

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

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

## **Лабораторная работа №2**

### **«Расчет и моделирование двушлейфного направленного ответвителя»**

**Модуль**  
**«Моделирование антенно-фидерных устройств»**

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

Москва, Зеленоград

2025

## Оглавление

Оглавление .....	2
Введение .....	2
Теоретические сведения .....	3
Методика выполнения работы .....	6
Создание проекта .....	6
Модель на идеальных линиях передачи .....	7
Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении .....	12
Модель на топологическом уровне .....	22
Статистический анализ выхода годных .....	31
Балансная схема сложения мощностей .....	51
Задание на выполнение .....	57
Требования к отчёту .....	64
Задание на самостоятельную работу .....	65
Контрольные вопросы .....	66
Литература .....	67



## Введение

**Цель работы:** ознакомиться с расчетом и моделированием двушлейфного направленного ответвителя в среде Keysight Advanced Design System (ADS).

**Используемое оборудование или ПО:** материал подготовлен на основании версии Keysight Advanced Design System 2024. Однако, в работе не используются никакие специфичные для данной версии инструменты, все используемое и описываемое существует в ADS практически в таком же виде как минимум с версии ADS 2011.11.

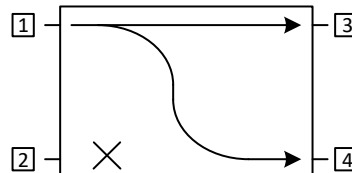
**Продолжительность работы:** 4 часа.

В разделе «Методика выполнения» приведены только необходимые действия по выполнению лабораторной работы. Подробно описываются только новые приемы работы в ADS. Предполагается, что студент выполнил предыдущие лабораторные работы.

<b>Lab1</b>	показывает места, которые подробно описаны в первой лабораторной работе
	показывает приемы, значительно упрощающие или ускоряющие использование ADS
	показывает места, за которыми надо особенно следить и где легко совершить ошибку

## Теоретические сведения

Направленные ответвители – это четырехпортовые устройства (восьмиполюсники), предназначенные для отведения части мощности от основного прохода мощности во вторичное плечо. Соответственно, его можно описать матрицей S-параметров размером 4x4.



При требовании идеального согласования, матрицу S-параметров абстрактного симметричного 8-полюсника можно записать в следующем виде:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{21} & S_{31} & S_{41} \\ S_{21} & 0 & S_{32} & S_{42} \\ S_{31} & S_{32} & 0 & S_{43} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & 0 \end{bmatrix}$$



При использовании любых формул из источников нужно следить за нумерацией портов. Существует несколько различающихся принятых схем обозначений. Использование формул без учета нумерации портов, может привести к странным и некорректным результатам расчетов. В текущей работе нумерация портов отличается от [2] и **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Если наложить требование на отсутствие потерь  $\sum_i |S_{ij}|^2 = 1, \forall j$  [2], то матрицу S-параметров можно свести к системе из двух уравнений:

$$\begin{cases} S_{21}^* (|S_{41}|^2 - |S_{32}|^2) = 0 \\ S_{43} (|S_{31}|^2 - |S_{42}|^2) = 0 \end{cases}$$

Одним из способов решить данную систему является наложение требования  $S_{21} = S_{43} = 0$ , что приводит к наличию изолированного порта, восьмиполюсник становится направленным ответвителем и система выше сводится к одному уравнению:

$$S_{31}^* S_{41} + S_{32}^* S_{42} = 0$$

Если выразить оставшиеся параметры через  $S_{31} = S_{42} = \alpha$ ,  $S_{41} = \beta \exp(j\theta)$  и  $S_{32} = \beta \exp(j\phi)$ , то из предыдущего выражения можно определить требования к фазовым соотношениям  $\theta + \phi = \pi + 2\pi n$ . Что приводит к двум принципиальным схемам построения направленных ответвителей:

1. Симметричный направленный ответвитель,  $\theta = \phi = \pi / 2$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha & j\beta \\ 0 & 0 & j\beta & \alpha \\ \alpha & j\beta & 0 & 0 \\ j\beta & \alpha & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. Ассиметричный направленный ответвитель,  $\theta = 0$ ,  $\phi = \pi$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha & \beta \\ 0 & 0 & -\beta & \alpha \\ \alpha & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & \alpha & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Из данных матриц также следует, что  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ . Фактически, в матрице S-параметров остается только одна степень свободы. Удобно за этот единый параметр взять требуемое отношение мощностей между прямым и вторичными плечами  $m = P_3 / P_4 = |S_{31}|^2 / |S_{41}|^2 = (\alpha / \beta)^2$ .

С учетом неидеальности реализации для направленных ответвителей можно определить следующий список их характеристик:

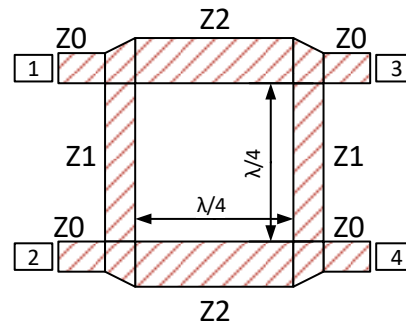
1. Рабочее затухание (Insertion Loss)  $L = -20 \lg(|S_{31}|)$ ;
2. Переходное ослабление (Coupling)  $C = -20 \lg(|S_{41}|)$ ;
3. Развязка (Isolation)  $I = -20 \lg(|S_{21}|)$ , в пределе  $\rightarrow +\infty$  дБ;
4. Направленность (Directivity)  $D = -20 \lg(|S_{21}| / |S_{41}|)$ , в пределе  $\rightarrow +\infty$  дБ.

Видно, что между тремя из этих параметров существует взаимосвязь

$$I[\text{дБ}] = D[\text{дБ}] + C[\text{дБ}].$$

Одним из примеров реализации симметричного направленного ответвителя является двушлейфный направленный ответвитель (Branch-Line Coupler). Его реализацию на линиях передачи можно привести в следующем виде ( $Z_0$  – волновое сопротивление подводящих линий,  $Z_1$  – волновое

сопротивление параллельных участков,  $Z_2$  – волновое сопротивление последовательных участков):



Анализ двушлейфного направленного ответвителя проще проводить в понятиях нормированной проводимости  $y = Z_0 / Z$ . В этом случае для  $S_{11}$  можно вывести следующее выражение

$$S_{11} = \frac{1 - (y_2^2 - y_1^2)^2}{1 + (y_1^2 + y_2^2) + (y_2 - y_1)^4}$$

Приравняв  $S_{11}$  к 0, получается требование  $1 = |y_2^2 - y_1^2|$ . Если наложить дополнительное условие  $y_2 > y_1$ , то данное выражение позволяет вычислить значения матрицы рассеяния  $S_{21} = 0$ ,  $S_{31} = -j \frac{1}{y_2}$ ,  $S_{41} = -\frac{y_1}{y_2}$ .

Можно вывести формулы для расчета значений нормированных проводимостей через коэффициент  $m$

$$m = P_3 / P_4 = |S_{31}|^2 / |S_{41}|^2, \quad y_1 = \sqrt{1/m}, \quad y_2 = \sqrt{(m+1)/m}.$$

Чаще всего двушлейфный направленный ответвитель используют как гибридный направленный ответвитель ( $m=1$ ). В этом случае его матрицу S-параметров можно свести к следующему виду:

$$[S] = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 1 \\ 0 & 0 & 1 & j \\ j & 1 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Видно, что между рабочим и ответвлённым плечами появляется набег фазы  $90^\circ$ . Это позволяет использовать гибридный двушлейфный направленный ответвитель для формирования равноамплитудного квадратурного сигнала (Hybrid- $90^\circ$  Coupler).

## Методика выполнения работы

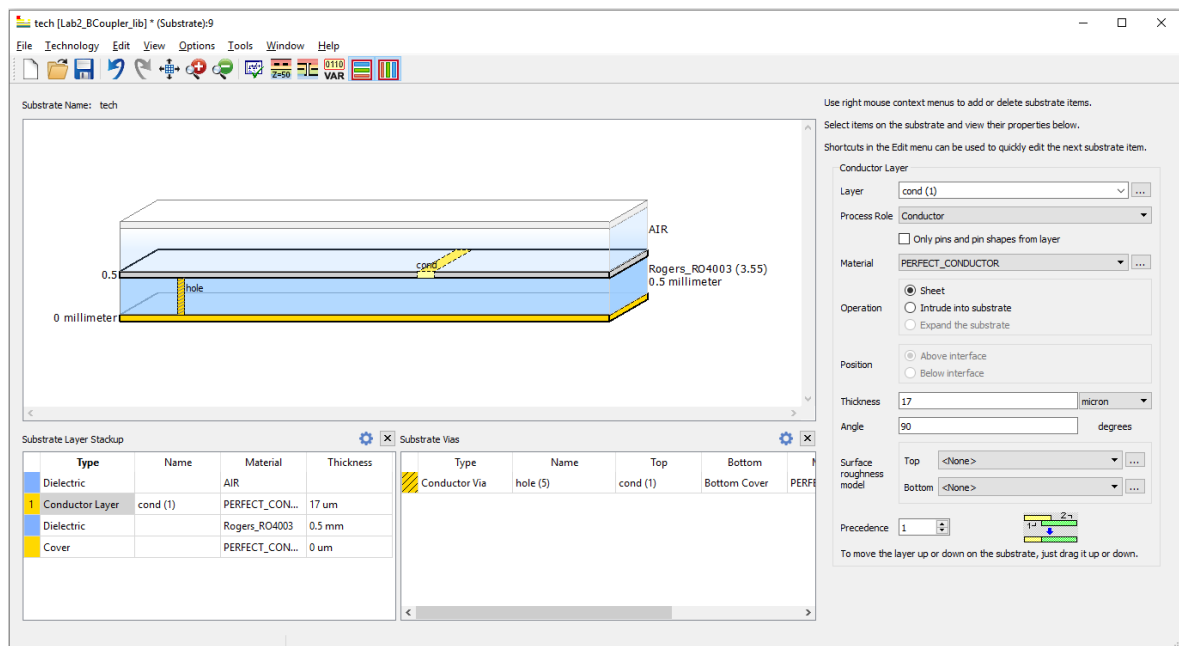
Маршрут работы следующий:

1. Составление модели на идеальных линиях передачи и моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.
2. Преобразование модели на идеальных линиях передачи в схемотехническое представление на заданной ВЧ-подложке с помощью инструмента LineCalc. Моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов. При необходимости подстройка модели.
3. Преобразование схемотехнической модели в топологическое представление. Моделирование методами моделирования uMoM (Microwave Momentum). Параметризация ЕМ-модели. При необходимости подстройка модели.
4. Статистический анализ выхода годных ЕМ-модели по точности размеров.

### Создание проекта

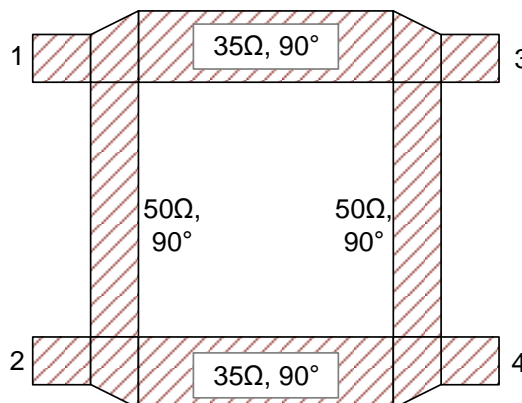
**Lab1** Проект должен быть подготовлен к ЕМ-моделированию, в том числе:

- В качестве библиотеки слоев необходимо дополнительно к библиотеке назначения слоев схемы «ads\_schematic\_layer» выбрать «ads\_standard\_layers» (назначение топологических слоев).
- единицы длин проекта – мм, с разрешением 10000 точек/мм
- рекомендовано сразу создать определение подложки tech.subst, в примере RO4003 ( $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\tan D = 0,0026$ ), толщиной диэлектрика 0,5 мм, толщиной металлизации 17 мкм.




## Модель на идеальных линиях передачи

Гибридный (на 3дБ) двушлейфный направленный ответвитель (Brach-Line Coupler, двушлейфный направленный ответвитель) при описании его на идеальных линиях передачи описывается следующим рисунком.



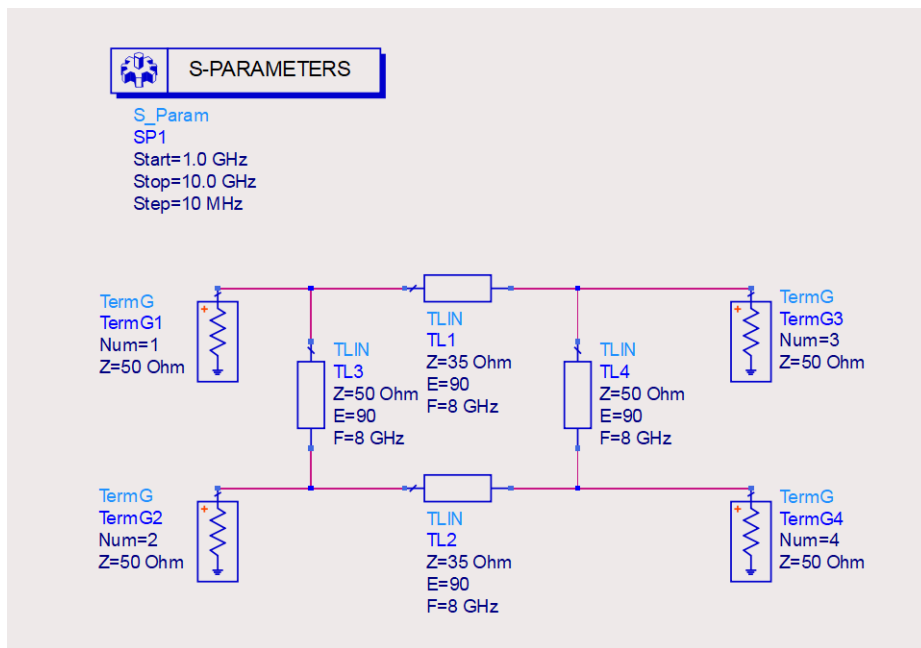
Пусть двушлейфный направленный ответвитель настроен на частоту 8 ГГц.

Создаем схему VCoupler\_Ideal. Собираем на идеальных линиях передачи

(модель TLIN ).




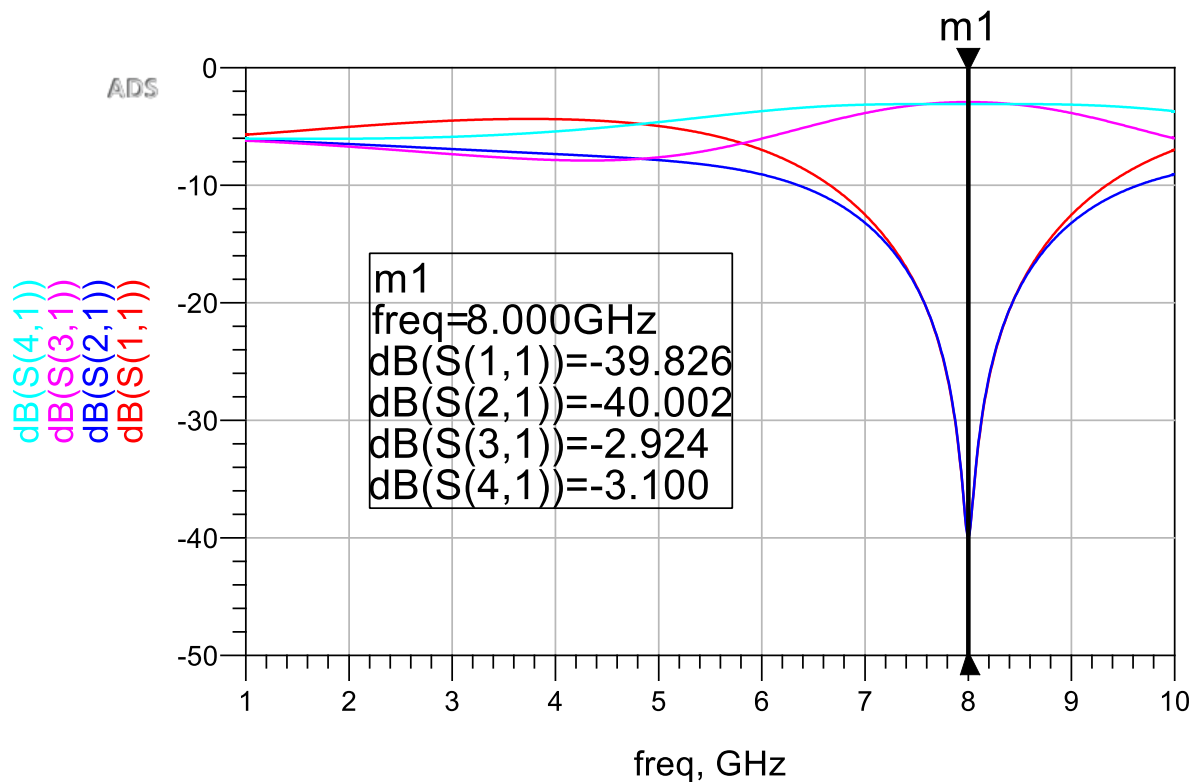
Нужно следить за нумерацией терминаторов Term (свойство Num). Оно определяет порядок обозначений в матрице S-параметров. Эту нумерацию надо будет сохранять одинаковой во всех схемах проекта, чтобы можно было сопоставлять графики.



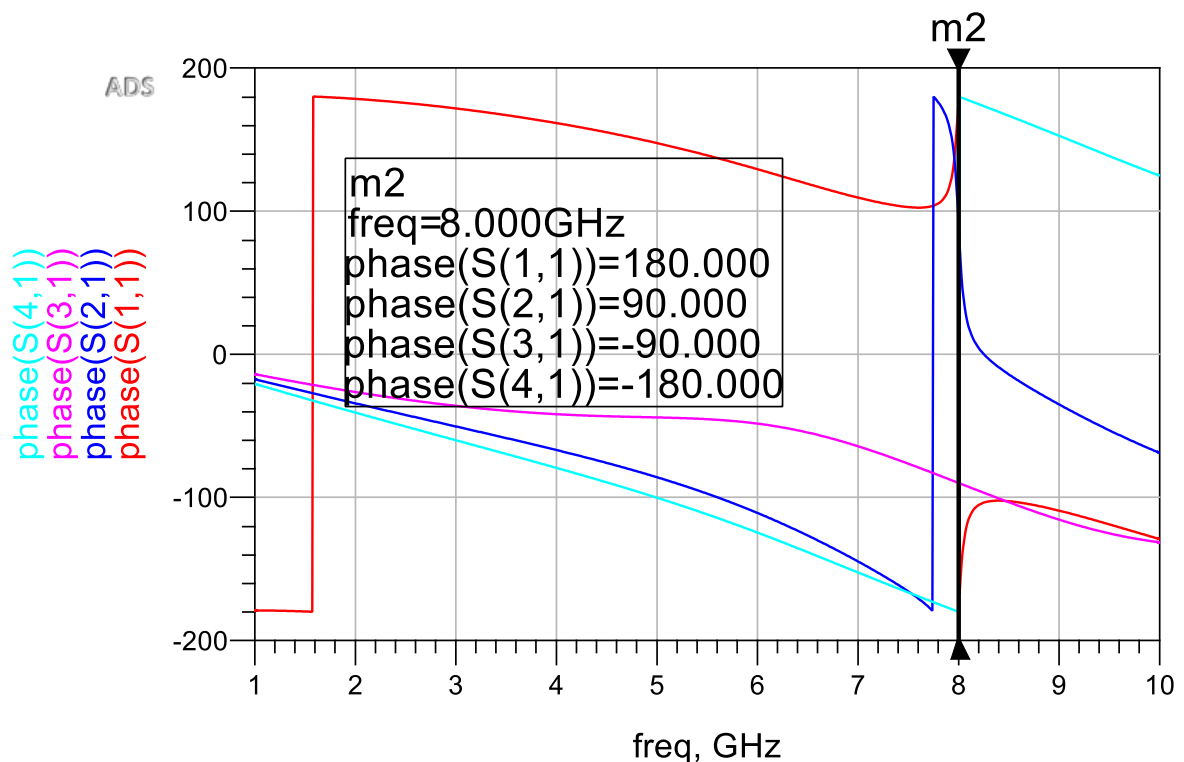
Запускаем моделирование .

## Lab1

Выводим два прямоугольных графика – один с амплитудными соотношениями относительно порта 1, второй с фазовыми. Для создания фазовых соотношений надо при выборе комплексных данных выбирать постобработку phase (результат в градусах). Для отображения данных для нескольких графиков воспользуемся линейным маркером .







Для амплитудных соотношений видно, что при подаче сигнала в порт 1 устройство на центральной частоте:

- имеет очень хорошее согласование по входу  $\text{dB}(S_{11}) \rightarrow -40$  дБ;
- рабочее затухание  $\text{dB}(S_{31})$  и переходное ослабление  $\text{dB}(S_{41})$  близки к  $-3$  дБ, т.е. устройство гибридное;
- развязка  $\text{dB}(S_{21})$  также большая  $-40$  дБ
- устройство настроено точно на 8 ГГц – видно по положению провала на  $\text{dB}(S_{21})$  и  $\text{dB}(S_{11})$ .



В этой и еще нескольких работах текущего цикла несколько некорректно пользуется понятия «рабочее затухание», «переходное ослабление» и «развязка». По своему корректному определению данные свойства направленных ответвителей являются ослаблениями и из параметров матрицы S-параметров высчитываются как, например, развязка  $I[\text{дБ}] = -20\lg(|S_{21}|)$ . Т.е. для результатов моделирования выше правильно говорить «развязка  $I = -\text{dB}(S_{21})$  также большая 40 дБ», т.к. развязка имеет смысл потерь и ее значение положительное. Однако, результаты моделирования в режиме S-параметров возвращают S-матрицы и на графики быстрее и удобнее выводить именно составляющие в виде  $\text{dB}(S_{21})$ , без умножения на « $-1$ ». При выполнении работ нужно учитывать эту особенность изложения материала.

При анализе фазовых соотношений видно:

- разность фаз между выходными плечами 4 и 3 составляет  $90^\circ$ ;
- перегиб ФЧХ рабочего плеча  $\text{phase}(S_{31})$  и разрыв ФЧХ коэффициента отражения  $\text{phase}(S_{11})$  на частоте 8 ГГц также косвенно говорят о том, что двушлейфный направленный ответвитель настроен эту частоту.

Известна следующая формула, описывающая матрицу рассеяния двушлейфного направленного ответвителя на центральной частоте (порядок портов соответствует моделированию):

$$S = -\frac{1}{y_2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & y_1 \\ 0 & 0 & y_1 & j \\ j & y_1 & 0 & 0 \\ y_1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $y_1 = \sqrt{\frac{1}{m}}$  - нормированная проводимость параллельных шлейфов,

$y_2 = \sqrt{\frac{m+1}{m}}$  - нормированная проводимость последовательных шлейфов,

$m = \frac{P_3}{P_4} = \frac{|S_{31}|^2}{|S_{41}|^2}$  - коэффициент деления мощности между рабочим и ответвленным плечом.

## Lab1

Создадим в этом же окне графиков идеальную теоретическую матрицу рассеяния и сравним с ней результаты моделирования на идеальных линиях передачи.

**Eqn** CouplingCoeff = 1

**Eqn** Yn\_shunt=sqrt(1/CouplingCoeff)

**Eqn** Yn\_ser=sqrt((1+CouplingCoeff)/CouplingCoeff)

Для задания матриц в ADS используется запись вида

`{ {S11, S12, S13, ...}, {S21, S22, S23, ...}, ... }`

Внутренние фигурные скобки задают вектор-строки (с разделением элементов запятыми), внешние фигурные скобки собирают матрицу по строкам.

$$\text{Eqn } S_{\text{theor}} = -1/Y_{n\_ser} * \{ \{0, 0, j, Y_{n\_shunt}\}, \{0, 0, Y_{n\_shunt}, j\}, \{j, Y_{n\_shunt}, 0, 0\}, \{Y_{n\_shunt}, j, 0, 0\} \}$$

Выведем в таблицу интересующие значения теоретической матрицы рассеяния. Форму результатов для каждого из выражений поставим dB/Degrees (амплитуда в дБ/фаза в градусах, дБ берутся по амплитуде), чтобы можно было удобно сравнивать с результатами с графиков.

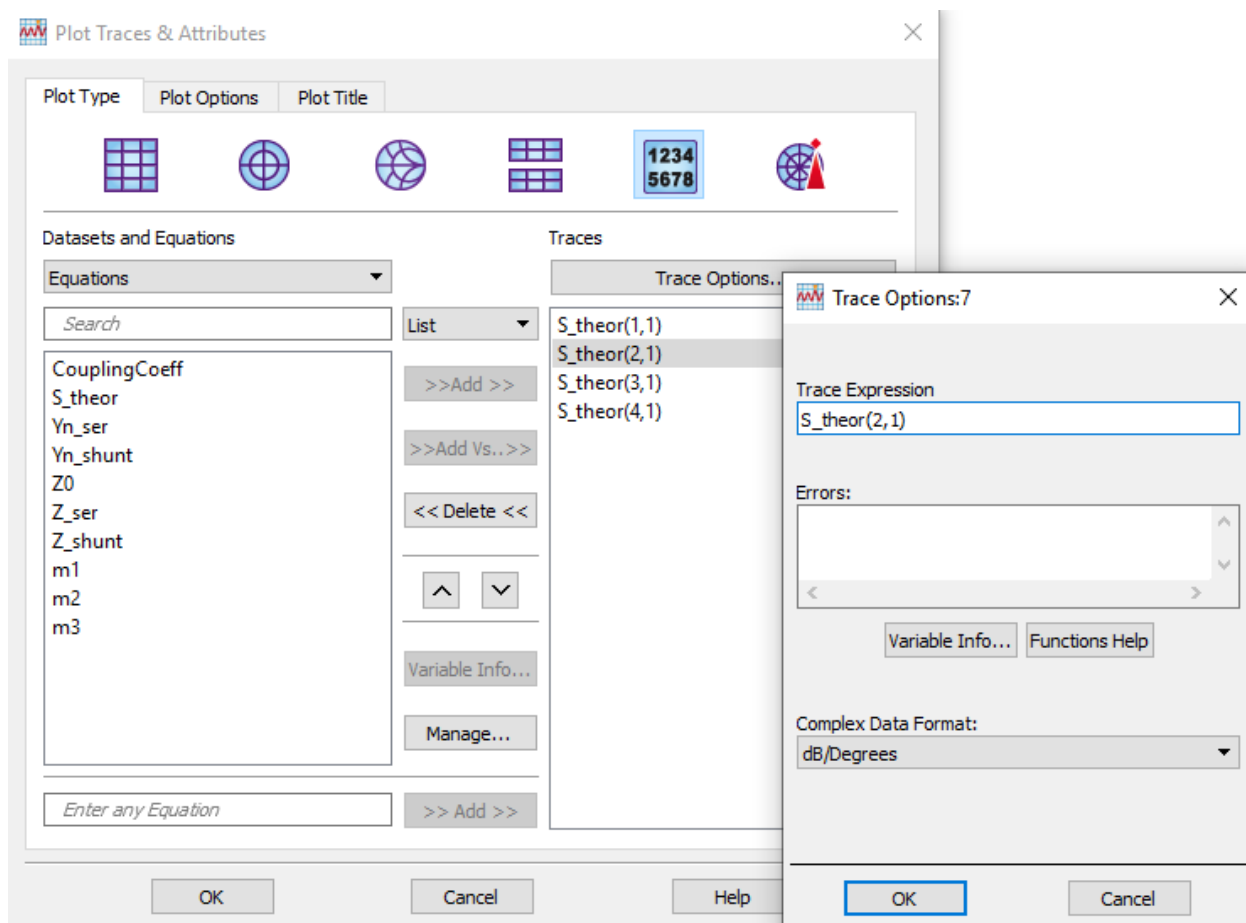


Таблица будет выглядеть следующим образом.

S_theor(1,1)	S_theor(2,1)	S_theor(3,1)	S_theor(4,1)
<-infinity> / 0.000	<-infinity> / 0.000	-3.010 / -90.000	-3.010 / -180.000

Коэффициент отражения S11 и развязка S21 имеют значение по амплитуде  $-\infty$  дБ (поэтому на фазу смотреть не имеет смысла). Рабочее затухание S31 и переходное ослабление S41 равны  $-3$  дБ, по фазовым соотношениям также видна разность фаз между выходными плечами 4 и 3 в  $90^\circ$ .

Дополнительно рассчитаем волновые сопротивления параллельного и последовательного участков (относительно  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$  ) исходя из теоретической матрицы.

$$\text{Eqn} Z_0 = 50 \quad \text{Eqn} Z_{\text{shunt}} = Z_0 / Y_{n\_shunt} \quad \text{Eqn} Z_{\text{ser}} = Z_0 / Y_{n\_ser}$$

Yn_shunt	Yn_ser	Z_shunt	Z_ser
1.000	1.414	50.000	35.355

Рассчитанное Zser незначительно отличаются от 35 Ом.

### Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении

Преобразуем рассчитанную ранее схему цепь из идеальных линий передачи в микрополосковое представление на схемном уровне.

Создаем новую схему BCoupler\_MLIN\_Sch.

Напомним параметры подложки - RO4003 ( $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\tan D = 0,0026$ ), толщиной диэлектрика 0,5 мм, толщиной металлизации 17 мкм.

**Lab1** С помощью инструмента LineCalc  рассчитаем геометрические размеры линий.

! Чтобы два раза не заполнять параметры подложки (в блоке MSUB и инструменте LineCalc) можно сначала в схеме заполнить определение подложки MSUB, добавить одиночный MLIN и по команде Tools – LineCalc – Send Selected Component to LineCalc перенести параметры подложки в LineCalc.

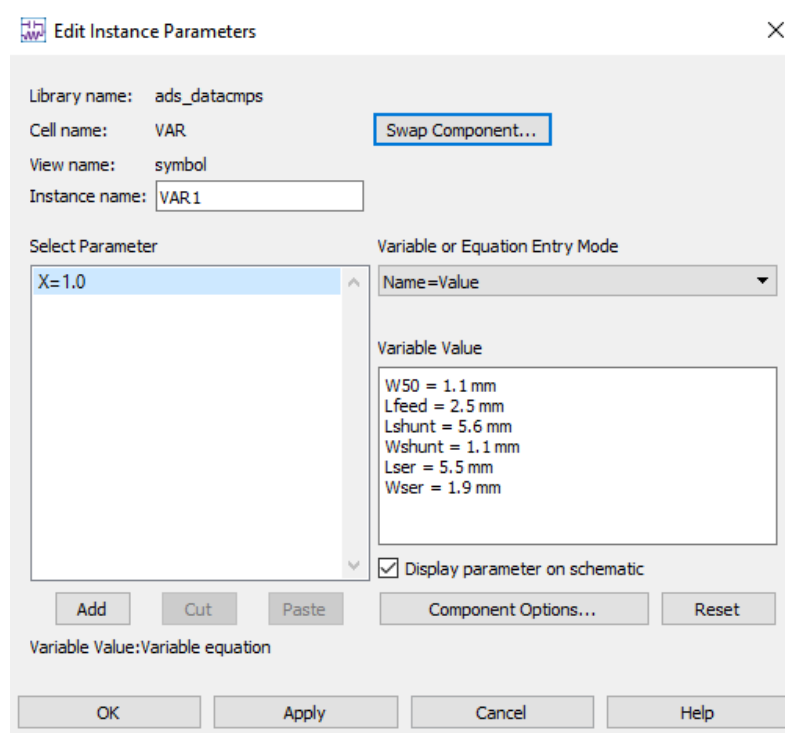
Параллельные шлейфы (50 Ом, 90°) на частоте 8 ГГц получают размеры  $L_{\text{shunt}} = 5,6 \text{ мм}$ ,  $W_{\text{shunt}} = 1,1 \text{ мм}$ .

Последовательные шлейфы (35 Ом, 90°) на частоте 8 ГГц получают размеры  $L_{\text{ser}} = 5,5 \text{ мм}$ ,  $W_{\text{ser}} = 1,9 \text{ мм}$ .

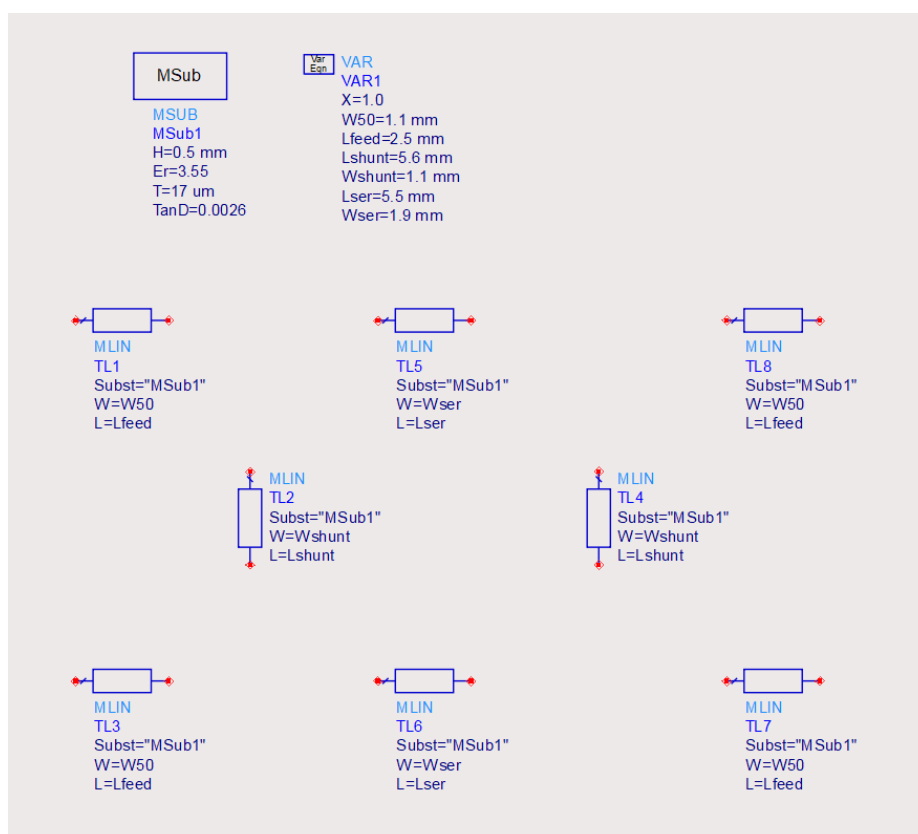
Собираем схему моделирования на микрополосковых линиях (MLIN). Дополнительно со стороны входов поставим 50-Омные участки  $W_{50} = 1,1 \text{ мм}$ ,  $L_{\text{feed}} = 2,5 \text{ мм}$ .

Указанные выше размеры вынесем в переменные (VAR).

! Для быстрого заполнения блока переменных есть режим введения «Name=Value». Он позволяет сразу ввести несколько переменных.

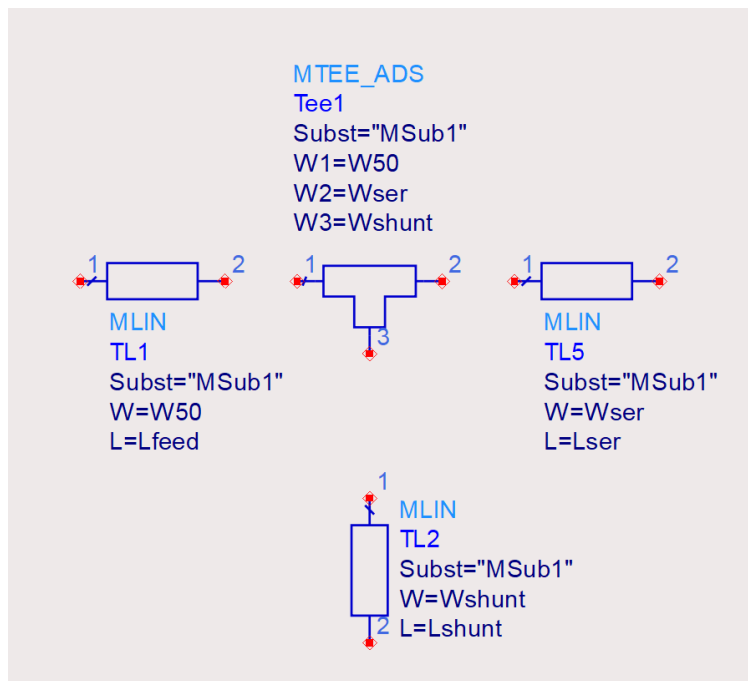




Предварительное расположение микрополосков MLIN.



Добавим Т-образные перекрёстки (MTEE\_ADS). В соответствующих значениях ширин ( $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$ ) нужно ввести значения ширин соответствующих подключённых микрополосков. Какой параметр ширины относится к какому выводу – можно узнать по справке (первый пин отмечен галочкой, второй – проход прямо, третий – в сторону).

! Также можно в настройках схемы включить отображение номеров пинов у компонентов (меню Options – Preferences вкладка Pin/Tee галка Pin Numbers в группе Visibility (on/off)).

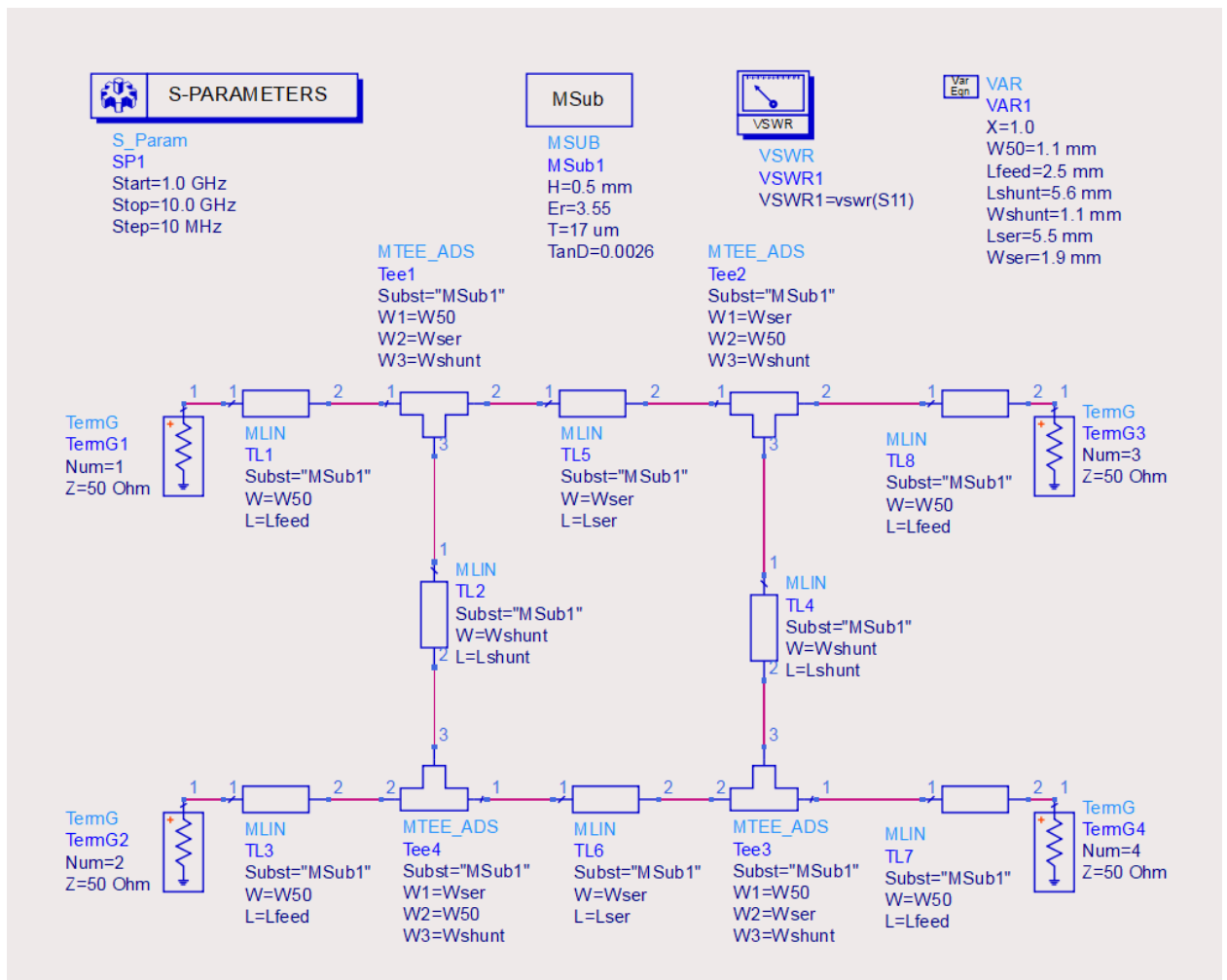


При расположении микрополосковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R). Зеркалить (Mirror About X, Mirror About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению топологии.

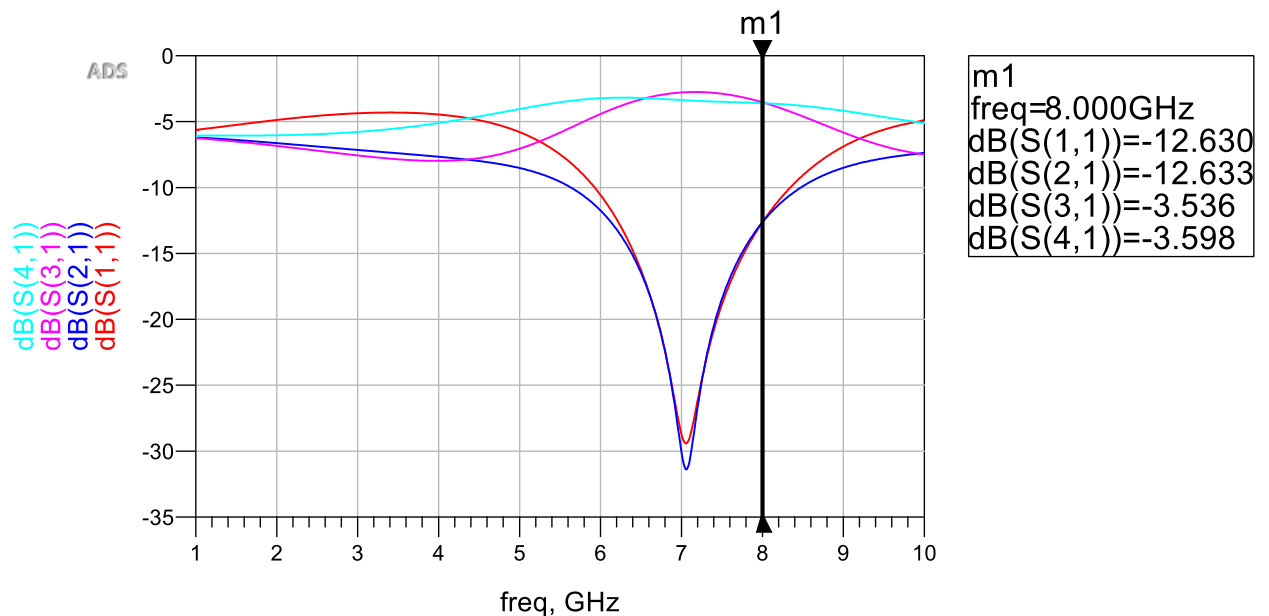
! При расположении компонентов можно перемещать привязанную текстовую информацию по ПКМ – Move Component Text (F5), так, чтобы получать чистую и читаемую схему. Также подпись можно передвигать за синий залитый ромбик.

Дополнительно добавим расчет КСВН по входу. По остальным входам ставить измеритель КСВН нет смысла, т.к. схем симметрична.

Общая готовая к моделированию схема представлена ниже.



Запускаем моделирование. В области графиков строим амплитудные характеристики.




Результаты показывают, что рабочая частота устройства уплыла вниз. Связанно это с тем, что были добавлены тройники и электрические длины шлейфов оказались больше, чем нужно.

С помощью инструмента Tune или Optimization настроим двушлейфный направленный ответвитель на 8 ГГц. Дополнительно настроим его так, чтобы он работал в некотором частотном диапазоне 7,7..8,3 ГГц. Наложим следующие ограничения:

- коэффициент отражения dB(S11) и развязка dB(S21) не должны превышать –20 дБ в данном частотном диапазоне;
- положение провалов коэффициента отражения dB(S11) и развязки dB(S21) должны быть как можно более к 8 ГГц;
- рабочее затухание dB(S31) и переходное ослабление dB(S41) не должны опускаться меньше –3,5 дБ.

Имеет смысл работать с переменными Lshunt, Wshunt, Lser и Wser (каждая с шагом 0,05 мм, уходить от номинального значения стоит не более, чем на 20%). Lshunt и Lser в результате должны стать меньше исходного значения, двигаться почти синхронно и в результате иметь почти одинаковые значения (т.к. они в паре определяют положение провалов dB(S21) и dB(S11)). Дополнительным подбором Wshunt и Wser можно добиться расширения рабочей полосы за счет уменьшения уровня развязки на центральной частоте.

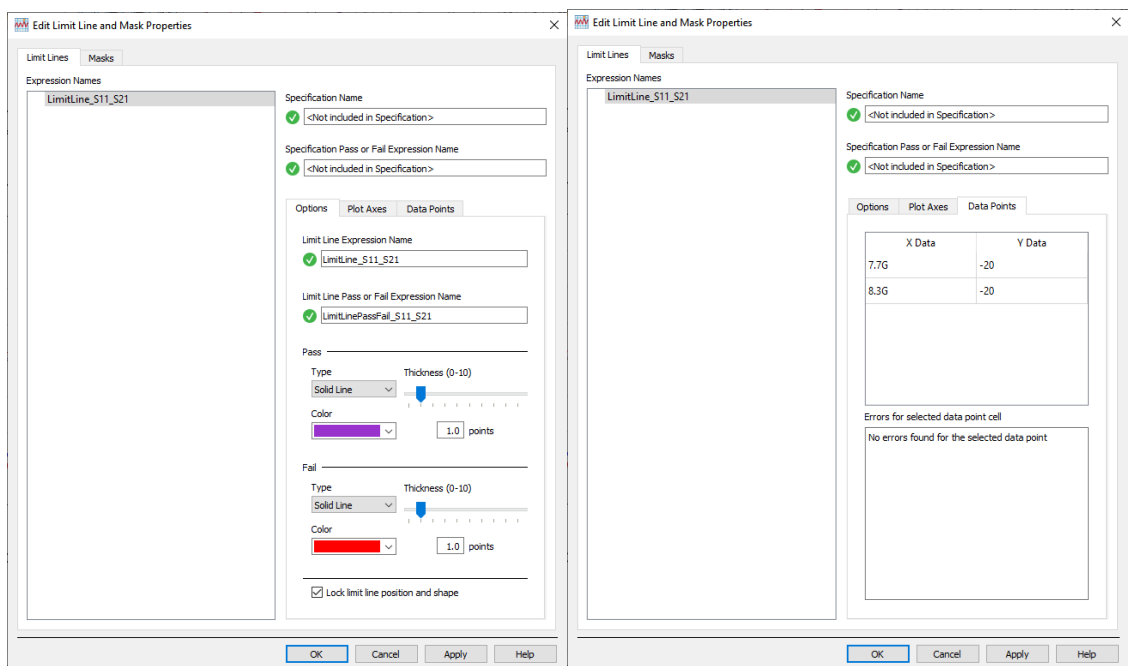
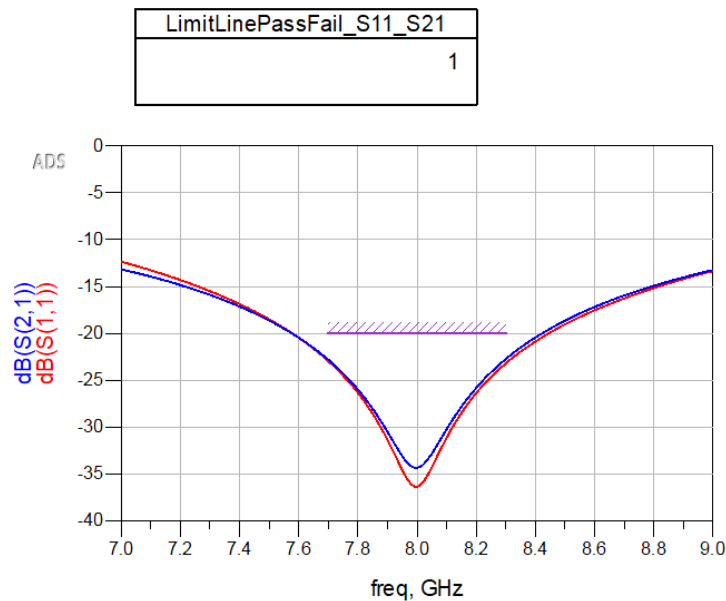


Для удобного контроля графиков можно воспользоваться установкой граничных линий (Limit Line). Они ставятся по команде Insert – Limit Line, тулбар Limit Line . Доступны граничные линии «Больше», «Меньше», «В пределах» и «За пределами». После приблизительной установки граничной линии в ее свойствах на вкладке Data Points ей можно точно численно задать положение. На вкладке Options можно определить имя граничной линии (Limit Line Expression Name), имя выражения для состояния граничной линии (Limit Line Pass or Fail Expression Name) и стиль отображения состояний Pass и Fail.


Граничная линия привязывается к полотну графиков и если все графики на полотне проходят по требованиям, то граничная линия получает статус Pass, изменяет на указанных стиль отображения и связанное с ней выражение принимает значение 1. Если хотя бы один график на полотне не проходит – то граничная линия принимает состояние Fail и выражение получает значение 0.



Использование граничных линий позволяет легко визуально определять, проходит ли результат по требованиям, а связанные выражения использовать их как условия в составных выражениях.

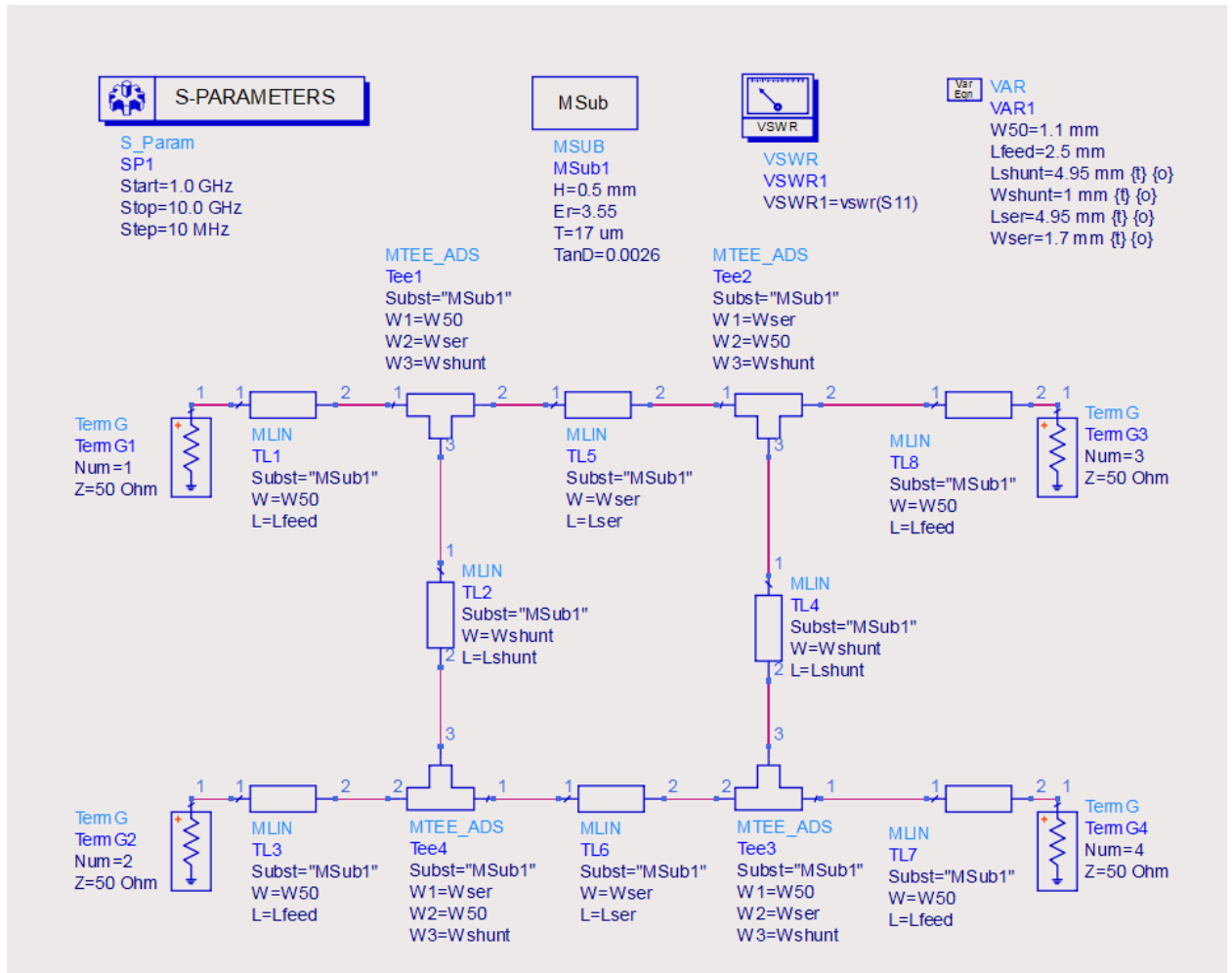


Граничные линии на одном полотне можно объединить спецификацию, возвращающую единое состояние. При этом граничные линии поддерживают только прямоугольные графики.

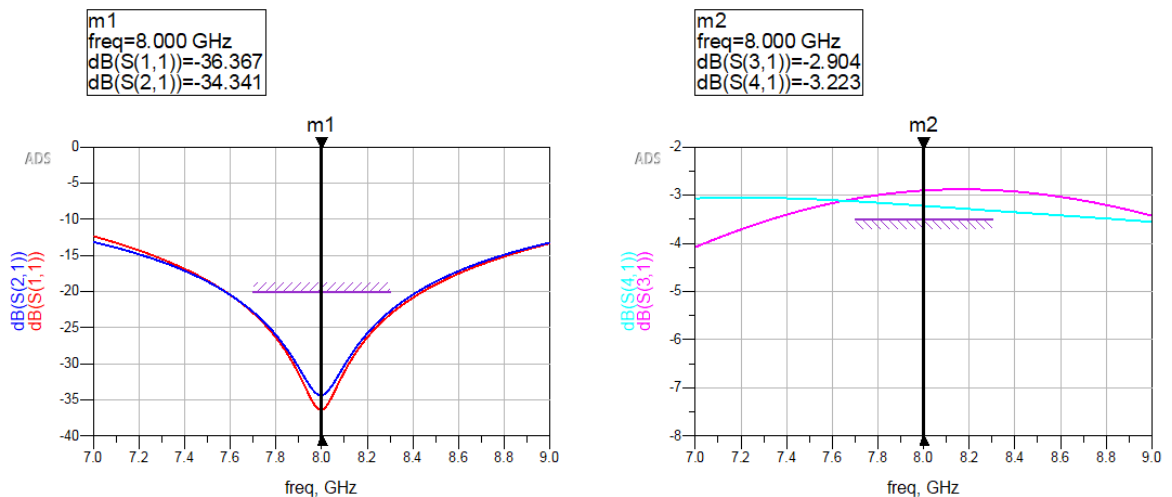
Есть близкая сущность Mask (Inset – Mask, тулбар ) , которой тоже можно указать точки для отображения. Но Mask не поддерживает интерактивность и не анализирует, проходит ли график по

заданным требованиям, не изменяет из-за этого свой стиль и не имеет выражения состояния. Mask является исключительно визуальным примитивом для удобной аннотации прямоугольных графиков.

В примере подобранные значения  $L_{shunt} = 4,95$  мм,  $W_{shunt} = 1$  мм,  $L_{ser} = 4,95$  мм и  $W_{ser} = 1,7$  мм.

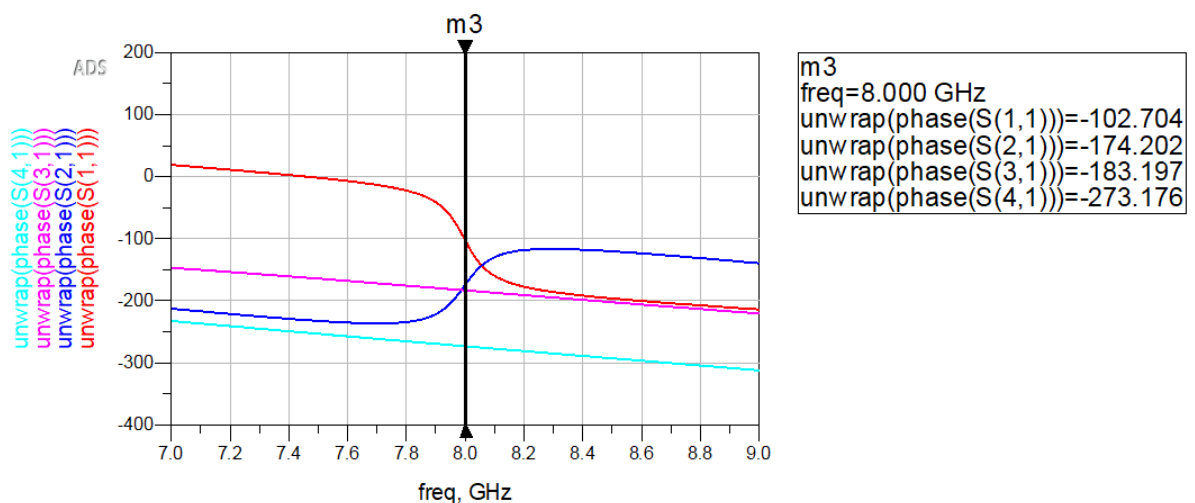


Проанализируем теперь подстроенные результаты.




Как и было запланировано, центральная частота 8 ГГц. Амплитудные характеристики в полосе 7,7..8,3 ГГц соответствуют ожидаемым.

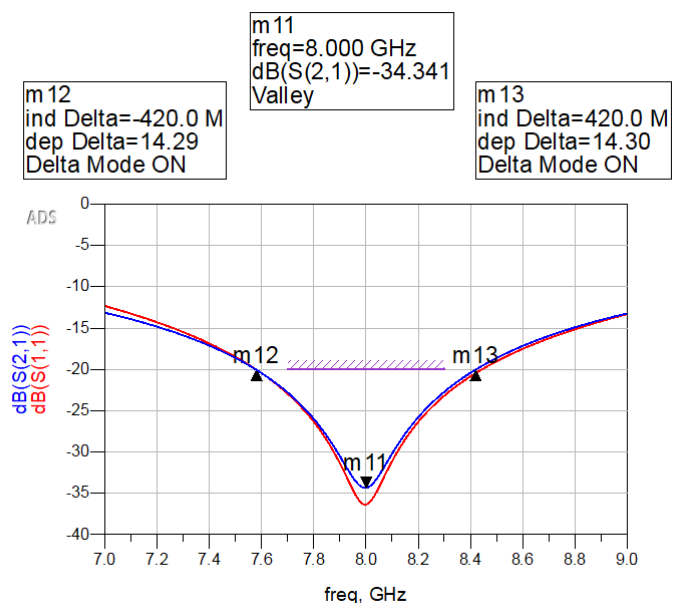
График фазовых соотношений стал сложноват для чтения (присутствуют разрывы через  $360^\circ$ ). Обернем выражения в функцию `unwrap()` (ищет и убирает перескоки через  $360^\circ$ ).



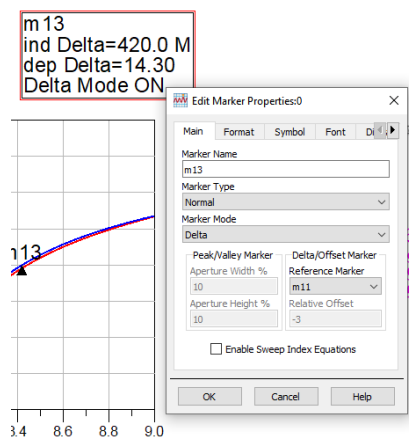
Характер ФЧХ аналогичен модели на идеальных линиях передачи. При этом присутствует дополнительный фазовый набег по отношению к модели на идеальных линиях передачи, связанный с наличием входных участков микрополосковых линий.

Определим, в пределах каких частот сохраняются заданные ограничения.

На графике из dB(S11) и dB(S21) установим маркер типа Valley . Он найдет локальный минимум. Затем поставим слева и справа от него на более высоком графике по два маркера в положениях  $Y = -20$  дБ.

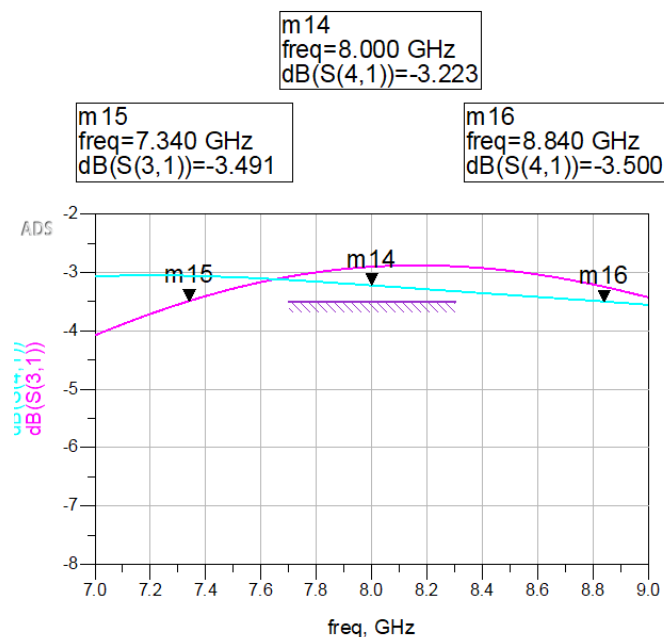


Чтобы не считать дельту по X или Y между маркерами, маркеру можно установить режим Delta и выбрать другой маркер, относительно которого давать данные.



Получается, что по S11 и S21 можно считать, что рабочая полоса двушлейфного направленного ответвителя по уровню  $-20$  дБ порядка  $\pm 420$  МГц (диапазон 7,58..8,42 ГГц).

Аналогичную операцию проведем на амплитудном графике с dB(S31) и dB(S41) по отношению к допустимому уровню  $-3,5$  дБ. Т.к. ограничение снизу, то маркер надо ставить на более низком графике.



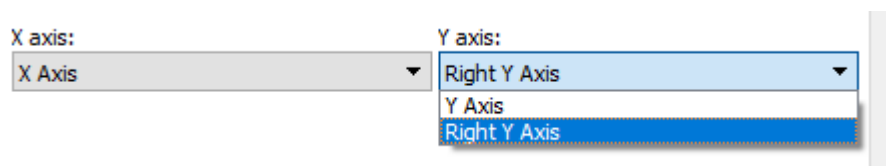
Здесь не получается симметричного частотного диапазона. Кроме того, диапазон частот больше, чем по развязке или коэффициенту отражения и равен 1,5 ГГц (диапазон 7,34..8,84 ГГц).

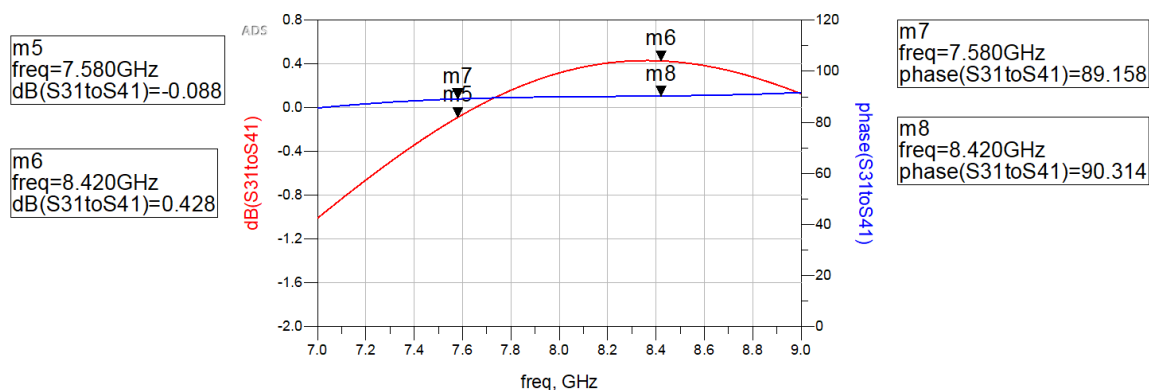
Окончательно проверим стабильность работы рабочего и вторичного плеч по отношению друг другу. Определим выражение

$$\text{Eqn } S_{31 \text{ to } S_{41}} = S_{31} / S_{41}$$

Выведем на прямоугольные графики амплитуду в дБ и фазу этого соотношения и поставим маркеры по краям ранее определенного расширенного частотного диапазона 7,58..8,42 ГГц.

! Чтобы на одном графике можно нормально отобразить данные различного характера (или диапазона) по Y, но с одинаковой зависимостью от X, можно второму графику привязать отдельную ось Y справа (в свойствах графика на вкладке Plot Axes в выпадающем списке Y axis выбрать Right Y Axis).





Видно, что фазовое соотношение между выходами 3 и 4 сохраняется в пределах  $\sim 1^\circ$ , а амплитудное порядка 0,5 дБ.

Получим эти две оценки точно. С помощью функции `build_subrange()` выделим интересующий частотный поддиапазон из S31toS41. Затем найдем размах по амплитуде и по фазе (с использованием функций `max()` и `min()`).

**Eqn** S31toS41inBand = build\_subrange((S31toS41), 7.58GHz, 8.42GHz)

**Eqn** S31toS41inBand\_magRipple=max(dB(S31toS41inBand))-min(dB(S31toS41inBand))

**Eqn** S31toS41inBand\_phaseRipple=max(phase(S31toS41inBand))-min(phase(S31toS41inBand))

S31toS41inBand_magRipple	S31toS41inBand_phaseRipple
0.519	1.156

### Модель на топологическом уровне

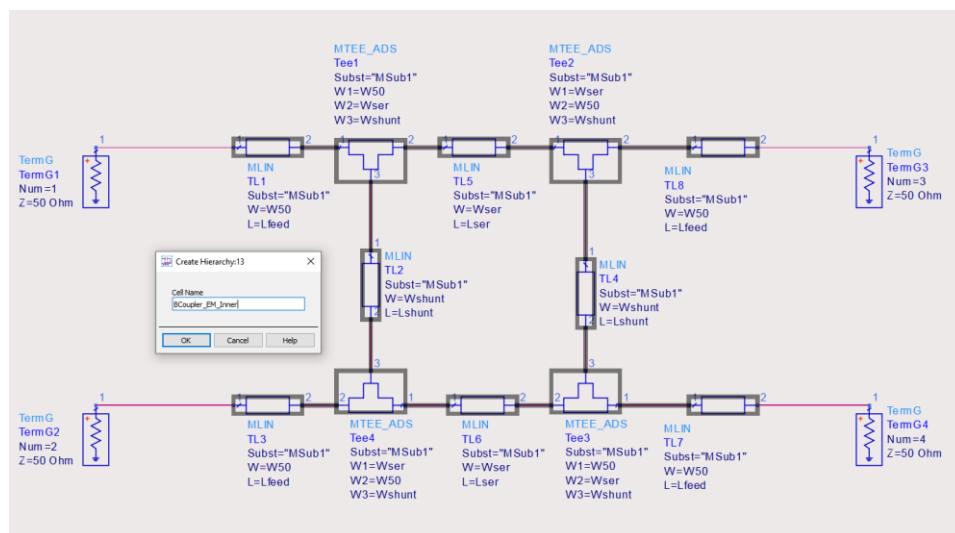
**Lab1** Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Для параметризации топологии надо будет создать двухуровневую схему:

- схема верхнего уровня VCoupler\_EM\_Top, в которой будет контроллер S-параметров, терминаторы и все измерительные выражения.
- схема нижнего уровня VCoupler\_EM\_Inner, только с микрополосками (MLIN и MTEE\_ADS), подключённая наверх через пины.

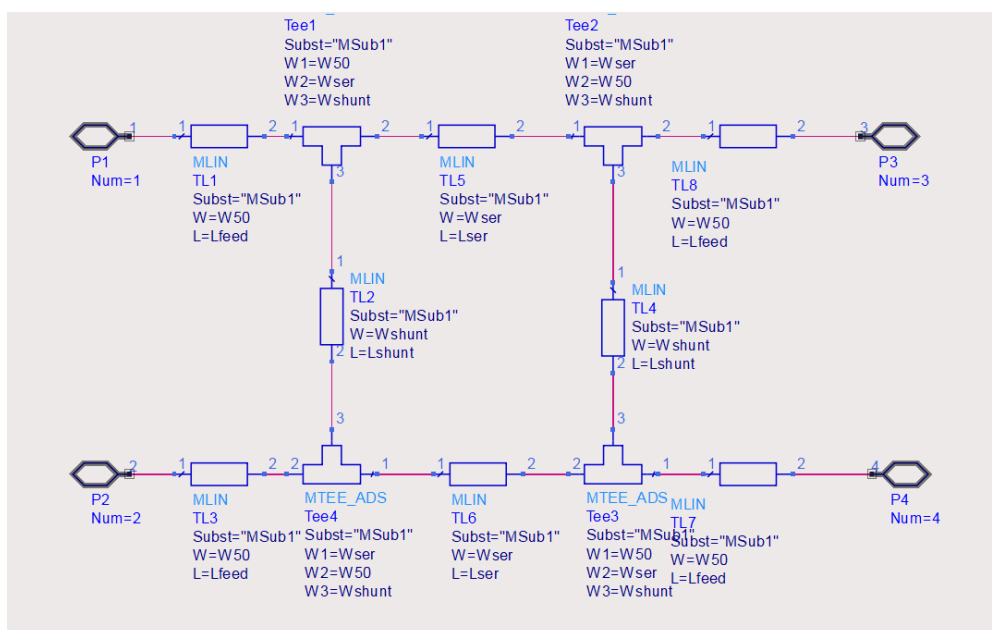
Схему нижнего уровня VCoupler\_EM\_Inner надо будет сконвертировать в топологию; сделать всю ячейку VCoupler\_EM\_Inner параметризированной и настроить параметры EM\_моделирования (emSetup).

Далее кратко показаны основные картинки до начала моделирования

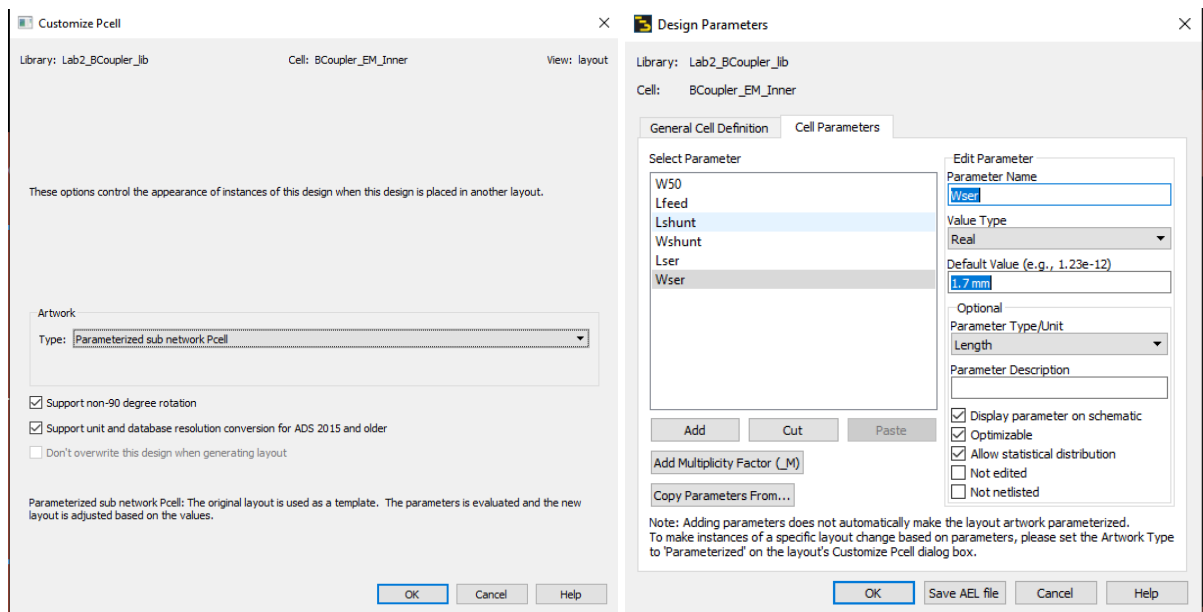
- создание иерархии



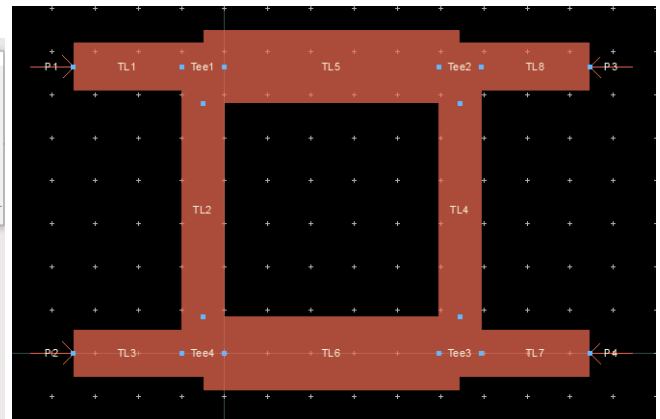
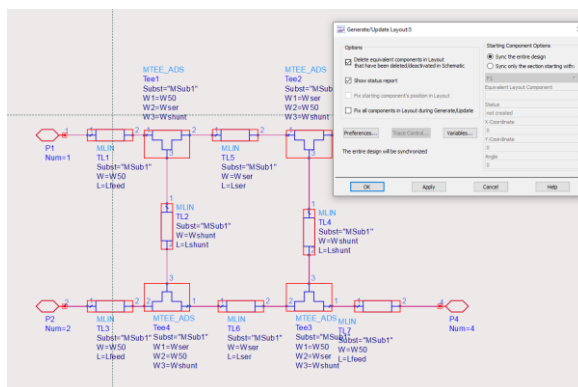
Автоматическое создание иерархий может выставить порядок пинов не в том порядке, как нам удобно. В примере переставлены местами пары пинов P1-P2 и P3-P4. Для удобства сопоставления графиков на разных этапах работы нужно эти пины переместить в нужные места (P1-P3 – основное плечо, P2-P4 - вторичное).





- параметризация ячейки BCoUpler\_EM\_Inner





- генерация топологии подсхемы BCoupler\_EM\_Inner



**Lab1** Далее надо настроить emSetup  подсхемы BCoupler\_EM\_Inner. Задать следующие настройки:

 Mom uW - метод моделирования Momentum Microwave, режим EM Simulation/Model.

 Substrate - убедиться, что привязана правильная подложка.

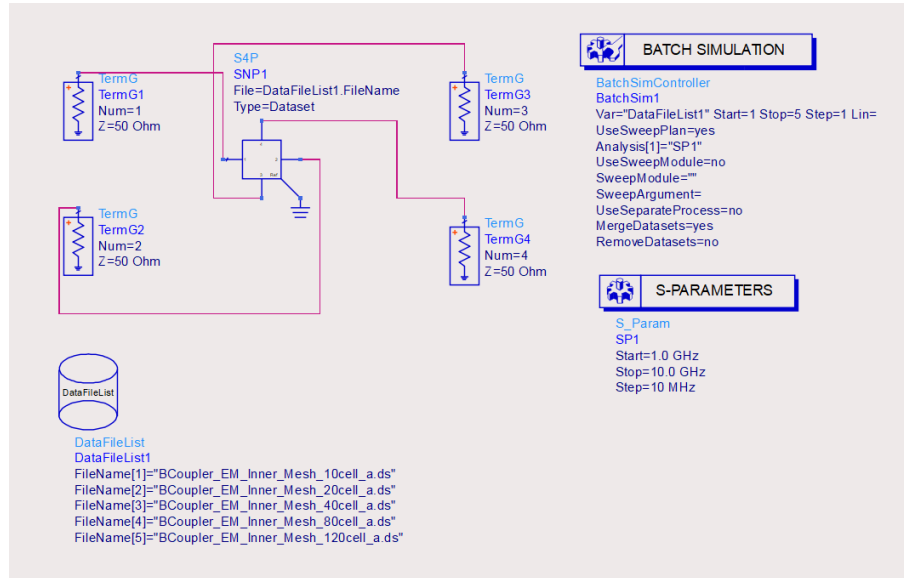
 Frequency plan - частотный план адаптивный от 0 до 10 ГГц, плюс точка 8 ГГц.

**Lab1** Далее определяются параметры плотности сетки в два этапа, пока без использования emModel, только изменяя параметры сетки и с сохранением в датасет с пользовательским суффиксом вида «\_10cell». Сначала проведено моделирование на плотность сетки 10, 20, 40, 80 и 120 ячеек/длина

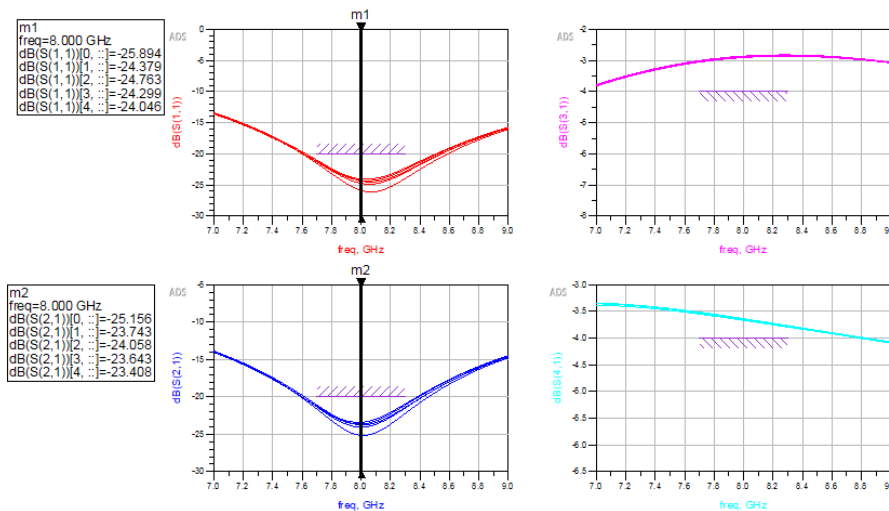


волны (Options – Mesh – Cell/Wavelength) без упрощения сетки (Options – Mesh – Mesh reduction = false).

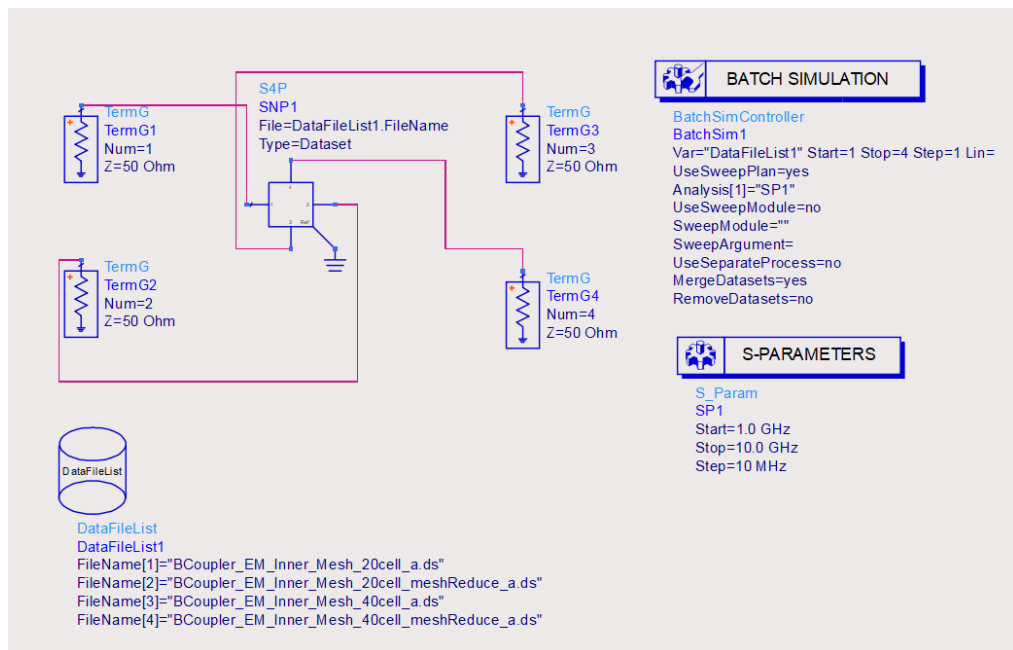
Датасеты загружены в схему BCoupler\_Mesh. Здесь для сравнения датасетов использован блок S4P и порты выставлены аналогично всей работе.



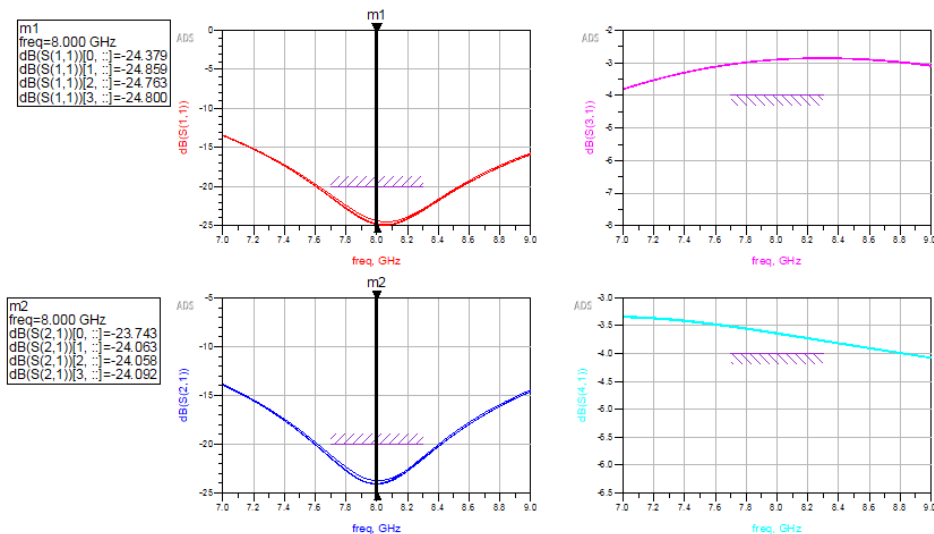
Видно, что в режиме без упрощения сетки сетка 10 ячеек/длина волны слишком грубая, а 80 и более плотно избыточно.



Второй этап, сетки 20 и 40 ячеек/длина волны с упрощением сетки (Options – Mesh – Mesh reduction = true).



Результаты с упрощением и без упрощения сетки практически одинаковы.




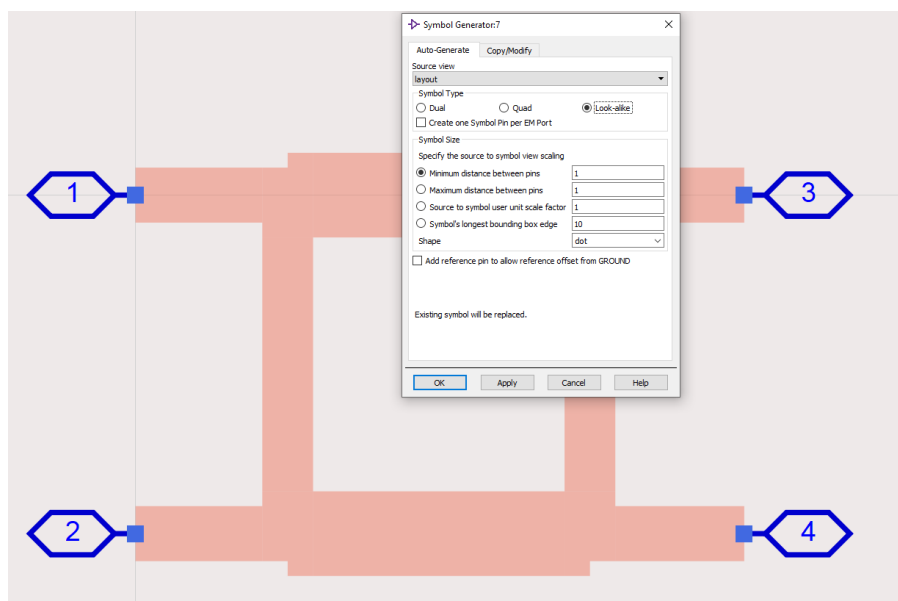
Решено остановиться на сетке 40 ячеек/длина волны с упрощением сетки. Можно донастраивать emSetup.


**Output plan** - отключено автоматическое отображение результатов и включено сохранение токов для всех расчетных частот.

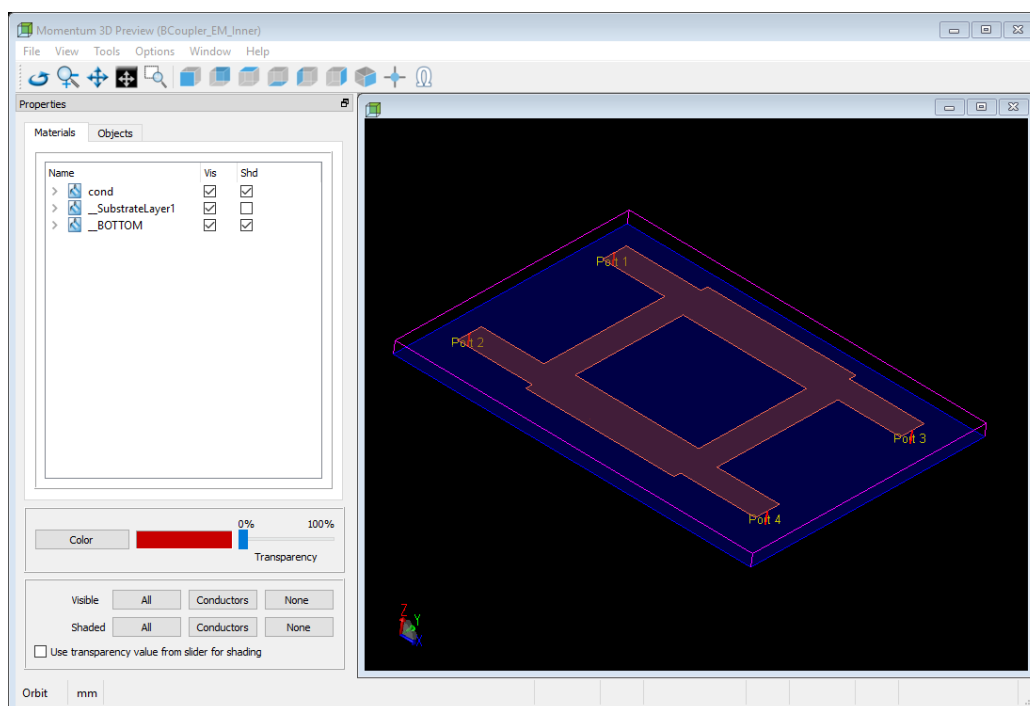
**Options** - Mesh с точностью 40 ячеек/длина волны, включено автоматическое создание краевой сетки и разрешено упрощение сетки


**Model** - включено создание и сохранение emModel

По команде Tools – Open Symbol Editor  сгенерирован символ, аналогичный топологии.



Перед запуском расчета можно по команде Tools - 3D EM Preview  вызвать отдельное окно, в котором будет показано, как будет считаться модель.



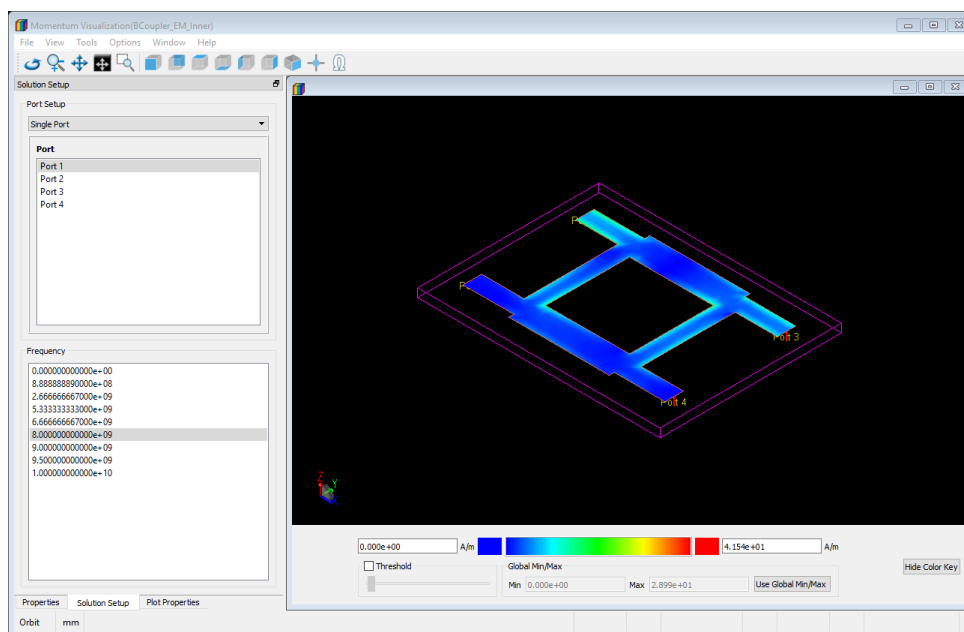
Один раз посчитаем топологию по запуску из текущего emSetup (Generate:S-Parameters). Т.к. в текущей топологии нет переходных отверстий, то посчитается она быстро. После расчета можно по команде Tools – Visualization  открыть окно визуализации результатов. Параметры

отображения объектов в нем аналогичны окну 3D EM Preview. Для настройки отображения результатов (поверхностных токов), нужно выполнить две настройки. На вкладке Solution Setup выбрать порт (или комбинацию портов) в списке Port Setup, относительно которого отображать результат и частоту отображения (список Frequency). Список частот соответствует тем частотам, для которых сохранялись поверхностные токи.

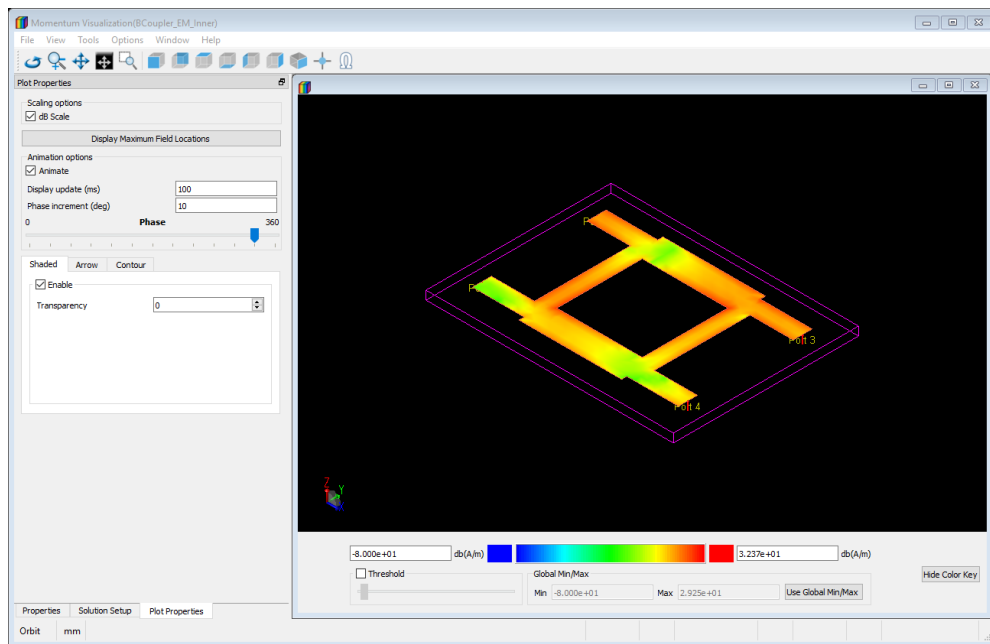


Если визуализации нет, то в настройках emSetup на вкладке Output plan не включено сохранение токов в результат.

Выберем отображение относительно порта 1 на частоте 8 ГГц.



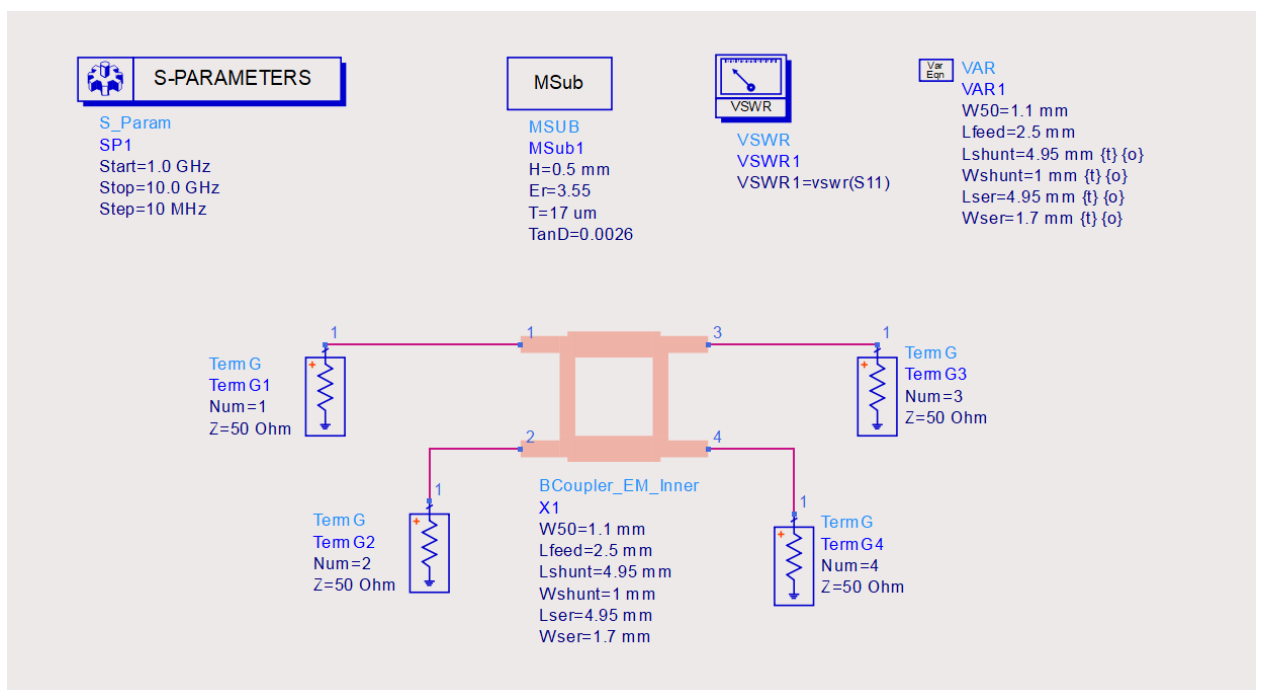
На вкладке Plot Properties включим логарифмический масштаб (галка dB Scale) и включим анимацию поверхностных токов.



Видно, что между выходами 3 и 4 есть сдвиг по фазе на  $90^\circ$ .

Полученные данные сохранены в emModel в составе ячейки BCoupler\_EM\_Inner. Можно из основного окна ADS развернуть состав ячейки и открыть emModel.

Вернемся в схему верхнего уровня BCoupler\_EM\_Top.

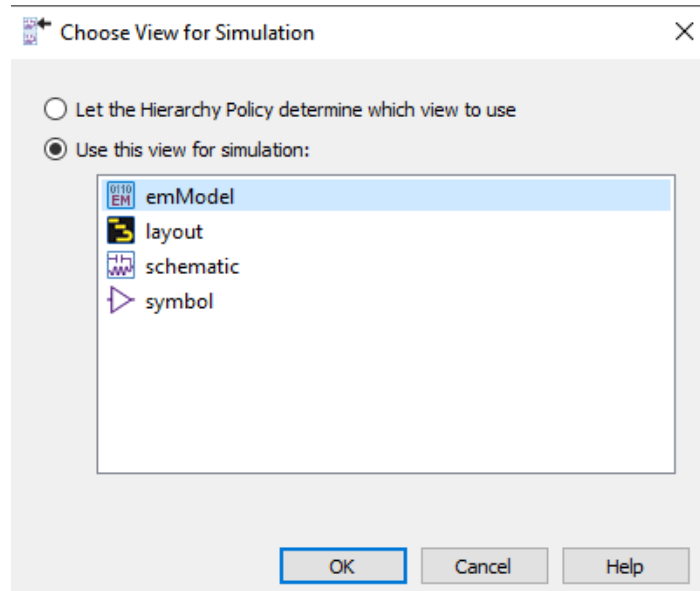


Приведем ее к следующему виду:

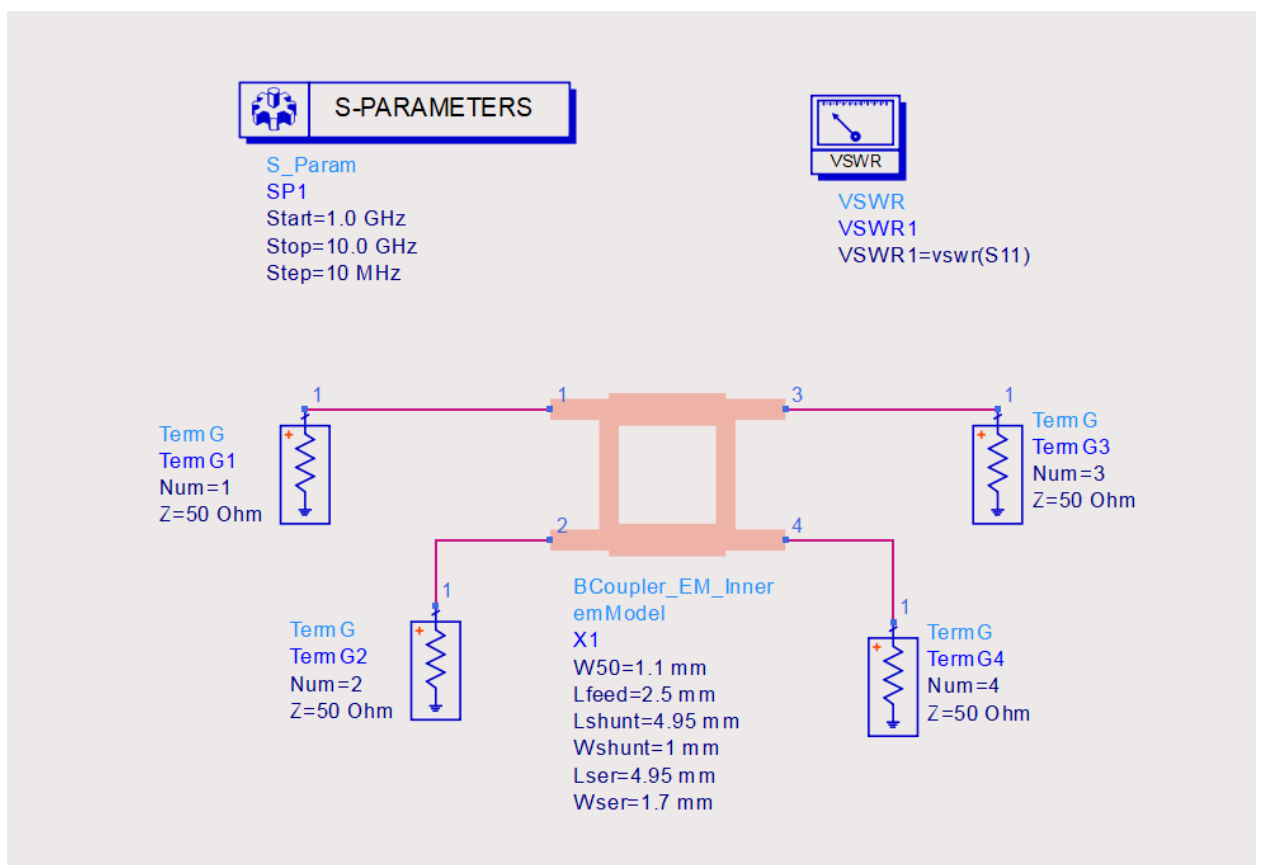
**Lab1**

- отключим MSUB1, т.к. в ЕМ-анализе подложка берется из файла subst.

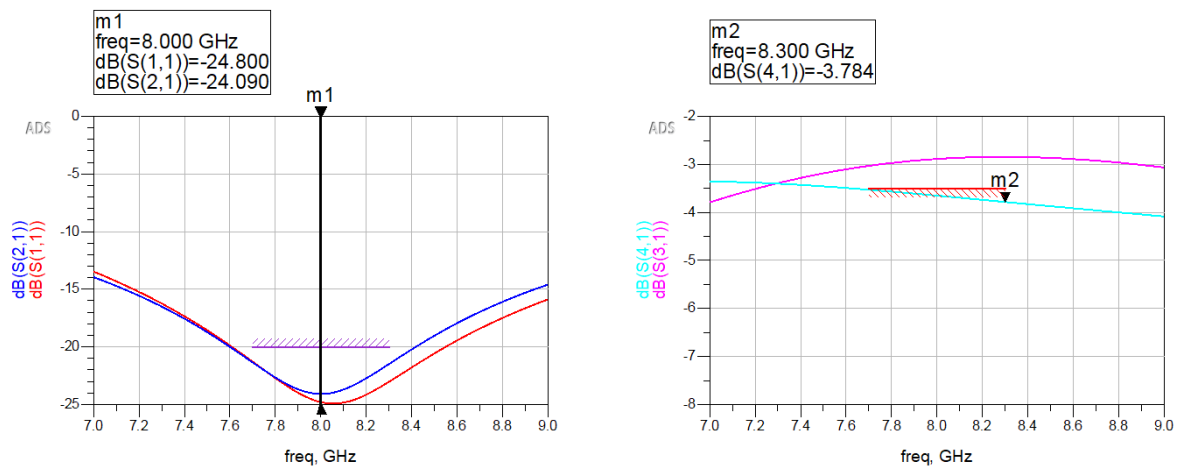
- отключим блок переменных VAR, т.к. переменные в топологию передаются через переменные ячейки.
- у подсхемы топологии BCoupler\_EM\_Inner по ПКМ – Component – Choose View for Simulation установим, что результаты надо брать из emModel.



Общий вид схемы BCoupler\_EM\_Top получится следующий



Запускаем расчет.



Развязка и коэффициент отражения по входу практически не изменились. Рабочее затухание тоже находится в разумных пределах. А вот переходное ослабление просело хуже, чем 3,5 дБ, заложенных в схемном расчете.

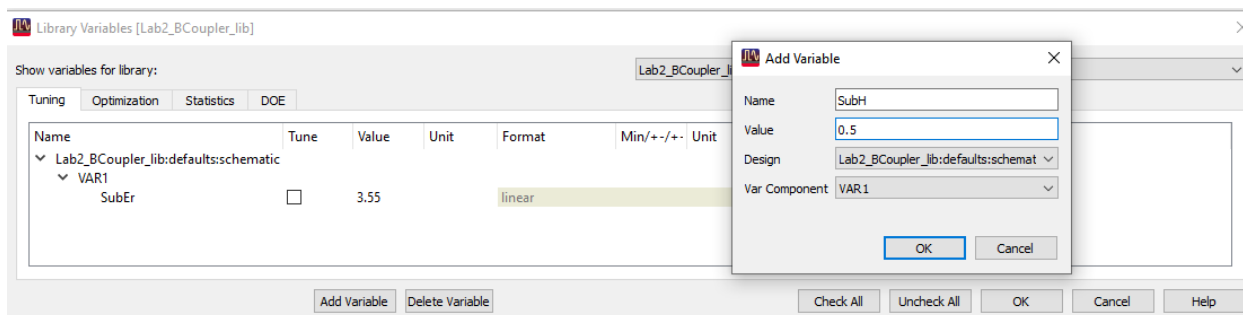
### Статистический анализ выхода годных

Проведем статистический анализ выхода годных (Yield) полученной топологии.

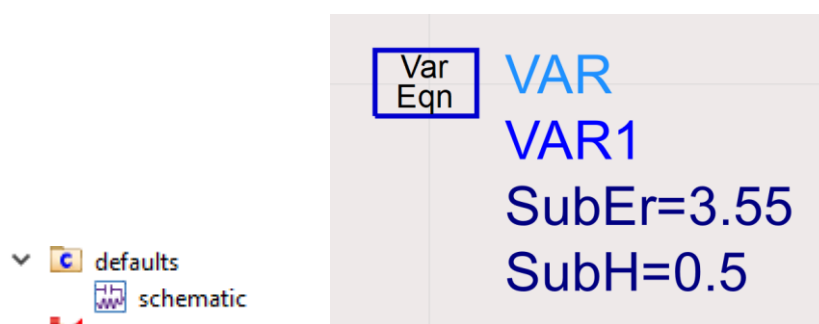
Оценим, будут ли сохраняться коэффициент отражения, рабочее затухание, развязка и переходное ослабление, а также симметричность рабочего затухания и переходного ослабления при учете технологических разбросов в производстве.

Для возможности вариации параметров подложки нужно параметризовать подложку для ЕМ-моделирования. Для этого нужно сделать несколько дополнительных преобразований:

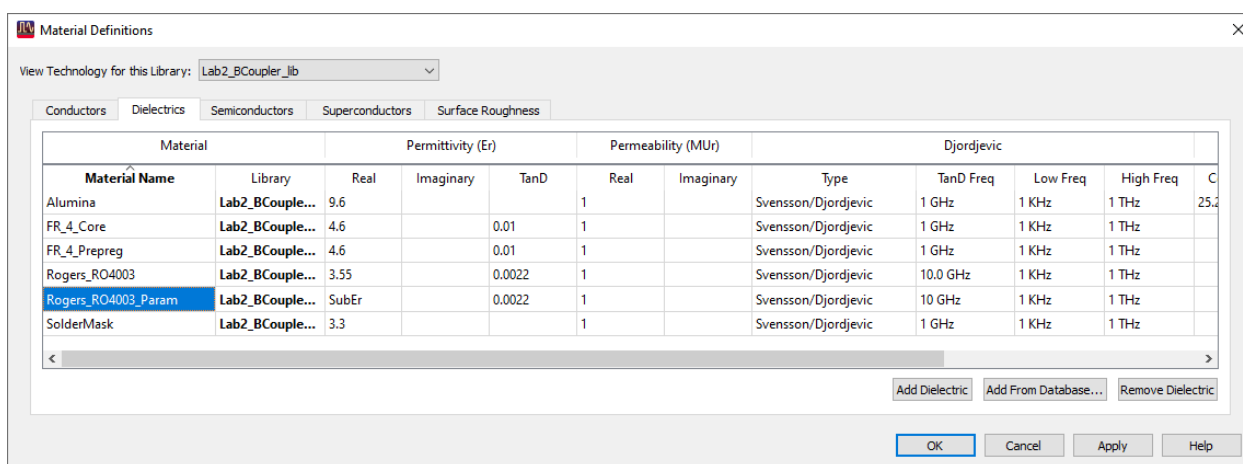
Создать параметры библиотеки проекта. В основном окне ADS по команде Options – Technology – Variables Definitions по команде Add Variable добавим две переменные – SubEr и SubH. Переменным библиотеки принято не назначать тип, чтобы иметь возможность использовать их как простое число в различных местах проекта, где преобразования множителей недоступны. Договоримся, что толщина диэлектрика SubH в мм. SubEr и так безразмерная.



В библиотеку проекта добавится ячейка defaults со схематиком, в котором будет находится блок VAR с созданными выше переменными библиотеки. Этот схематик фактически является местом хранения переменных библиотеки проекта и там тоже можно с ними работать.



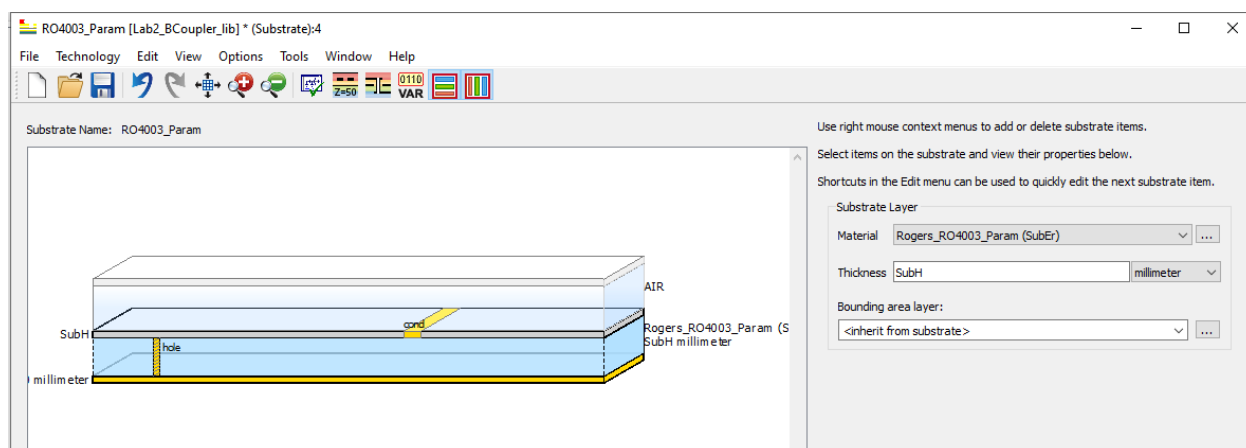
Добавить параметризованный ВЧ-диэлектрик. Из основного окна ADS по команде Options – Technology – Material Definitions выйдем в окно базы материалов проекта. Скопируем строку с базовым ВЧ-диэлектриком и заменим ему значение относительной диэлектрической проницаемости с фиксированного значения на переменную SubEr.



Создать параметризованное определение подложки. Из основного окна ADS по ПКМ – Copy File скопируем технологическое определение подложки tech.subst как RO4003\_Param. Материал подложки выберем параметризованный (Rogers\_RO4003\_Param) и толщину тоже зададим



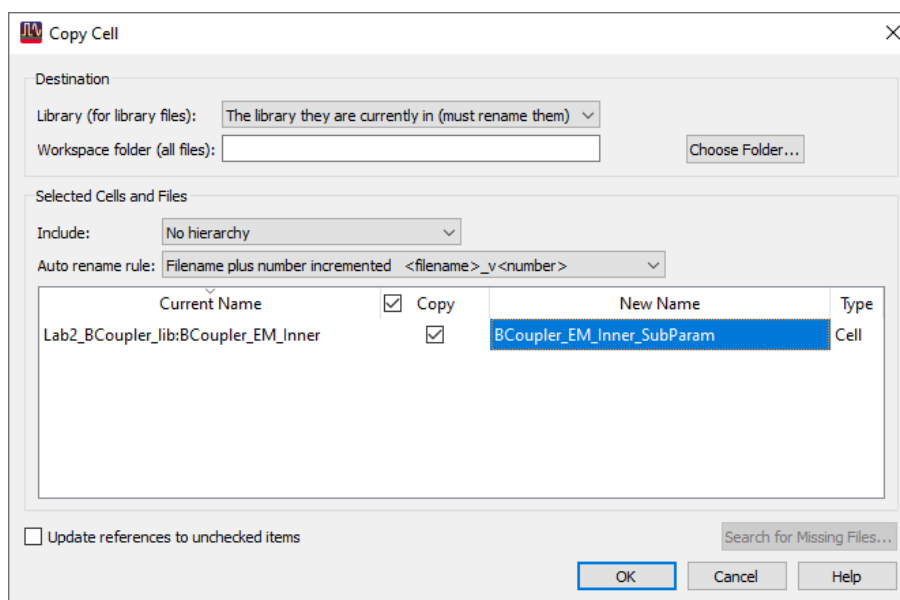
переменной SubH. Т.к. переменные проекта безразмерные, то для толщины нужно указать единицу (мм).



В дереве проекта теперь у нас есть дополнительная параметризованная подложка. Она не будет технологической подложкой для библиотеки проекта, а будет использоваться только для параметрического ЕМ-моделирования.

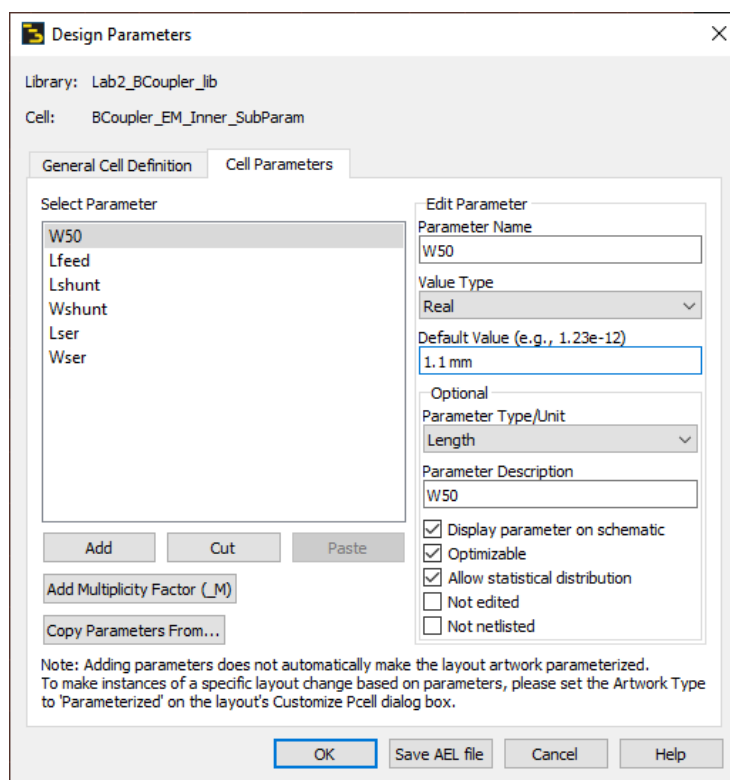
Доступ к окнам технологии библиотеки также возможен и из редактора подложки (меню Technology).

Создать внутреннюю ячейку с параметризованной подложкой. В дереве проекта по ПКМ – Copy Cell скопируем ячейку с внутренней топологией BCoupler\_EM\_Inner как BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam.

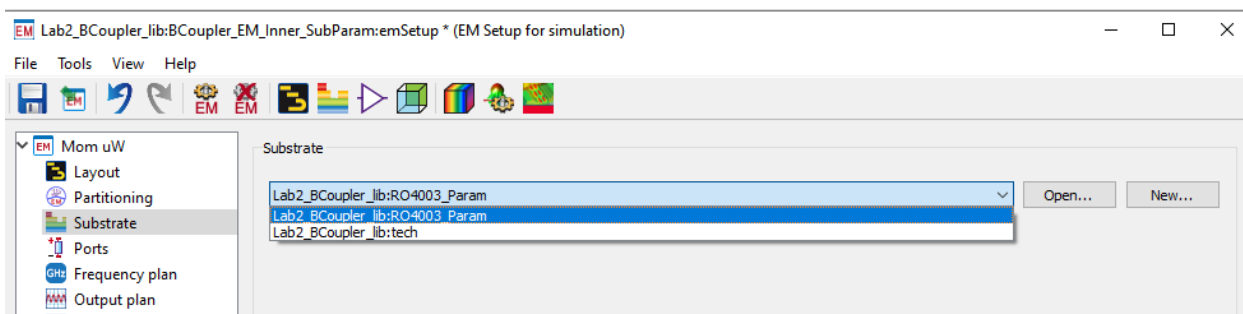


В новой внутренней ячейке надо убедиться, что она параметризована. Для этого в ее топологии по команде File – Design Parameters на вкладке Cell Parameters должны быть соответствующие параметры. Если их нет, то по

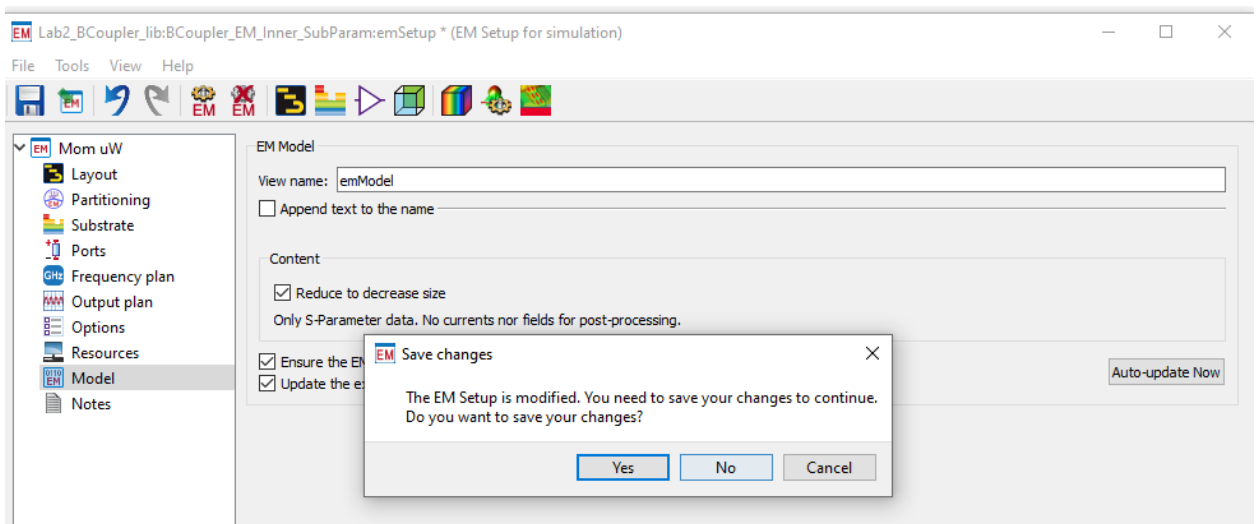
кнопке Copy Parameters From можно скопировать параметры из исходной ячейки.



Далее в новой внутренней ячейке в настройках emSetup нужно выбрать параметризованную подложку (вкладка Substrate).



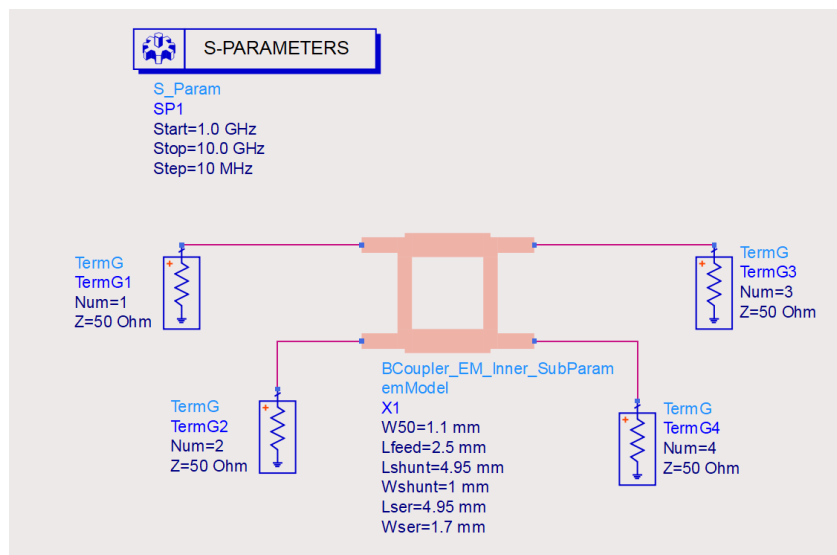
Также на вкладке Model нужно обновить emModel по кнопке Auto-update Now. Откроется окно для сопоставления старых результатов с учетом появления новых параметров SubEg и SubH. Укажем No для полного удаления базы результатов.




Ячейка подсхемы BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam готова. Можно приступить к статистическому анализу выхода годных (Yield). Данный анализ позволяет понять, как ведет себя интересующий результат при случайном изменении параметров.


Оценим, как будет меняться коэффициент отражения S11, рабочее затухание S31, переходное ослабление S41 и развязка S21 и останутся ли они в допустимых пределах, если численные значения длин и ширин линий, а также толщина и относительная диэлектрическая проницаемость подложки могут случайно изменяться в некоторых пределах. Длинам и толщине подложки разрешим меняться по равномерному распределению в пределах  $\pm 0,05$  мм. Относительная диэлектрическая проницаемость подложек может меняться у разных производителей, иногда в значительных пределах, поставим ей разброс  $\pm 0,2$  по равномерному распределению.

Создаем схему BCoupler\_Yield. Заменяем внутреннюю подсхему возьмем на BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam.



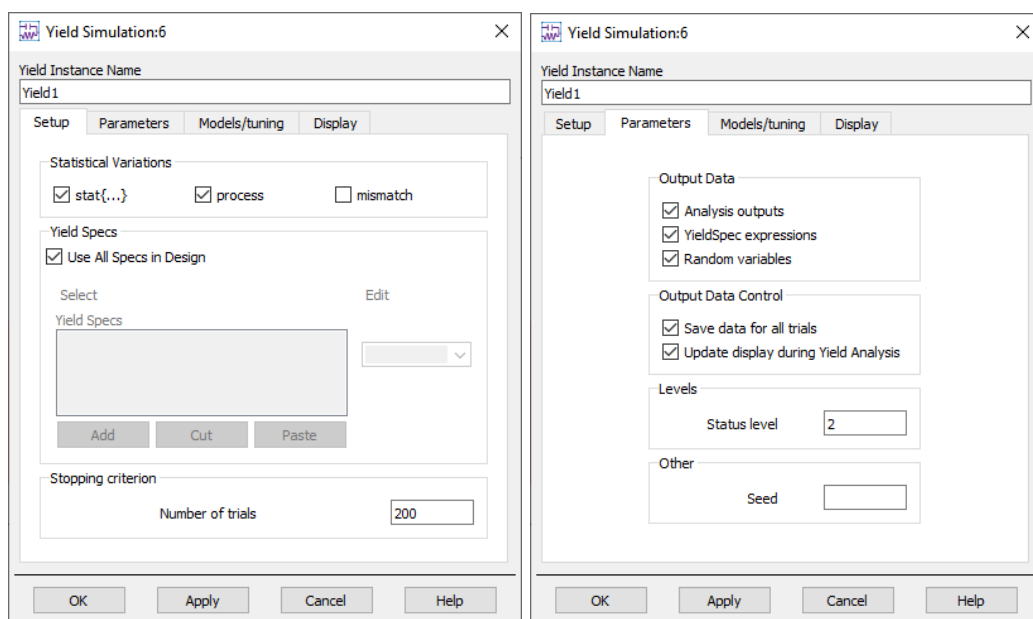
Как и при оптимизации, задается анализ выхода годных через три составляющие:

- Yield  - контроллер анализа выхода годных (палитра Optim/Stat/DOE). Он контролирует сбор промежуточной информации и рассчитывает процент выхода годных.

- YieldSpec  - одно или несколько измерительных выражений и границы, в которых считается, что выражение выполняется (палитра Optim/Stat/DOE).

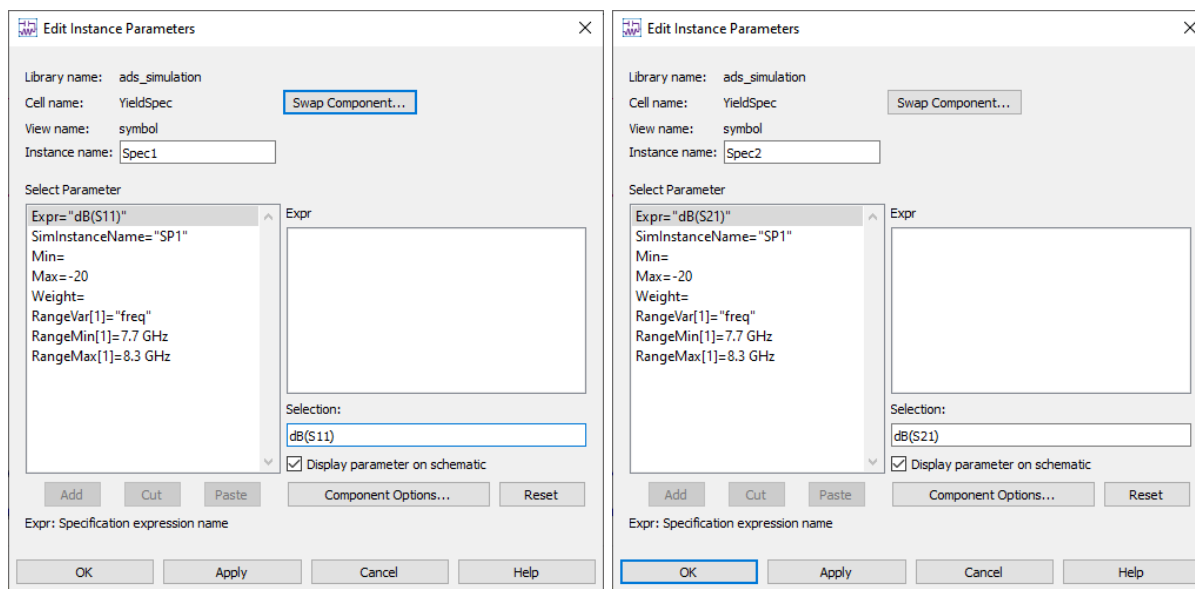
- Переменные и допустимые диапазоны их вариации, задается аналогично настройкам Tune и Optimization.

Добавим и настроим контроллер Yield. Количество попыток пусть будет 200. Т.к. мы планируем проводить постанализ массива данных, то пусть для каждой попытки сохраняется результат и случайные значения переменных.

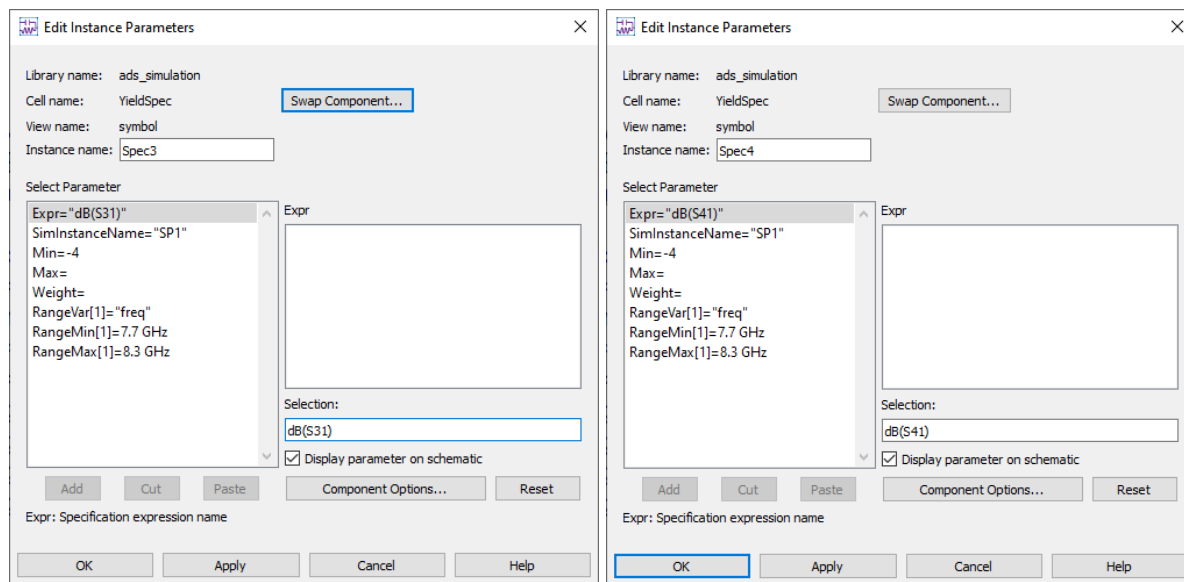


Спецификации YieldSpec укажем аналогичные, полученным при ЕМ-анализе.

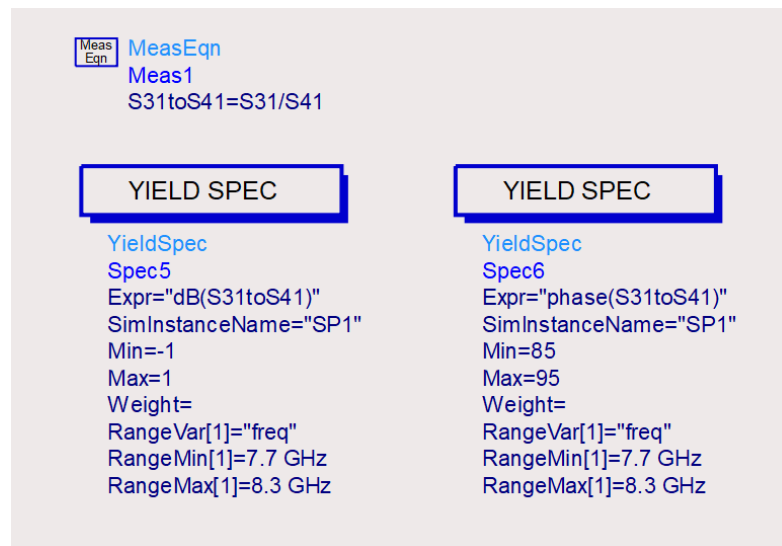
Коэффициенту отражения S11 и развязке S21 установим предел в -20 дБ. Выражений вида «dB(S(1,1))» среди предопределенных на схеме нет, их нужно вписать самостоятельно в поле Selection. Данные мы вырезаем в частотном поддиапазоне 7,7..8,3 ГГц. Результаты берем из контроллера SP1.



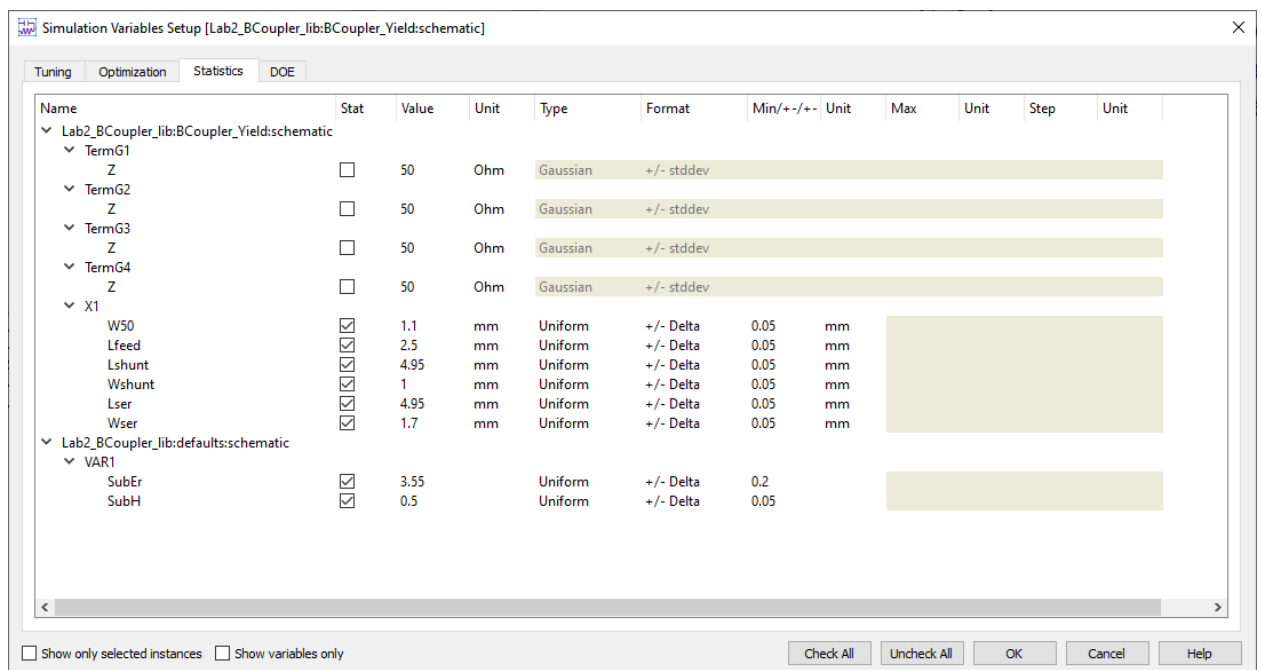
Рабочему затуханию S31 и переходному ослаблению S41 смягчим требования до -4 дБ.



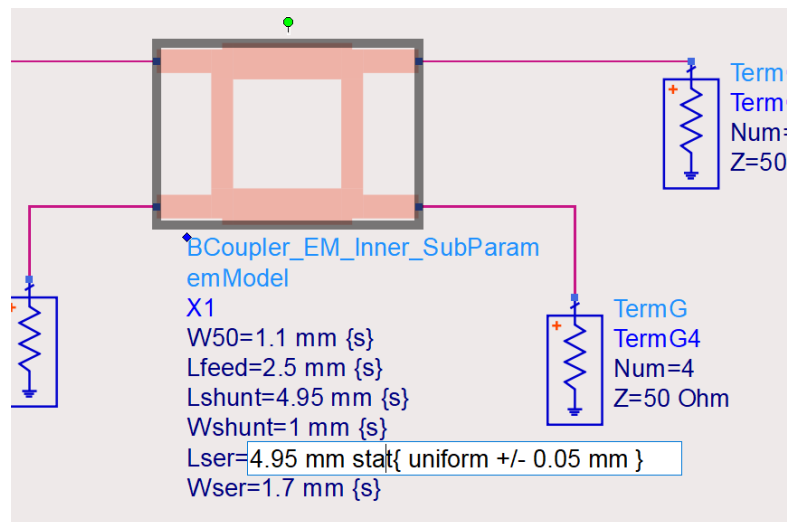
Для оценки симметричности плеч добавим измерительное выражение MeasEqn, в котором рассчитаем S31/S41. А затем в двух спецификациях разрешим несимметричность по амплитуде  $\pm 1$  дБ и по фазе  $\pm 5^\circ$ . С учетом того, что идеальное значение  $\text{dB}(S31/S41) = 0$ , а  $\text{phase}(S31/S41) = 90^\circ$ , то эта пара спецификаций будет выглядеть следующим образом.



Пусть используемый техпроцесс позволяет линейным размерам изменяться по равномерному распределению в пределах  $\pm 0,05$  мм. Относительной диэлектрической проницаемости разрешим меняться в пределах  $\pm 0,2$  от номинала, также по равномерному распределению. Толщине подложки разрешим меняться в пределах  $\pm 0,05$  от номинала, где значение интерпретируется в мм. Т.к. размеры топологии и параметры подложки задаются в разных местах, то удобно пользоваться окном Simulation Variables Setup, вкладка Statistics.

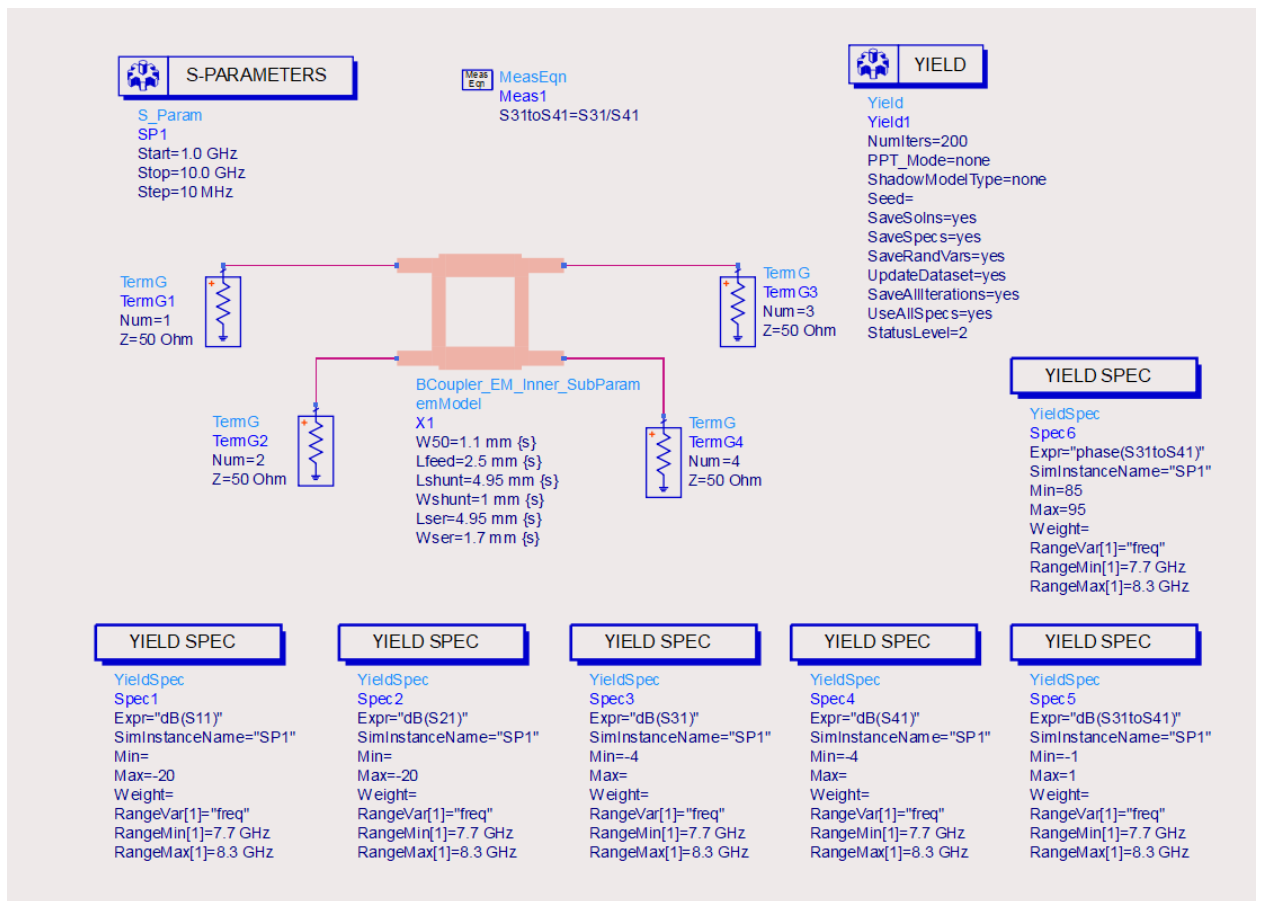


Также, как и при туне или оптимизации, переменные разрешенные на случайное изменение, получают в отображении на схеме суффикс {s}.



Для построения хоть сколько-нибудь достоверной статистики необходимо провести довольно большое число попыток, каждая из которых запускает свой ЕМ-расчет. Соответственно весь расчет устойчивости может идти довольно долго. Если исходные параметры моделирования заданы с ошибкой, то весь Yield-расчет будет некорректным и его придется пересчитывать заново. Среди частых ошибок – схема даже в номинальном состоянии не проходит по спецификациям. Такое бывает, если с ошибкой указаны размеры. Также иногда с ошибкой задается разброс переменных (не учтена единица). Или спецификации заданы излишне оптимистично. Чтобы не ждать долго и выбросить потом весь расчет, можно изначально провести Yield-анализ с малым числом попыток (например, с 10..20) и проверить, насколько корректно и ожидаемо идет расчет устойчивости.

Схема перед полным запуском должна иметь приблизительно следующий вид (показано на 200 попыток).



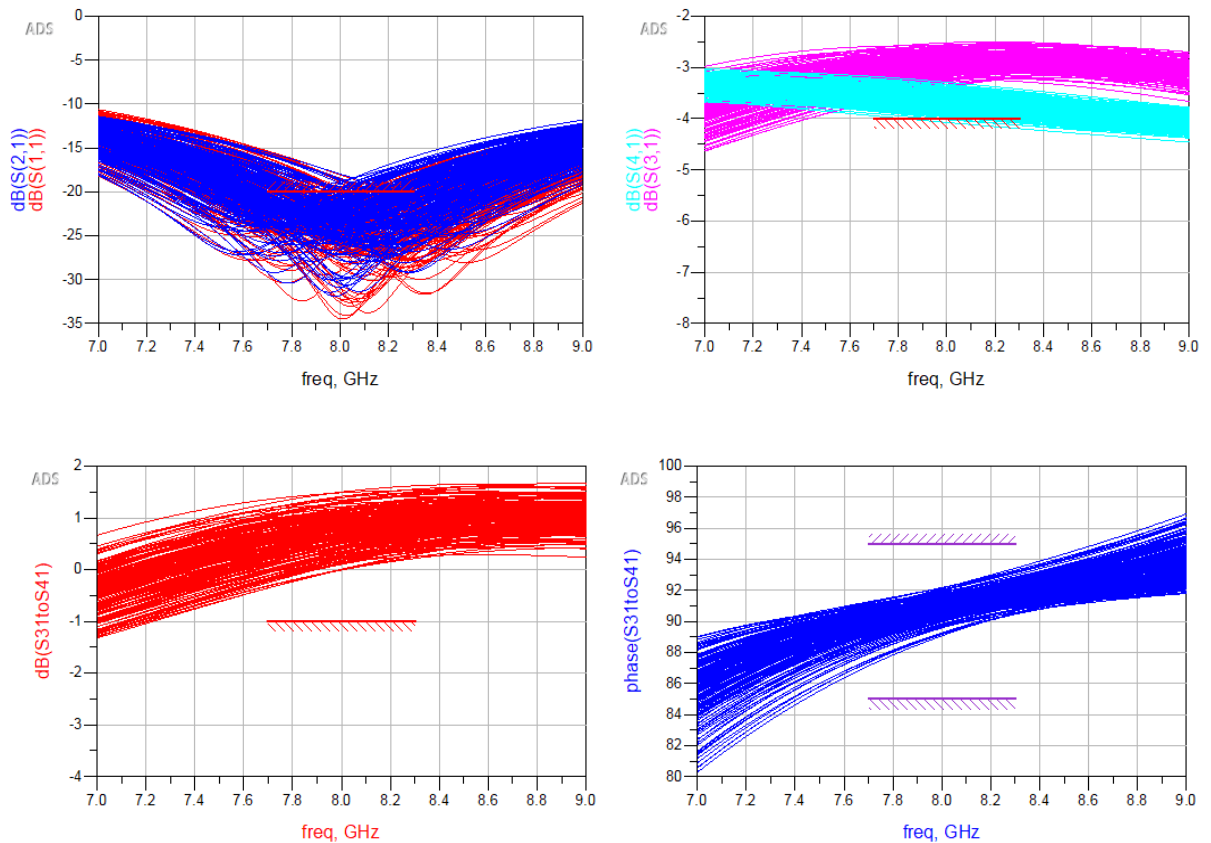
Поле окончания расчета нужно вывести таблицу со значениями Yield, NumPass и NumFail. Они говорят нам о том, какой вышел общий процент выхода годных и сколько попыток удалось и провалилось.

Yield	NumPass	NumFail
13.500	27.000	173.000

Получается успех всего в 13,5%. Это плохо, схема очень чувствительна к заявленной точности параметров. Надо проанализировать результаты, чтобы понять, в чем может быть причина.

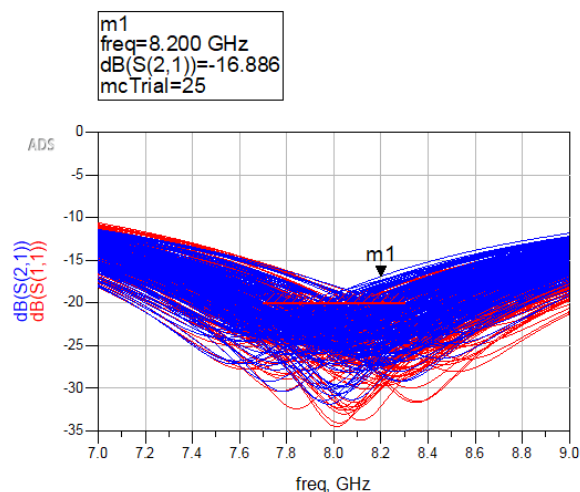
Выведем значения dB(S11), dB(S21), dB(S31), dB(S41), dB(S31toS41) и phase(S31toS41). Они были сохранены для каждой из попыток. Наложим маски, соответствующие нашим спецификациям.



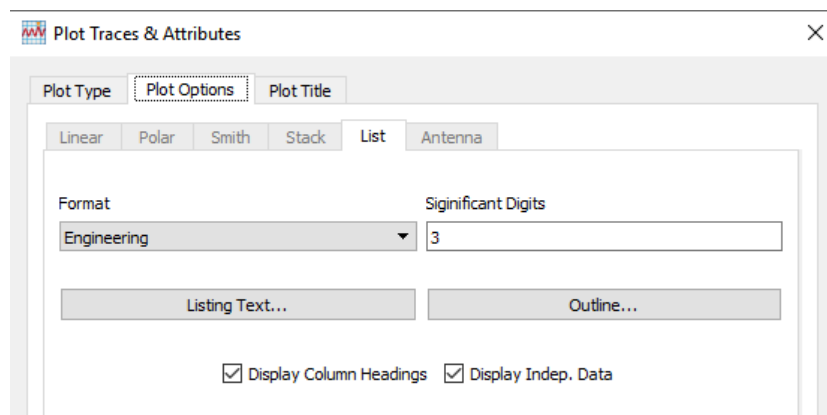


Видно, что по коэффициенту отражения S11 и развязке S21 большая часть кривых не проходит по спецификации, хуже, чем -20 дБ. Рабочее затухание S31 всегда лучше, чем -4 дБ. При этом у переходного ослабления S41 некоторое число кривых хуже, чем -4 дБ. Очевидно, из-за этого много кривых амплитудной симметричности dB(S31toS41) выходит за пределы  $\pm 1$  дБ. При этом фазовая симметричность phase(S31toS41) всегда укладывается в  $\pm 5^\circ$ .

Поставим маркеры на худшую попытку с точки зрения развязки S21. Это попытка №25 (значение mcTrial).



Выведем таблицу со значениями параметров W50, Lfeed, Wshunt, Lshunt, Wser, Lser, SubEr и SubH. Они будут выведены относительно номера попытки mcTrial. Численные значения выведем в инженерном формате (вкладка Plot Options, Format = Engineering), так они выглядят показательнее.



Чтобы пролистать до нужной строки в таблице, можно по ПКМ – Scroll Data вызвать окно листания данных. Эти же команды расположены в тулбале Data Scroll.



mcTrial	W50	Lfeed	Lser	Lshunt	Wser	Wshunt	SubEr	SubH
25	1.129 m	2.450 m	4.981 m	4.952 m	1.744 m	1.045 m	3.702	468.4 m
26	1.089 m	2.511 m	4.986 m	4.982 m	1.682 m	1.006 m	3.393	549.4 m
27	1.094 m	2.519 m	4.908 m	4.919 m	1.690 m	956.9 u	3.380	467.2 m
28	1.066 m	2.492 m	4.934 m	4.929 m	1.724 m	965.8 u	3.456	523.4 m
29	1.136 m	2.480 m	4.955 m	4.916 m	1.656 m	987.5 u	3.484	498.8 m

По значениям переменных видно, что от номинальных значений дальше всего ушли Lfeed, SubEr и SubH. И можно осторожно предположить, что виноваты скорее всего они. Но если так перебирать и анализировать неудачные попытки, то получается довольно трудоемкий ручной анализ. Гораздо эффективнее провести анализ с помощью гистограмм чувствительности.

Для этого воспользуемся функцией гистограммы чувствительности `histogram_sens()`. Она формирует подготовленные для отображения в виде гистограммы данные. Имеет следующий синтаксис:

```
y = histogram_sens(data, sensitivityVar, goalMin, goalMax, innermostIndepLow, innermostIndepHigh, numBins)
```

где `data` – результат для анализа (действительного типа);

`sensitivityVar` – переменная, зависимость по которой надо посчитать;

`goalMin` — минимальное значение результата, при котором он считается подходящим;

`goalMax` — максимальное значение результата, при котором он считается подходящим;

`innermostIndepLow` — нижняя граница независимой переменной результата, позволяет, например, выбрать частотный поддиапазон;

`innermostIndepHigh` — аналогично, верхняя граница независимой переменной результата;

`numBins` — число столбиков (бинов) гистограммы.

По dB(S41) и phase(S31toS41) проходят попытки в 100%, их поведение исследовать не имеет смысла.

Т.к. надо поисследовать поведение четырех результатов (dB(S11), dB(S21), dB(S41) и dB(S31toS41) по восьми переменным (W50, Lfeed, Wshunt, Lshunt, Wser, Lser, SubEr и SubH), то чтобы не писать 32 больших выражений и делать 32 графика, определим запрос через дополнительные переменные.

Во всех результатах мы вырезаем частотный поддиапазон 7,7 ..8,3 ГГц. Число бинов гистограммы рекомендовано брать порядка  $\log_2(N)$ , где N-число попыток, пусть будет 8. У исследуемых результатов в спецификациях заданы допустимые значения. Вынесем все это в переменные.

**Eqn**NumBins = 8

**Eqn**S21Max = -20

**Eqn**S31toS41Max = 1

**Eqn**freqMin = 7.7 GHz

**Eqn**S11Max=-20

**Eqn**S31toS41Min = -1

**Eqn**freqMax = 8.3 GHz

**Eqn**S41Min = -4

Т.к. у нас 4 анализируемых результата, а переменных 8, то проще написать четыре выражения гистограмм чувствительности для каждого результата, а переменные подставлять. Например, для чувствительности по Lfeed это будет выглядеть следующим образом.

**Eqn**SensVar = Lfeed

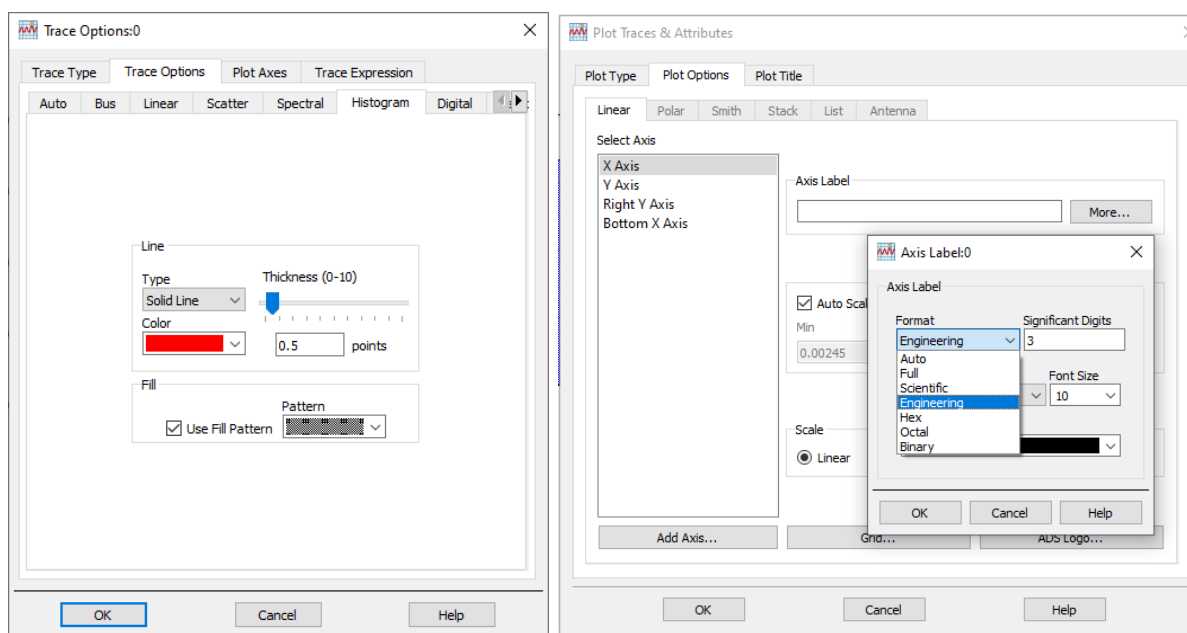
**Eqn**histS11 = histogram\_sens(dB(S11), SensVar, , S11Max, freqMin, freqMax, NumBins)

**Eqn**histS21=histogram\_sens(dB(S21), SensVar, , S21Max, freqMin, freqMax, NumBins)

**Eqn**histS41=histogram\_sens(dB(S41), SensVar, S41Min, , freqMin, freqMax, NumBins)

**Eqn**histS31toS41=histogram\_sens(dB(S31toS41), SensVar, S31toS41Min, S31toS41Max, freqMin, freqMax, NumBins)

И строим четыре прямоугольных графика в формате гистограмм. Для данных, сформированных с помощью функции гистограммы чувствительности, этот формат установится автоматически. Для повышения читаемости графиков можно включить заливку столбикам гистограмм (в свойствах графика Trace Options – Histogram галка Use Fill Pattern) и значениям по оси X инженерный тип (в свойствах полотна Plot Options – X Axis – Axis Label – кнопка More.. – Format:Engineering)



Как работать с гистограммами чувствительности:

- При построении гистограммы чувствительности диапазон независимой переменной разбивается на NumBins число равных промежутков. В каждом промежутке считается, какой процент попыток удовлетворяет спецификации на анализируемый сейчас результат. И откладывается по оси Y.

- В случае, если значение гистограммы чувствительности практически одинаково для всех значений переменной - это как правило означает, что приемлем или не приемлем результат, практически не зависит от этого значения переменной, а определяется комбинацией других переменных.

- Там, где гистограмма собирается в горб или провал – это значит, что присутствует чувствительность по данной переменной. Горб означает положительную чувствительность (желательные значения переменной), провал – наоборот запрещенные значения.

- При наличии чувствительности по ширине горба можно оценить, какой уход от номинального значения допустим.

- Также при наличии чувствительности по положению пика горба можно оценить, смещено ли оптимальное значение переменной относительно номинального значения или нет. И если смещенно, то куда.

- Если общий Yield-анализ дает 100% результат, то о наличии или отсутствии чувствительности фактически сказать ничего нельзя, по крайней мере при разрешенных вариациях переменных и заданных спецификациях. Аналогично и при значениях Yield-анализа, равного 0%.

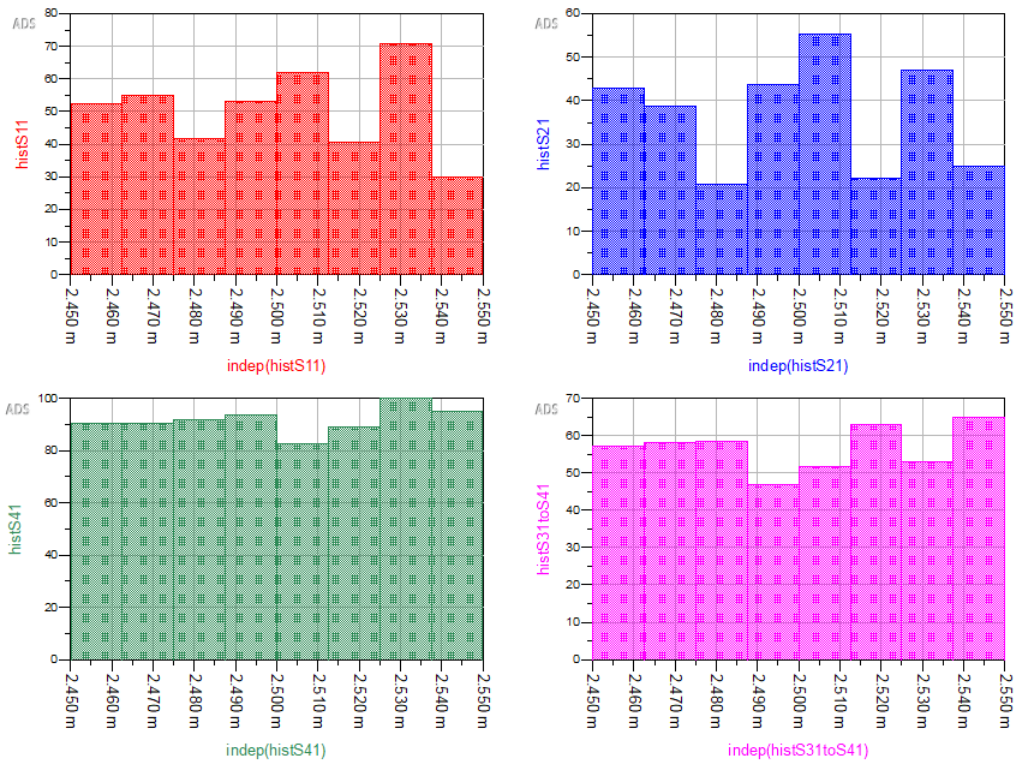
- Т.к. построение гистограмм чувствительности на основе случайных вариаций параметров - это такой способ вычленив из общей кучи результатов влияние конкретного параметра на конкретный результат, что абсолютно точно гистограммы чувствительности работают только при отсутствии корреляции параметров друг на друга. А в общем случае это совершенно не обязательно. При этом как правило, при уменьшении допустимого разброса параметров можно считать, что параметры меньше влияют друг на друга.

- Надо не забывать, у нас всего было 200 попыток, это вообще-то маловато для построения приличной статистической модели, поэтому возможны локальные отклонения и перекосы.

- Может получится, что гистограммы чувствительности не дают полезной информации. В этом случае можно поработать с допустимыми вариациями параметров (изменить список переменных, разброс или тип распределения) и/или со спецификациями (изменить список анализируемых результатов, граничных значений, частотных поддиапазонов). Т.к. гистограммы чувствительности строятся на основе массива результатов моделирования, полученных при вариации переменных, то обновить параметры вариации переменных без полного перерасчета невозможно. А вот поработать со спецификациями в области графиков можно довольно просто, т.к. это постанализ в области графиков.

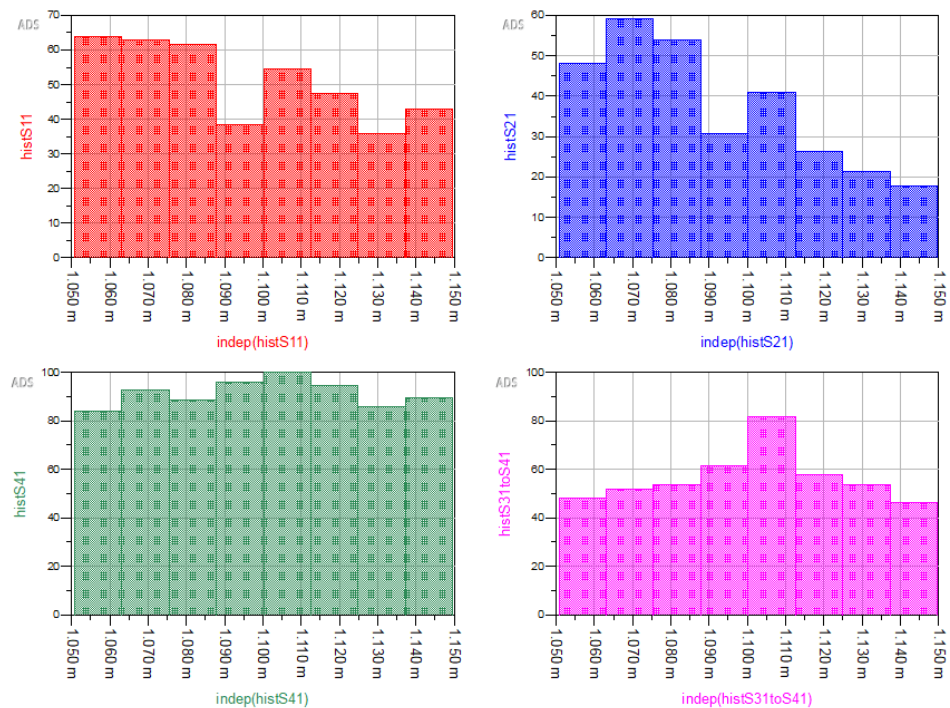
Выведем гистограммы чувствительности по Lfeed. Распределение довольно ровное, что говорит о том, что Lfeed практически не влияет ни на что. Что логично.

EqnSensVar = Lfeed



Заменим переменную на W50. Влияние W50 довольно мало. При этом присутствует небольшой сдвиг оптимального значения в сторону уменьшения для коэффициента отражения S11 и развязки S21 и отсутствие сдвига для dB(S31toS41).

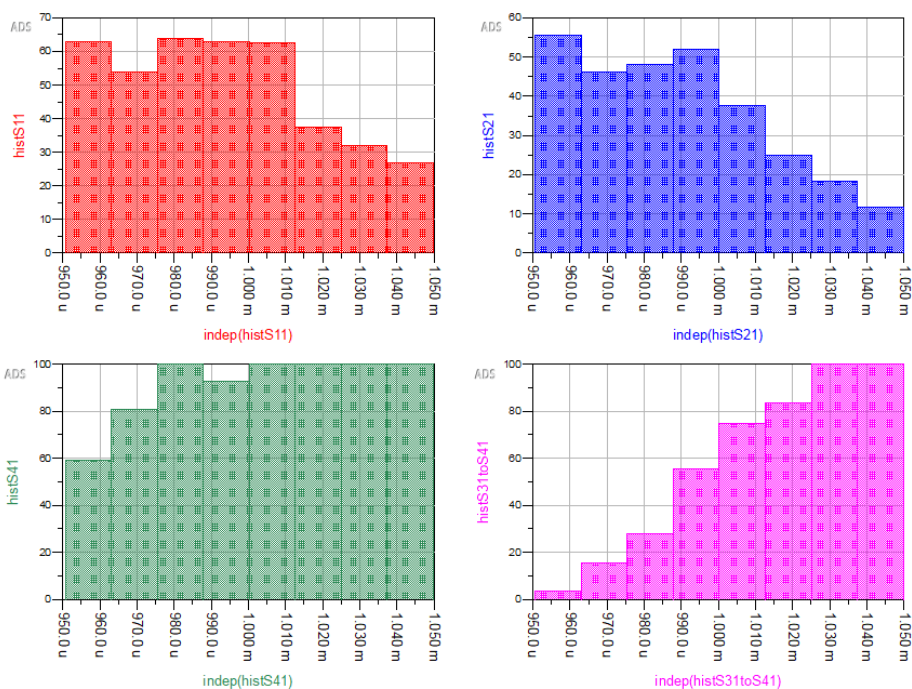
EqnSensVar = W50





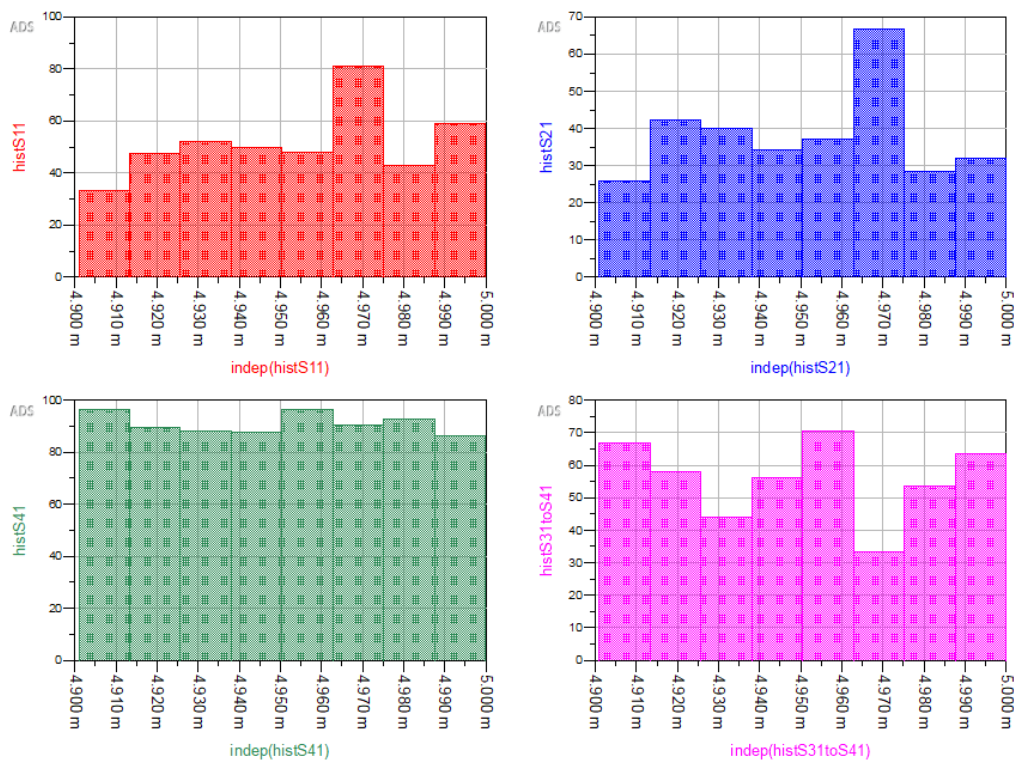
По Wshunt видно наличие чувствительности, заметно более сильное, чем по W50. При этом разнонаправленное.

EqnSensVar = Wshunt



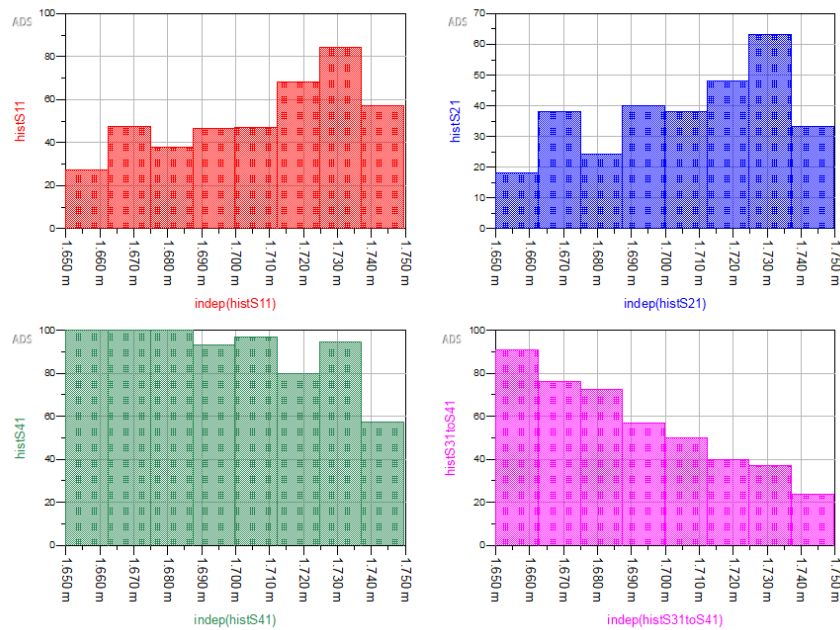
По Lshunt чувствительности почти нет.

EqnSensVar = Lshunt



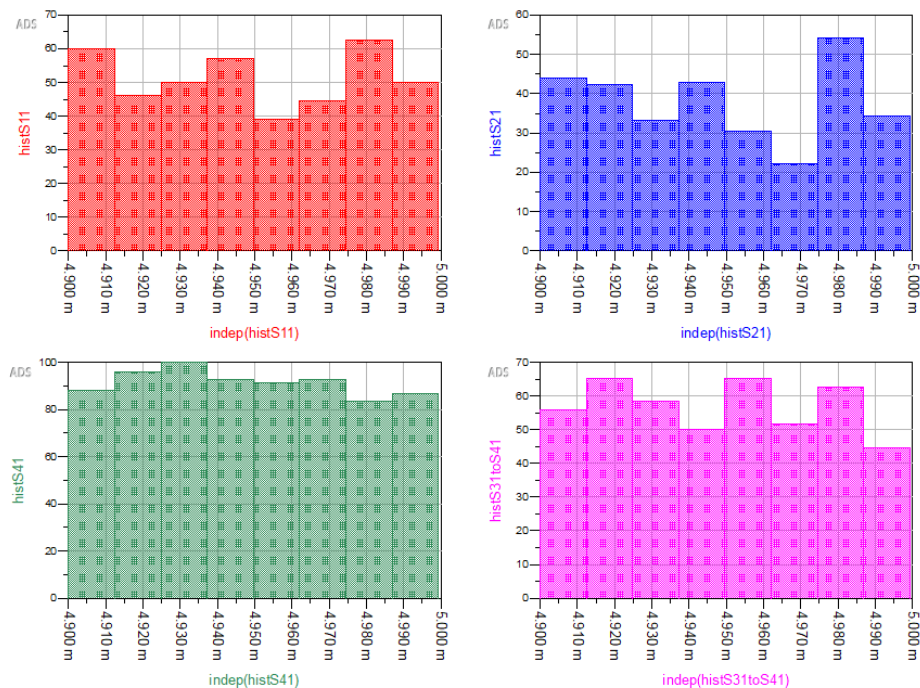
По Wser чувствительность присутствует, и также оптимальное значение для различных результатов разнонаправленное.

EqnSensVar = Wser



По Lser чувствительность практически отсутствует.

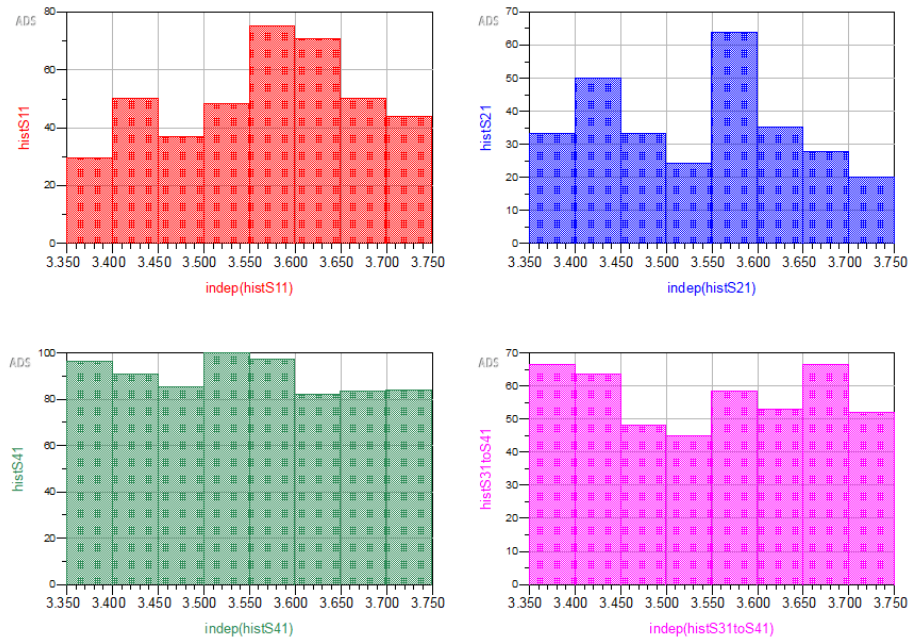
EqnSensVar = Lser



По SubEr небольшая чувствительность есть и оптимальное значение не смещено.

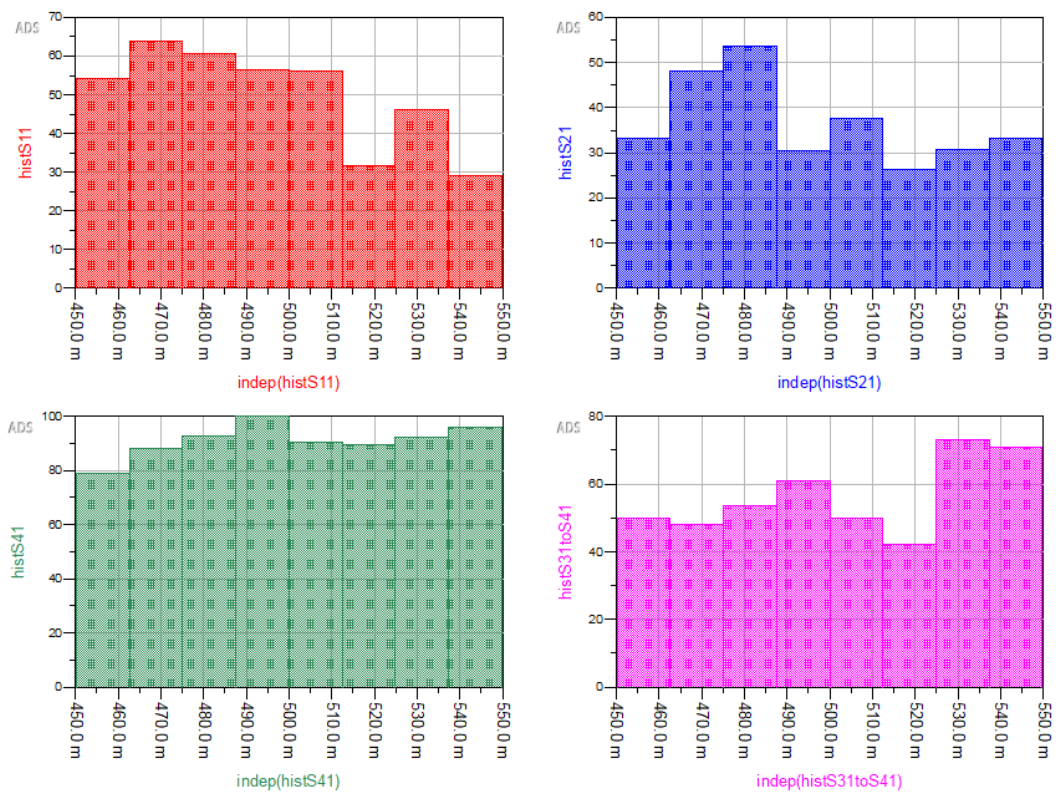


EqnSensVar = SubEr



По SubH минимальная чувствительность на S11.

EqnSensVar = SubH



Нужно помнить, что к выводам, сделанным на основе гистограмм чувствительности нужно относиться аккуратно, как к возможным статистическим гипотезам. Которые нужно проверять.

Применение различного вида статистических анализов (мы выполнили анализ выхода годных и провели анализ чувствительности) позволяет оценить устойчивость решения, найденного до этого оптимизацией или подбором (тюном). В большинстве задач проектирования как правило нет одного точного абсолютного решения, при проектировании находится какое-то одно из миллионов возможных, и далеко не факт, что самое удачное. И всегда после проектирования нужно оценивать, насколько устойчиво найденное решение к разным нестабильностям и неточностям.

## Балансная схема сложения мощностей

Исследуем часто используемую схему, позволяющую за счет параллельного сложения мощностей на двушлейфных направленных ответвителях увеличить уровень выходной мощности усилительного устройства.

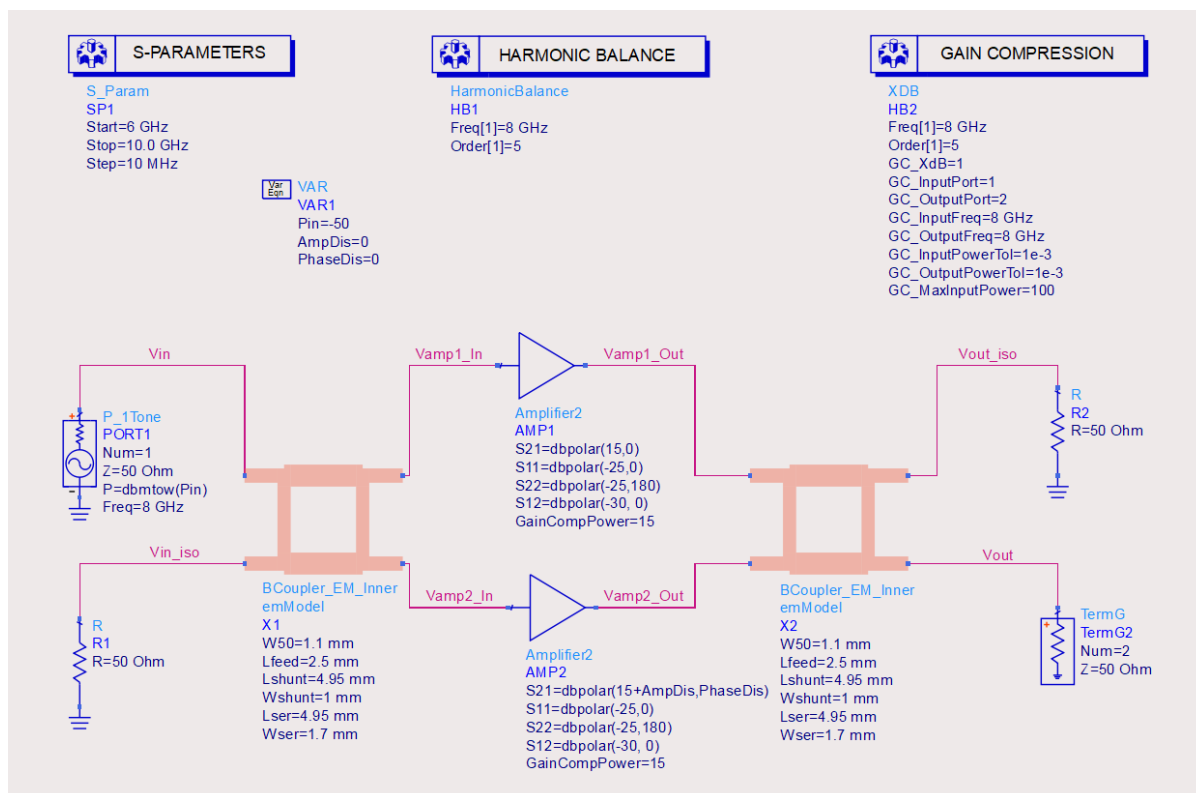
Уровень входной мощности должен быть в линейном участке, пусть будет  $P_{in} = -50$  дБм. В качестве усилителя выбраны два одинаковых усилителя ( $K_p = 15$  дБ,  $P_{1dBOut} = 15$  дБм). Частота сигнала – соответствует той, на которую настроен двушлейфный направленный ответвитель (8 ГГц).

В нижнем канале в усилителе введем разбаланс амплитуд и фаз через переменные AmpDis и PhaseDis, в первом запуске равным нулю.

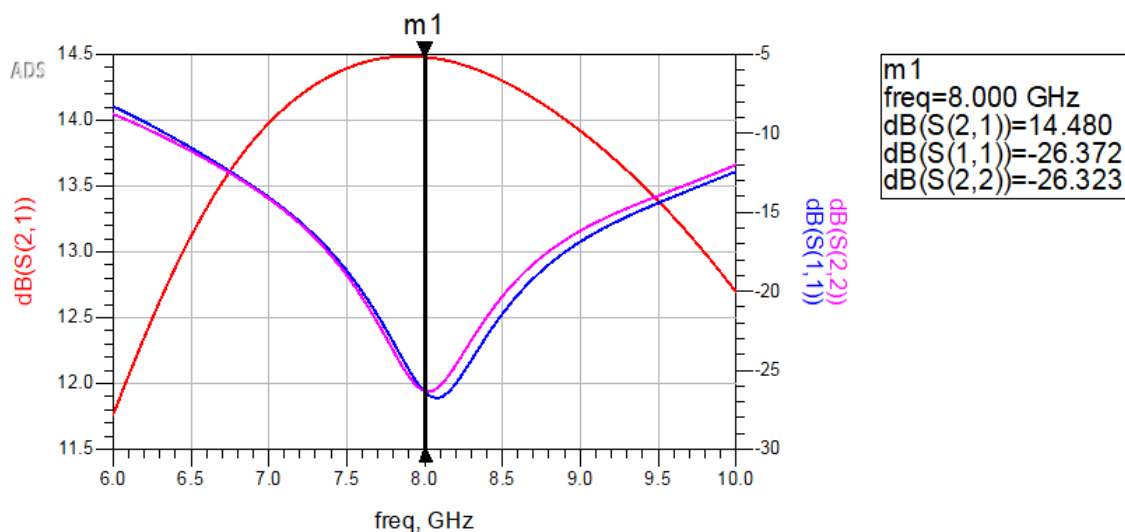
Для анализа коэффициента передачи в линейном режиме используем контроллер симуляции S-param, чтобы изучить уровни сигналов по узлам используем контроллер Harmonic Balance, для поиска точки однодецибельной компрессии используем контроллер XDB.

❗ Порты типа P\_1Tone могут выступать в роли терминаторов для режима моделирования S-параметров. В свою очередь, терминаторы выступают в качестве нагрузки для режима моделирования Harmonic Balance.

Схема перед запуском показана ниже (BCoupler\_2AMP).



Выведем на график линейный коэффициент передачи всех схемы, а также коэффициенты отражения.



Видно, что суммарный коэффициент передачи равен 14,5 дБ. Это число получается, как коэффициент усиления единичного усилителя (15 дБ) минус дополнительные (сверх -3 дБ) потери на каждом двушлейфном направленном ответвителе. При этом коэффициенты отражения разумные (-25...-20 дБ).

Проанализируем, как проходит сигнал по результатам моделирования Harmonic Balance (HB1). Выведем амплитуды сигналов в именованных точках, в дБм. Из всей таблицы интересует сигнал на основной гармонике 8 ГГц.

freq	dBm(HB1.HB.Vin)	dBm(HB1.HB.Vamp1_In)	dBm(HB1.HB.Vamp2_In)	dBm(HB1.HB.Vamp1_Out)
0.0000 Hz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
8.000 GHz	-49.972	-52.412	-53.188	-37.923
16.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
24.00 GHz	-226.975	-207.939	-201.802	-173.431
32.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
40.00 GHz	-398.217	-384.371	-413.302	-363.166

freq	dBm(HB1.HB.Vamp2_Out)	dBm(HB1.HB.Vout)	dBm(HB1.HB.Vin_iso)	dBm(HB1.HB.Vout_iso)
0.0000 Hz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
8.000 GHz	-38.610	-35.520	-70.166	-56.359
16.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
24.00 GHz	-170.283	-194.938	-224.182	-193.101
32.00 GHz	<invalid>	<invalid>	<invalid>	<invalid>
40.00 GHz	-361.687	-370.539	-394.622	-369.209

Входной сигнал был задан  $V_{in} = -50$  дБм. При попадании на входы усилителей видны потери на входном двушлейфном направленном ответвителе  $V_{amp1\_In} = -52,4$  дБм и  $V_{amp2\_In} = -53,2$  дБм. Далее, каждый из этих сигналов усиливается на 15 дБ, до  $V_{amp1\_Out} = -37,9$  дБм и  $V_{amp2\_out} = -38,6$  дБм и подаются на выходной двушлейфный направленный ответвитель. На выходе  $V_{out} = -35,5$  дБм. Получается, что итоговое усиление  $-35,5 - (-50) = 14,5$  дБ. Это соответствует результатам выше.

Также видно, что в изолированный вход сигнал не идет,  $V_{in\_iso} = -70$  дБм, что на 20 дБ меньше входного сигнала. Аналогично,  $V_{out\_iso} = -56,4$  дБм, что на 20,9 дБ меньше выходного сигнала  $V_{out} = -35,5$  дБм. Данные значения объясняются развязкой двушлейфного направленного ответвителя.

В двушлейфном направленном ответвителе между рабочим и ответвленным плечом есть разность фаз  $90^\circ$ . Выведем фазовые соотношения для интересующих сигналов.

freq	phase(HB1.HB.Vamp1_In)	phase(HB1.HB.Vamp2_In)	phase(HB1.HB.Vamp1_Out)	phase(HB1.HB.Vamp2_Out)
0.0000 Hz	0.000	0.000	0.000	0.000
8.000 GHz	174.337	81.828	174.322	76.269
16.00 GHz	0.000	0.000	0.000	0.000
24.00 GHz	86.781	72.649	-0.606	67.938
32.00 GHz	0.000	0.000	0.000	0.000
40.00 GHz	-139.194	-66.314	-9.836	-19.915

Видно, что между верхним и нижним плечами сохраняется разность фаз  $\sim 90^\circ$ .

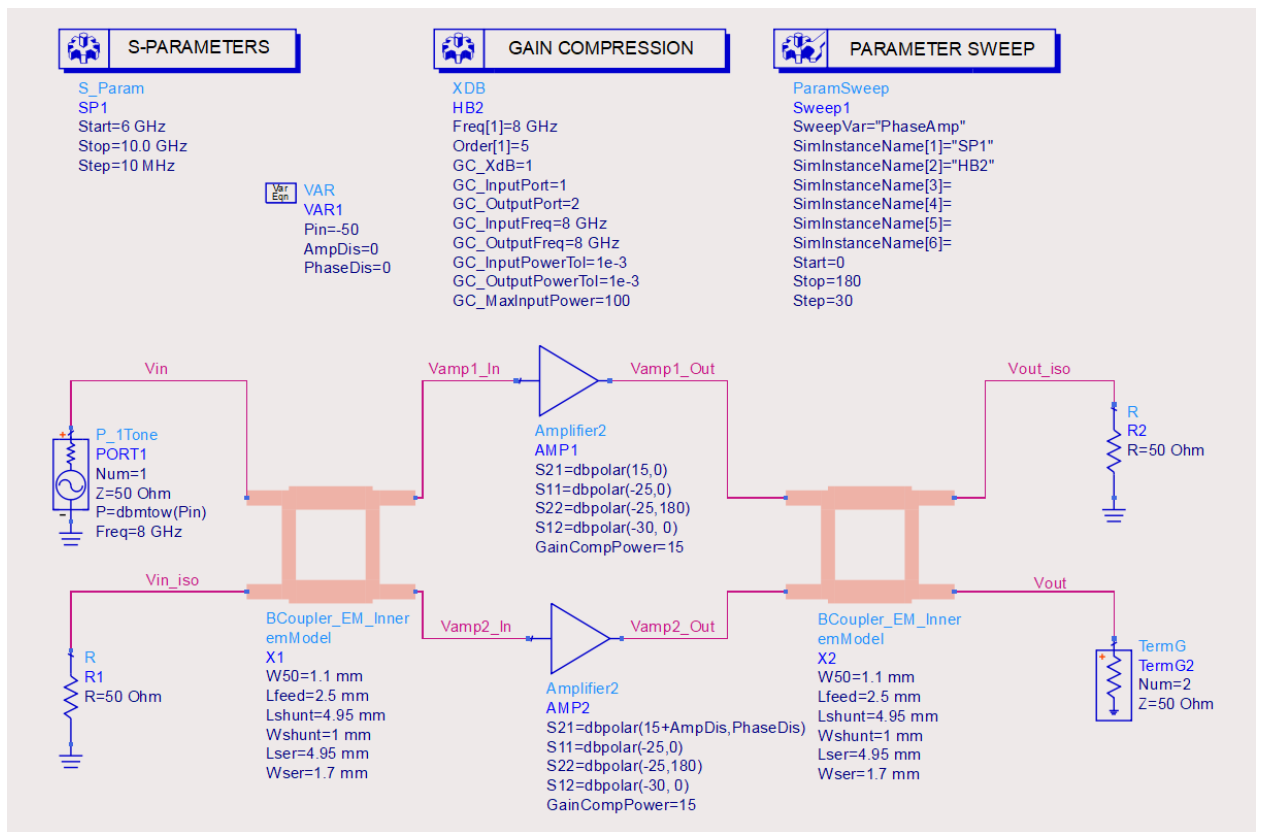
Определим точку однодецибелной компрессии по выходу.

outpwr
17.74 dBm

Точка однодецибелной компрессии по выходу равна 17,8 дБм, что почти на 3 дБ больше точки однодецибелной компрессии по выходу одиночного усилителя.

Из приведенных выше результатов видно, что применение балансной схемы сложения мощностей не дает выигрыша по линейному коэффициенту усиления, даже некоторое снижение из-за дополнительных потерь на двух двушлейфных направленных ответвителях. А вот точка однодецибелной компрессии почти удваивается за счет параллельного сложения мощностей.

Пока в данной схеме нет разбаланса каналов, например, из-за различия усилителей мощности. Введем разбаланс по фазе и изучим, как изменяется линейный коэффициент усиления и точка однодецибелной компрессии. Контроллер HB1 не нужен, отключим его. С помощью блока ParamSweep переберем значение разности фаз от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $30^\circ$ .

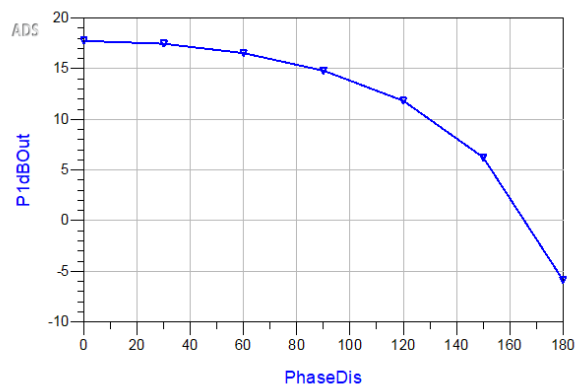
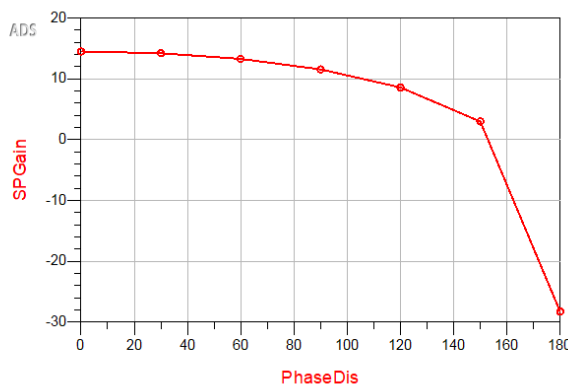


Для построения графика зависимости коэффициента усиления на центральной частоте от разбаланса фаз, необходимо знать номер индекса частоты. В помощь функции `find_index()` найдем этот индекс. Для результата, выдаваемого контроллером XDB в моделируемой схеме индекс несущей частоты равен 1, поэтому для него не нужно искать индекс.

```
Eqnidx_8GHz = find_index(SP.freq[0,:], 8 GHz)
```

```
EqnSPGain = dB(S21[:, idx_8GHz])
```

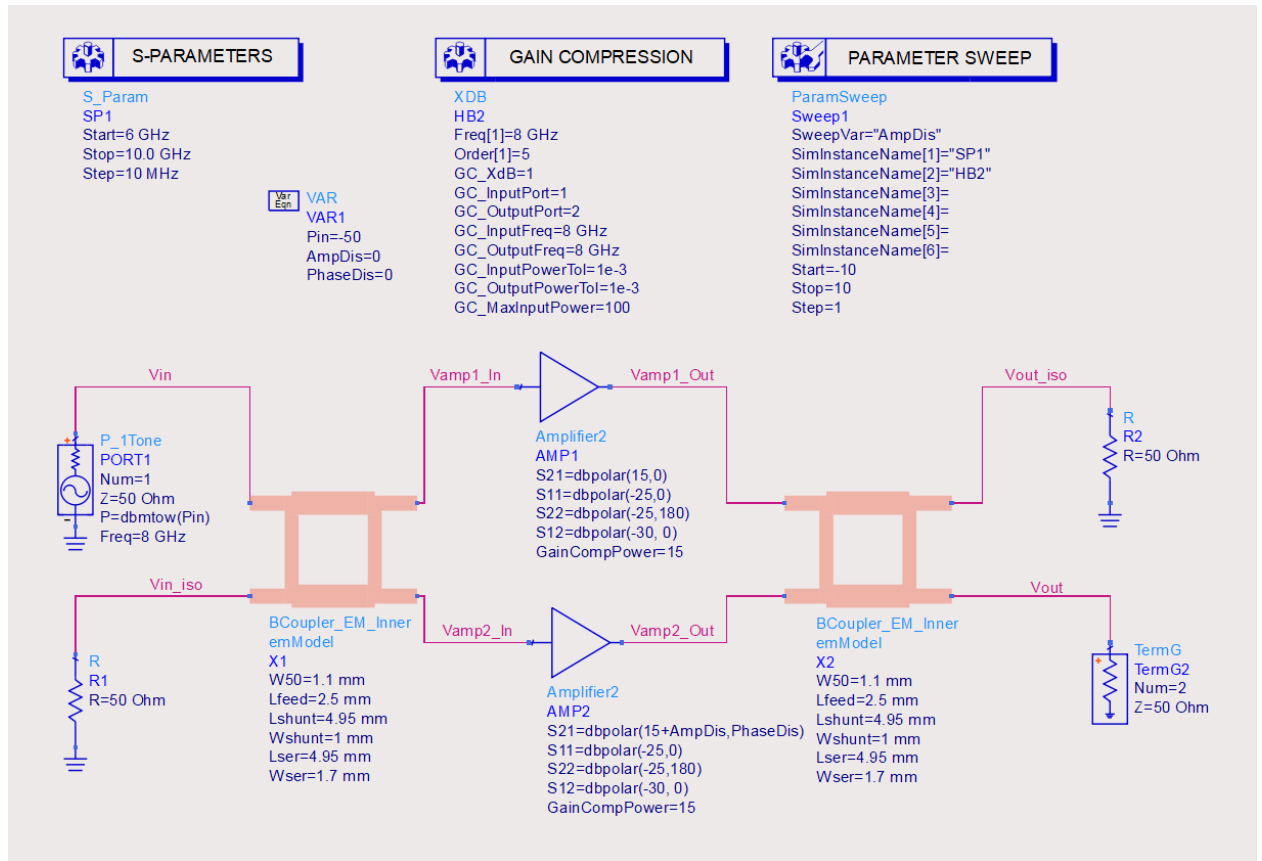
```
EqnP1dBOut = outpwr[:, 1]
```



По графикам видно, что пока разбаланс фаз малый (порядка 30..60°), схема еще работает. А вот при увеличении разбаланса фаз схема работать

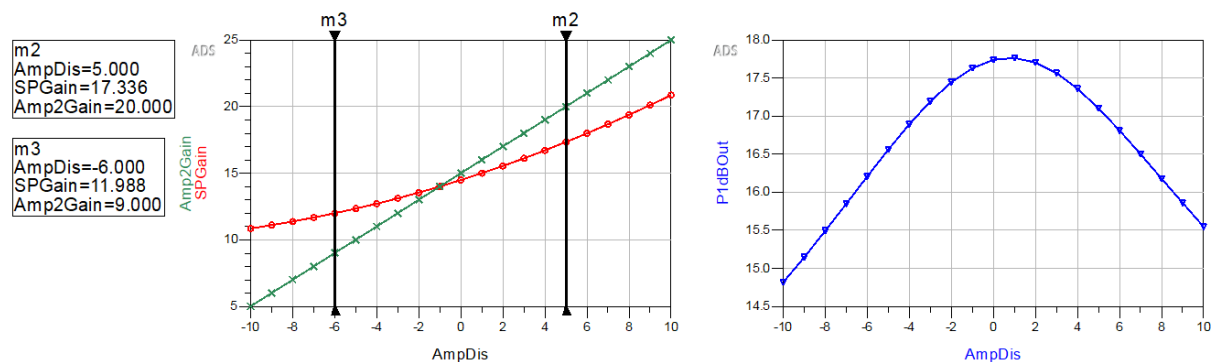
перестает, и коэффициент передачи, и точка однодецибельной компрессии по выходу уходят в глубокий минус.

Аналогично проведем анализ по разбалансу амплитуд, от  $-10$  дБ до  $+10$  дБ с шагом 1 дБ.



Добавим выражение коэффициента усиления второго усилителя Amp2Gain.

$$\text{EqnAmp2Gain} = \text{SP.AmpDis} + 15$$



По графику линейного коэффициента усиления хорошо видно, как усилитель с большим коэффициентом усиления подавляет более слабый. При

этом при наличии разбаланса амплитуд общая эффективность схемы сомнительная.

В текущей точке маркера m2 данные нужно понимать следующим образом: первый усилитель имеет фиксированный  $K_{p1} = 15$  дБ, второй  $K_{p2} = 15 + 5 = 20$  дБ и при этом суммарный  $K_p = 17,3$  дБ, на 2,7 дБ меньше  $K_p$  второго усилителя мощности. А в точке маркера m3  $K_{p1} = 15$  дБ, второй  $K_{p2} = 15 - 6 = 9$  дБ и при этом суммарный  $K_p = 12$  дБ, на 3 дБ меньше первого усилителя мощности.

Оптимум по P1dVOut распложен около разбаланса 0 дБ. При уходе от него снижается.

Отсюда можно сделать вывод, что балансная схема сложения мощностей с применением двушлейфных направленных ответвителей хорошо работает при отсутствии разбаланса фаз и амплитуд.



### Задание на выполнение

В соответствии с вариантом рассчитать и спроектировать гибридный двухшейфный направленный ответвитель на заданную частоту ( $F_c$ ) и ВЧ-подложку. Провести его настройку и исследование на схемном и топологическом уровнях.

Варианты заданий приведены в таблице 1.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

**Таблица 1. Варианты заданий**

№ Варианта		1	2	3	4	5
Центральная частота $F_c$ , ГГц		2,2	3,0	3,8	4,6	5,4
Параметры подложки	Именование материала	FR-4	FR-4	RO4360	RO4360	RO4350B
	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , ед.	4,5	4,5	6,15	6,15	3,66
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ , ед.	0,01	0,01	0,0038	0,0038	0,004
	Толщина диэлектрика $h$ , мм	0,71	0,51	0,61	0,406	0,508
	Толщина металлизации $t$ , мкм	17	35	35	17	17
№ Варианта		6	7	8	9	10
Центральная частота $F_c$ , ГГц		6,2	7,0	7,8	8,6	9,4
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO4003C	RO4003C	RO3003	RO3003
	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , ед.	3,66	3,55	3,55	3,0	3,0
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ , ед.	0,004	0,0026	0,0026	0,0013	0,0013
	Толщина диэлектрика $h$ , мм	0,338	0,305	0,203	0,25	0,13
	Толщина металлизации $t$ , мкм	17	17	35	35	17

Если материала в базе материалов ADS нет, его надо будет самостоятельно определить по кнопке Add Dielectric.

Каждый крупный этап рекомендовано делать в отдельных ячейках (схемах), т.к. при выполнении работы возможно придется возвращаться к предыдущим этапам.

### ***Этапы выполнения:***

1. Двухшейфный направленный ответвитель на идеальных линиях передачи (ячейка BCoupler\_Ideal).

1.1. Составить схему для моделирования в режиме S-параметров согласующей цепи на идеальных линиях передачи.

- Компоненты брать из палитры TLines-Ideal.
- Диапазон частот моделирования брать от 0 Гц до удвоенной частоты  $F_c$ .

1.2. Промоделировать в режиме S-параметров.

- Показать, что двухшейфный направленный ответвитель цепь выполняет поставленную на него задачу.
- Результаты контролировать только на центральной частоте  $F_c$ .
- Построить графики амплитудных и фазовых соотношений
- Создать теоретическую матрицу S-параметров на центральной частоте и сравнить результаты.

2. Двухшейфный направленный ответвитель в микрополосковом исполнении на схемном уровне (ячейка BCoupler\_MLIN\_Sch).

2.1. Создать схему двухшейфного направленного ответвителя в микрополосковом исполнении на основании результатов, полученных в п.1.

- Для расчета геометрических размеров микрополосков использовать инструмент LineCalc.
- Компоненты брать из палитры TLines-Microstrip.
- Параметры подложки брать из таблицы 1.
- Дополнительно добавить 50 Омные участки длиной около 2-2,5 ширины 50 Ом-ной линии со стороны портов 50 Ом.

## 2.2. Провести моделирование в режиме S-параметров.

- Диапазон частот моделирования брать от 0 Гц до удвоенной частоты  $F_c$ .

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 3\%$ .

- Считать, что двушлейфный направленный ответвитель выполняет свою задачу, если

а) Коэффициент отражения  $S_{11}$  в рабочей полосе менее  $-20$  дБ;

б) Развязка  $S_{21}$  в рабочей полосе менее  $-20$  дБ;

в) Рабочее затухание  $S_{31}$  в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

г) Переходное ослабление в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

е) Центральная частота, на которую настроен двушлейфный направленный ответвитель близка к  $F_c$  (контролировать по положению провала на  $S_{11}$  и  $S_{21}$ ).

2.3. Если двушлейфный направленный ответвитель не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить ее.

2.4. После настройки определить предельные частотные параметры двушлейфного направленного ответвителя, в том числе

- полный диапазон частот, при котором  $S_{11}$  и  $S_{21}$  меньше  $-20$  дБ;

- полный диапазон частот, при котором  $S_{31}$  и  $S_{41}$  больше  $-3,5$  дБ;

- оценить стабильность рабочего и вторичного плеч по отношению друг другу ( $S_{31}/S_{41}$ ) по амплитуде и по фазе.

3. Двушлейфный направленный ответвитель в микрополосковом исполнении на топологическом уровне (ячейка верхнего уровня BCoupler\_EM\_Top и подсхема BCoupler\_EM\_Inner).

3.1. Создать параметризованную топологию двушлейфного направленного ответвителя в микрополосковом исполнении с использованием результатов п.2.

- Создать определение подложки tech.subst в соответствии с методикой. Параметры брать из таблицы 1.

- Для параметризации топологии создать двухуровневую схему в соответствии с методикой.

- На уровень внутренней ячейки вынести все параметры, использованные в топологии. Численные значения параметров задавать в соответствии с результатами п.2.

### 3.2. Провести ЕМ-моделирование топологии.

- Метод моделирования брать Momentum Microwave.

- Провести исследование необходимой плотности сетки.

- Результаты хранить с использованием emModel.

- Если расчет идет долго, то верхнюю границу диапазона частот моделирования можно сократить  $F_c + 20\%$ .

- Сравнить результаты с результатами п.2.

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 3\%$ .

- Считать, что двушлейфный направленный ответвитель выполняет свою задачу, если:

- б) Развязка  $S_{21}$  в рабочей полосе менее  $-20$  дБ;

- в\*) Рабочее затухание  $S_{31}$  в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

- г\*) Переходное ослабление в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

- е) Центральная частота, на которую настроен двушлейфный направленный ответвитель близка к  $F_c$  (контролировать по положению провала на  $S_{11}$  и  $S_{21}$ ).

- \* При необходимости требование можно ослабить до  $4$  дБ.*

### 3.3. Если двушлейфный направленный ответвитель на связанных линиях не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить его.

## 4. Анализ выхода годных (ячейка верхнего уровня BCoupler\_\_Yeld, подсхема BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam).

### 4.1. Подготовить ячейку нижнего уровня BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam:

- создать параметры проекта SubEr и SubH, безразмерного типа.

- создать параметризированный по SubEr ВЧ-диэлектрик.
- создать параметризованную по толщине SubH и материалу 3D-подложку.
- создать ячейку нижнего уровня BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam как копию BCoupler\_EM\_Inner с измеренной подложкой и дополнительными параметрами SubEr и SubH.

4.2. Подготовить схему для исследования топологии статистическим анализом выхода годных.

- Считать, что линейные размеры и толщина диэлектрика могут иметь погрешность  $\pm 0,05$  мм, распределенную равномерно.

- Считать, что SubEr может иметь погрешность  $\pm 0,2$ , распределенную равномерно.

- Модель для исследования брать в топологическом представлении BCoupler\_EM\_Inner\_SubParam.

- Если расчет одной попытки идет долго, то верхнюю границу диапазона частот моделирования можно сократить  $F_c + 20\%$ .

- Считать, что двушлейфный направленный ответвитель выполняет свою задачу, если

а) Коэффициент отражения S11 в рабочей полосе менее  $-20$  дБ;

б) Развязка S21 в рабочей полосе менее  $-20$  дБ;

в\*) Рабочее затухание S31 в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

г\*) Переходное ослабление S41 в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

е) Центральная частота, на которую настроен двушлейфный направленный ответвитель близка к  $F_c$  (контролировать по положению провала на S11 и S21).

*\* При необходимости требование можно ослабить до  $4$  дБ.*

4.3. По результатам статистического моделирования провести анализ результатов.

- Если топология имеет процент выхода годных (Yield) меньше 100%, то провести анализ гистограммой чувствительности по параметрам и найти возможное решение для получения более устойчивого решения.

- Если топология имеет процент выхода годных (Yield) близко к 100%, то увеличить возможный разброс значений параметров или ужесточить спецификации и провести анализ гистограммой чувствительности по параметрам и найти, какие из параметров начинает влиять на устойчивость решения.

## 5. Исследование балансной схемы сложения мощностей (ячейка BCoupler).

### 5.1. Подготовить балансную схему сложения мощностей с применением двушлейфного направленного ответвителя.

- Для усилителей использовать имитационную модель Amplifier2, параметры задавать аналогичные методике.

- Для двушлейфных ответвителей использовать настроенную emModel (BCoupler\_EM\_Inner).

- Мощность входного сигнала подавать в заведомо линейном режиме, с запасом не менее 20 дБ от P1dBIn усилителей мощности.

### 5.2. Анализ балансной схемы в номинальном состоянии.

- Получить график суммарного коэффициента передачи и коэффициентов отражения.

- Получить амплитудные и фазовые представления сигналов в узловых точках модели.

- Получить расчет точки одностенной компрессии по выходу.

- На основании результатов выше сделать выводы, в каких случаях полезно использовать балансную схему сложения мощностей.

### 5.3. Исследование влияния разбаланса фаз и амплитуд на балансную схему сложения мощностей.

- Отключить основной контроллер НВ.

- Добавить контроллер ParamSweep для перебора разбаланса фаз, диапазон перебора брать от 0° до 180° с разумным шагом.

- Построить графики зависимости линейного коэффициента усиления и точки однодецибельной компрессии по выходу всех схемы от разбаланса фаз.
- Перестроить контроллер ParamSweep на передор разбаланса амплитуд, диапазон перебора брать от  $-10$  дБ до  $10$  дБ с шагом  $1$  дБ.
- Изучить графики зависимости линейного коэффициента усиления и точки однодецибельной компрессии по выходу всех схемы от разбаланса фаз.
- Сделать выводы о применимости балансной схемы сложения мощностей при наличии разбаланса фаз и амплитуд.

## Требования к отчёту

Отчет о выполненной лабораторной работе 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 лабораторной 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.

Подробность описания этапов выполненной работе 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 экспортировать 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 7z-архивом.

По окончании выполнения лабораторной работы и подготовки отчета, отчет и архив проекта надо выложить в ОРИОКС в домашнее задание в дисциплину, привязав к контрольному мероприятию ЗЛР (Защита лабораторных работ). Именование отчета и архива проекта должно давать возможность точно понять, к какой теме лабораторной работы они относятся (Например, AFU\_Lab\_BCoupler вместо непонятного Lab2 или Workspace2).



### **Задание на самостоятельную работу**

#### **1) Подготовка к лабораторному занятию**

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо продумать шаблон отчета, при необходимости внести краткие теоретические сведения, продумать и наметить количество, вид и расположение таблиц и графиков с измеренными данными. Для получения допуска необходимо подробно изучить теоретический материал.

2) С использованием навыков, полученных в лабораторной работе, выполнить соответствующий этап курсового проекта.

## Контрольные вопросы

1. Какая размерность матрицы S-параметров направленного ответвителя? Какие есть особенности у этой матрицы?
2. Что такое рабочее затухание направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?
3. Что такое переходное ослабление направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?
4. Что такое развязка (изоляция) направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?
5. Что такое направленность направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?
6. В какой части диаграммы Смита на графике  $S_{11}$  должна находиться точка, близкая к рабочей частоте двушлейфного направленного ответвителя?
7. Какие фазовые соотношения присутствуют в гибридном двушлейфном направленном ответвителе между основным и вторичным плечом на рабочей частоте?
8. Какие электрические длины должны быть у последовательного и параллельного участков в гибридном двушлейфном направленном ответвителе?
9. Какие волновые сопротивления должны быть у последовательного и параллельного участков в гибридном двушлейфном направленном ответвителе?
10. Как правильно интерпретировать гистограммы чувствительности? Какие типовые формы может она принимать?
11. Как с помощью двушлейфного направленного ответвителя можно сформировать квадратурный сигнал? Какие требования нужно наложить на двушлейфный направленный ответвитель?

## Литература

1. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва : СОЛОН-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. Microwave Engineering, 4th Edition, David M. Pozar, 2011, ISBN 978-0470631553.

### *Перечень ресурсов сети «Интернет»*

3. Тематический раздел «Rf & Microwave Design» форума electronix.ru, доступен после свободной регистрации, <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=63>
4. Интернет-энциклопедия разработчиков СВЧ-аппаратуры «Microwaves101» <https://www.microwaves101.com>
5. Репозиторий с методическими указаниями по лабораторным работам <https://github.com/dee3mon/Keysight-ADS-Microstrip-methodic>
6. Репозиторий с методическими указаниями по лабораторным работам <https://github.com/dee3mon/Keysight-ADS-RFDevices-methodic/>

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

7. Канал youtube образовательного центра Keysight EEsof EDA <https://www.youtube.com/user/KeysightEESOF>
8. Канал youtube Anurag Bhargava образовательного центра <https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>
9. Канал youtube Keysight EEsof EDA Field <https://www.youtube.com/c/EEsofAETips>

### **Разработчик:**

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.