

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

## **Методические указания к выполнению курсовому проекту**

**По курсу  
«Моделирование СВЧ-устройств в САПР»**

Москва, Зеленоград

2024

## Оглавление

Оглавление .....	2
Введение .....	3
Информация о задании .....	3
Порядок оценивания .....	4
Рекомендации к поиску элементной базы .....	4
Пример подбора ЭКБ и составления структурной схемы ячейки .....	5
Системная модель передающей многоканальной ячейки .....	6
Системная модель приемной ячейки с детектированием сигнала .....	12
Моделирование отдельных компонентов с учетом их моделей .....	22
Выбор ВЧ-подложки .....	23
Импорт полосковых устройств .....	24
Предусилитель HMC608LC4 .....	26
Аттенюатор TGL2616-SM (пример деэмбединга) .....	34
Фазовращатель TGP2109-SM .....	50
Усилитель TGA2624-CP .....	56
Подсхема детектора мощности LTC5596 с направленным ответвителем .....	59
Подсхема ключа VSW2-33-10W+ .....	63
Общее моделирование .....	70
Общая предварительная схема .....	70
Правка общей схемы на топологическом уровне .....	72
Перенос изменений в топологии в схемное представление общей схемы .....	78
Моделирование при переборе состояний .....	79
Требования и типовой состав отчета .....	83
Типовой состав презентации .....	88
Литература .....	90
Приложение 1. Нелинейные параметры компонентов .....	92
Приложение 2. Титульный лист .....	94

## **Введение**

**Цель работы:** освоить порядок расчета и моделирования ВЧ-канала ячейки с применением Keysight Advanced Design System.

**Используемое оборудование или ПО:** материал подготовлен с использованием версии Keysight Advanced Design System 2023.

**Продолжительность работы:** 24 ак.часа

Приведены рекомендации по поэтапному выполнению курсовой работы, а также требования к отчету. Основные этапы описаны на типовых примерах. Подробно описываются только новые по отношению к выполненным лабораторным работам приемы работы в ADS.

## **Информация о задании**

Курсовой проект выполняется как самостоятельная работа с применением САПР Keysight Advanced Design System (ADS), а также других, доступных студенту. Преподавателем выдается техническое задание (ТЗ) на ячейку, для которой необходимо подобрать основную ВЧ-элементную базу и провести моделирование, показывающее, что выбранная ВЧ-элементная база позволяет спроектировать ячейку, выполняющую ТЗ.

Выполненный курсовой проект будет служить основой для выполнения курсовой работы в 7 семестре по дисциплине «Проектирование печатных плат», поэтому необходимо сохранить проект в ADS (через инструмент «Портфолио») и также подготовить отчет в электронной форме (в pdf, передается преподавателю через инструмент «Портфолио»).

Варианты задания обновляются ежегодно индивидуально для каждого студента.

Курсовой проект состоит из следующих этапов:

1. Поиск ВЧ-компонентов.
2. Построение системной модели.
3. Проектирование полосковых устройств.
4. Индивидуальное согласование для отдельных компонентов
5. Построение общей совместной модели.
6. Публичная защита проекта.

Выдача задания на 1 (2) неделе обучения.

Одно очное занятие выделено для начального подбора компонентов. Дальнейшее проектирование выполняется самостоятельно.

## **Порядок оценивания**

За весь курсовой проект выставляется до 100 баллов в зависимости от качества выполнения. Должны быть решены следующие задачи – выбрана структурная схема, выбрана элементная база, подготовлена модель и приведены результаты моделирования, подтверждающее выполнение ТЗ, пройдена защита проекта. Преподавателю передается проект в ADS и отчет.

*При оценивании преподаватель ориентируется на соответствие следующим критериям:*

- Корректно выбрана структурная схема устройства
- Обоснованный выбор основной элементной базы
- Моделирование ВЧ-трактов проектируемого устройства подтверждает выполнение ТЗ
- В отчете представлены все этапы проектирования и моделирования
- В докладе достаточно подробно представлено выполнение проекта

## **Рекомендации к поиску элементной базы**

1. Перед началом поиска элементной базы необходимо продумать исходную структуру ячейки исходя из ТЗ.

2. Поиск ВЧ-компонентов стоит осуществлять по сайтам известных производителей элементной ВЧ-базы (Analog Devices, Qorvo, Mini-Circuits, Skyworks, Broadcom, Texas Instruments, NXP Semiconductors, MACOM, United Monolithic Semiconductors, Integrated Device Technology и пр.) или с помощью сайтов-агрегаторов-продавцов (globalspec.com, everythingrf.com, digikey.com, mouser.com и пр.).

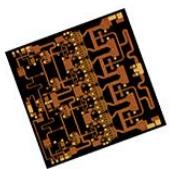
3. Необходимо помнить, что ТЗ на коэффициент усиления ( $K_p$ ), коэффициент шума ( $N_f$ ) и точку однодецибелевой компрессии ( $P_{1dBout}$ ) даются на весь канал в рабочей полосе, а не только на усилительную часть, т.е. выбирать усилители необходимо с учетом потерь на всех остальных компонентах, также не забывать про оценочные потери в микрополосках.

4. У всего полученного канала  $N_f$  может быть сильно лучше заданного в ТЗ.  $P_{1dBout}$  лучше не более чем +1..+5 дБ от ТЗ, иначе мощные усилители работают впустую. Для  $K_p$  допустимо превышение над ТЗ не более чем на 3 дБ во всей рабочей частоте.

5. При подборе компонентов лучше начинать либо с тех компонентов, параметры которых уже известны (например, в ТЗ есть требования на фильтр, т.е. уже понятны его характеристики) или с редких компонентов (например, есть только один подходящий фазовращатель). Их параметры дальнейшем, скорее всего, не будут меняться, т.е. можно зафиксировать требования на остальные части канала.

6. Компоненты надо выбирать в виде корпусированных микросхем (которые можно паять), а не бескорпусных чипов (которые надо разваривать). У

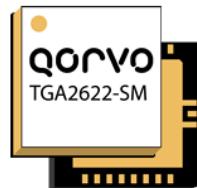
производителя обычно есть как корпусированные, так и некорпусированные (могут обозначаться как die либо в имени компонента нет суффикса, показывающего тип корпуса) версии одного ВЧ-компонентта.



Некорпусированный  
усилитель TGA2622  
(кристалл)



Корпусированный  
усилитель TGA2622-CP  
(корпус на фланце)



Корпусированный  
усилитель TGA2622-SM  
(корпус QFN)

7. Также, при возможности, лучше брать компоненты с более простой рекомендованной схемой включения, питания и управления (но это при прочих равных).

8. Для каждого из выбранных компонентов стоит выкачивать и складывать к себе в рабочую папку всю доступную документацию по найденным компонентам. Как правило, это:

- листок производителя (даташит) – основной документ, в котором описаны основные параметры компонента, графики, условия применения, тип корпуса, иногда приведены типовые схемы включения, варианты исполнения на продажу и пр.;
- модель, для ВЧ это обычно S-параметры, иногда могут присутствовать и нелинейные модели (SPICE, X-параметры и пр.);
- описание корпуса по номенклатуре производителя;
- информация о тестовой плате (evaluation board), также отдельно может быть набор gerber-файлов этой платы;
- примеры применения в различных устройствах;
- информация по режимам пайки и надежности;
- файл УГО и посадочного места для топологических САПР.

Для нас основными являются даташит и модель, если их нет в свободном доступе, то рассматривать такие компоненты нельзя, мы не сможем использовать такие компоненты при моделировании.

### Пример подбора ЭКБ и составления структурной схемы ячейки

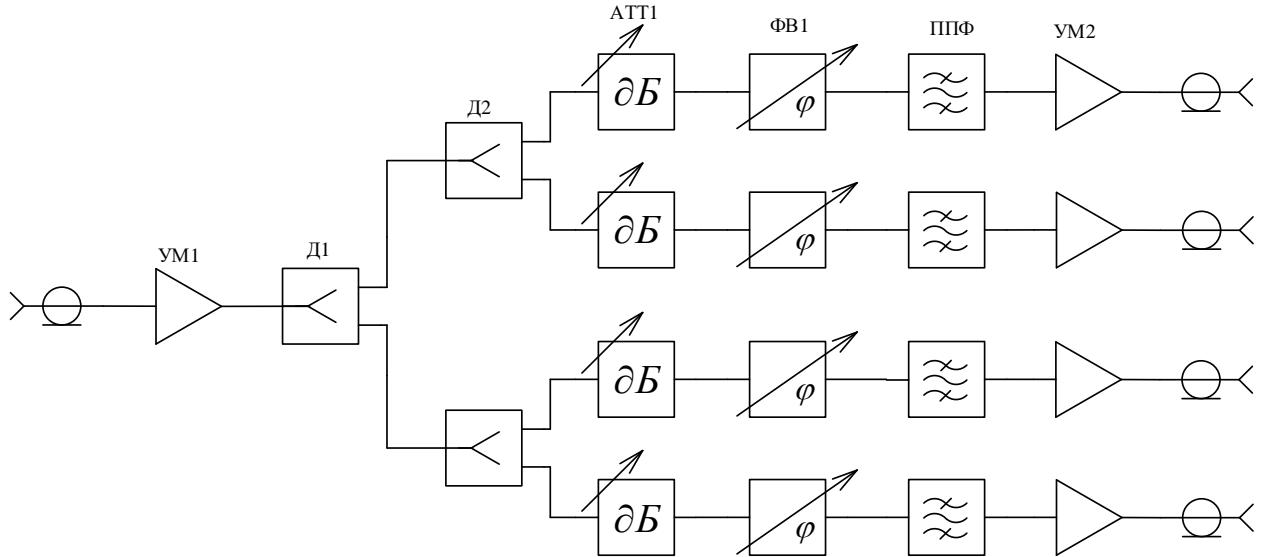
Приведены два примера – передающая четырехканальная ячейка с фильтрацией в соседних каналах и с управлением фазовым сдвигом и усилением в отдельных каналах и двухканальная приемная ячейка с фильтрацией, управляемым фазовым сдвигом, с детектированием принимаемого сигнала и с защитой от кратковременного входного импульса большой мощности.

## Системная модель передающей многоканальной ячейки

Пусть, необходимо спроектировать четырехканальную передающую ячейку на 9,5 ГГц с рабочей полосой по уровню  $-3$  дБ в  $\pm 300$  МГц. Коэффициент передачи каждого канала не менее 46 дБ, точка однодецибелевой компрессии каждого канала по выходу не менее чем +36 дБмВт, каждый канал должен иметь возможность изменять коэффициент передачи в диапазоне не менее 22 дБ меньше номинального, с шагом не более 1 дБ; в каждом канале должен быть предусмотрен фазовращатель с точностью установки фазы не более  $6^\circ$ .

Полосы запирания 8,0..8,5 ГГц и 10,5..11,0 ГГц с уровнем запирания не менее 30 дБ от уровня рабочей полосы.

Базовая структура предполагается следующая:



При проектировании однонаправленных ВЧ-устройств (однозначный вход и однозначный выход) при рисовании структурной схемы лучше придерживаться правила «слева входы, справа выходы, в одну горизонталь». Таким образом, схема становится читаемой.

Фильтр в передающей ячейке служит для подавления выходной мощности в соседних частотных каналах (чтобы не мешать соседям).

Определим компоненты.

Сначала зафиксируем приблизительные свойства пассивных полосковых устройств:

- В качестве делителей ( $D_1, D_2$ ) в таких ячейках принято брать кольцевые развязанные делители, они имеют потери  $\sim 3,1..3,5$  дБ в рабочей полосе и порядка -25...-35 дБ развязки.

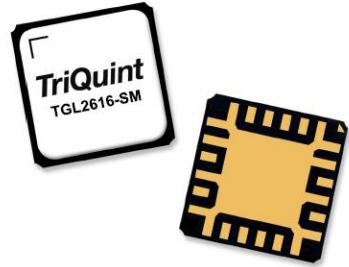
- Фильтр будет спроектирован отдельно как полосковое устройство. Для центральной частоты 9,5 ГГц можно заложиться на потери порядка 4 дБ.

Далее нужно выбрать те компоненты, которые более редкие.

Пройдемся по доступным аттенюаторам. Основное требование - возможность изменять коэффициент передачи в диапазоне не менее 22 дБ меньше номинального

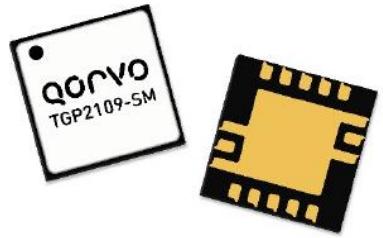
и рабочий диапазон частот  $9,5 \pm 0,3$  ГГц. Кроме того, он должен иметь наименьшие потери на проход (insertion loss), разумный уровень однодецибелевой компрессии (P1dB), простую схему питания и управления. Аттенюаторов не так и много, остановимся на TGL2616-SM [11] со следующими свойствами.

<i>Аттенюатор TGL2616-SM</i>
<i>Диапазон рабочих частот 10 – 20 ГГц</i>
<i>Число разрядов 5</i>
<i>Диапазон ослабления 23,25 дБ</i>
<i>Шаг ослабления 0,75 дБ</i>
<i>Вносимые потери 4,8 дБ</i>
<i>Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по выходу 36 дБмВт</i>
<i>Напряжение управления: 3,3-5 В</i>
<i>Корпус SMT 4,0x4,0x1,47мм</i>



Перейдем к фазовращателю. Основное требование - точность установки фазы не менее  $6^\circ$ , это соответствует 6 битам управления; и рабочий диапазон частот  $9,5 \pm 0,3$  ГГц. Кроме того, он должен иметь наименьшие потери на проход (insertion loss), разумный уровень однодецибелевой компрессии P1dB, простую схему питания и управления. Фазовращателей, как и аттенюаторов, не так и много, остановимся на TGP2109-SM [12] со следующими свойствами.

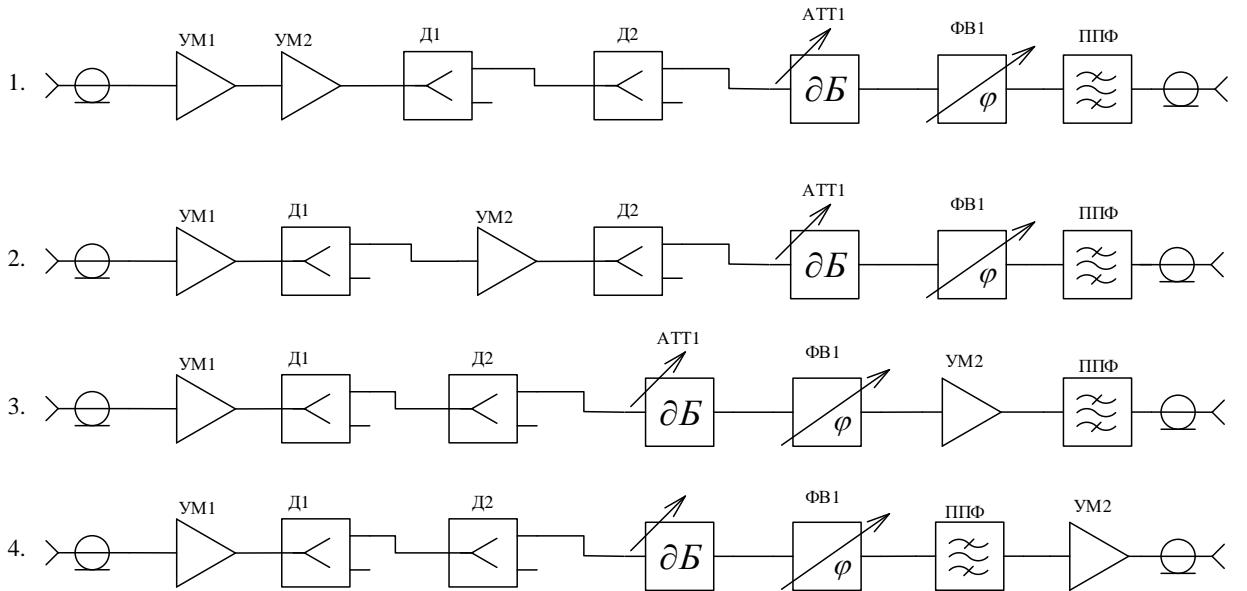
<i>Фазовращатель TGP2109-SM</i>
<i>Диапазон рабочих частот 8 – 12 ГГц</i>
<i>Число разрядов 6</i>
<i>Дискрет фазы 5,625°</i>
<i>Вносимые потери 6 дБ</i>
<i>Точна однодецибелевой компрессии по выходу 29 дБмВт</i>
<i>Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по выходу 40 дБмВт</i>
<i>Напряжение управления: 0/5 В</i>
<i>Корпус QFN 4,0x4,0x1,64мм</i>



Нужно определиться с усилителем мощности, который в основном обеспечивает точку однодецибелевой компрессии. Начинать стоит с выходного УМ2.

Для эффективной работы (КПД по питанию) нужно выбирать выходной усилитель мощности с точной однодецибелевой компрессии немного ( $+1..3$  дБ) выше, чем задана по ТЗ, естественно с запасом на потери на все идущее после выходного усилителя.

В пределах одного канала устройства с потерями вносят порядка 19 дБ потерь. Соответственно, все усилители должны в сумме давать не менее, чем  $46 + 19 = 65$  дБ усиления. Это большая цифра, в одной микросхеме так вряд ли будет. Очевидно, придется разбивать на каскады. Возможно предложить несколько вариантов (показан один канал).



Первые два варианта хороши тем, что уменьшается общее число усилителей, но они не подходят, т.к. аттенюатор и фазовращатель не в состоянии обеспечить точку выходную однодецибелевой компрессии +36 дБмВт (они просто столько мощности не пропускают). Третий вариант не очень хорош тем, что мощный выходной усилитель будет работать вхолостую, т.к. выходной фильтр как устройство с потерями (до 4 дБ у нас) значительно ухудшает нелинейные параметры ячейки. Поэтому разумным компромиссом является установка фильтра до выходного усилителя мощности (четвертый вариант).

Таким образом, остановимся на четвертом варианте и на выходе каждого канала будем ставить мощный усилитель мощности. Его подбираем по его точке однодецибелевой компрессии. С точки зрения эффективности по питанию она не должна сильно превышать требуемую точку однодецибелевой компрессии на весь канал. Остановимся на выходном усилителе TGA2624-CP [13] со следующими параметрами.

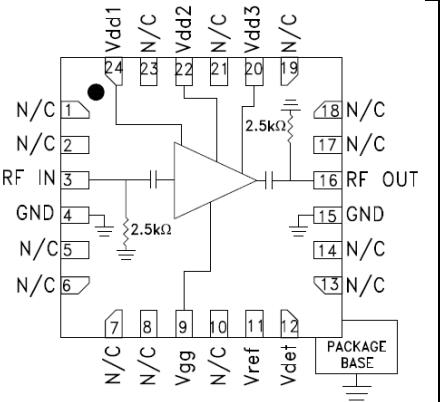
<p>Усилитель мощности TGA2624-CP          Диапазон рабочих частот 9 – 10 ГГц          Коэффициент усиления 36,5 дБ          Мощность насыщения 42,5 дБмВт          Напряжение питания 28 В          Ток потребления 365 мА          Корпус на фланце 15,2x15,2x3,5мм</p>	
--	--



Нелинейность у этого усилителя задана через мощность насыщения, оценочно по графикам из даташита, можно считать, что точка однодецибелевой компрессии по выходу ~39 дБмВт.

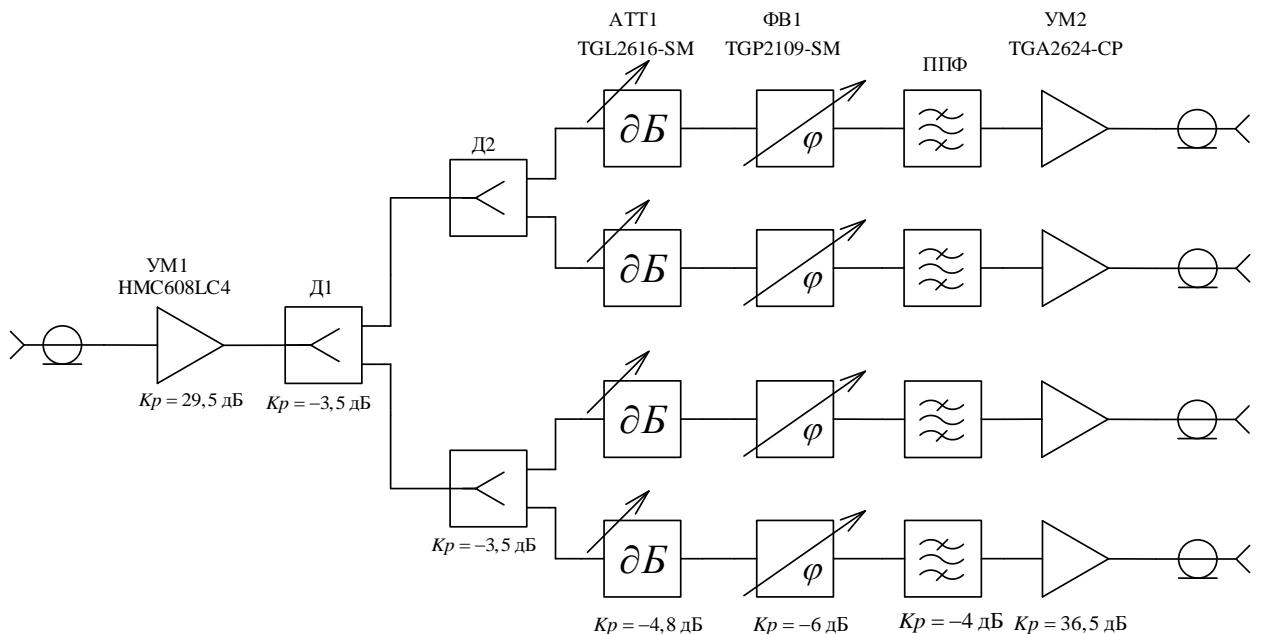
Осталось подобрать входной предусилитель УМ1. У него усиление должно быть не менее, чем  $65 - 36,5 = 28,5$  дБ. Возьмем HMC608LC4 [14].

Усилитель мощности HMC608LC4  
 Диапазон рабочих частот 9,5 – 11,5 ГГц  
 Коэффициент усиления 29,5 дБ  
 Точна однодецибелевой компрессии по выходу  
 27 дБмВт  
 Уровень интермодуляционных искажений  
 третьего порядка по выходу 33 дБмВт  
 Напряжение питания 5 В  
 Ток потребления 310 мА  
 Корпус QFN 4,0x4,0 мм



Расчет точки однодецибелевой компрессии каскадного соединения устройств по формулам сложен, проверять будем при системном моделировании.

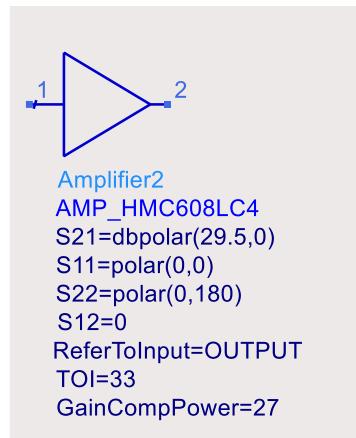
Рисуем финальную структурную схему. На ее основе будем проводить моделирование.



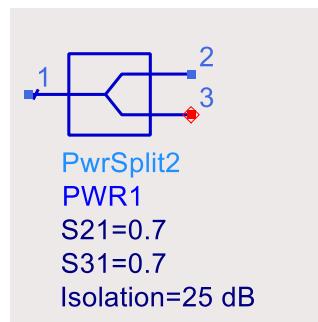
Переходим к построению системной модели передающего тракта.

На этом этапе считается, что все компоненты идеально согласованы, ВЧ-подложка еще не выбрана, и расчет канала ведется только по основным параметрам с использованием имитационных моделей. Для моделирования будем использовать следующие имитационные модели:

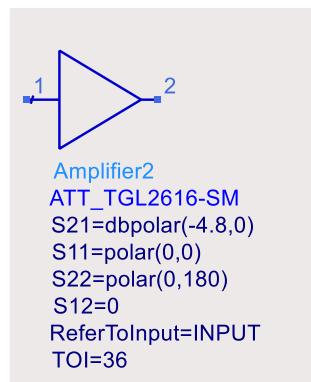
**Предусилитель HMC608LC4.** Задаем только коэффициент усиления и параметры нелинейности в блоке типа Amplifier2.



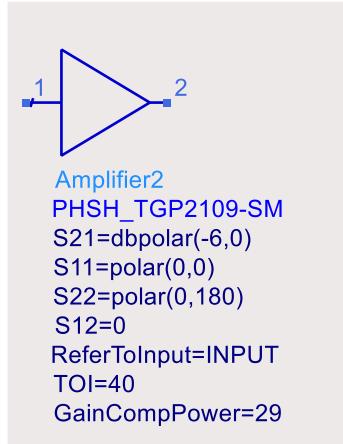
**Кольцевой развязанный делитель.** Используем блок типа PwrSplit2 – это модель делителя пополам. Этим блоком мы пользуемся, т.к. на текущий этап еще не выбрана ВЧ-подложка и не спроектированы полосковые устройства. В будущем ее надо будет заменить на полноценное полосковое устройство. Зададим ей развязку 25 дБ (характерное значение для кольцевого развязанного делителя), коэффициент передачи в плечи S21 и S31 выбран 0,7 вместо 0,707 чтобы внести некоторые потери.



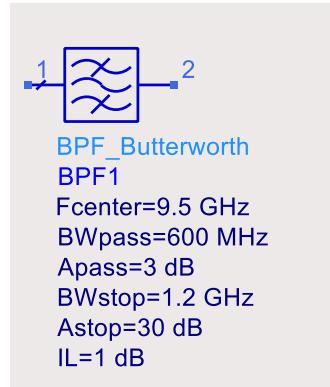
**Аттенюатор TGL2616-SM.** У нас канал передающий и необходимо задать свойства нелинейности. У встроенного в ADS блока Attenuator таких свойств нет, поэтому воспользуемся блоком типа Amplifier2. В качестве коэффициента S21 укажем потери на проход в состоянии 0 (Insertion Loss). Также обратим внимание, что IP3 задан относительно входа (изменено свойство ReferToInput). Точка однодецибелевой компрессии не задана.



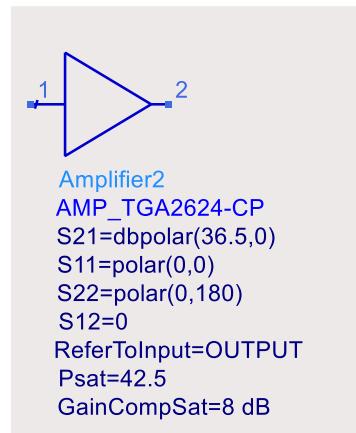
**Фазовращатель TGP2109-SM.** Аналогично с аттенюатором, воспользуемся блоком типа Amplifier2 вместо PhaseShiftSML для задания нелинейности. Также обратим внимание, что IP3 и P1dB заданы относительно входа.



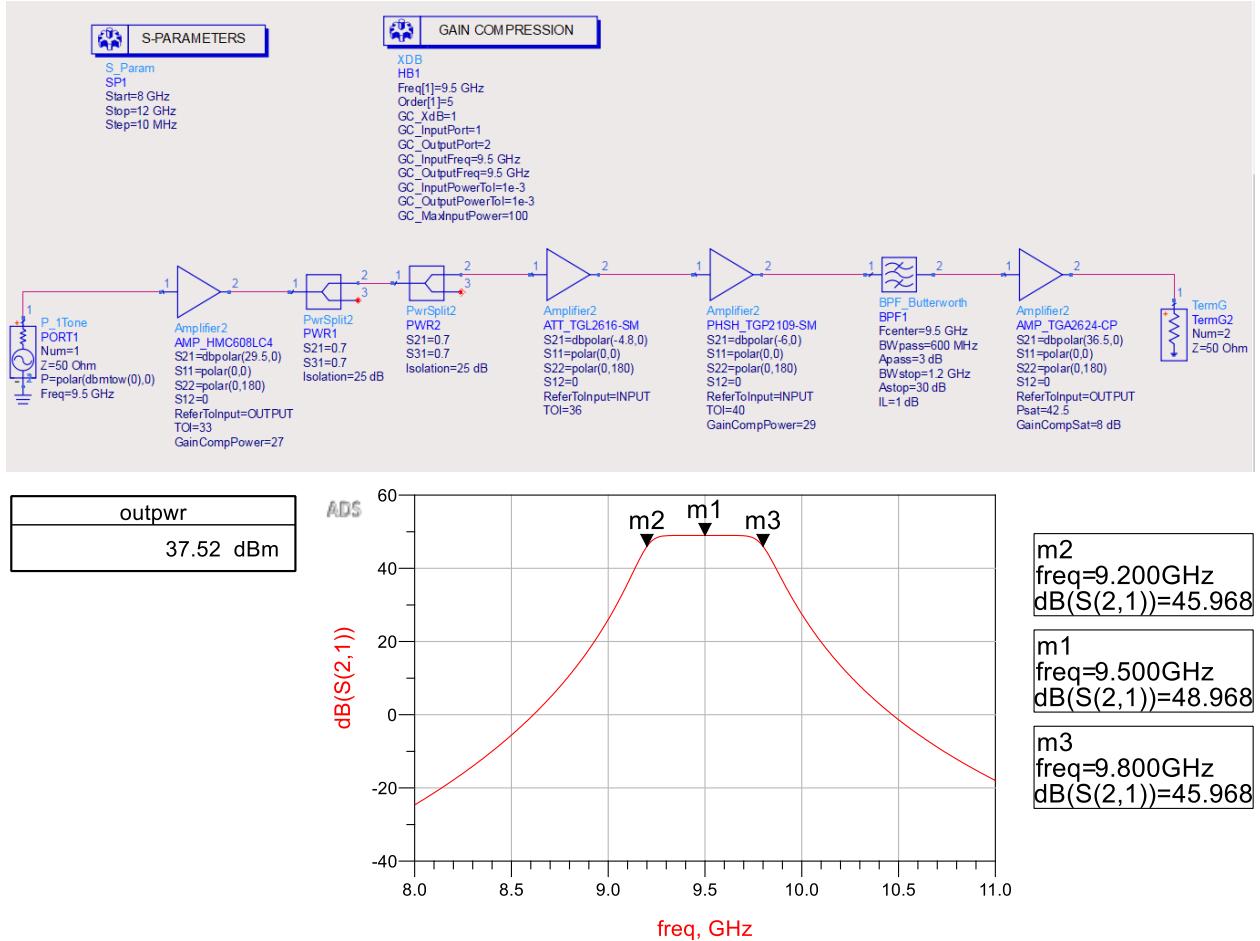
**Полосно-пропускающий фильтр.** Воспользуемся имитационной моделью BPF\_Butterworth. В ней зададим желаемые частотные свойства канала. Заложенные нами потери в 4 дБ складываются из требований на полосу пропускания Apass и дополнительных потерь IL. При этом надо понимать, если удастся сделать фильтр с меньшими потерями и меньшей неравномерностью в полосе, то оценку потерь на фильтре можно будет ослабить.



**Выходной усилитель TGA2624-CP.** Его нелинейные параметры заданы через мощность насыщения.



Для оценки коэффициента передачи будем использовать режим симуляции S\_Param. Для оценки точки однодецибельной компрессии – XDB. Для оценки этих параметров достаточно одного канала.



После системного моделирования видно, что требования на коэффициент передачи и точку однодецибельной компрессии выполняются. Можно переходить к проектированию с учетом S-параметров компонентов и проектированию полосковых устройств.

### Системная модель приемной ячейки с детектированием сигнала

Покажем на примере двухканальной приемной ячейки с фильтрацией, управляемым фазовым сдвигом, с детектированием принимаемого сигнала и с защитой от кратковременного входного импульса большой мощности. Конкретизируем требования:

- центральная частота 7,7 ГГц;
- рабочая полоса по уровню -3 дБ не менее ±200 МГц;
- коэффициент усиления в рабочей полосе не менее 36 дБ;
- диапазоны запирания по уровню не менее 32 дБ 7..7,2 Гц и 8,2..9 ГГц;
- эквивалентный коэффициент шума одного канала не более 2,2 дБ;
- защита от кратковременного импульса большой мощности 20 Вт;
- детектирование уровней входной мощности диапазона -60..-40 дБмВт;
- точность установки фазового сдвига не более 6°.

Под эквивалентным коэффициентом шума подразумевается коэффициент шума одного канала, при этом на делителях (сумматорах) при расчете берутся только их потери сверх 3 дБ (обычно 0,1..0,5 дБ).

При этом требования на коэффициент передачи и вообще форму АЧХ заданы при наличии всех каналов (по определению S-параметров).

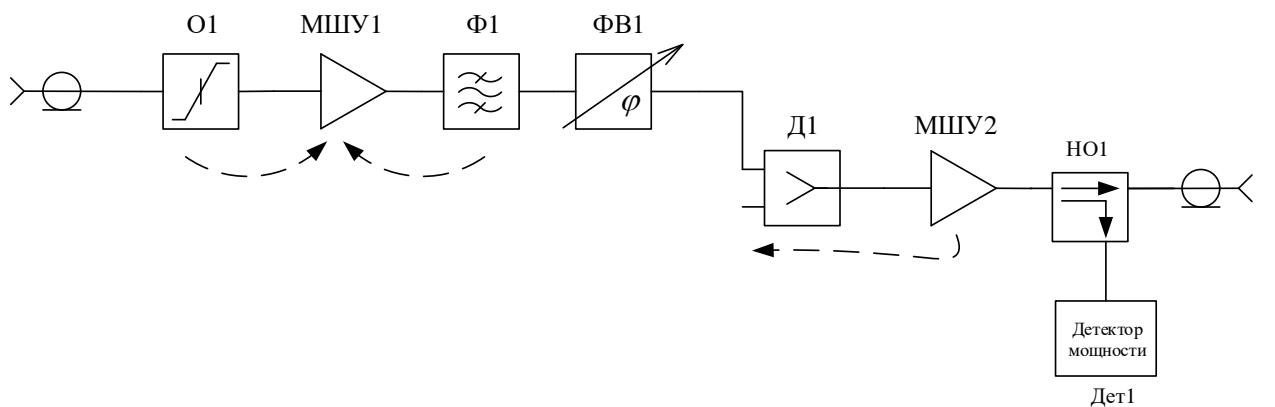
Защиту от кратковременного импульса большой мощности можно обеспечить с помощью ограничителя ВЧ-сигнала. Их часто выполняют на основе p-i-n-диодов. Основные интересующие параметры – это потери в линейном режиме и уровень пропускаемой мощности в насыщении.

Для пассивных устройств надо помнить, что их коэффициент шума равен их потерям.

Направленный ответвитель нужен для ответвления некоторого малого уровня мощности на детектор мощности. Переходное ослабление направленного ответвителя конкретизируется по результатам системного моделирования исходя из того, какой диапазон измеряемых мощностей способен принять выбранный детектор мощности.

Надо понимать, что по линейному коэффициенту передачи порядок компонентов не важен. А вот для коэффициента шума – важен, т.к. при каскадном соединении четырёхполюсников наибольший вклад в общий коэффициент шума вносит первое устройство. Вклад последующих устройств идет с учетом коэффициента передачи предыдущего участка цепи.

Таким образом, можно предложить следующую базовую структурную схему:



При этом пунктирными линиями показаны возможные изменения этой схемы.  
Поясним:

- Ограничитель (O1) защищает всю схему от кратковременного импульса большой мощности. Но он имеет потери, которые прямо добавляются к коэффициенту шума ячейки, скомпенсировать их никак нельзя. Т.е. если ячейка никак не проходит по коэффициенту шума и виноват в этом ограничитель, то придется жертвовать первым МШУ1 (лишать его защиты от кратковременного импульса большой мощности) иставить ограничитель после него.

- Взаимное положение фильтра и первого МШУ1 так же имеет значение. В идеале если ячейка проходит по коэффициенту шума, то лучше ставить фильтр

перед всеми активными устройствами, т.к. в этом случае в МШУ1 не попадают сигналы из соседних диапазонов, что может приводить в интермодуляционным искажениям из-за перегруза от соседних частотных каналов. Но если по коэффициенту шума ячейка не проходит, то придется ставить МШУ1 до фильтра.

- Положение последующих малошумящих усилителей (обобщённо назовём их МШУ2, хотя это может быть несколько каскадных усилителей) также определяется исходя из коэффициента шума. С точки зрения коэффициента шума, чем ближе к первому МШУ1 стоит МШУ2, то тем меньше будет суммарный коэффициент шума. Например, если МШУ2 поставить до фазовращателя ФВ1 (у которого большие потери), то коэффициент шума еще уменьшится. Но с другой стороны, если поставить МШУ2 после сумматора, то МШУ2 надо будет ставить один вместо двух в параллельных каналах.

При выборе ЭКБ для приемных устройств, как и для передающих, лучше всего сначала определиться с теми, свойства которых или уже зафиксированы, или более редкие.

В качестве сумматора будет использован кольцевой развязанный делитель Д1. Он имеет характерные потери 3,1..3,5 дБ. При этом для моделирования эквивалентного коэффициента шума будем брать только потери сверх 3 дБ, т.е. 0,1..0,5 дБ.

Переходное ослабление направленного ответвителя НО1 на текущем этапе не известно, но рабочее ослабление можно принять равным 0,5 дБ.

Для фильтра Ф1 заложимся на потери 4 дБ.

Для обеспечения защиты от кратковременного импульса большой мощности надо подобрать ограничитель, работающий в нужном диапазоне частот, имеющий наименьшие потери на проход (insertion loss), выдерживающий не менее заданных импульсных 20 Вт по входу и пропускающий сквозь себя разумный уровень мощности, не сжигающий последующие устройства. Остановимся на TGL22-09-SM [15] со следующими свойствами:

*Ограничитель мощности TGL2209-SM*

*Диапазон рабочих частот 8 – 12 ГГц*

*Вносимые потери <0,5 дБ*

*Уровень выдерживаемой импульсной мощности 50 Вт*

*Уровень проходящей мощности <18,5 дБмВт*

*Корпус QFN 4,0x4,0x1,54мм*



Первым МШУ1 выберем имеющим минимальный коэффициент шума при максимальном коэффициенте усиления. Остановимся на CMD309P4 [16].

*Малошумящий усилитель CMD309P4*

*Диапазон рабочих частот 5 – 11 ГГц*

*Коэффициент усиления 27 дБ*

*Коэффициент шума 1,5 дБ*

*Точка однодецибелевой компрессии по выходу 13 дБмВт*

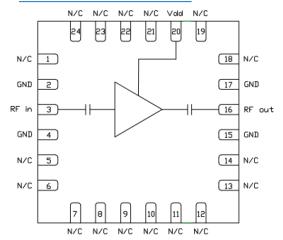
*Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по выходу 24 дБмВт*

*Максимальная допустимая входная мощность 20 дБмВт*

*Напряжение питания 4 В*

*Ток потребления 45 мА*

*Корпус QFN 4,0x4,0мм*



Перейдем к фазовращателю. Основное требование - точность установки фазы не менее  $6^\circ$ , это соответствует 6 битам управления; и рабочий диапазон частот  $7,7 \pm 0,2$  ГГц. Кроме того, он должен иметь наименьшие потери на проход (insertion loss), разумный уровень однодецибелевой компрессии P1dB, простую схему питания и управления. Также имеет значение максимальная допустимая входная мощность. Фазовращателей, не так и много, остановимся на TGP2105-SM [18] со следующими свойствами.

*Фазовращатель TGP2105-SM*

*Диапазон рабочих частот 6 – 18 ГГц*

*Число разрядов 6*

*Дискрет фазы  $5,625^\circ$*

*Вносимые потери 8 дБ*

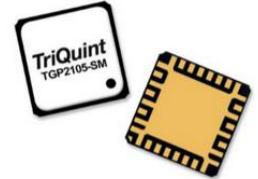
*Точна однодецибелевой компрессии по входу 25 дБмВт*

*Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по входу 41 дБмВт*

*Максимальная допустимая входная мощность 30 дБмВт*

*Напряжение управления: 0/5 В*

*Корпус QFN 5,0x5,0x1,45мм*



С учетом всех потерь для получения коэффициента передачи ячейки нужно на втором МШУ иметь коэффициент усиления не меньше 24 дБ. Остановимся на CMD157P3 [17].

*Малошумящий усилитель CMD157P3*

*Диапазон рабочих частот 6 – 18 ГГц*

*Коэффициент усиления 26 дБ*

*Коэффициент шума 1,8 дБ*

*Точка однодецибелевой компрессии по выходу 11 дБмВт*

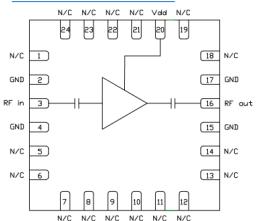
*Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по выходу 24 дБмВт*

*Максимальная допустимая входная мощность 20 дБмВт*

*Напряжение питания 3 В*

*Ток потребления 52 мА*

*Корпус QFN 3,0x3,0мм*



Для контроля мощности будем использовать детектор мощности LTC5596 [19].

*Детектор мощности LTC5596*

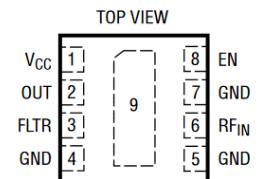
*Диапазон рабочих частот 0,1 – 40 ГГц*

*Диапазон измеряемых мощностей -35 ..0 дБмВт*

*Напряжение питания 3,3 В*

*Ток потребления 30 мА*

*Корпус DFN 2,0x2,0мм*



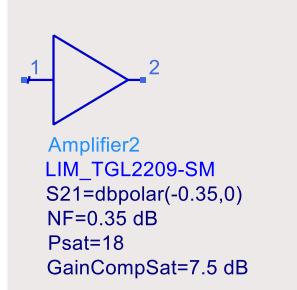
Далее соберем схемы для анализа нашего выбора.

В текущей задаче, несмотря на то, что моделируется приемная ячейка, все равно надо задавать свойства нелинейности для решения двух проблем:

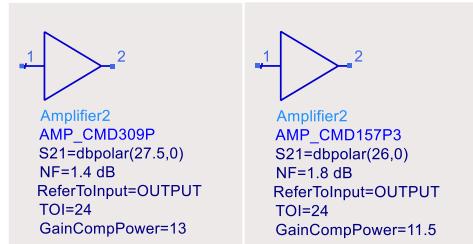
- определения способности схемы защищаться от кратковременного импульса большой мощности;
- определения того, что все компоненты работают в линейном режиме при заданных уровнях входного сигнала.

Для моделирования ограничителя, малошумящего усилителя и фазовращателя будем использовать имитационную модель Amplifier2 (т.к. в ней есть все необходимые свойства нелинейности).

**Ограничитель TGL2209-SM.** У него по документации в линейном режиме на интересующей частоте 7,7 ГГц потери порядка 0,35 дБ. Эти потери также нужно задавать в свойство NF (коэффициент шума). Отдельно нужно задать насыщение – полка равна 18 дБмВт при компрессии порядка 7,5 дБ.



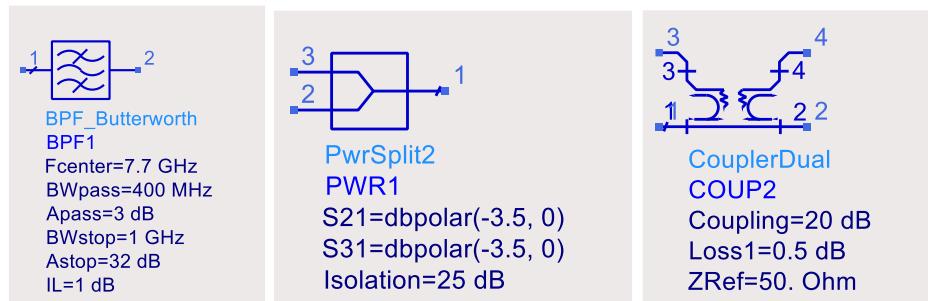
**Малошумящие усилители CMD309P и CMD157P3** задаются стандартно, через коэффициент усиления, шума и нелинейные параметры.



**Фазовращатель PSH\_TGP2105-SM.** У него необходимо задать коэффициент шума равным потерям на проход. Также у него нелинейности заданы по отношению ко входу.

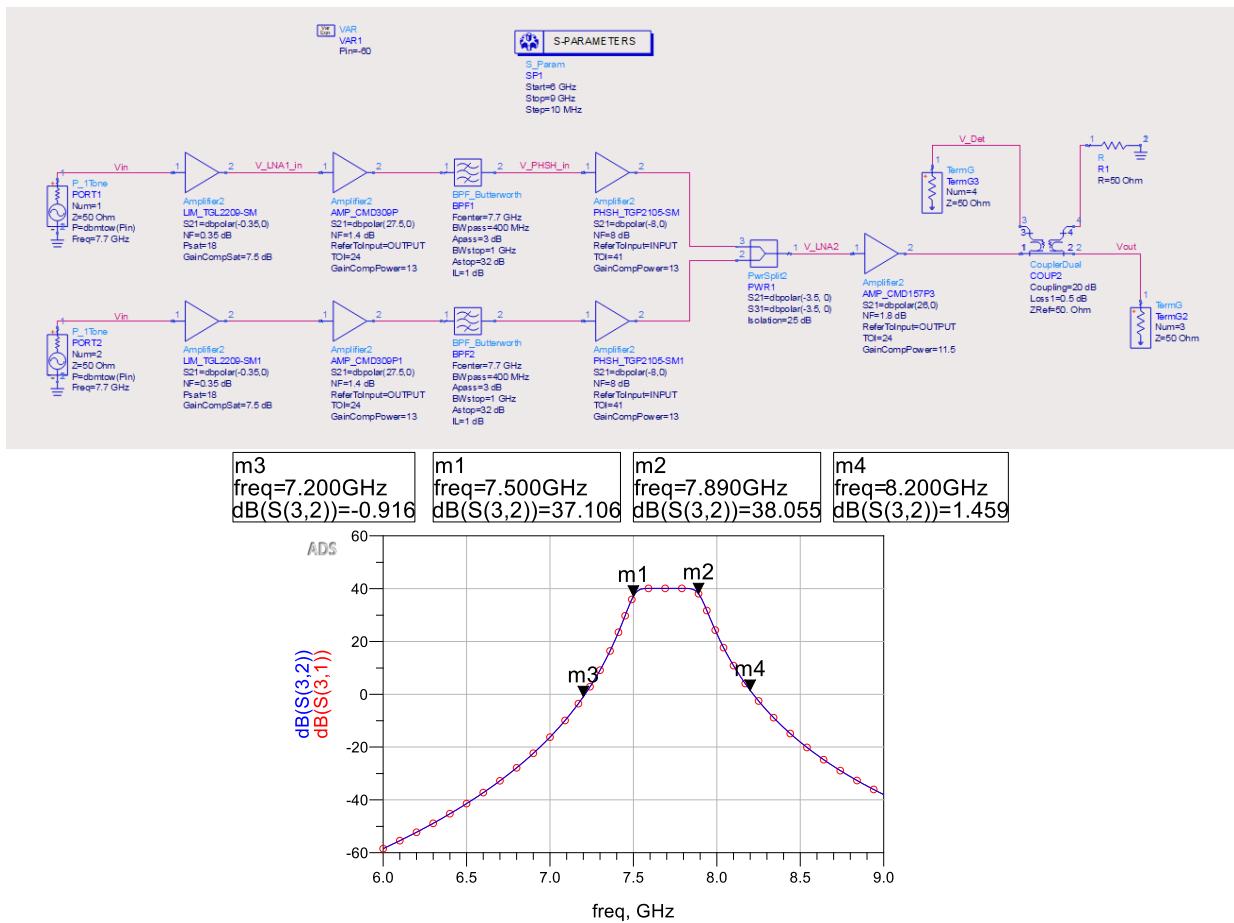


Для фильтра, делителя и направленного ответвителя будем использовать соответствующие имитационные модели. Направленному ответвителю установим рабочее затухание в 0,5 дБ, переходное ослабление пока предварительно 20 дБ.



## 1. Схема для моделирования коэффициента передачи.

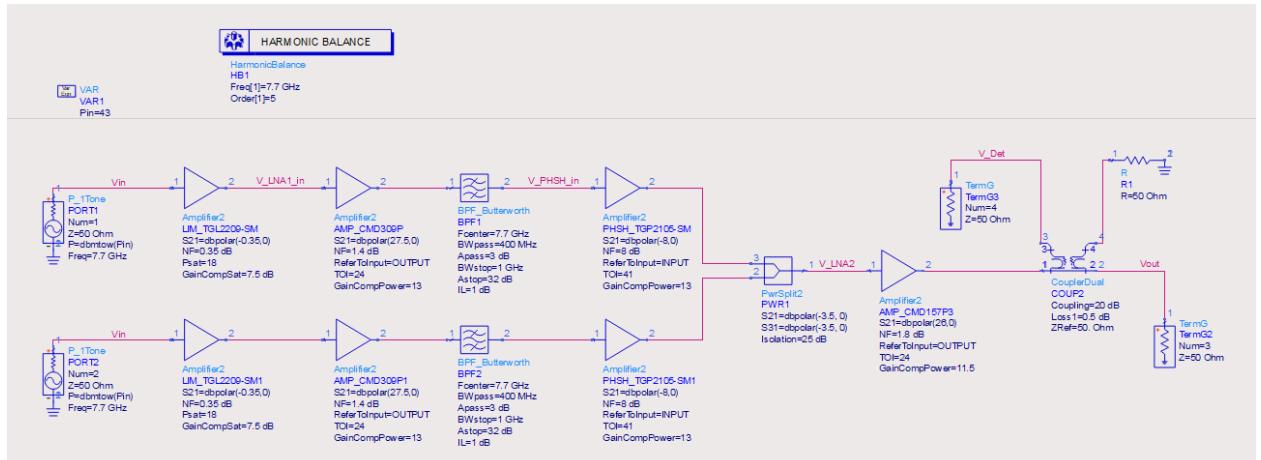
Соберём схему для моделирования коэффициента передачи.



По результатам имитационной модели видно, что ячейка предварительного проходит по коэффициенту передачи и по полосам запирания.

2. Схема для моделирования защиты от кратковременного импульса большой мощности.

Необходимо установить контроллер НВ и подать необходимый уровень кратковременной входной мощности 20 Вт (Pin = 43 дБмВт). Импульс будем подавать на оба входа сразу.



В моделях типа Amplifier2 нет возможности задавать предельную входную мощность и как-то контролировать ее превышение, поэтому проанализируем результаты в области графиков.

В соответствии с документацией пропишем предельные разрешенные уровни мощности на входах соответствующих компонентов (данные из раздела Absolute Maximum Ratings).

$$\text{Eqn\_LNA\_CMD309P\_PinMax} = 20$$

$$\text{Eqn\_IM\_TGA2208\_SM\_PinMax} = 47$$

$$\text{Eqn\_PHSH\_TGP2105\_SM\_PinMax} = 30$$

$$\text{Eqn\_LNA\_CMD157P3\_PinMax} = 20$$

Далее пропишем выражения для проверки, превосходят ли значения мощности на входах компонентов максимальные (через условное выражение IF — THEN — ELSE, мощность снимается с первой гармоники).

$$\text{Eqn\_IM\_TGA2208\_SM\_P} = \text{if } (\text{dBm}(\text{Vin}[1]) <= \text{LIM\_TGA2208\_SM\_PinMax}) \text{ then "Pass" else "Fail"}$$

$$\text{Eqn\_AMP\_CMD309P\_P} = \text{if } (\text{dBm}(\text{V\_LNA1\_in}[1]) <= \text{LNA\_CMD309P\_PinMax}) \text{ then "Pass" else "Fail"}$$

$$\text{Eqn\_PHSH\_TGP2105\_SM\_P} = \text{if } (\text{dBm}(\text{V\_PHSH\_in}[1]) <= \text{PHSH\_TGP2105\_SM\_PinMax}) \text{ then "Pass" else "Fail"}$$

$$\text{Eqn\_LNA\_CMD157P3\_SM\_P} = \text{if } (\text{dBm}(\text{V\_LNA2}[1]) <= \text{LNA\_CMD157P3\_PinMax}) \text{ then "Pass" else "Fail"}$$

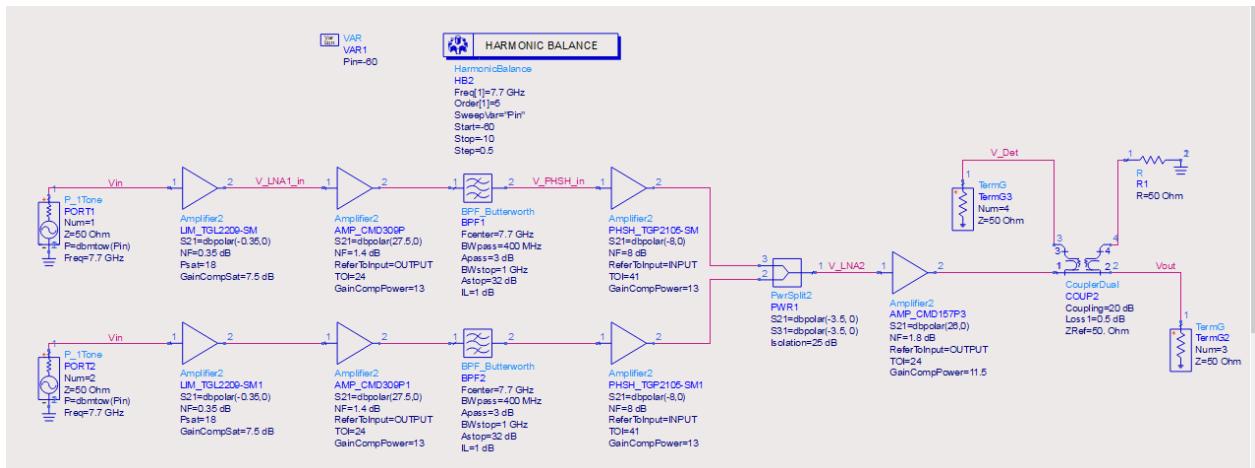
И выведем в таблицу.

AMP_CMD309P_P	LIM_TGA2208_SM_P	PHSH_TGP2105_SM_P	LNA_CMD157P3_SM_P
Pass	Pass	Pass	Pass

По данной таблице видно, что все устройства выживают, т.е. защита срабатывает.

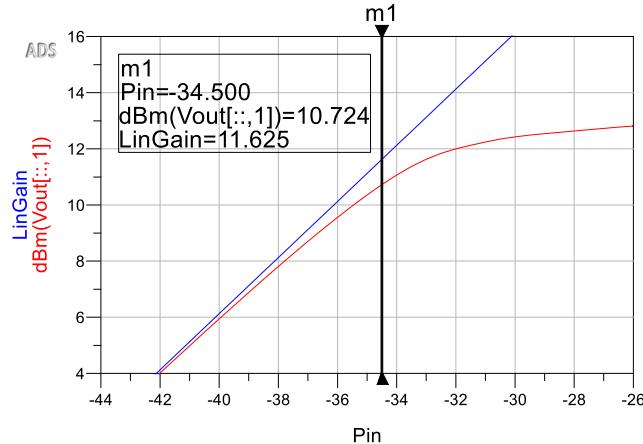
3. Схема для проверки того, что все компоненты работают в линейном режиме.

Найдем точку однодецибелевой компрессии по входу. В случае, если она окажется больше, чем заданный ожидаемый диапазон входных мощностей, то схема работает в линейном режиме.



Компрессию можно искать по любому из каналов, они симметричны (в примере из порта 1 в порт 3).

$$\text{EqnLinGain} = \text{dBm}(\text{Vout}[0,1]) - \text{Pin}[0] + \text{Pin}$$

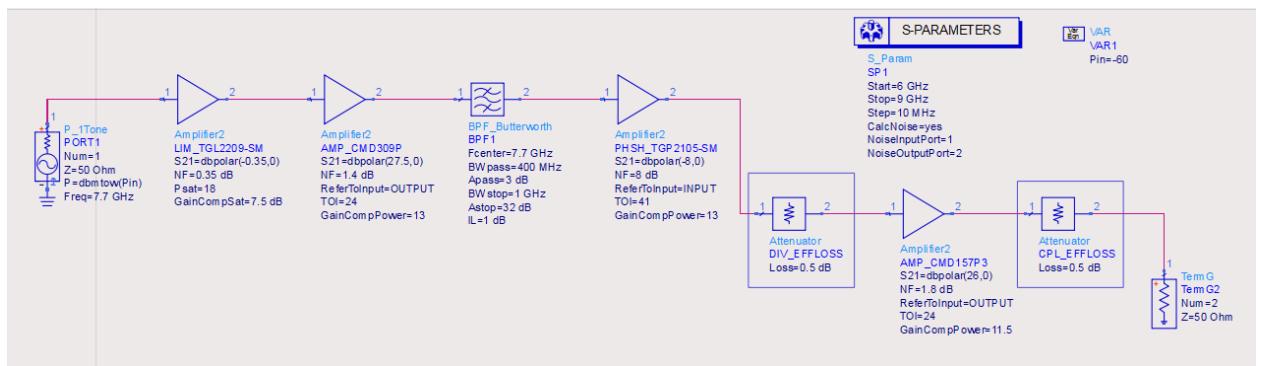


$P_{1\text{dBin}} = -34.5$  дБмВт, что больше ожидаемого диапазона входных мощностей  $-60..-40$  дБмВт, т.е. схема работает в линейном режиме.

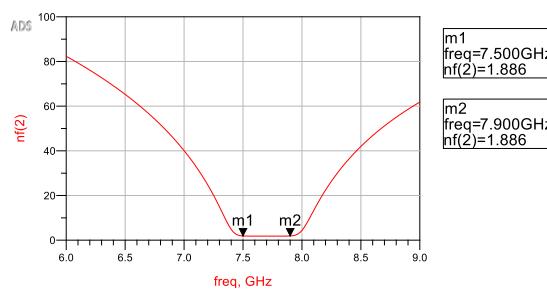
Контролёр XDB для текущей задачи не подходит, т.к. он может управлять мощностью только одного порта, а в предложенной модели нужно свипать обе входные мощности параллельно.

#### 4. Схема для моделирования эквивалентного коэффициента шума.

С учетом введенного нами определения эквивалентного коэффициента шума и для того, чтобы корректно для такой модели задать потери на многоканальных полосковых устройствах, используем блок Attenuator, в который внесем учитываемые потери. Моделируется только один канал.



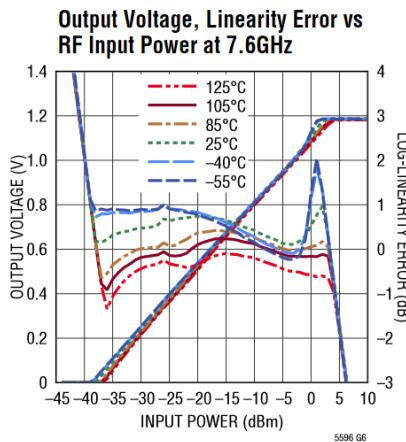
По результатам моделирования видно, что в полосе эквивалентный коэффициент шума не превосходит 1,9 дБ, что лучше заданного 2,2 дБ.



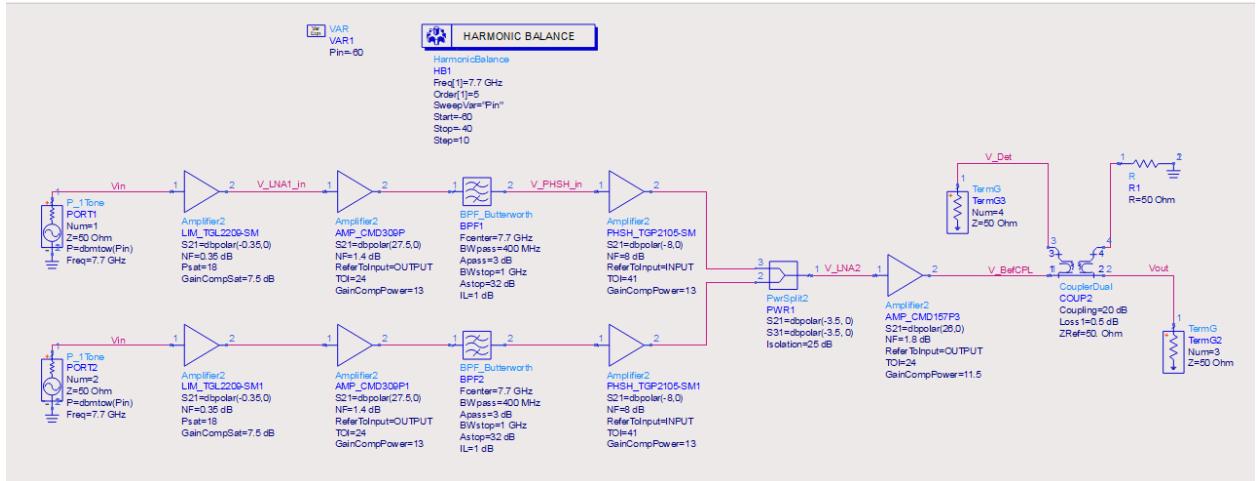
## 5. Схема для определения переходного ослабления в направленном ответителе.

Осталось определить, какое нужно будет реализовать переходное ослабление у направленного ответителя, чтобы попадать в диапазон измеряемых мощностей выбранного детектора мощности LTC5596 [19].

В документации приведен график зависимости выходного сигнала от уровня входной мощности частоты 7,6 ГГц (близко к требуемой 7,7 ГГц). По данному графику видно, что качественно измеряется диапазон входных мощностей где-то от -37 дБмВт до -3 дБмВт.



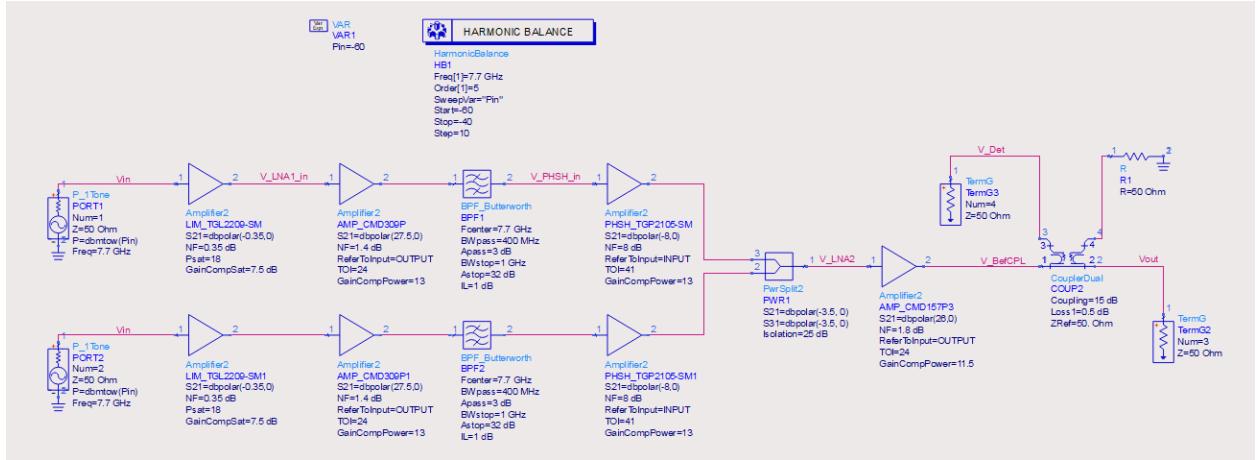
Посмотрим, какой уровень мощности будет на выходе направленного ответителя. Сделаем свип по Pin по трем точкам -60, -50 и -30 дБмВт.



Видно, что уровни мощности перед направленным ответителем будут в диапазоне -13,5..+6,5 дБмВт.

Pin	dBm(V_BefCPL[:, 1])
-60.000	-13.331
-50.000	-3.346
-40.000	6.484

Таким образом, чтобы попасть в диапазон измеряемых мощностей детектора мощности, переходное ослабление направленного ответителя нужно задать порядка 15 дБ. Проверим на модели.



По результатам видно, что значения подпадают диапазон измеряемых детектором мощности, кроме того, шаг между соседними точками сохраняется в 10 дБ.

Pin	dBm(V_Det[:, 1])	dBm(V_BefCPL[:, 1])
-60.000	-28.331	-13.331
-50.000	-18.346	-3.346
-40.000	-8.516	6.484

Расчет системных моделей закончен. Можно переходить к более точному моделированию.

Для приемной ячейки нужно учесть, что почти никто из современных производителей ЭКБ не вносит в файлы S-параметров шумовых свойств. Поэтому моделирование коэффициента шума проводится чаще всего только на системном уровне.

## Моделирование отдельных компонентов с учетом их моделей

Для упрощения последующей работы в общей схеме (особенно большой и сложной), сначала нужно отработать отдельные компоненты, в том числе:

- проверка по S-параметрам, соответствуют ли заявленные характеристики представленным S-параметрам;
- настройка перебора состояний для управляемых устройств, т.к. их S-параметры как правило поставляются архивом;
- добавка подводящих линий, конфигурация которых определяется тем, относительно каких рефлоскостей измерены S-параметры;
- согласование отдельных компонентов до некоторого разумного КСВН (как правило до 1,5 входу и выходу) в рабочей полосе, чтобы при их включении в общую схему не было необходимости досогласовать всю ячейку;
- отдельное проектирование полосковых устройств;
- удобно еще сразу привязать посадочные места микросхем, чтобы при проектировании видеть общий вид топологии;

Более подробно процесс проектирования покажем на примере четырёхканальной передающей ячейки.

## **Выбор ВЧ-подложки**

Надо выбрать ВЧ-подложку для всего проекта.

Массово доступных ВЧ-подложек не так много. Это в том числе RO4003C, RO3003 и RO4350B. Все остальное как правило либо редкое и дорогое, либо нетехнологично для печатных плат.

При выборе ВЧ-подложки есть несколько соображений:

- желательно отношение ширины 50 Ом/эл.длины 360° около 1/10..1/20 – чтобы была возможность поиграться с размерами. Если отношение меньше – полосковые устройства будут неоправданно огромными; если больше – будет сложно проектировать полосковые устройства, т.к. их схемотехнические и ЕМ-модели будут сильно различаться.

- уменьшение толщины подложки ведет к уменьшению ширины 50 Ом (что частично упрощает согласование), но при этом увеличиваются погонные потери. Также это может приводить к невозможности проектирования некоторых полосковых устройств, т.к. большие волновые сопротивления становятся нереализуемыми по ширине (меньше допустимого по техпроцессу).

Доступные к покупке толщины ВЧ-подложек:

- RO4003C - 0,203 мм (8 mil), 0,305 мм (12 mil), 0,406 мм (16 mil), 0,508 мм (20 mil), 0,813 мм (32 mil) и 1,524 мм (60 mil) [21];

- RO4350B – 0,101 мм (4 mil), 0,168 мм (6,6 mil), 0,254 мм (10 mil), 0,338 мм (13,3 mil), 0,422 мм (16,6 mil), 0,508 мм (20 mil), 0,762 мм (30 mil) и 1,524 мм (60 mil) [21];

- RO3003 – 0,13 мм (5 mil), 0,25 мм (10 mil), 0,5 мм (20 mil), 0,75 мм (30 mil) и 1,52 мм (60 mil) [22].

Стандартные толщины металлизаций – 17 мкм (0,5 os) и 35 мкм (1 os).

Для других подложек могут быть иные доступные толщины.

Для указанных подложек есть аналоги от других производителей. Таблица взаимозаменяемости приведена ниже. Но надо учитывать, что взаимозаменяемость идет только по относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r/Dk$ ). По доступным толщинам диалектика и металлизации, тангенсу угла диэлектрических потерь и других физических свойств материалы могут отличаться. Точные значения нужно проверять по документации на подложки. Хорошие каталоги с указанием взаимозаменяемости можно найти на ресурсах [23] и [24].

**Таблица – Взаимозаменяемость распространенных ВЧ-подложек**

№	Rogers corp	TACONIC	WANGLING	FSD	Jio Yao
1	RO4003C	HF-330F	WL-CT338	FSD883T	HJY340B-M
2	RO4350B	HF-350	WLCT350	FSD888T	HJY350A или HJY350B-M
3	RO3003 или RO3003G2	NF30	TFA300	FSD300GR	FJY300C-M

Т.к. ВЧ-подложка является единой для всей ячейки, то лучше после предварительного выбора подложки сначала попробовать спроектировать наиболее сложное полосковое устройство (вдруг придется подложку менять), а затем все остальное. Как правило, самое сложное полосковое устройство – это фильтр.

При проектировании надо следить за стандартным техпроцессом, по состоянию на 2021г. это:

- минимальный зазор – 0,15 мм
- минимальная ширина 0,15 мм

Кроме того, если длины прямых участков микрополосков (шлейфов в согласующих цепях, фильтрах или пр.) получаются слишком большие, то надо искать способы их уменьшения (выбор другой схемы полоскового устройства, изменение подложки или ее толщины и пр.).

Вообще полосковые части надо проектировать как можно более подробно и точно, в том числе с добавлением всех переходов ширин, тройников и крестообразных соединений. При этом нужно следить, реализуема ли вообще схема, а именно не нахлестывают ли микрополоски друг на друга, нет ли участков с нулевой длиной, хватит ли места для добавленного чипа и пр. При работе в ADS такое лучше всего визуально контролируется по генерации топологии (layout). Если же получаются странные цепи (слишком широкие или узкие участки, близко друг к другу лежит то, что не должно иметь связи и т.д.) то лучше вообще провести ЕМ-анализ.

В нашем проекте мы решили остановиться на RO4003C толщиной 0,5 мм, толщиной металлизации 17 мкм. Данный диэлектрик имеет  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\tan\delta = 0,0026$ . На рабочей частоте 9,5 ГГц ширина получается  $W_{50} = 1,1$  мм,  $L_{360^\circ} = 18,9$  мм. Отношение довольно удобное.

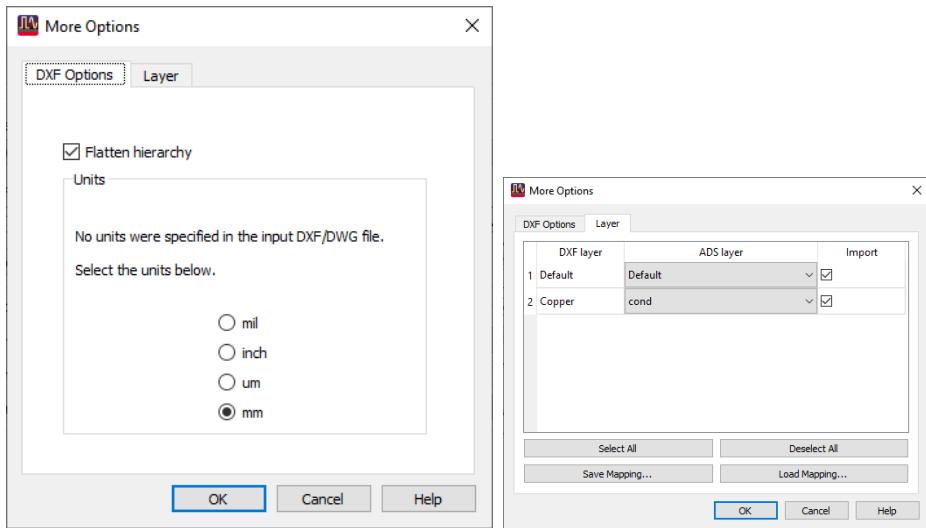
### ***Импорт полосковых устройств***

В данном методическом указании не рассказывается, как проектировать полосковые устройства (развязанный делитель, направленный ответвитель или фильтр). Показываются только как можно внедрить полосковое устройство в проект, в том числе без перемоделирования в ADS.

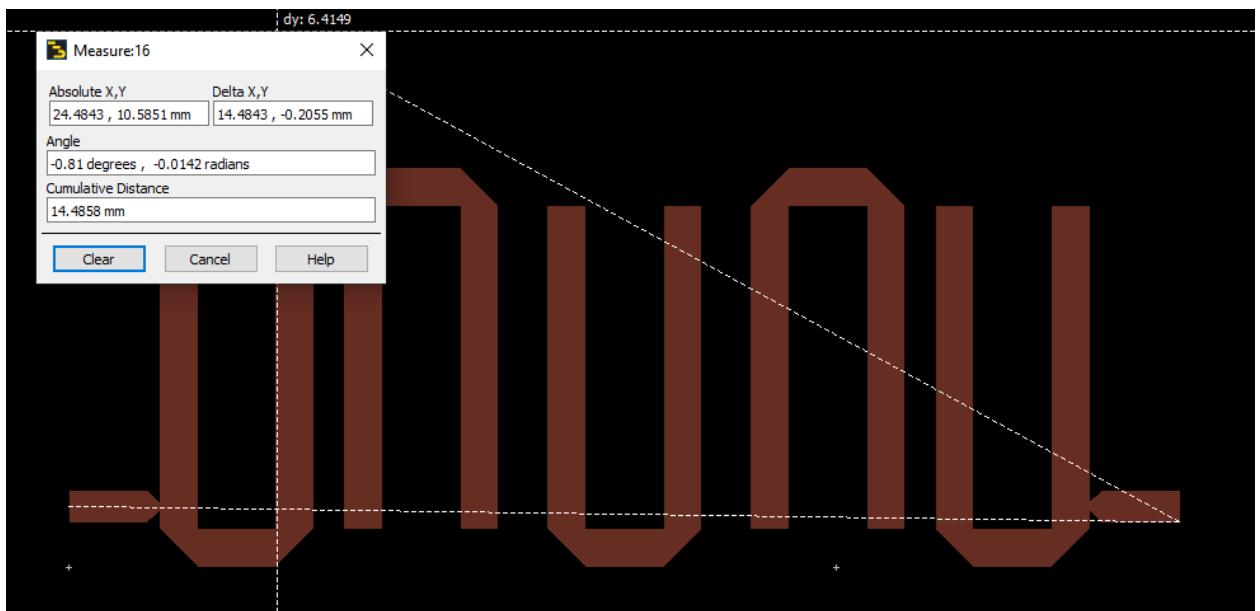
В техническом задании фильтр в основном обеспечивает форму АЧХ, а именно полосу пропускания и полосу запирания. По ТЗ уровень запирания должен быть не менее 30 дБ относительно уровня пропускания.

Пусть микрополосковый шпилечный фильтр был спроектирован в стороннем САПР и теперь его нужно импортировать в ADS. Импортируется топология. Как промежуточный формат выбран DXF/DWG. Отдельно сохранены S-параметры спроектированного фильтра.

По File – Import – Design выбирается тип DXF/DWG и нужный файл. По кнопке Options на вкладке DXF Options нужно установить единицы промежуточного файла. На вкладке Layer настраивается соответствие слоев.



Результат импорта обязательно нужно проверять по известному размеру.



Далее нужно добавить пины.



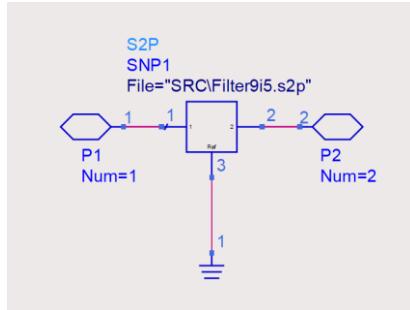
Дальнейшее зависит от того, как планируется работать с фильтром в ADS:

1. Фильтр будет промоделирован еще раз в ADS и использована emModel.

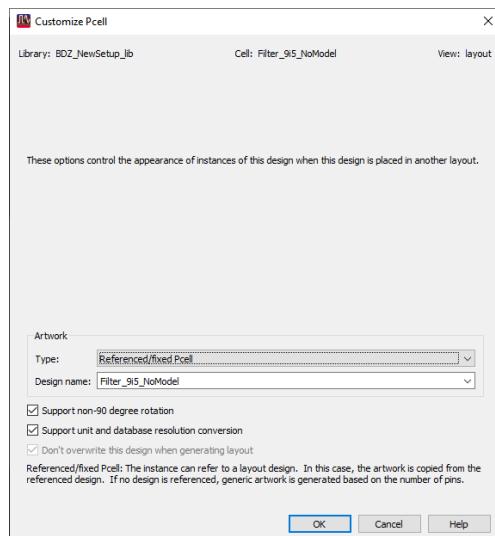
Данный маршрут подробно описан в лабораторных работах по курсу «Моделирование антенно-фидерных устройств в ADS» [9].

2. Топология фильтра будет использована только для получения общего вида всей топологии. Для общего моделирования будут использованы результаты моделирования из стороннего САПР (файл S-параметров).

В ячейке с топологией нужно создать схематик с блоком S2P.



Чтобы при генерации общей топологии использовалась топология только фильтра, а не пыталась генерироваться дефолтная топология для блока S2P и земли, нужно в топологии ячейки фильтра по File – Customize Pcell установить тип Referenced/fixed Pcell и указать имя той же ячейки.



При установке фильтра на схему верхнего уровня для моделирования на схемном уровне нужно будет по Choose View For Simulation выбрать источник schematic.

### Предусилитель HMC608LC4

Начнем работу с предусилителем.

Перед началом проектирования подводящих и согласующих цепей нужно определиться с корпусом компонента и тем, относительно какой рефплоскости приведены S-параметры.

В файле S-параметров в комментариях присутствует строка

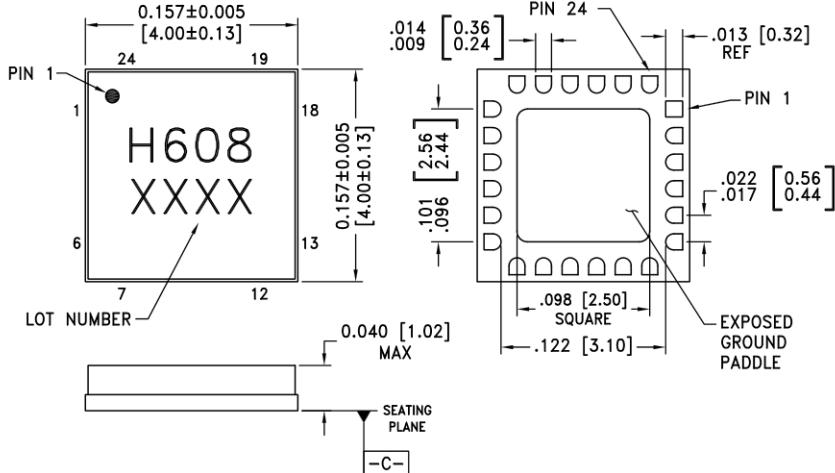
```
The reference plane is the center of the package pin.
```

Это означает, что файлы S-параметров приведены относительно центров падов. При проектировании подводящих линий и цепей согласования это придется учесть.

Чтобы можно было по генерации топологии контролировать конфигурацию согласующих цепей, нужно отдельно создать посадочное место для предусилителя.

Создаем отдельную ячейку только с топологией HMC608LC4\_Footprint. В ней по приведенному ниже чертежу рисуем посадочное место.

BOTTOM VIEW



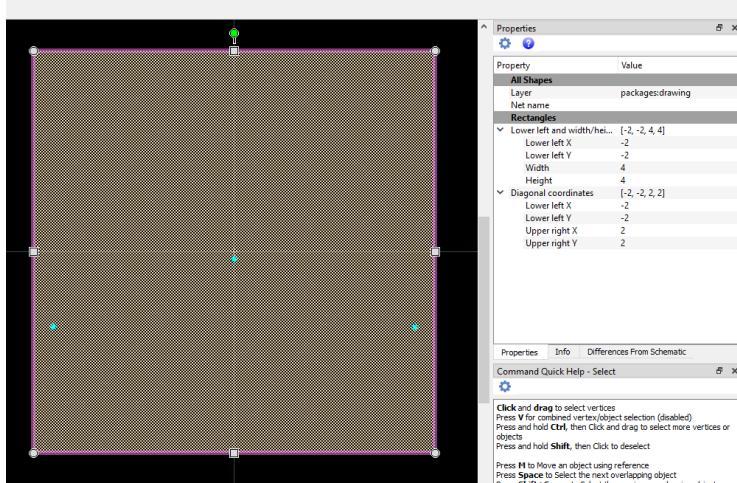
Для посадочных мест в стандартной схеме слоев ads\_standard\_layers обычно достаточно трех слоев:

- cond для поверхностно монтируемых падов на верхнем слое;
  - packages для графики корпуса;
  - leads для дополнительного обозначения выводов у выводных корпусов.

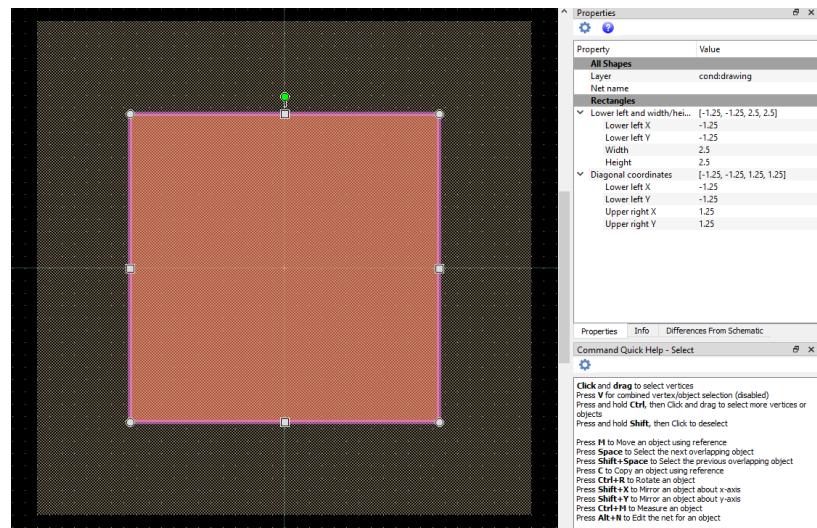
Тип корпуса HMC608LC4 – Pullback QFN, он является безвыходным, т.е. слой leads не используется.

При создании посадочных мест для моделирования как правило используют номинальные (средние) размеры.

В слое packages относительно центра рисуем квадрат 4x4 – это будет геометрия корпуса. Контролировать рисунок удобно по данным в панели Properties

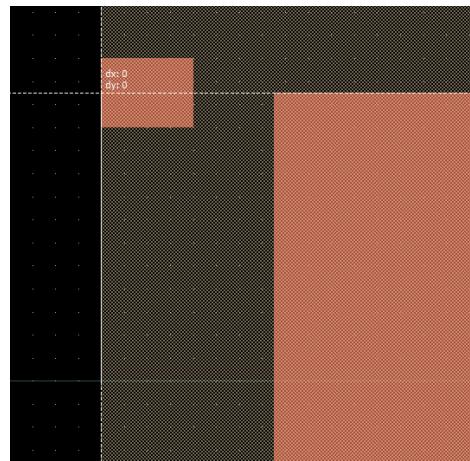


Далее нужно создать геометрию металлизации падов (слой cond). Сначала создаем квадрат 2,5x2,5 в центре для термопада.

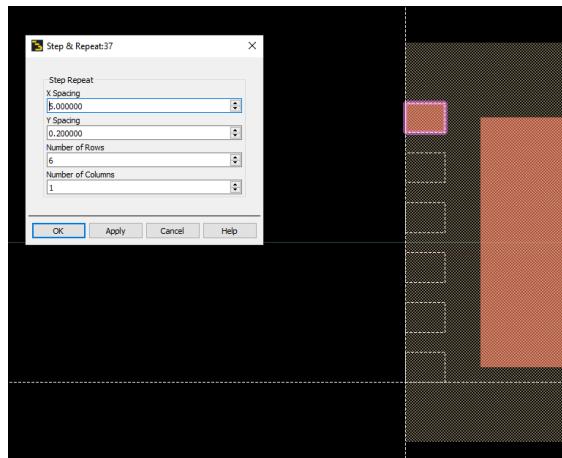


Затем создаем остальные пады. По чертежу у пада ширина 0,3 мм. С длиной немного сложнее. Несмотря на то, что данный корпус типа PQFN, на печатной плате пады обычно ведут до края корпуса. Соответственно длина пада получается 0,4 мм.

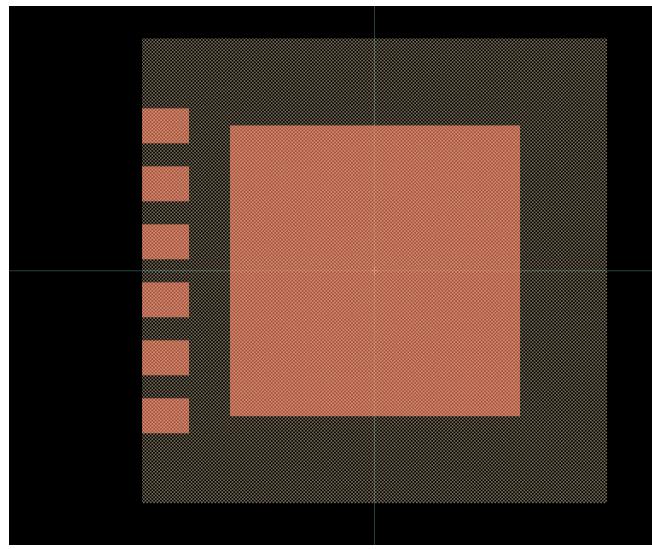
Затем используя привязку к сетке и середине ребра пада и сдвиг с референсной точкой (Edit - Move – Move Using Reference, M) размещаем пад в нужном месте.



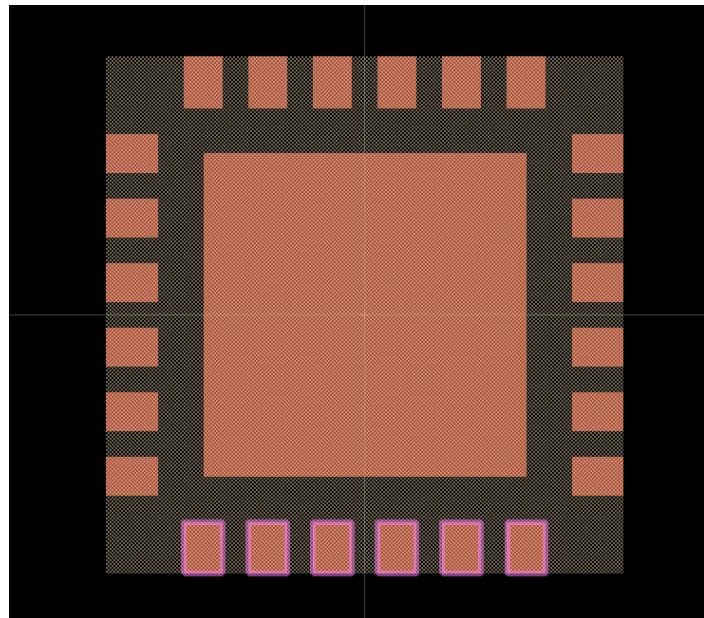
После этого по команде Edit – Copy/Paste – Step And Repeat размножим до 6 штук. Шаг задается как зазор между краями (т.е. 0,2 мм).



Задвоившийся первый пад удаляем.

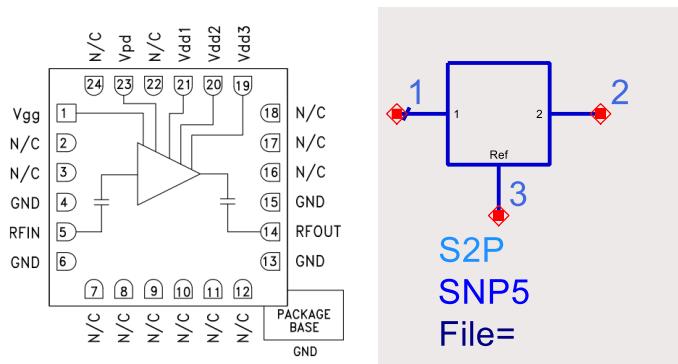


Затем используя копирование относительно референсной точки (Edit – Copy/Paste – Copy Using Reference, C) относительно центра по Ctrl+R размножим пады (т.к. корпус полностью симметричен относительно центра).



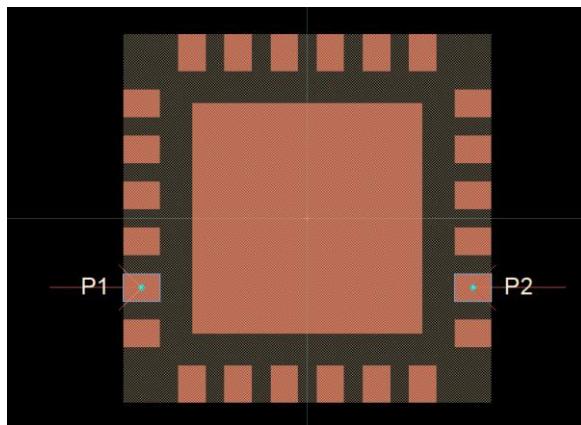
Далее нужно назначить пины для связи со схематиком.

Здесь мы отойдем от правильной нумерации падов. Данный футпринт будет привязан к блоку S2P, у которого первый пин вход, второй выход, третий земля.

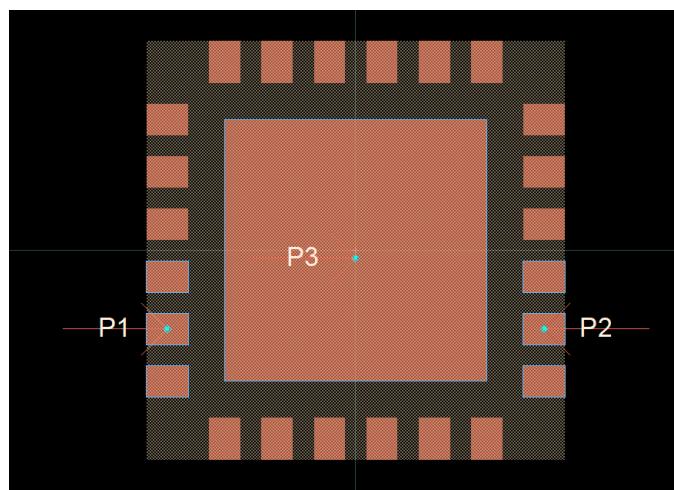


Выбираем нужный пин (5 в чертеже) и ПКМ – Pin – Create One Pin From Selection создаем ему первый пин. Он также сразу привязывается к центру пада (как нам нужно по инструкции из файла S-параметров).

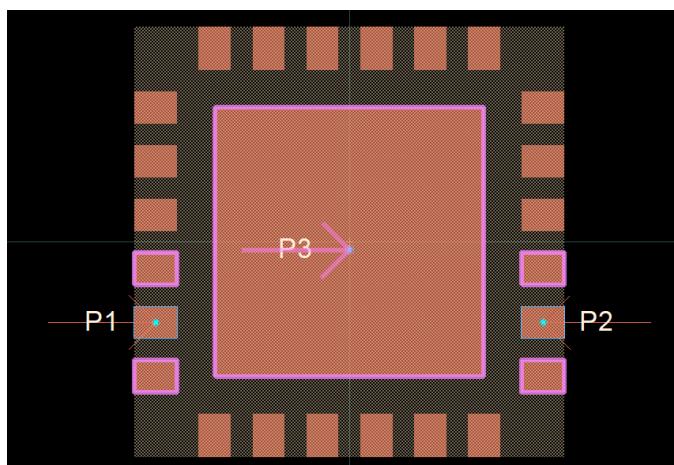
Аналогично повторяем для выходного второго пина (14 в чертеже).



Затем выбираем все земляные пады, включая термопад и по ПКМ - Pin – Create One Pin From Selection создаем третий земляной пин.

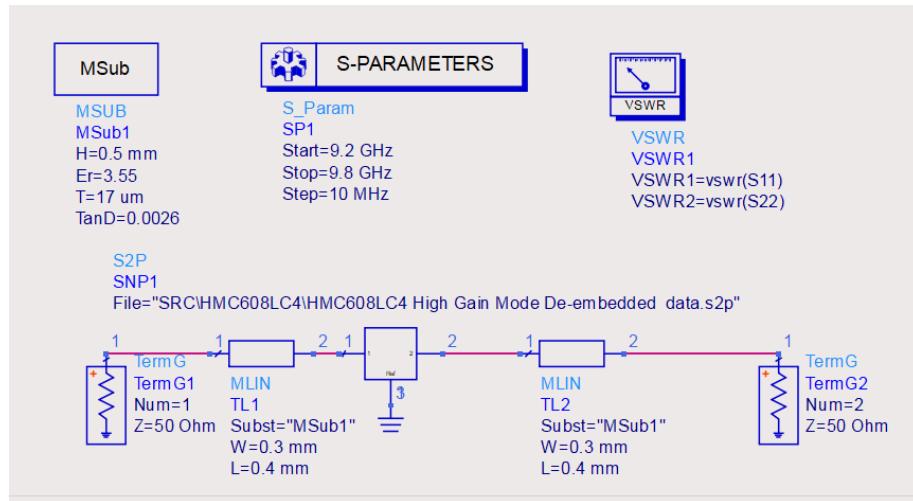


Если выбрать пин, то автоматом выберутся все привязанные к нему пады.



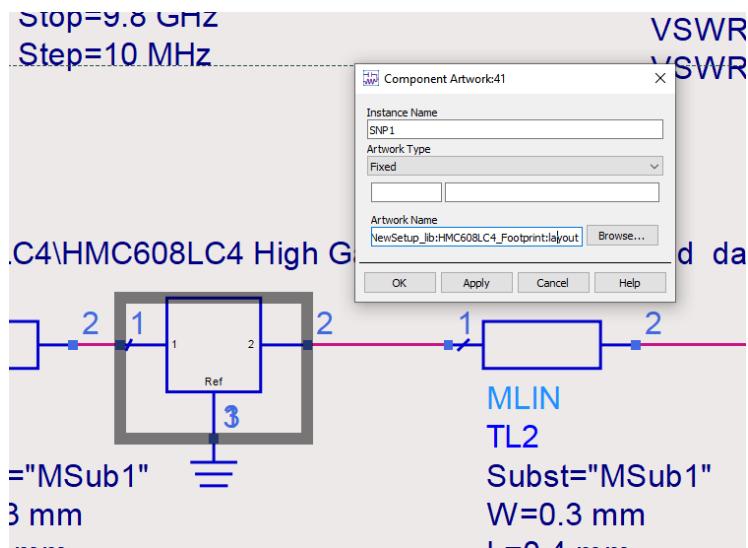
Посадочное место HMC608LC4 готово. Можно переходить к проектированию подводящих и согласующих цепей.

Создаем ячейку AMP\_HMC608LC4 со следующей схемой.

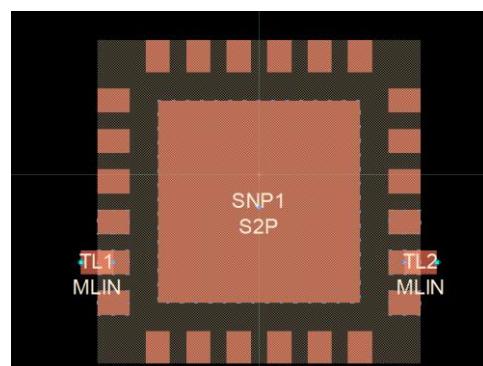


Участки шириной 0,3 мм и длиной около 0,4 мм имитируют вывод от падов (с учетом положения рефплоскостей). Это пока предварительная схема.

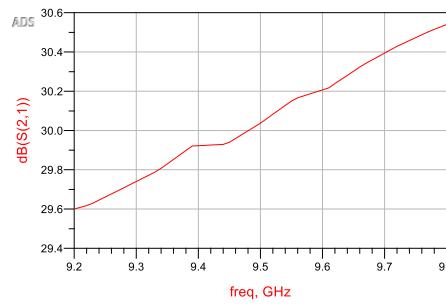
Для генерации топологии нужно чтобы у блока S2P было привязано посадочное место. По ПКМ – Component – Edit Component Artwork привяжем спроектированное нами ранее посадочное место (режим привязки Fixed, по кнопке Browse выбрать ячейку HMC608LC4\_Footprint).



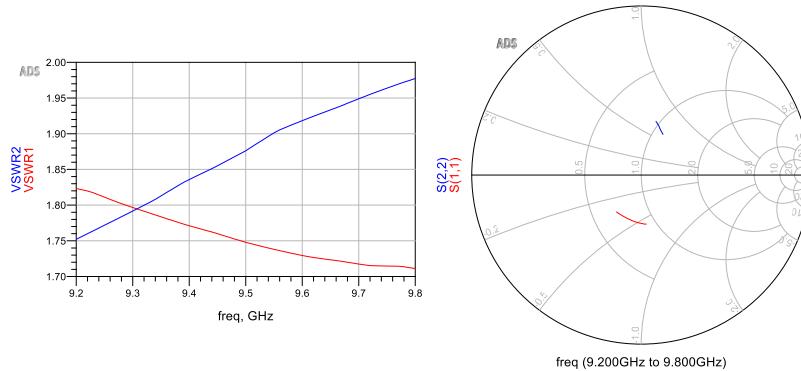
Теперь можно по генерации топологии смотреть на общий вид, насколько он получается адекватным.



Проверяем моделированием. По коэффициенту передачи видно, что усилитель выполняет заявленные в ТЗ параметры по усилению.



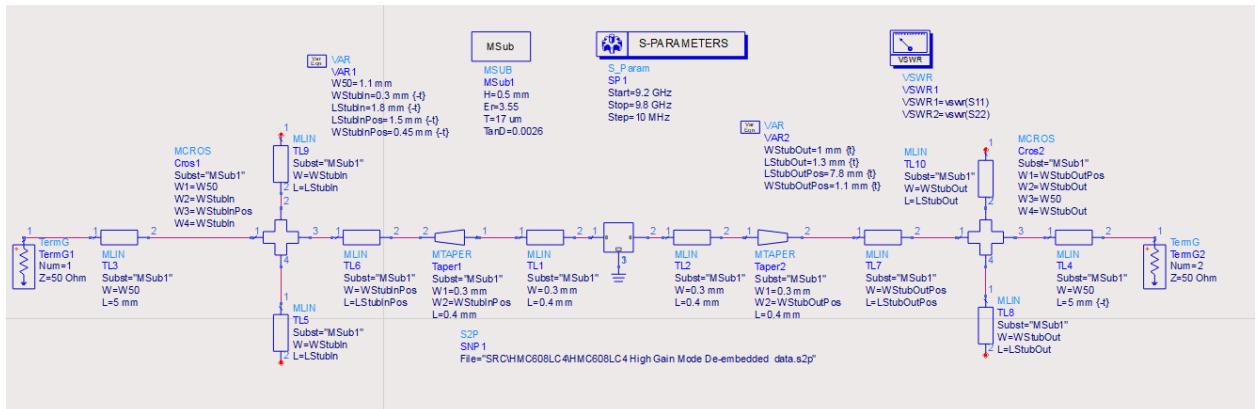
Но вот по КСВН согласованность плоховата, перед включением в общую схему желательно досогласовать КСВН по входу и по выходу как минимум где-то до 1,5.



По положению S11 и S22 видно, что обойтись только последовательными шлейфами не получится (они далековаты от действительной оси), придется добавлять параллельные.

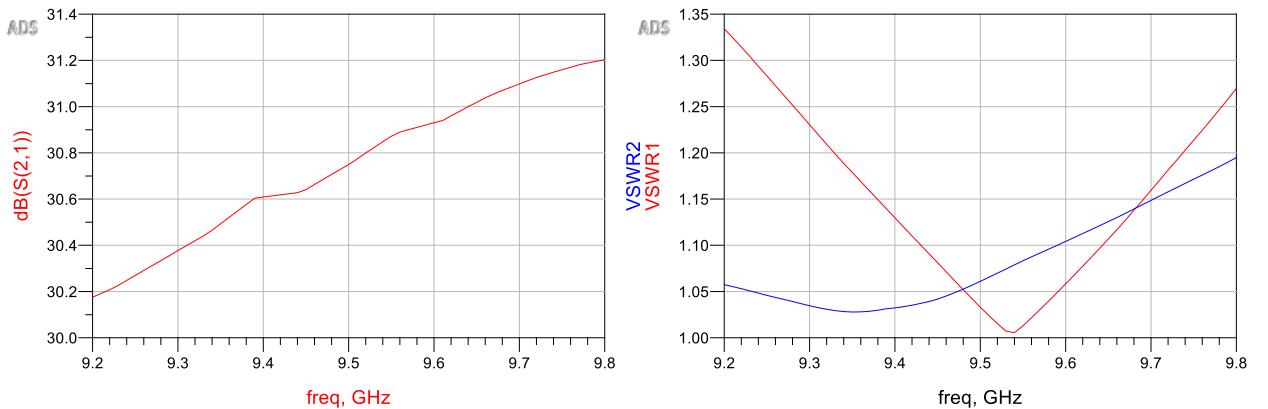
При этом для усилителей нужно учитывать, что выход очень сильно зависит от того, что подключено ко входу. А вот наоборот не сильно. Т.е. правильно сначала согласовать вход, а затем выход.

Можно предложить следующую схему согласования. При этом нужно учесть, какая должна быть конфигурация цепей питания. По документации соседние с ВЧ-проходом пады либо земляные, либо NC (No Connect, без соединения; их либо соединяют с землей, либо оставляют висеть в воздухе). Это значит, что нет конфигурационных ограничений на вид согласующих цепей.

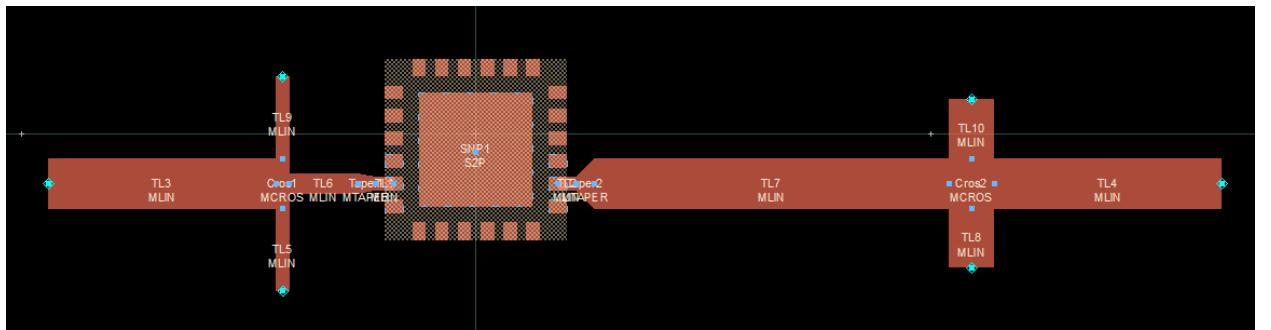


В данной схеме дополнительно добавлены небольшие участки по 50 Ом с обоих входов, чтобы заложиться на место до следующих компонентов.

Результаты показывают отличное согласование.

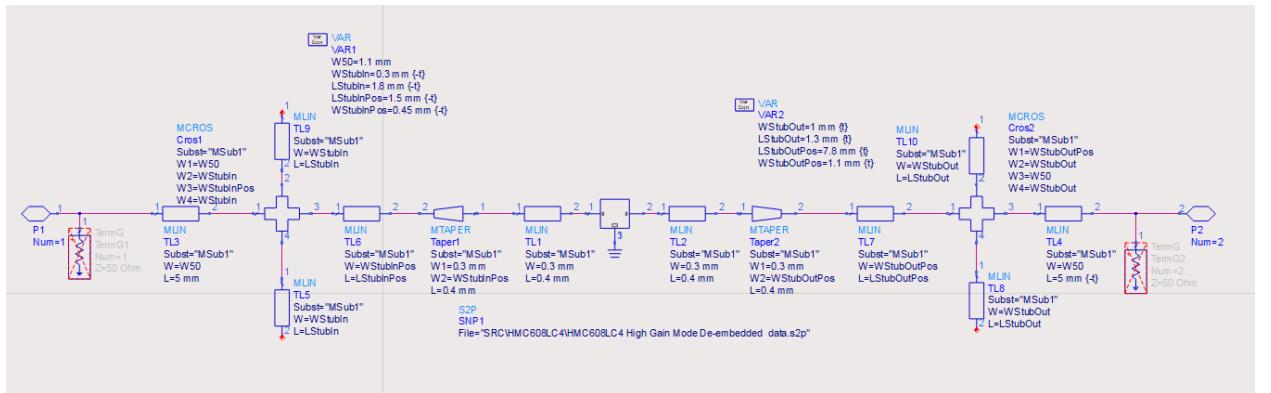


Окончательно по генерации топологии проверим внешний вид.



Выглядит более-менее прилично, длины согласующих цепей не превышают 12 мм.

С усилителем HMC608LC4 закончили, чтобы его корректно использовать в общей иерархии, надо отключить (удалить) блок S-params, запросы KCBH, определение подложки и терминаторы. Все что должно остаться в модели.

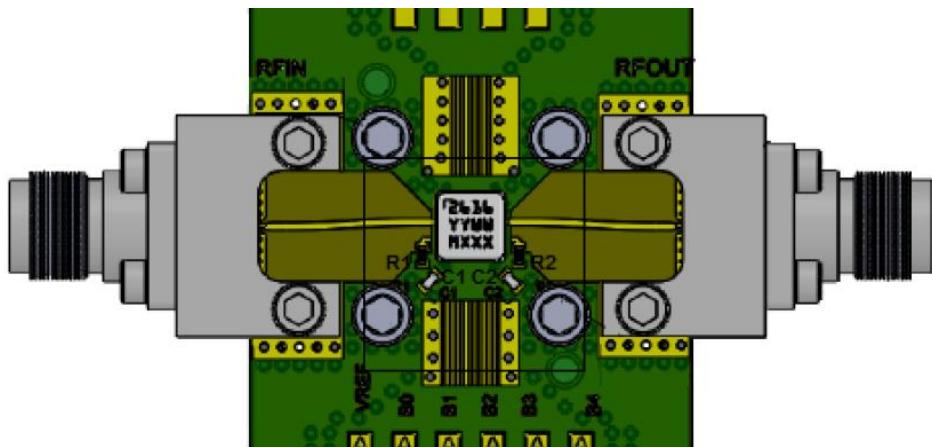


## Аттенюатор TGL2616-SM (пример деэмбединга)

В случае, если S-параметры измерены вместе с оснасткой, то прямое использование S-параметров для моделирования не является корректным. Необходимо сначала убрать влияние оснастки (Fixture) – провести деэмбединг (Deembedding).

Для аттенюатора TGL2616-SM в документации указано, что S-параметры измерены на тестовой плате, деэмбеденных данных нет. Это также указано в заголовках файлов S-параметров.

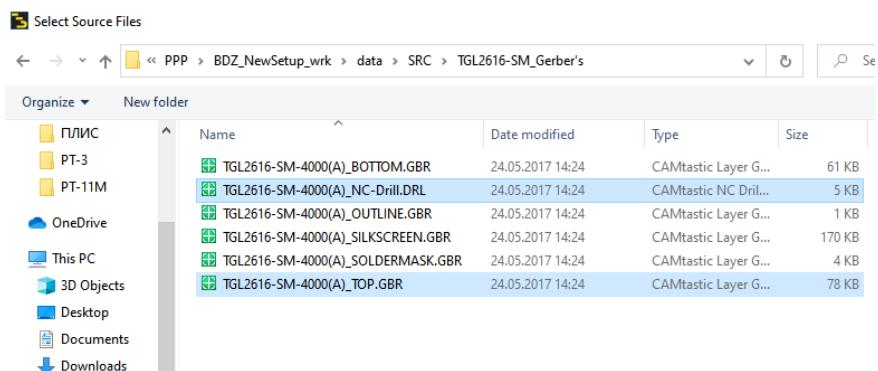
Для данной тестовой платы выложен архив гербер-файлов.



Также, S-параметры приведены для каждого из состояний. Для удобного обращения их еще соберем в один S2PMDIF-файл.

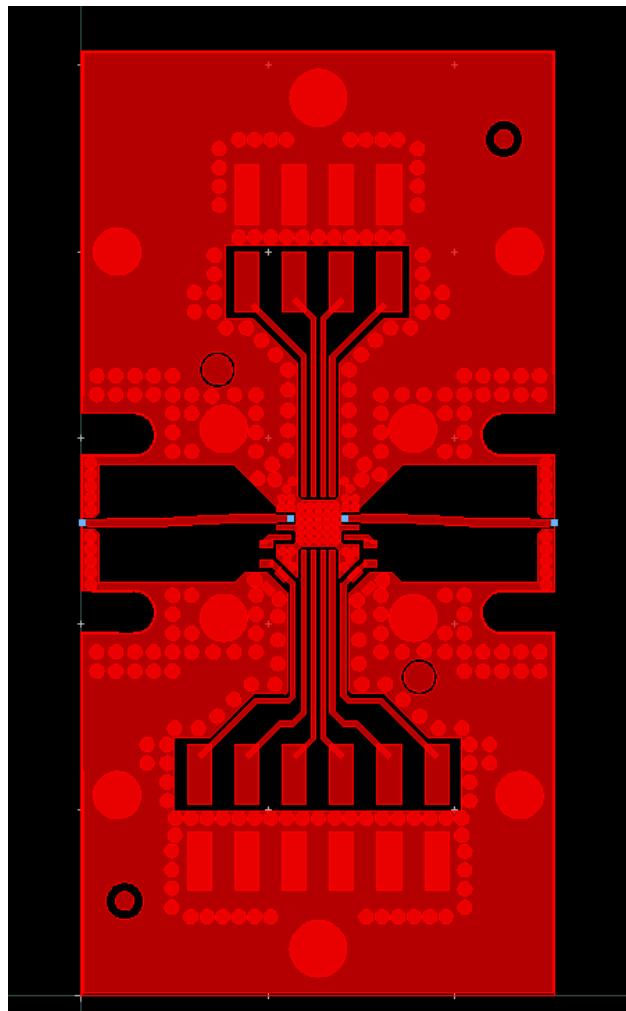
Для того, чтобы сделать деэмбединг, нужно отдельно знать S-параметры оснастки. Мы можем промоделировать ее. Импортируем в ADS гербер-файлы оснастки (File – Import – Design в основном окне ADS).

Из всего списка гербер-фалов сейчас нужны геометрия металлизации верхнего слоя (\_TOP.BBR) и геометрия отверстий (\_NC\_Drill.DRL).



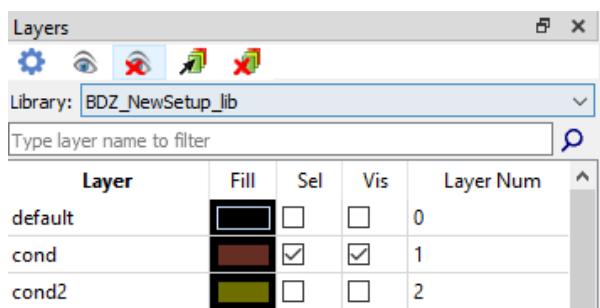
Данные файлы также могут быть поименованы и по другой схеме, например верхний слой может иметь расширения \*.art01, \*.gtl, \*.cmp, \*.top, \*.layer1, \*.soldcom или \*.comp, а слои сверловки как \*.dd, \*.dd01, \*.dd02, \*.gd, \*.gd1, \*.gg, \*.gg1, \*.drill, \*.drl, \*.tap, \*.nc1, \*.nc2 [8].

После импорта необходимо проверить, что при импорте были выбраны правильные единицы. Проще всего по линейке Ctrl+M измерить какой-нибудь размер.



Вся тестовая плата для моделирования не нужна и слишком сложна (будет долго считаться), обрежем ее, оставив только проход ВЧ-сигнала и окружающую ее вокруг землю.

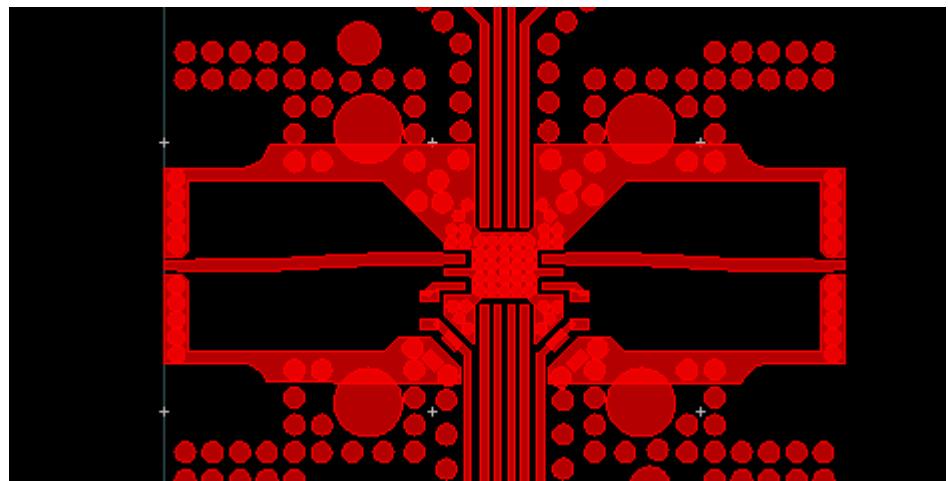
При редактировании топологии можно активно пользоваться включением и выключением слоев в панели Layers.



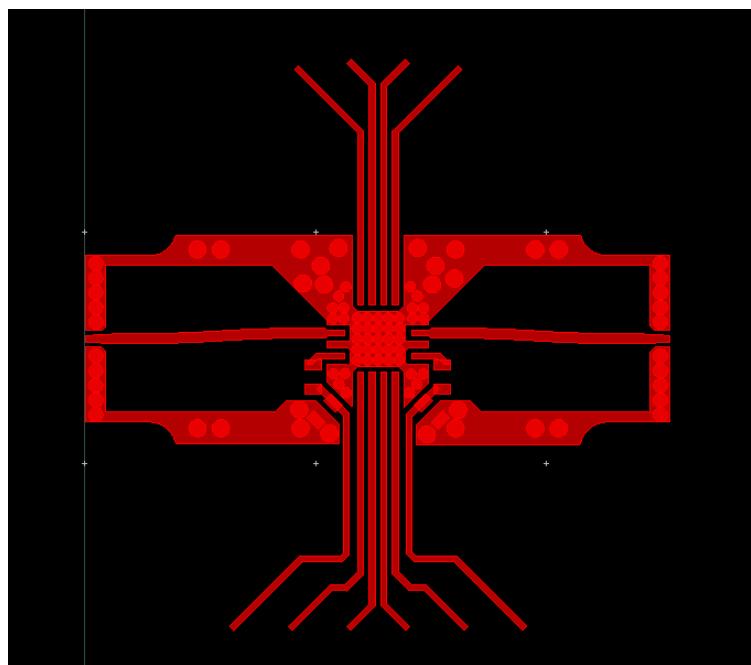
Зачеркнутый прямоугольник – отключает возможность выбора графики на всех слоях, кроме текущего. Зачеркнутый глаз кроме этого отключает еще видимость всех других слоев.

Сначала зачистим геометрию из импортированного слоя TGL2616-SM-400(A)\_TOP.GBR.

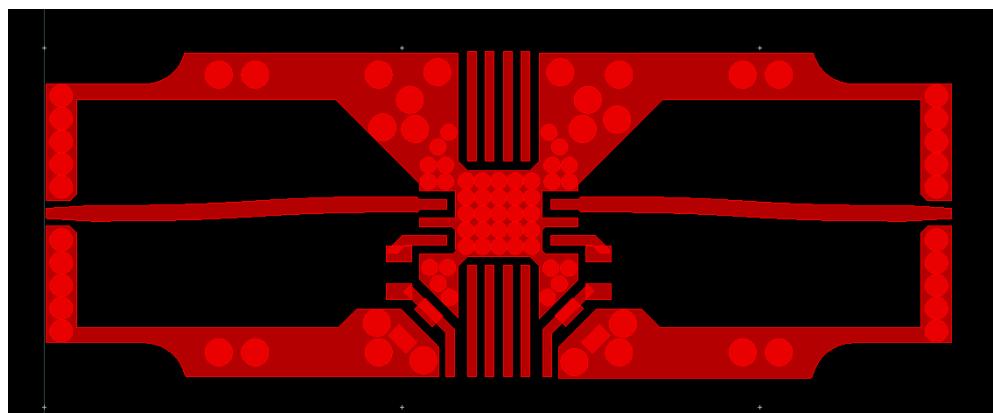
С помощью инструментов из группы Edit – Modify приведем геометрию верхнего слоя к следующему виду.



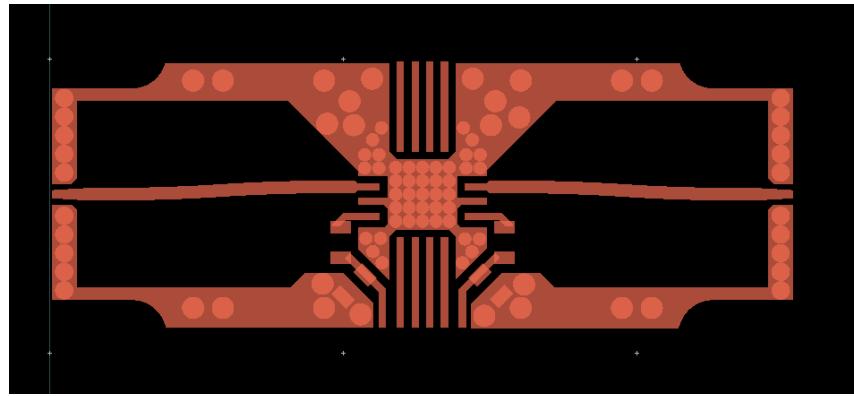
Затем уберем отверстия падов отверстий.



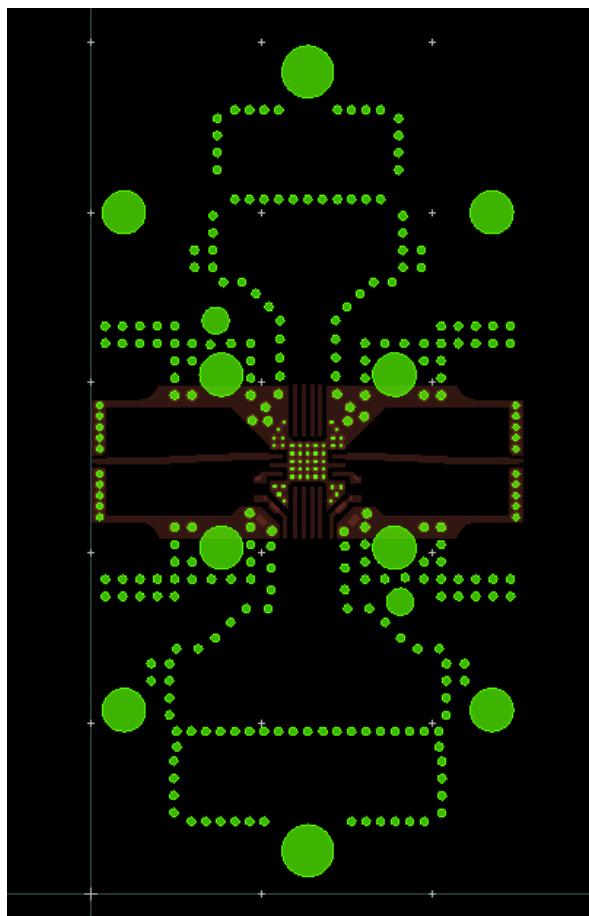
Затем подрежем линии управления.



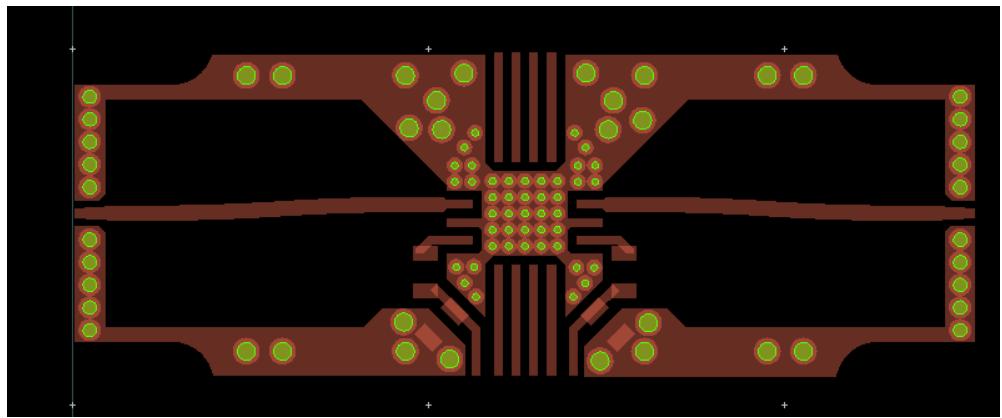
Окончательно перенесем данную геометрию в слой cond (выбрав в панели Properties изменить слой в свойстве Layer, или по команде Edit – Move – Move to Layer)



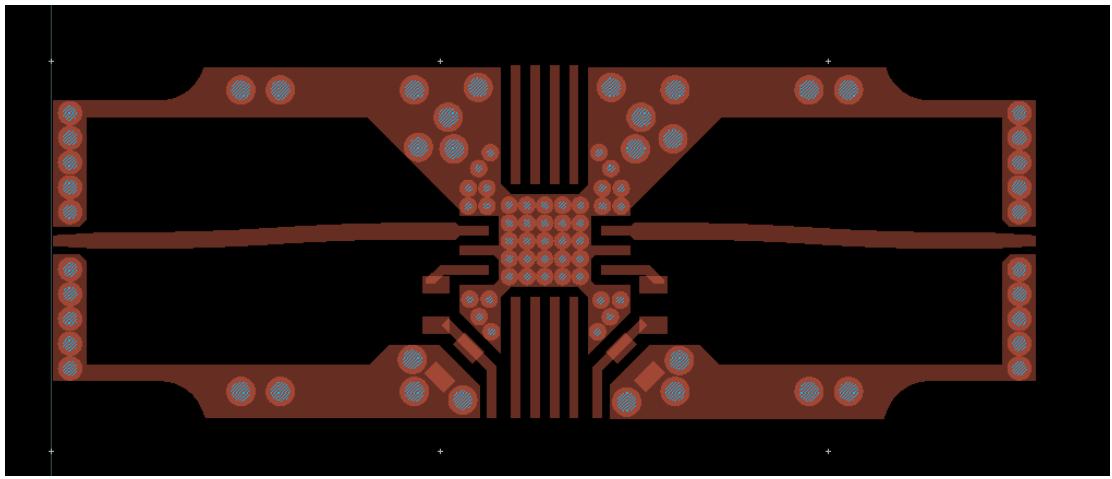
Далее включим отображение слоя TGL2616-SM-400(A)\_NC\_Drill.DRL (отверстия).



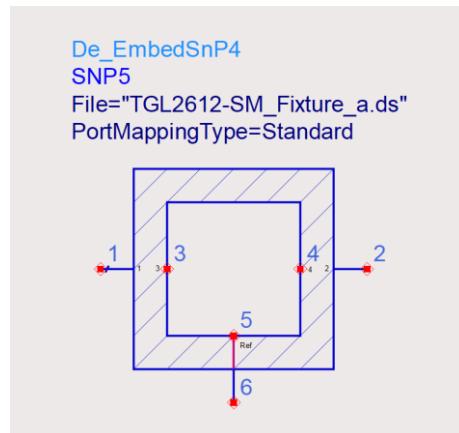
Оставим только те отверстия, которые попадают в оставленную нами часть металлизации верхнего слоя.



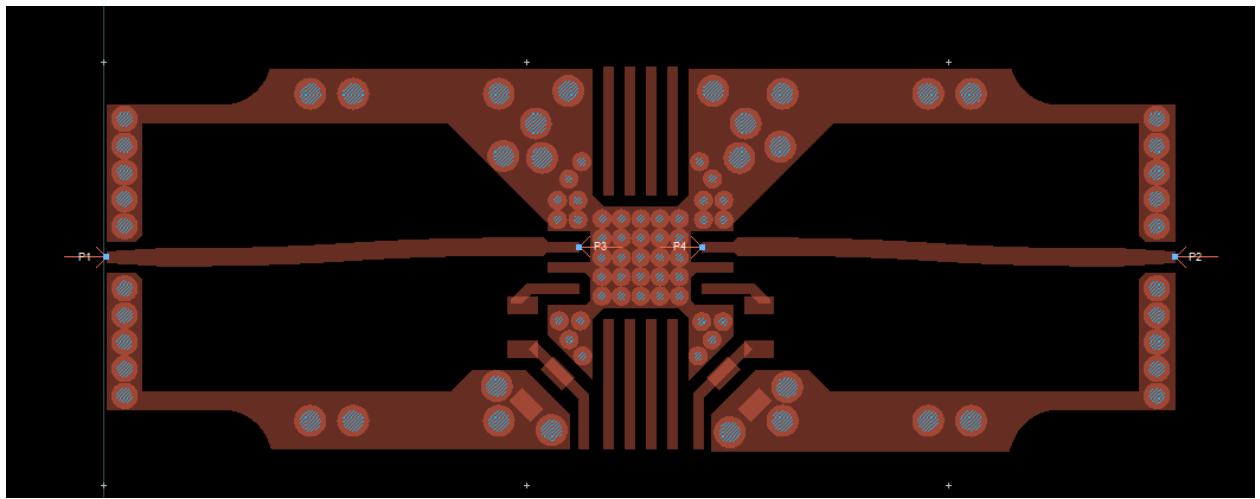
И перенесём их в слой hole.



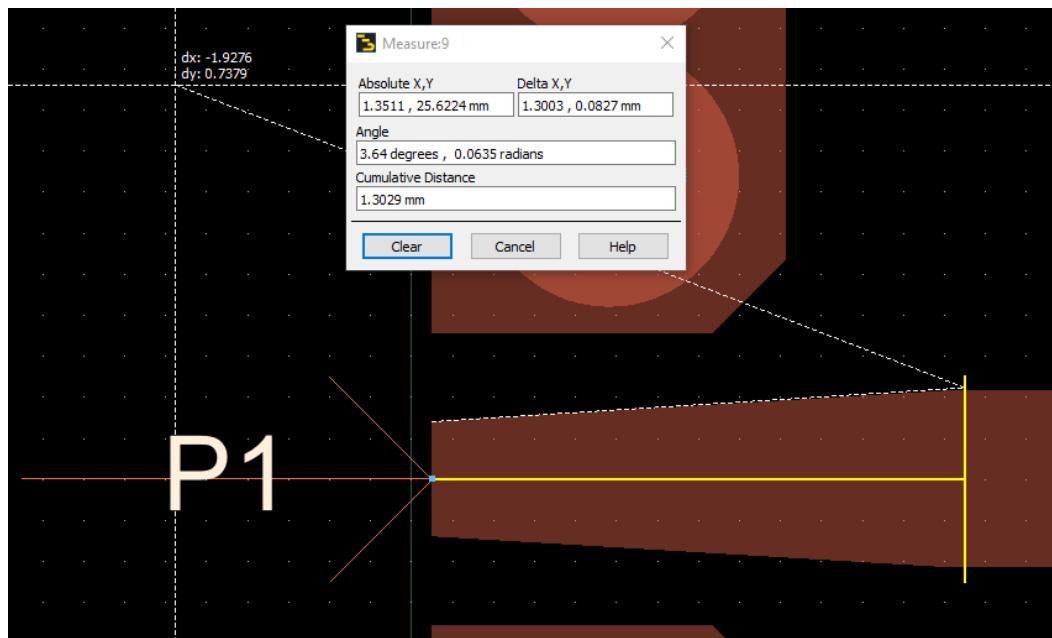
Теперь надо настроить пины. Т.к. для деэмбединга мы планируем использовать встроенный блок De\_EMBEDSnP4, то удобной нумерацией будет следующая – сначала последовательно идут внешние порты (1 – вход платы, 2 – выход платы), затем внутренние (3 – вход устройства, 4 – выход устройства), окончательно земляной (при выбранной EM-подложки впрямую указывать необязательно, земляной слой подключается автоматически).



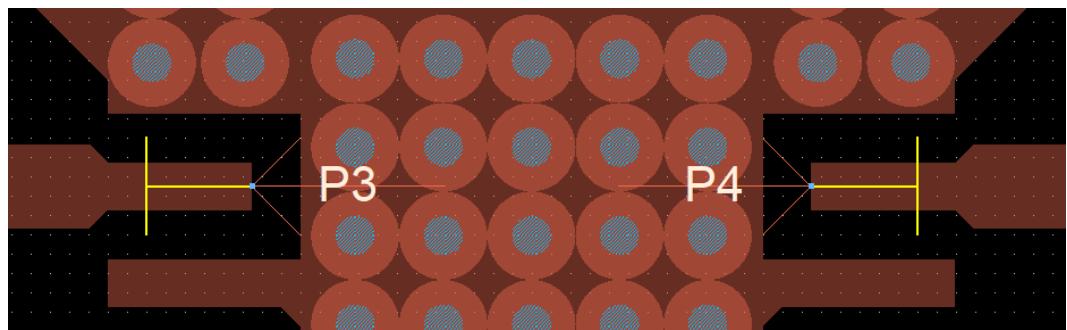
Проставляем пины по ВЧ-проходу.



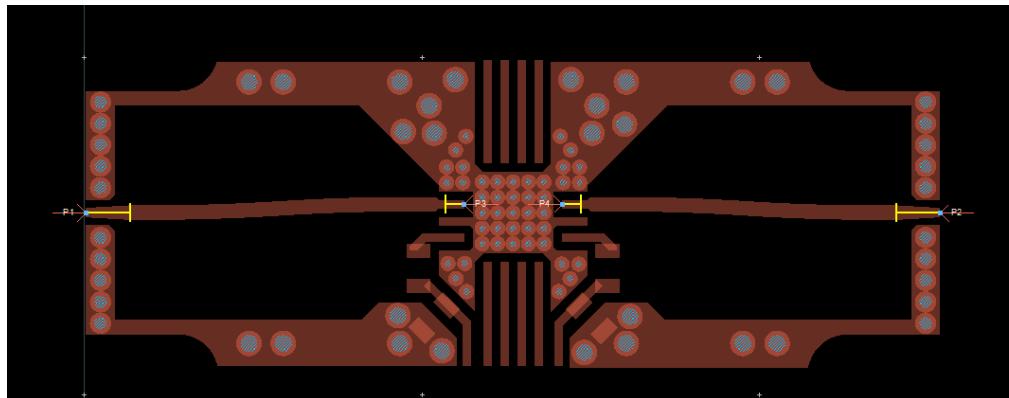
Далее надо настроить калибровки. Для портов имитирующих подключение ВЧ-разъемов (P1 и P2), нам неизвестно положение рефплоскости. Разработчик тестовой платы утверждает, что плата соптимизирована для использованных ВЧ-разъемов. Т.к. для данной микросхемы нам не очень важны фазовые соотношения, то обойдемся простым сдвигом рефплоскости до того места, где микрополосковая линия становится однородной, это приблизительно 1,3мм (свойство Reference plane shift). В этом случае, абсолютным фазовым соотношениям конечно верить нельзя, но относительным фазовым и абсолютным амплитудным можно.



Для портов Р3 и Р3 имитирующих подключение собственно микросхемы выберем удобную для нас позицию рефплоскости по границе корпуса. Ширина корпуса равна 4 мм, в тестовой плате пад переходит в микрополосковую линию на размахе 4,4 мм. Таким образом сдвиг рефплоскости получается 0,55 мм.

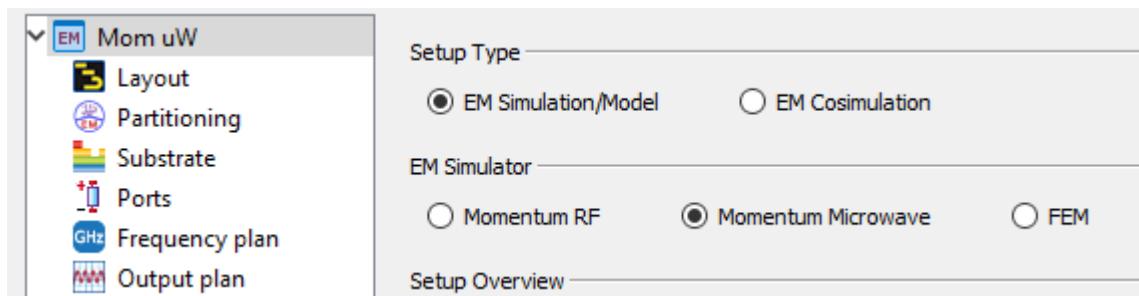


Общий вид подготовленной топологии оснастки получается следующий:

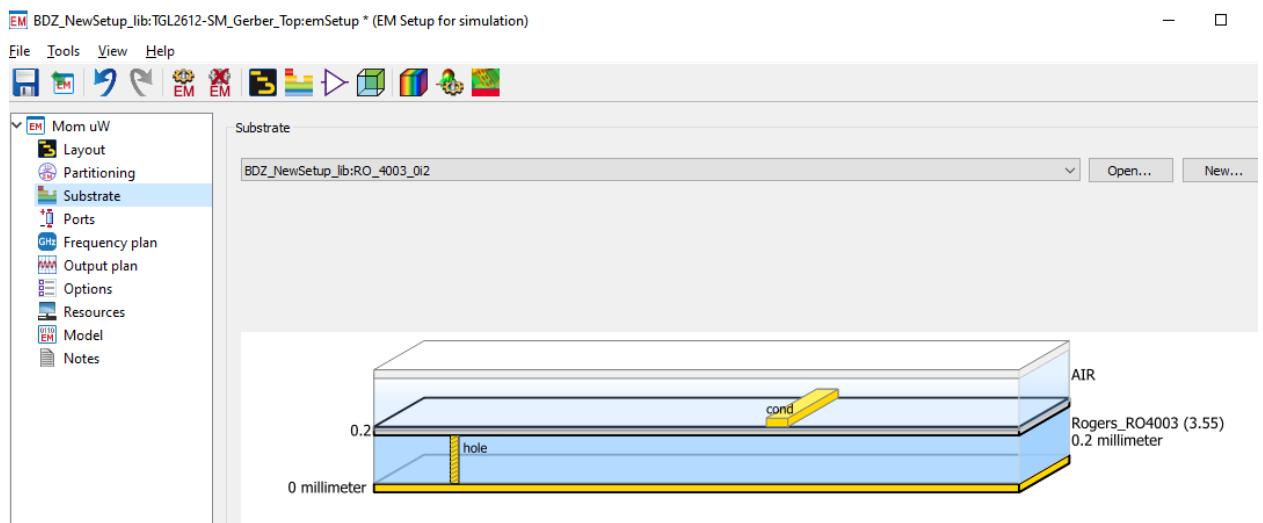


Настроим ЕМ-моделирование.

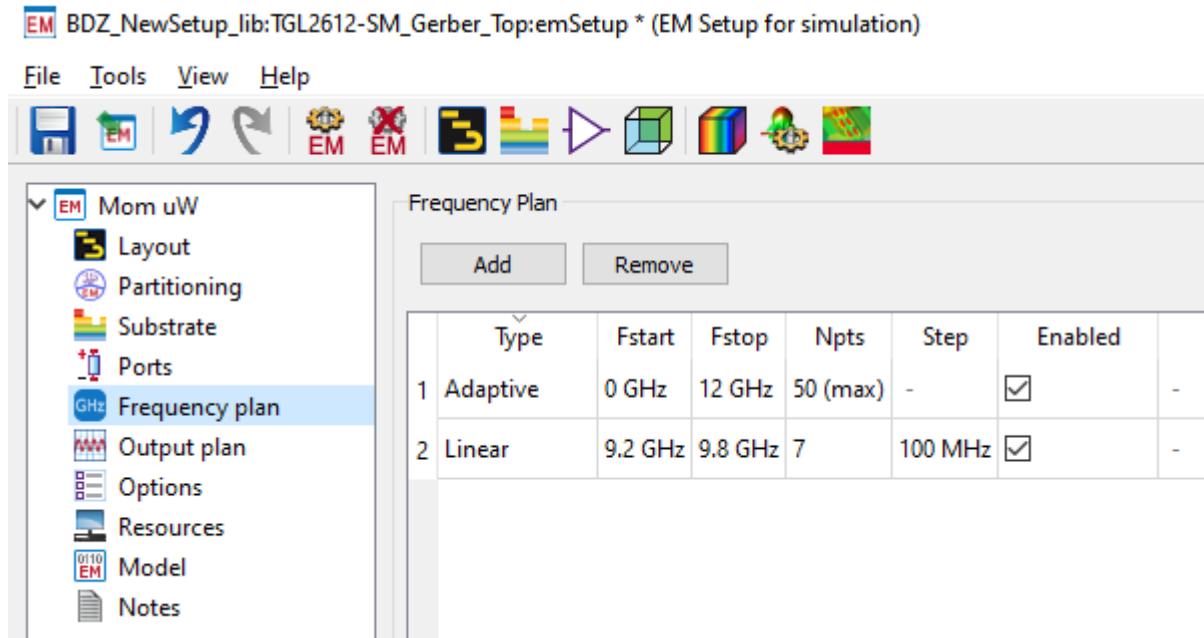
Пусть расчет будет вестись методом Mom Uw.



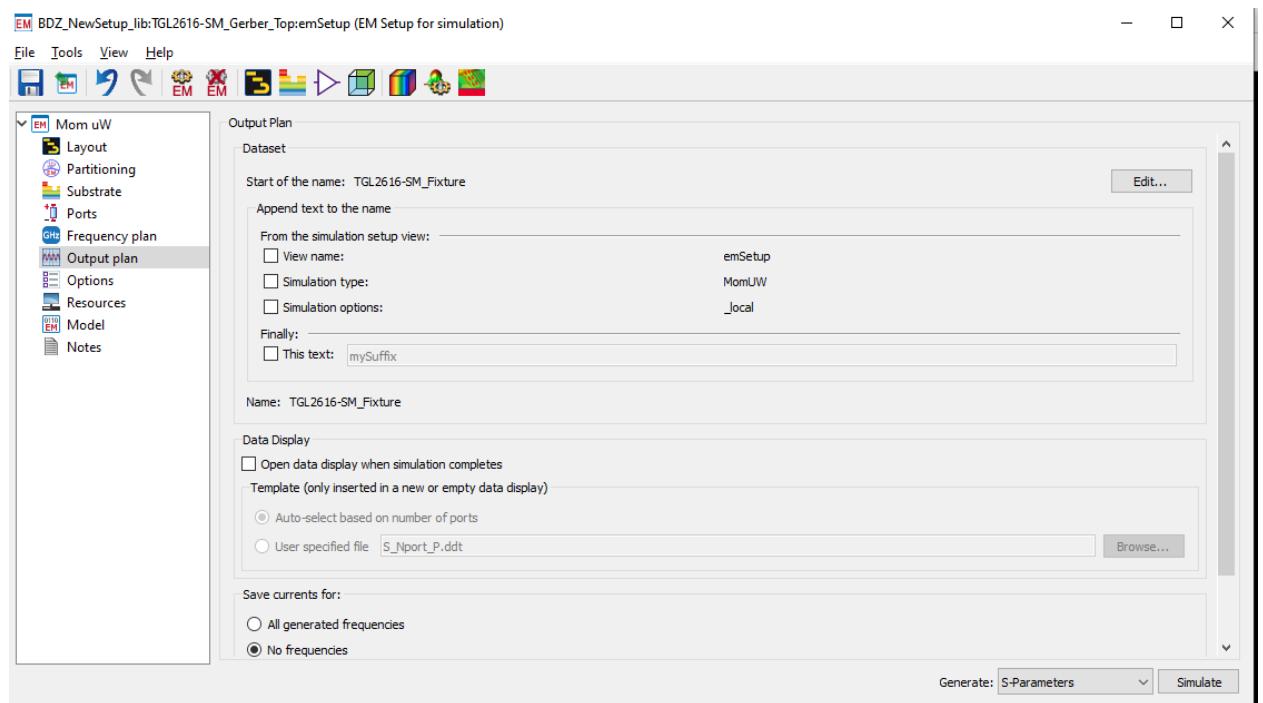
По документации тестовая плата делалась на подложке RO4003 толщиной 8 mil (0,2 мм).



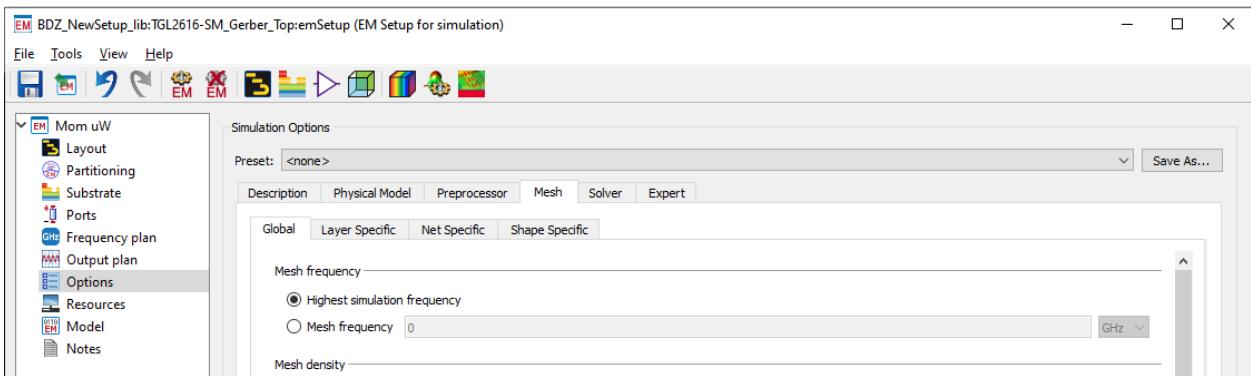
Частоты установим до 12 ГГц, адаптивно, плюс более точная сетка в интересующем нас частотном поддиапазоне.



Сохраним в датасет с именем TGL2616-SM\_Fixture.ds (по кнопке Edit).



Разбиение настроим на 40 ячеек/длина волны и включим краевое разбиение.



emModel для данного случая не нужно, т.к. нас интересует только датасет TGL2616-SM\_Fixture.ds.

После окончания моделирования оснастки настроим схему, в которой настроим деэмбединг S-параметров и соберем все фалы S-параметров в один файл с зависимостью от выставленного ослабления.

Файлы S-параметров имеют именование вида «SN03\_25C\_5V\_Phase%N.s2p», где %N – номер состояния.

Разместим их в подпапке «data/SRC/TGL2616-SM\_5V\_25C\_All Phases/».

Пусть мы хотим, чтобы в собранном файле была зависимость от установленного ослабления. У TGL2616-SM шаг ослабления 0,75 dB, т.е. от 0 до 23,25 dB (32 файла). Назовем переменную ослабления Att.

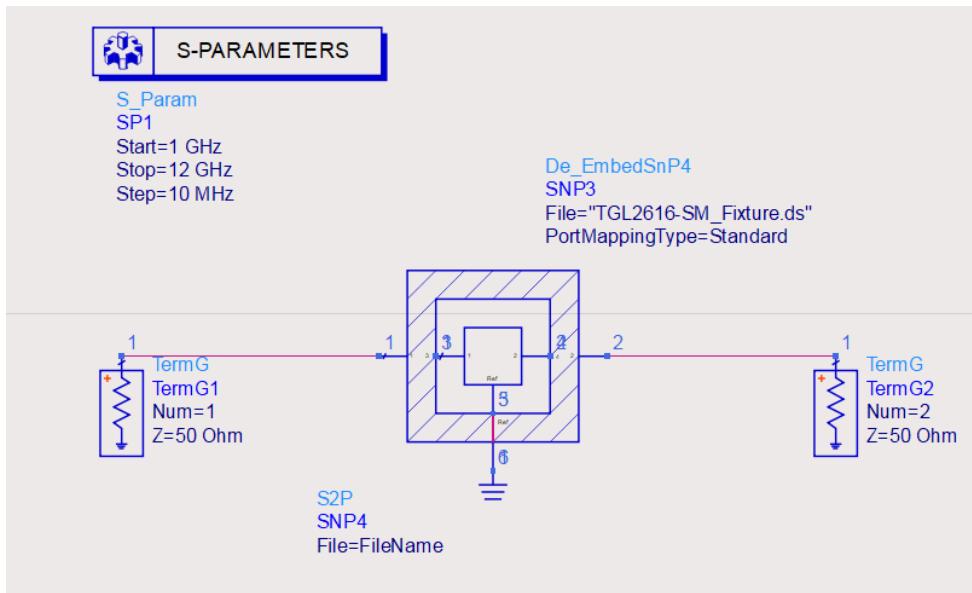
Сделаем свип по переменной Att от 0 до 23,25 с шагом 0,75, и на основании ее будем определять текущее имя файла S-параметров. Сборка строки имени текущего файла FileName делается через склейку строк strcat() и преобразования числа в строку value().

```

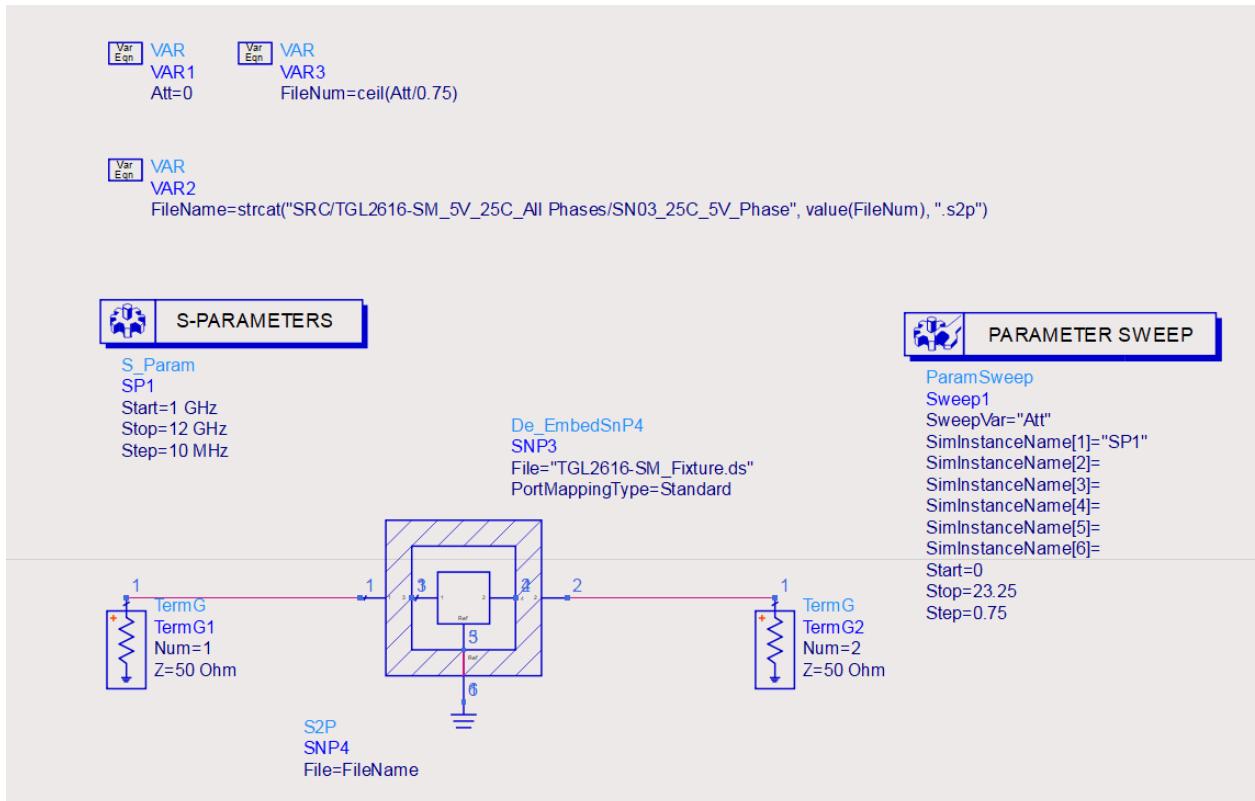
PARAMETER SWEEP
ParamSweep
Sweep1
SweepVar="Att"
SimInstanceName[1]="SP1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=
Start=0
Stop=23.25
Step=0.75
FileName=strcat("SRC/TGL2616-SM_5V_25C_All Phases/SN03_25C_5V_Phase", value(FileName), ".s2p")

```

Для деэмбединга используем блок De\_EmbbedSnP4. К нему привяжем датасет TGL2616-SM\_Fixture.ds как файл-S-параметров оснастки. Внутрь него поместим блок S2P, в который в качестве файла S-параметров привяжем переменную FileName.

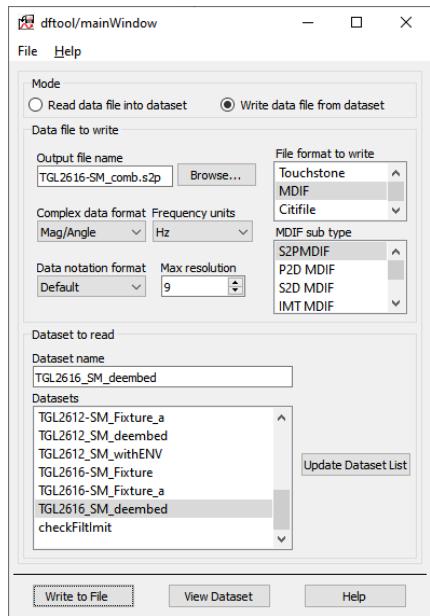


Общий вид схемы перед моделированием.



По окончании расчетов в окне графиков с помощью утилиты Tools – Data File Tool экспортим все результаты в один файл.

В выбираем режим Write data from dataset, в поле Output file name имя скомбинированного файла, в поле File format to write – MDIF подтип S2PMDIF, в поле Dataset to read имя нужного датасета и по кнопке Write to File генерим выходной S2PMDIF файл.

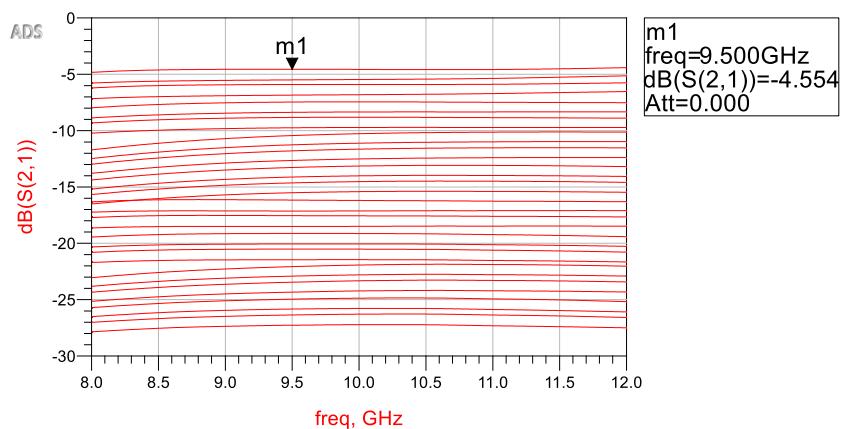


В подпапке data появится файл с расширением s2p, содержащий зависимость от одной независимой переменной Att

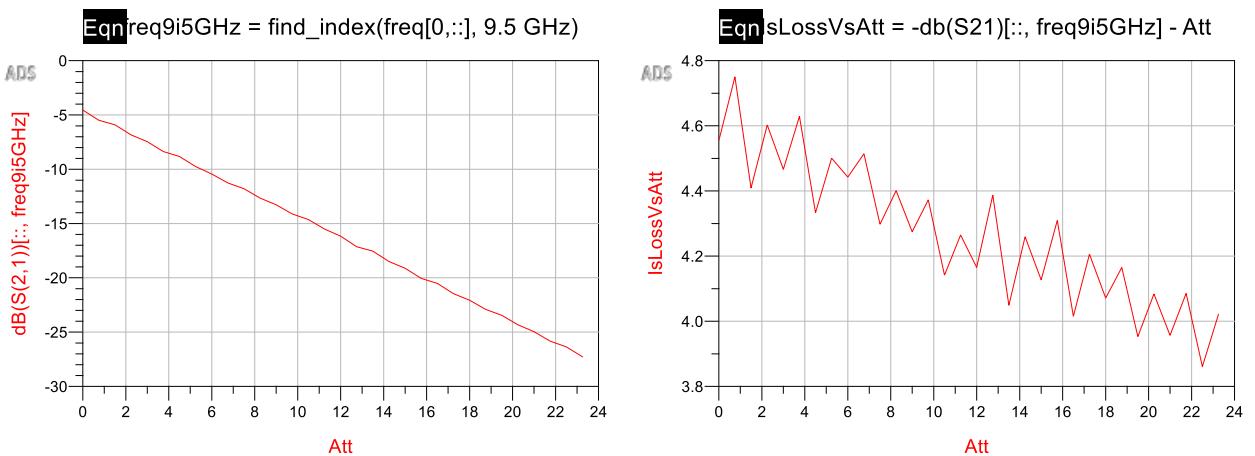
```
TGL2616-SM_comb.s2p - Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
! Created Tue Jul 13 11:24:23 2021
VAR Att = 0
BEGIN ACDATA
# hz S ma R 50
% F n11x n11y n21x n21y n12x n12y n22x n22y
    8e+09   0.101513157   28.1385847   0.573187493   -135.364658   0.572594051
-135.372851   0.0810439895   150.2185   0.573580999   -135.605538   0.573007219
-135.615075   0.081703683   150.597739   0.573974557   -135.846276   0.573420443
-135.857157   0.0823654339   150.978001   0.574200121   -135.88074   0.573933600
    0.02e-00   0.101117603   0.000000000   0.574200121   0.000000000   0.573933600
```

Также проанализируем деэмбеденные S-параметры.

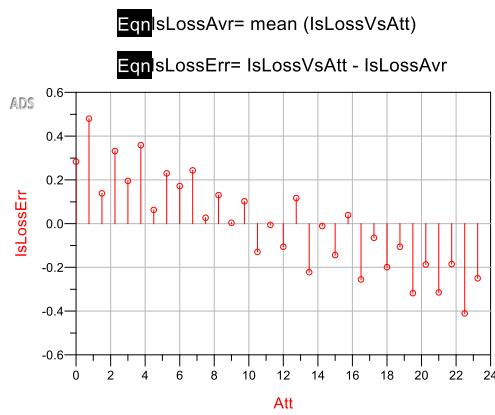
По dB(S21) видно, что потери в нулевом состоянии 4,6 дБ незначительно лучше заложенных на системном уровне 4,8 дБ.



Более подробно оценим поведение на центральной частоте 9,5 ГГц. Также построим зависимость реального ослабления от установленного Att на центральной частоте.

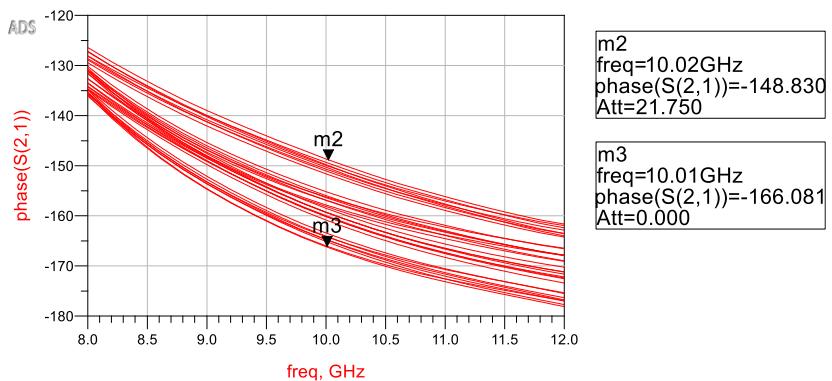


Характеристика выглядит более-менее линейной.  
Вычтем среднее значение дополнительных потерь.



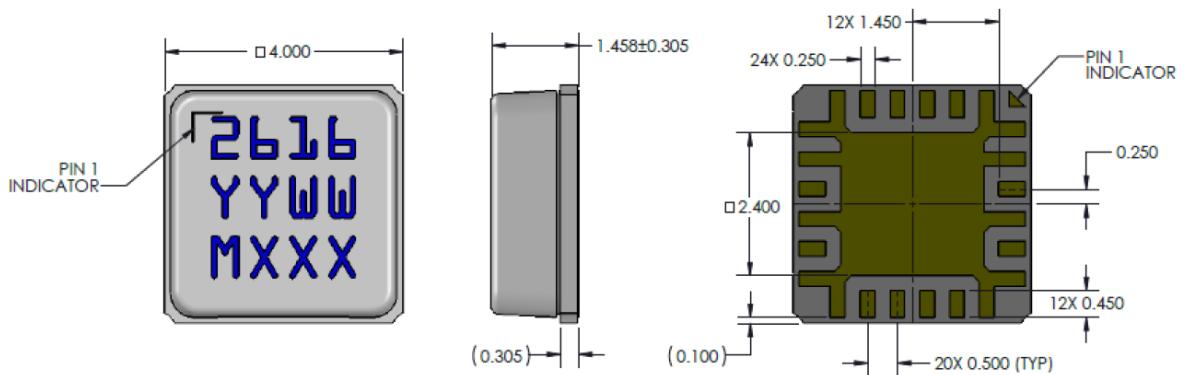
Видно, что ошибка может достигать +0,5..-0,4 дБ от установленного. При шаге в 0,75 дБ это довольно много и в реальном устройстве надо будет отдельно учитывать.

Дополнительно оценим, как влияет переключение ослаблений на сдвиг фазы.

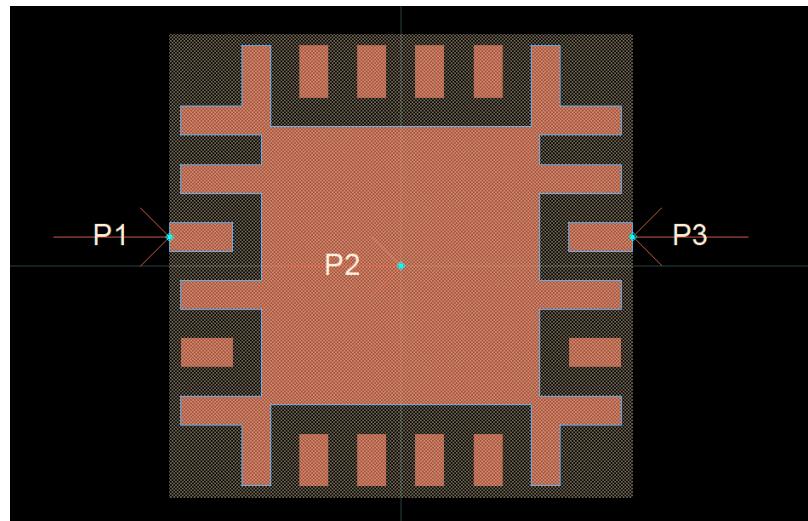
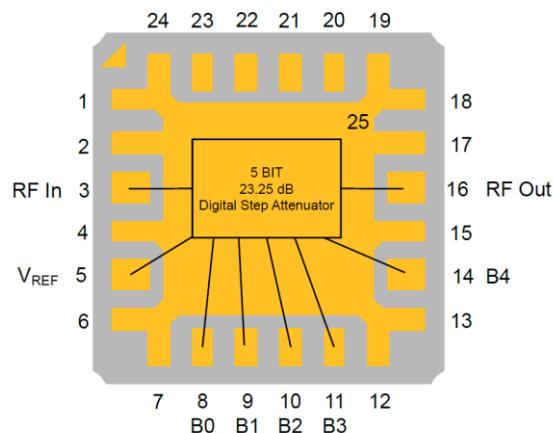


Разброс фазовых сдвигов довольно большой. Это означает, что при построении фазовой программы для каналов кроме работы с фазовращателями надо будет учитывать еще установленное состояние аттенюаторов.

Для контроля топологии создадим посадочное место TGL2616-SM\_Footprint. Основную часть сделаем по чертежу, за исключением падов ВЧ-прохода, их доведем до границы корпуса.

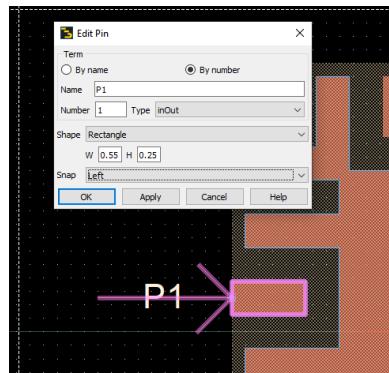


Dimensions are in millimeters



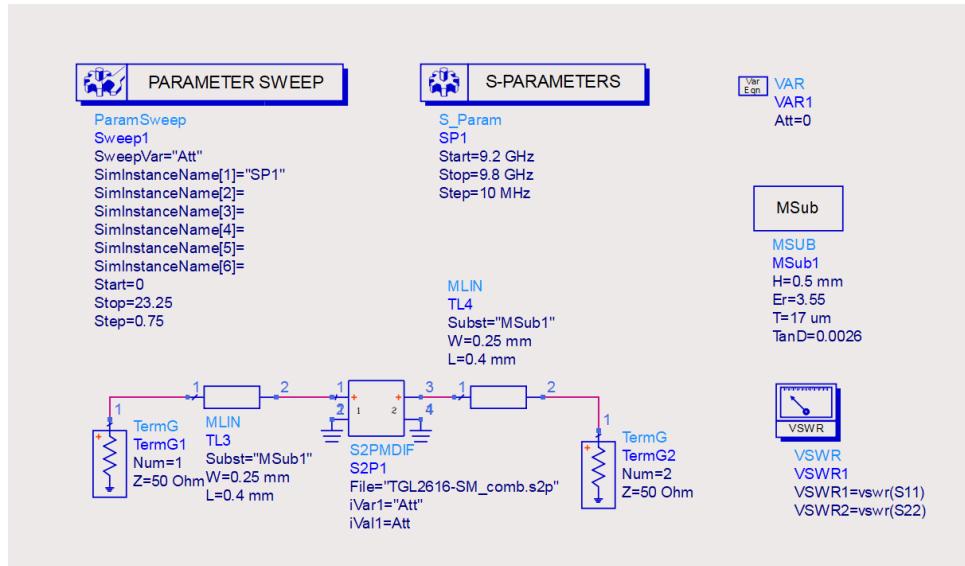
Нумерацию пинов установим такой же как у блока S2PMDIF – P1 (вход), P3 (выход), P2 и P4 (земля).

Пинам P1 и P3 установим точку привязки слева и справа от пада соответственно (чтобы выйти на границу корпуса).

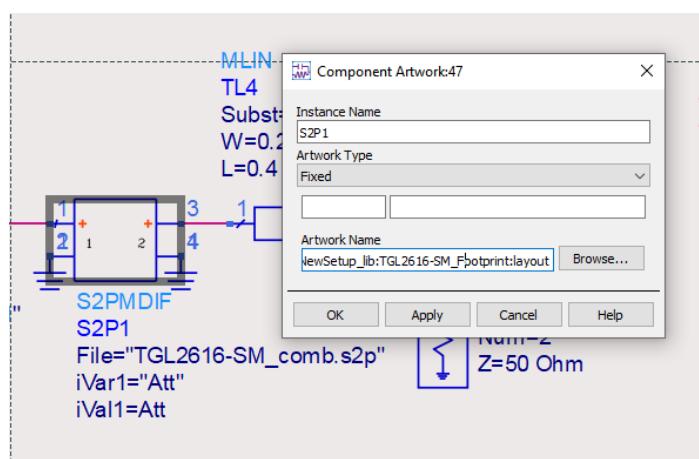


Теперь можно перейти к проектированию подводящих и согласующих линий. Точку подключения мы выбрали ровно по границе корпуса. Но для таких без выводных корпусов пады обычно еще немного выступают за корпус, сделаем подводящую линию +0,4мм шириной пада (0,25 мм).

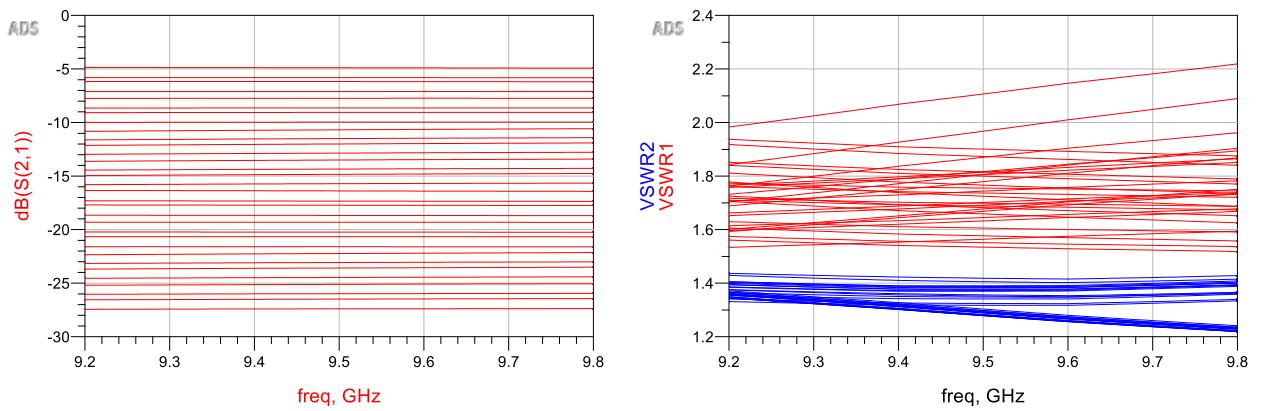
В качестве источника установим блок S2PMDIF для возможности перебора состояний аттенюатора.



Также нужно привязать посадочное место к блоку S2PMDIF

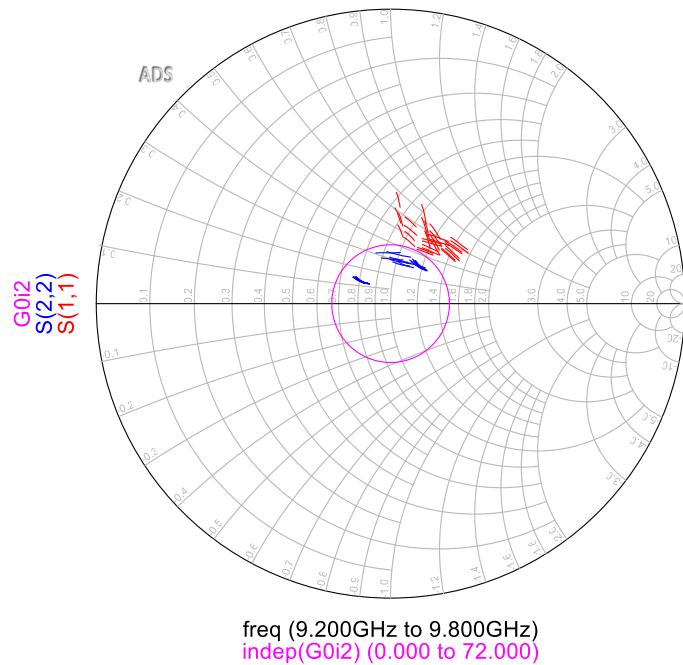


По коэффициенту передачи видно, что аттенюатор управляет и ослабляет как нужно. Однако по КСВН видно, что он сильно рассогласован по входу.



По диаграмме Смита посмотрим поведение S11 и S22, а также добавим туда круг радиусом 0,2 (что соответствует КСВН 1,5).

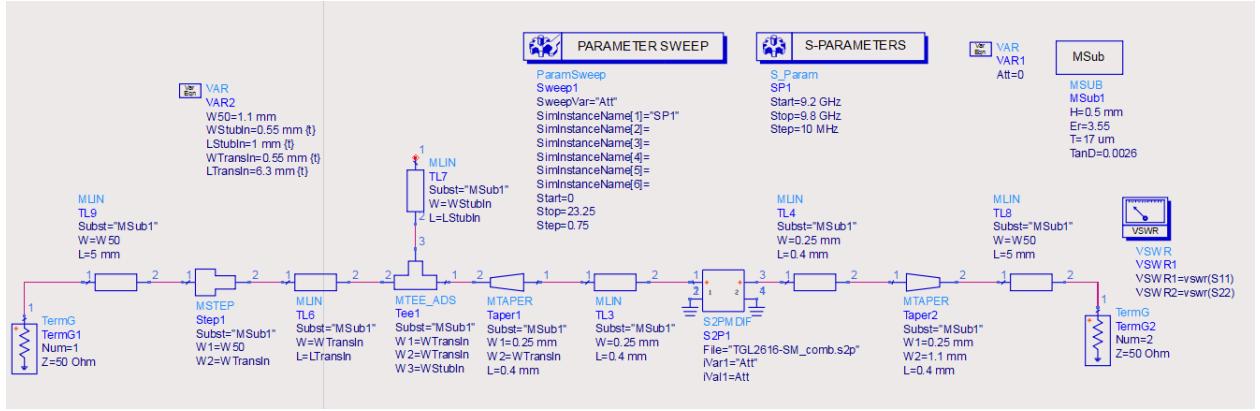
$$\text{EqnG0i2} = \text{polar}(0.2, [0::5::360])$$



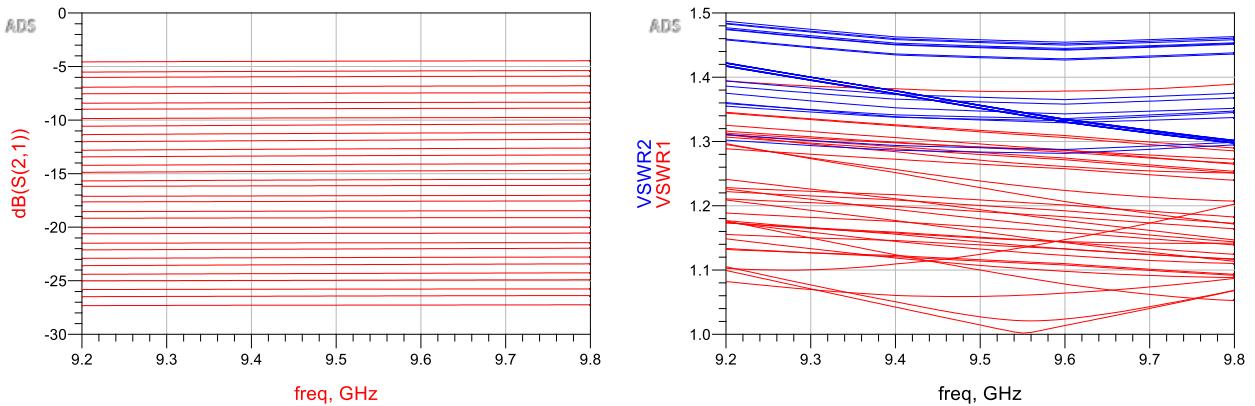
По чертежу из документации видно, что для согласующих цепей типа крест может не оказаться места (выводы 5 и 16 мешают).

Также видно, что выходное согласование гораздо лучше входного. При этом надо учесть, аттенюатор взаимное устройство, т.е. согласующие цепи на входе сильно влияют на выход и наоборот.

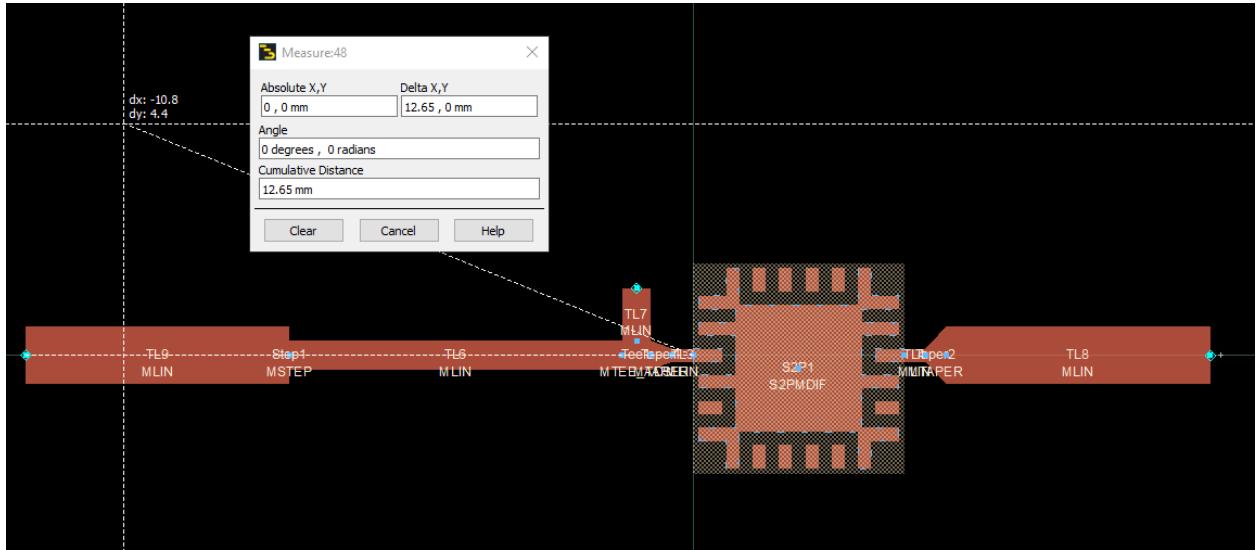
Можно предложить следующую конфигурацию согласующих цепей.



По результатам видно, что согласование прошло успешно.

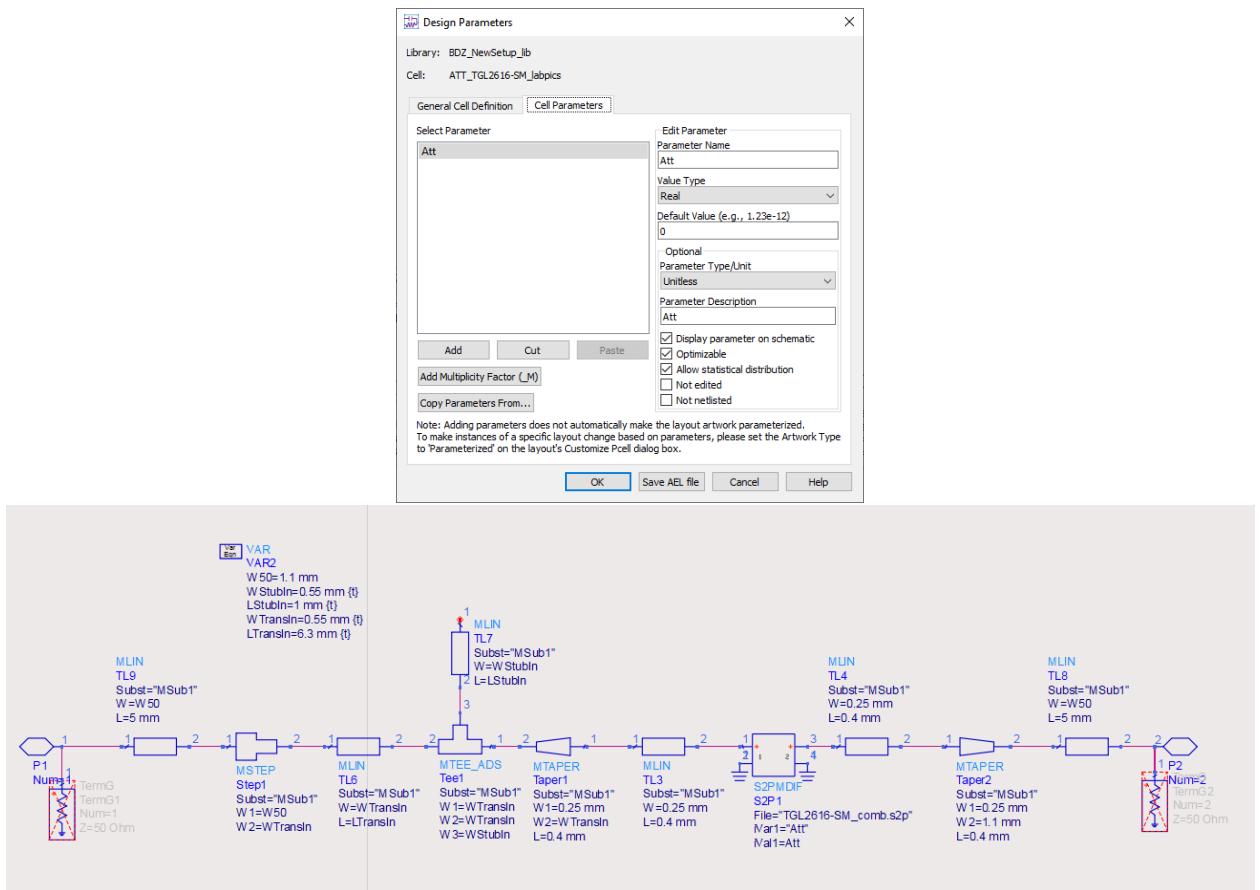


По генерации топологии видно, что выглядит все это прилично.



В схеме TGL2616-SM отключаем (удаляем) все лишнее, оставляем только нужное для полной иерархии.

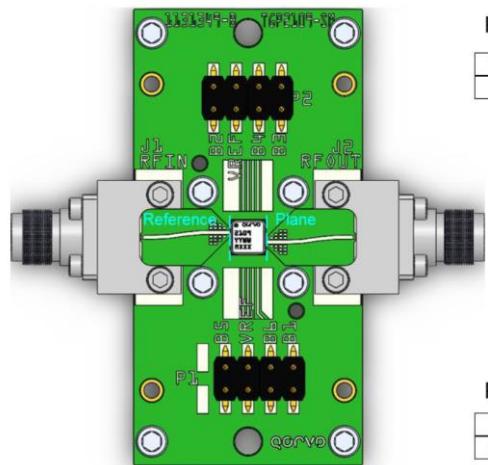
Переменную Att вынесем на уровень ячейки, чтобы можно было управлять аттенюатором с общей схемы.



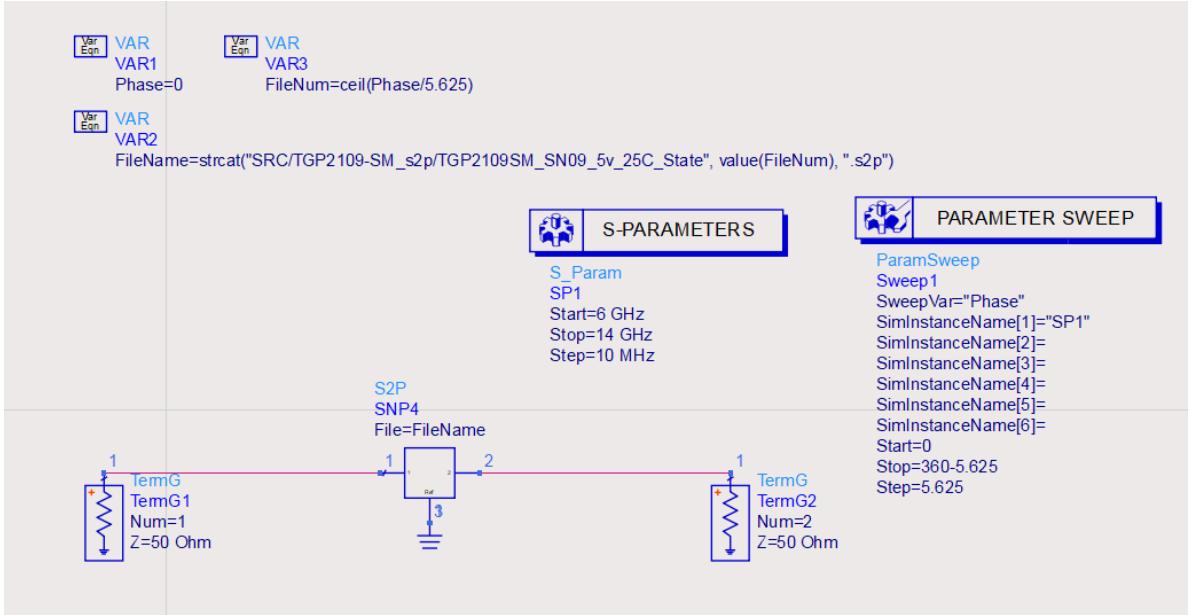
Аттенюатор TGL2616-SM готов.

### Фазовращатель TGP2109-SM

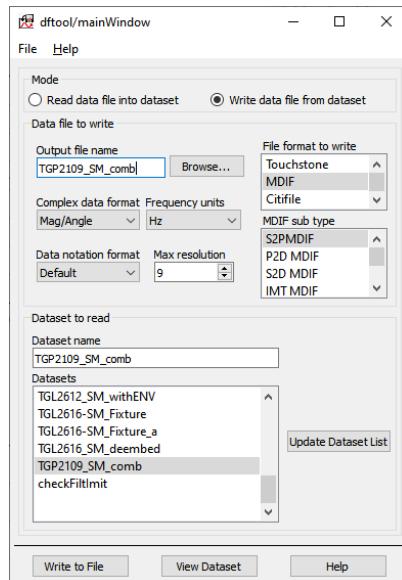
В документации на фазовращатель указано, что S-параметры приведены относительно рефлоскости, которая совпадает с границей корпуса. Деэмбединг проводить не дано.



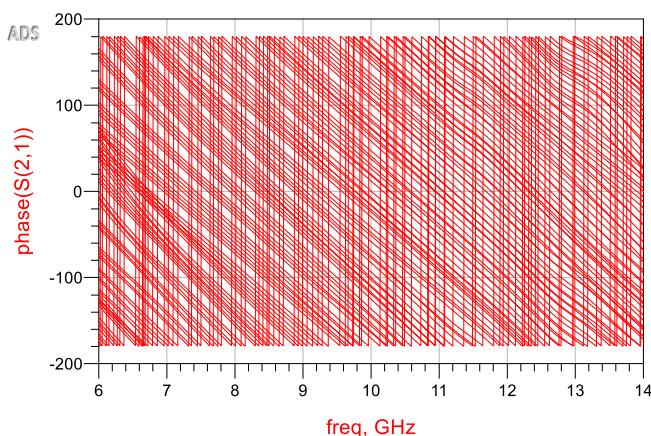
Файлы S-параметров представляют собой архив с именованием вида «TGP2109SM\_SN09\_5v\_25C\_State%N.s2p», где %N – номер состояния. Воспользуемся временной схемой для объединения всех файлов в один S2PMDIF-файл.



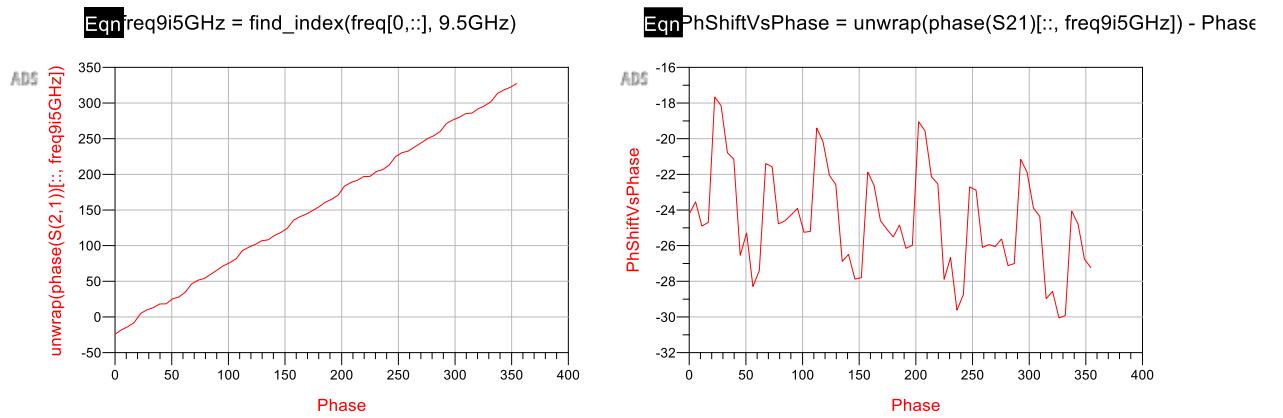
В области графиков с использованием Data File Tool соберём результат в один файл типа S2PMDIF.



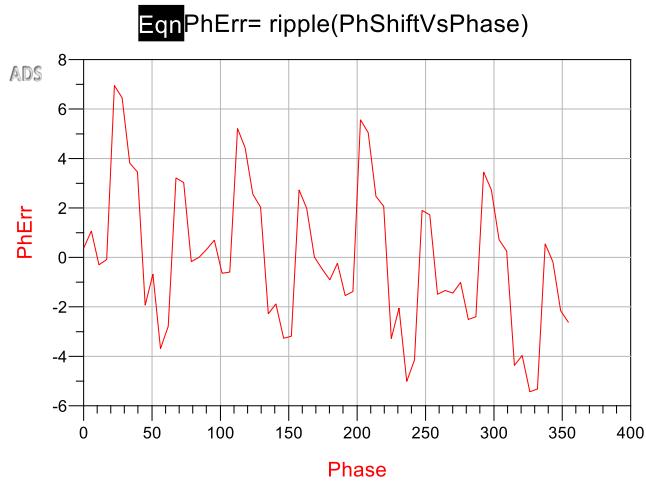
Также проанализируем S-параметры с точки зрения применимости как фазовращателя на центральной частоте 9,5 ГГц.



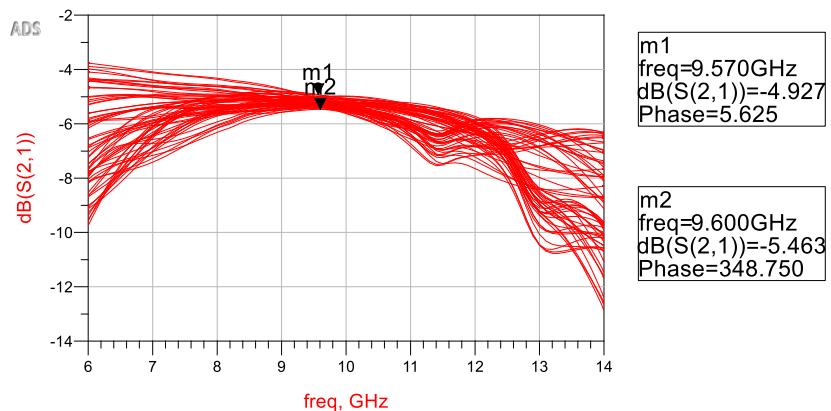
По графику фазовых соотношений видно, что переключение сдвигов фаз идет. Проверим их качество на центральной частоте. Зависимость близка к линейной.



Оценим ошибку установки фазы (от среднего). Она получится  $+7\ldots-5^\circ$ .

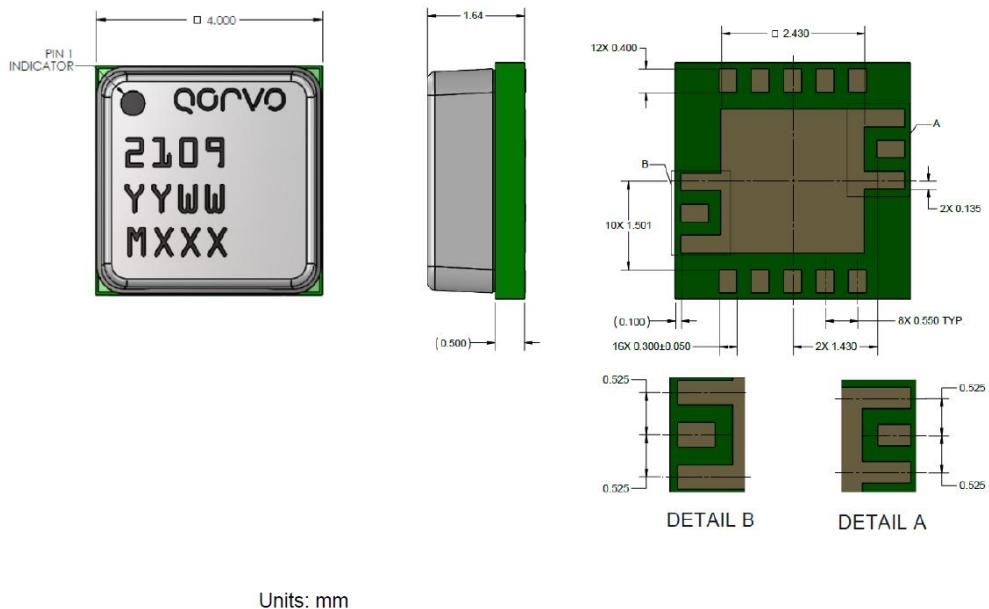


Дополнительно оценим, как меняется коэффициент передачи в зависимости от установленной фазы. Разброс потерь достигает 1 дБ. С учетом планируемого шага установки ослабления в 0,75 дБ это означает, что при формировании программы ослаблений надо будет учитывать и изменяемые потери на фазовращателях.



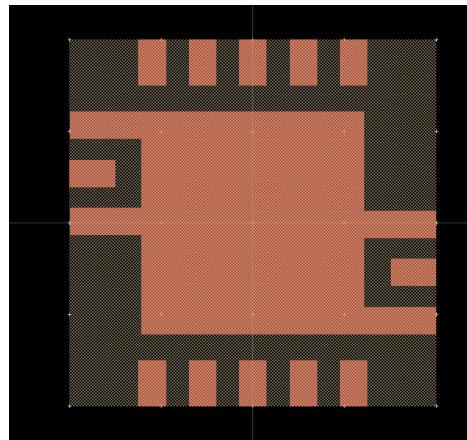
Создадим посадочное место для фазовращателя (ячейка TGP2109-SM\_Footprint).

TGP2109-SM имеет корпус Pullback PLCC с шагом между ВЧ- и земляными выводами 0,54 мм и шириной выводов 0,3 мм. Увеличим длины выводов до края корпуса.

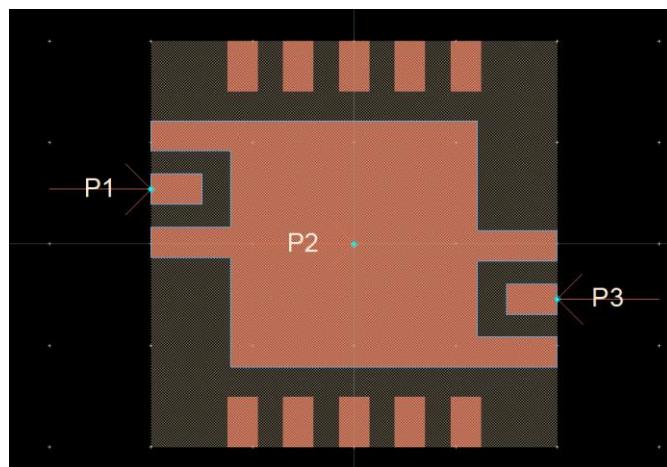


Units: mm

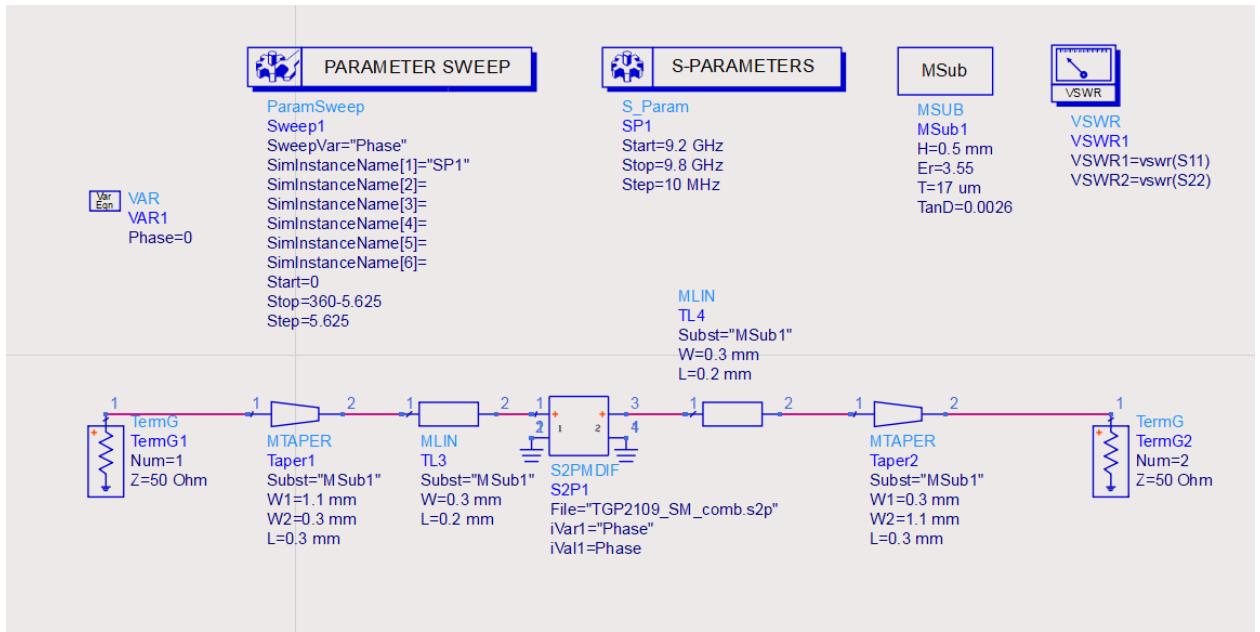
Посадочное место выглядит следующим образом



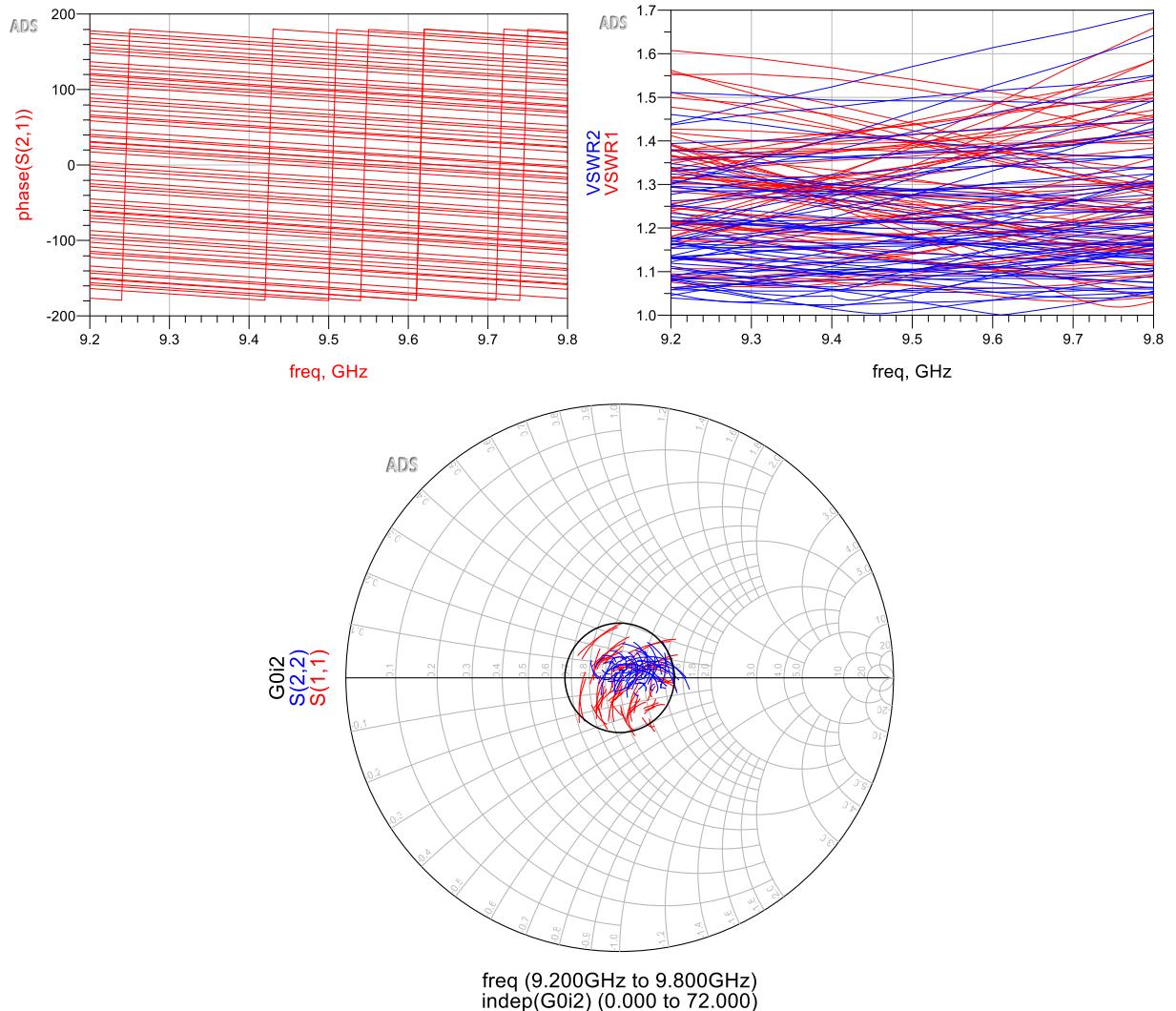
Привязывать мы его будем к блоку S2PMDIF, т.е. вход P1, выход P2, земля P3. Причем у пинов P1 и P3 точка привязки слева и справа соответственно.



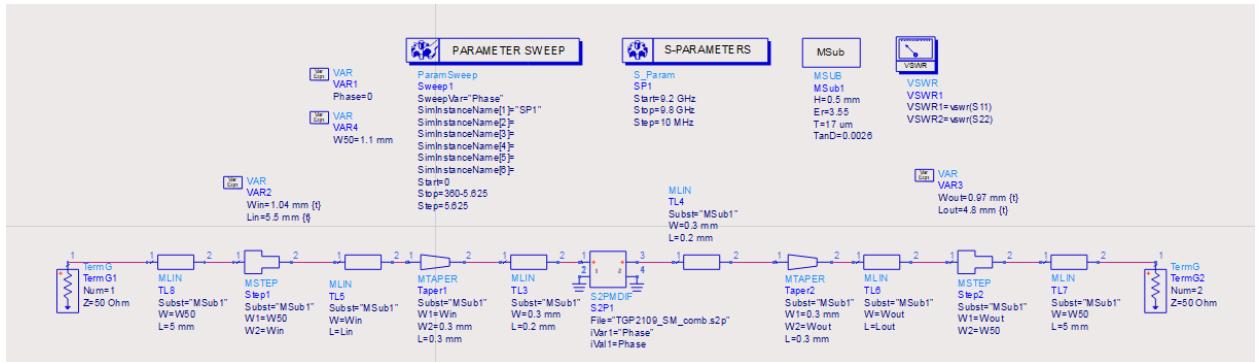
Создадим схему для моделирования с учётом подводящих линий.



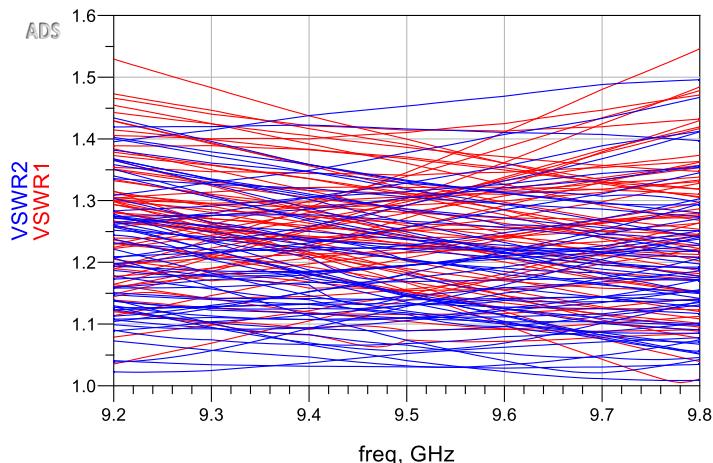
По результатам моделирования видно, что S11 и S22 сгруппированы в четкие облака. Эти облака равномерно расположены вокруг центра диаграммы Смита.



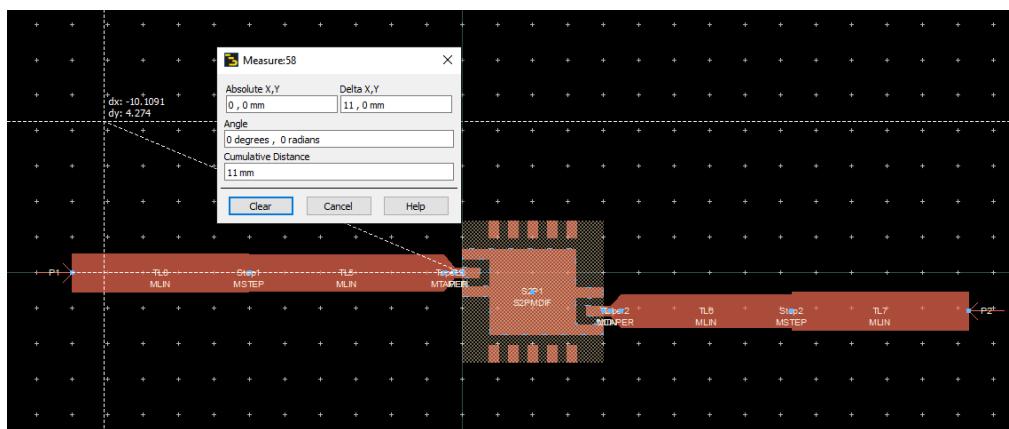
Данное расположение говорит о том, что параллельные шлейфы практически бесполезны, лучшего можно достичь только за счет последовательных шлейфов как вносящих некоторые потери. Можно предложить следующую цепь согласования.



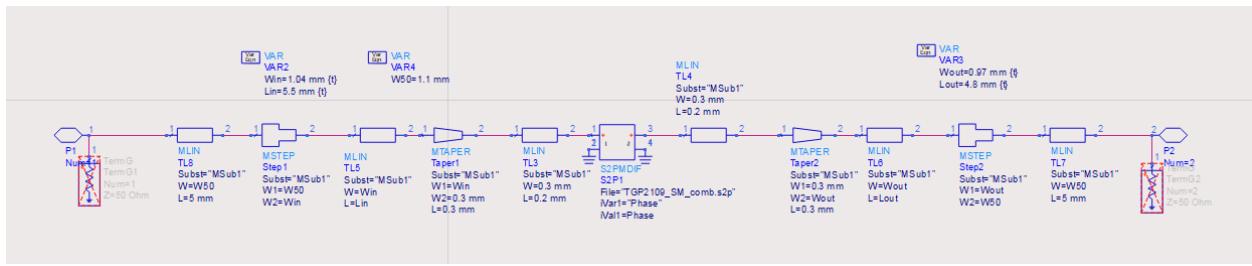
По результатам видно, что только два состояния фазовращателя по выходу выходят за пределы КСВН  $\leq 1.5$ . Но это устройство находится далеко от выхода, поэтому пока проигнорируем эту проблему.



По генерации топологии видно, что выглядит она прилично. Размеры согласующих цепей не превосходят 12 мм.



Закончим с фазовращателем TGP2109-SM, отключаем (удаляем) все лишнее, оставляем только нужное для полной иерархии. Переменную Phase выносим на уровень параметров ячейки.

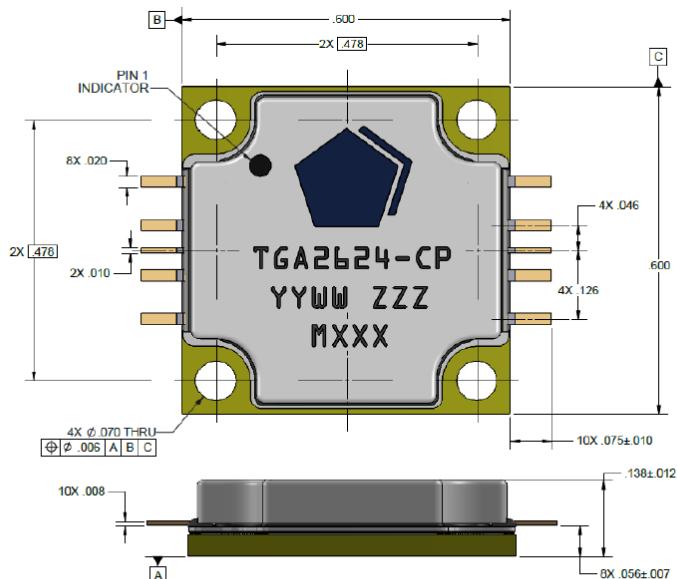


### Усилитель TGA2624-CP

Корпус TGA2624-CP – керамический, располагаемый в вырезе платы, к линиям подключается вынесенными ножками

Для выходного усилителя нигде не указано, относительно каких рефлоскостей приведены S-параметры. Воспользуемся стандартным решением - для корпусов такого типа (на фланце) как правило рефлоскость располагают ближе к корпусу на расстоянии 0,4-0,08 мм. Это также характерное расстояние для минимального зазора от металла на плате до границ вырезов в плате при фрезеровке.

Подготовим посадочное место. Размеры в документации приведены в дюймах.



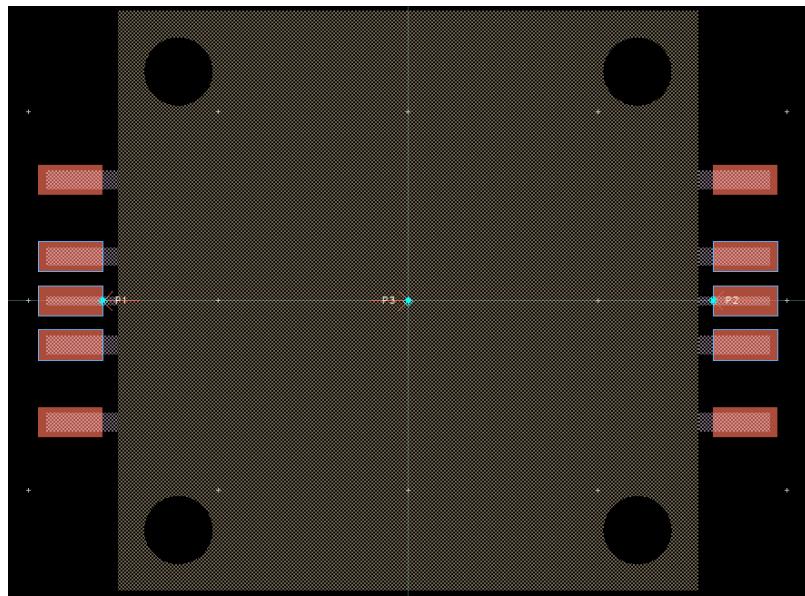
Units: inches

Основной корпус будем рисовать в слое packages (квадратом 15,3x15,3 мм с указанием отверстий).

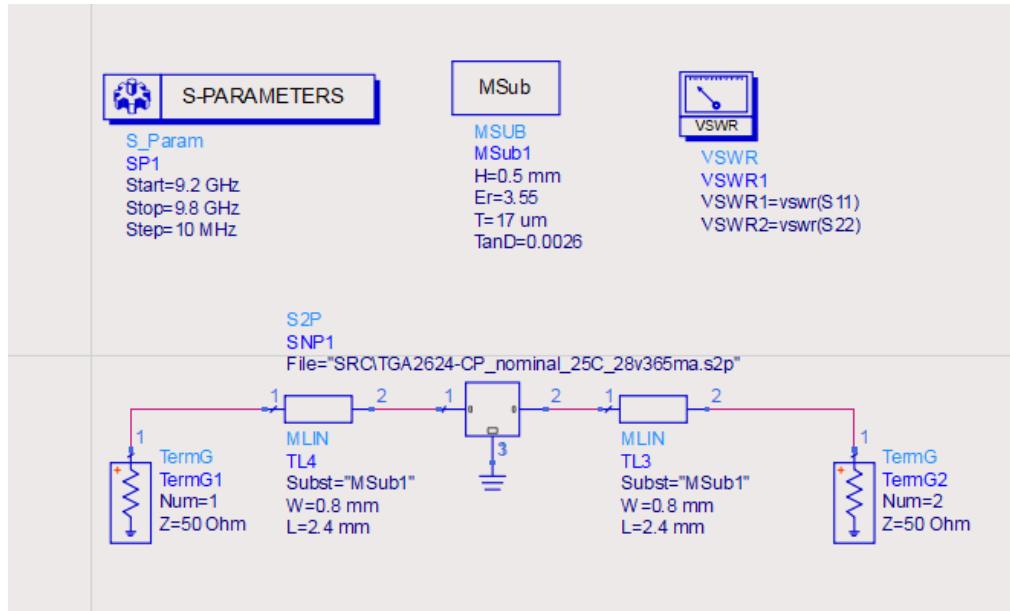
Выводы будем рисовать в слое leads. Выводы ВЧ-прохода это прямоугольники 0,25x1,9 мм, выводы земли, питания и смещения 0,5x1,9 мм.

Пады будем рисовать сдвинутыми относительно основного корпуса на 0,4 мм, прямоугольниками 0,8x1,7 мм. ВЧ-пады сделать сразу 50 Омными (1,1 мм) не получится, не хватает зазора.

Окончательно разместим пины. Р1 и Р2 – ВЧ-проход, точка подключения на 0,4 мм отстоит от корпуса. Р3 – земляные пады.



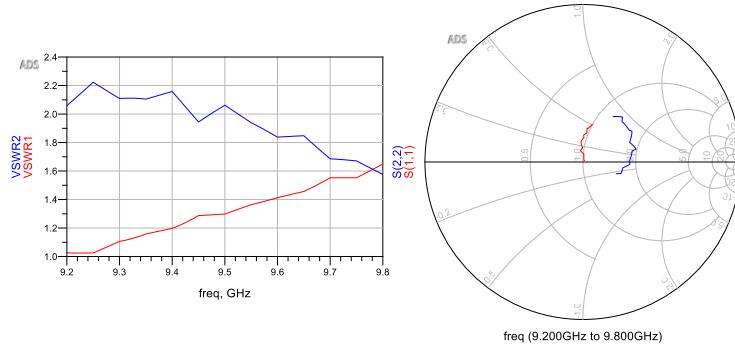
Соберем базовую схему для оценки параметров TGA2624-CP. Выводящие линии сделаем шириной по 0,8мм, длиной чуть длиннее выводов (2,4 мм).



По результатам моделирования коэффициент усиления близок к заявленному.

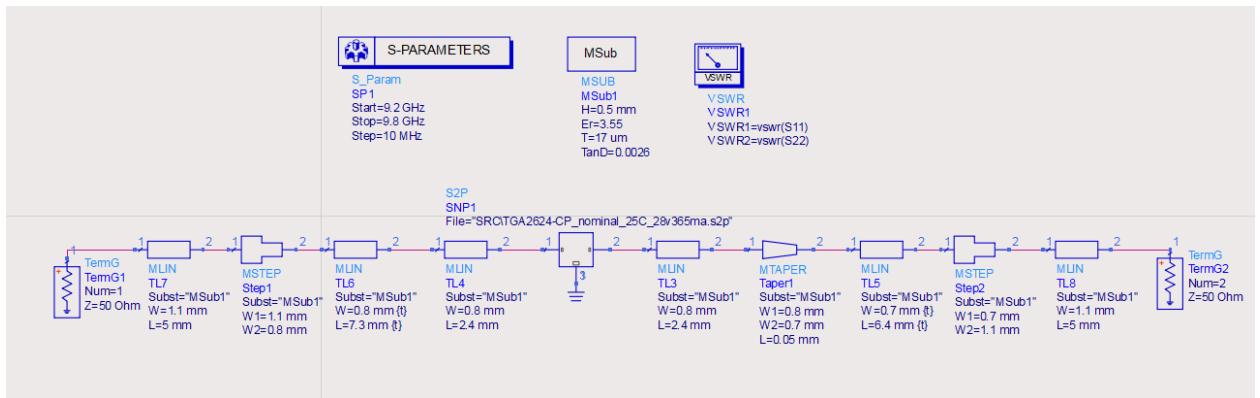


Оценим согласование.

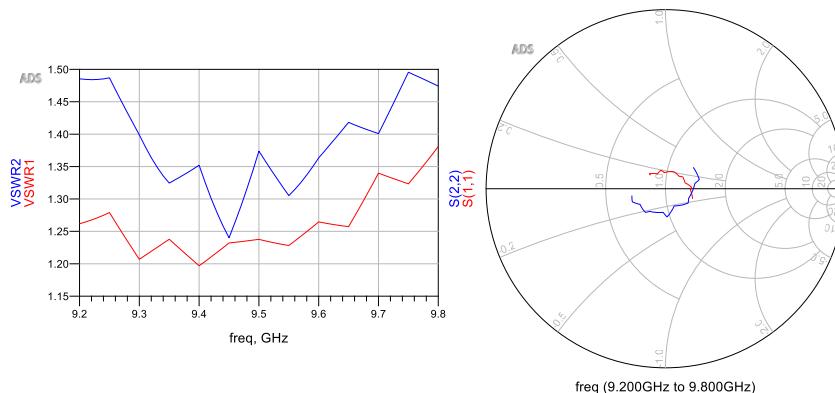


Согласование недостаточно, но линии группируются близко к действительной оси. Значит можно попробовать последовательные шлейфы.

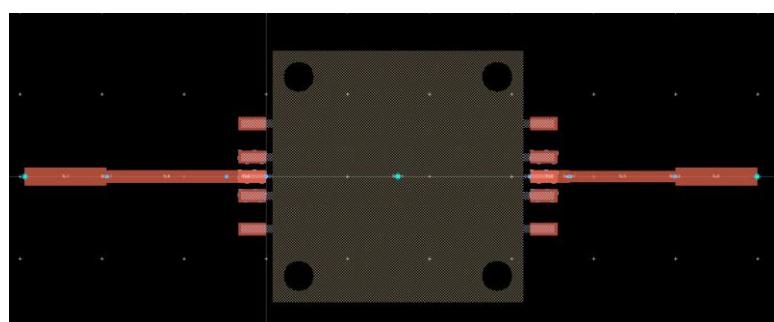
Как финальная получается следующая схема согласования.



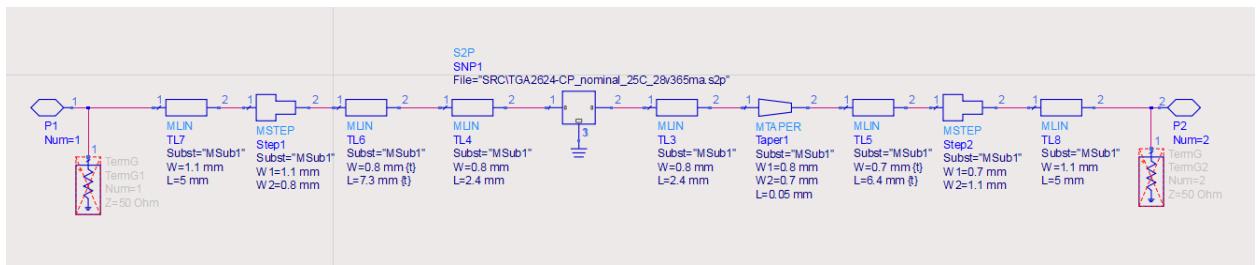
По результатам теперь видно приемлемое согласование.



Сгенерированная топология тоже выглядит прилично.



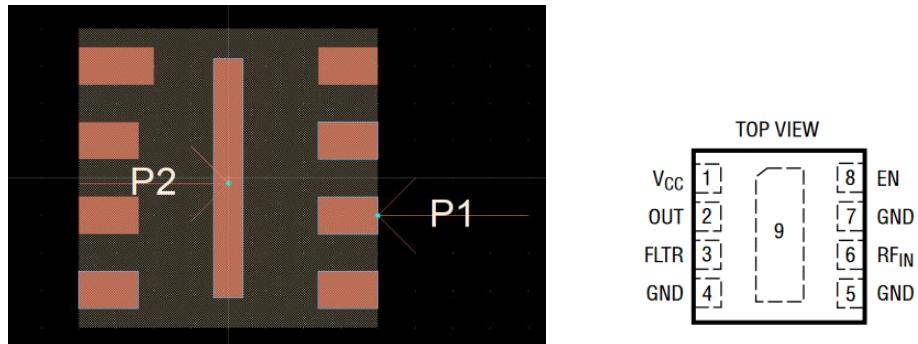
Оставляем только необходимое для включения модели TGA2624-CP в общую модель.



### Подсхема детектора мощности LTC5596 с направленным ответвителем

Корпус LTC5596 – DFN (SON), без выводной. В документации указано, что S-параметры деэмбедены, но не указано к какой рефлоскости. Обычно это означает, что они приведены к границе корпуса. Также S-параметры приведены в формате S1P, т.к. у детектора мощности только один ВЧ-вход.

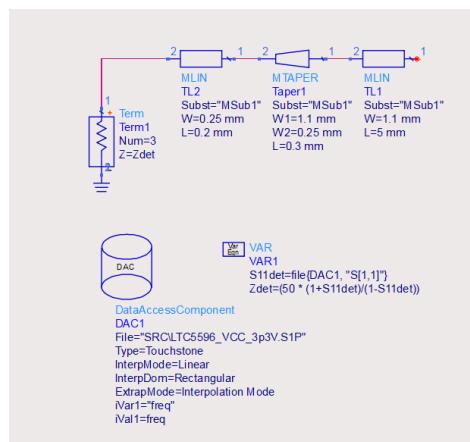
Создадим посадочное место для LTC5596. Привязывать его мы будем к терминатору, поэтому ВЧ-вход пин 1 (пад 6), земля – пины 4, 5, 7 и 9.



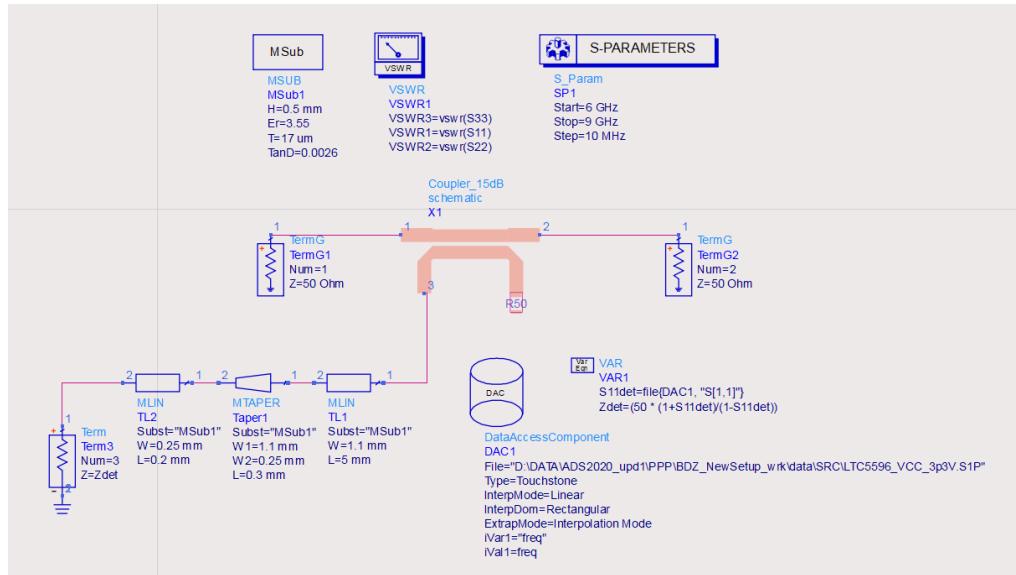
Обычно в схеме используют блок S1P, но мы хотим еще смотреть на КСВН со стороны детектора. Поэтому надо использовать терминатор с частотозависимым комплексным сопротивлением. Для этого воспользуемся промежуточной выгрузкой S-параметров через блок DAC в переменную S11det с последующим пересчетом в Zdet.

Также к нужному терминатору нужно привязать посадочное место детектора мощности.

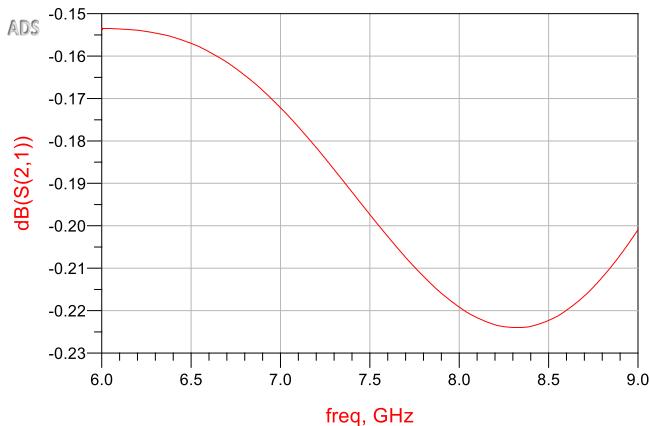
Ширина пада 0,25 мм, точка подключения по границе корпуса. Добавим небольшой участок длиной 0,2 мм с переходом в ширину 1,1 мм.



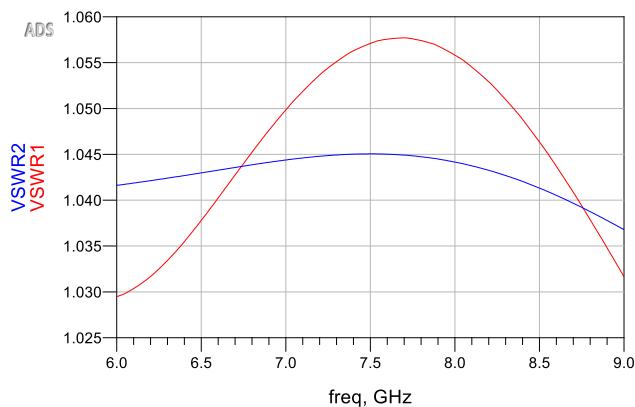
Добавим в схему направленный ответвитель. Он немного изменен по отношению к стандартной схеме, чтобы основной проход был прямым. На четвёртом выходе сразу висит резистор на 50 Ом на землю.



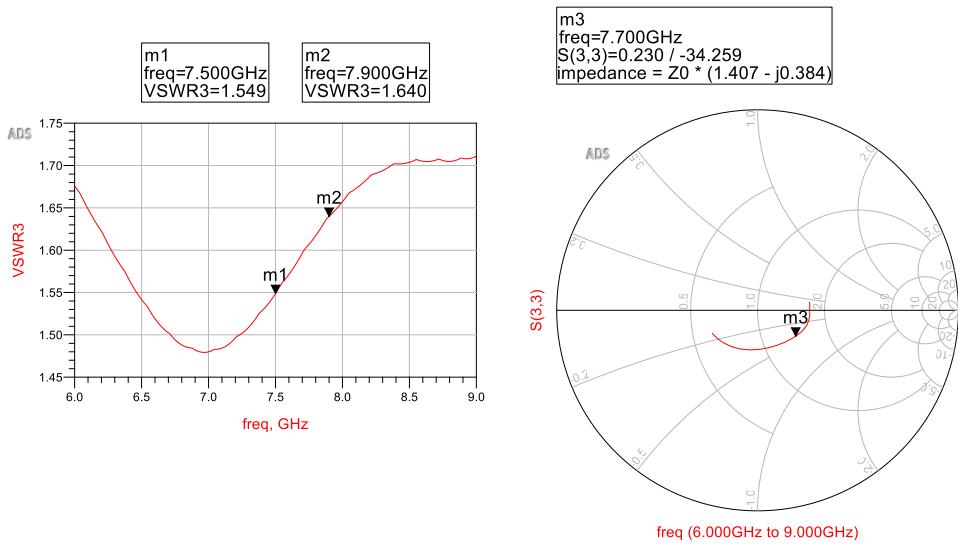
По результатам моделирования видно, что рабочее ослабление незначительно меньше 0,5 дБ заложенных на этапе системной модели.



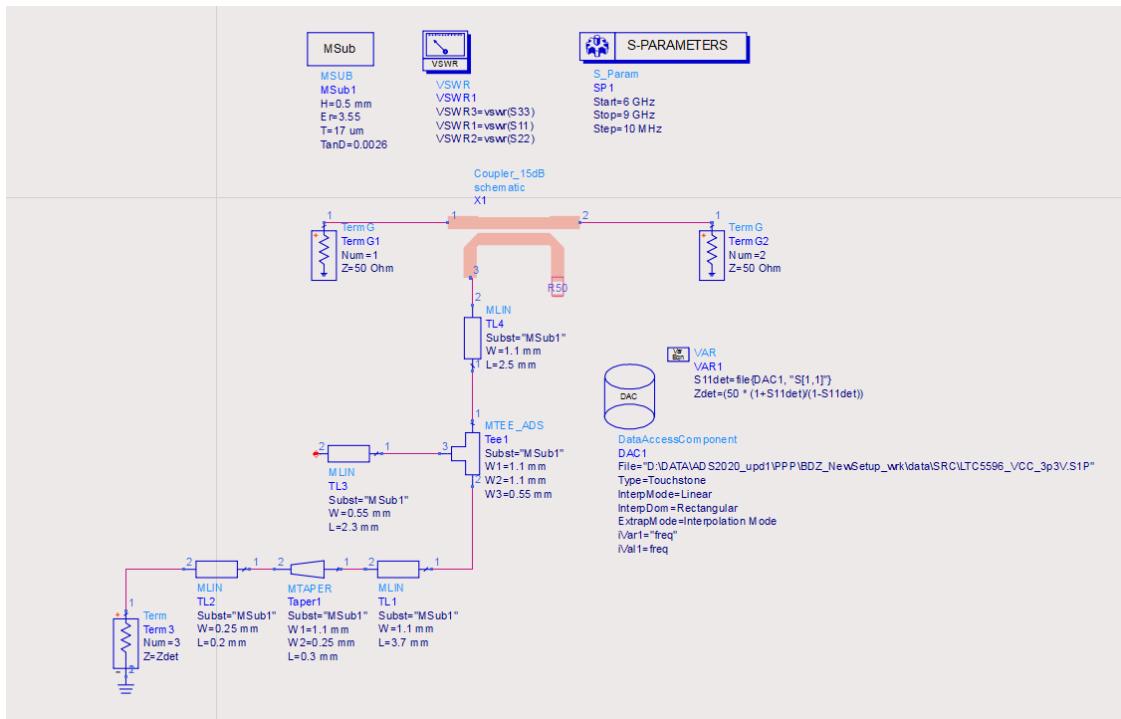
По основному проходу видно хорошее согласование.



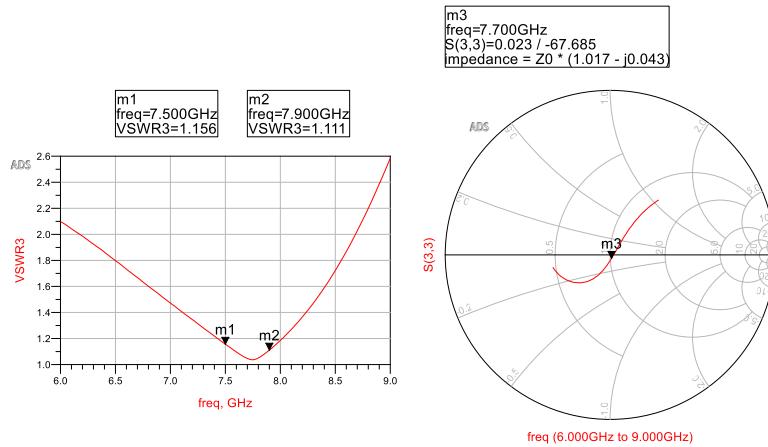
По КСВН и S33 для детектора мощности видна небольшая реактивность, ее можно скомпенсировать параллельным шлейфом.



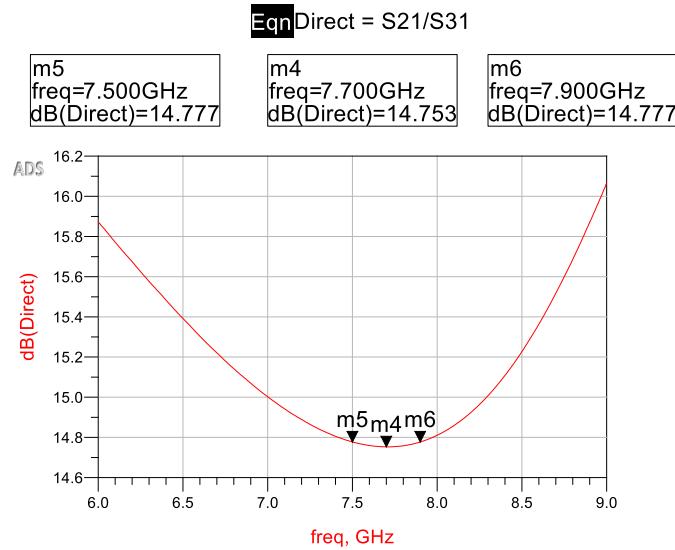
Можно предложить следующую схему.



По результатам отличное согласование.



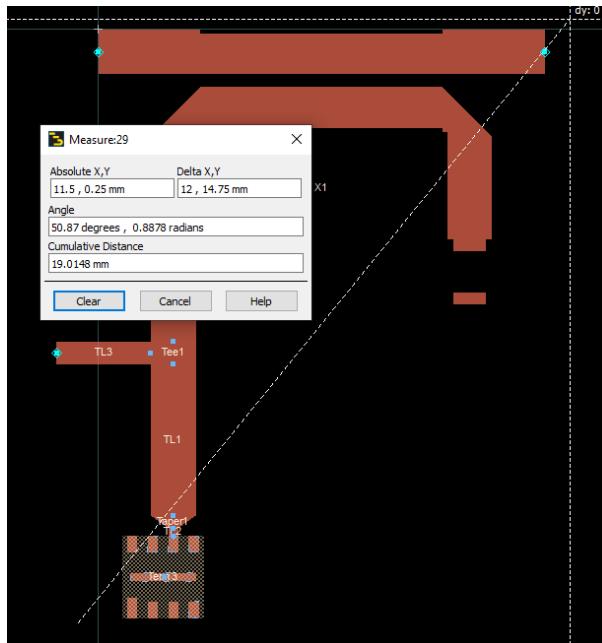
Для схемы детектирования мощности значимой является отношение мощностей между основным и ответвленным плечами, т.к. оно показывает, как различаются показания детектора от реальной выходной мощности (с учетом неидеальности направленного ответвителя). Для текущей схемы это  $\text{dB}(\text{S21/S31})$



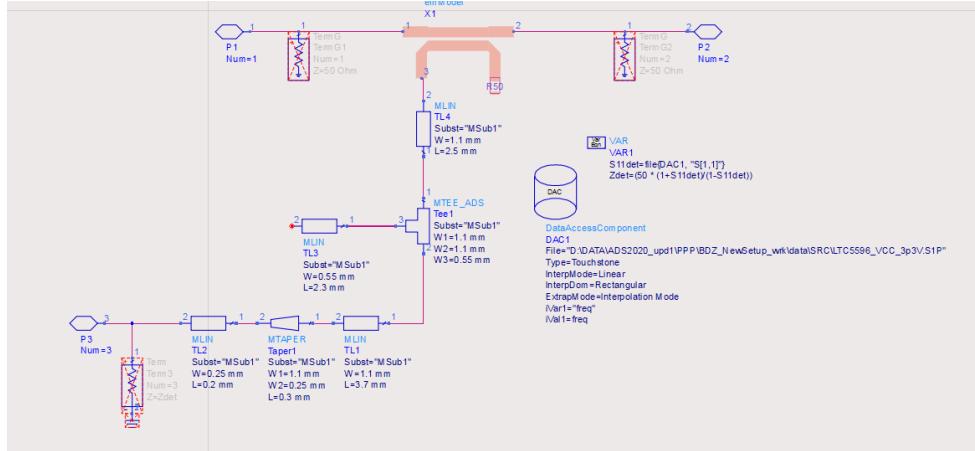
Видно, что отношение S21/S31 почти точно равно 14,8 дБ, данное число надо будет закладывать в учет показаний детектора мощности.

Также отношение S21/S31 надо будет смотреть для всей финальной схемы.

Дополнительно проконтролируем полученную топологию. Она имеет разумный размер 12x14 мм.



По окончании работы с подсхемой детектора надо будет убрать все лишнее.

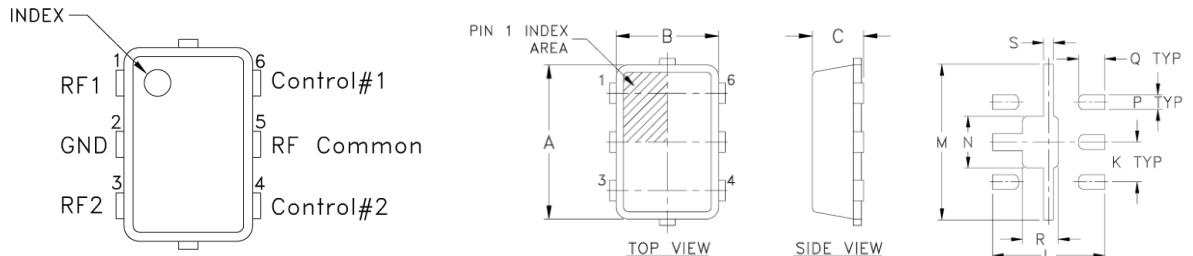


При этом, чтобы иметь возможность генерировать в общей топологии посадочное место детектора мощности и моделировать его поведение с учетом его S-параметров, терминатор Term3 надо будет перенести на верхний уровень.

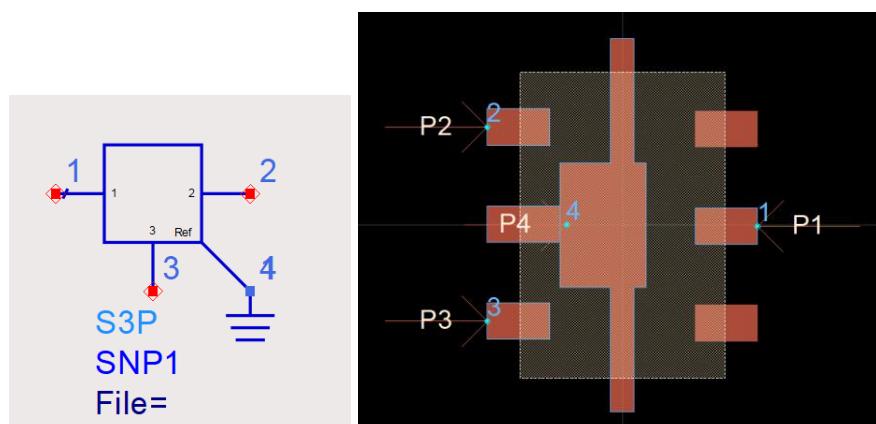
### Подсхема ключа VSW2-33-10W+

При наличии в проекте ключа, для него нужно создать рабочую схему с переключением состояний. Покажем, как это можно сделать на примере SPDT-ключа (один вход, два выхода) VSW2-33-10W+ от Mini-Circuits [20].

Сначала создадим посадочное место в ячейке VSW2-33-10W+\_Footprint.



Нужно сразу определиться с привязкой выводов к используемым блокам. Приведенные файлы S-параметров имеют расширение \*.s3p (на три выхода) и в своем заголовке указывают нумерацию матрицы S-параметров следующего вида: порт 1 – RFC (общий), порт 2 – выход RF1, порт 3 – выход RF2. Блок S3P имеет четыре выхода. Таким образом, посадочное место ключа VSW2-33-10W+ имеет следующий вид.



Для возможности изменения подключаемого файла в зависимости от нужного

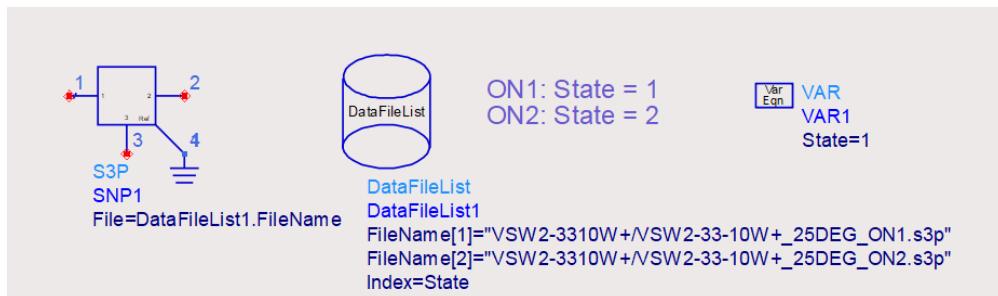


состояния, можно воспользоваться блоком DataFileList из палитры Simulation-Batch. Он позволяет создать список файлов и при симуляции по индексу брать нужный файл. В этом блоке подключим два приведенных файла S-параметров. Они имеют в названии метки «\_ON1» и «\_ON2», которые говорят, на какой выход включен ключ.

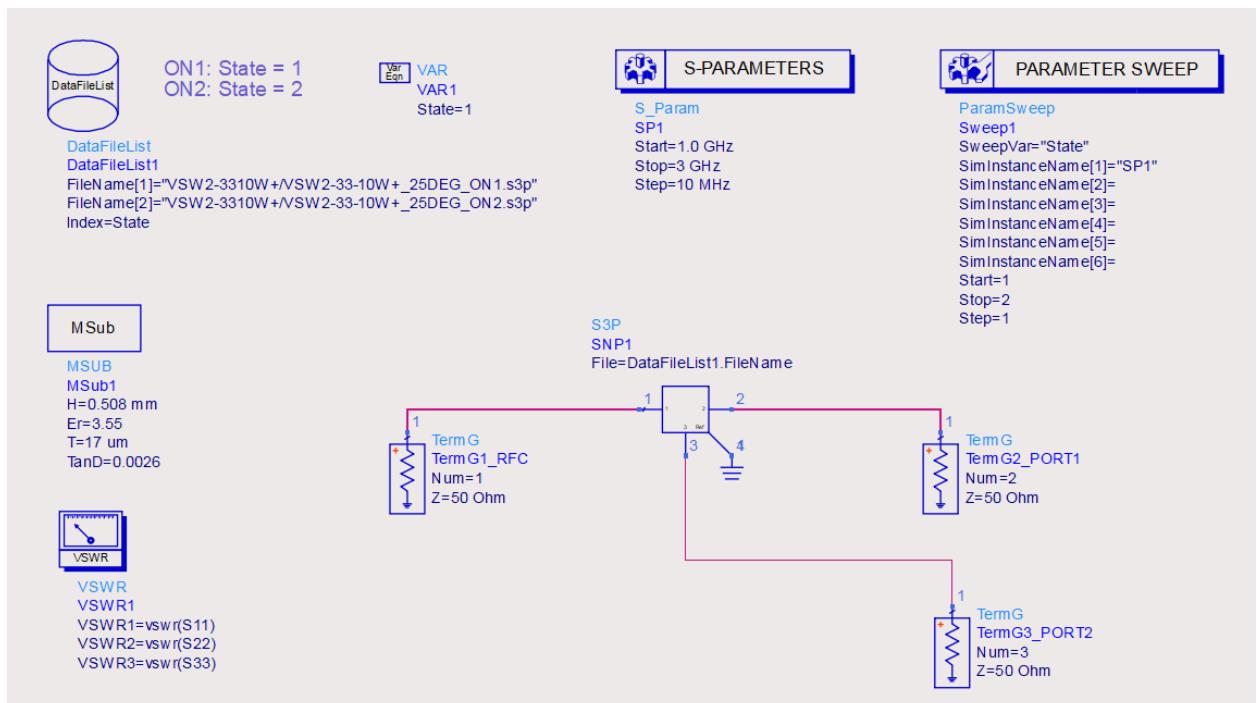
Файл будем переключать по значению переменной State. Также нужно учитывать, что в блоке DataFileList индекс – это целые числа, начиная с 1, а не с 0, как в обычных массивах. Создадим переменную целого типа State и ее значение присвоим параметру Index в блоке DataFileList.

Договоримся, что State = 1 – это состояние ключа «ON1», ключ открыт на выход RF1. А State = 2 – это состояние ключа «ON2», ключ открыт на выход RF2. Чтобы не забыть про эту договоренность, разместим поле с текстом (Insert – Text, Ctrl+T).

В блок S3P в имя подключённого файла S-параметров укажем строку DataFileList1.FileName



Подготовим схему к моделированию. Свип по переменной State будет от 1 до 2 с шагом 1. Чтобы не запутаться, где какой терминатор, добавим им в подписи метки именования портов.



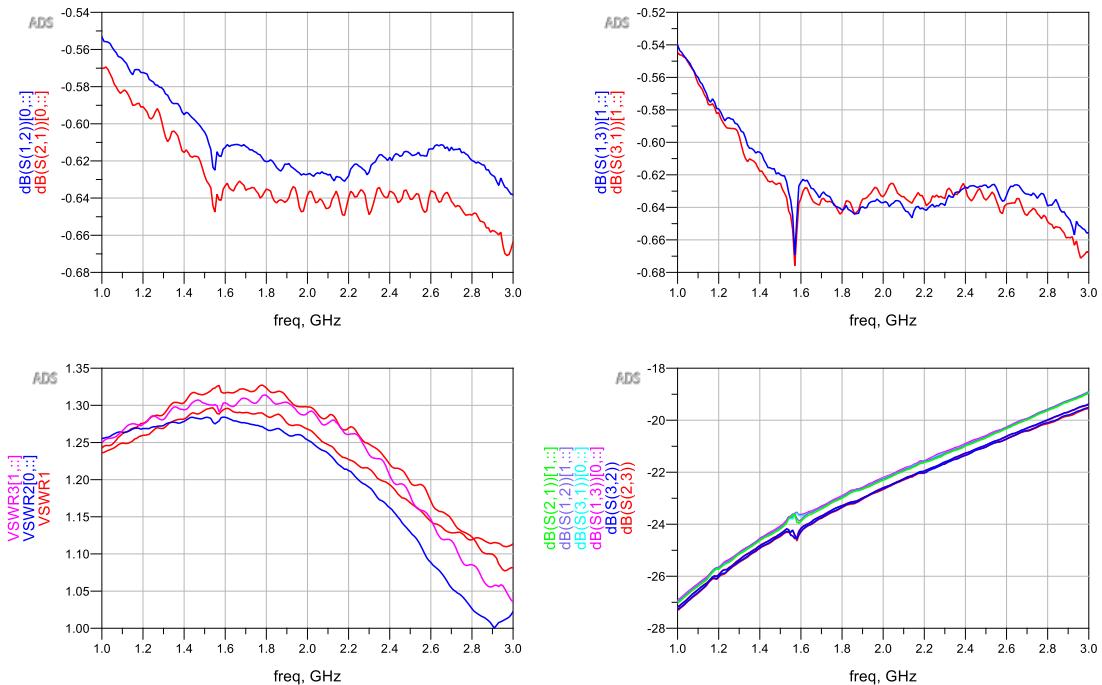
Результаты нужны не все. В зависимости от состояния (State) интересуют различные графики, в том числе потери во включённом состоянии; развязки, как между портами RF1 и RF2, так и между RFC и выключенным портом; KCBH для включенных портов. Для выключенного порта KCBH смотреть смысла нет, т.к. ключ отражательный (Reflective), т.е. выключенный порт обрывается, все отражается обратно и KCBH выключенного порта будет огромный.

С учетом того, что при моделировании результаты записываются в массивы, то в результатах нумерация по State начинается с 0, а не с 1. Т.е. State = 1 («ON1») соответствует индексу 0, а State = 2 («ON2») соответствует индексу 1.

Чтобы выбрать нужный результат, нужно будет использовать обращение к частям массива. Свип по State сделан поверх основного контроллера SP1, который создает базовый спип по частоте freq. Поэтому обращение к частям будет в виде *Результатам[State\_index,:]*.

Соответственно, из всех результатов нужны:

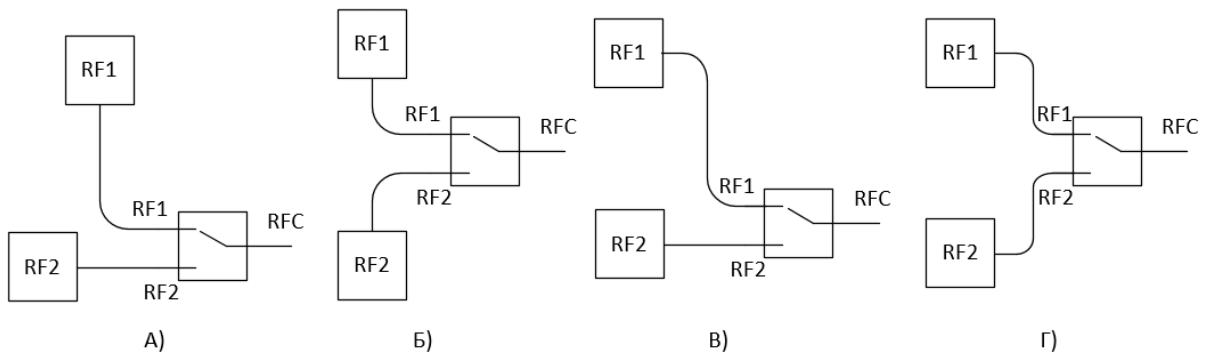
- коэффициенты передачи S21 (и обратный к нему S12) в состоянии «ON1», включен выход RF1, State = 1, индекс 0;
- коэффициенты передачи S31 (и обратный к нему S13) в состоянии «ON2», включен выход RF2, State = 2, индекс 1;
- KCBH для порта RFC (1 в матрице S-параметров) при всех состояниях, KCBH для порта RF1 (2 в матрице S-параметров) в состоянии «ON1» (включен выход RF1, State = 1, индекс 0) и KCBH для порта RF2 (3 в матрице S-параметров) в состоянии «ON2» (включен выход RF2, State = 2, индекс 1);
- развязка S23 (и парная к нему S32) во всех состояниях, развязка S13 (и парная к нему S31) в состоянии «ON1» (включен выход RF1, State = 1, индекс 0) и развязка S12 (и парная к нему S21) в состоянии «ON2» (включен выход RF2, State = 2, индекс 1);



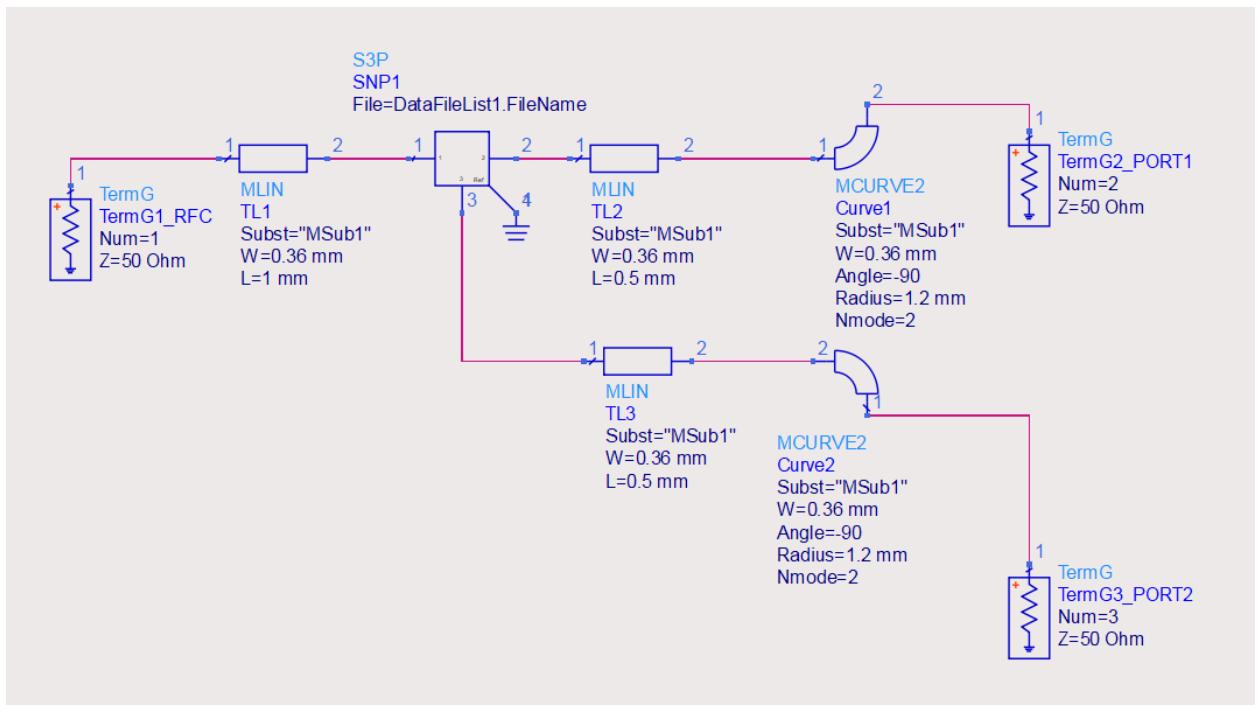
Поле графиков получено. Видно, что ключ практически симметричен по поведению каналов; имеет малые потери (~0,6 дБ) на проход; хорошее согласование во включенных каналах не более 1,35; уровень развязки не хуже 18 дБ в рабочем диапазоне частот.

Можно переходить к проектированию подводящих цепей. С учетом расположения выводов на компоненте, можно предложить несколько вариантов общей компоновки устройства, и как соответственно, изначально нужно проектировать подводящие к ключу линии (в какую сторону их изгибать).

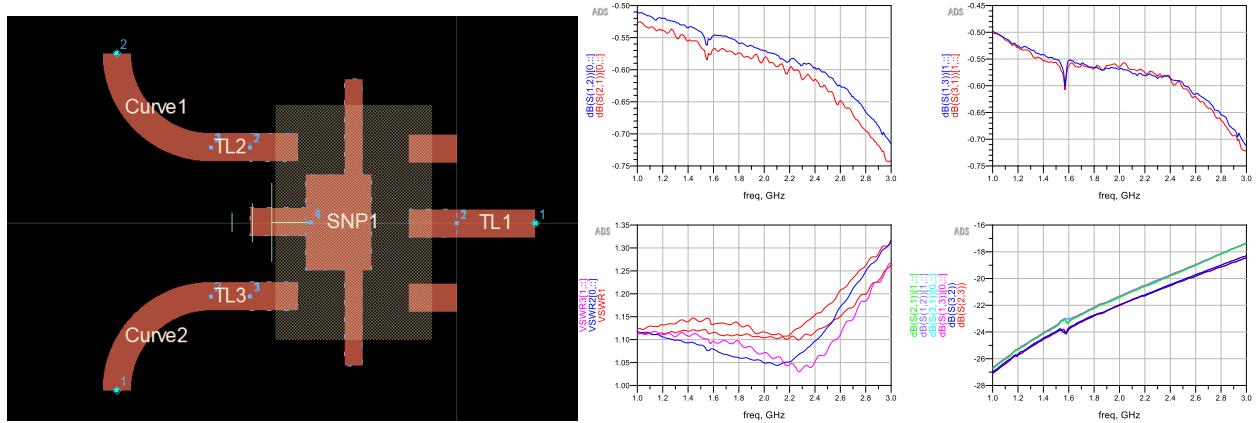
Остановимся на варианте с двумя поворотами RF1 и RF2. Этот выбор даст при будущей компоновке всей печатной платы возможность выстроить каналы как параллельно друг с другом (смотрящие на одну сторону, вариант Г), так и разнеси их по разные стороны от ключа (смотрящие на противоположные стороны, вариант Б).



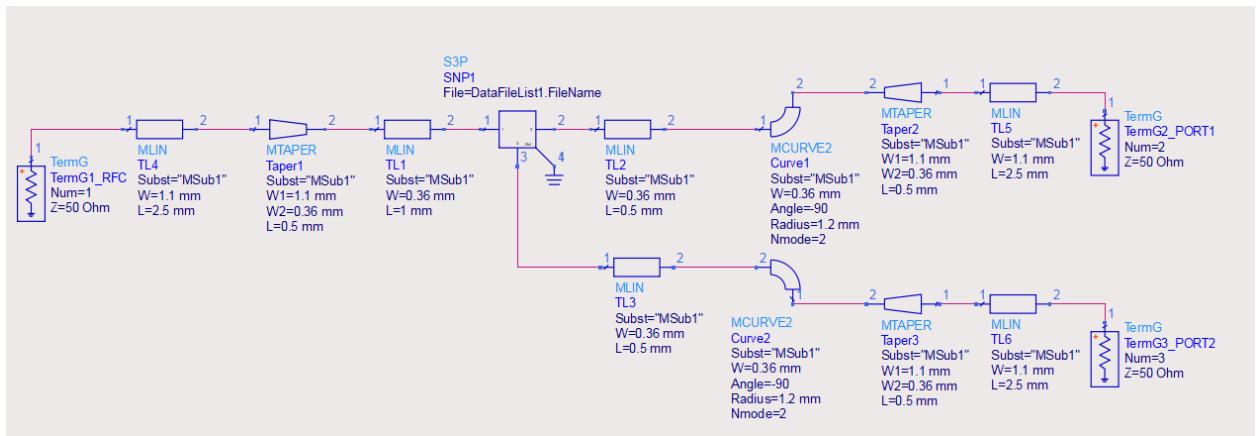
Сначала добавим небольшие участки шириной как у пада (0,36 мм). Также сразу добавим повороты на 90°. Радиус поворота выберем порядка 1,2 мм (>3R). Длина участка со стороны дуг сделана немного менее, чем со стороны RFC.



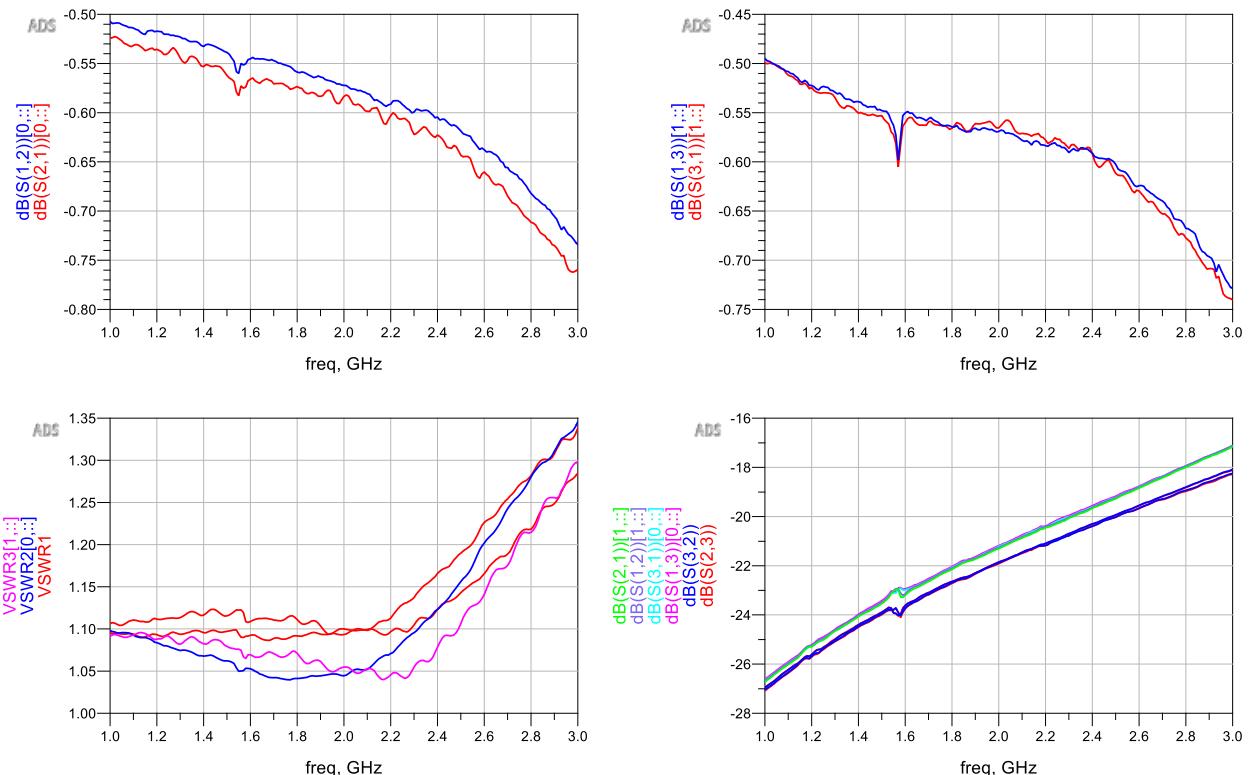
Параллельно контролируем графики и получающуюся топологию.



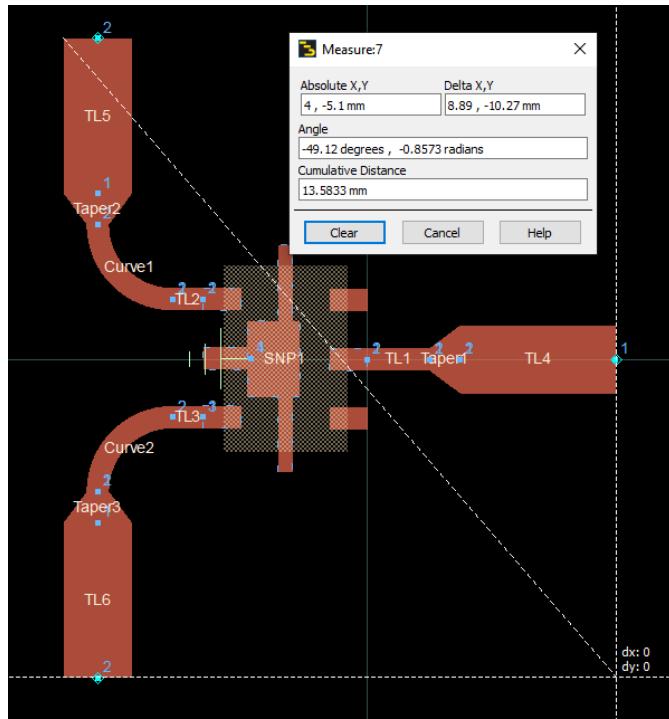
Пока все хорошо. Далее делаем плавные переходы на 50 Ом, 1,1 мм на используемой подложке.



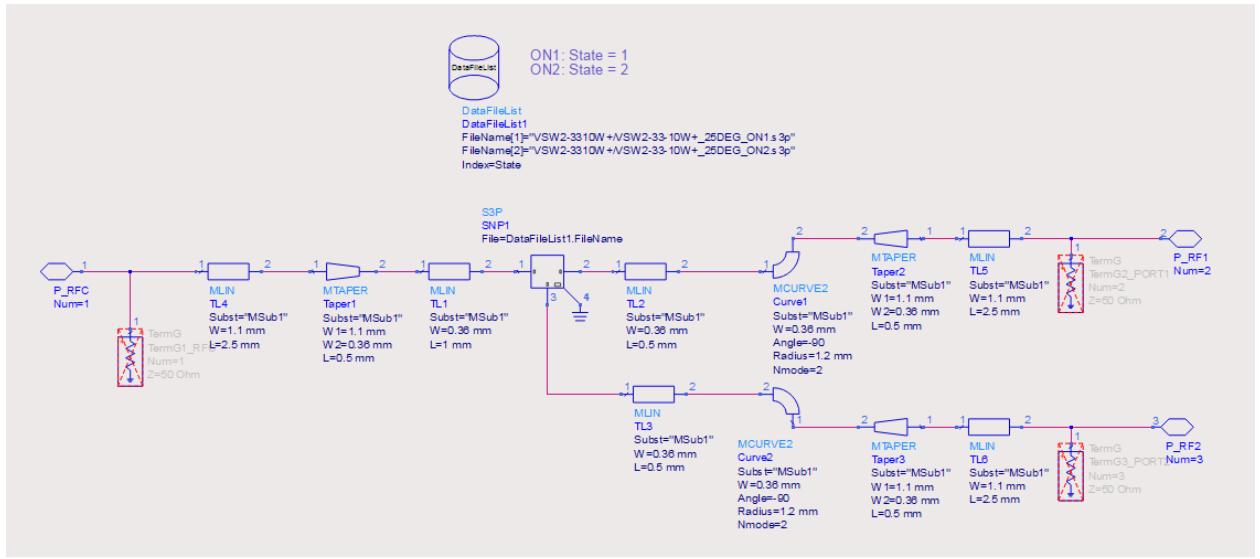
По результатам слегка ухудшилась развязка, но незначительно.



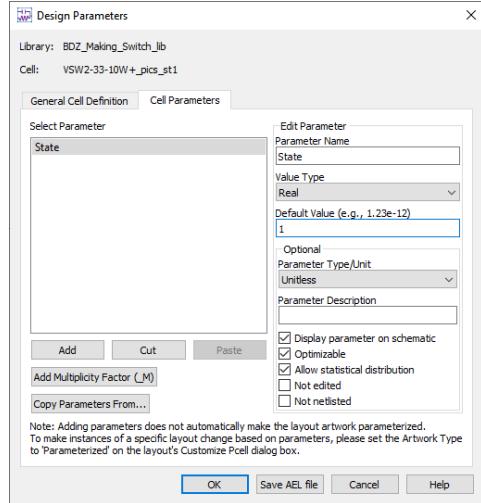
Конфигурация топологии при этом выглядит прилично. Также оставлено место для разводки цепей управления ключа.



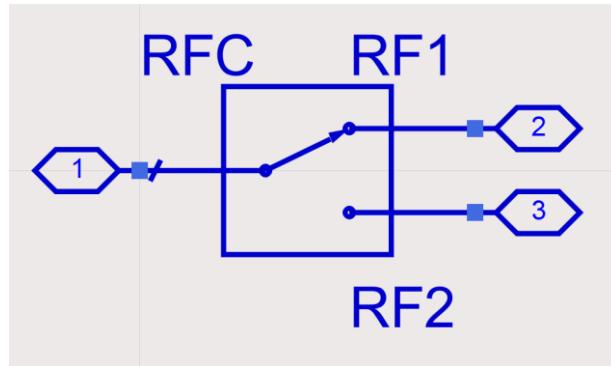
Для подготовки ячейки для включения ее в общую модель нужно добавить пины, создать читаемый символ ячейки, удалить (отключить) контроллеры симуляции, терминалы, измерительные выражения, определение подложки и блок VAR (с определением переменной State). Блок со списком файлов DataFileList при этом нужно оставить.



Также нужно переменную State (со значением по умолчанию 1) вынести на уровень ячейки.



Для генерации символа за основу можно взять символ ads\_behavioral:SPDT\_Static из палитры System-Switch & Algorithmic.



## Общее моделирование

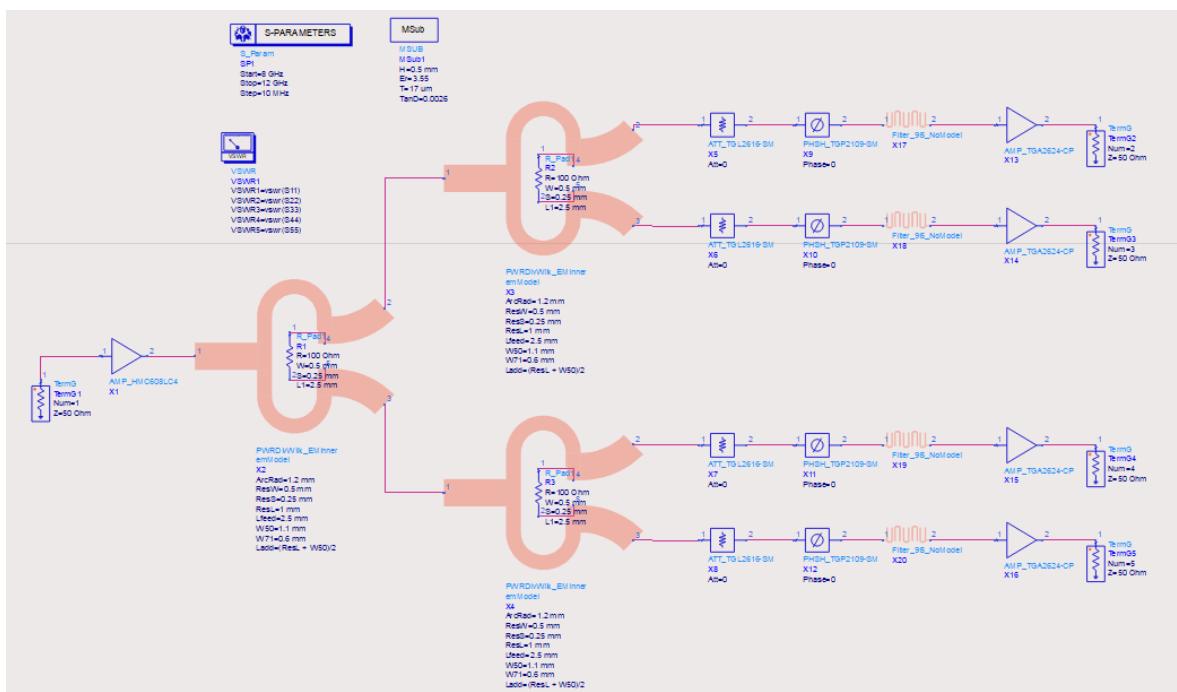
После окончания работы с отдельными компонентами можно перейти к общему моделированию. Нужно:

- определиться с общей компоновкой и соответственно с необходимыми дополнительными линиями связи между участками ВЧ-канала;
- провести общее ВЧ-моделирование, чтобы убедиться в выполнении требований ТЗ;
- при наличии управляемых устройств, провести еще моделирование в различных состояниях. Если возможно слишком много состояний, то можно воспользоваться анализом выхода годных Yield.

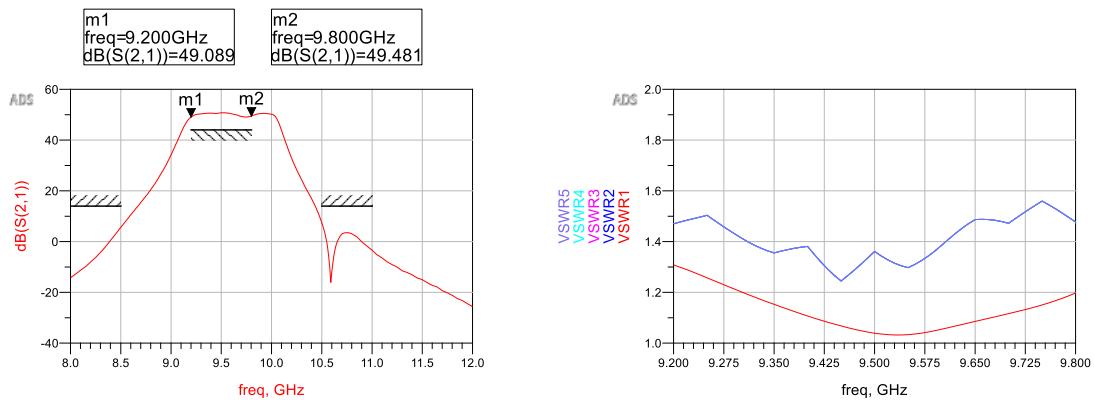
### Общая предварительная схема

*Для приемной ячейки все будет приблизительно также.*

Собираем общую схему. На нее как подсхемы выносим все отработанные отдельные устройства. Для кольцевого развязанного делителя используется emModel. Для фильтра импортированный файл S-параметров.



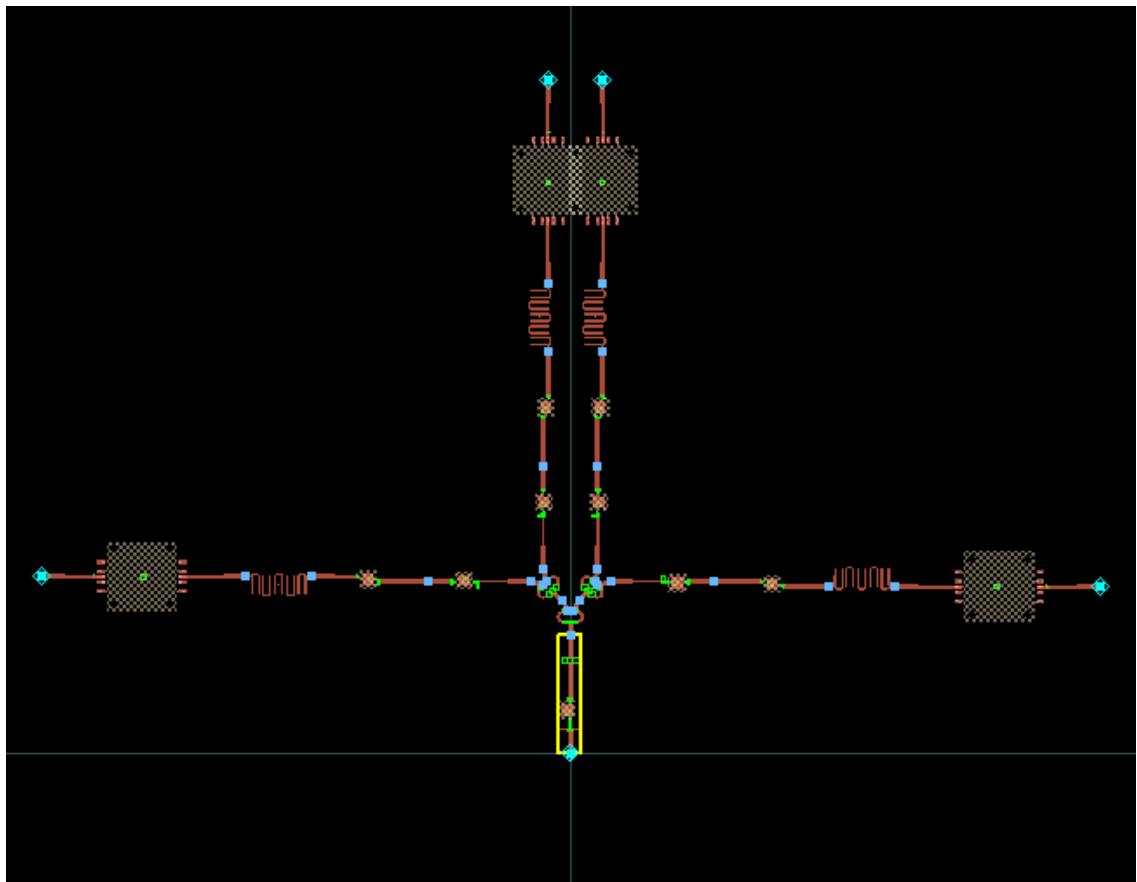
После первого общего моделирования результаты являются отличными (соответствующими ТЗ) и даже несколько оптимистичными по коэффициенту усиления.



Но, на данном уровне мы еще не учли необходимые вставки микрополосковых линий между компонентами. Кроме того, каналы по отношению друг к другу должны быть разведены на некоторое разумное расстояние, чтобы не влиять друг на друга и оставить место для ВЧ-разъемов и цепей питания и управления.

На схемном уровне понять, какие нужны линии сложно. Сгенерируем на основе общей модели топологию.

Генерация раскидала подсхемы с компонентами и их согласующими цепями в соответствии со схемой, что явно надо отредактировать.



## *Правка общей схемы на топологическом уровне*

Для получения нормальной топологии нужно сделать следующие шаги:

- определить шаг между каналами, лучше всего кратно 5 или 10 мм;
- добавить выходные дуги у кольцевых развязанных делителей до 90°, сейчас они по 45°;
- добавить посадочные места, которые будут имитировать разъемы;
- определиться с положением кольцевых развязанных делителей второго этажа, так, чтобы электрические длины от предусилителя до аттенюаторов в каналах были одинаковыми;
- определиться с шириной платы, также лучше кратно 5 или 10 мм;
- добавить недостающие микрополосковые линии и перенести все это обратно в схематик.

Сначала определимся с шагом между каналами.

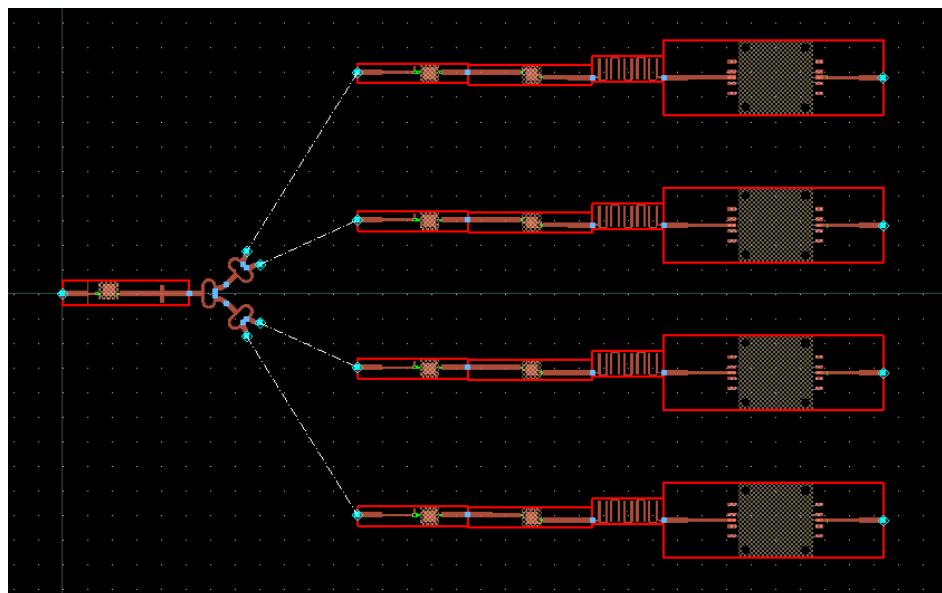
Для вывода ВЧ-сигнала с платы в кабель используются ВЧ-разъемы. Ширина у распространённых SMA-разъемов до 10 мм. Разумным будет считать, что для закрутки гайки кабеля нужен шаг не меньше 15 мм.

Но при этом у нас еще есть довольно большие по ширине микросхемы выходного усилителя мощности TGA2624-CP (15,3 мм). Соответственно, чтобы каналы легли и осталось место для цепей питания и управления, зафиксируем шаг между каналами в 30 мм.

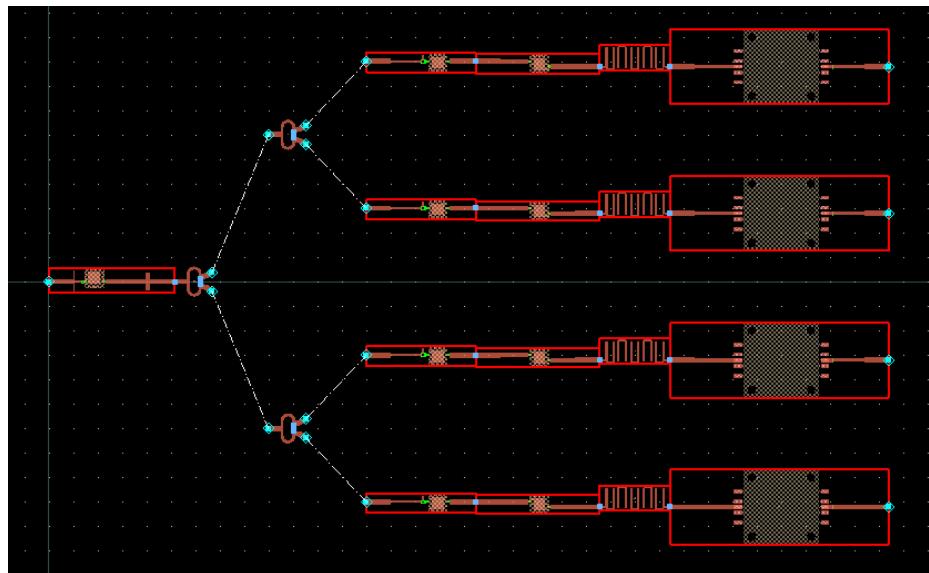
При этом, т.к. нам нужна симметричность линий со стороны делителей, то шаг 30 мм мы будем фиксировать относительно входных точек в каналы (входы аттенюаторов). Смещение ВЧ-прохода в пределах каналов одинаковое, т.е. ВЧ-выходы будут идти с шагом 30 мм, и с небольшим и пока нам неизвестным смещением по вертикали (что не страшно).

Также оставим некоторое расстояние для поворотов ВЧ-линий.

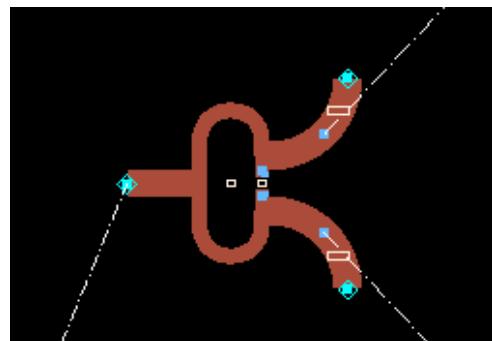
После размещения можно зафиксировать положение каналов по Schematic – Lock Component Position (будет отмечено красной рамкой).



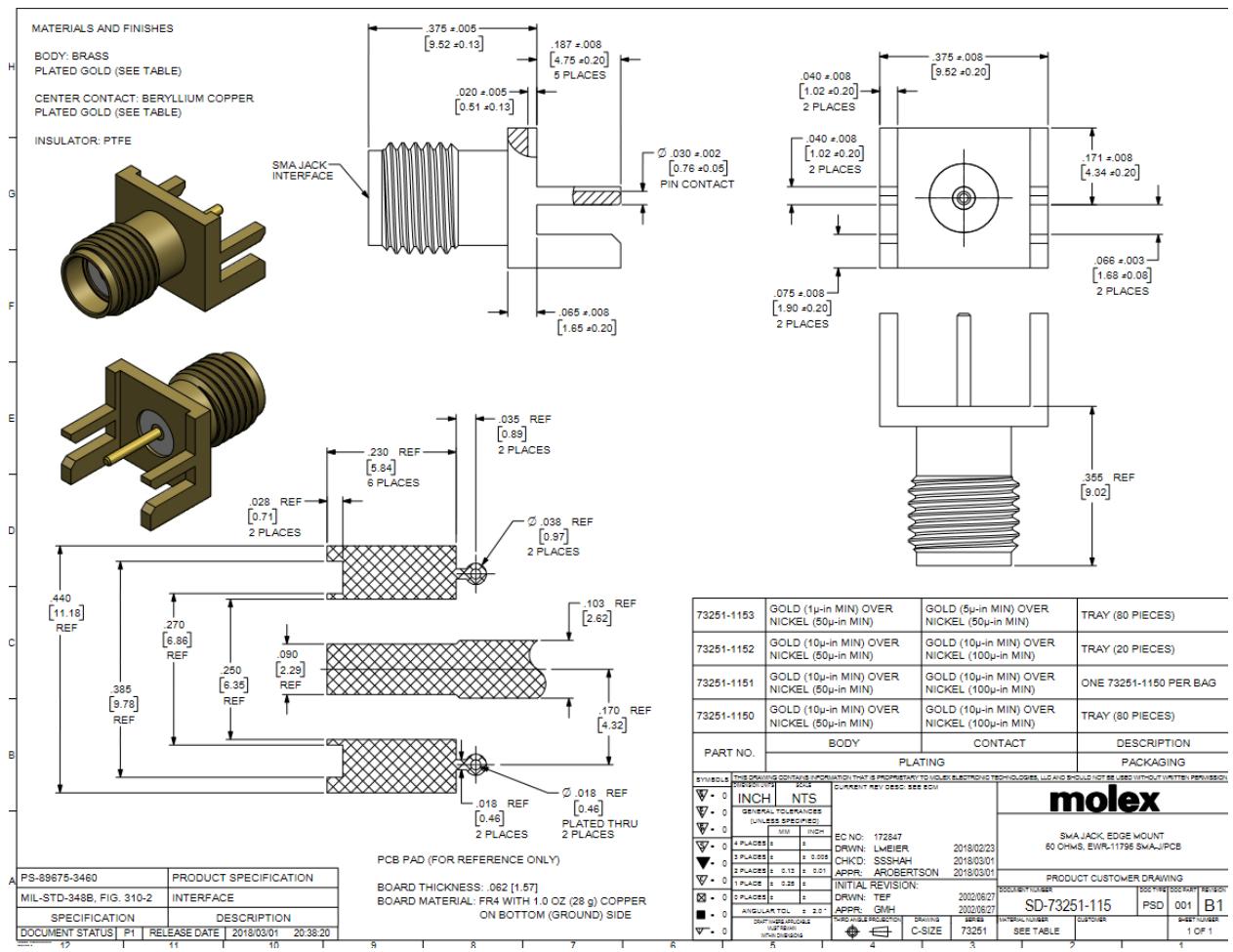
Повернём на  $45^\circ$  делители второго этажа и разместим их так, чтобы они были симметричны относительно горизонтали. Повернуть на  $45^\circ$  компонент можно либо выставив глобальный шаг поворота по Edit – Rotate – Set Rotation Angle и использовав Edit – Rotate (Ctrl+R), либо по единичной команде Edit – Rotate – Rotate Relative.



Затем добавим дуги (блок MCURVE2) по  $45^\circ$  на выходах кольцевого развязанного делителя. У этих дуг радиус должен быть по 3 мм, ширина по 1,1 мм.

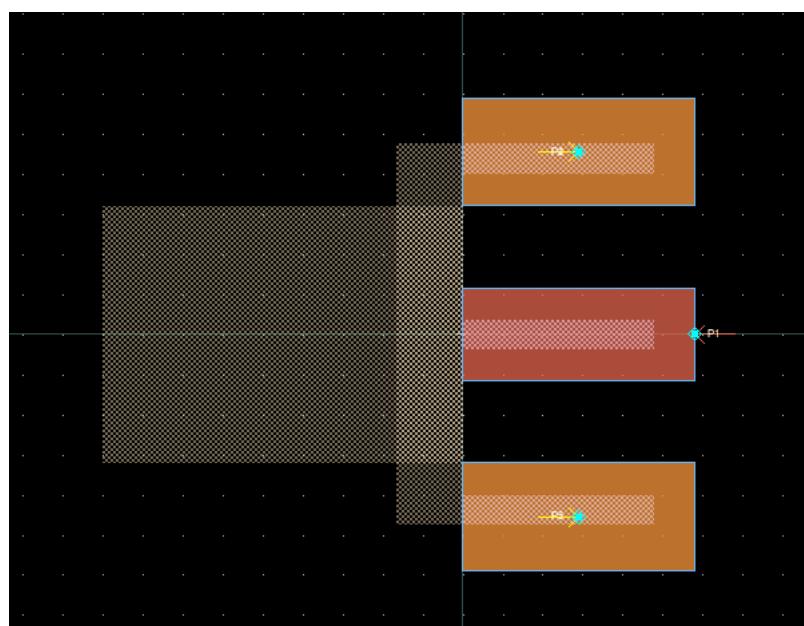


Для имитации ВЧ-разъемов создадим посадочное место одного из простых SMA-разъемов 732511151 фирмы Molex [25] в соответствии с чертежом.

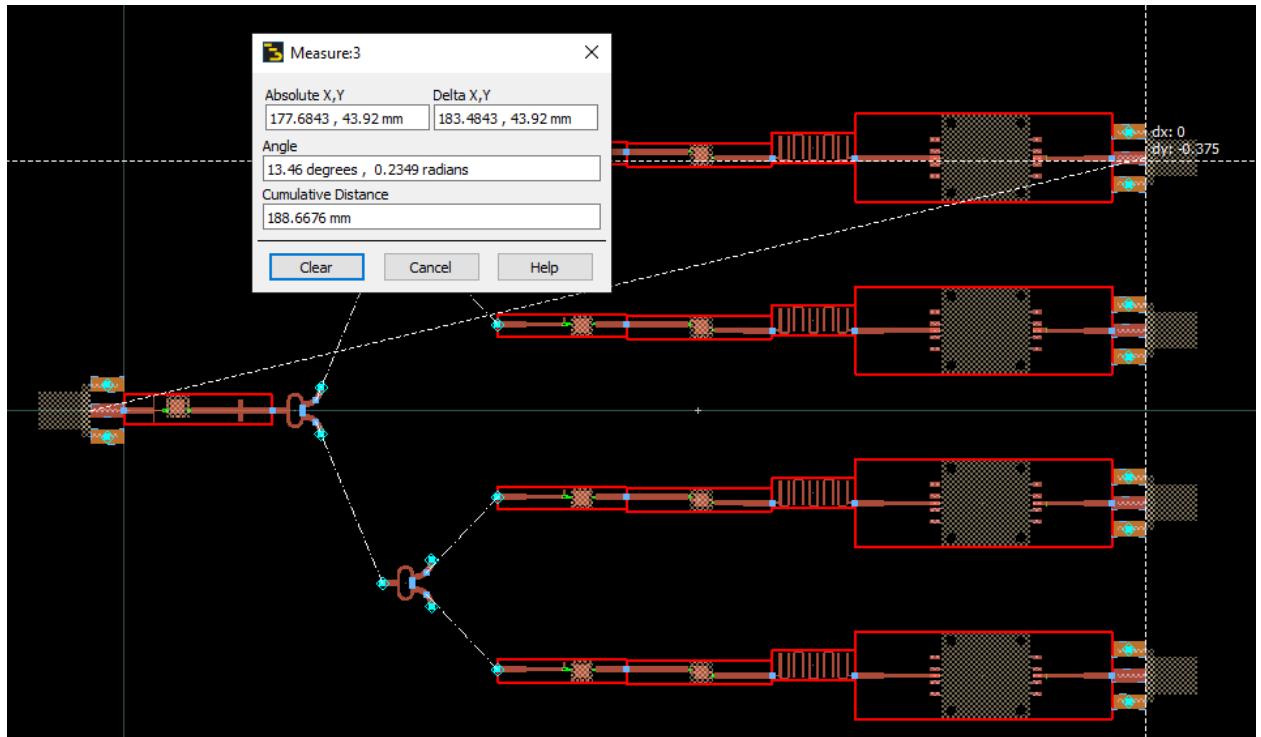


Данное посадочное место не будет моделироваться на схемном уровне, т.к. у нас для нее нет адекватной модели. Будет использоваться только для формирования топологии.

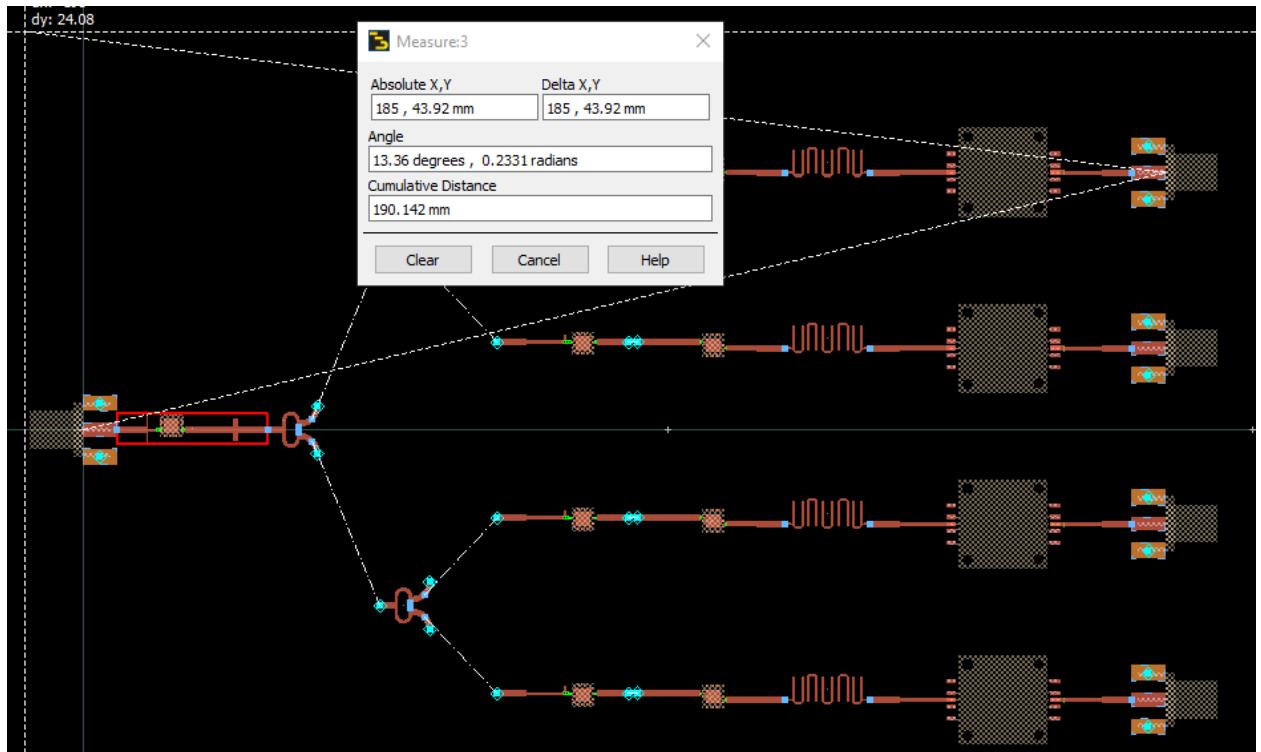
Земляные пады сделаны не только на верхнем слое cond, но и на нижнем слое cond2.



Разместим посадочные места ВЧ-разъемов и проверим, какой получается горизонтальный размер.

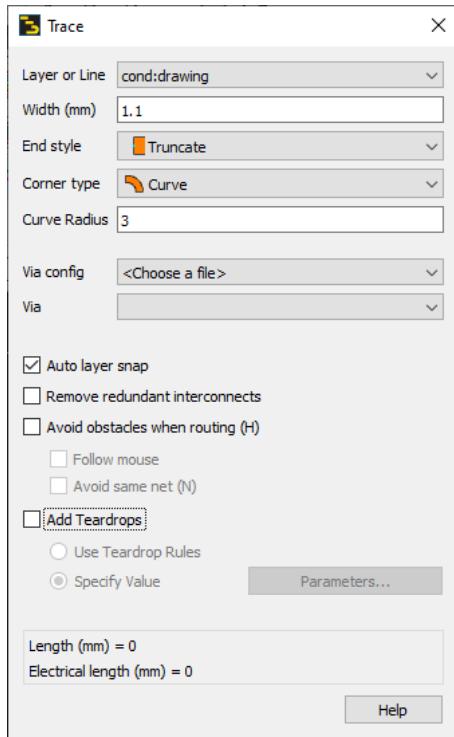


Данный размер 183,4843 мм получился дробным. Сдвинем все участки так, чтобы горизонтальный размер платы был кратным 5 мм (185 мм, меряется по краям ВЧ-разъемов).

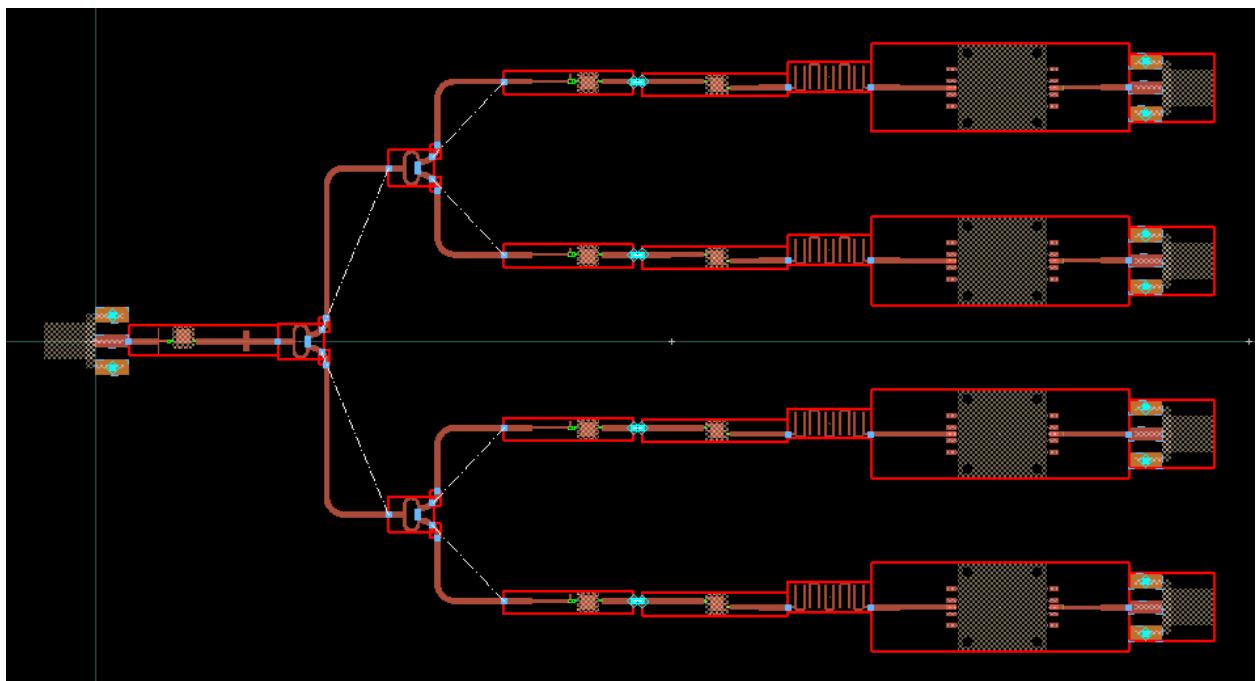


Далее с помощью инструмента Insert – Trace (T) добавим недостающие линии. Режим их прокладки нужно настроить как показано ниже – ширина 1,1 мм (50 Ом),

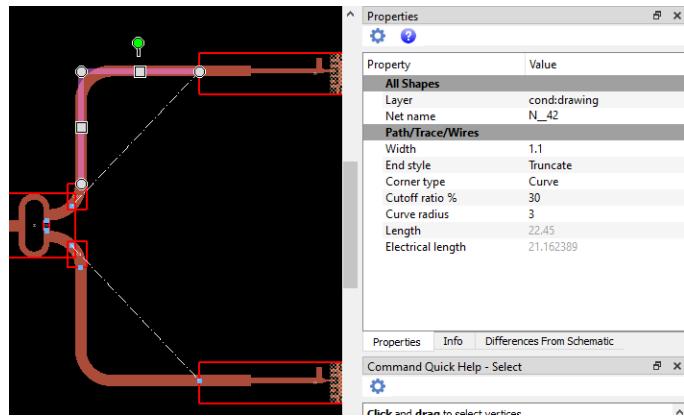
обрезка концов (End style: Truncate), поворот дугой (Corner type:Curve), радиусом 2-3 ширины 50 Ом (3 мм).



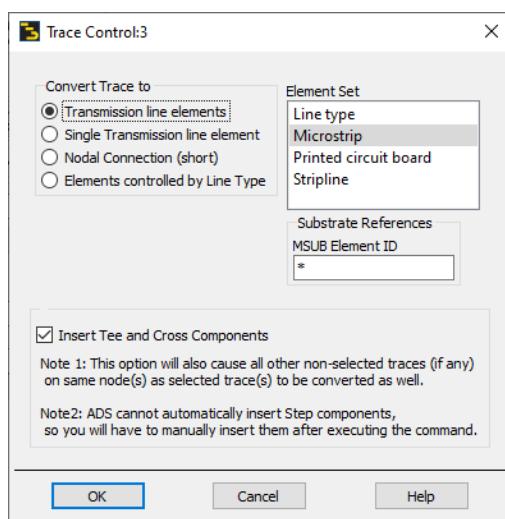
Получим следующий вид ВЧ-каналов печатной платы.



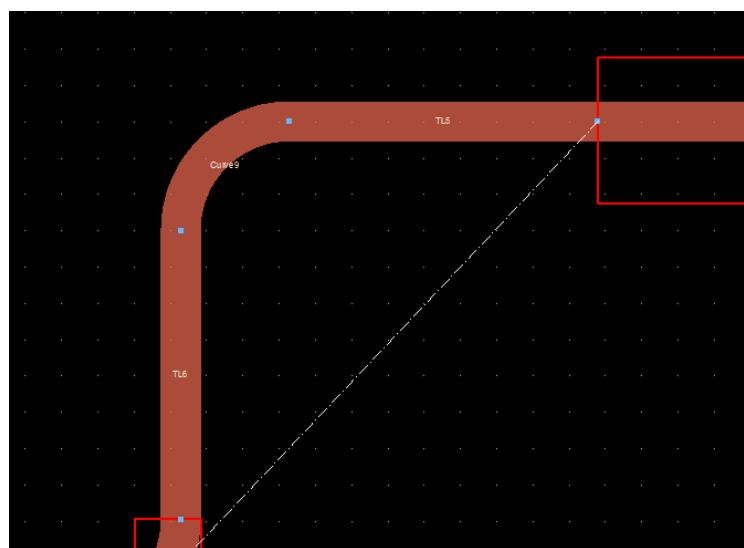
При этом, выбрав добавленные ВЧ-линии, можно по свойству Electrical length убедиться, что они имеют одинаковую длину и каналы ожидаю симметричны.



Для того, чтобы промоделировать добавленные ВЧ-линии в схематике, нужно их превратить в объекты типа MLIN, MCURVE и т.д. Для этого используется команда Edit – Path/Trace – Convert Traces.

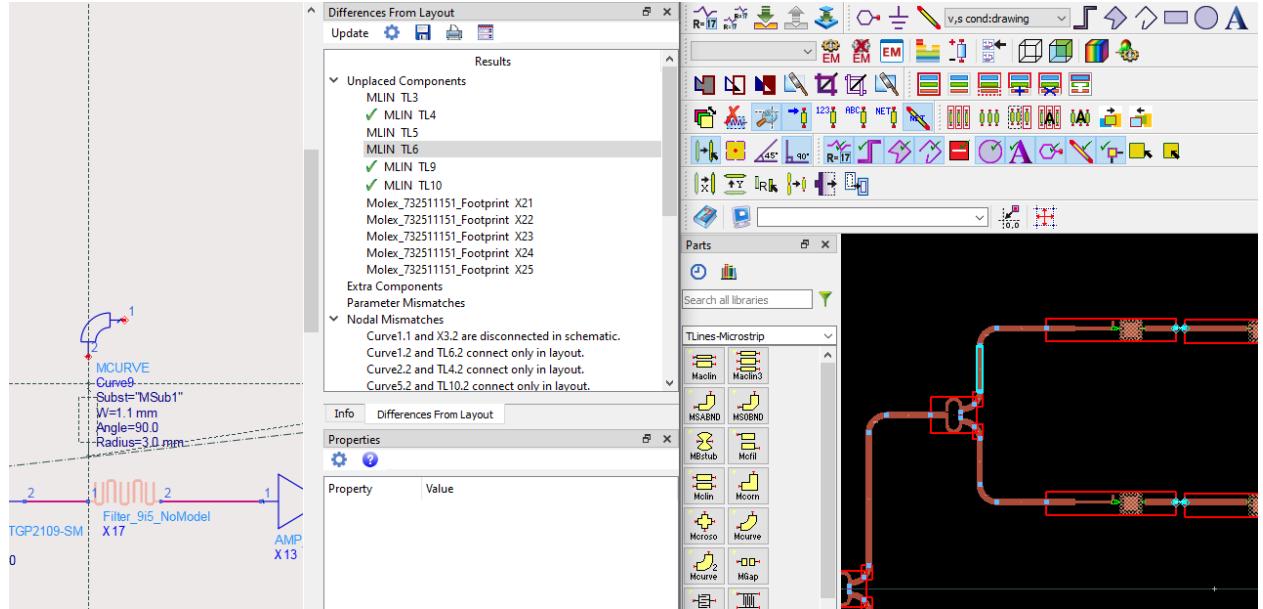


После преобразования ВЧ-линии превратятся в стандартные микрополосковые компоненты.

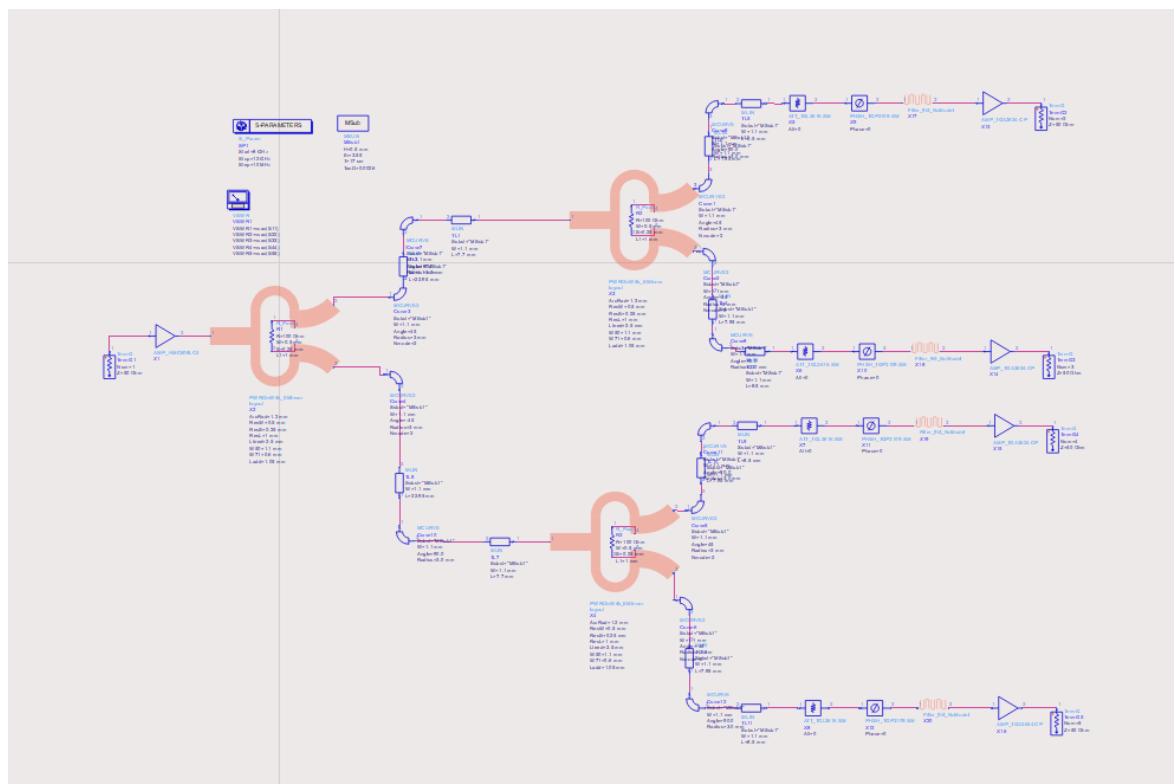


## Перенос изменений в топологии в схемное представление общей схемы

Теперь нужно все добавленное (кроме ВЧ-разъемов) перенести обратно в схематик. Т.к. нужно перенести не все, то лучше это делать в ручном режиме. Для этого нужно перейти в схематик и открыть панель Differences From Layout. В ней один раз запустить анализ различий по кнопке Update. После этого, аккуратно по одному перенести желаемые изменения. При этом, при выборе текущего компонента в окне топологии будет голубым подсвечиваться его топологическое представление.



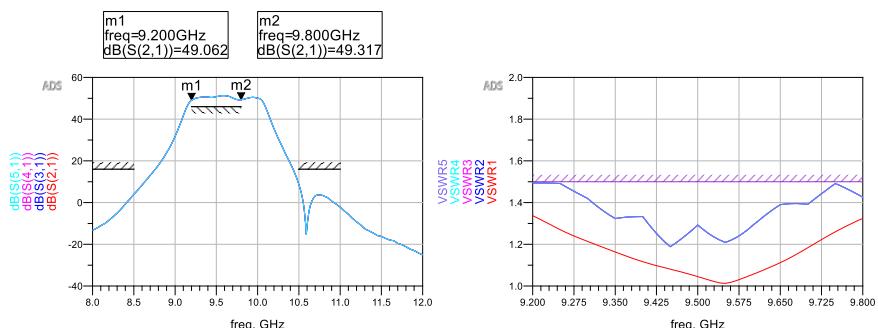
После этого в списке различий должно остаться только не нужное к переносу. Финальная схема громадная, для удобства обращения и отображения ее стоит разделить на функционально значимые фрагменты.



После совместного моделирования возможно придется поднастроить отдельные устройства. В нашем случае необходимо было немного поднастроить выходной усилитель.

Если при данной поднастройке изменятся геометрические размеры согласующих цепей, то генерацию топологии надо будет сделать еще раз, в топологии подправить длины некоторых участков (лучше всего 50 Омных линий рядом с делителями мощности) и перенести обратно. Чтобы при такой операции не поплыли по положению разъемы, их надо предварительно в топологии зафиксировать.

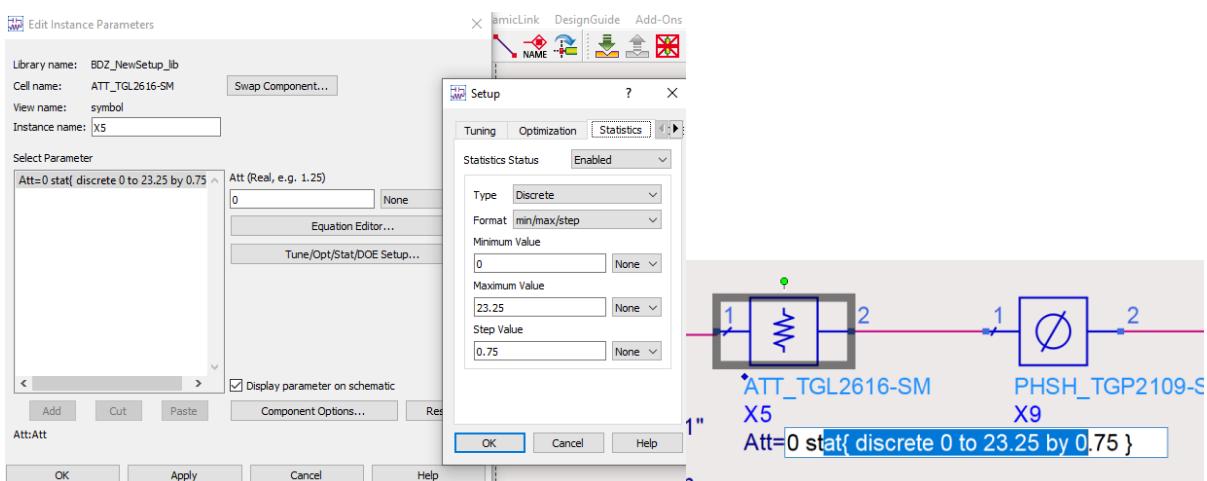
Окончательно схема даст следующие результаты по S-параметрам.



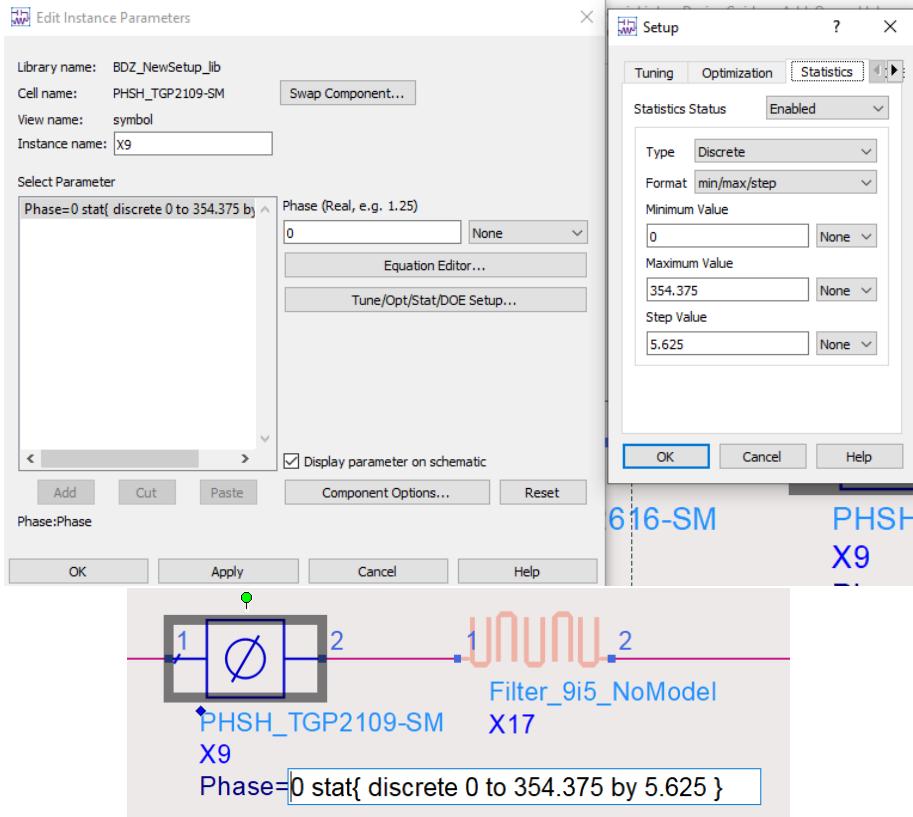
### *Моделирование при переборе состояний*

Далее проверим, как переключение состояний каналов (фазовращателей и аттенюаторов) скажется на работоспособности всего устройства. Перебрать все возможные состояния во всей системе невозможно – число этих состояний равно  $32^4 \cdot 64^4 = 2^{44} > 10^{13}$ , поэтому удобно воспользоваться статистическим анализом выхода годных (Yield). В этом анализе система моделируется в каком-то относительно небольшом числе случайно выставленных состояний (попыток), и смотрится, какой процент этих попыток выполняет ТЗ.

Для Yield-анализа сначала нужно указать, какие переменные и как можно менять. Для всех аттенюаторов TGL2616-SM (блоки X5, X6, X7 и X8) для свойства AttenLoss укажем, что его можно выставлять случайно в дискретном диапазоне от 0 дБ до 23,25 дБ с шагом 0,75 дБ (что соответствует возможным состояниям аттенюатора).

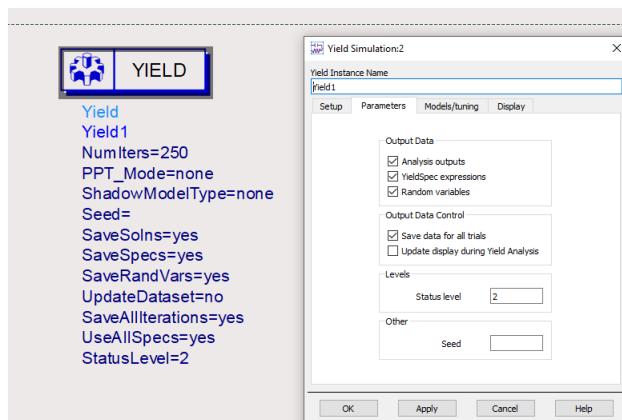


Для всех фазовращателей TGP2109-SM (блоки X9, X10, X11 и X12) для свойства Phaset укажем, что его можно выставлять случайно в дискретном диапазоне от  $0^\circ$  до  $354.375^\circ$  с шагом  $5.625^\circ$  (что соответствует возможным состояниям фазовращателя).



На общей схеме у аттенюаторов и фазовращателей в свойствах появится буква «s» в фигурных скобках, указывающая, что это свойство будет перебираться при статистическом анализе (так же как «t» говорит, что при подстройке по tune можно двигать эту переменную, или «o» аналогично про оптимизацию).

Добавим контроллер Yield. Оставим 250 попыток, этого достаточно. Также укажем, чтобы он сохранял все промежуточные результаты расчетов.



Теперь добавим спецификации YieldSpec. В спецификации YieldSpec надо указать измеряемое выражение, контроллер симуляции, диапазон допустимых значений измеряемого выражения и также можно добавить независимую

переменную (например, чтобы проводить проверку только в части рассчитываемого частотного диапазона).

У нас спецификаций будет три группы, первая группа проверяет, проходит ли система по КСВН, вторая группа - по коэффициенту передачи в полосе пропускания, третья группа - по коэффициенту передачи в полосе запирания.

Группа YieldSpec по КСВН выглядит следующим образом. Она проверяет, чтобы все КСВН не были больше 1,5, проверка проходит по результатам симуляции контроллера SP1 в частотном поддиапазоне 9,2-9,8 ГГц.

| YIELD SPEC  |
|---|---|---|---|---|
| <pre> YieldSpec Spec1 Expr="VSWR1" SimInstanceName="SP1" Min= Max=1.5 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre> | <pre> YieldSpec Spec2 Expr="VSWR2" SimInstanceName="SP1" Min= Max=1.5 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre> | <pre> YieldSpec Spec3 Expr="VSWR3" SimInstanceName="SP1" Min= Max=1.5 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre> | <pre> YieldSpec Spec4 Expr="VSWR4" SimInstanceName="SP1" Min= Max=1.5 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre> | <pre> YieldSpec Spec5 Expr="VSWR5" SimInstanceName="SP1" Min= Max=1.5 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre> |

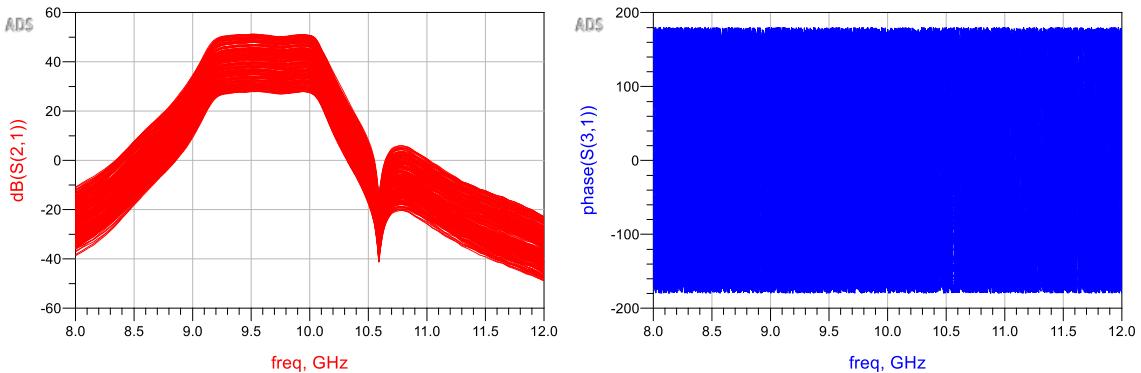
В группе YieldSpec по коэффициенту передачи немного сложнее. У нас изменяемый коэффициент передачи из-за переключения состояний аттенюаторов, это надо учесть. Проверяем, что коэффициент передачи не менее 46 дБ с учетом выставленных потерь на аттенюаторах в частотном поддиапазоне 9,2-9,8 ГГц.

YIELD SPEC	YIELD SPEC	YIELD SPEC	YIELD SPEC
<pre> YieldSpec Spec6 Expr="dB(S21)+X5.Att" SimInstanceName="SP1" Min=46 Max= Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec7 Expr="dB(S31)+X6.Att" SimInstanceName="SP1" Min=46 Max= Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec8 Expr="dB(S41)+X7.Att" SimInstanceName="SP1" Min=46 Max= Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec9 Expr="dB(S51)+X8.Att" SimInstanceName="SP1" Min=46 Max= Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=9.2 GHz RangeMax[1]=9.8 GHz </pre>

### И третья группа по полосам запирания

YIELD SPEC	YIELD SPEC	YIELD SPEC	YIELD SPEC
<pre> YieldSpec Spec10 Expr="dB(S21)+X5.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=8 GHz RangeMax[1]=8.5 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec11 Expr="dB(S31)+X6.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=8 GHz RangeMax[1]=8.5 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec12 Expr="dB(S41)+X7.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=8 GHz RangeMax[1]=8.5 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec13 Expr="dB(S51)+X8.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=8 GHz RangeMax[1]=8.5 GHz </pre>
<pre> YieldSpec Spec14 Expr="dB(S21)+X5.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=10.5 GHz RangeMax[1]=11 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec15 Expr="dB(S31)+X6.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=10.5 GHz RangeMax[1]=11 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec16 Expr="dB(S41)+X7.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=10.5 GHz RangeMax[1]=11 GHz </pre>	<pre> YieldSpec Spec17 Expr="dB(S51)+X8.Att" SimInstanceName="SP1" Min= Max=16 Weight= RangeVar[1]="freq" RangeMin[1]=10.5 GHz RangeMax[1]=11 GHz </pre>

Запускаем. По завершению выведем некоторые из графиков амплитуды и фазы коэффициента передачи случайного канала, чтобы проверить, что действительно перебирались разные состояния аттенюаторов и фазовращателей.



Выведем в таблицу число провалившихся попыток (NumFail), число успешных (NumPass) и получившийся процент выхода годных (Yield).

NumFail	NumPass	Yield
0.000	250.000	100.000

В нашем случае получился стопроцентный успех, ни одна из попыток не провалилась. Т.е. с большой долей вероятности можно утверждать, что ни при какой из комбинаций состояний фазовращателей и аттенюаторов КСВН по всем выходам в рабочем частотном диапазоне не станет больше 1,5 и коэффициент передачи всех каналов не будет менее 46 дБ (с учетом заданного ослабления на аттенюаторе в канале) при сохранении уровня запирания соседних каналов в 30 дБ.

Моделирование ВЧ-такта и проектирование полосковых частей устройства закончено.

В топологический САПР в зависимости от рабочего маршрута работы с полосковыми устройствами, необходимо будет переносить или схематики, или топологии, поэтому, прежде чем переходить в топологический САПР, нужно пройтись по всем схемам в проекте и убедиться, что топологии (layout) и схематики (schematic) синхронизированы (все изменения были перенесены).

При этом, если какая-то ячейка является параметризованной, то при экспорте только этой ячейки, она переносится со значениями параметров по умолчанию. За возможность такой ошибки надо следить.

## **Требования и типовой состав отчета**

Отчет о выполнении курсовом проекте должен представлять из себя структурированное описание всей выполненной работы, в том числе должен содержать:

- Титульный лист, с наименованием работы, указанием исполнителя и даты выполнения.
- Цель (-и) работы.
- Список использованных инструментов в работе.
- Разделы работы, которые рекомендовано формировать в соответствии с этапами выполнения (аналогично методике и заданию на выполнение).
- Для каждого этапа необходимо привести все выполненные расчеты, подготовленные модели, результаты и анализ результатов.

Отчет должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.32-2017 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления» [10], в том числе – шрифт Times New Roman, 14 кегль, полуторный интервал между строк, пронумерованные страницы, подписанные и пронумерованные рисунки и пр.

Подробность описания этапов выполненной работы студент определяет самостоятельно. Самое простое правило, которому надо следовать – человек, незнакомый с выполненной работой (но знакомый с использованным инструментом) должен быть в состоянии по отчету повторить данную работу и понять, что в ней происходит.

Готовый отчет необходимо экспорттировать в pdf.

Архив проекта ADS лучше всего делать встроенным инструментом File – Archive Workspace из основного окна ADS. При архивации проекта можно выбрать, какие составляющие проекта добавлять в архив. Если какие-то ячейки или результаты расчета не нужны, то их можно исключить из архивирования.

Созданный архив будет иметь расширение \*.7zads и является фактическим 7z-архивом.

По окончании выполнения курсового проекта и подготовки отчета, отчет и архив всех проектов надо выложить в ОРИОКС-Портфолио в дисциплину. Именование отчета и архивов проектов должно давать возможность точно понять, к какой теме они относятся.

Рекомендовано следовать следующей структуре отчёта:

## 1. Титульный лист

См. Приложение 2.

## 2. Техническое задание

2.1. Сначала словами пишется цель работы, например:

«Проектирование двухканальной приемной ячейки», или «Разработка передающей ячейки с контролем мощности», или «Проектирование приемной ячейки усиления и фильтрации, с возможностью переключения каналов», в зависимости от задания.

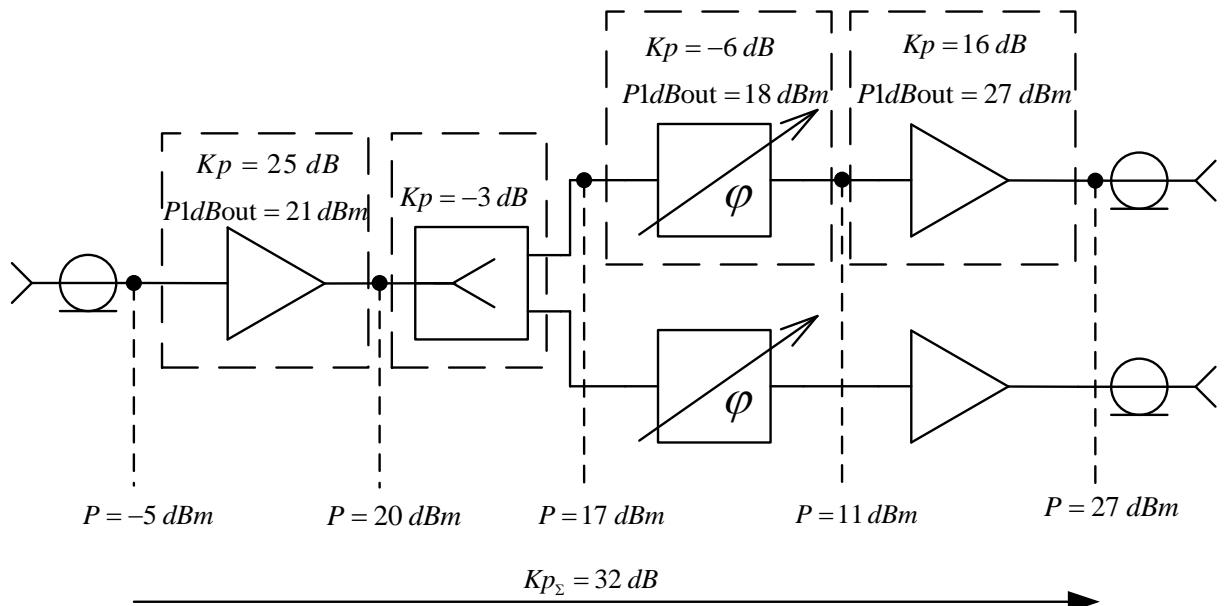
2.2. Затем в виде таблицы или списка идут численные требования, например:

Параметр	Значение
Центральная частота, $F_c$	9,5 ГГц
Полоса частот по -3dB, $\Delta F_{-3dB}$	не менее 400 МГц
Коэффициент усиления, $K_p$	не менее 42 дБ
Точка однодецибелевой компрессии по выходу канала, $P_{1dB}$	не менее 37 дБмВт
$K_{CBH}$	не более 1,5
Переходное ослабление направленного ответвления	16 дБ

2.3. Словами дописывается то, что плохо ложится в таблицу, например  
 «Должна быть предусмотрена установка детектора мощности во вторичном плече направленного ответвителя».

## 3. Составление структурной схемы (и расчет канала)

3.1. Пишется что-то типа «На основании технического задания составлена структурная схема проектируемой ячейки» и рисуется структурная схема разработанного устройства. На структурной схеме можно конкретизировать именования ВЧ-компонентов и системный расчет (уровни мощностей, как меняется усиление и т.д.).



3.2. Если структурная схема сильно менялась в процессе проектирования, то можно сначала нарисовать примерную структурную схему, а потом финальную.

#### 4. Выбор элементной базы

4.1. Описывается выбор основной элементной базы.

4.2. Если осуществлялся выбор между несколькими компонентами на одно место, то составляется сравнительная таблица и пишется, почему был выбран конкретный компонент.

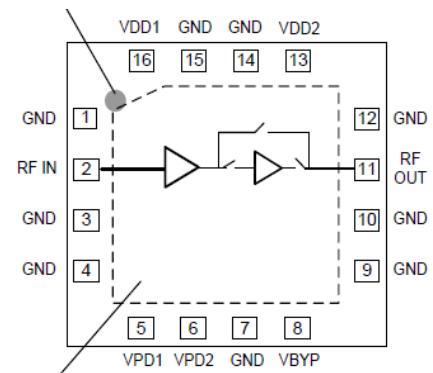
4.3. Последним в списке идет выбранная ВЧ-подложка (с толщиной диэлектрика и металлизации) с обоснованием, почему она выбрана.

4.4. На каждый выбранный компонент составляется описание приблизительно в таком виде:

Было в даташите:

#### Product Features

- 1.5 – 3.8 GHz Operational bandwidth
- 2<sup>nd</sup> stage LNA with integrated bypass mode
- Ability to turn LNA and bypass mode OFF
- Ultra low noise, 0.5 dB at 1.95 GHz
- 36 dB Gain at 1.95 GHz, 17 dB in Low Gain Mode
- +35 dBm Output IP3 in High Gain Mode
- +34 dBm Output IP3 in Low Gain Mode
- Internally matched
- Positive supply only, +3.3 to +5 V
- 3.5x3.5 mm 16-pin SMT package



Внесено в отчет:

Малошумящий усилитель TQL9065

Диапазон рабочих частот 1,5 – 3,8 ГГц

Возможность отключения второго каскада

Коэффициент усиления в режиме полного усиления

36 дБ на частоте 1,95 ГГц

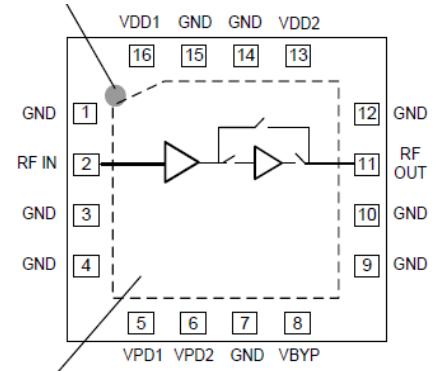
Коэффициент усиления с отключенным вторым каскадом 17 дБ на частоте 1,95 ГГц

Коэффициент шума 0,5 дБ на частоте 1,95 ГГц

Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка 35 дБмВт в режиме полного усиления, 34 дБмВт с отключенным вторым каскадом

Возможность питания от +3,3 В и +5 В

Корпус QFN 3,5 мм x 3,5 мм



#### 5. Моделирование ВЧ-канала

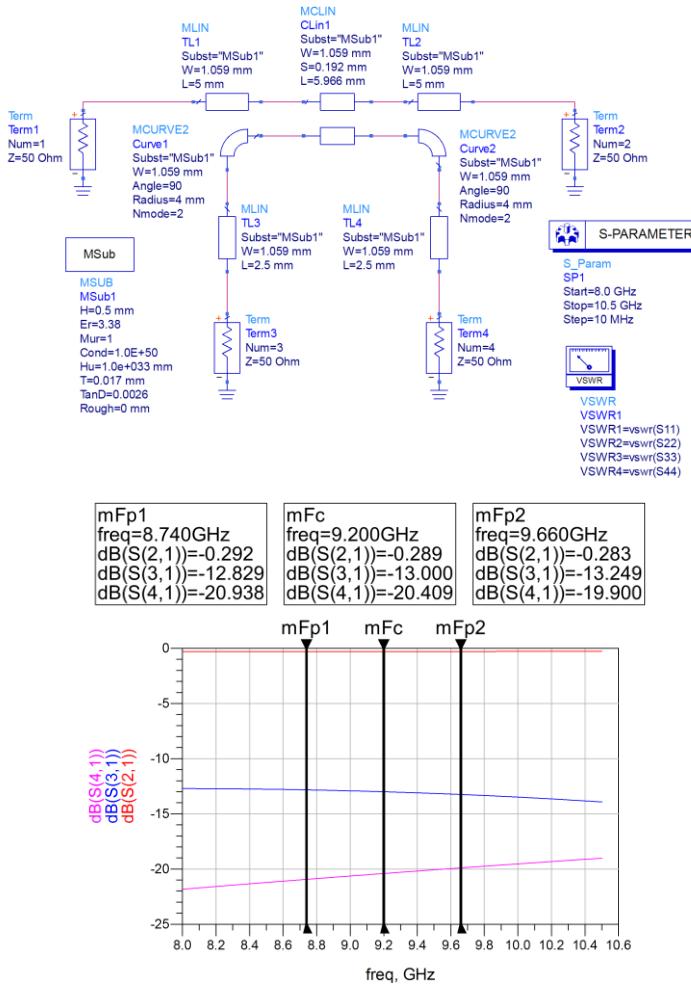
Описывается полное моделирование. Если проводилось моделирование компонентов по отдельности, то и описываются они отдельно.

5.1. Для отдельно спроектированных полосковых устройств моделирование описывается отдельно, например:

«Спроектирован направленный ответвитель мощности на связанных линиях. Результаты моделирования представлены на рисунке. Результаты показывают, что переходное ослабление на рабочей частоте равно 13 дБ и в диапазоне рабочих

частот отклоняется от заданного не более чем на 0,3 дБ, что соответствует техническому заданию»».

На графиках результатов моделирования должны быть понятны полученные значения, т.е. надо ставить маркеры. Обычно нужно три маркера – на центральной частоте и два по границе рабочего диапазона. Для фильтров нужны маркеры и для полос запирания.



5.2. Если у компонентов проводилось индивидуальное согласование, то про каждый компонент пишется отдельно, сначала модель и результаты без согласующих цепей, затем после согласования. Все это должно сопровождаться фразами вида

*«Результаты моделирования без согласующих цепей показывают отсутствие согласования компонента HMC123 на 50 Ом, выходное КСВН больше 1,5. Спроектируем выходную согласующую цепь на микрополосковых линиях», «Результаты моделирования вместе со спроектированной согласующей цепью показывают приемлемый уровень КСВН как по входу, так и по выходу».*

5.3. Приводится совместная модель и полученные результаты. По графикам коэффициента передачи Кр, КСВН и (в зависимости от задания) Nf или P1dB делается вывод, что выполняется техническое задание.

5.4. Если у устройства есть несколько режимов, то приводятся результаты моделирования в этих режимах. Если режимов получается слишком много, то можно воспользоваться моделированием выхода годных (Yield Analysis).

#### ***6. Список использованной литературы и источников***

6.1. В формате списка литературы приводятся все использованные источники, включая ссылки на страницы с документацией ЭКБ.

6.2. Соответственно, по тексту должны присутствовать правильно оформленные ссылки (в квадратных скобках).

## **Типовой состав презентации**

Презентация и доклад формируются на основании отчета, в них должны быть отображены основные этапы выполненной работы.

### ***Типовой состав презентации следующий:***

Название работы, кто выполнил, руководитель (1 слайд).

Техническое задание (1 слайд).

Структурная схема (1 слайд).

Выбор ВЧ-элементной базы (1-3 слайда).

Выбор ВЧ-подложки (1 слайд) можно совместить с выбором ЭКБ.

Построение системной модели (1-2 слайда).

Проектирование полосковых устройств (1-3 слайда)

Индивидуальное согласование для отдельных компонентов (по числу компонентов)

Построение общей совместной модели (1-3 слайда).

Спасибо за внимание (1 слайд).

### ***Важные моменты:***

Должны быть номера слайдов и слайды должны иметь заголовки!

При докладе по слайду с ТЗ озвучиваются только основные требования.

Время лучше всего планировать в среднем 0,5-1 минуты на слайд, суммарно 5-7 минут на весь доклад. Учтите, что обычно чтение текста вслух с бумаги идет в два раза быстрее, чем устный рассказ по памяти.

Не должно быть во время доклада ситуаций «вот он слайд...» и стоим-молчим. Речь должна непрерывно идти, объясняющая, что представлено, откуда оно получилось, к чему ведет и т.д.

Доклад должен быть устный, без чтения по бумажке.

Расчет по Кш, Р1dB, уровням мощностей и пр., если не выполнялось их моделирование на итоговой схеме, вынести на слайд про структурный расчет.

Помните, для **каждого** заявленного в ТЗ требования в докладе должно быть показано его выполнение тем или иным способом! Если этого в докладе нет, считается, что ТЗ не выполнено.

Не злоупотребляйте фразой «соответствует техническому заданию», используйте ее только если показываемое действительно соответствует техническому заданию. Например, выбранная ВЧ-подложка обычно никак не может «соответствовать техническому заданию» (если только в ТЗ нет требований, ограничивающих именно ВЧ-подложку, например, по толщине, или стойкости к перегреву, или еще каких особенностей). Лучше использовать нейтральные связки, объясняющие выбор или иллюстрирующие результат.

На всех графиках результатов моделирования должны быть видны и понятны полученные значения, т.е. надо ставить маркеры. Обычно нужно три маркера – на

центральной частоте и два по границе рабочего диапазона. Для фильтров нужны маркеры и для полосы запирания.

Картинки для слайдов подбирать такие, чтобы было читаемо. Если значимые элементы на слайде слишком мелкие и ничего не разобрать, то разбивайте картинки на фрагменты на несколько слайдов. Избегать много черного фона, с проектора плохо видно.

Вообще, для сколько-нибудь сложной работы невозможно уместить всю работу во временной лимит доклада и приходится выбирать, что не показывать, а что показать более подробно. В случае, если какой-то этап работы выполнен, и подробно его показать его не получается, то можно сослаться на отчет фразой «*более подробно описано в отчете в разделе ...*». Но слишком так наглеть нельзя, иначе комиссия решит, что от нее спрятали какую-то большую глупость или ошибку.

Формат презентации берите стандартный широкоформатный.

Избегайте ненужной анимации при переключении слайдов, она никогда не работает как было задумано.

Для успешной защиты курсовой работы надо серьезно готовиться заранее, писать доклад к презентации и тренировать его перед зеркалом.

# **Литература**

## ***Основная литература***

1. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва: СОЛООН-Пресс, 2017. — 316 с. — ISBN 978-5-91359-236-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107661> (дата обращения: 02.02.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Курушин, А. А. Моделирование цифровых потоков радиосвязи в среде ADS/Ptolemy / А. А. Курушин, А. О. Мельников. — Москва : СОЛООН-Пресс, 2005. — 184 с. — ISBN 5-98003-204-5 . — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/13705> (дата обращения: 02.02.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Бахвалова С.А. (Автор МИЭТ, МРТУС). Основы моделирования устройств в программе Advanced Design System [Текст]: Лабораторный практикум / С. А. Бахвалова, В. В. Курганов; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ". - М.: МИЭТ, 2016. – 128 с. - Имеется электронная версия издания

## ***Перечень ресурсов сети «Интернет»***

4. Сборник примеров работы в ADS «ADS Example Book: Focused on RF and Microwave Design», доступен после свободной регистрации <https://www.keysight.com/main/editorial.jspx?cc=RU&lc=rus&ckey=2704333&id=2704333&cmpid=zzfindeesof-ads-rfmw-examples>

5. База знаний Образовательного центра Keysight EEs of EDA Knowledge Center, доступен после свободной регистрации, <http://edadocs.software.keysight.com/display/support/Knowledge+Center>

6. Тематический раздел «Rf & Microwave Design» форума electronix.ru, доступен после свободной регистрации, <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=63>

7. Интернет-энциклопедия разработчиков СВЧ-аппаратуры «Microwaves101» <https://www.microwaves101.com>

8. Статья «Формат Gerber. Общий обзор» Интернет-журнала «САПР-журнал» <http://sapr-journal.ru/stati/format-gerber-obshhij-obzor/>

9. Репозиторий автора с методическими указаниями по курсу «Моделирование антенно-фидерных устройств в среде ADS» <https://github.com/dee3mon/Keysight-ADS-Microstrip-methodic>

10. ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления <https://docs.cntd.ru/document/1200157208>

## ***Ссылки на документацию использованных ЭКБ***

11. Документация на аттенюатор TGL2616-SM <https://www.qorvo.com/products/p/TGL2616-SM>

12. Документация на фазовращатель TGP2109-SM  
<https://www.qorvo.com/products/p/TGP2109-SM>
13. Документация на усилитель мощности TGA2624-CP  
<https://www.qorvo.com/products/p/TGA2624-CP>
14. Документация на предусилитель HMC608LC4  
<https://www.analog.com/en/products/hmc608.html>
15. Документация на ограничитель мощности TGL2209-SM  
<https://www.qorvo.com/products/p/TGL2209-SM>
16. Документация на малошумящий усилитель CMD309P4  
<https://www.qorvo.com/products/p/CMD309P4>
17. Документация на малошумящий усилитель CMD157P3  
<https://www.qorvo.com/products/p/CMD157P3>
18. Документация на фазовращатель TGP2105-SM  
<https://www.qorvo.com/products/p/TGP2105-SM>
19. Документация на детектор мощности LTC5596  
<https://www.analog.com/en/products/ltc5596.html>
20. Документация на SPDT-ключ VSW2-33-10W+  
<https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=VSW2-33-10W%2B>
21. Документация на ВЧ-подложки RO4003C и RO4350B  
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates>
22. Документация на ВЧ-подложку RO3003  
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates>
23. Общий каталог магазина ЭлекТрейд-М <http://www.eltm.ru/>
24. Специальный раздел магазина ЭлекТрейд-М, посвященный базовым материалам печатных плат <https://pcmaterial.ru/>
25. Документация на разъем Molex 732511151  
[https://www.molex.com/molex/products/part-detail/rf\\_coax\\_connectors/0732511150](https://www.molex.com/molex/products/part-detail/rf_coax_connectors/0732511150)

### ***Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System***

26. Канал youtube образовательного центра Keysight EEsof EDA  
<https://www.youtube.com/user/KeysightEESOF>
27. Канал youtube Anurag Bhargava образовательного центра  
<https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>
28. Канал youtube Keysight EEsof EDA Field  
<https://www.youtube.com/c/EEsofAETips>

### **Разработчик:**

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.

## Приложение 1. Нелинейные параметры компонентов

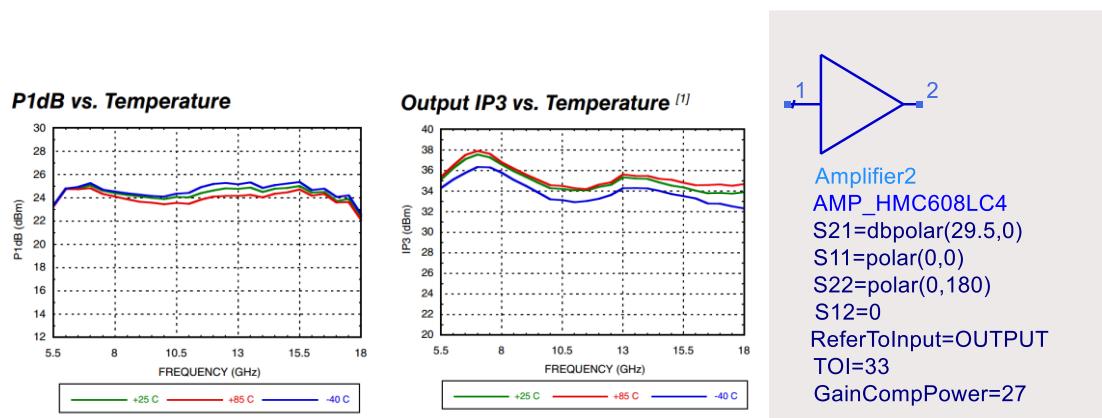
Нелинейности задаются через группу параметров, причем какими из них пользоваться, зависит от доступного описания (даташита).

1. Наиболее простой вариант, если в даташите указаны *точка однодецибелевой компрессии (P1dB)* и/или *уровень интермодуляционных искажений третьего порядка (IP3)*. В блоке Amplifire2 это GainCompPower и TOI. Для усилителей они обычно задаются относительно выхода (задается через свойство ReferToInput). Для фазовращателей, аттенюаторов и смесителей относительно входа.

Точка однодецибелевой компрессии по входу InP1dB и по выходу OutP1dB связаны между собой соотношением  $InP1dB + KpdB - 1 = OutP1dB$ , где  $KpdB$  – линейный коэффициент усиления в дБ.

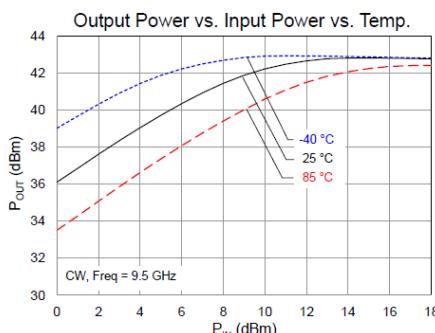
Уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по входу InIP3 и по выходу OutIP3 связаны между собой соотношением  $InIP3 + KpdB = OutIP3$ , где  $KpdB$  – линейный коэффициент усиления в дБ.

У усилителя HMC608LC4 [14], на частоте 9,5 ГГц OutP1dB и OutIP3 равны +24 дБмВт и +35 дБмВт соответственно.

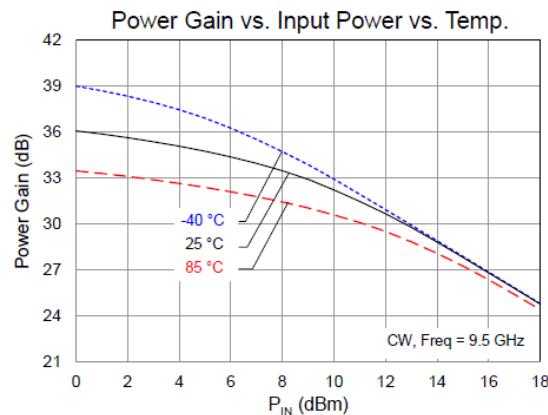


При задаче одновременно OutP1dB и OutIP3 следить, чтобы OutIP3 было больше OutP1dB на 10,6 дБ или более. При невыполнении данного условия нелинейное моделирование может не сойтись.

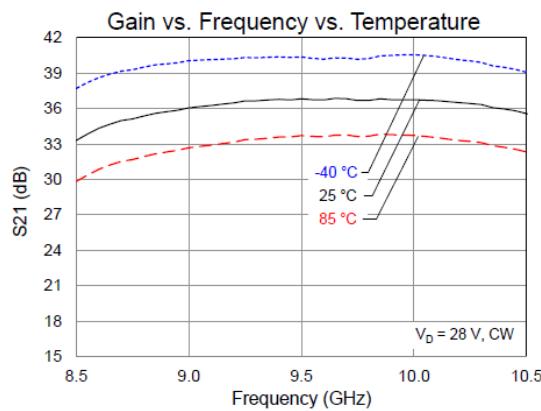
2. Если этих точек нет, а есть *мощность насыщения (Saturated Power)*, то можно задать через нее. Покажем на примере TGA2624-CP [13]. Сначала ищем в даташите график зависимости выходной мощности от входной и смотрим значение полки насыщения. Получаем выходную мощность насыщения +42,5 дБмВт (Psat в ADS).



Теперь нужно выбрать точку на полке и соответствующий ей уровень компрессии. В даташите TGA2624-CP нелинейные параметры даются относительно входной мощности +15 дБмВт, воспользуемся ей. Ищем график зависимости реального коэффициента усиления по мощности от входной мощности и на нем определяем реальный коэффициент усиления по мощности (Power Gain) при входной мощности +15 дБмВт: PowerGain = 28,5 дБ.

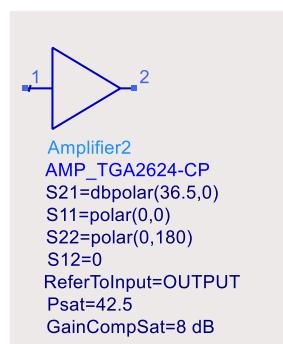


Далее ищем график линейного усиления на частоте 9,5 ГГц (Small Signal Gain). В нормальных условиях это +36,5 дБ.



Уровень компрессии при входной мощности +15 дБмВт равен SmallSignalGain – PowerGain = 36,5 – 28,5 = 8 дБ. Этот параметр надо задавать в свойство GainCompSat.

Мощность насыщения всегда задается по выходу, вне зависимости от свойства ReferToInput.



## **Приложение 2. Титульный лист**

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники»

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Отчет по выполнению курсового проекта  
по дисциплине «Моделирование СВЧ-устройств в САПР»  
Вариант {Номер варианта}  
{Наименование ячейки}

Выполнил {Фамилия И.О.}  
Группа {РТ-3\_}

Москва 20\_\_