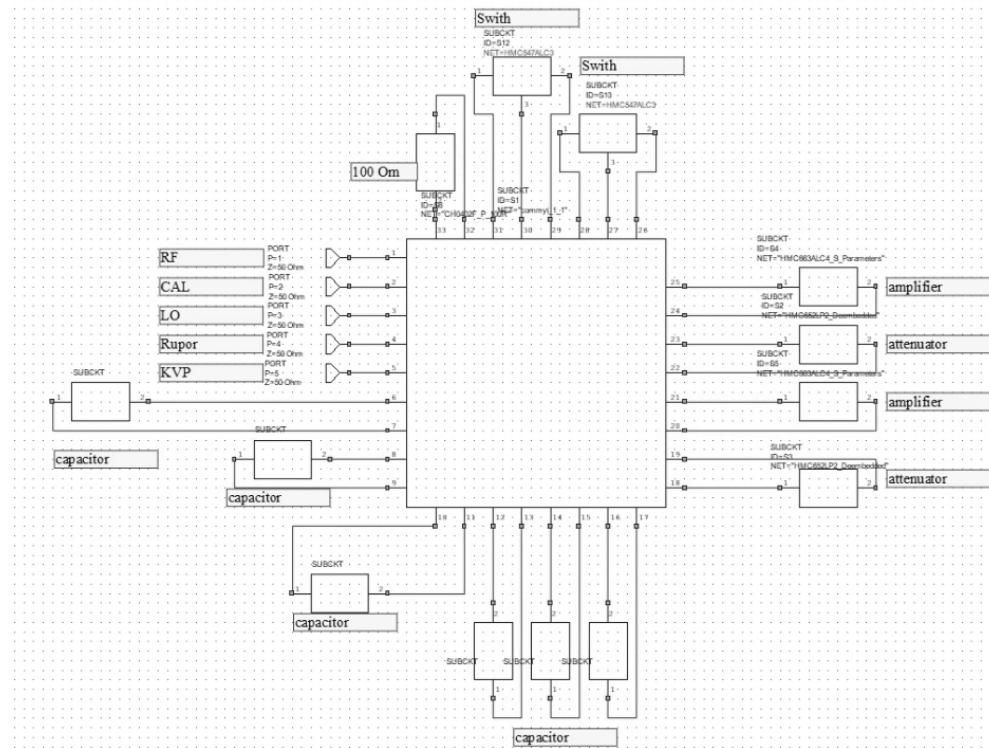


Рисунок 5.29 – Схематичный лист с подгруженными файлами

Как видно из рисунка 5.29, название портов были не много скорректированы:

- основной вход обозначен RF;
- калибровочный вход обозначен CAL;
- выход гетеродин обозначен LO;
- основной выход обозначен РУПОР;
- калибровочный выход обозначен КВП.

Результат моделирования платы «коммутации»:

- при положении первого ключа на основной входной порт и при положении второго ключа на основной выходной порт, указан на рисунке 5.30;

- при положении первого ключа на основной входной порт и при положении второго ключа на калибровочный выходной порт, указан на рисунке 5.31;
- при положении первого ключа на калибровочный входной порт и при положении второго ключа на основной выходной порт, указан на рисунке 5.32;
- при положении первого ключа на калибровочный входной порт и при положении второго ключа на калибровочный выходной порт, указан на рисунке 5.33;
- КСВ всех портов модели указан на рисунке 5.34.

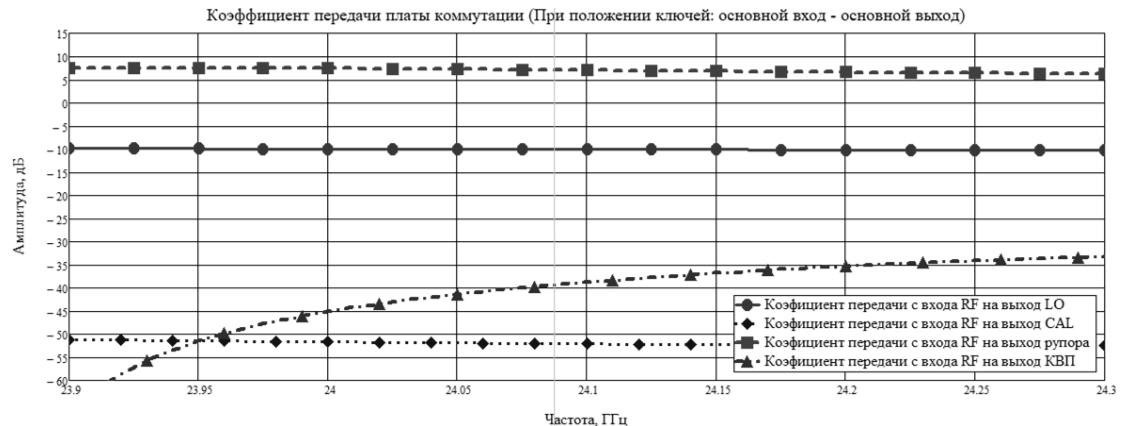


Рисунок 5.30 – Частотная зависимость КП на разные каналы
Коэффициент передачи платы коммутации (При положении ключей: основной вход - калибровочный выход)

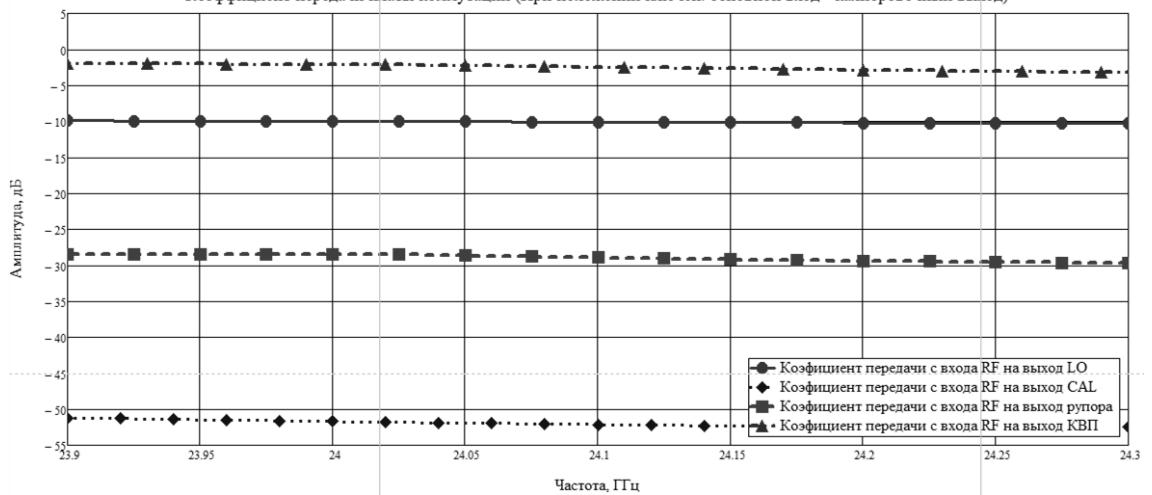


Рисунок 5.31 – Частотная зависимость КП на разные каналы



Рисунок 5.32 – Частотная зависимость КП на разные каналы



Рисунок 5.33 – Частотная зависимость КП на разные каналы

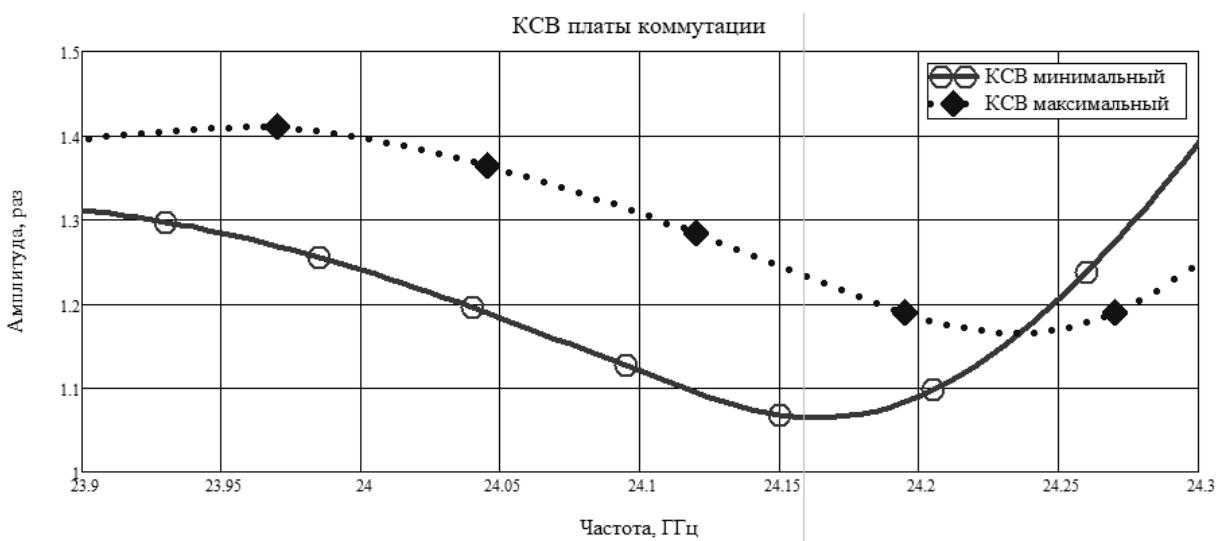


Рисунок 5.34 – Частотная зависимость минимального и максимального значения КСВ портов платы «коммутации»

По результатам моделирования платы «коммутации» делаются выводы:

- КП с входного калибровочного и основного порта на выход основного порта имеет значение 9,8 дБ, данное значение подходит к требованию ТЗ;
- КП с входного калибровочного и основного порта на выход калибровочного порта имеет значение 0 дБ, данное значение подходит к требованию ТЗ;
- изоляция между входными портами составляет минус 50 дБ, данное значение входит в требования ТЗ.

5.6 Полученные значение моделирования системы

В данном разделе будут анализированы полученные данные моделирования, для характеристики всей системы распределения мощности. В таблице 5.2 указаны полученные значения при моделировании системы и ТТХ системы.

Таблица 5.2 – Характеристики, полученные после моделирования и ТТХ системы

Параметр	T3	TTX	Значение системы полученные с помощью моделирования
Частотный диапазон	5.1	$24,125 \pm 0,125$ ГГц	$24,125 \pm 0,125$ ГГц
Габаритный размер	5.2	ширина 170 мм длинна 170 мм высота 2 мм	ширина 135 мм длинна 111 мм высота 1.2 мм
Уровень сигнала с калибровочного входа на выход смесителей	5.7	менее минус 30 дБ	КП: минус 51 дБ (посчитано с помощью рисунков: 5.22, 5.26 и 5.36) При подаче на входные порты 10 дБ, уровень сигнала на выходе смесителя составит минус 41 дБ.
Коэффициент передачи с основного входного канала на выход основного порта	5.15	КП не менее 5 дБ	КП: 10 дБ
Мощность с калибровочного выхода	5.16	Не менее минус 6 дБ	КП: 0 дБ При подаче на входные порты 10 дБ, мощность на выходе составит 10 дБ
Мощность подводимая к смесителям	5.19	в диапазоне от 0 до 10 дБ	КП : 0 дБ

Из таблицы видно, что при шаге моделирования все ТТХ соблюдаются. КСВ всех порт системы имеют значение не выше 1.6, данное значение говорит о приемлемом согласовании в данном частотном диапазоне.

6 Проектирование печатной платы

Проектирование печатной платы производилась в Altium Designer. Выбор программной среды Altium Designer обусловлен большим функционалом системы, а также её просты и удобства представления данных и информации по проекту.

Печатные платы применяются практически во всех отраслях народного хозяйства, и потребность в них постоянно возрастает. Опережающие темпы развития микроэлектроники требуют непрерывного повышения их технического уровня, который определяется ростом плотности монтажа электро-радиодеталей, повышения требований к надежности, увеличением частоты следования импульсов. Обеспечение этих требований зависит от достижений в области конструирования и развития технологий производства печатных плат.

Процесс производства печатных плат прошло долгий путь от приклеивания медной фольги к диэлектрику и ручного лужения, до сложных автоматизированных химических и электрохимических процессов. Качество, ремонтопригодность, а также габаритные размеры готовой продукции во многом зависят от качества изготовления печатных плат.

Использование печатных плат обуславливает возможность уменьшения габаритных размеров аппаратуры, улучшения условий отвода теплоты, снижения металлоемкости аппаратуры и обеспечивает другие конструктивно-технологические преимущества по сравнению с объемным монтажом [23].

6.1 Обзор программы Altium Designer

В программной среде Altium Designer для начала создается проект, который будет связывать схематическое представление платы, библиотеки и так же трехмерная прорисовка платы. Для создания нового проекта в программной среде Altium, осуществляется по пути File – New – Project, как указано на рисунке 6.1.

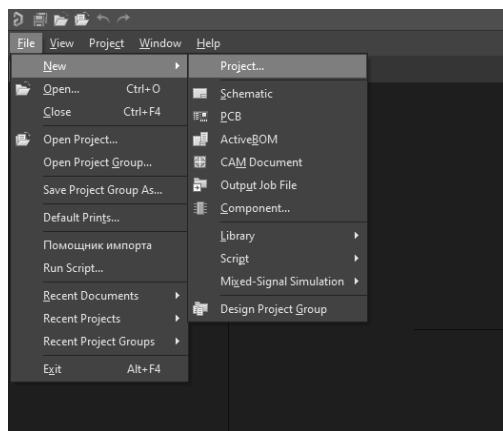


Рисунок 6.1 – Создание нового проекта

После создания файла проекта создается, две библиотеки:

- первая библиотека компонентов, схематическое представление;

- вторая библиотека содержит топологические посадочные места компонента.

Для создания элементов принципиальной электрической схемы и самой электрической схемы используются ГОСТ единая система конструкторской документации (ЕСКД) [24 – 29].

Для создания библиотек используется путь *File – New – Library – Schematic/PCB*, как указано на рисунке 6.2.

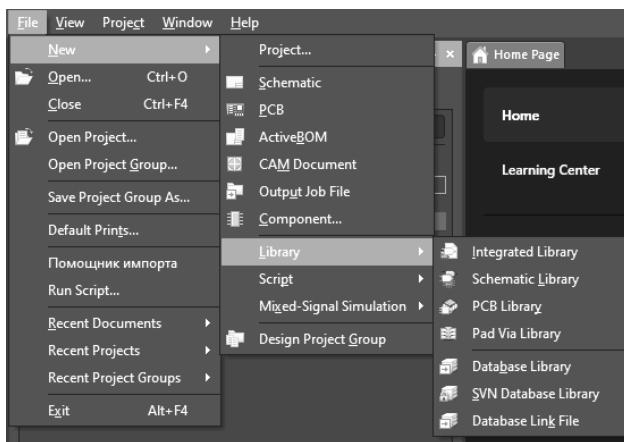


Рисунок 6.2 – Создание библиотек

После создания библиотеки компонентов, создаётся лист с принципиальным электрическим представлением схемы. На данном листе будут располагаться компоненты, созданные в библиотеках выше. Для создания листа где будет располагаться принципиальная электрическая схема, используется путь *File – New – Schematic*, данный путь можно увидеть на рисунке 6.2.

После построения схемы используется лист PCB. На котором производится основная часть работы т.е. правильное проводка ЛП, земляных полигонов, цепей питаний и т.д. Для трассировки печатной платы используется ряд обычных инструментов, данный ряд указан на рисунке 6.3.

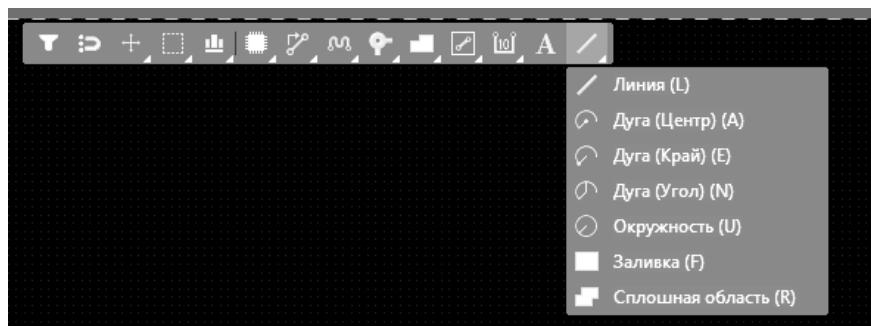


Рисунок 6.3 – Основные инструменты для трассировки печатных плат

После трассировки печатной платы экспортируются файлы нужные для производства чаще всего это Gerber. На данном типе файла указаны все основные слои, которые используется при трассировке печатной платы. И по данному файлу производится и травится ПП.

Более подробное описание функций Altium указаны в литературе [30], [31], [32].

6.2 Создание принципиальной электрической схемы плат деления мощности

Перед созданием электрической принципиальной схемы была создана обобщённая структурная схема. Данная структурная схема показана на рисунке 6.4 и подходит к двум платам деления.

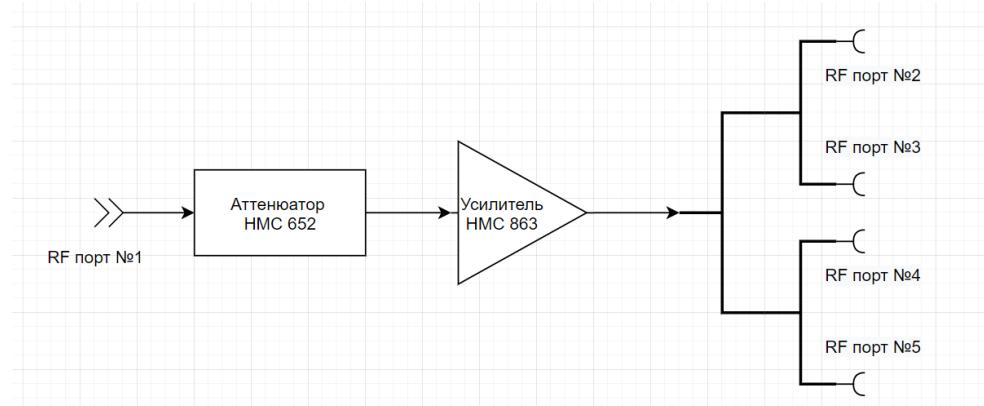


Рисунок 6.4 – Обобщенная структурная схема плат деления мощности

Так как в данном проекте будет использован УМ HMC863, было изучено питание данного усилителя. Данный усилитель потребляет по положительному питанию 5 В, а по отрицательному в пределах от 0 до минус 2 В. Так как на плату рассчитывалось, что будет приходить только положительное питание, используется инвертор TPS60403DBVR [14]. Схема подключения инвертора показана на рисунке 6.5.

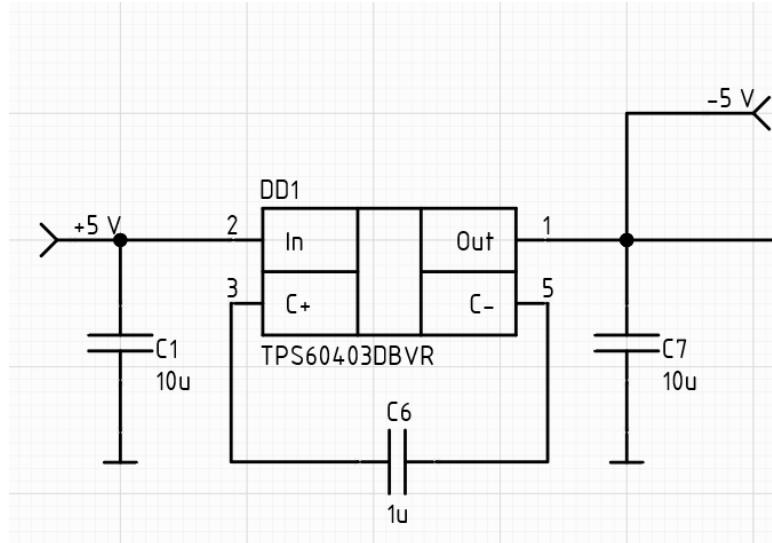


Рисунок 6.5 – Схема подключения инвертора напряжения TPS60403DBVR

Инвертор преобразует входное положительное напряжение на отрицательное напряжение. Зная, что на усилитель надо подавать отрицательное напряжение в пределах от 0 до 2 В, после подключения инвертора был использован линейный стабилизатор по отрицательному напряжению. Так же линейный стабилизатор стабилизирует отрицательное

напряжения, которое имеет прямую связь с КУ. Линейный стабилизатор по отрицательному питанию использовался от LT3093 [12].

У данного стабилизатора были использованы функции:

- команда *Fast Start-Up Circuitry*, которая нужна для быстрого появления отрицательного питания на выходе стабилизатора;
- контроль выходного напряжения за счёт обратной связи;
- установка лимита по току, т.к. потребление по отрицательному напряжению не более 10 мА.

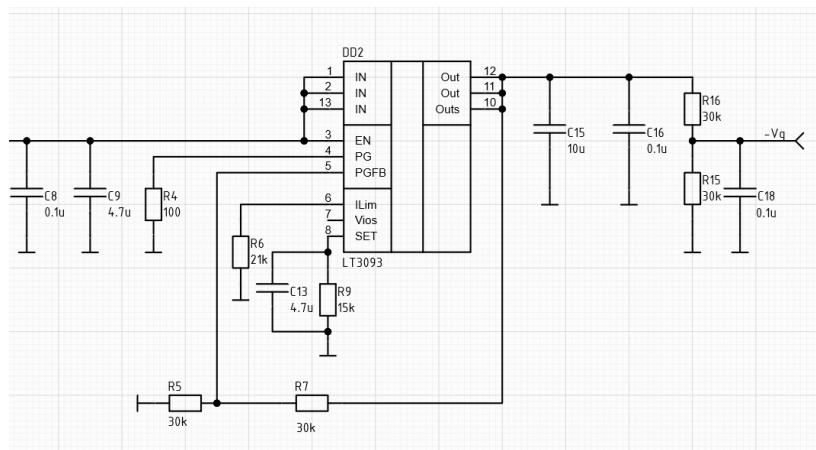


Рисунок 6.6 – Схема подключения линейного стабилизатора отрицательного напряжения LT3093

На выходе стабилизатора стоит делитель напряжения, который подстраивается под данный УМ. Каждый УМ данной линейки имеет свое значение напряжения т.е. два одинаковых УМ могут иметь разные значения отрицательного напряжения.

Для питания усилителя по положительному напряжению использовался импульсный стабилизатор ADM7171ACPZ-5.0 [13]. Данный стабилизатор указан на рисунке 6.7.

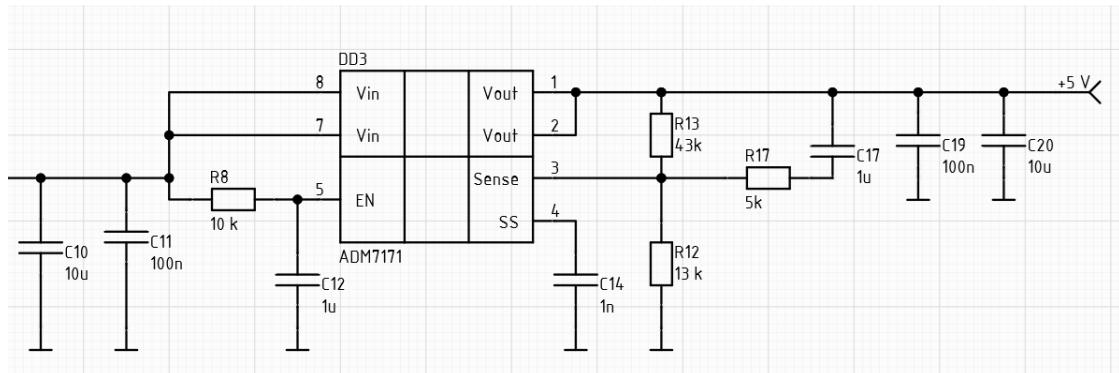


Рисунок 6.7 – Схема подключения импульсного стабилизатора положительного напряжения ADM7171

Данный стабилизатор является фиксированный т.е. на входе он имеет диапазон напряжений от 5 В до 6.5 В, но на выходе всегда будет 5 В.

В схеме использовалось отрицательные напряжения, поэтому стоит задача, чтобы положительно напряжение, которое приходит на УМ, появлялось позже чем отрицательное.

Для решения данной задачи было решено:

- 1) использование транзисторного ключа, который при появлении минус 5 В, открывался и входное напряжение попадало на стабилизатор ADM7171ACPZ-5.0;
- 2) использование схеме стабилизатора ADM7171ACPZ-5 задерживающие RC цепи (рисунок 6.7);
- 3) использование функции *Fast Start-Up Circuitry* у стабилизатора LT3093 (рисунок 6.6).

Транзисторный ключ указан на рисунке 6.8. В данном ключе использовался транзистор P – канальный от компании *Infineon* IRF9Z34NS и N – канальный IRFML8244TRPBF, так как являются самыми доступными и с хорошими характеристиками [33], [34].

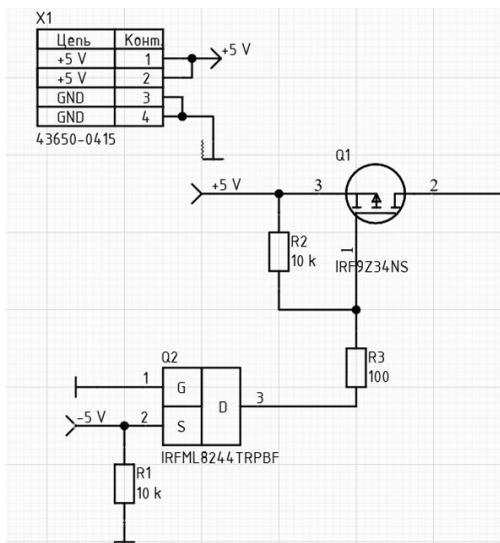


Рисунок 6.8 – Транзисторный ключ и разъем для подачи питания

Схема СВЧ-тракта представлена на рисунке 6.9. Принципиальная электрическая схема плат деления представлена в приложении А.

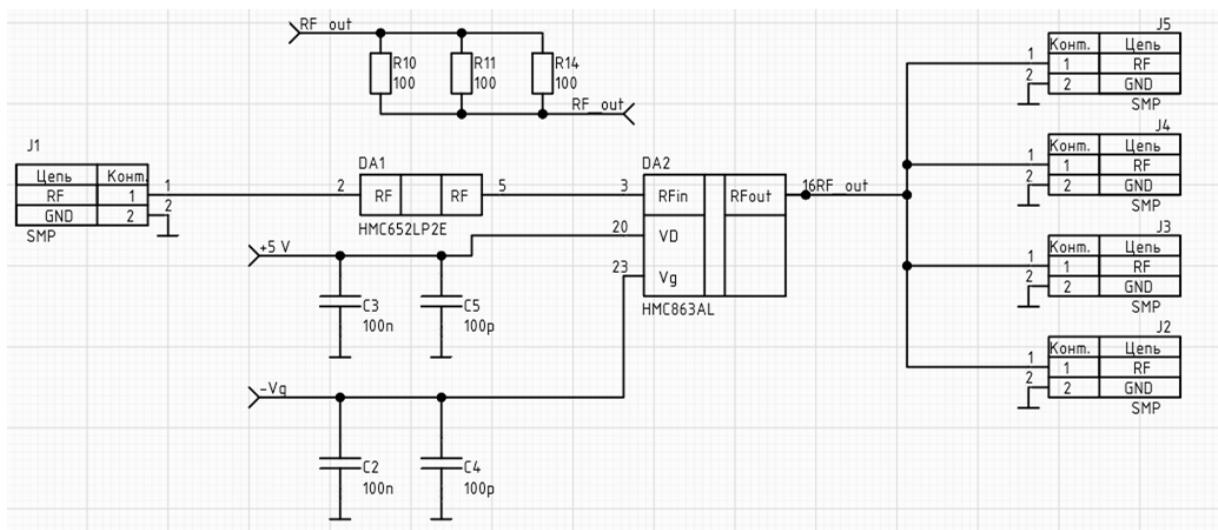


Рисунок 6.9 – Схема СВЧ тракта

6.3 Создание принципиальной электрической схемы платы «коммутации»

Перед созданием электрической принципиальной схемы была создана обобщённая структурная схема. Данная структурная схема показана на рисунке 6.10.

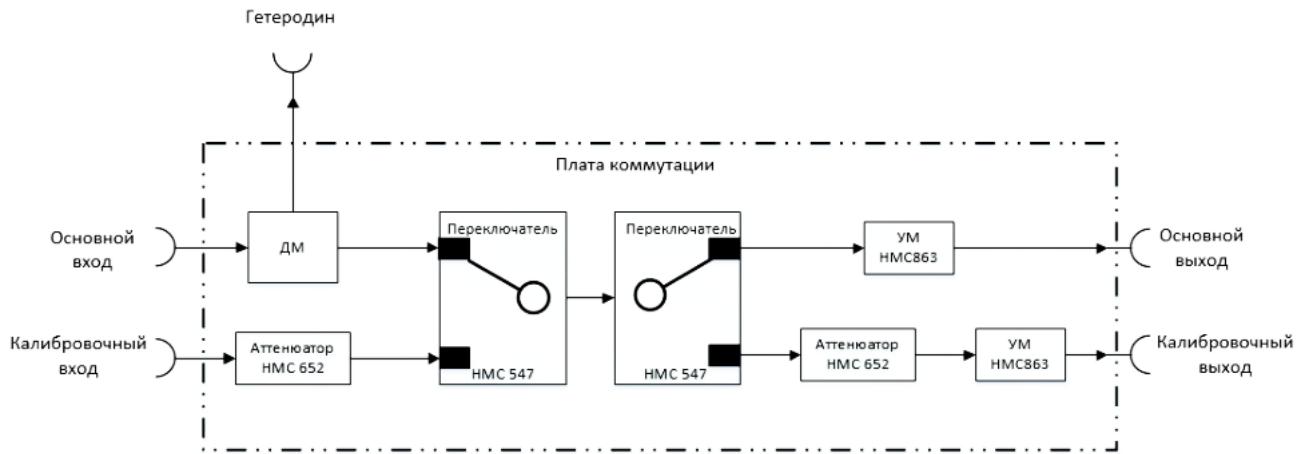


Рисунок 6.10 – Обобщенная структурная схема платы

В плате «коммутации» используется два УМ. Для питания двух усилителей по положительному напряжению использовался LT3029 двуканальный линейный стабилизатор напряжения [10].

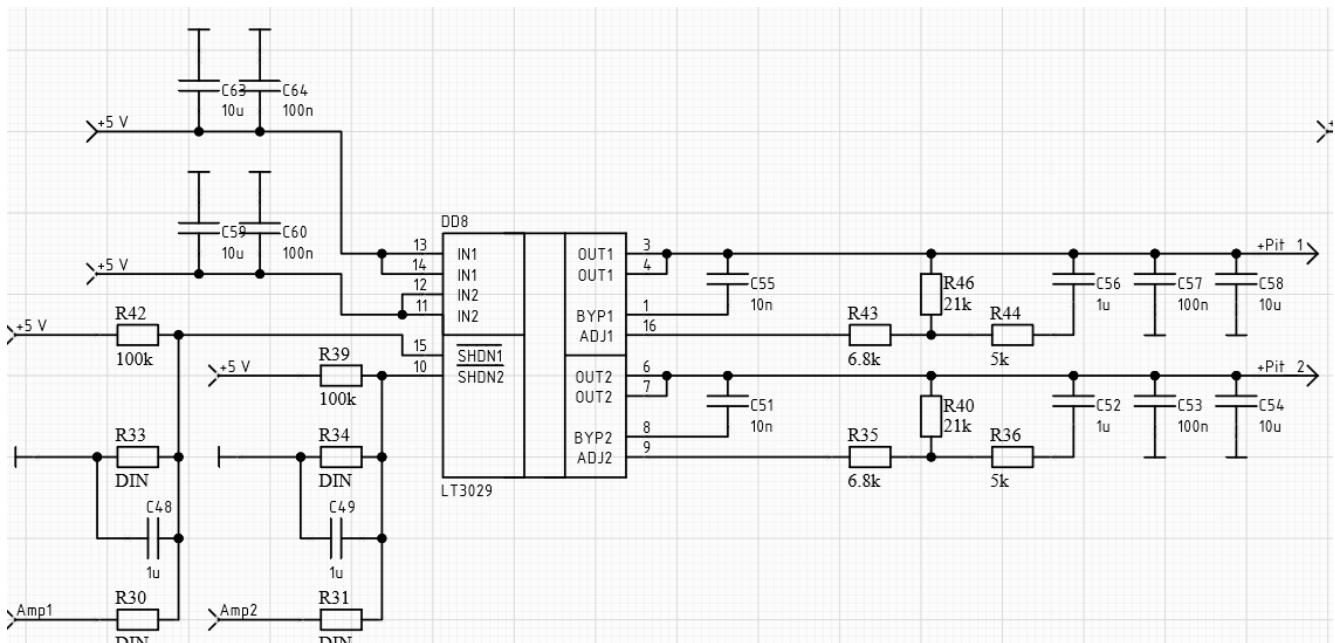


Рисунок 6.11 – Схема подключения двуканального линейного стабилизатора положительного напряжения LT3029

По отрицательному напряжению используется, такая же цепь, как и в п.6.2. Для того, чтобы использовать сигналы переключения положительного значения, надо подать на пины заземления (GND) микросхемы HMC547, положительное напряжение равное плюс 5 В. Логика переключения данного переключателя указана в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Логика переключения микросхемы HMC547 [6]

Выбранный канал	Напряжение А	Напряжение В
Выход RF2	+5 В	0 В
Выход RF1	0 В	+5 В

Для отдельного питания двух переключателей использовался линейный стабилизатор положительного напряжения LT3045. Схема подключения данного стабилизатора показана на рисунке 6.12 [11].

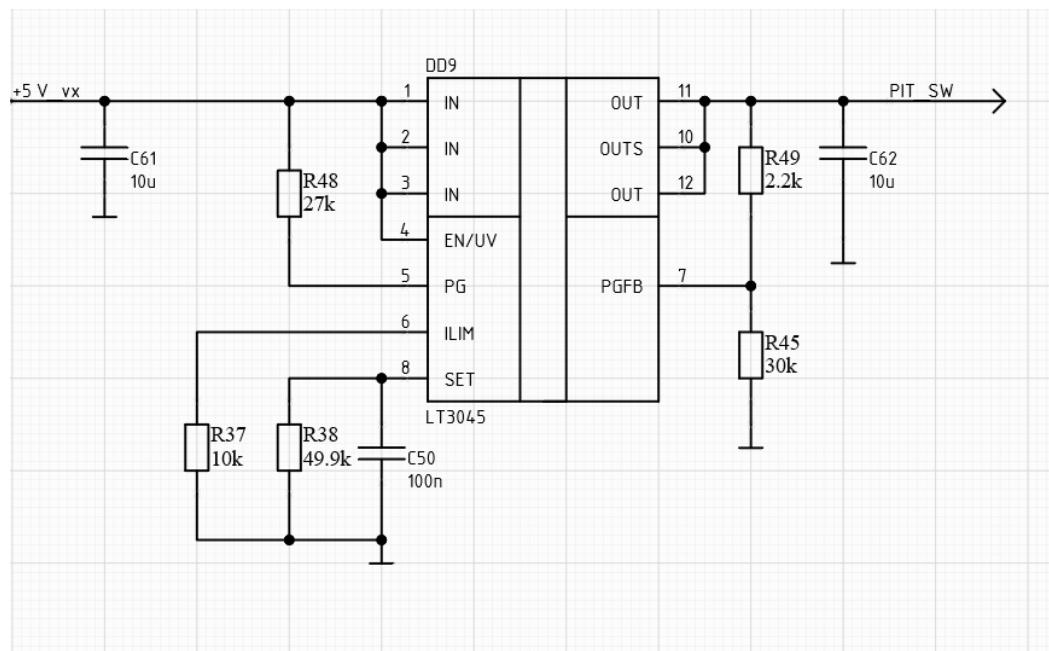


Рисунок 6.12 – Схема подключения линейного стабилизатора положительного напряжения LT3045

Схема подключения переключателей HMC547 располагается на рисунке 6.13.

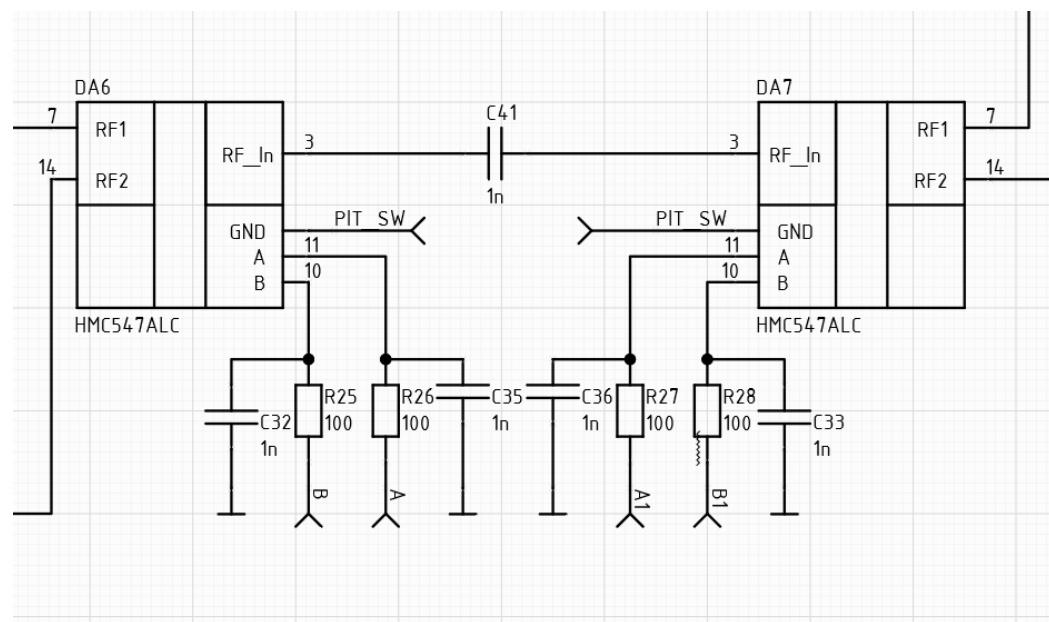


Рисунок 6.13 – Схема подключения переключателей HMC547ALC

Для получения напряжений: A, A1, B, B2, использовался двойной логический инвертор NC7WZ04 [35]. Принцип его работы представлен на рисунке 6.14.

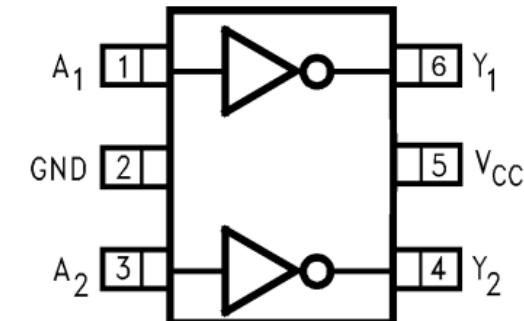


Рисунок 6.14 – Принцип работы NC7WZ04

Подача напряжения для переключения будет производится с помощью разъема IDSC-16 [18]. Также с помощью данного разъема будет выбираться, какой УМ будет включен, так как работа двух УМ не понадобится. Не используемые пины разъема заземляются. Схема получения напряжений, A, A1, B, B2, которые нужны для переключения двух ключей, указана на рисунке 6.15.

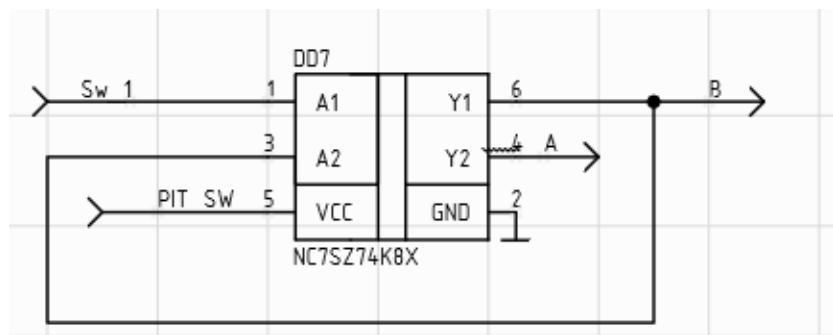


Рисунок 6.15 – Схема подключения логических инверторов

Принципиальная электрическая схема платы «коммутации» указана в приложении В. Из рисунка 6.14 видно, что использовались разделительные конденсаторы по входу и выходу, из-за переключателей HMC547. Данные переключатели могут пускать постоянное напряжение питания.

6.4 Создание топологии плат деления

Перед созданием топологии платы надо ознакомиться с допусками и правилами Резонита. В допуски входят такие параметры [36], [37]:

- Ширина проводника;
- Толщина проводника;
- Расстояние между проводниками;
- Поясок переходного отверстия;
- Минимальный диаметр монтажного отверстия и т.д.

Задавшись данными правилами создается стек платы, который был упомянут в таблице 5.1. Созданный стек указан на рисунке 6.16.

#	Name	Material	Type	Thickness	Dk	Weight	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	SM-001	Solder Mask	0.0254mm	4		0.03
1	Top Layer	CF-004	Signal	0.018mm		1/2oz	
	Rogers4350	Rogers4350	Core	0.254mm	4.5		0.02
2	Mid Layer 2	CF-004	Signal	0.018mm		1/2oz	
	Prepreg	FR-4	Prepreg	0.125mm	4.3		0.02
3	Mid Layer 3	CF-004	Signal	0.018mm		1/2oz	
	FR-4	FR-4	Core	0.71mm	4.5		0.02
4	Bottom Layer	CF-004	Signal	0.018mm		1/2oz	
	Bottom Solder	SM-001	Solder Mask	0.0254mm	4		0.03
	Bottom Overlay		Overlay				

Рисунок 6.16 – Стек платы в Altium Designer

После создания стека платы был нарисован контур платы «маленького» деления мощности с параметрами 27 мм шириной и 55 мм длинной. Также на контуре платы сразу были отмечены вырезы для размещения разъемов 19S202-40ML5-NM и монтажные отверстия для крепления печатной платы. Создав контур платы происходит размещение компонентов и трассировка печатной платы таким образом, чтобы путь был наименьшим, но при этом не было трудности ручного монтажа компонентов. Форма контактных площадок микросхем и портов берутся из TX микросхемы, TX портов и рекомендованных параметров. Послойное представление платы указано на рисунках 6.17 – 22.

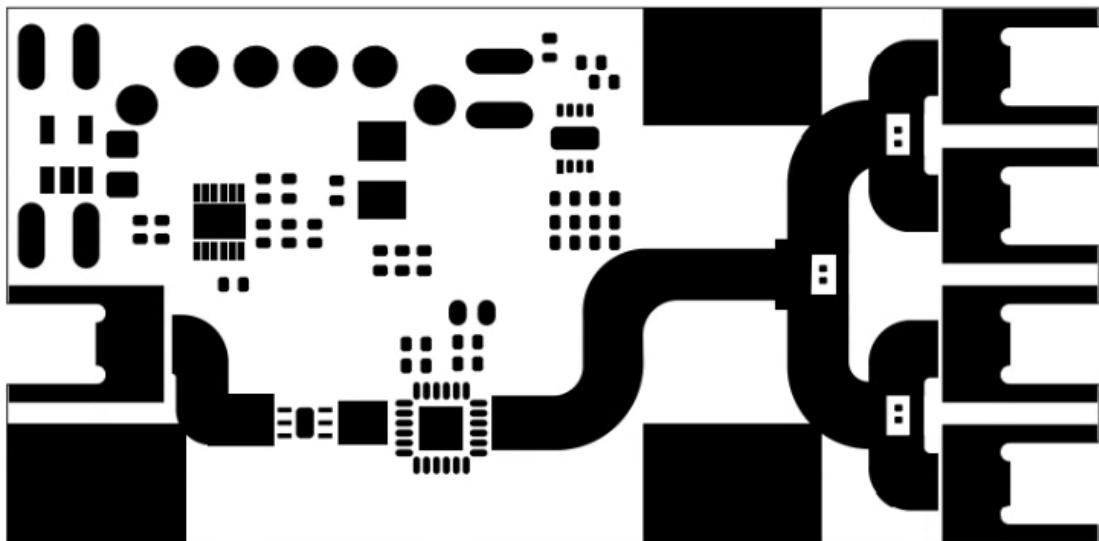


Рисунок 6.17 – Верхний слой вскрытие от паяльной маски

Вскрытие от маски нужно для припаивания компонентов на плату, но и так же паяльная маска нужна чтобы при пайке компонентов олово не растеклось на всю линию. Так же паяльная маска убрана с СВЧ ЛП так, как она вносит большие потери, на рабочей частоте.

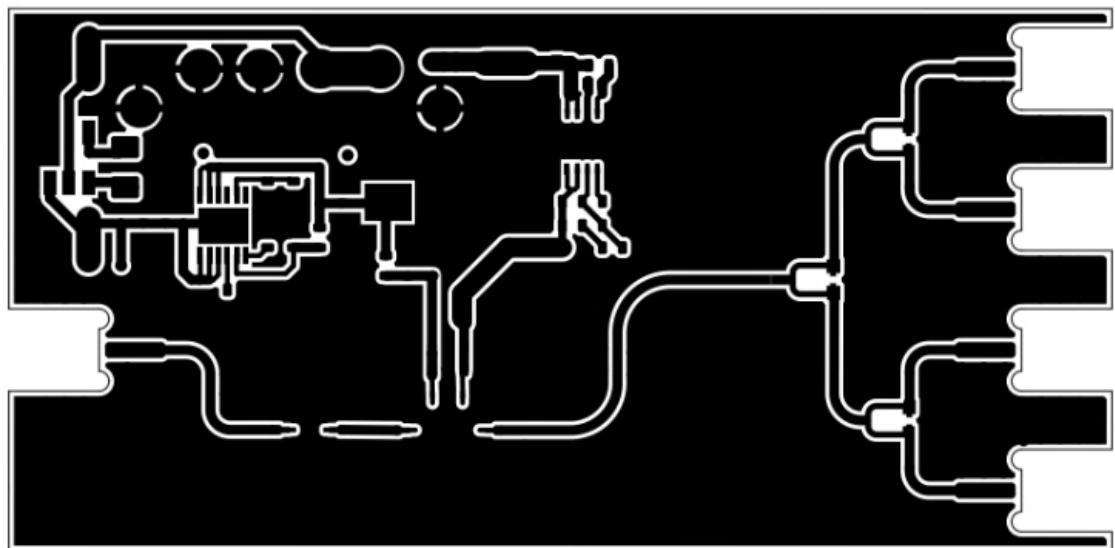


Рисунок 6.18 – Верхний слой металлизации

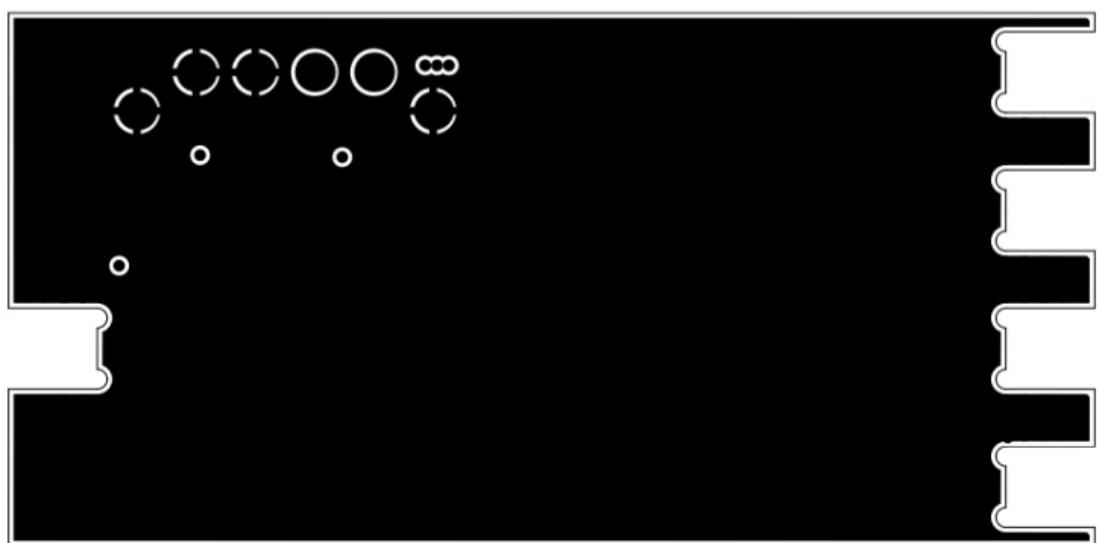


Рисунок 6.19 – Второй слой металлизации



Рисунок 6.20 – Третий слой металлизации

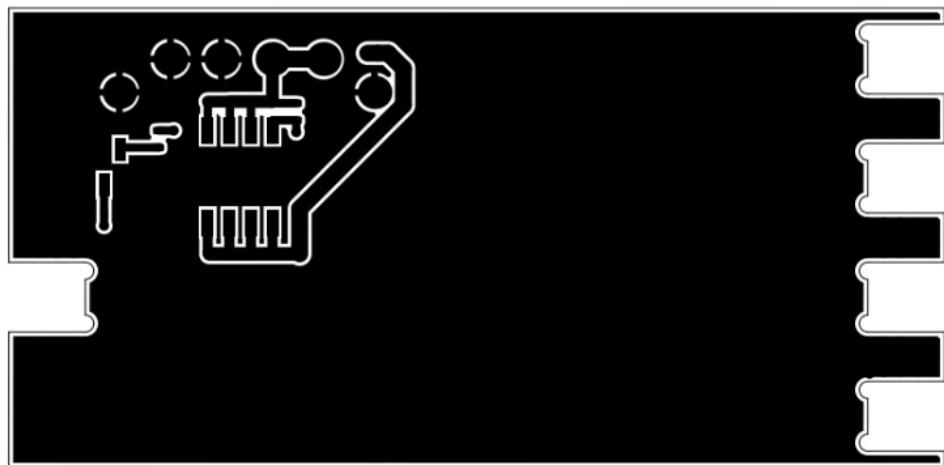


Рисунок 6.21 – Нижний слой металлизации

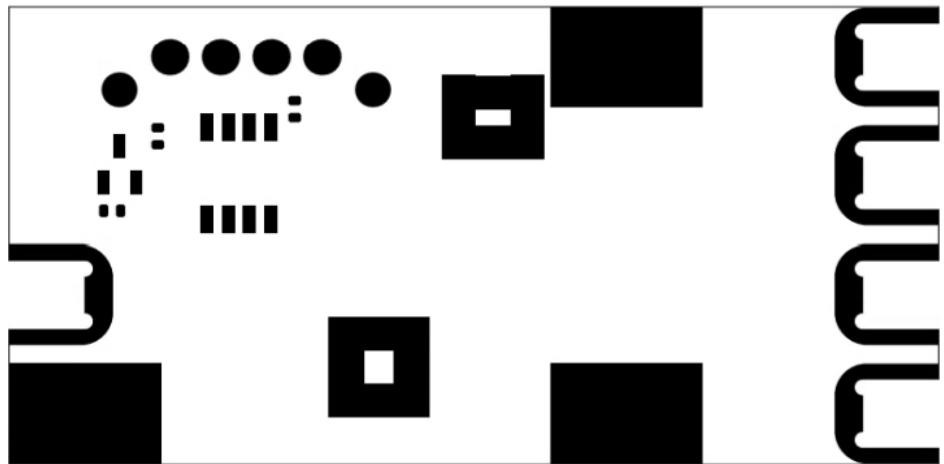


Рисунок 6.22 – Нижний слой вскрытие от паяльной маски

Нижнее вскрытие от маски понадобилось из-за того, что транзисторный ключ расположен на обратной стороне платы, но и так же для припаивания разъемов SMP и отвода тепла у микросхем ADM7171ACPZ-5.0 и HMC863.

Так же плюс данной программы она дает представление печатной платы в 3D. Разведенная выше ПП указана на рисунке 6.23 – 24.

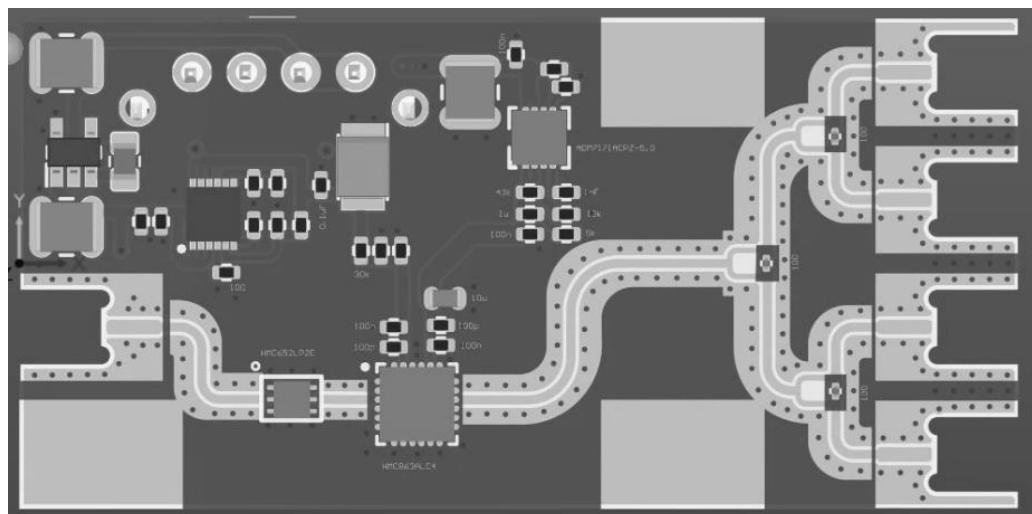


Рисунок 6.23 – 3D платы сверху

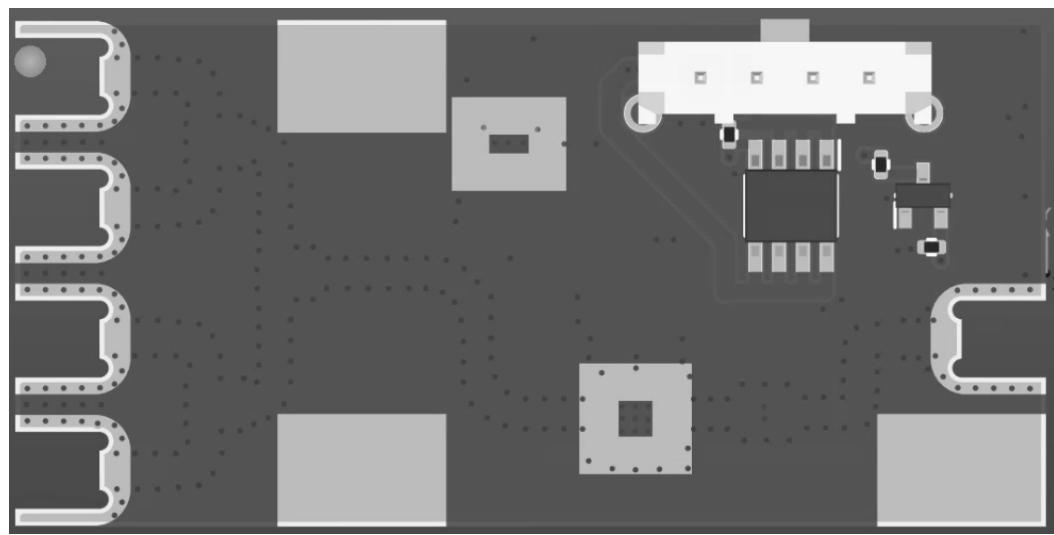


Рисунок 6.24 – 3D платы сверху

Для платы «большого» делителя мощности, создавался новый файл. Данная ПП является копией «маленького» делителя мощности, но при этом с длиной в 4 раз больше. На рисунках 6.25 – 28 будут указаны слои ПП «большого» делителя мощности. Отличие от «маленького» делителя является в том, что данные не используется два последних слоя и они дублируют второй слой металлизации.

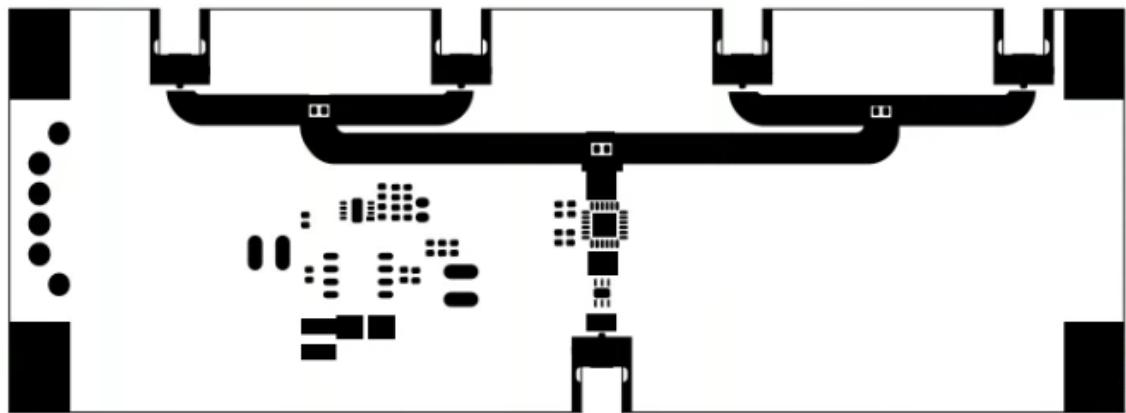


Рисунок 6.25 – Верхний слой вскрытие от паяльной маски

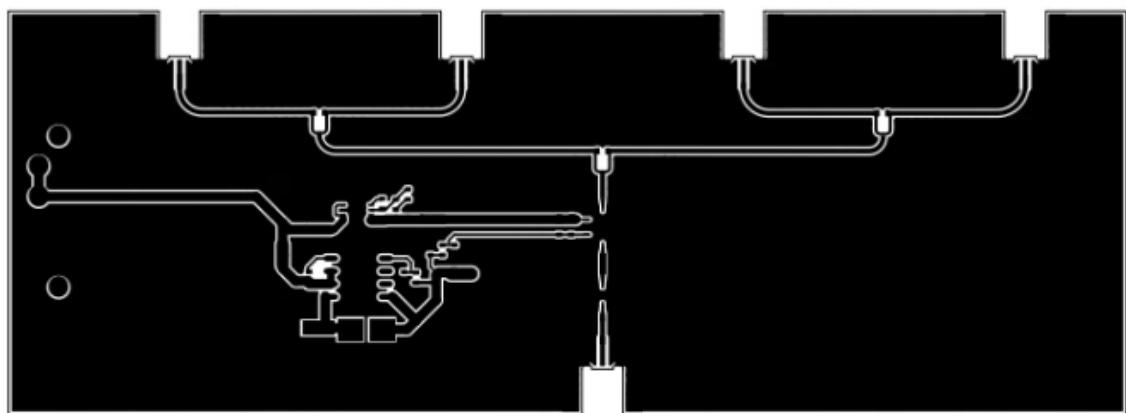


Рисунок 6.26 – Верхний слой металлизации



Рисунок 6.27 – Второй слой металлизации

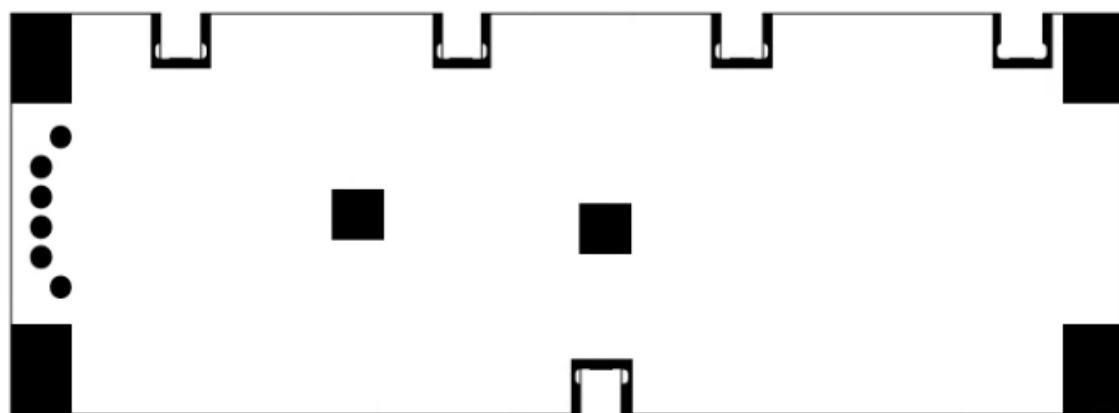


Рисунок 6.28 – Нижний слой вскрытие от паяльной маски
3D представление печатной платы указана на рисунках 6.29 и 6.30.

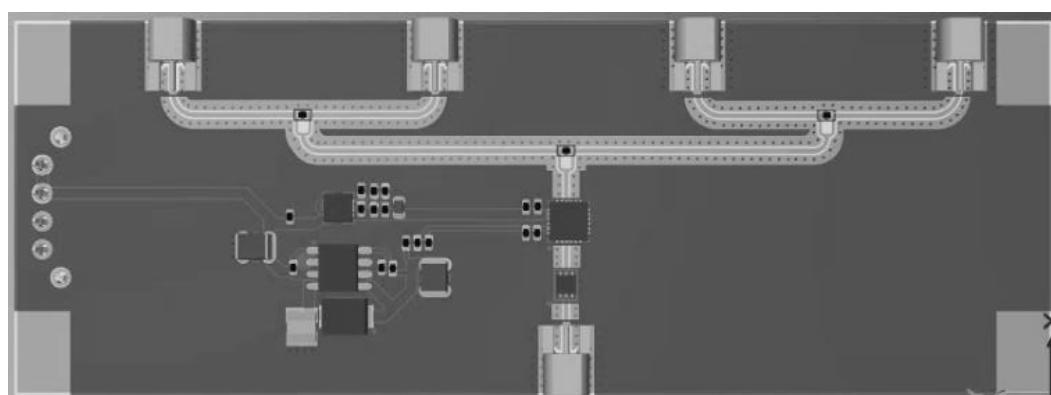


Рисунок 6.29 – 3D представление сверху ПП «большого» делителя мощности

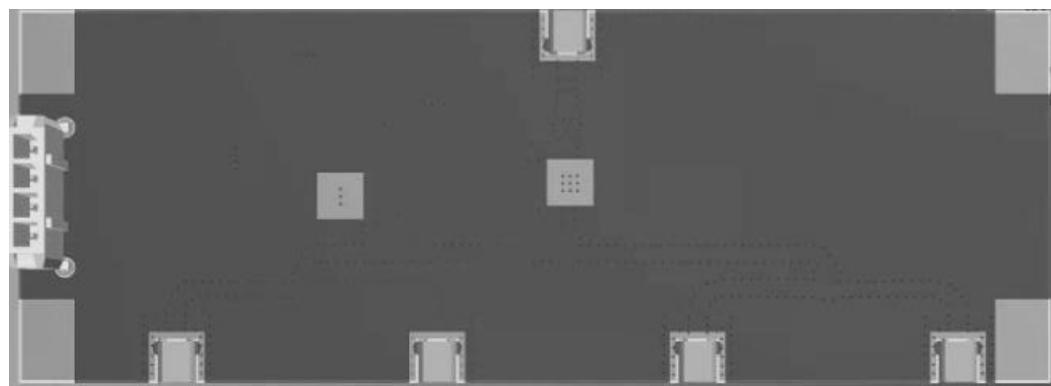


Рисунок 6.30 – 3D представление снизу ПП «большого» делителя мощности

6.5 Создание топологии платы «коммутации»

Плата «коммутации» будет не много труднее предыдущих из-за того, что надо провести ЛП так, чтобы:

- не наводились друг на друга;
- с наименьшей длиной;
- место пересечения двух ЛП, на разных слоях диэлектрика, было наименьшим.

Слои данной печатной платы указана на рисунках 6.31 – 6.38.

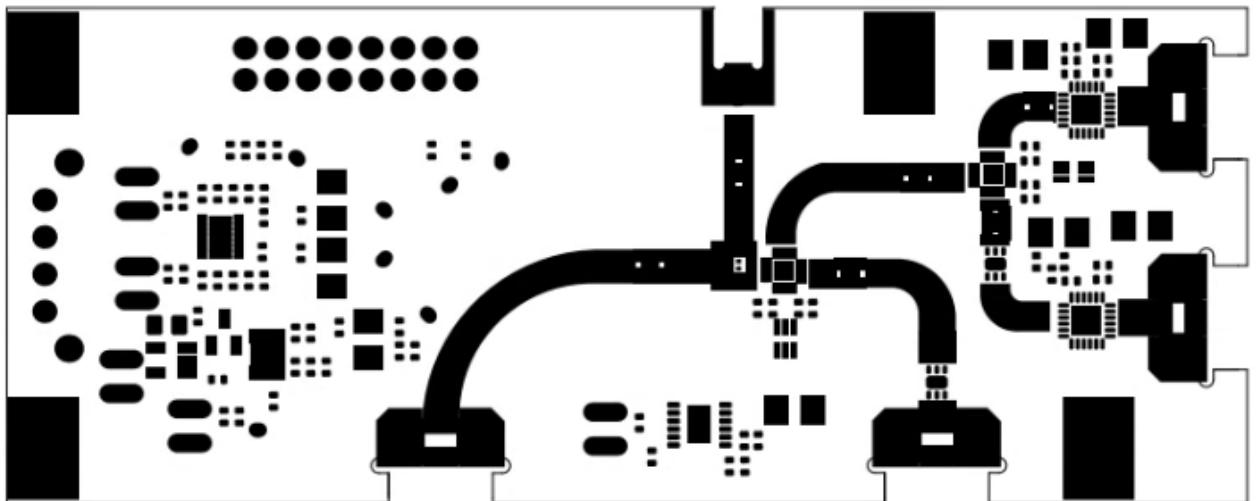


Рисунок 6.31 – Верхний слой вскрытия от паяльной маски платы «коммутации»

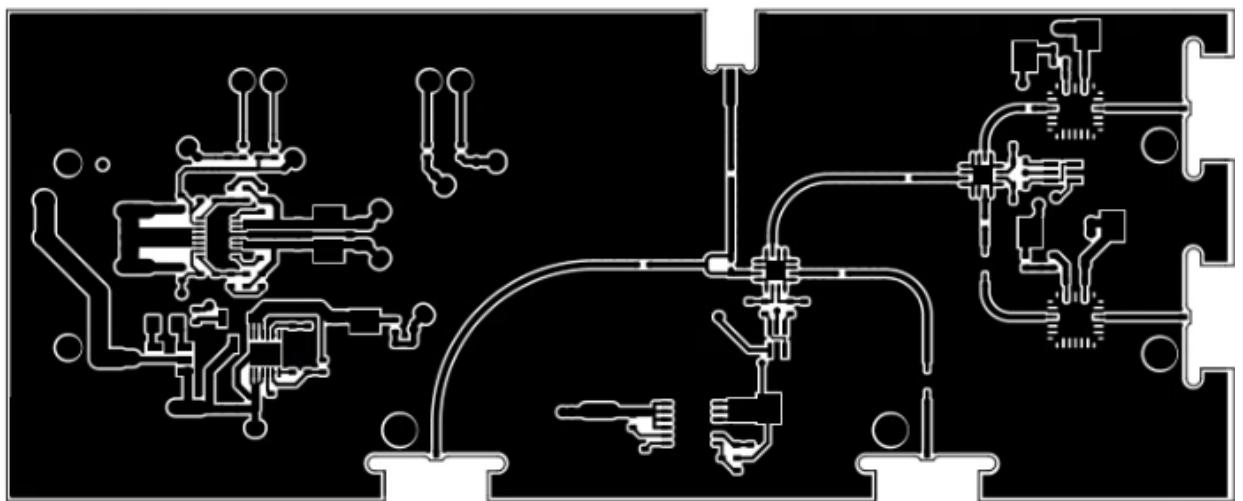


Рисунок 6.32 – Верхний слой металлизации платы «коммутации»

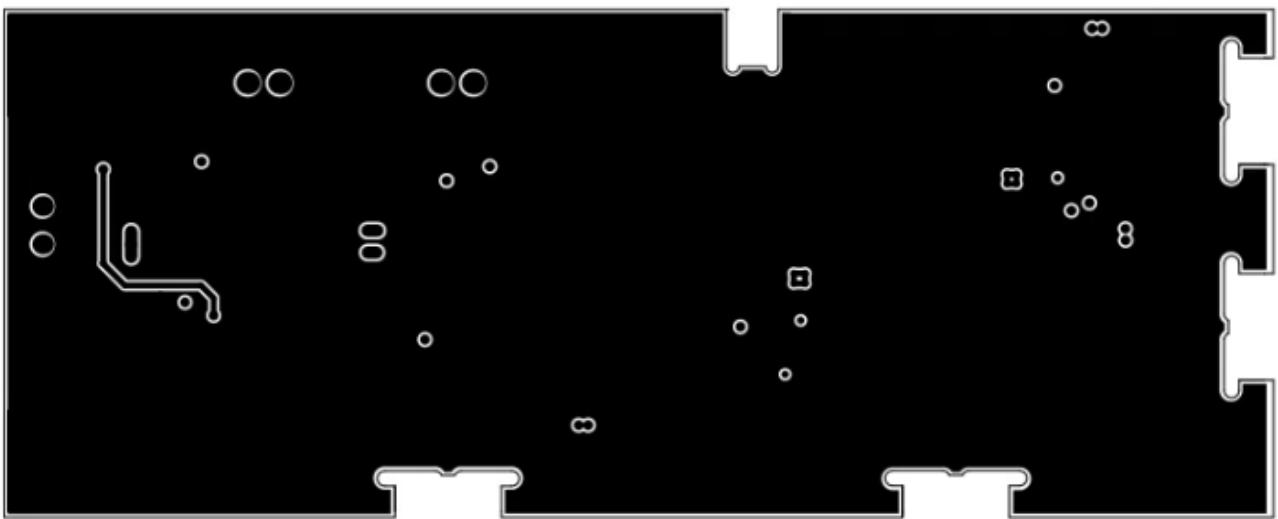


Рисунок 6.33 – Второй слой металлизации платы «коммутации»

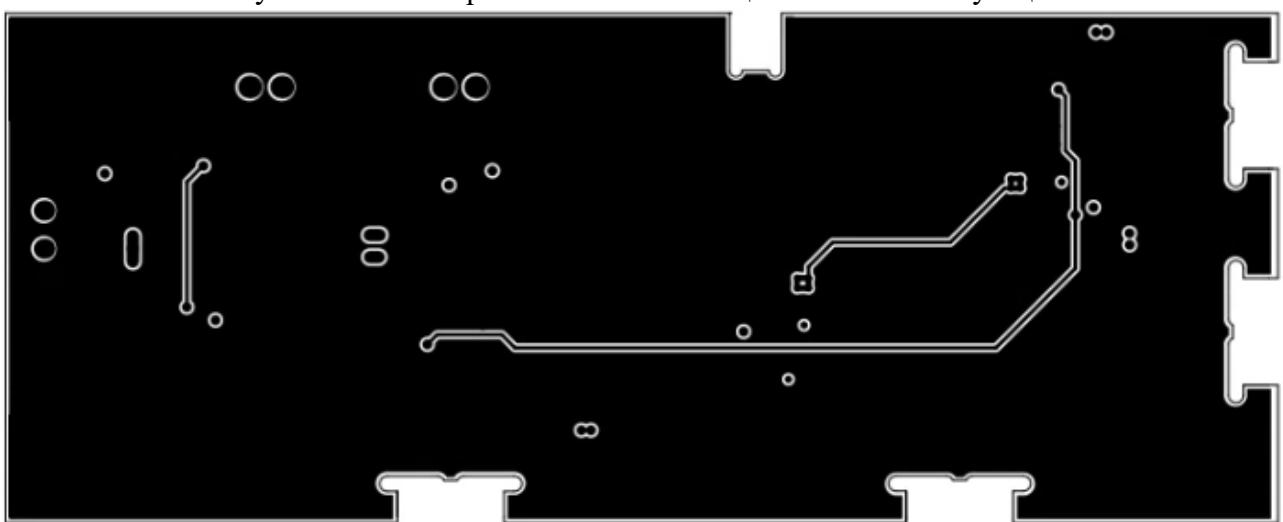


Рисунок 6.34 – Третий слой металлизации платы «коммутации»

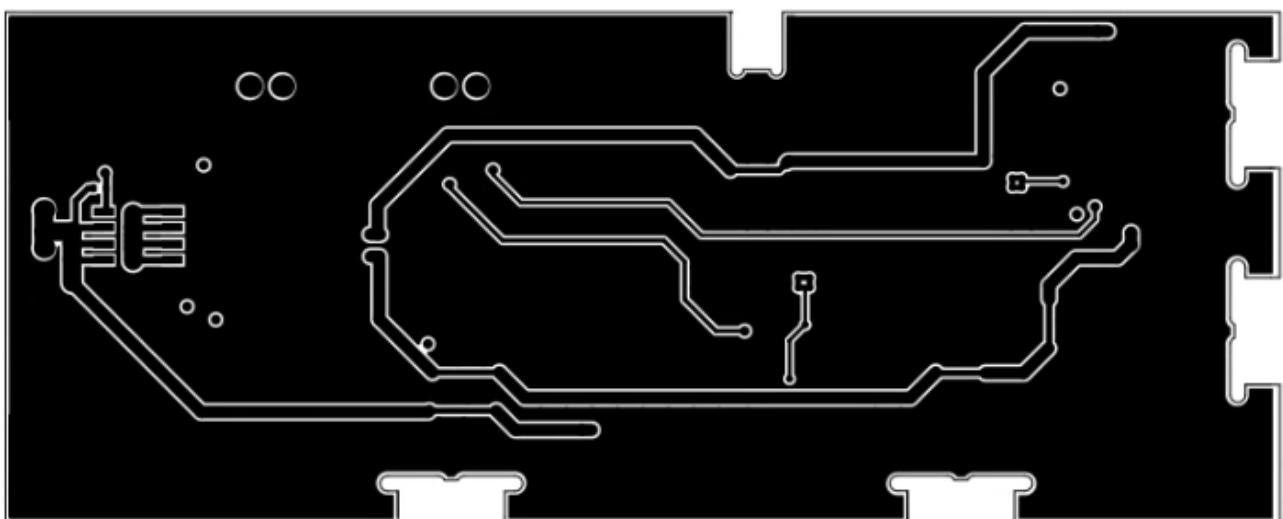


Рисунок 6.35 – Нижний слой металлизации платы «коммутации»

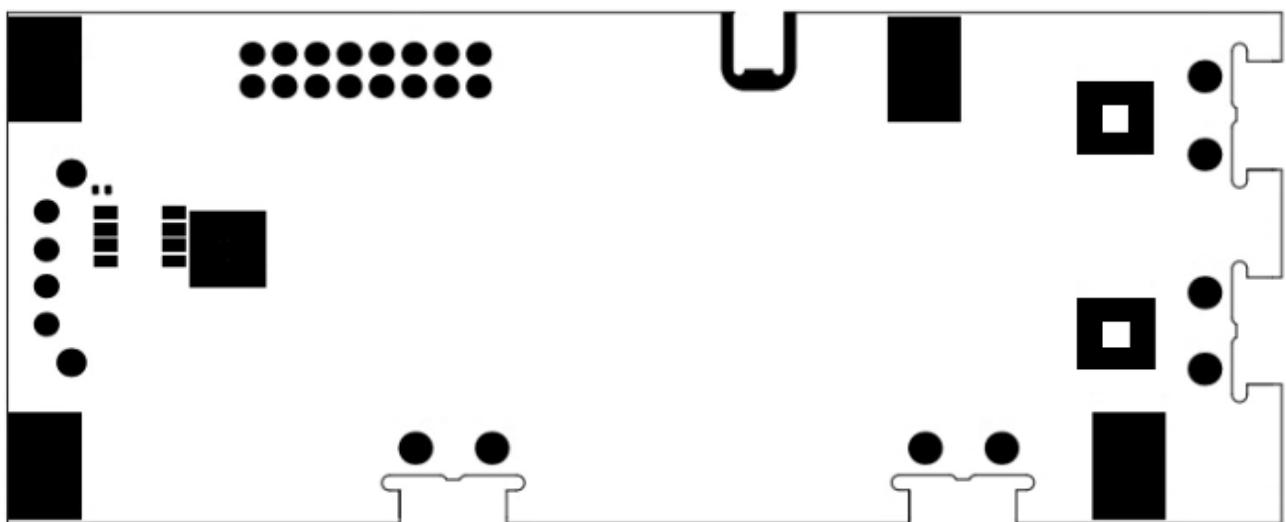


Рисунок 6.36 – Нижний слой вскрытия от паяльной маски платы «коммутации»

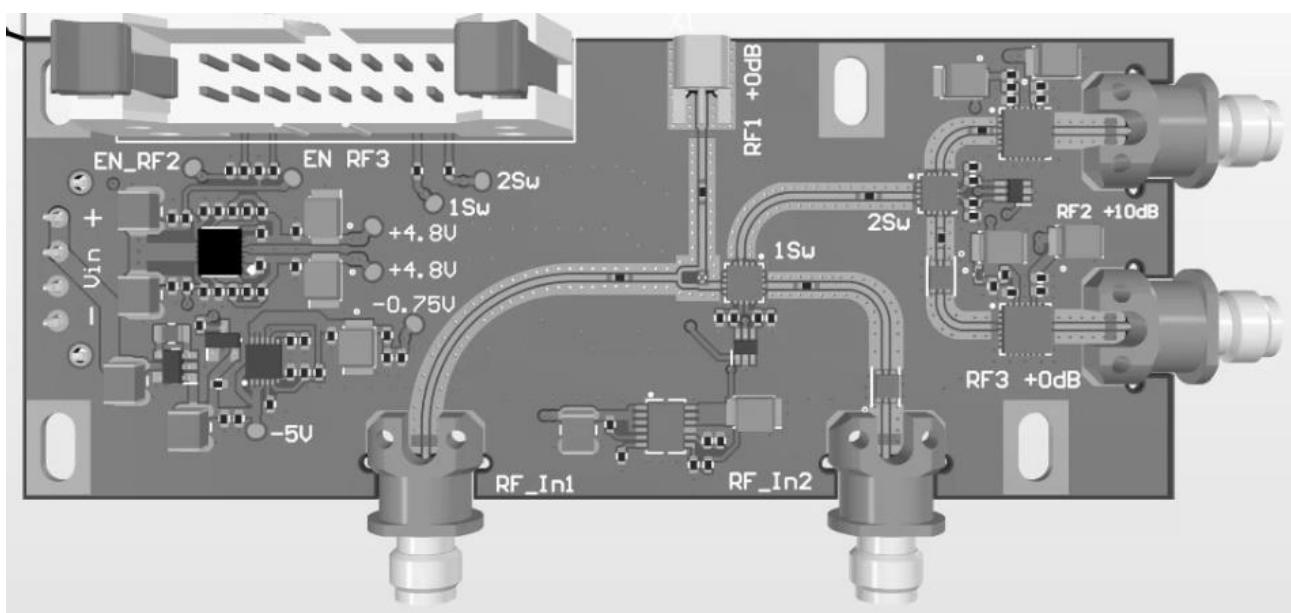


Рисунок 6.37 – 3D представление сверху платы «коммутации»

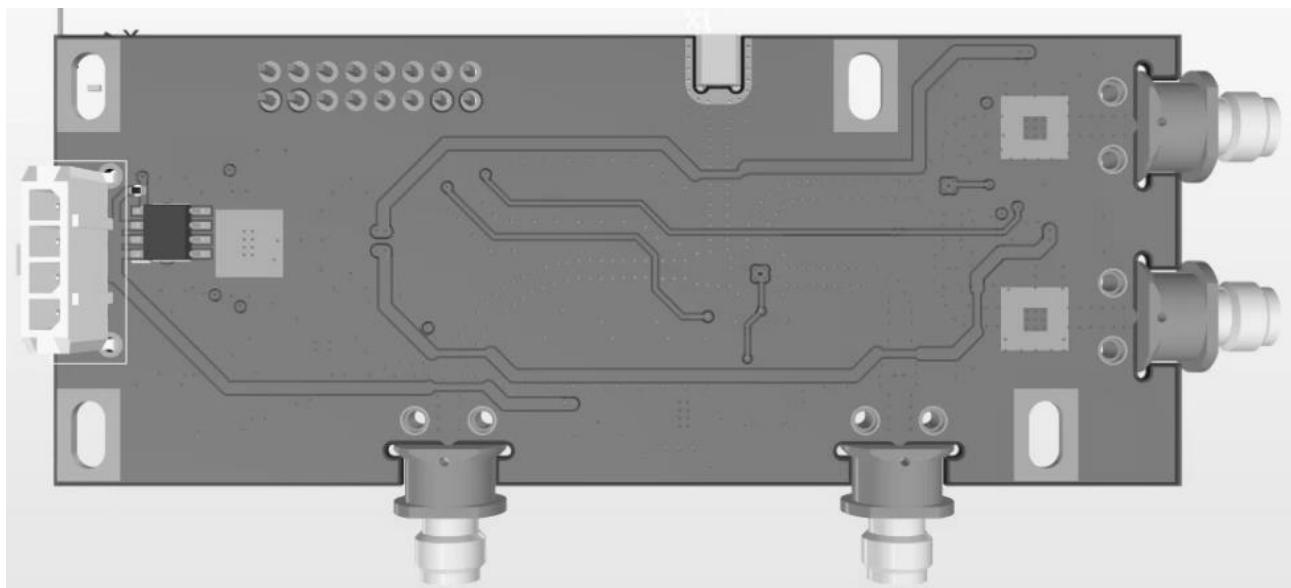


Рисунок 6.38 – 3D представление сверху платы «коммутации»

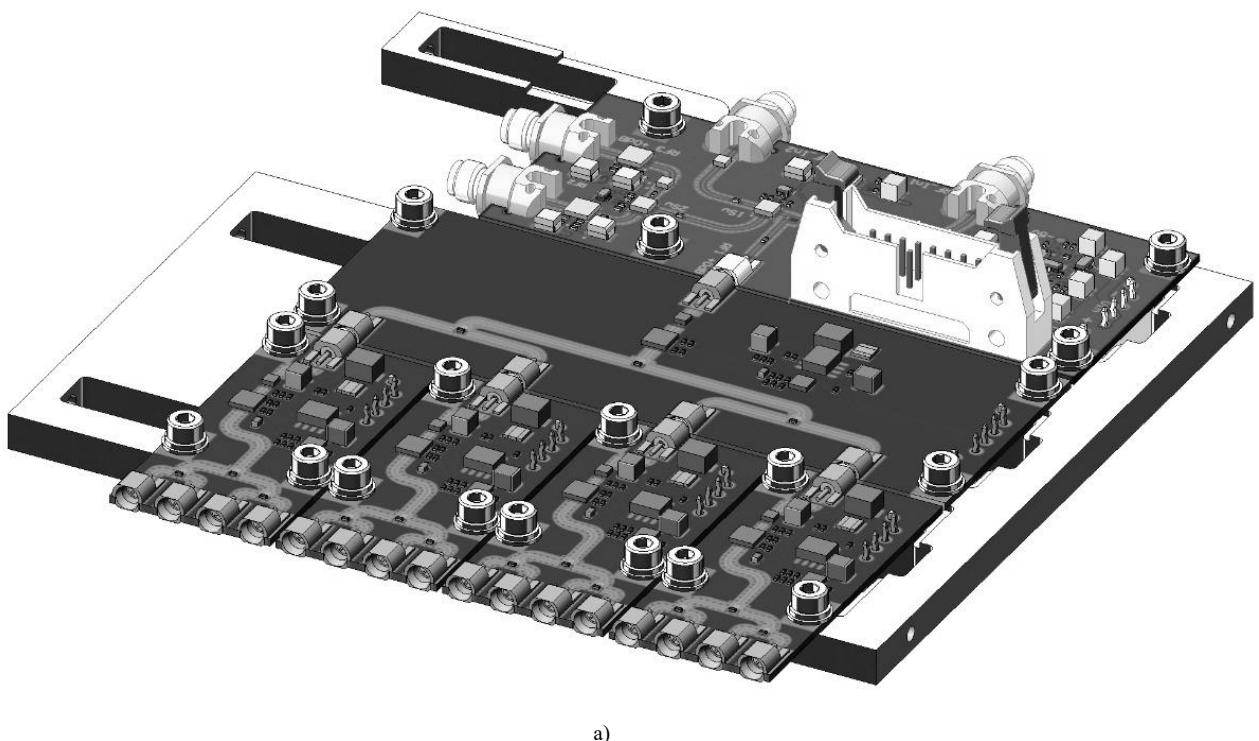
6.6 Полученные данные после проектирования печатных плат

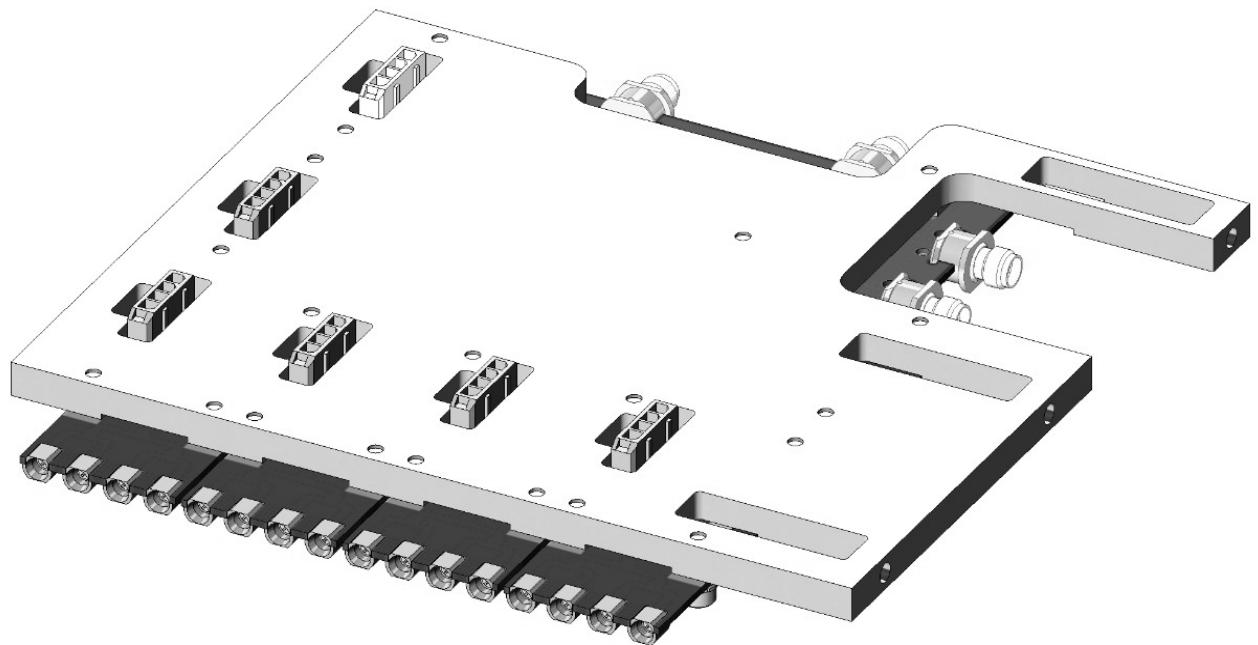
После проведения данного раздела работы, нужные файлы для производства печатной платы отдаются в Резонит. После чего технологии проверяют плату на ошибки и допуски. Если плата полностью подходит под их требования и нет замечаний, то печатную плату отправляют на производство. В таблице 6.2, указаны полученные характеристики системы в данном разделе и TTX.

Таблица 6.2 – Полученные ТХ при проектировании ПП и ТTX системы

Параметр	Пункт ТЗ	TTX	Результаты полученные в разделе проектировке платы
Тип управления переключателя	5.9	По средствам напряжения	По средствам напряжения
Крепление системы	5.22	Отверстия под крепление	Отверстия под крепление
Потребляемое напряжение	5.23	Не более 12 В	Потребление от 5 до 6.5 В

После создания 3D моделей ПП, была создана модель системы распределения мощности. Модель системы распределения мощность указа на рисунок 6.39.





б)

Рисунок 6.39 – Модель распределения мощности (а – вид сверху, б – вид снизу)

7 Измерение системы распределения мощности

Измерения на СВЧ, по сравнению с традиционными измерениями на более низких частотах, имеют свои особенности. В первую очередь, они являются следствиями свойств волн СВЧ, их распространения и преобразования. В технике СВЧ необходимо измерять новые параметры – коэффициент стоячей волны (КСВ), коэффициент отражения (КО) и т.д. В рамках матричной характеристизации цепей приходится переходить от матриц, связанных с импедансами, токами и напряжениями, к матрицам рассеяния. Измерениям на СВЧ свойственны ограничения технического порядка, связанные с несовершенством аппаратуры на этих частотах. В частности, трудно или невозможно добиться достаточно высоких добротностей резонаторов, трудно создавать измерительные генераторы достаточной мощности со сверхширокополосной перестройкой, обеспечить высокую частотную стабильность генераторов, а также создавать измерительные усилители со стабильными метрологическими характеристиками и т.д. [38].

7.1 Оценка потребления системы

После получения печатной платы производится монтажа компонентов. В первую очередь производится монтаж цепи питания и проводится его проверка. После распаиваются основные компоненты и проверяется общее потребление. Нераспаянные ПП указана на рисунке 7.1, распаянные ПП на рисунке 7.2. Потребление ПП «маленько» делителя, указано на рисунке 7.3.

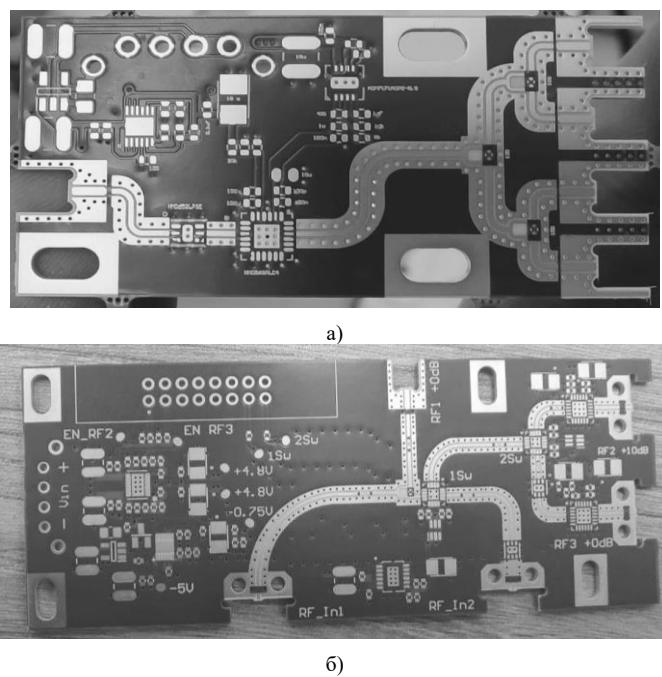


Рисунок 7.1 – Нераспаянные ПП (а – плата «маленький» делитель мощности, б – плата «коммутации»)

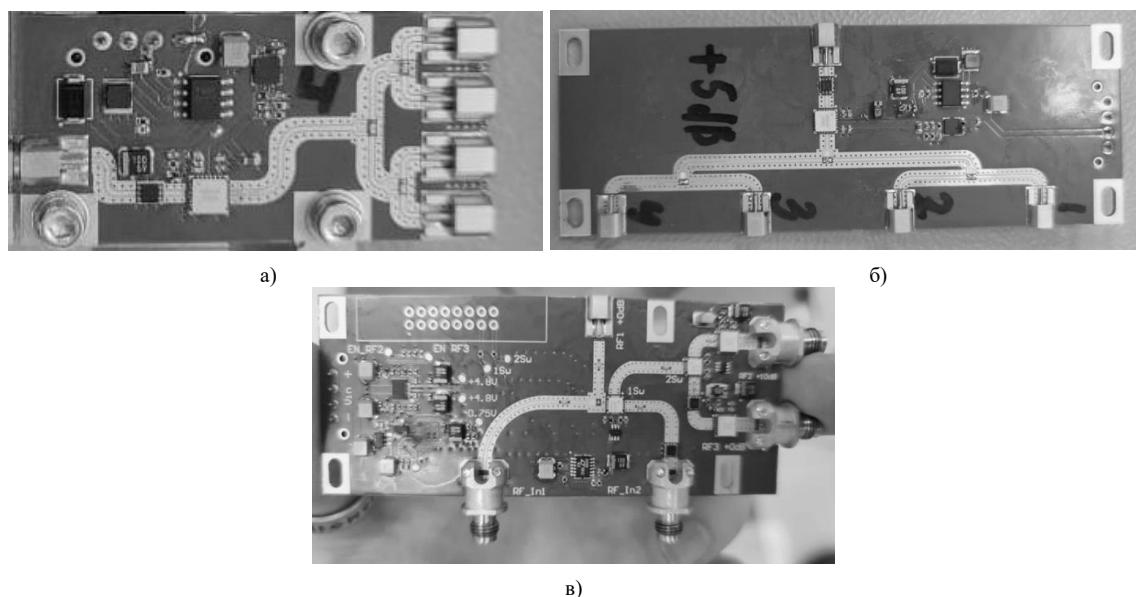


Рисунок 7.2 – Распаянная ПП (а – плата «маленький» делитель мощности, б – плата «большой» делитель мощности, в – плата «коммутации»)



Рисунок 7.3 – Передняя панель лабораторного источника

В таблице 7.1 указана потребляемая мощность всех ПП отдельности и суммарная, а также сравнение с ТТХ.

Таблица 7.1 – Потребление системы распределение мощности и ТТХ

Название ПП	Потребление тока, А	Потребление напряжения, В	Мощность, Вт	Суммарная мощность, Вт	TTX, Вт
Плата «маленький» делитель мощности (4 платы)	1.28	6	7.68	13.98	Не более 15
Плата «большой» делитель мощности	0.33	6	1.98		
Плата «коммутации» (при включении 2 УМ)	0.72	6	4.32		

После проверки цепи питания производится измерения параметров СВЧ ЛП, перед этим убедившись, что постоянного напряжения нет на ЛП, из-за того, что постоянное напряжение может вывести из строя чувствительные компоненты приборов. Проверка мультиметром показала, что на ЛП нету постоянного напряжения. Измерения будут проводиться при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ) *FieldFox* до 50 ГГц.

7.2 Обзор ВАЦ *FieldFox*

ВАЦ - прибор, который измеряет характеристики прохождения сигнала через тестируемое устройство и характеристики отражения сигнала от его портов.

Agilent N9918A FieldFox современный миниатюрный высокочастотный анализатор-измеритель параметров беспроводных сетей связи, предназначенный для использования при создании, обслуживании и ремонте беспроводных сетей связи. *Agilent N9918A FieldFox* – это комбинированный прибор, сочетающий в себе целый комплекс радиоаппаратуры необходимый специалистам самого широкого профиля. ВЧ - анализатор *Agilent N9918A FieldFox* объединяет анализ кабелей и антенн, анализ спектра, измерение мощности, ВАЦ и векторный вольтметр [39]. Сам прибор указан на рисунке 7.4.



Рисунок 7.4 – Измерительный прибор *FieldFox*

7.3 Калибровка ВАЦ

Калибровка ВАЦ – ответственная задача, которая зависит от:

- частотного диапазона;

- типов коннекторов, установленных на объекте измерения и на выходе ВАЦ;
- задач проводится калибровка: для определения КО, КП;
- количество портов устройства и ВАЦ и другие факторы.

Существует множества различных калибровок. Самым распространённым считаются: SOLT, SSLT и SSST. Калибровки типа SSLT и SSST применяются в волноводных линиях передачи. В коаксиальных линиях передачи, на частотах ниже 40 ГГц, предпочтительней использовать калибровку типа SOLT. SOLT - это сокращение от четырёх английских слов, которые обозначают меры калибровки:

- короткое замыкание (Short);
- холостой ход (Open);
- согласованную нагрузку (Load);
- перемычку (Thru).

Каждая мера описывается с помощью математических выражений. С помощью калибровочных мер строится матрица ошибок, которая впоследствии вычитается от измеренных результатов и получается данные более точные. Так же с помощью калибровки создаётся опорная ось, по которой можно характеризовать только исследуемое устройство, а не переходы и коаксиальные кабели.

Для калибровки данного ВАЦ был использован электронный модуль калибровки ECal. Данное устройство является разработкой *Keysight*. Данная калибровка в два раза быстрее чем калибровка с помощью механических мер, но при этом сопоставимо с точностью механических мер. Данное устройство минимизирует погрешность, связанную с человеческим фактором так, как все действия будут проводится в программном обеспечении (ПО) [41]. Электронный модуль калибровки указан на рисунке 7.5.



Рисунок 7.5 – Электронный модуль калибровки

Для калибровки использовалось:

- 1) *FieldFox* (50ГГц);
- 2) ECal (300кГц – 26.5 ГГц);
- 3) две кабельные сборки (2.4/1.04 мм);

4) переход коаксиальный (с 3.5/1.52 мм на 2.4/1.04 мм).

Подключение показывается на рисунке 7.6. Все соединения были затянуто с помощью барометрического ключа, который тоже указан на рисунке 7.6. С помощью внутреннего ПО будет произведена калибровка, данное действие указано на рисунке 7.7.

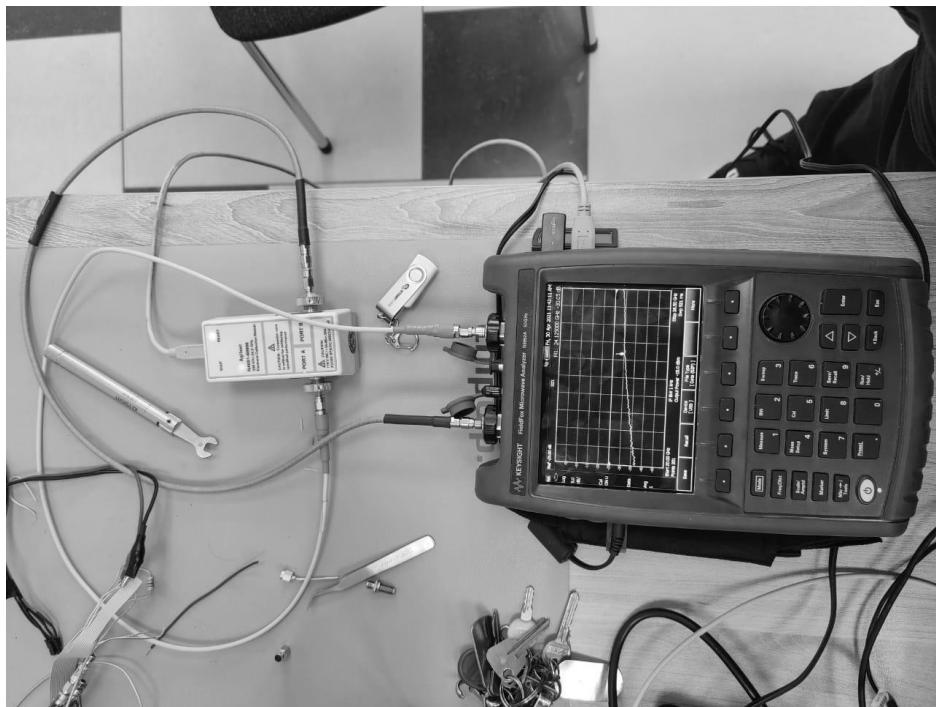


Рисунок 7.6 – Подключение ВАЦ и ECal

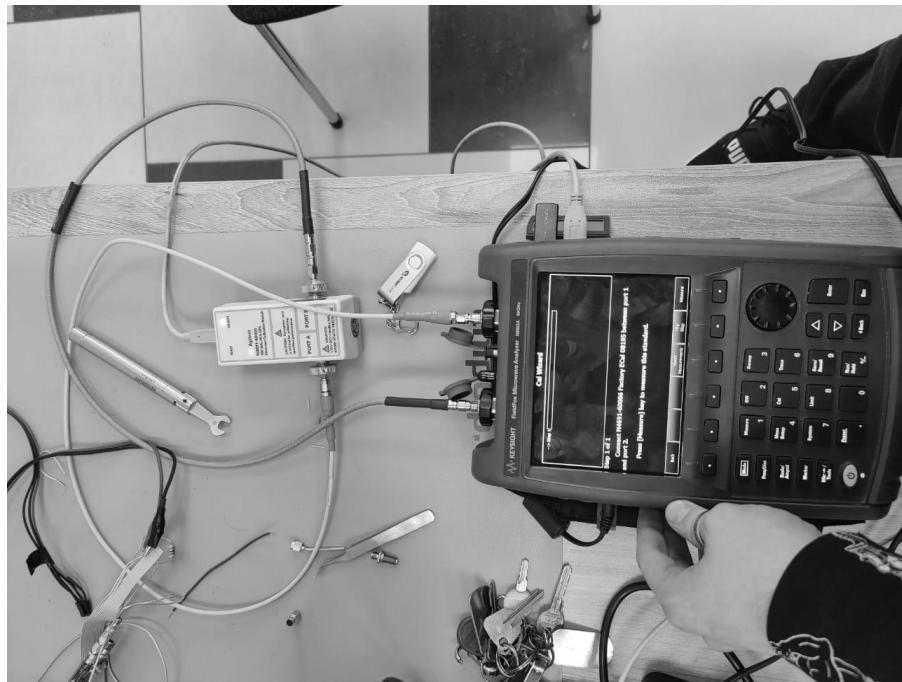


Рисунок 7.7 – Запуск ПО для калибровки ВАЦ

Для проверки калибровки используется перемычка. Которая по техническим характеристикам имеет минус 0,5 дБ на данной частоте (рисунок 7.8). Из рисунка 7.8 видно, что значение равняется минус 0.57 дБ.

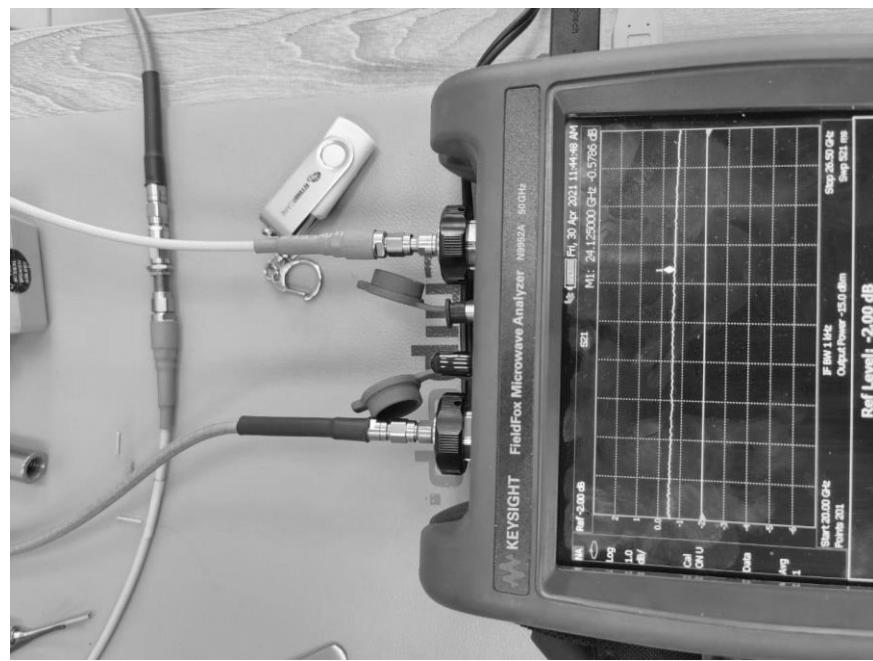


Рисунок 7.8 – Подключение перемычка после калибровки

7.4 Измерение параметров изготовленного образца системы с помощью ВАЦ

После калибровки происходит подключение ВАЦ и ПП с помощью кабельной сборки и переходом с 3.5 мм на SMP через адаптер, который указан на рисунке 7.9.



Рисунок 7.9 – Адаптер для соединения разъемов SMP

Схема подключения для проведения эксперимента указана на рисунке 7.10.

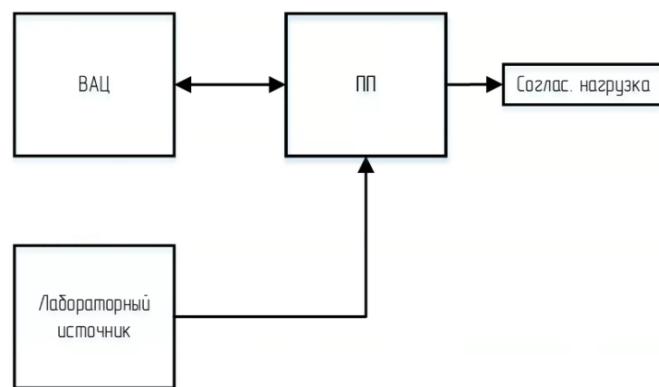


Рисунок 7.10 – Схема измерения КП и КО

На оставшиеся выходные порты плат деления и платы «коммутации» устанавливаются СН.

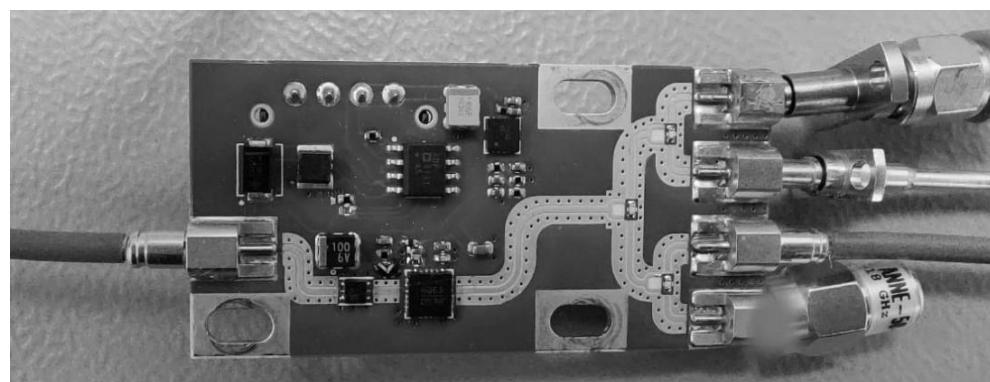


Рисунок 7.11 – Схема подключения для измерения плат деления

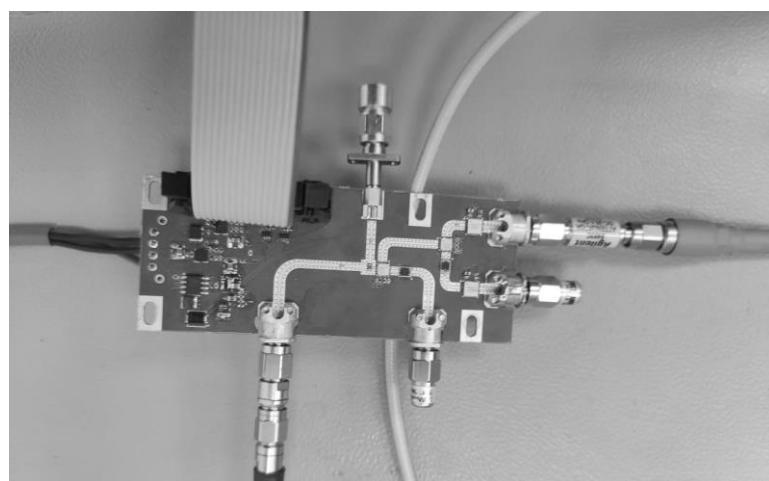


Рисунок 7.12 – Схема подключения для измерения платы «коммутации»

Полученные графики измерения плат «маленького» делителя мощности указаны на рисунках 7.13 – 7.16. Полученные характеристики «большого» делителя мощности, указаны на рисунке 7.17.

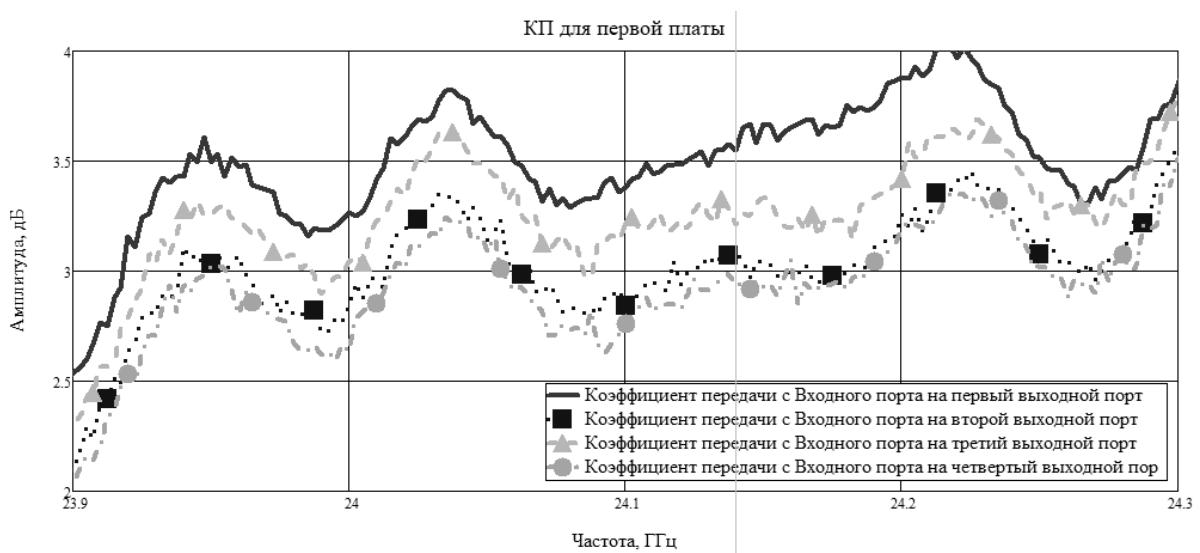


Рисунок 7.13 – Частотная зависимость модуля КП первой платы «маленького» делителя мощности (сплошная линия – S_{21} , квадраты – S_{31} , треугольники – S_{41} , круги – S_{51})

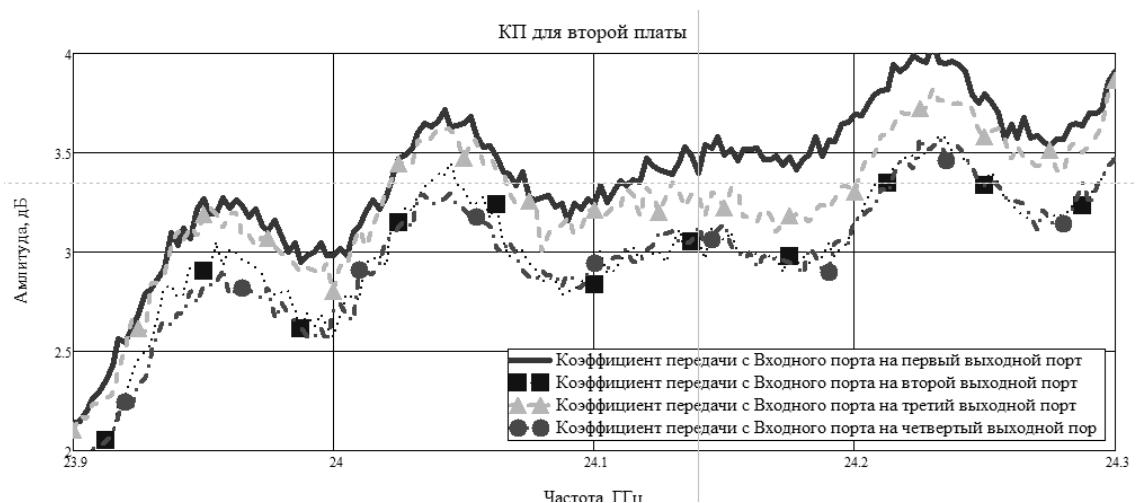


Рисунок 7.14 – Частотная зависимость модуля КП второй платы «маленького» делителя мощности (сплошная линия – S_{21} , квадраты – S_{31} , треугольники – S_{41} , круги – S_{51})

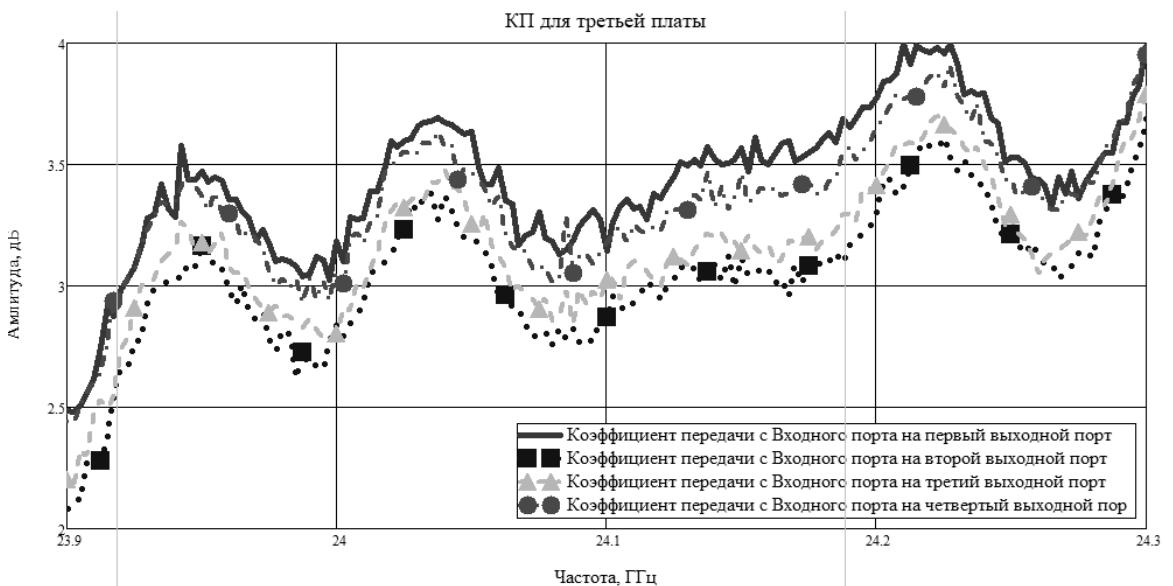


Рисунок 7.15 – Частотная зависимость модуля КП третьей платы «маленького» делителя мощности (сплошная линия – S_{21} , квадраты – S_{31} , треугольники – S_{41} , круги – S_{51})

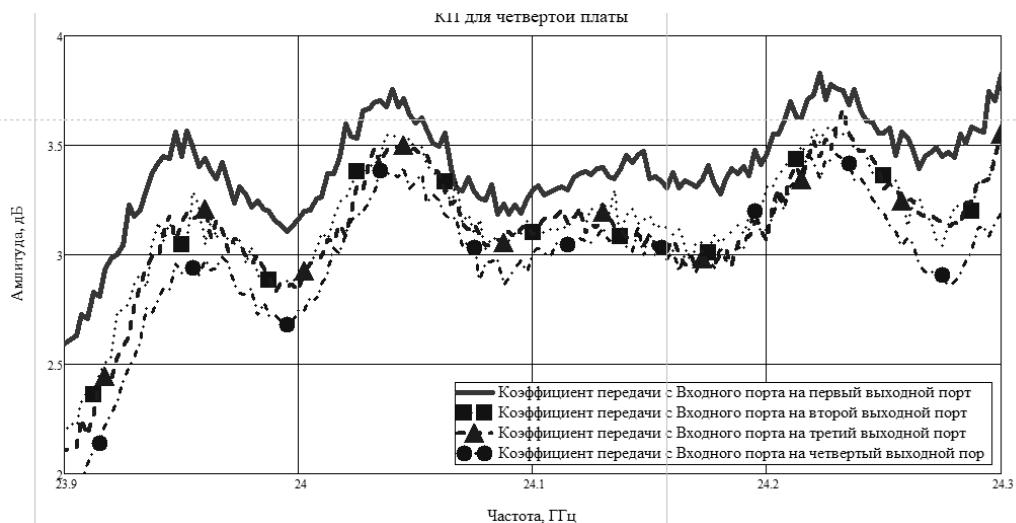


Рисунок 7.16 – Частотная зависимость модуля КП четвертой платы «маленького» делителя мощности (сплошная линия – S_{21} , квадраты – S_{31} , треугольники – S_{41} , круги – S_{51})

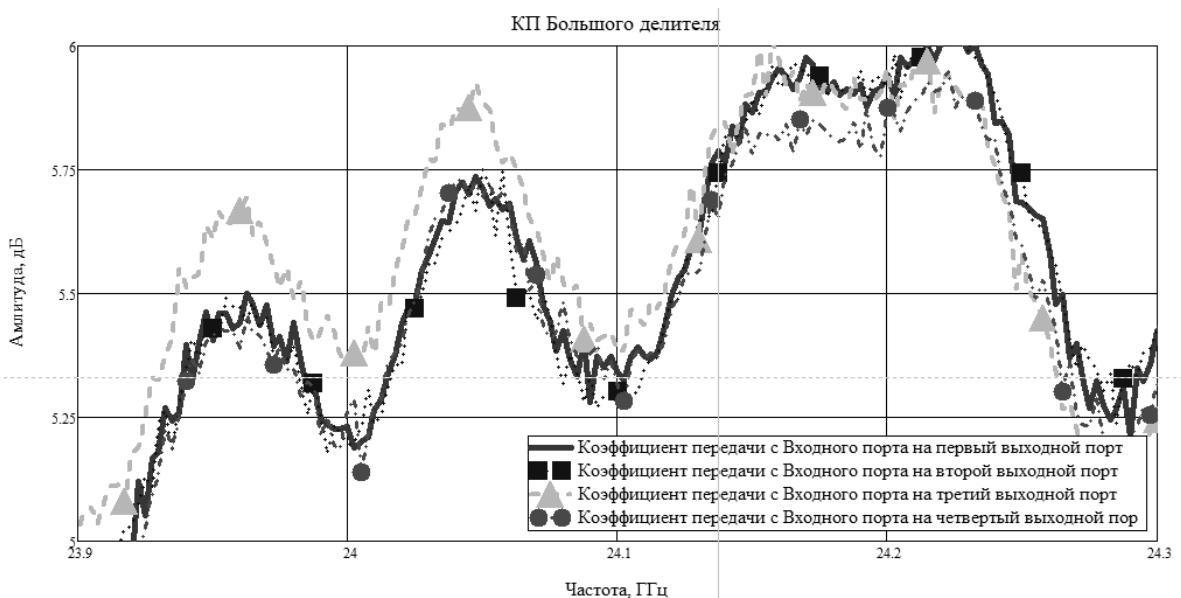


Рисунок 7.17 – Частотная зависимость модулей КП платы «большого» делителя мощности
(сплошная линия – S_{21} , квадраты – S_{31} , треугольники – S_{41} , круги – S_{51})

Графики, полученные после измерения платы «коммутации» при разных положениях ключа указаны на рисунках 7.19 – 7.22.

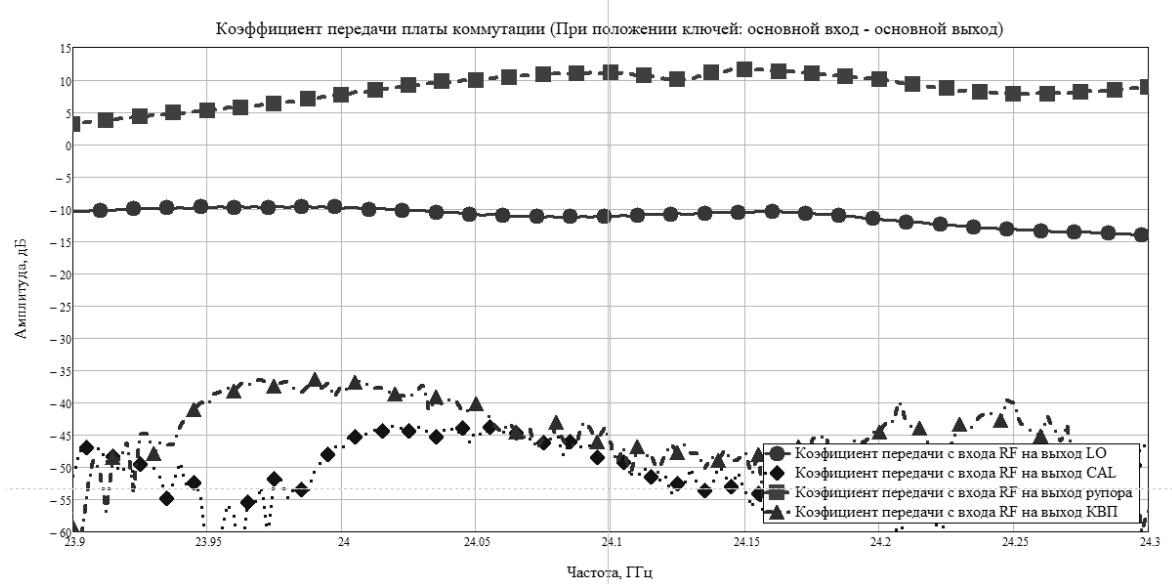


Рисунок 7.18 – Частотная зависимость измеренных КП на разных каналах (круги – с основного входа на выход гетеродина, ромбы – с основного входа на калибровочного вход, квадраты – с основного на выход основного канала, треугольники – с основного входа на выход калибровочного канала)

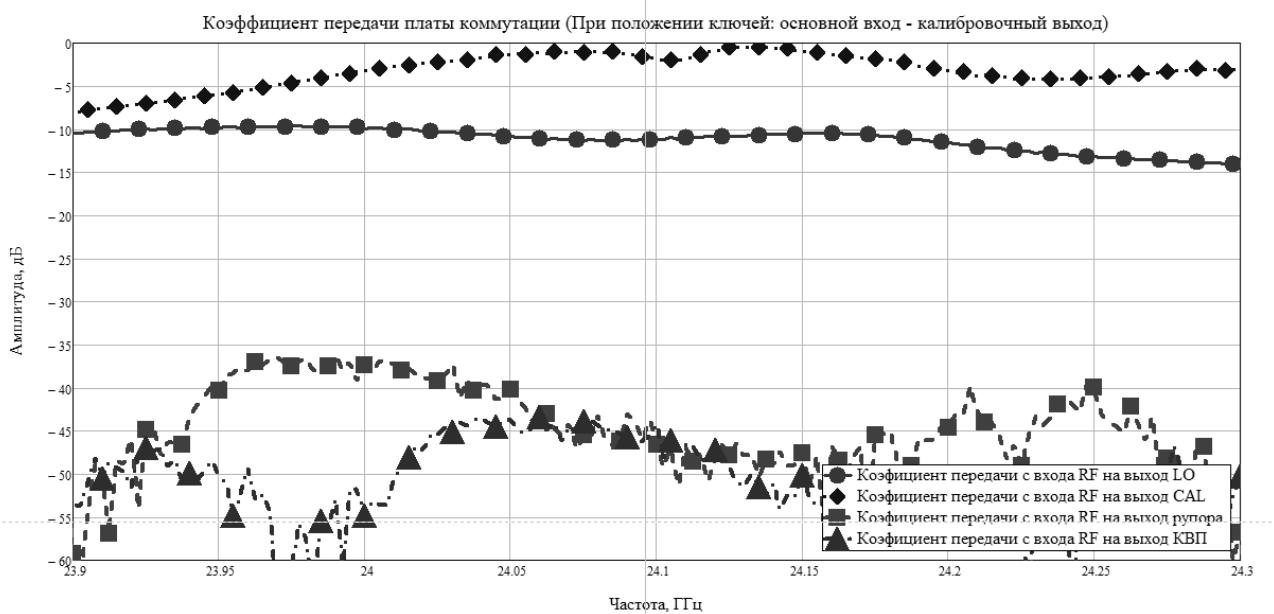


Рисунок 7.19 – Частотные зависимости измеренных КП на разных каналах (круги – с основного входа на выход гетеродина, ромбы – с основного входа на калибровочный вход, квадраты – с основного на выход основного канала, треугольники – с основного входа на выход калибровочного канала)

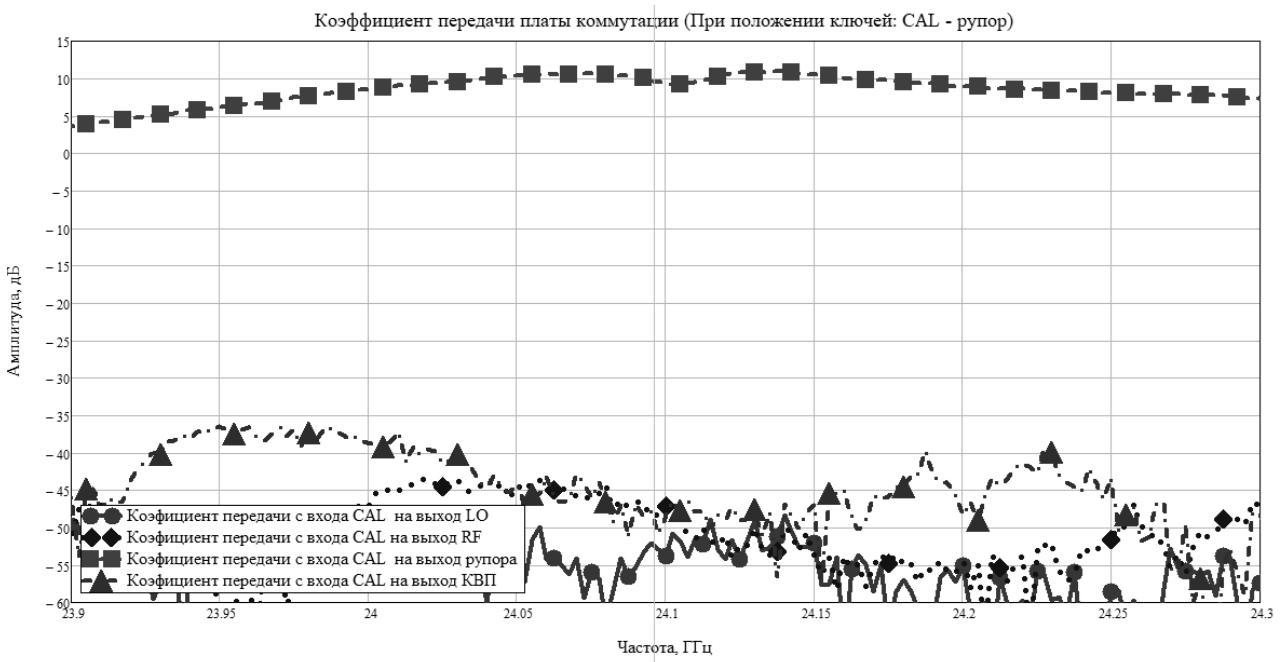


Рисунок 7.20 – Частотные зависимости измеренных КП на разных каналах (круги – с калибровочного входа на выход гетеродина, ромбы – с калибровочного входа на основной вход, квадраты – с калибровочного входа на выход основного канала, треугольники – с калибровочного входа на выход калибровочного канала)

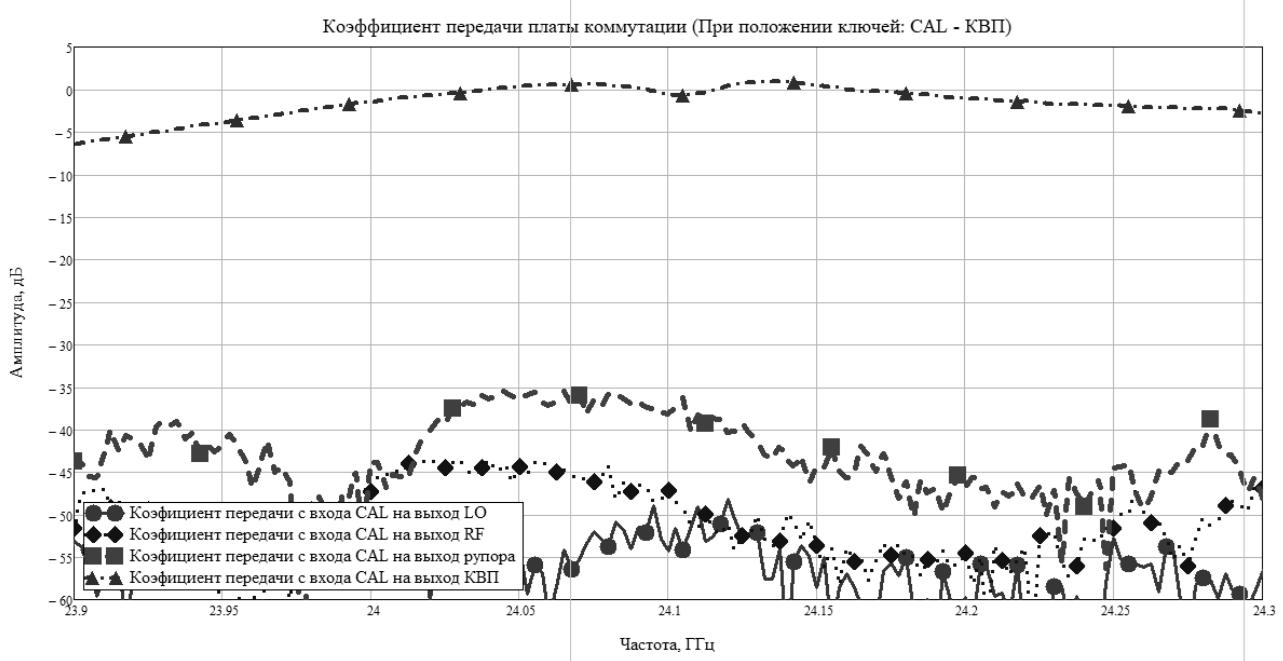


Рисунок 7.21 – Частотные зависимости измеренных КП на разных каналах (круги – с калибровочного входа на выход гетеродина, ромбы – с калибровочного входа на основной вход, квадраты – с калибровочного входа на выход основного канала, треугольники – с калибровочного входа на выход калибровочного канала)

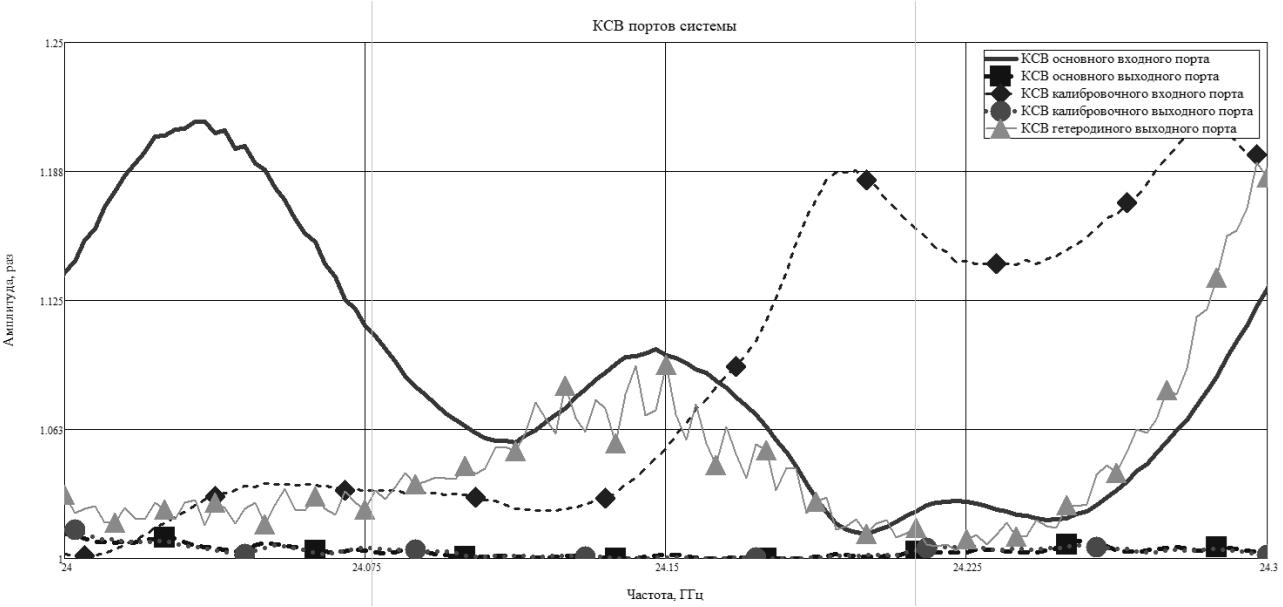


Рисунок 7.22 – Частотная зависимость KCB портов платы «коммутации» (сплошная – основного входного порта, квадраты – основного выходного порта, ромбы – калибровочного входного порта, круги – калибровочного выходного порта, треугольники – порта гетеродина)

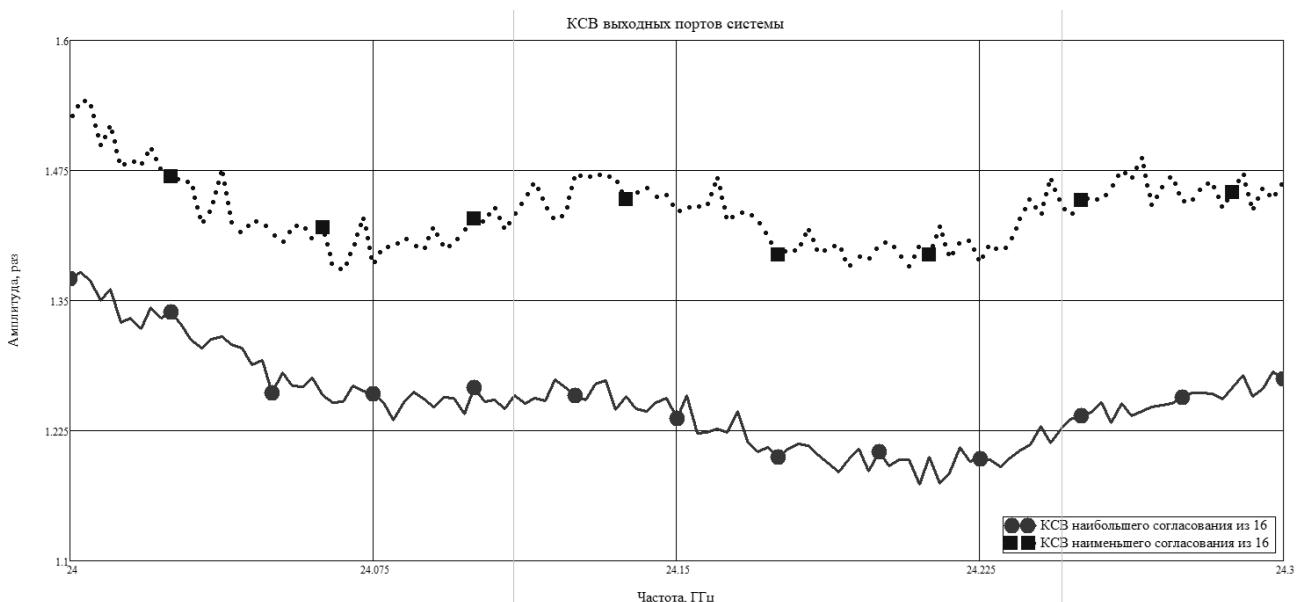


Рисунок 7.23 – Частотные зависимости КСВ выходных портов системы (круги – наибольшее согласование из 16 портов, квадраты – наименьшее согласование из 16 портов)

КСВ получился не выше 2, но даже при этом уровне на рассогласование влияет адаптер SMP, который указан на рисунке 7.9. Данное соединение является ненадежным в плане фиксации, по сравнению с механическим из-за этого повторяемость результатов меньше, чем у механического соединения.

8 Сопоставление результатов моделирования и измерения

После проведения всех экспериментов можно сравнить результаты моделирования и результаты, чтобы можно было сказать на сколько точно были сделаны модели в САПР. На рисунках 8.1 – 5, указаны КП моделированных значений и измеренных значений, при этом выбирались максимальные и минимальные разбросы значения.

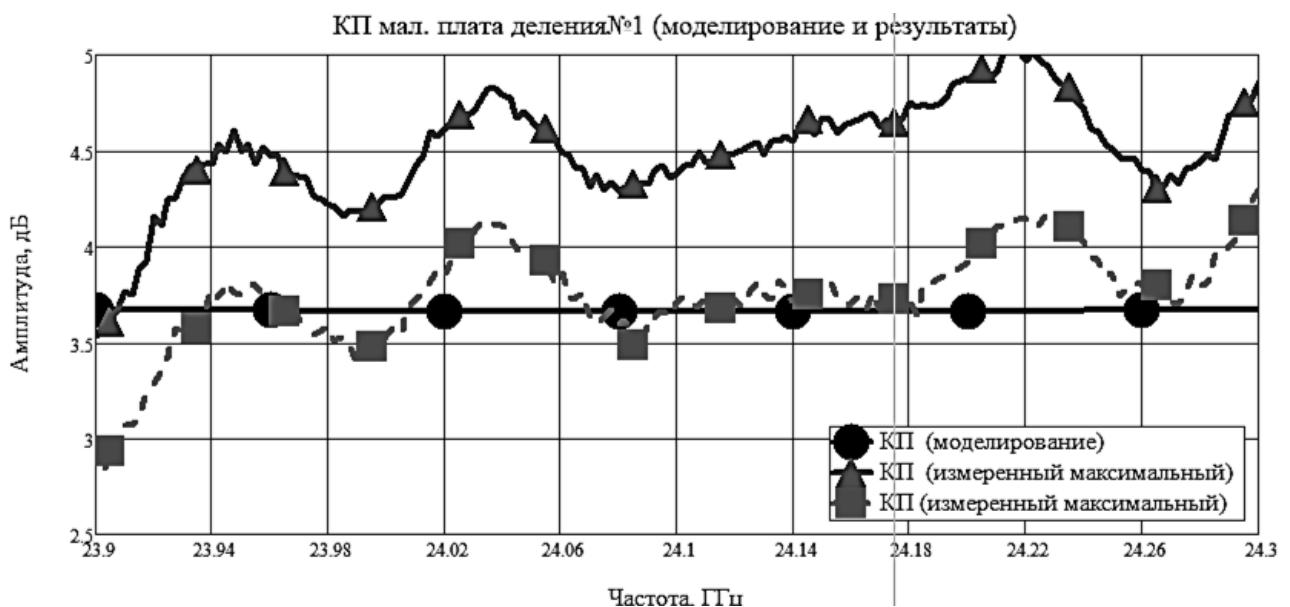


Рисунок 8.1 – Частотные зависимости КП первой «маленькой» платы деления (круги – полученный моделированием, треугольники – максимальное измеренное значение, квадраты – минимальное измеренное значение)

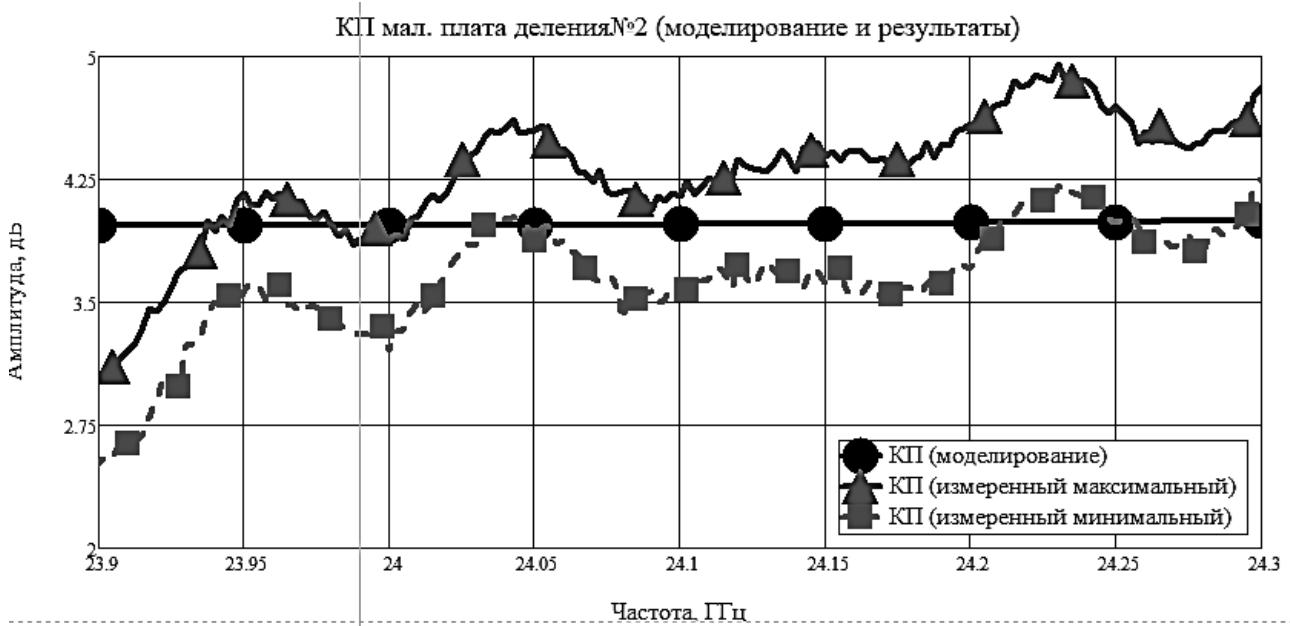


Рисунок 8.2 – Частотные зависимости КП второй «маленькой» платы деления (круги – полученный моделированием, треугольники – максимальное измеренное значение, квадраты – минимальное измеренное значение)

КП мал. платы деления №3 (моделирование и результаты)

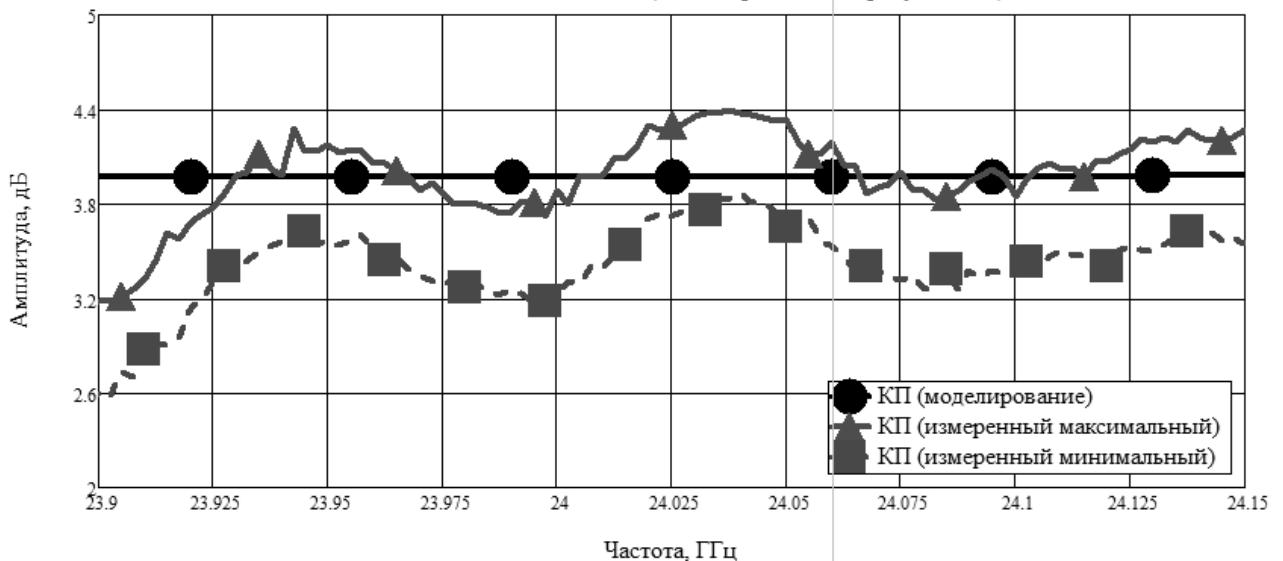


Рисунок 8.3 – Частотные зависимости КП третьей «маленькой» платы деления (круги – полученный моделированием, треугольники – максимальное измеренное значение, квадраты – минимальное измеренное значение)

КП платы деления №4 (моделирование и результаты)

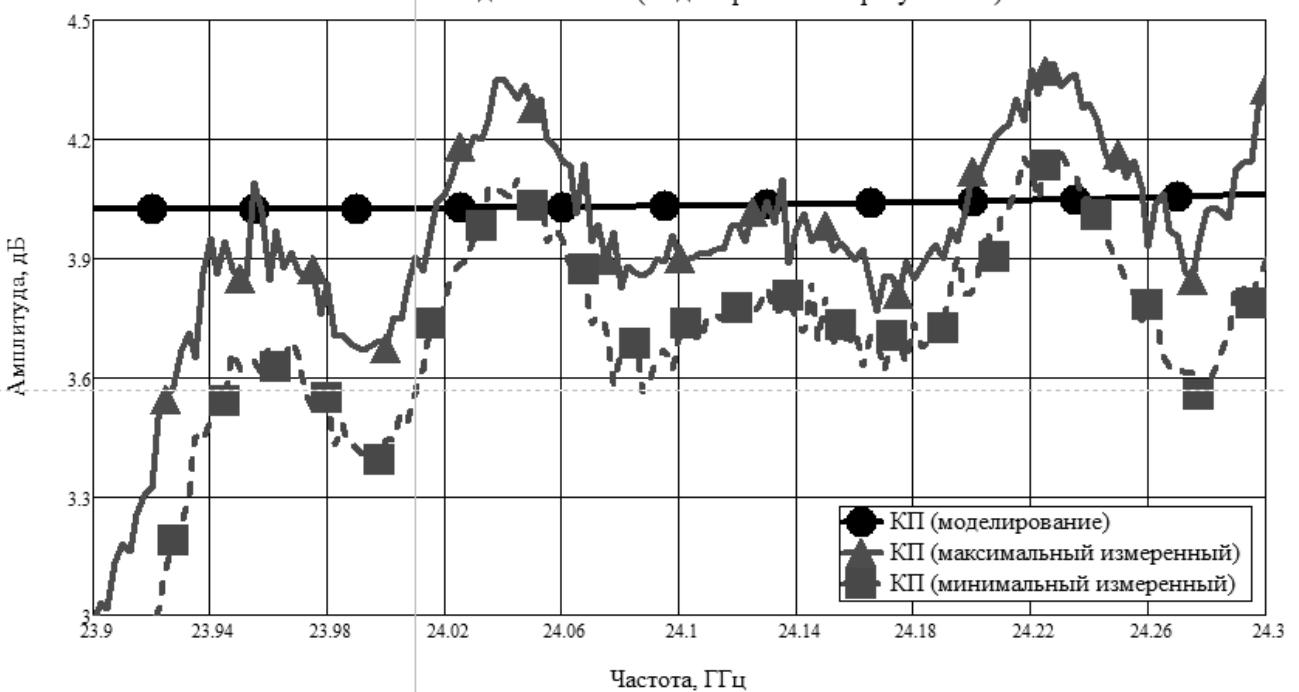


Рисунок 8.4 – Частотные зависимости КП четвертой «маленькой» платы деления (круги – полученный моделированием, треугольники – максимальное измеренное значение, квадраты – минимальное измеренное значение)

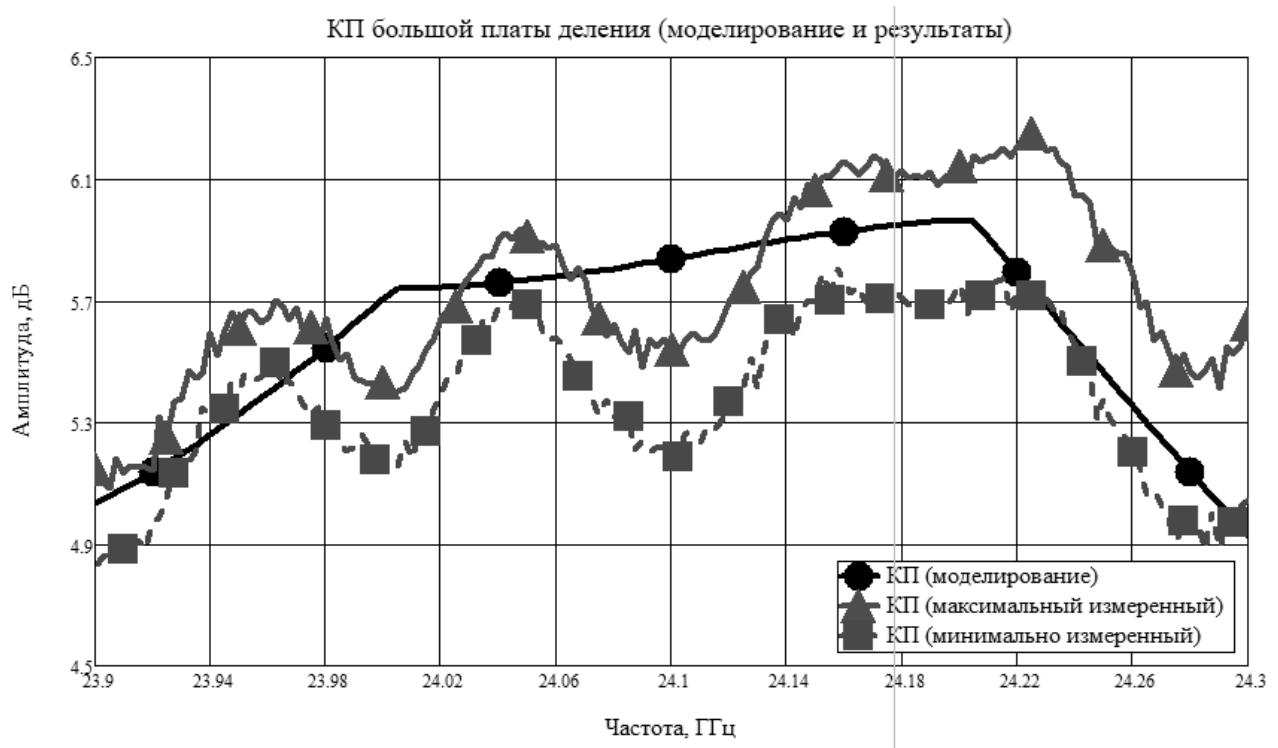


Рисунок 8.5 – Частотные зависимости КП «большой» платы деления (круги – полученный моделированием, треугольники – максимальное измеренное значение, квадраты – минимальное измеренное значение)

Рассмотрев рисунки 8.1 – 8.5, делаются следующие выводы:

- КП с моделирование не сходятся на ± 0.5 дБ, это связано с настройкой отрицательного питания УМ;
- в ЛП передачи есть не однородности, которые связаны с припаиванием компонентов, с производством печатных плат, шероховатостью материала и т.д.

Но даже с этими факторами, моделирование сходится с измерением и имеет хороший результат.

9 Полученные параметры образца системы распределения мощности

В данном разделе будут подводится итоги полученной системы распределения мощности. Для более понятного и комфортного рассмотрения полученных параметров и ТТХ, все значения помещены в таблицу 9.1

Таблица 9.1 – Полученные характеристики системы и ТТХ

Параметр	Пункт ТЗ	ТТХ системы	Параметры системы
Диапазон частот работы системы	5.1	24,125±0,125	24,125±0,200
Вес системы	5.2	Не более 1 кг	По полученным данным от Резонита вес плат составлял 200 грамм. Отсюда вес с компонентами не превышает 1 кг.
Габаритный размер	5.2	ширина 170 мм длинна 170 мм высота 2 мм	ширина 135 мм длинна 111 мм высота 1.2 мм
Количество входных портов и тип входных портов (подаваемая мощность 10 дБ)	5.3 5.4	2 входных порта, разъемом типа 3,5 мм	2 входных порта, разъемом типа 3,5 мм
Переключение между входными портами и выходными портами системы	5.6 5.17	Осуществление переключения с основного на калибровочный, входной и выходной, порт и обратно.	Осуществляется переключения с основного на калибровочный, входной и выходной, порт и обратно
Уровень сигнал с калибровочного порта на выходах к смесителю	5.7	менее минус 30 дБ	Находится в пределах от минус 38 дБ до минус 42 дБ (зависит от номера выхода)
Параметры переключателя	5.8	Изоляция между портами переключения более 25 дБ	Изоляция между портами у переключателя HMC547 равняется 34 дБ

Продолжение таблицы 9.1

Параметр	Пункт ТЗ	TTX системы	Параметры системы
Управление переключателя	5.9	Переключению с помощью напряжений	Переключение переключателя HMC547 производится с помощью напряжений (+5В, 0 В)
Разъем для сигналов переключения	5.10	Реализовать на отдельном разъеме	Реализован через разъем IDSC-16
Время переключения переключателя	5.11	Время переключения не более 15 нс	Время переключения HMC547 равняется 3 нс
УМ с построенным усилением	5.12	УМ должен иметь регулируемый КУ	HMC863 имеет регулировку КУ, с помощью изменения напряжения смещения затвора (V_g)
Выходные порты (количество и тип разъема)	5.13 5.14	Должно быть реализовано два выходных порта: основной и калибровочный. С типом разъема 3,5 мм	Реализована два выходных порта с разъемом типа 3,5 мм
КП с основного входного порта на выход основного порта	5.15	КП должен быть не менее 5 дБ	КП равен 10 дБ При входной мощности 10 дБ, мощность на выходе основного порта будет равно 20 дБ
Мощность на выходе калибровочного порта	5.16	Мощность на выходе калибровочного порта не менее минус 6 дБ.	КП с основного порта на выход калибровочного порта составляет 0 дБ При подаче 10 дБ на основной ход, мощность на выходе калибровочного порта составит 10 дБ На столько большая мощность не нужна на

Продолжение таблицы 9.1

			выходе калибровочного порта, из-за этого меняются аттенюаторы с повышенным значением аттенюации
Разделение мощности	5.18	Мощность с основного порта должна подводится к 16 смесителям	Реализовано деление входной мощности, из основного порта, на 16 выходных порта.
Мощность подводимая к смесителям	5.19	Мощность должна быть в пределах от 0 до 10 дБ	KП платы «коммутации» с основного входного порта составляет находится в диапазоне от минус 10 до минус 11 дБ KП «большой» платы деления находится в диапазоне от 5.6 дБ до 6.4 дБ KП «маленькой» платы деления находится в диапазоне от 3.5 дБ до 4.5 дБ При подводимой мощности 10 дБ, мощность на выходе имеет диапазон от 8.1 дБ до 9.9 дБ
Используемый тип разъема для подведения мощности к смесителям	5.20	Тип разъема SMP	Разъем для подводимой мощности к смесителями использовался SMP
Постоянное напряжение на портах системы	5.21	На всех выходах и входах системы не должно присутствовать постоянное напряжение	На всех портах системы нету постоянного напряжения из-за использования разделительных конденсаторов в разрыв ЛП. Были использованы УМ с

Продолжение таблицы 9.1

			интегрированными разделительными конденсаторами
Отверстия для крепления системы	5.22	Реализованы отверстия для удобного крепления системы	На каждой ПП сделаны отверстия для последующего удобного крепления системы
Ограничение по потребляемому напряжению	5.23	Не более +12 В	Потребляемое напряжение составляет от +5 В до 6.5 В
Потребление	5.24	Не более 15 Вт	При включении всех элементов системы потребляемая мощность составляет 13.98 Вт

Из таблицы 9.1 видно то, что система реализована с полным соблюдением ТТХ. Так же отмечается что в данные параметры системы могут изменяться за счёт:

- припаивания аттенюаторов с большим или меньшим коэффициентом затухания;
- использования КМП от других производителей с лучшими характеристиками в данном частотном диапазоне;
- изменения КУ усилителя, с помощью напряжение смещения затвора.

10 Заключение

В ходе работы были использованы теоретические и практические знания в области СВЧ-радиотехники, а также навыки работы в системе автоматизированного проектирования EMPro и AWR. Усовершенствованы навыки в программной среде Altium Designer. Проделана большая работа по моделированию и разводки печатной платы. Использованы знания работы с приборами от *Keysight Technologies*, которые помогают в анализе работы СВЧ-устройств.

В ходе бакалаврской работы была создана модель системы распределения мощности СВЧ диапазона, создана топология системы, а также проведен эксперимент по измерению параметров системы. Был произведен подбор компонентов для реализации системы, которые будут удовлетворять ТТХ системы.

В имеющемся САПР был произведен расчёт: ДМ Уилкинсона двуплечего и четырёхплечевого, плат деления и платы «коммутации». Созданы модели: SMD резистора, разъемы СВЧ, компоненты СВЧ тракта.

В программной среде Altium Designe была проведена работа: по созданию цепей питания, по создание схемы СВЧ тракта, по созданию топологического представления плат системы распределения мощности.

С помощью приборов *Keysight Technologies* были получены такие характеристики системы: коэффициент отражения, коэффициент передачи, коэффициент стоячей волны, потребление тока и напряжения.

В результате была разработана модель и изготовлен экспериментальный образец системы распределения мощности СВЧ диапазона, с двумя входными портами и двумя выходными портами для излучающих антенн, но и также было произведено деление мощности для подводки её к 16 смесителям. Диапазон работы данной системы составляет $24,125 \pm 0,125$ ГГц, значение КСВ на портах не превышает 1.5. Значение КП на основном выходе равняется 9.5 ± 0.5 дБ, значение КП на калибровочном выходе равняется минус 0.5 ± 0.5 дБ. Значение мощности подводимая к смесителям варьируется в диапазоне от 8.1 до 9.9 дБ.

Данная система будет использована в распределения мощности от гетеродина к излучаемым антеннам и смесителям многоканального приемника ЦАР радара СВЧ диапазона и калибровки системы.

Таким образом все задачи технического задания полностью выполнены, а работа выполнена в соответствии с ОС ТУСУР 01-2013 [42].

Сокращения, обозначения, термины и определения

- АЦП – Аналогово-цифровые преобразователи
- ВАЦ – Векторный анализатор цепей
- ДМ – Делитель мощности
- ЕСКД – Единая система конструкторской документации
- КМП – Коаксиально-микрополоскового переход
- КО – Коэффициент отражения
- КП – Коэффициент передачи
- КСВ – Коэффициент стоячей волны
- КУ – Коэффициент усиления
- НО – Направленный ответвитель
- ПЗ – Пояснительная записка
- ПЛИС – Программируемая логическая интегральная схема
- ПО – Программное обеспечение
- ПП – Печатная плата
- САПР – Система автоматизированного проектирования
- СВЧ – Сверхвысокие частоты
- СН – Согласованная нагрузка
- ТЗ – Техническое задание
- ТТХ – Требуемые технические характеристики
- ТХ – Технические характеристики
- УМ – Усилитель мощности
- ФС – Функциональная схема
- ЦАР – Цифровая антенная решетка

Список используемой литературы

- 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ УИЛКИНСОНА [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30290470_67480142.pdf (дата обращения: 10.06.2021)
- 2 Разработка микрополоскового делителя мощности и делителя мощности на копланарных волноводах: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.intermerra.ru/files/docs/8.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 3 Технологические возможности производства [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://www.rezonit.ru/directory/tekhnologicheskie-osobennosti-proizvodstva/?active_tab=base_materials&type\[\]](https://www.rezonit.ru/directory/tekhnologicheskie-osobennosti-proizvodstva/?active_tab=base_materials&type[])=urgent (дата обращения: 10.06.2021)
- 4 RO4350BTM Laminates [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 5 Transmission Line Design Handbook (Artech House Antennas and Propagation Library) by Brian C. Wadell - PDF Drive [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.pdfdrive.com/transmission-line-design-handbook-artech-house-antennas-and-propagation-library-e185121637.html> (дата обращения: 10.06.2021)
- 6 HMC547ALC3 (v01.0317) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc547Alc3.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 7 HMC863ALC4 (v02.0118) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc863alc4.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 8 hmc652lp2-hmc655lp2 (v02.0112) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc652lp2-hmc655lp2.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 9 High Frequency (Up to 40 GHz) Resistor, Thin Film Surface Mount Chip [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/60093/fcseries.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 10 LT3029 Dual 500mA/500mA Low Dropout, Low Noise, Micropower Linear Regulator [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3029fb.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)

- 11 LT3045 (Rev. C) [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt3045.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 12 LT3093 (Rev. 0) [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt3093.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 13 ADM7171 (Rev. E) [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adm7171.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 14 TPS60403 data sheet, product information and support | TI.com [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.ti.com/product/TPS60403#product-details##features> (дата обращения: 10.06.2021)
- 15 Переходы коаксиально-микрополосковые — Микран [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.micran.ru/upload/iblock/74d/Переходы%20коаксиально-микрополосковые%20ПКМ1-32%20и%20ПКМ1-50.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 16 19S202-40ML5-NM [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<https://ru.mouser.com/datasheet/2/704/19S202-40ML5-NM-1854643.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 17 2696609.pdf [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<http://www.farnell.com/datasheets/2696609.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 18 DOC000274136.pdf [Электронный ресурс]. - Режим доступа:
<https://static.chipdip.ru/lib/274/DOC000274136.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 19 Electronic Components | HOME | Murata Manufacturing Co., Ltd. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.murata.com/en-eu/products> (дата обращения: 10.06.2021)
- 20 Фатеев, А. В. Микроволновая техника: Лабораторный практикум [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8228/download> (дата обращения: 10.06.2021)
- 21 Читать бесплатно книгу "Основы компьютерного моделирования в САПР EMPro" - Н. Н. Кисель [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://avidreaders.ru/read-book/osnovy-kompyuternogo-modelirovaniya-v-sapr-empro.html> (дата обращения: 10.06.2021)
- 22 Системы автоматизированного проектирования Keysight EEsof [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.intermera.ru/files/docs/5989-7568RURU.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)

23 Технология изготовления печатных плат: учебное пособие [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/30870/1/978-5-7996-1380-8.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)

24 ГОСТ 2.417-91 ЕСКД. Платы печатные. Правила выполнения чертежей. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200006934> (дата обращения: 10.06.2021)

25 ГОСТ 2.702-75(2000) ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. [Электронный ресурс]. - Режим доступа <https://docs.cntd.ru/document/1200008442> (дата обращения: 10.06.2021)

26 ГОСТ 2.709 - Система обозначения цепей в электрических схемах. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200004560> (дата обращения: 10.06.2021)

27 ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001985> (дата обращения: 10.06.2021)

28 ГОСТ 2.728-74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200006616> (дата обращения: 10.06.2021)

29 ГОСТ 2.747-68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200010867> (дата обращения: 10.06.2021)

30 Altium Designer - цикл статей Владимира Прановича / Евроинтех - решения для производства электроники [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.eurointech.ru/education/selftraining/altium_designer/ (дата обращения: 10.06.2021)

31 Самоучитель по Altium Designer (Уроки в формате видео) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://4creates.com/training/228-uroki-altium-designer.html> (дата обращения: 10.06.2021)

32 Лопаткин А. Проектирование печатных плат в системе Altium Designer (2-е издание) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://radiohata.ru/textbook/3734-proektirovaniye-pechatnyh-plat-v-sisteme-altium-designer-2-e-izdanie.html> (дата обращения: 10.06.2021)

33 page1.EPS [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/144/DOC000144313.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)

34 IRFML8244PbF.pmd [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/300/DOC000300476.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)

- 35 NC7WZ04 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/641/DOC001641721.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 36 СВЧ печатные платы РЕЗОНИТ. Срочное производство в России от 3 рабочих дней. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.rezonit.ru/pcb/svch-pechatnye-platy/> (дата обращения: 10.06.2021)
- 37 Опыт экспертов РЕЗОНИТ для проектировщика печатных плат [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.rezonit.ru/directory/v-pomoshch-konstruktoru/> (дата обращения: 10.06.2021)
- 38 Методы измерений на СВЧ Том 1 Е.В. Андронов, Г.Н. Глазов ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИЗМЕРЕНИЙ НА СВЧ Томск УДК 621.385.6: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://os.x-pdf.ru/20radiotekhnika/462446-1-metodi-izmereniy-svch-tom-andronov-glazov-teoreticheskiy-apparat.php> (дата обращения: 10.06.2021)
- 39 FieldFox Handheld RF and Microwave Analyzers | Keysight [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/network-analyzers/fieldfox-handheld-rf-microwave-analyzers.html> (дата обращения: 10.06.2021)
- 40 AN49-016.pdf [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.minicircuits.com/app/AN49-016.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 41 Модули электронной калибровки (ECal) для векторных анализаторов цепей [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06783/technical-overviews/5963-3743.pdf> (дата обращения: 10.06.2021)
- 42 Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления - База нормативных документов ТУСУРа [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/documents/70> (дата обращения: 10.06.2021)