

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

2024

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	21
Статистический анализ выхода годных	28
Задание на выполнение	33
Требования к отчёту	38
Задание на самостоятельную работу	39
Контрольные вопросы	40
Литература	41



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 2023. 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.

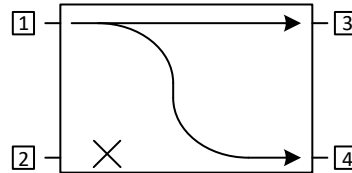
Продолжительность работы: 4 часа.

В разделе «Методика выполнения» приведены только необходимые действия по выполнению лабораторной работы. Подробно описываются только новые приемы работы в ADS. Предполагается, что студент выполнил первую лабораторную работу и освоил базовый предложенный маршрут.

Lab1	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:

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



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 [3].

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 $m = P_3 / P_4 = |S_{31}|^2 / |S_{41}|^2 = (\alpha / \beta)^2$.

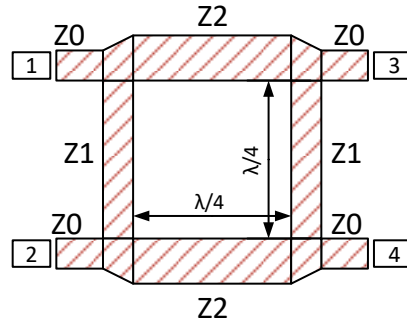
С учетом неидеальности реализации для направленных ответвителей можно определить следующий список их характеристик:

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° . Это позволяет использовать гибридный двушлейфный направленный ответвитель для формирования равноамплитудного квадратурного сигнала (Hybrid- 90° Coupler).

Методика выполнения работы

Маршрут работы следующий:

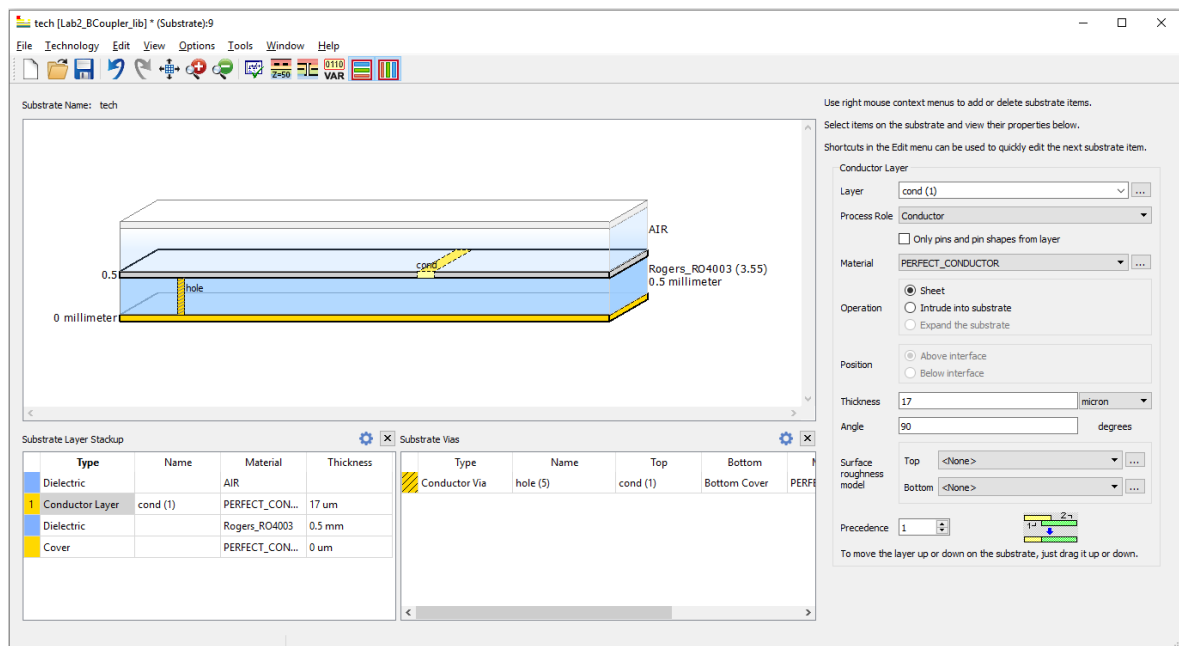
1. Составление модели на идеальных линиях передачи и моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.
2. Преобразование модели на идеальных линиях передачи в схемотехническое представление на заданной ВЧ-подложке с помощью инструмента LineCalc. Моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов. 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

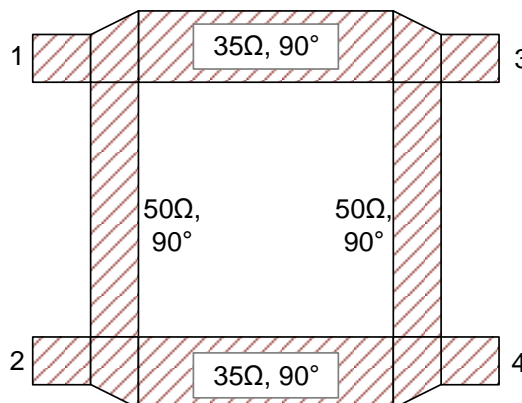
Проект должен быть подготовлен к ЕМ-моделированию, в том числе:

- 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.



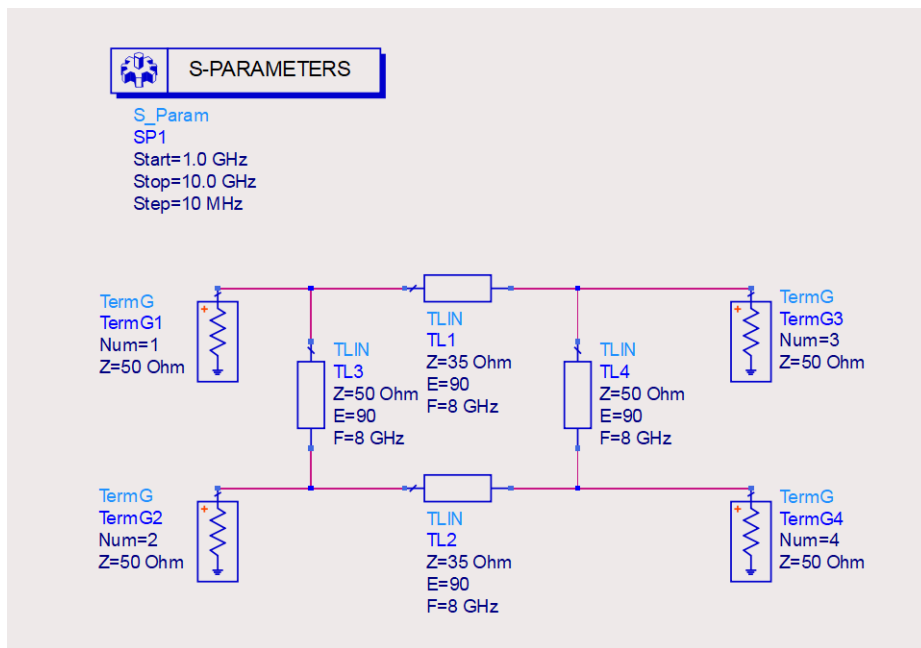
Пусть двушлейфный направленный ответвитель настроен на частоту 8 ГГц.

Создаем схему VCoupler_Ideal. Собираем на идеальных линиях передачи

(модель TLIN ).




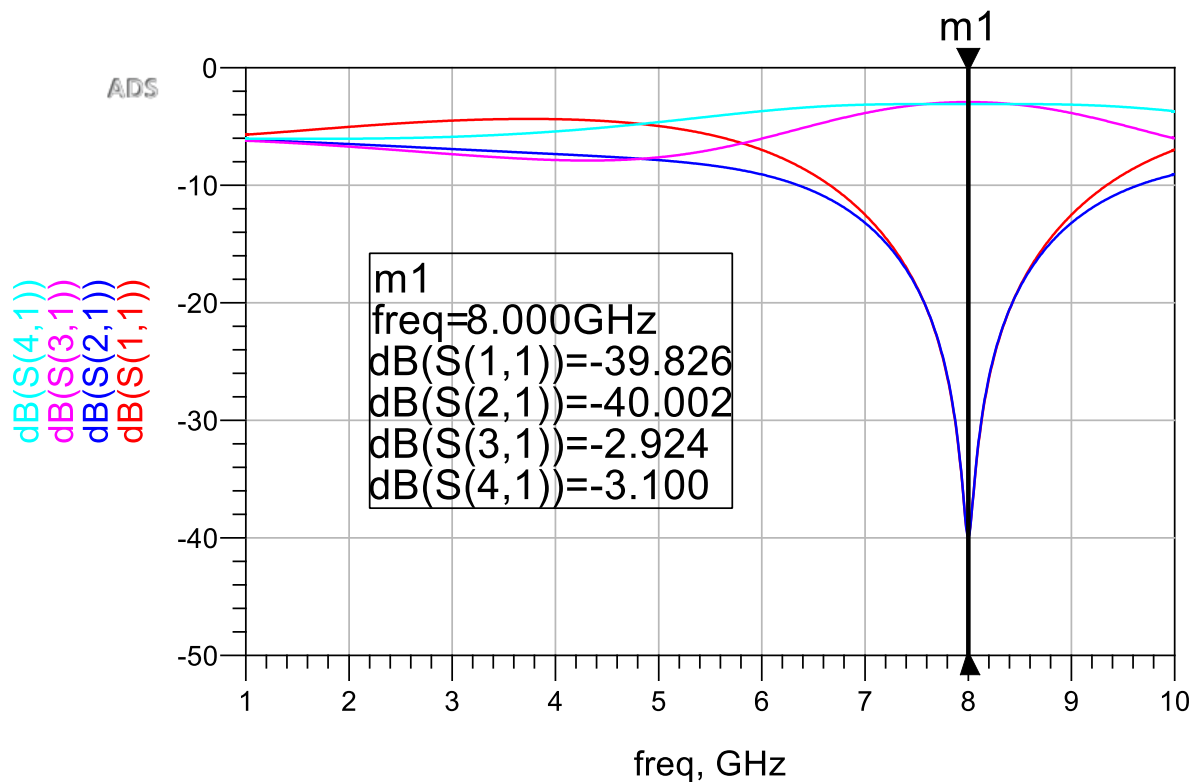
Нужно следить за нумерацией терминаторов Term (свойство Num). Оно определяет порядок обозначений в матрице S-параметров. Эту нумерацию надо будет сохранять одинаковой во всех схемах проекта, чтобы можно было сопоставлять графики.

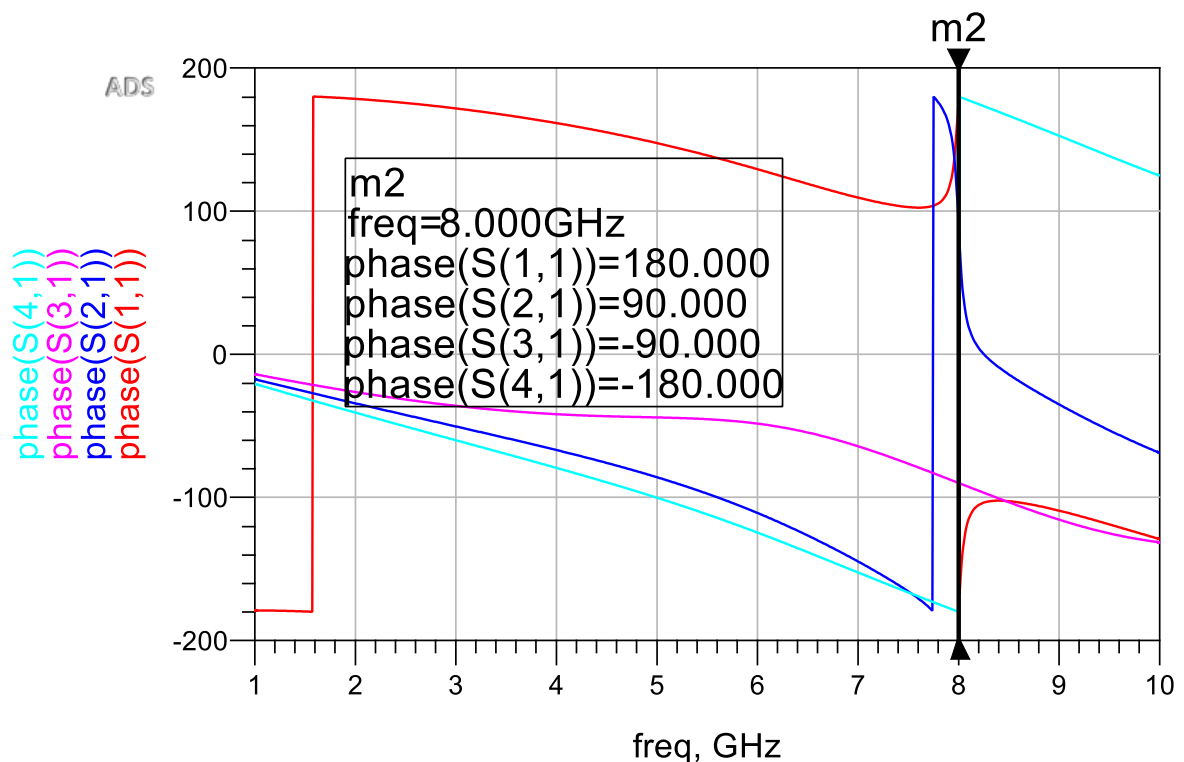


Запускаем моделирование .

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° ;
- 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.

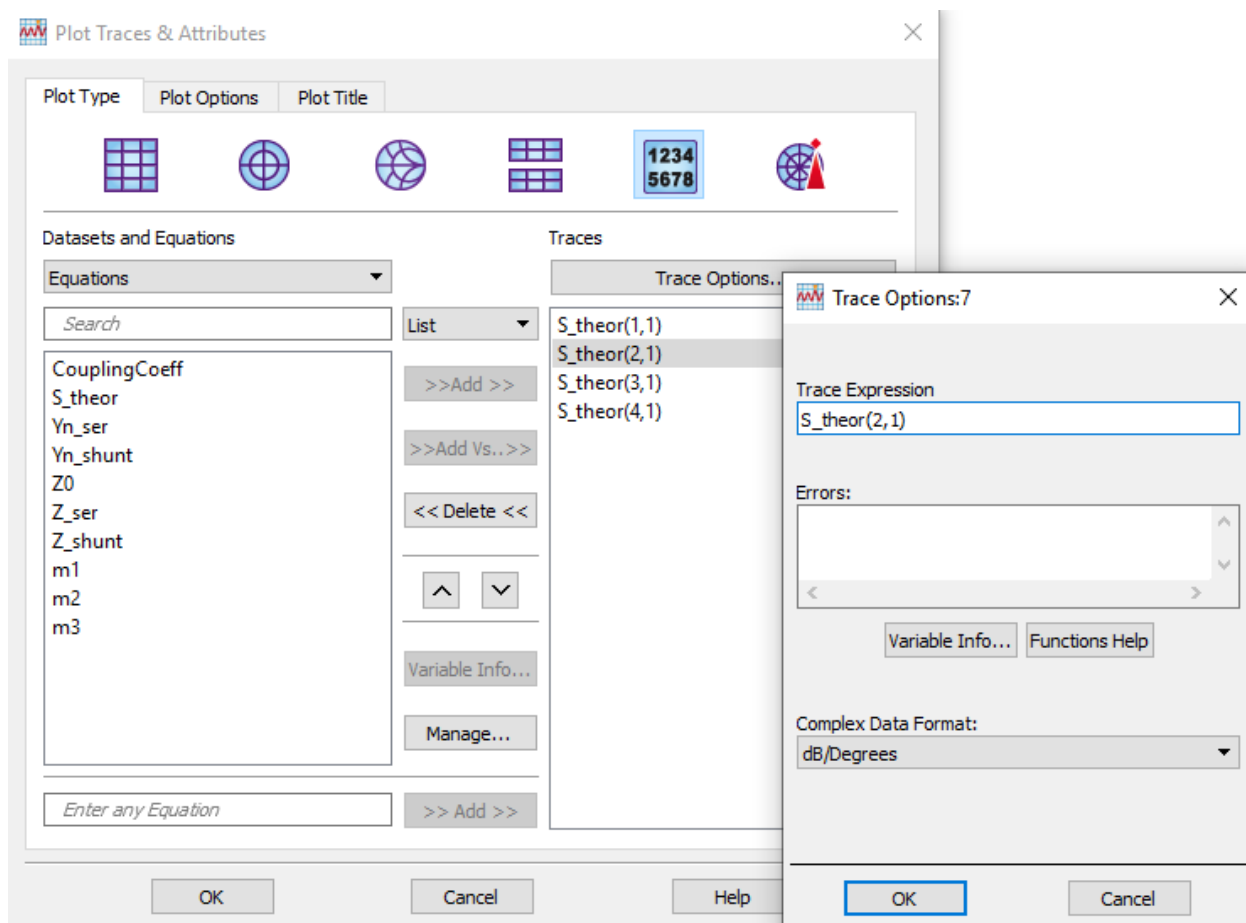


Таблица будет выглядеть следующим образом.

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° .

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 ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan \delta = 0,0026$), 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.

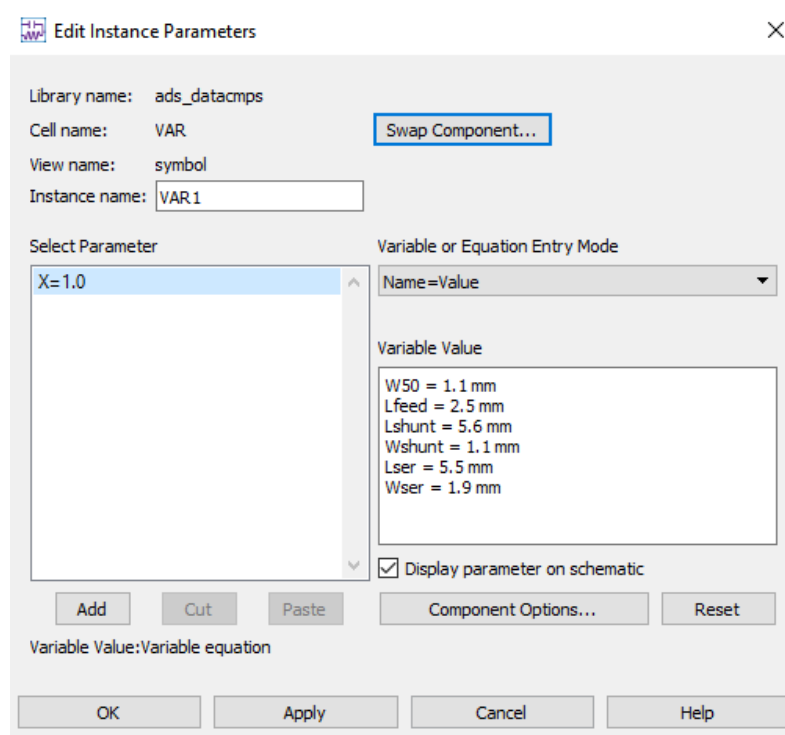
Параллельные шлейфы (50 Ом, 90°) на частоте 8 ГГц получают размеры $L_{\text{shunt}} = 5,6 \text{ мм}$, $W_{\text{shunt}} = 1,1 \text{ мм}$.

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

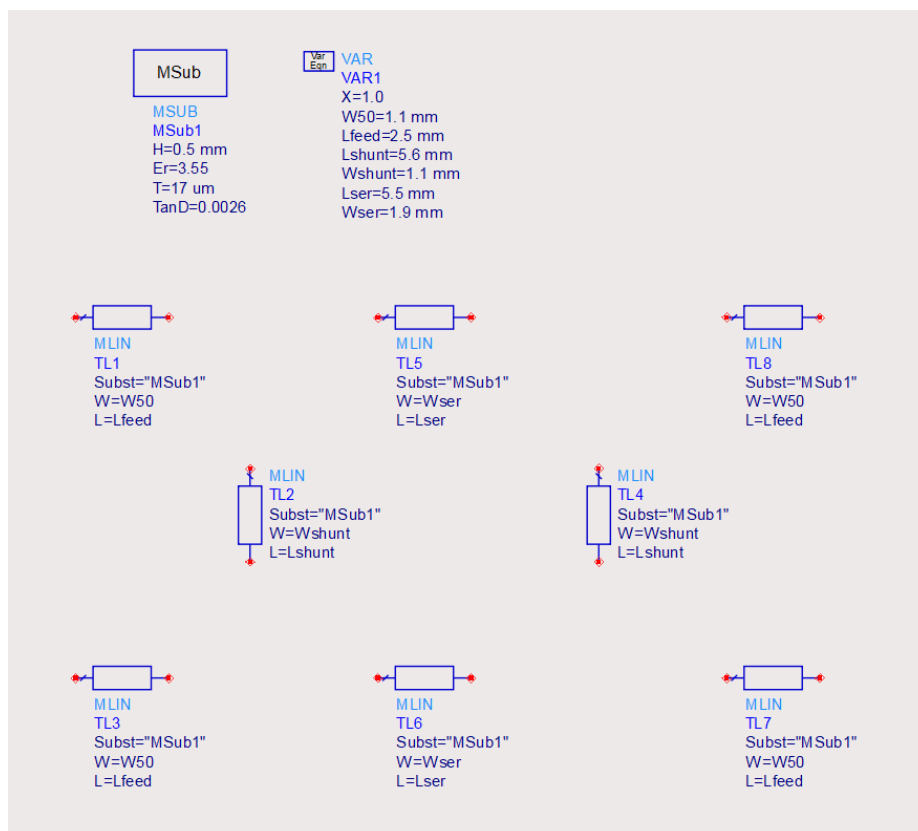
Собираем схему моделирования на микрополосковых линиях (MLIN). Дополнительно со стороны входов поставим 50-Омные участки $W_{50} = 1,1 \text{ мм}$, $L_{\text{feed}} = 2,5 \text{ мм}$.

Указанные выше размеры вынесем в переменные (VAR).

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

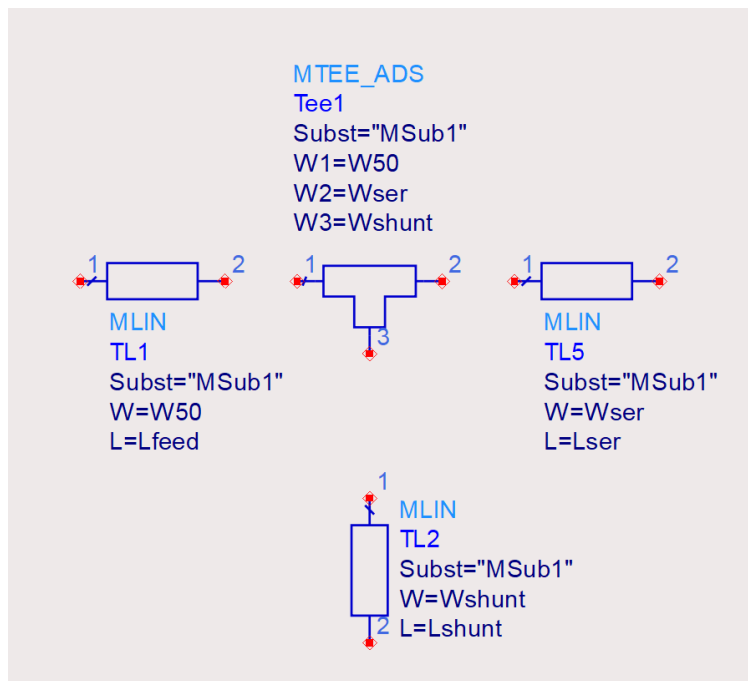




Предварительное расположение микрополосков MLIN.



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 всех компонентов (меню Options – Preferences вкладка Pin/Tee галка Pin Numbers в группе Visibility (on/off)).

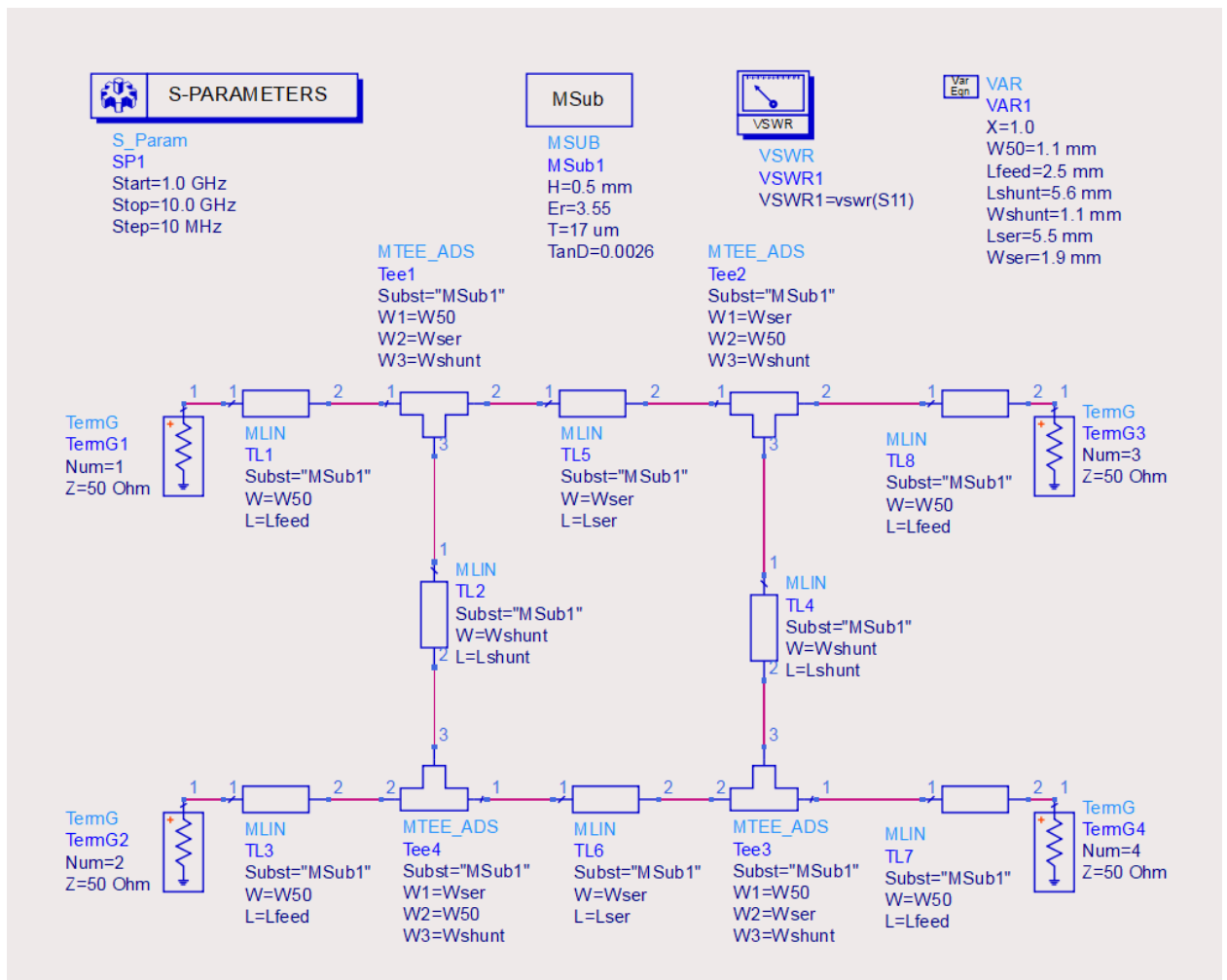


При расположении микрополосковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R), зеркалить (Mirror About X, Mirror About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению.

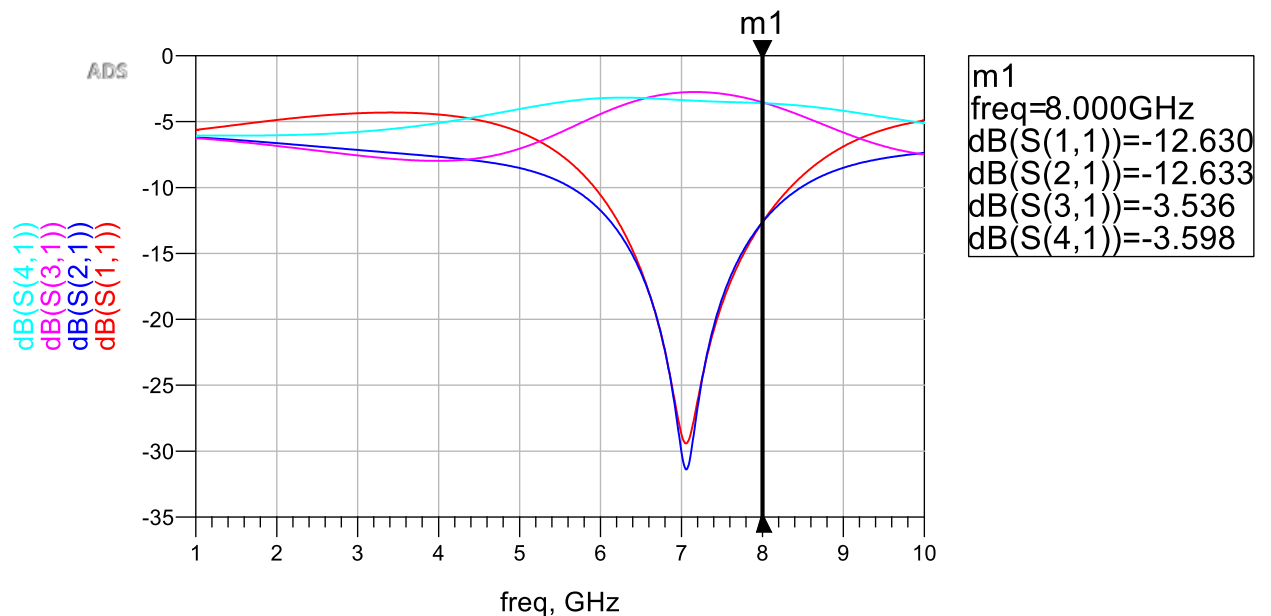
! При расположении компонентов можно перемещать привязанную текстовую информацию по ПКМ – Move Component Text (F5), так, чтобы получать чистую и читаемую схему.

Дополнительно добавим расчет КСВН по входу.

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.

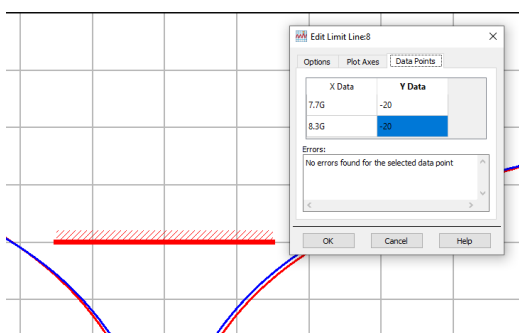
С помощью инструмента Tune или Optimization настроим двушлейфный направленный ответвитель на 8 ГГц. Дополнительно настроим его так, чтобы он работал в некотором частотном диапазоне 7,7..8,3 ГГц. Наложим следующие ограничения:

- коэффициент отражения $\text{dB}(S_{11})$ и развязка $\text{dB}(S_{21})$ не должны превышать -20 дБ в данном частотном диапазоне;
- положение провалов коэффициента отражения $\text{dB}(S_{11})$ и развязки $\text{dB}(S_{21})$ должны быть как можно более к 8 ГГц;
- рабочее затухание $\text{dB}(S_{31})$ и переходное ослабление $\text{dB}(S_{41})$ не должны опускаться меньше $-3,5$ дБ.

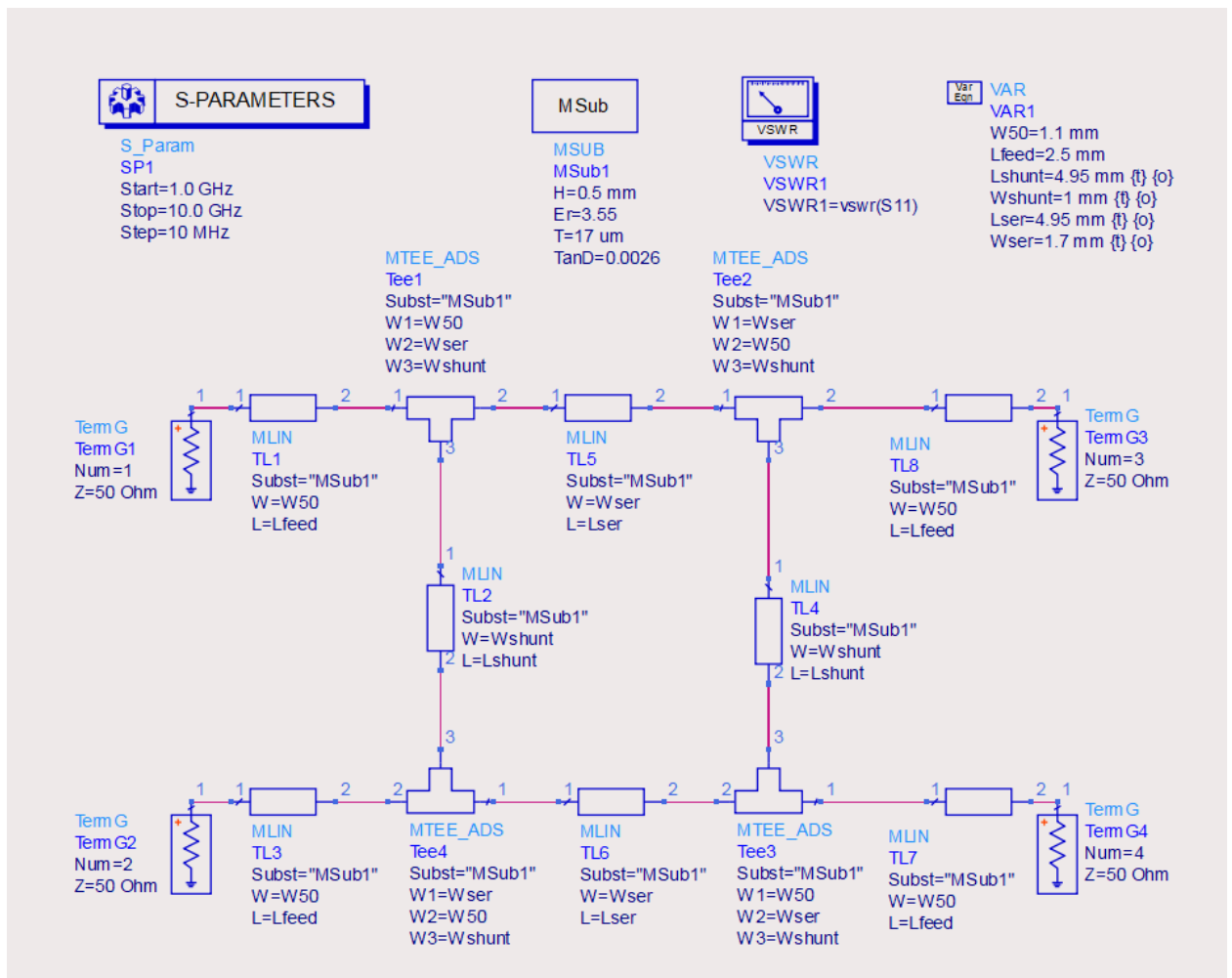
Имеет смысл работать с переменными Lshunt, Wshunt, Lser и Wser (каждая с шагом 0,05 мм, уходить от номинального значения стоит не более, чем на 20%). Lshunt и Lser в результате должны стать меньше исходного значения, двигаться почти синхронно и в результате иметь почти одинаковые значения (т.к. они в паре определяют положение провалов $\text{dB}(S_{21})$ и $\text{dB}(S_{11})$). 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

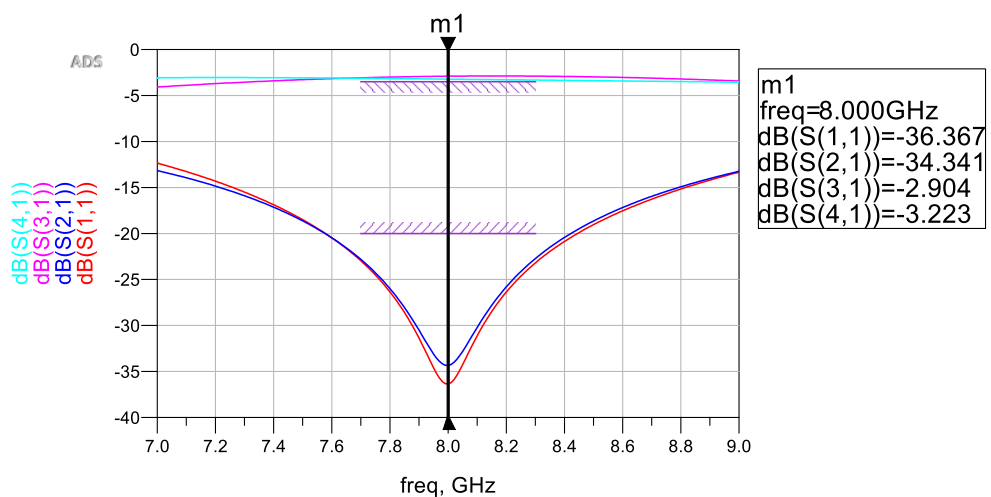
Line, тулбар Limit Line . Доступны граничные линии «Больше», «Меньше», «В пределах» и «За пределами». После приблизительной установки граничной линии в ее свойствах ей можно точно численно задать положение.



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

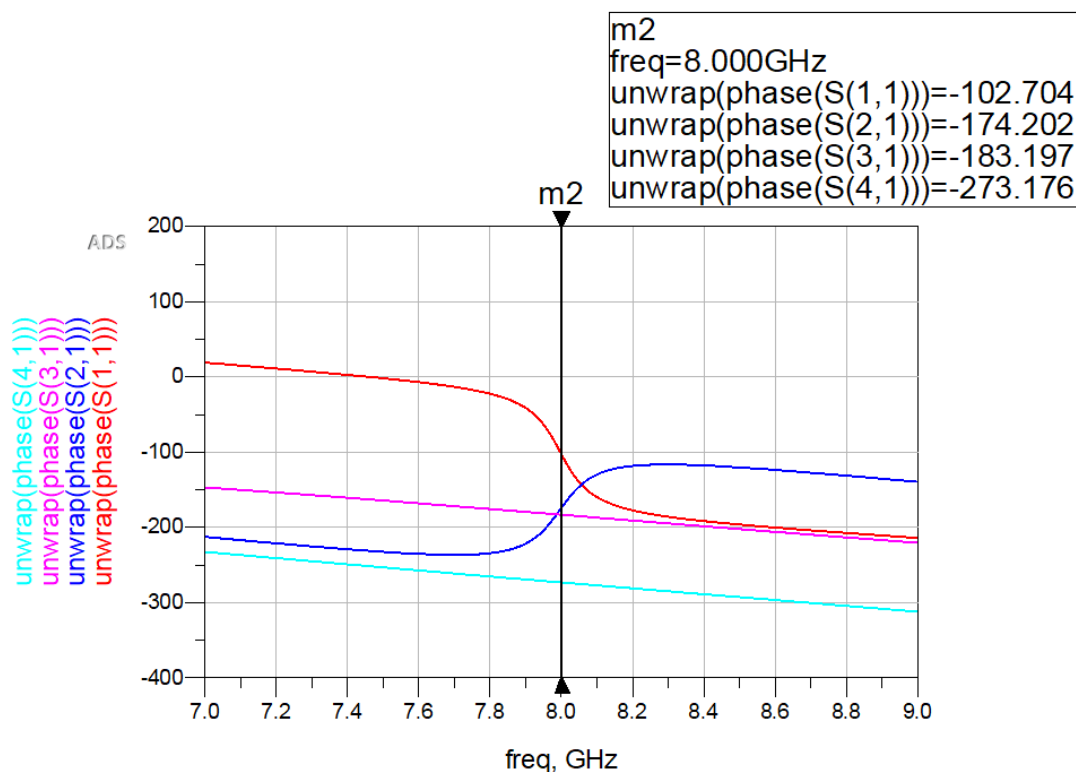


Проанализируем теперь подстроенные результаты.




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

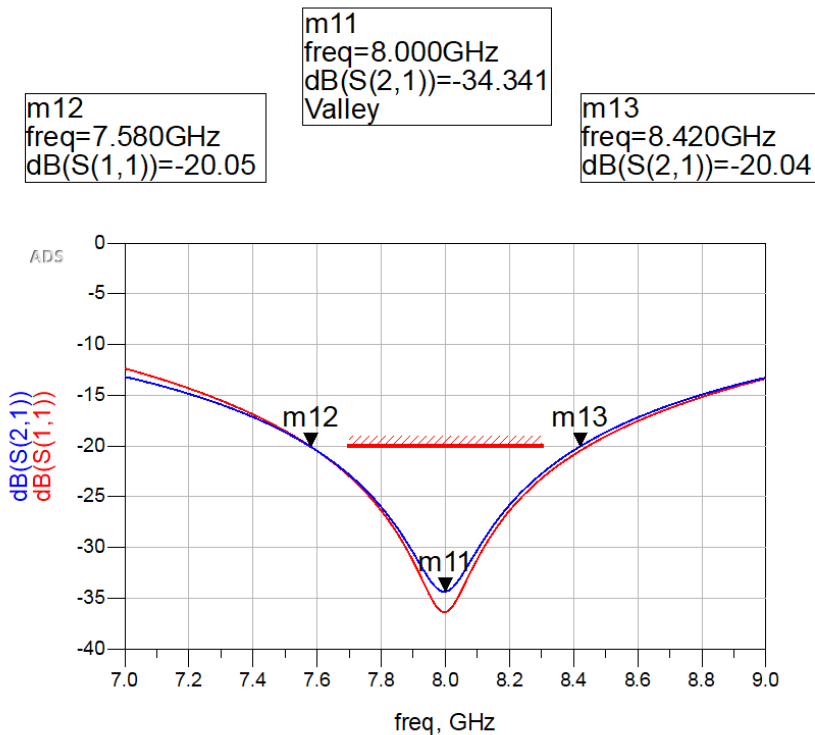
График фазовых соотношений стал сложноват для чтения (присутствуют разрывы через 360°). Обернем выражения в функцию `unwrap()` (ищет и убирает перескоки через 360°).



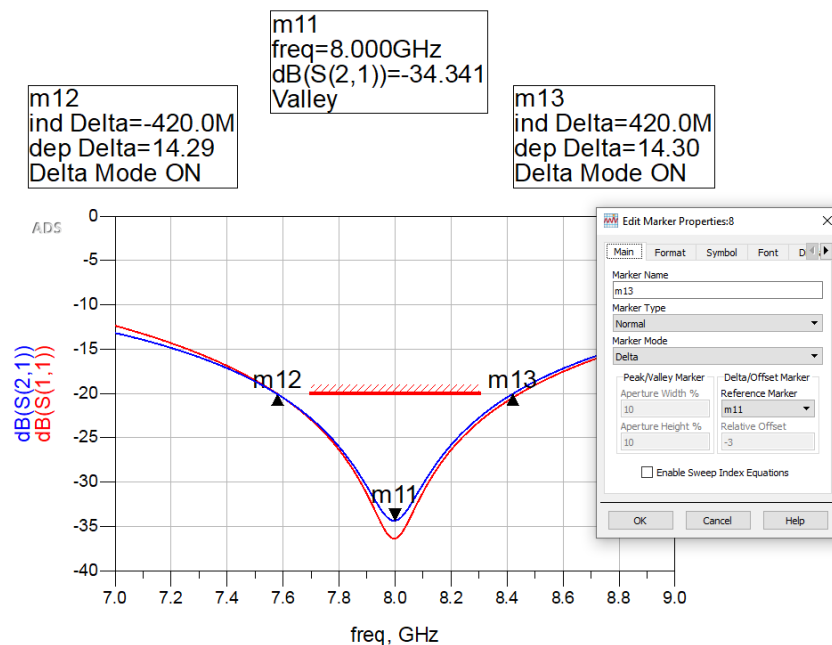
Характер ФЧХ аналогичен модели на идеальных линиях передачи. При этом присутствует дополнительный фазовый набег по отношению к модели на идеальных линиях передачи, связанный с наличием входных участков микрополосковых линий.

Определим, в пределах каких частот сохраняются заданные ограничения.

Скопируем амплитудный график и удалим с него $\text{dB}(S_{31})$ и $\text{dB}(S_{41})$. Поставим на более высоком графике из $\text{dB}(S_{11})$ и $\text{dB}(S_{21})$ 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.

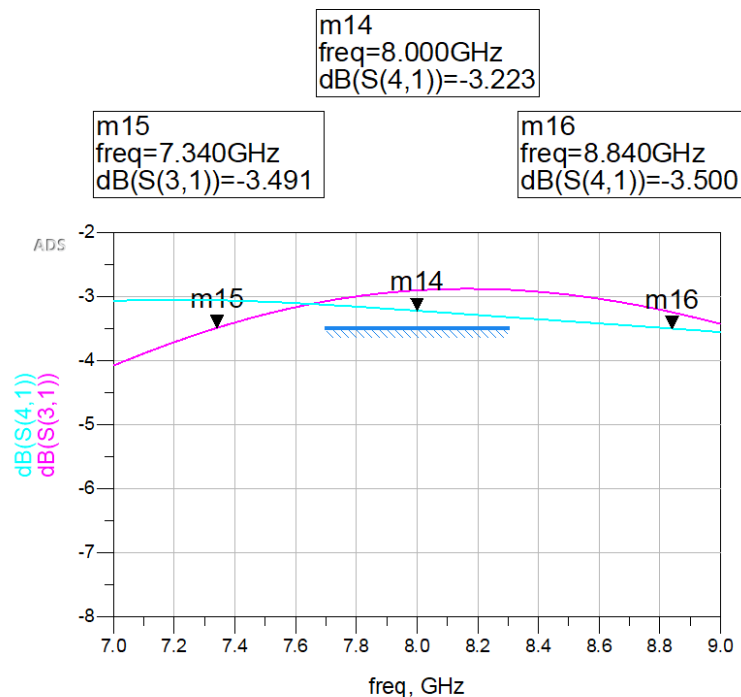


Чтобы не считать дельту по X или Y между маркерами, маркеру можно установить режим Delta и выбрать другой маркер, относительно которого давать данные.



Получается, что по S11 и S21 можно считать, что рабочая полоса двушлейфного направленного ответвителя ± 420 МГц (диапазон 7,58..8,42 ГГц).

Аналогичную операцию проведем на копии амплитудного графика 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.



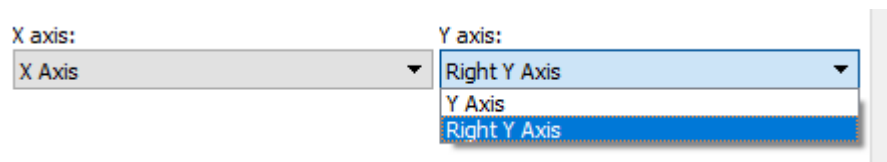
На нем не получается симметричного частотного диапазона. Кроме того, диапазон частот больше, чем по развязке или коэффициенту отражения и равен 1,5 ГГц (диапазон 7,34..8,84 ГГц).

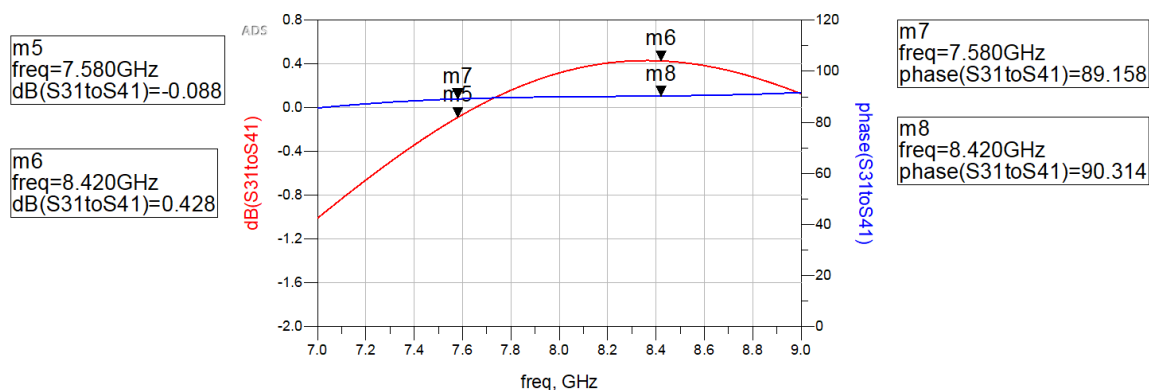
Окончательно проверим стабильность работы рабочего и вторичного плеч по отношению друг другу. Определим выражение

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

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 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

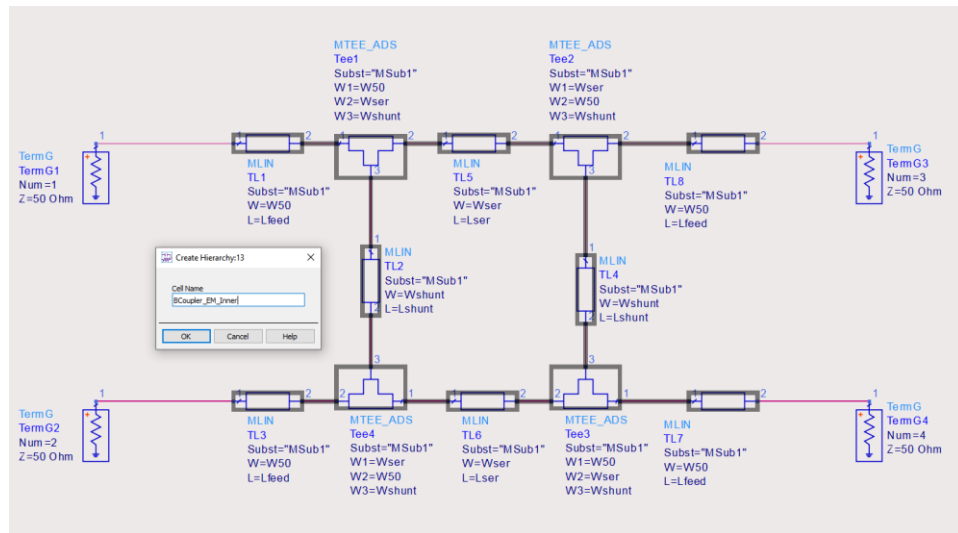
Lab1 Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Для параметризации топологии надо будет создать двухуровневую схему:

- 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.

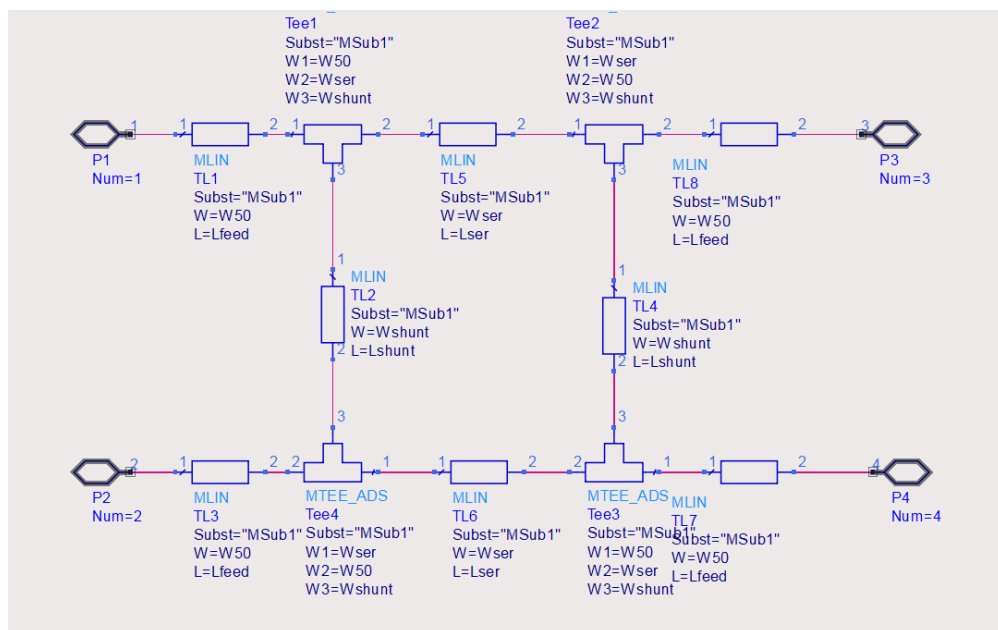
Схему нижнего уровня VCoupler_EM_Inner надо будет сконвертировать в топологию; сделать всю ячейку VCoupler_EM_Inner параметризированной и настроить параметры EM_моделирования (emSetup).

Далее кратко показаны основные картинки до начала моделирования

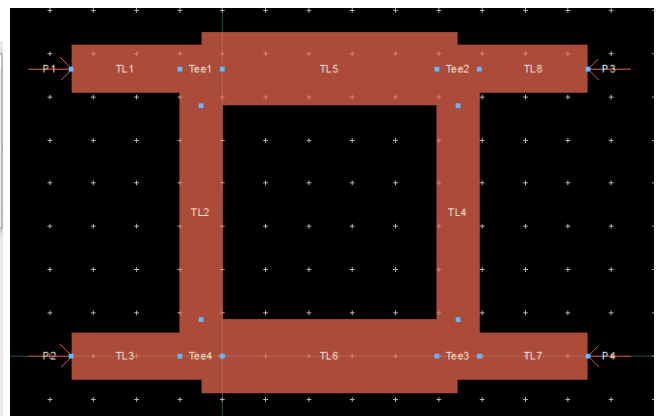
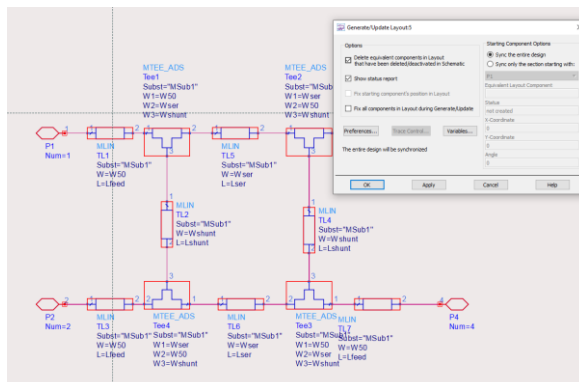
- создание иерархии



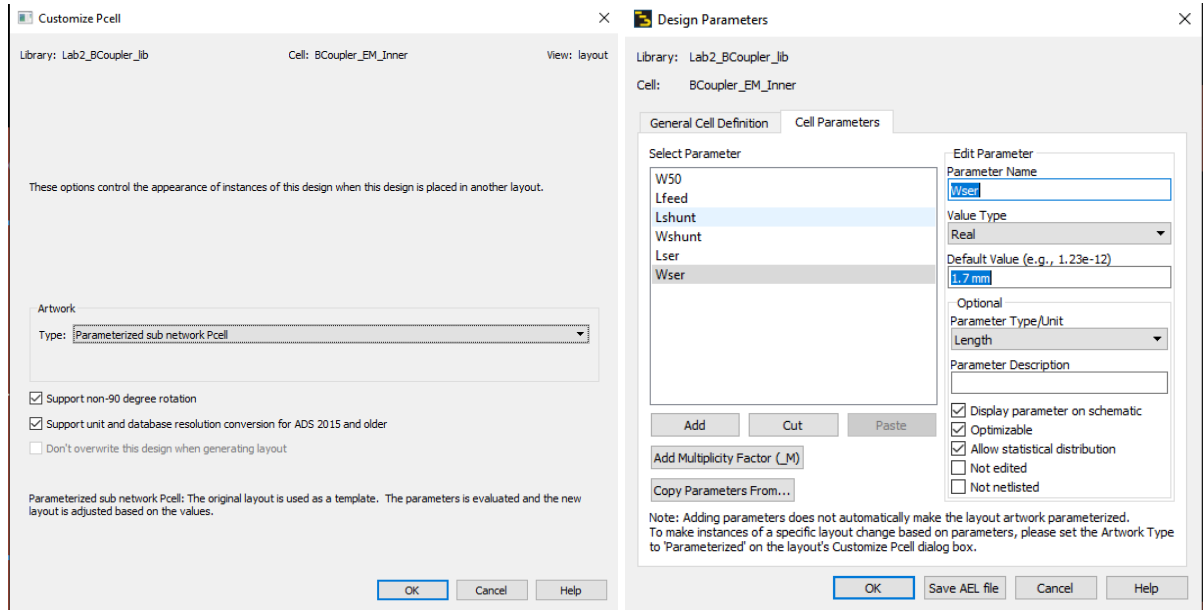
Автоматическое создание иерархий может выставить порядок пинов не в том порядке, как нам удобно. В примере переставлены местами пары пинов P1-P2 и P3-P4. Нужно эти пины переместить в нужные места (P1-P3 – основное плечо, P2-P4 - вторичное).



- генерация топологии подсистемы BSCoupler_EM_Inner



- параметризация ячейки BCoupler_EM_Inner



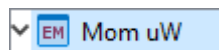
Lab1

Далее надо настроить emSetup

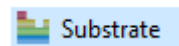


подсхемы

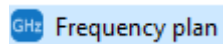
BCoupler_EM_Inner. Задать следующие настройки:



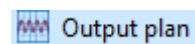
- метод моделирования Momentum Microwave, режим EM Simulation/Model.



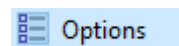
- убедиться, что привязана правильная подложка



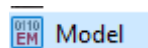
- частотный план адаптивный от 0 до 10 ГГц, плюс точка 8 ГГц



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



- Mesh с точностью 40 ячеек/длина волны и включено автоматическое создание краевой сетки



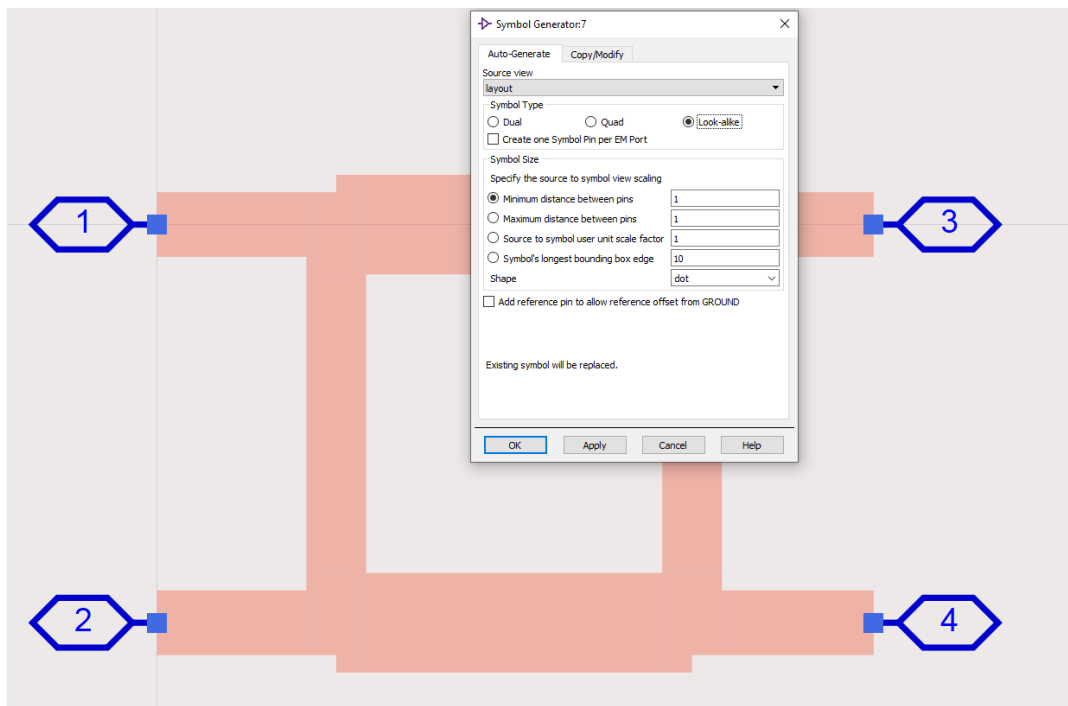
- включено создание и сохранение emModel


По команде Tools – Open Symbol Editor

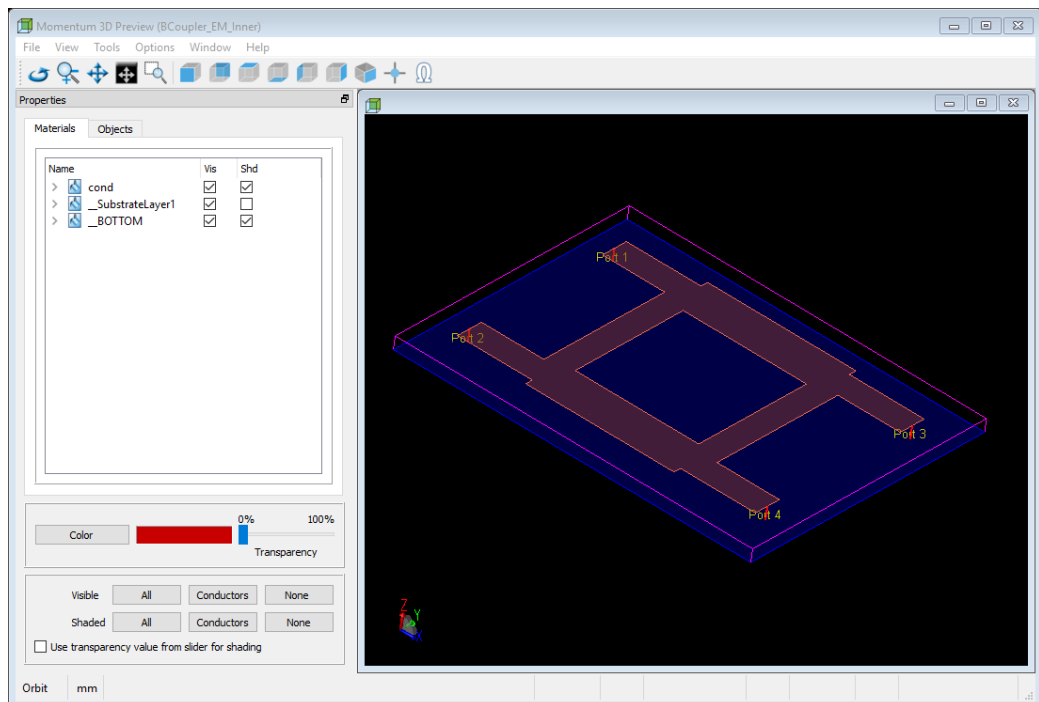



сгенерирован символ,

аналогичный топологии.



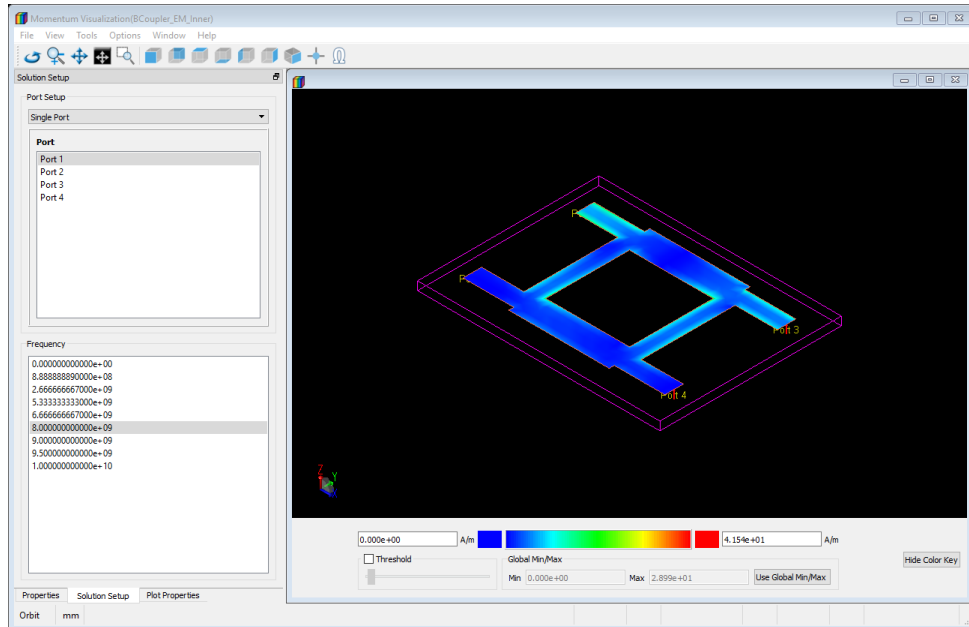
Перед запуском расчета можно по команде Tools - 3D EM Preview  вызвать отдельное окно, в котором будет показано, как будет считаться модель.



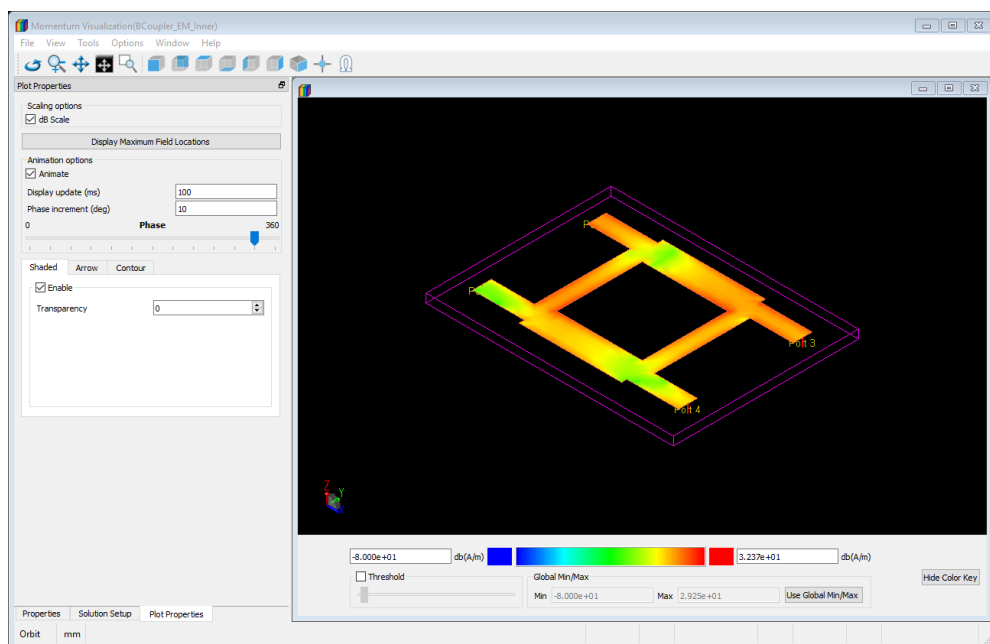
Один раз посчитаем топологию по запуску из текущего emSetup (Generate:S-Parameters). Т.к. в текущей топологии нет переходных отверстий, то посчитается она быстро. После расчета можно по команде Tools – Visualization  открыть окно визуализации результатов. Параметры отображения объектов в нем аналогичны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

Выберем отображение относительно порта 1 на частоте 8 ГГц.

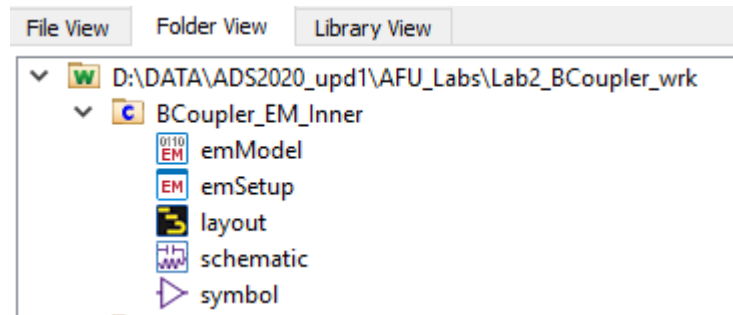


На вкладке Plot Properties включим логарифмический масштаб (галка dB Scale) и включим анимацию поверхностных токов.

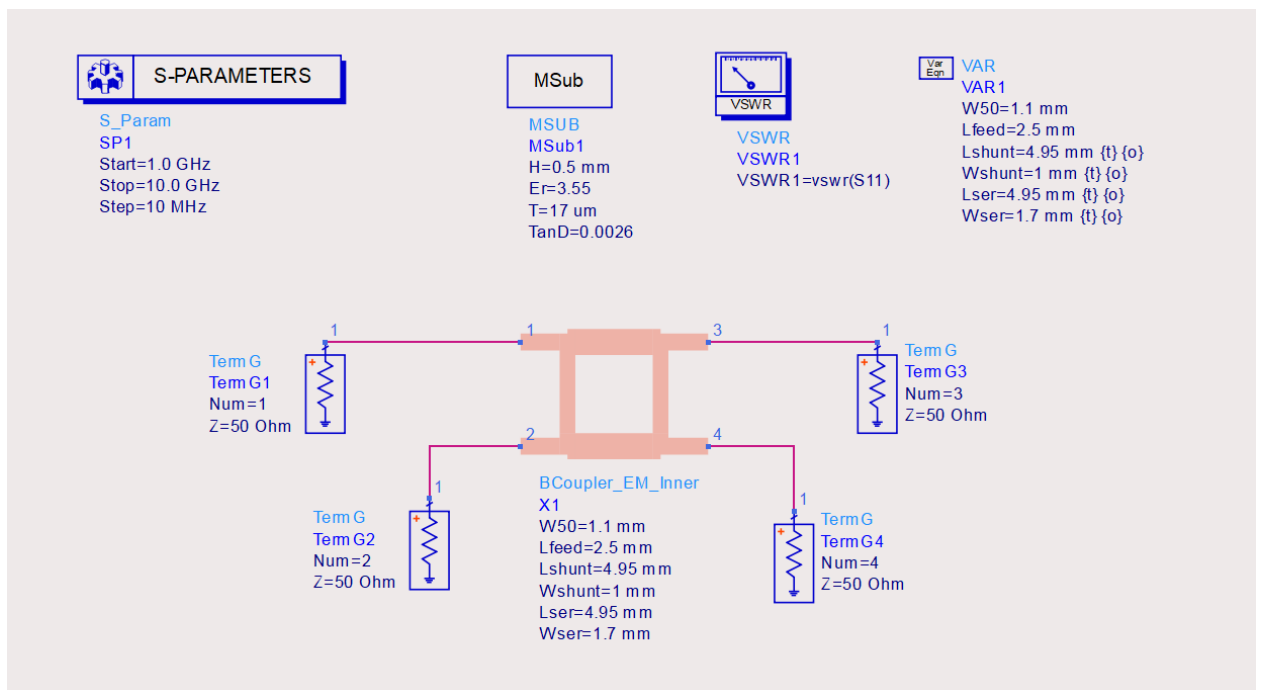


Видно, что между выходами 3 и 4 есть сдвиг по фазе на 90° .

Полученные данные сохранены в emModel в составе ячейки BCoupler_EM_Inner. Можно из основного окна ADS развернуть состав ячейки и открыть emModel.



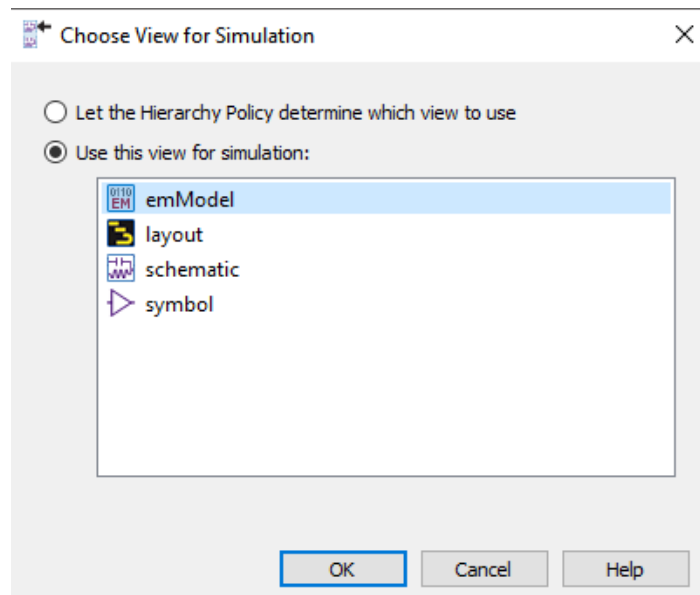
Вернемся в схему верхнего уровня BCoupler_EM_Top.



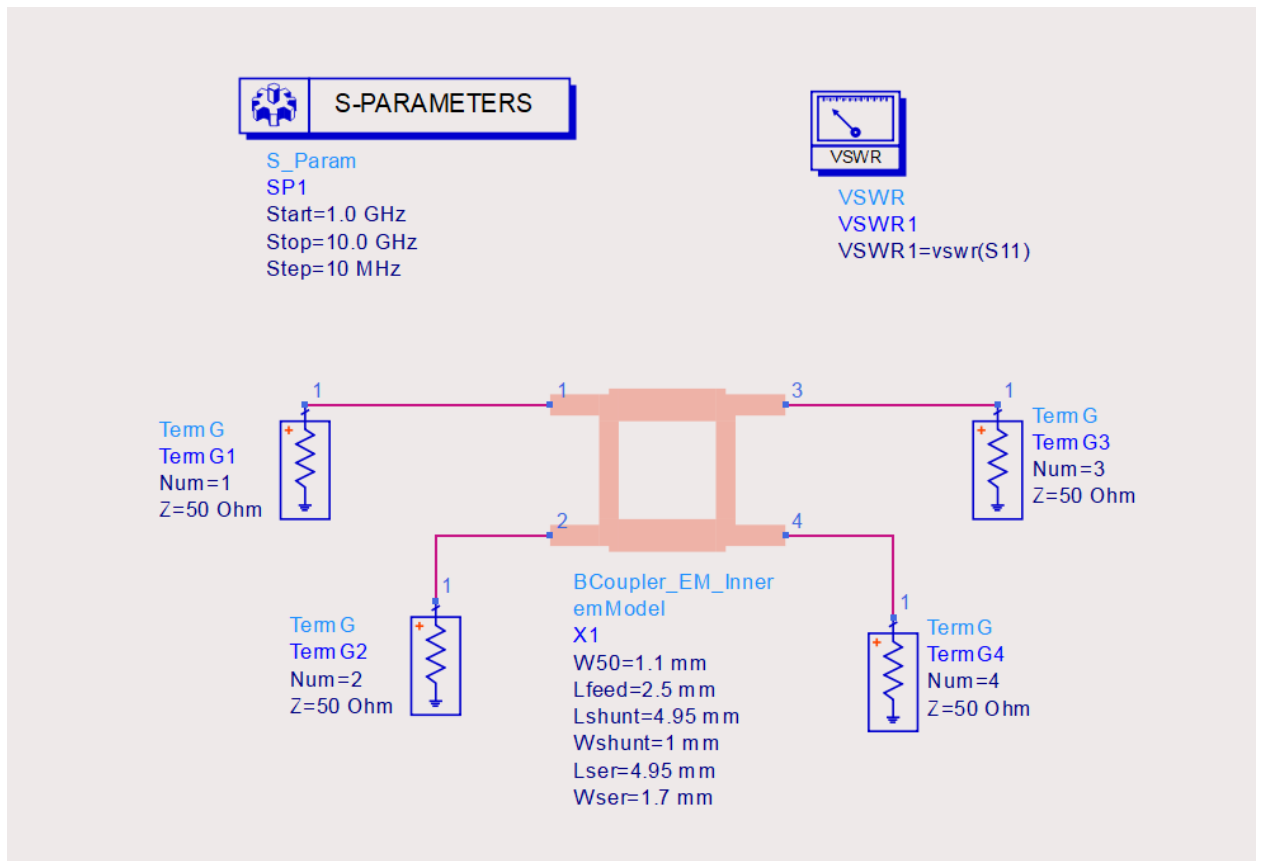
Приведем ее к следующему виду:

Lab1

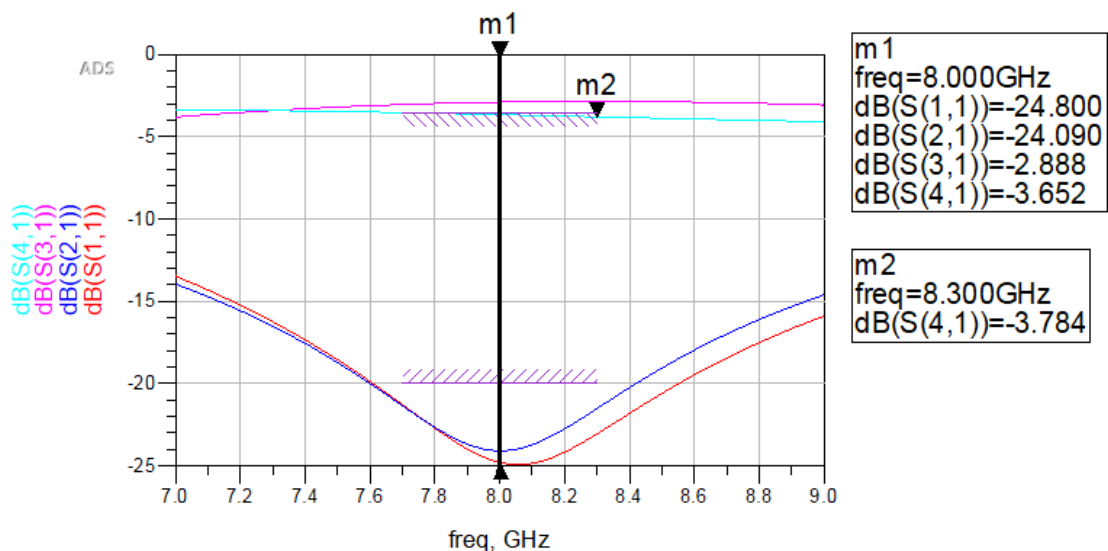
- отключим MSub1, т.к. в EM-анализе подложка берется из файла subst.
- отключим блок переменных VAR, т.к. переменные в топологию передаются через переменные ячейки.
- у подсхемы топологии BCoupler_EM_Inner по ПКМ – Component – Choose View for Simulation установим, что результаты надо брать из emModel.



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 до -3,6 дБ.

Статистический анализ выхода годных

Проведем статистический анализ выхода годных (Yield) полученной топологии.

Оценим, как будут меняться коэффициент отражения, рабочее затухание, развязка и переходное ослабление. Численные значения длин путь могут иметь случайное значение в пределах $\pm 0,05$ мм (по нормальному распределению). Угловые параметры $\pm 1^\circ$ (по нормальному распределению).

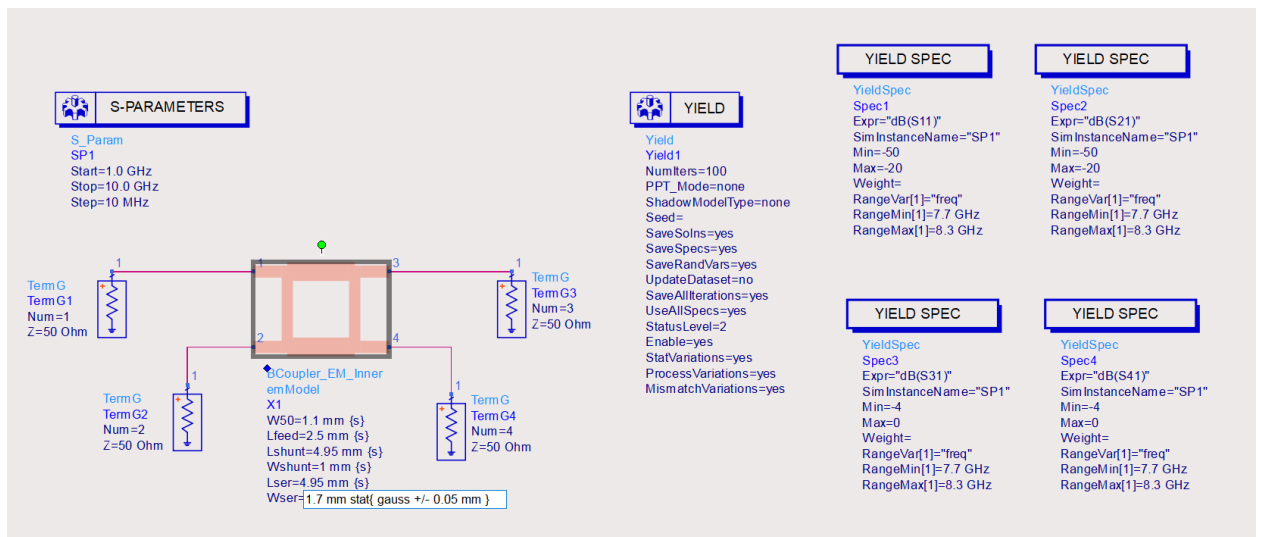
Смягчим требования по рабочему затуханию и переходному ослаблению до -4 дБ.

Lab1

Создадим копию схемы BCoupler_EM под названием BCoupler_EM_Yield.

Yield-спецификацию по dB(S11) и dB(S21) установим в пределах -50..-20 дБ. Yield-спецификацию по dB(S31) и dB(S41) установим в пределах -4..0 дБ.

Число попыток 100, в промежуточных состояниях пусть сохраняются все данные.



Запускаем расчет. Т.к. при данном расчете при каждом запуске расчета S-параметров будет запускаться подчиненный ЕМ-анализ, весь расчет будет идти довольно долго.

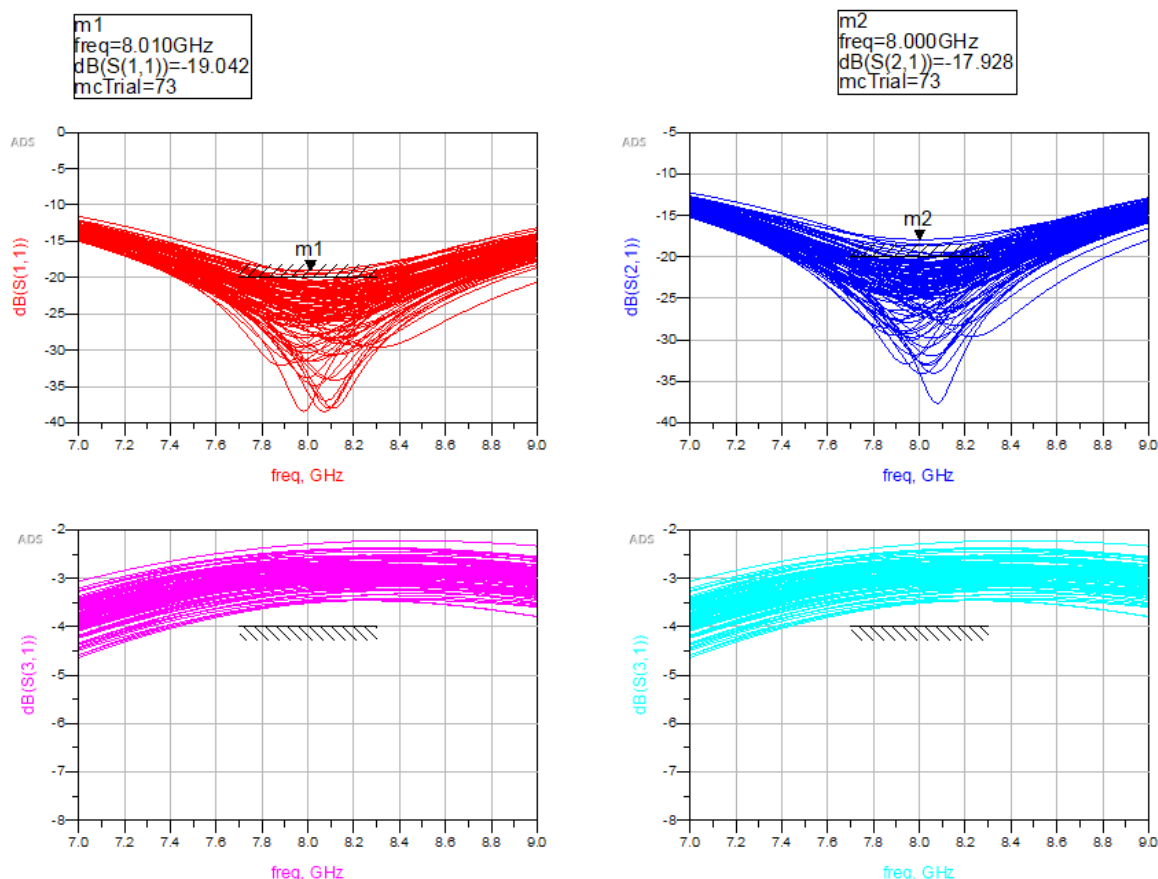
Поле окончания расчета нужно вывести таблицу со значениями Yield, NumPass и NumFail. Они говорят нам о том, сколько процентов попыток удалось или провалилось.

Yield	NumFail	NumPass
36.000	64.000	36.000

Получается успех всего в 36%. Это плохо, схема очень чувствительна к точности параметров. Надо проанализировать результаты, чтобы понять, в чем может быть причина проблема.

Выведем значения dB(S11), dB(S21), dB(S31) и dB(S41). Они были сохранены для каждой из попыток. Поставим маркеры на самых плохих результатах.

Видно, что по S31 и S41 попытки проходят всегда. Определим, точность какого параметра влияет на S11 и S21.



По графикам видно, что это попытка №73 (значение mcTrial). Выведем таблицу со значениями параметров W50, Lfeed, Wshunt, Lshunt, Wser и Lser. Они будут выведены относительно номера попытки mcTrial.

mcTrial	W50	Lfeed	Wshunt	Lshunt	Wser	Lser
73	1.144 m	2.501 m	1.069 m	4.972 m	1.617 m	4.963 m
74	1.136 m	2.500 m	1.056 m	4.990 m	1.625 m	5.000 m

Ни одна из переменных для данной попытки не слишком отличается от номинальных значений (mcTrial = 0). Поисследуем чувствительность с помощью функции `histogram_sens()`.

Т.к. по dB(S31) и dB(S41) проходят попытки в 100%, то их поведение исследовать не имеет смысла.

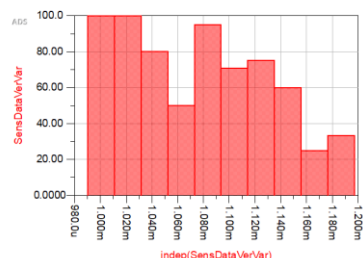
Eqn SensDataVerVar = histogram_sens(SensData , SensVar, SensYieldMin, SensYieldMax, freqMin, freqMax, NumBins)

Eqn freqMin = 7.7 GHz **Eqn** freqMax=8.3 GHz **Eqn** NumBins = 10

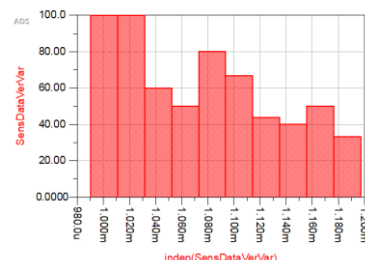
Eqn SensData = dB(S11) **Eqn** SensVar = W50 **Eqn** SensYieldMin=-50 **Eqn** SensYieldMax=-20

Пройдемся по переменным и оценим чувствительность. По W50 и dB(S11) и dB(S21) имеют результат, близкий к 100% при W50 = 1,0..1,025 мм (что вообще говоря, странно и требует дополнительного исследования).

EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = W50 EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20

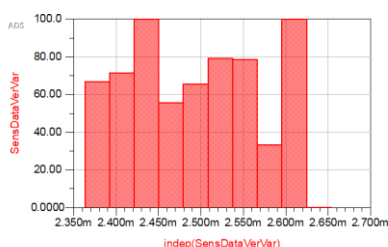


EqnSensData = dB(S21) EqnSensVar = W50 EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20

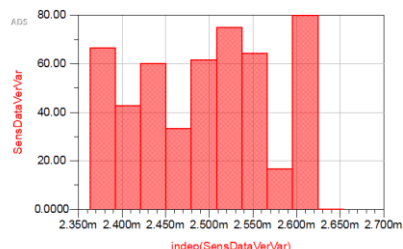


По Lfeed есть слабая зависимость, но не ярко выраженная (что логично).

EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Lfeed EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20

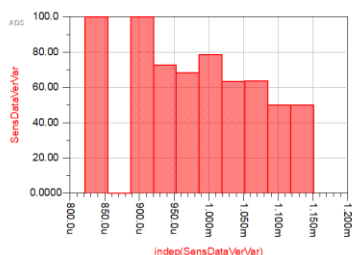


EqnSensData = dB(S21) EqnSensVar = Lfeed EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20

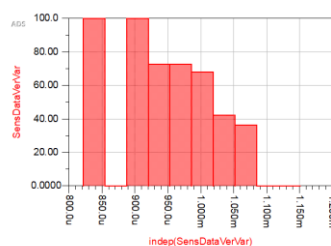


По Wshunt есть зависимость, 100% собирается близко к 0,85 мм и 0,9 мм. Провал до 0% при Wshunt = 0,87 мм плохо объясним, скорее всего не хватает числа попыток для построения достоверной картинки.

EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Wshunt EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20

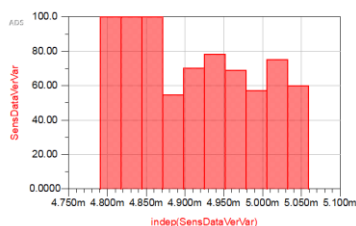


EqnSensData = dB(S21) EqnSensVar = Wshunt EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20

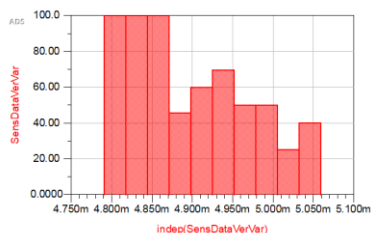


По Lshunt есть зависимость, 100% собирается близко к 4,85 мм.

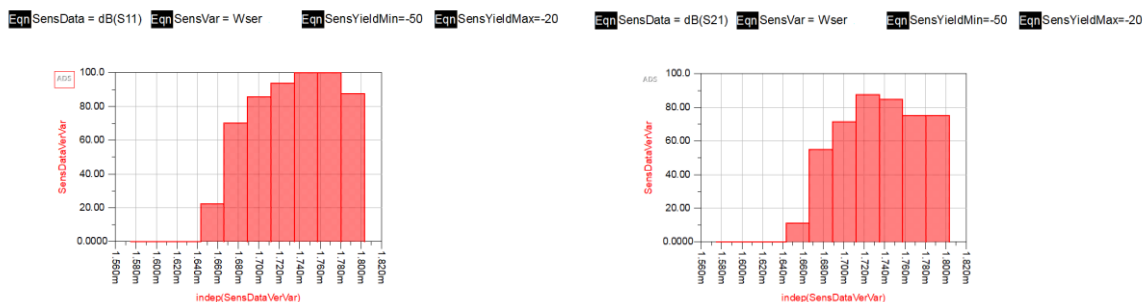
EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Lshunt EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20



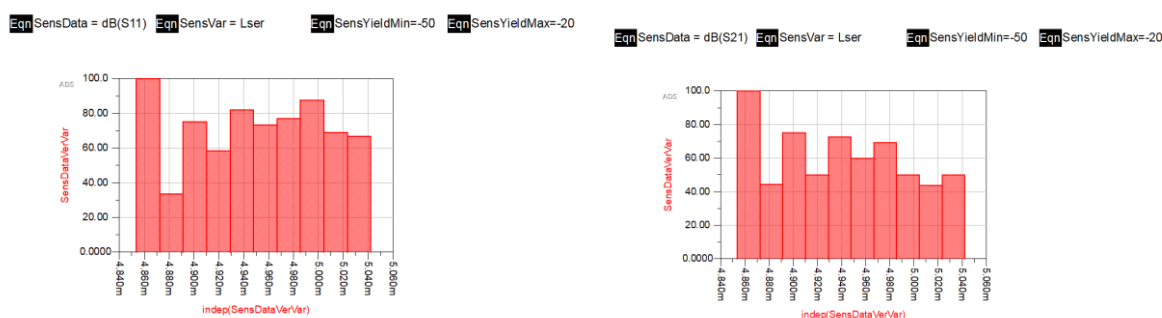
EqnSensData = dB(S21) EqnSensVar = Lshunt EqnSensYieldMin=-50 EqnSensYieldMax=-20



По Wser есть зависимость, горб собирается близко к 1,76 мм.



По Lser также есть зависимость, есть точные пики 100% близко к 4,86 мм. При других значениях, от Lser успех не зависит.



Исходя из полученных выводов, получается, что надо подправить значения Wshunt в диапазон 0,85..0,9 мм, Lshunt на 4,85 мм, Wser на 1,76 мм и Lser на 4,86 мм. И еще раз провести анализ чувствительности, но теперь с учетом новых номинальных значений.

Задание на выполнение

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

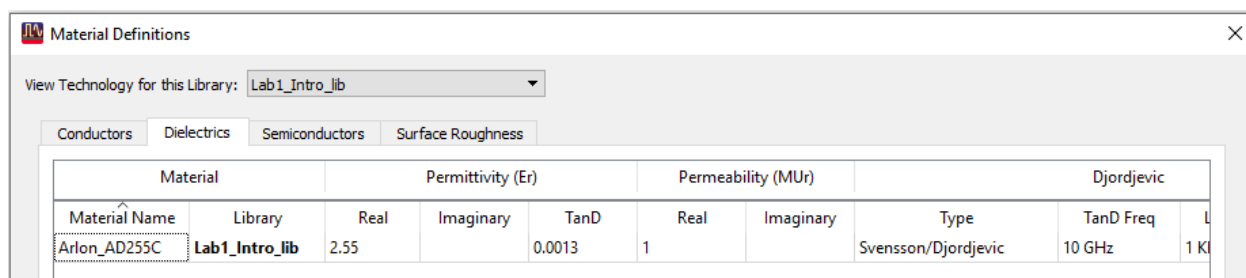
Варианты заданий приведены в таблице 1.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

Таблица 1. Варианты заданий

№ Варианта		1	2	3	4	5
Центральная частота F_c , ГГц		9,5	6,5	5	6	4,7
Параметры подложки	Именование материала	RO3006	RO3006	RO4003C	RO4003C	RO4350B
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ед.	6,15	6,15	3,55	3,55	3,66
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, ед.	0,0025	0,0025	0,0026	0,0026	0,004
	Толщина диэлектрика h , мм	0,25	0,64	0,813	0,508	0,254
	Толщина металлизации t , мкм	17	35	35	17	17
№ Варианта		6	7	8	9	10
Центральная частота F_c , ГГц		4,9	6,2	4,1	2,5	4,4
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO3003	RO3003	RO3010	RO3010
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ед.	3,66	3,0	3,0	10,2	10,2
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, ед.	0,004	0,0013	0,0013	0,0025	0,0025
	Толщина диэлектрика h , мм	0,508	0,76	1,52	1,28	0,64
	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. Двухшлейфный направленный ответвитель в микрополосковом исполнении на топологическом уровне (ячейка верхнего уровня BCoupler_EM_Top и подсхема BCoupler_EM_Inner).

3.1. Создать параметризованную топологию двухшлейфного 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.

- 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 двухшлейфный 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 двухшлейфный 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 VCoupler_EM_Yeld, использует созданную ранее подсхему VCoupler_EM_Inner).

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

- Считать, что линейные размеры могут иметь погрешность $\pm 0,05$ мм, распределенную нормально.

- Модель для исследования брать в топологическом представлении.

- 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.*

4.2. 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 и провести анализ гистограммой чувствительности по параметрам и найти, какие из параметров начинает влиять на устойчивость решения.

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 фактическим 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 БДЗ.

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. Как с помощью двушлейфного направленного ответвителя можно сформировать квадратурный сигнал? Какие требования нужно наложить на двушлейфный направленный ответвитель?
7. В какой части диаграммы Смита на графике S_{11} должна находиться точка, близкая к рабочей частоте двушлейфного направленного ответвителя?
8. Какие фазовые соотношения присутствуют в гибридном двушлейфном направленном ответвителе между основным и вторичным плечом на рабочей частоте?
9. Какие электрические длины должны быть у последовательного и параллельного участков в гибридном двушлейфном направленном ответвителе?
10. Какие волновые сопротивления должны быть у последовательного и параллельного участков в гибридном двушлейфном направленном ответвителе?

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

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

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

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

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.