

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 №4

«Расчет и моделирование направленного ответвителя на связанных линиях»

**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	7
Создание проекта	7
Модель на идеальных линиях передачи	8
Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении	11
Модель на топологическом уровне	17
Статистический анализ выхода годных	24
Задание на выполнение	31
Требования к отчёту	36
Задание на самостоятельную работу	37
Контрольные вопросы	37
Литература	39



Введение

Цель работы: ознакомиться расчетом и моделированием направленного ответвителя на связанных линиях 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.

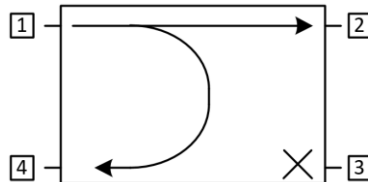
Продолжительность работы: 4 часа.

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

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

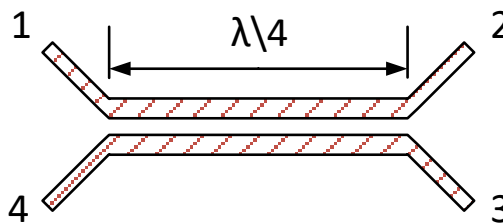
Теоретические сведения

Направленный ответвитель на связанных линиях относится к направленным ответвителям, устройствам аналогичным уже изученным ранее. В общем виде он предназначен для отведения части мощности от основного прохода мощности во вторичное плечо. Соответственно, его можно описать матрицей S-параметров размером 4×4 .

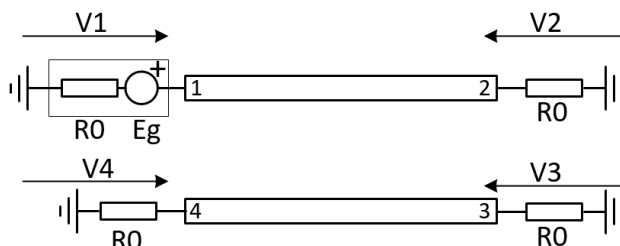


При использовании любых формул из источников нужно следить за нумерацией портов. Существует несколько различающихся принятых схем обозначений. Использование формул без учета нумерации портов, может привести к странным и некорректным результатам расчетов. В текущей работе нумерация портов отличается от [2] и [3].

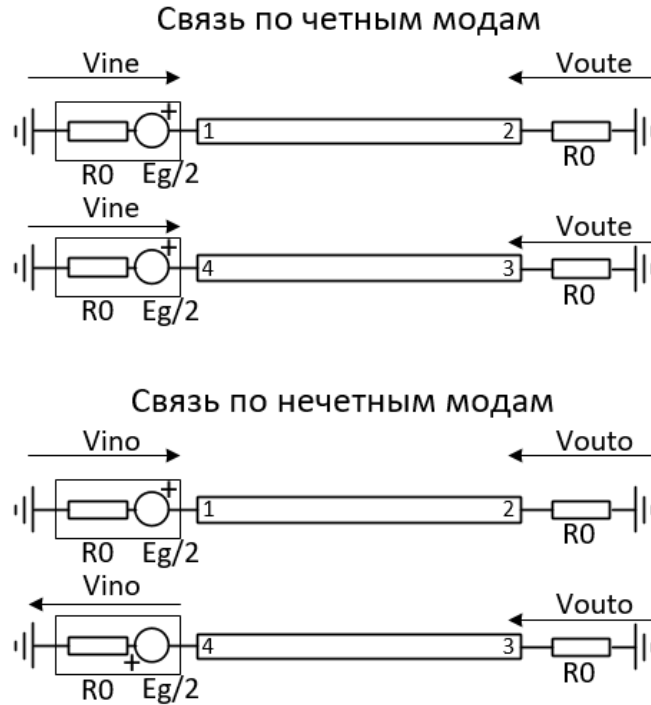
По сравнению с изученными ранее типами направленных ответвителей довольно широкополосной реализацией является направленный ответвитель на связанных линиях. В микрополоском виде он может быть реализован в следующем виде



Основой данного направленного ответвителя является участок связанных линий. Проанализируем его. Путь нумерация представлена следующим видом и сигнал подается с порта 1.



С точки зрения связанных линий данную модель можно представить в виде суммы двух возбуждений, работающих по четным (even) и нечетным (odd) модам.



С учетом нумерации портов можно написать следующую систему:

$$\begin{cases} V_1 = V_{ine} + V_{ino} \\ V_2 = V_{oute} + V_{outo} \\ V_3 = V_{oute} - V_{outo} \\ V_4 = V_{ine} - V_{ino} \end{cases}$$

Если представить линии как двухпортовые устройства, нагруженные на сопротивление R_0 , то, обозначая падающие волны как a , отраженные как b , можно получить общую форму выражений по четным и нечетным модам:

$$b_{oe} = b_{0e} \frac{e^{-j\theta_e}}{1 - \Gamma_{0e}^2 e^{-2j\theta_e}}, \quad a_{oe} = b_{0e} \frac{\Gamma_{0e} e^{-j\theta_e}}{1 - \Gamma_{0e}^2 e^{-2j\theta_e}}, \quad b_{ie} = b_{0e} \frac{\Gamma_{0e} e^{-2j\theta_e}}{1 - \Gamma_{0e}^2 e^{-2j\theta_e}}, \quad a_{ie} = b_{0e} \frac{1}{1 - \Gamma_{0e}^2 e^{-2j\theta_e}},$$

где $\Gamma_{0e} = \frac{R_0 - Z_{0e}}{R_0 + Z_{0e}}$ - коэффициент отражения от генератора и нагрузки с импедансом R_0 , $\theta_e = 2\pi l / \lambda_e$ - электрическая длина по четным модам,

$b_{0e} = \frac{E_g}{2} \frac{\sqrt{Z_{0e}}}{Z_{0e} + R_0}$ - значение падающей волны от генератора по четным модам на входе.

Входные и выходные напряжения можно разложить по падающим и отраженным волнам следующим образом;

$$V_{ine} = a_{ine} \sqrt{Z_{0e}} + b_{ine} \sqrt{Z_{0e}}, \quad V_{oute} = b_{oute} \sqrt{Z_{0e}} + a_{oute} \sqrt{Z_{0e}}$$

Аналогично поступив с расчетами по нечетным модам и с учетом разложения выше, можно получить напряжения по четным и нечетным модам.

$$V_{ine} = \frac{E_g}{2} \frac{1 + \Gamma_{0e} e^{-2j\theta_e}}{1 - \Gamma_{0e}^2 e^{-2j\theta_e}} \frac{Z_{0e}}{R_0 + Z_{0e}},$$

$$V_{ino} = \frac{E_g}{2} \frac{1 + \Gamma_{0o} e^{-2j\theta_o}}{1 - \Gamma_{0o}^2 e^{-2j\theta_o}} \frac{Z_{0o}}{R_0 + Z_{0o}},$$

$$V_{oute} = \frac{E_g}{2} \frac{(1 + \Gamma_{0e}) e^{-j\theta_e}}{1 - \Gamma_{0e}^2 e^{-2j\theta_e}} \frac{Z_{0e}}{R_0 + Z_{0e}},$$

$$V_{outo} = \frac{E_g}{2} \frac{(1 + \Gamma_{0o}) e^{-j\theta_o}}{1 - \Gamma_{0o}^2 e^{-2j\theta_o}} \frac{Z_{0o}}{R_0 + Z_{0o}}.$$

Если считать, что фазовая скорость по четным и нечетным модам одинаковая $\theta = \theta_e = \theta_o$ то можно оценить поведение на центральной частоте расчета, где $V_1 = V_{ine} + V_{ino}$.

$$V_1 = \frac{E_g}{2} \frac{Z_{0e}}{R_0 + Z_{0e}} \frac{1 - \Gamma_{0e}}{1 + \Gamma_{0e}^2} + \frac{E_g}{2} \frac{Z_{0o}}{R_0 + Z_{0o}} \frac{1 - \Gamma_{0o}}{1 + \Gamma_{0o}^2} = \frac{E_g}{2} \left(\frac{Z_{0o}^2}{R_0^2 + Z_{0o}^2} + \frac{Z_{0e}^2}{R_0^2 + Z_{0e}^2} \right).$$

Порт 1 согласован, когда $V_1 = E_g / 2$, т.е.

$$\frac{Z_{0o}^2}{R_0^2 + Z_{0o}^2} + \frac{Z_{0e}^2}{R_0^2 + Z_{0e}^2} = 1 \quad \text{или} \quad R_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}}$$

Можно оценить коэффициенты отражения по четным и нечетным модам в следующем виде

$$\Gamma_{0o} = \frac{R_0 - Z_{0o}}{R_0 + Z_{0o}} = \frac{\sqrt{Z_{0e}} - \sqrt{Z_{0o}}}{\sqrt{Z_{0e}} + \sqrt{Z_{0o}}} = \Gamma \quad \text{и} \quad \Gamma_{0e} = \frac{R_0 - Z_{0e}}{R_0 + Z_{0e}} = \frac{\sqrt{Z_{0o}} - \sqrt{Z_{0e}}}{\sqrt{Z_{0o}} + \sqrt{Z_{0e}}} = -\Gamma.$$

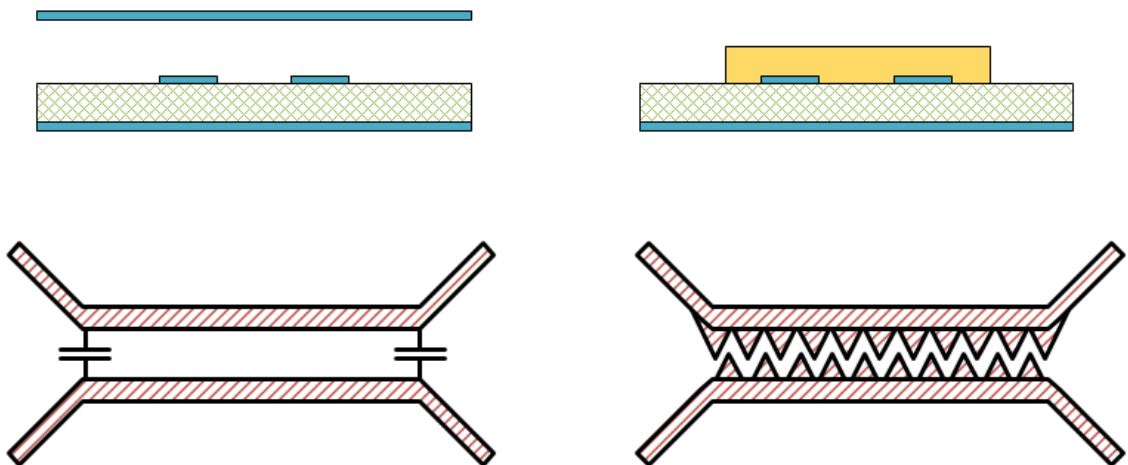
Если считать направленный ответвитель полностью согласованным ($S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$), имеющим идеальную развязку ($S_{13} = S_{31} = S_{42} = S_{23} = 0$) и симметричным по рабочему затуханию ($S_{21} = S_{12} = S_{43} = S_{34}$) и по переходному ослаблению ($S_{41} = S_{14} = S_{32} = S_{23}$), то матрица S-параметров получает только одну степень свободы. Удобно выбрать степень связи между связанными линиями

$\gamma = k$, численно равную переходному ослаблению. Рабочее затухание отсюда $\beta = -j\sqrt{1-k^2}$.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & \beta & 0 & \gamma \\ \beta & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & \beta \\ \gamma & 0 & \beta & 0 \end{bmatrix},$$

Вообще, направленный ответвитель на связанных линиях не обязательно должен быть построен на электрической длине связанного участка в 90° . Но это наиболее широко встречающаяся реализация.

Расчет выше приведен в предположении одинаковости фазовой скорости по четным и нечетным модам, что вообще-то для микрополосковых линий (как квази ТЕМ-волнам) не выполняется. Это приводит в первую очередь к ухудшению согласования и развязки; на рабочее затухание и переходное ослабление влияние гораздо меньше. Есть группа компенсирующих приемов. В том числе, добавление металлического экрана на высоту приблизительно равной толщине диэлектрика; покрытие диэлектриком, по разному влияющему на фазовые скорости по четным и нечетным модам; внесение компенсирующих емкостей, работающих только по нечетным модам; усложнение формы связанного участка, слабо влияющего на четные моды, но при этом значительно на нечетные и пр.



Направленный ответвитель на связанных линиях почти не используют как гибридный. В этом случае $Z_{0e} = 121 \text{ Ом}$ и $Z_{0o} = 21 \text{ Ом}$, что как правило требует нереализуемые ширины линий и зазоров в связанном участке.

Методика выполнения работы

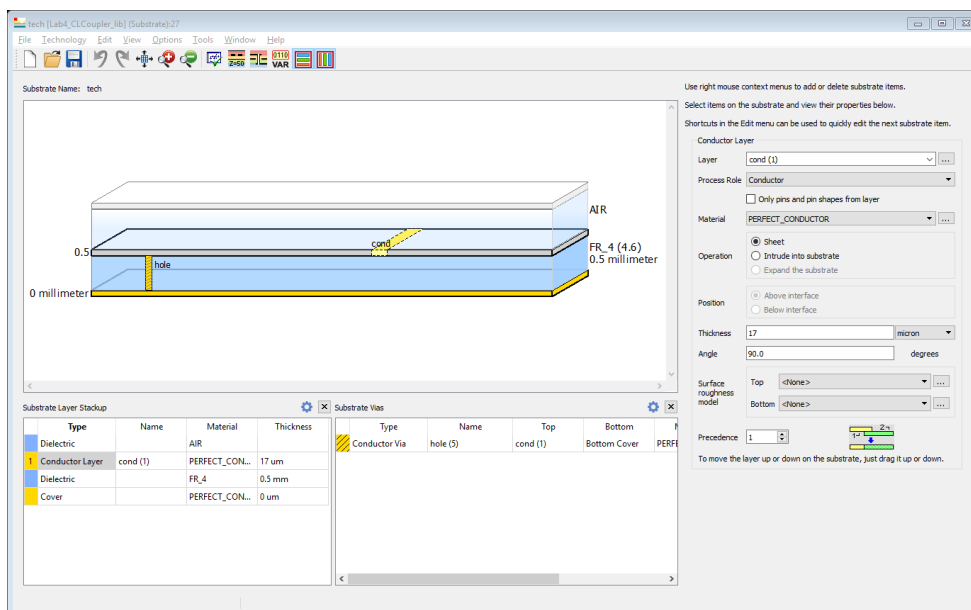
Маршрут работы следующий:

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 геометрических размеров.

Создание проекта

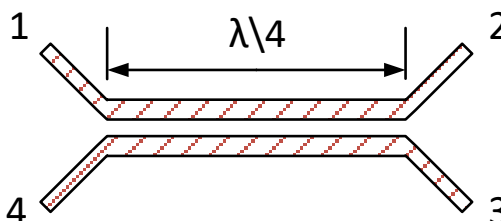
Lab1 Проект должен быть подготовлен к ЕМ-моделированию, в том числе:

- 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 FR4 ($\epsilon_r = 4,6$, $\tan D = 0,01$), толщиной диэлектрика 0,5мм, толщиной металлизации 17мкм.



Модель на идеальных линиях передачи

Направленный ответвитель на связанных линиях (НО на связанных линиях) при описании его на идеальных линиях передачи выглядит согласно следующему рисунку:



Основой НО на связанных линиях является участок связанных линий



(модель CLIN, палитра TLines-Ideal). Этот участок электрически описывается характеристическими сопротивлениями по нечетным модам Z_{odd} и четным модам Z_{even} , электрической длиной (обычно 90°) и частотой F , относительно которой задана электрическая длина.

При выбранной электрической длине связанного участка в 90° , характеристические сопротивления по нечетным и четным модам можно рассчитать исходя из желаемого коэффициента связи k между полосками (численно равного переходному ослаблению НО):

$$Z_{\text{odd}} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad \text{и} \quad Z_{\text{even}} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}},$$

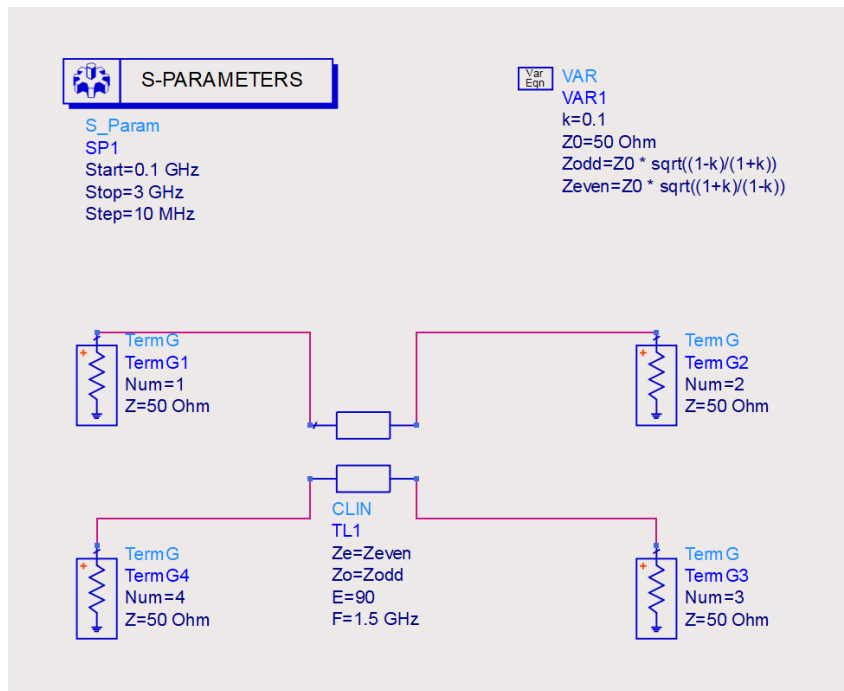
где Z_0 - волновое сопротивление подводящих линий (50 Ом).

Также из формул выше следует однозначная связь $Z_0 = \sqrt{Z_{\text{odd}} Z_{\text{even}}}$.

Воспользуемся блоком переменных VAR для автоматического расчета характеристических сопротивлений. Пусть переходное ослабление k задано равным 0,1 (–20 дБ). Настроен НО на связанных линиях будет на 1,5 ГГц.



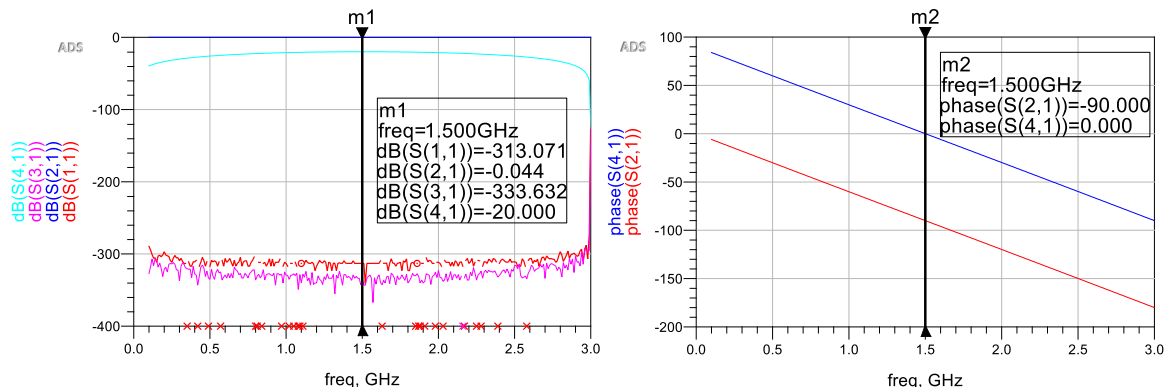
Нужно следить за нумерацией терминаторов Term (свойство Num). Оно определяет порядок обозначений в матрице S-параметров. Эту нумерацию надо будет сохранять одинаковой во всех схемах проекта, чтобы можно было сопоставлять графики.



Запускаем моделирование .

Lab1

Выводим два прямоугольных графика – один с амплитудными соотношениями относительно порта 1, второй с фазовыми (только для рабочего S21 и переходных ослаблений S41).



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

- имеет очень идеальное согласование по входу $\text{dB}(S_{11}) \rightarrow -\infty$ дБ;
- рабочее затухание $\text{dB}(S_{21})$ близко к 0 дБ;
- переходное ослабление $\text{dB}(S_{41})$ близко к заданному -20 дБ ($k = 0,1$);
- развязка $\text{dB}(S_{31})$ также практически идеальная $\rightarrow -\infty$ дБ;
- разность фаз между выходными плечами равна 90° ;
- несмотря на наличие резонансного участка, устройство довольно широкополосное.

Известна следующая формула, описывающая матрицу рассеяния НО на связанных линиях на центральной частоте при длине связанного участка в 90° (порядок портов соответствует моделированию):

$$S = \begin{bmatrix} 0 & \beta & 0 & \gamma \\ \beta & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & \beta \\ \gamma & 0 & \beta & 0 \end{bmatrix},$$

где $\gamma = k$ - переходное ослабление,

$\beta = -j\sqrt{1-k^2}$ - рабочее затухание.

Lab1

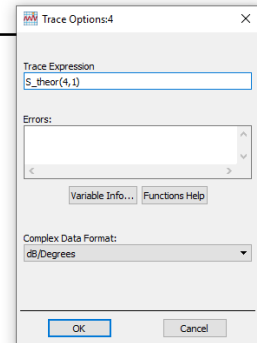
Создадим в этом же окне графиков идеальную теоретическую матрицу рассеяния и сравним с ней результаты моделирования на идеальных линиях передачи.

$$\text{Eqn } k = 0.1 \quad \text{Eqn } \gamma = k \quad \text{Eqn } \beta = -j\sqrt{1-k^2}$$

$$\text{Eqn } S_{\text{theor}} = \{\{0, \beta, 0, \gamma\}, \{\beta, 0, \gamma, 0\}, \{0, \gamma, 0, \beta\}, \{\gamma, 0, \beta, 0\}\}$$

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

S_theor(1,1)	S_theor(2,1)	S_theor(3,1)	S_theor(4,1)
<-infinity> / 0.000	-0.044 / -90.000	<-infinity> / 0.000	-20.000 / 0.000



Коэффициент отражения S11 и развязка S31 имеют значение по амплитуде $-\infty$ дБ. Рабочее затухание S21 близко к 0 дБ и переходное ослабление S41 точно равно заданному -20 дБ, по фазовым соотношениям также видна разность фаз между выходными плечами 2 и 4 в 90° .


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 CLCoupler_MLIN.

Напомним параметры подложки FR-4 ($\epsilon_r = 4,6$, $\tan D = 0,01$), толщиной диэлектрика 0,5мм, толщиной металлизации 17 мкм.

Lab1

С помощью инструмента LineCalc  рассчитаем геометрические размеры связанных линий и одиночной 50 Ом микрополосковой линии.

Модель связанных линий – MCLIN (нужно выбрать в списке Type).

После указания параметров подложки и частоты расчета нужно указать электрические параметры. Для MCLIN это группа связанных между собой параметров:

Z0 - волновое сопротивление подводящих линий, 50 Ом;

ZE - характеристическое сопротивление по четным модам (Z_{even} в модели на идеальных линиях передачи выше) - напрямую в данном случае не задаём;

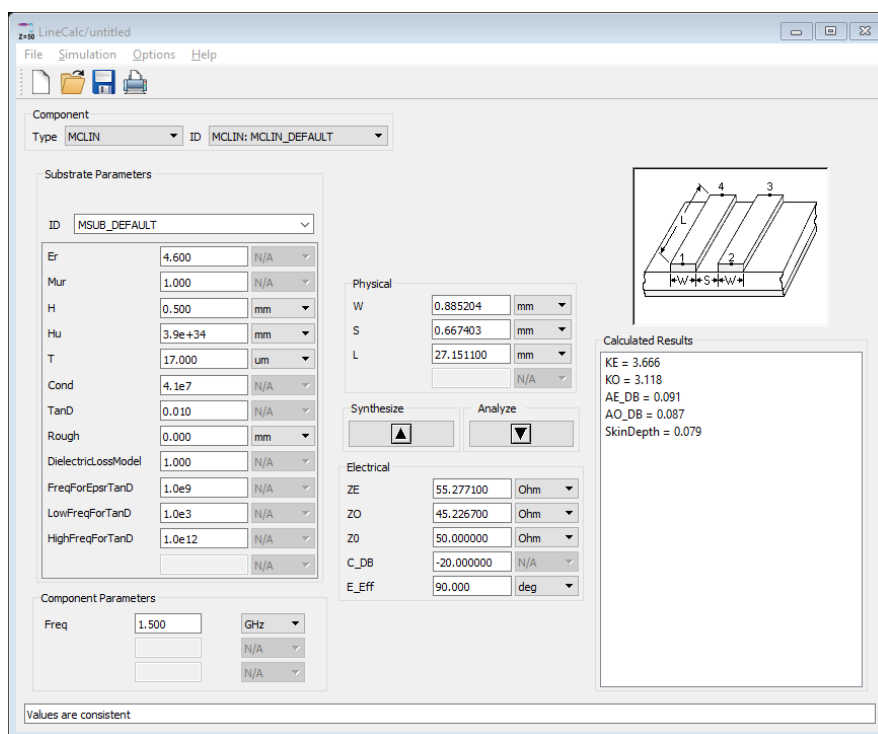
ZO- характеристическое сопротивление по нечетным модам (Z_{odd} в модели на идеальных линиях передачи выше) - напрямую в данном случае не задаём;

C_{DB} – коэффициент связи (k в модели на идеальных линиях передачи выше), задается в дБ (зададим -20 дБ).

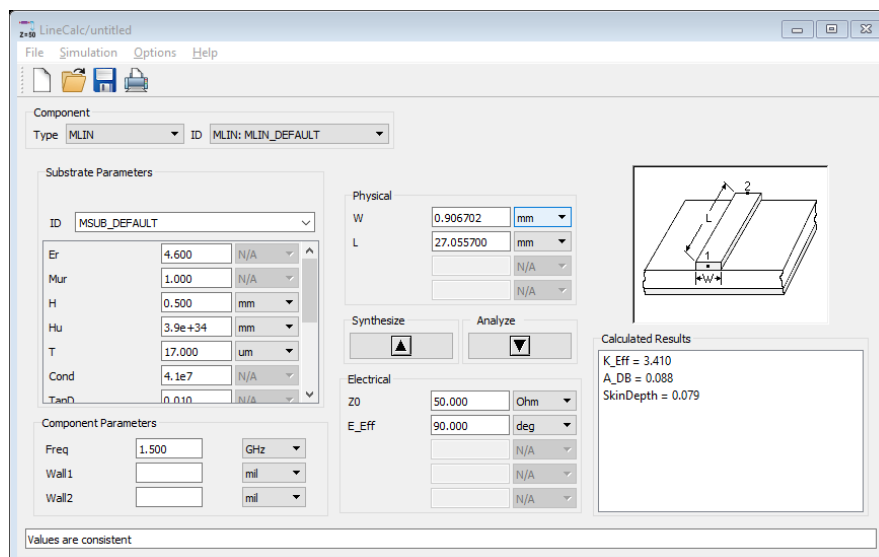
При задании двух из четырех параметров выше остальные два пересчитываются.

E_{Eff} - отдельно надо задать электрическую длину связанного участка (90°).

Получаем геометрические параметры связанного участка: ширина линий $Coupled_W = 0,89$ мм, зазор $Coupled_S = 0,67$ мм, длина $Coupled_L = 27,2$ мм.



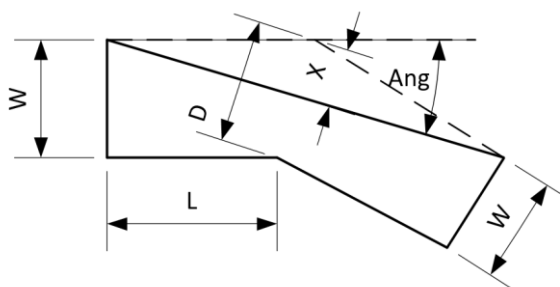
Отдельно определим волновое сопротивление одиночной микрополосковой линии $W50 = 0,91$ мм.



Для отвода от связанного участка линии нужно повернуть. Будем использовать поворот на 45° со срезанным внешним углом MSABND_MDS



(палитра TLines-Microstrip).



Геометрия среза задаётся в соответствии с рисунком выше. Значение среза $M = X / D$ (срезанная доля относительно внешнего угла).

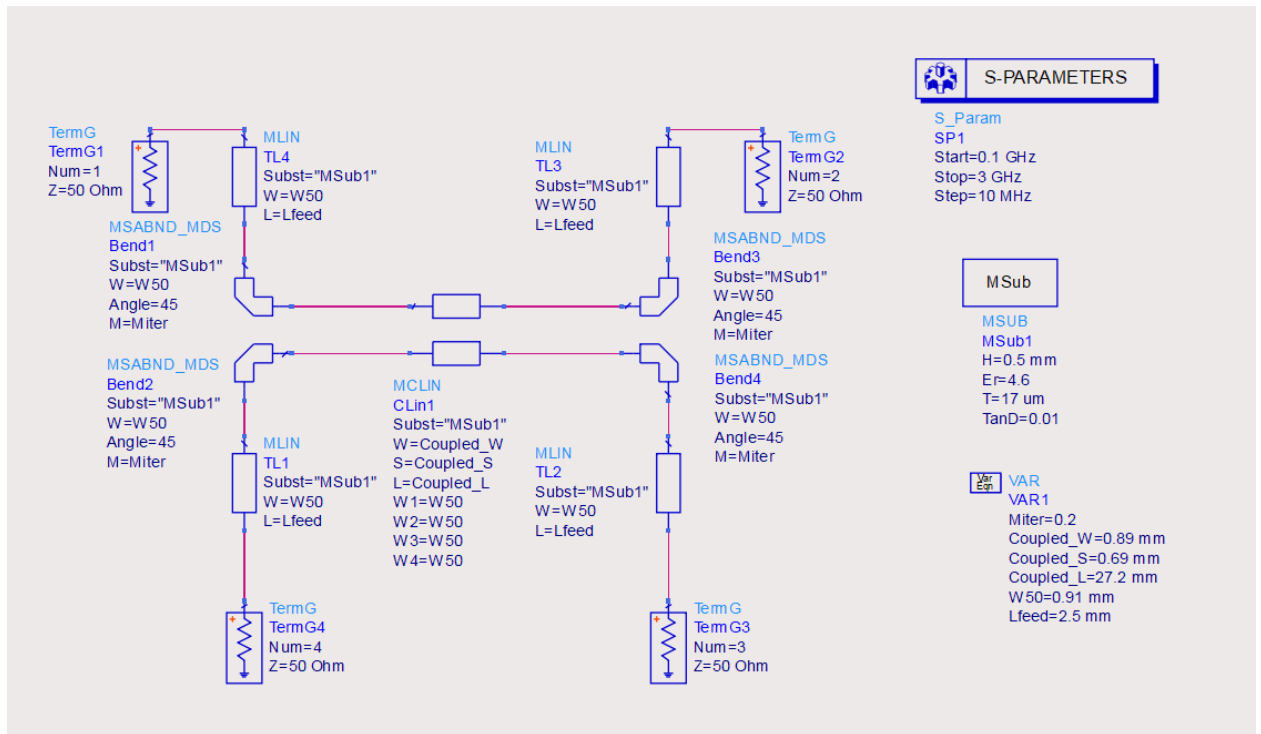
Для поворота на 45° неизвестно оптимальное значение среза M (Miter), его нужно подобрать отдельно в зависимости от подложки и ширины линии.



Создадим дополнительную схему optim_45bend. В ней на используемой подложке сделаем перебор параметра M модели MSABND_MDS (через переменную Miter) в диапазоне от 0 до 0,9 с шагом 0,05 (срез угла может быть в диапазоне от 0 до 1 не включая; схемотехническая модель MSABND_MDS поддерживает диапазон до 0,9). Ширина поворота должна быть W50.



Модель участка на связанных линиях MCLIN (палитра TLines-Microstrip). Для корректного подключения (со смещением) на топологическом уровне линий отличающейся ширины (т.к. $W50 \neq \text{Coupled_W}$) используются параметры W1..W4, указывающие ширину подключённых линий.

Дополнительно со стороны входов поставим 50-Омные участки $W50 = 0,91\text{мм}$, $L_{\text{feed}} = 2,5\text{мм}$.

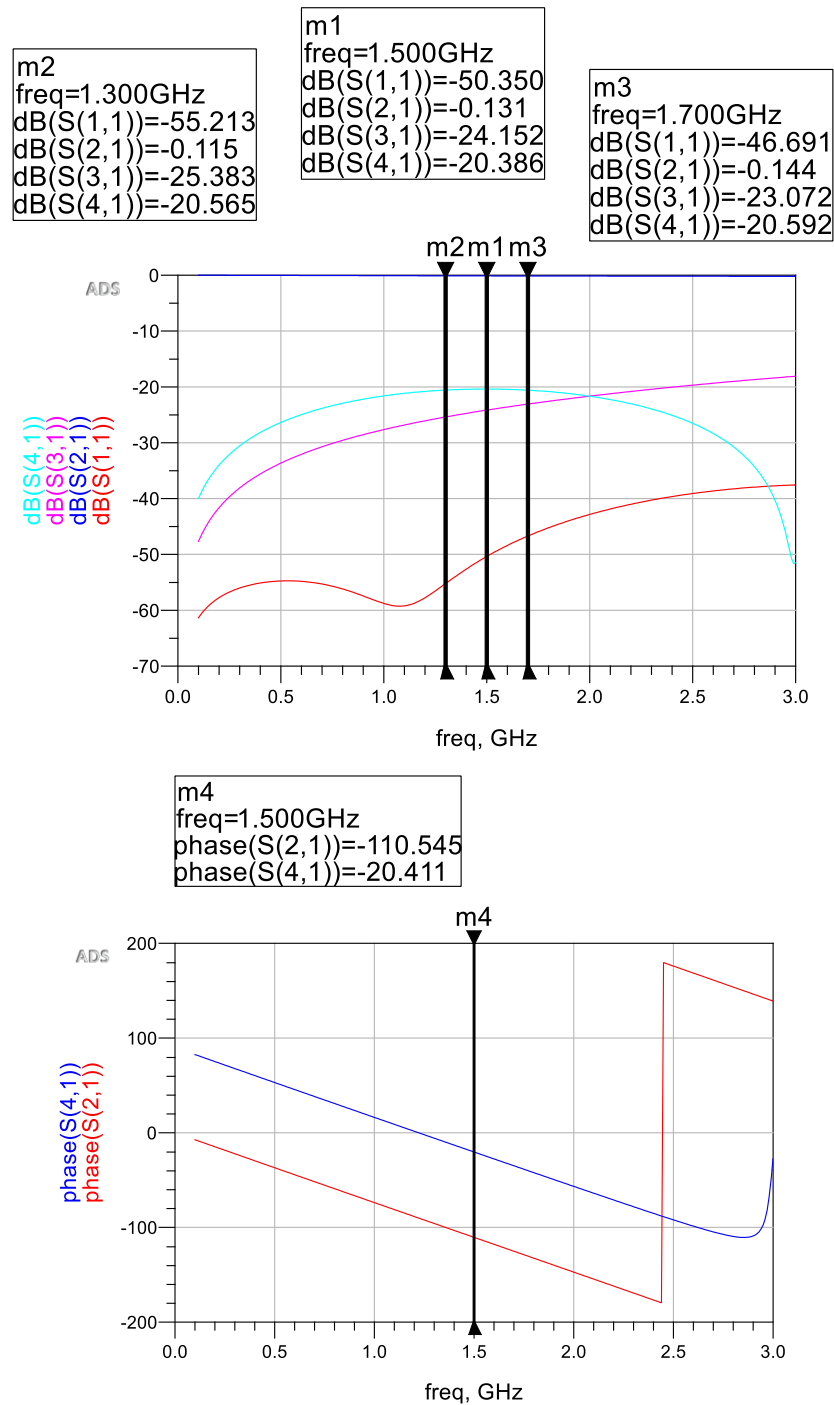


При расположении микрополоковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R), зеркалить (Mirror About X, Mirror About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению.



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

Запускаем моделирование. В области графиков строим амплитудные характеристики относительно порта 1 и фазовые для рабочего S21 и переходного S41 ослаблений.

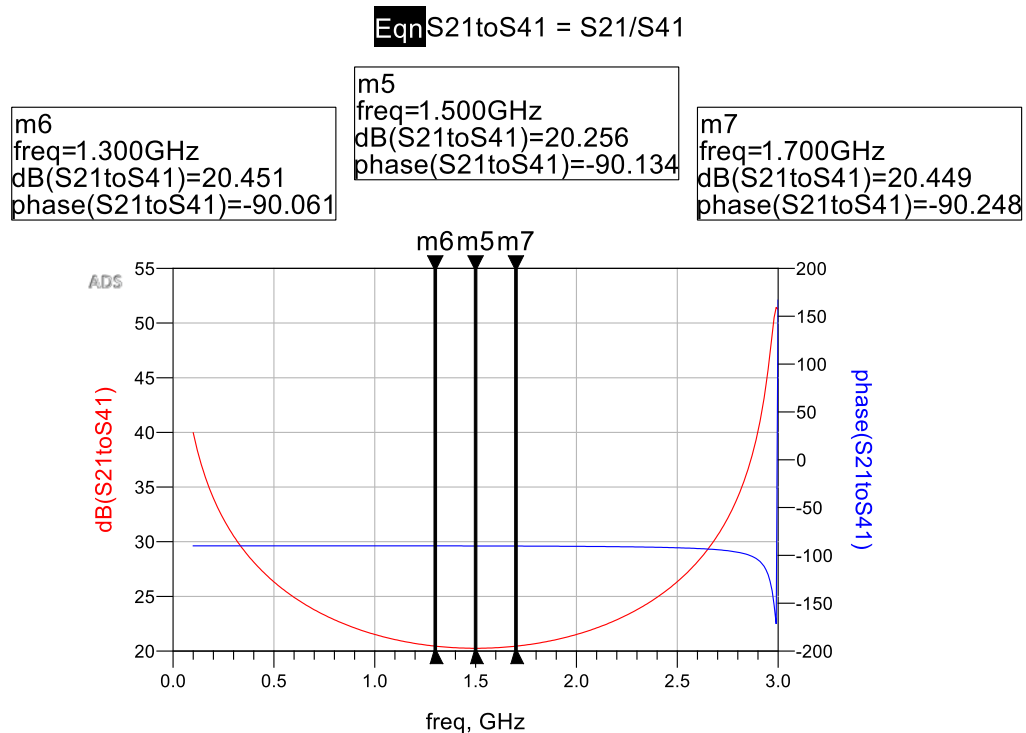


Для выведенных соотношений видно, что по сравнению с моделью на идеальных линиях передачи:

- согласование по входу dB(S11) осталось хорошее (~ -50 дБ);
- рабочее затухание dB(S21) в пределах 0,2 дБ;
- переходное ослабление dB(S41) близко к -20 дБ ($k = 0,1$) с точностью порядка $\pm 0,6$ дБ;
- развязка dB(S31) приняла более реальное значение -23..-25 дБ;

- разность фаз между выходными плечами равна 90° ;
- несмотря на наличие резонансного участка (90°), устройство является широкополосным, зафиксируем рабочую полосу как ± 200 МГц (13%).

Дополнительно проанализируем результаты по отношению плеч (S_{21}/S_{41}).



Видно, что она сохраняется близко к -20 дБ по амплитуде и в пределах 1° по фазе.

Модель на топологическом уровне

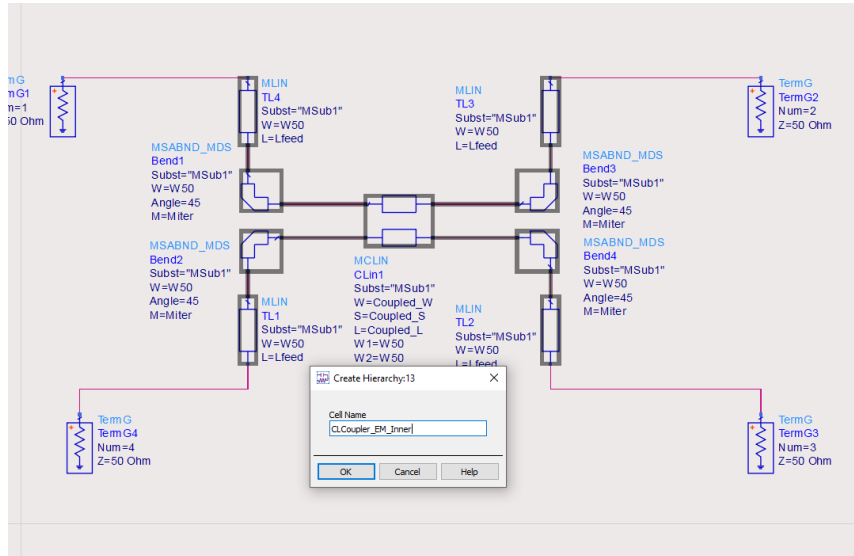
Lab1 Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Для параметризации топологии надо будет создать двухуровневую схему:

- схема верхнего уровня CLCoupler_EM_Top, в которой будет контроллер S-параметров, терминаторы и все измерительные выражения.
- схема нижнего уровня CLCoupler_EM_Inner, только с микрополосками (MLIN, MSABND_MDS и MCLIN), подключённая наверх через пины.

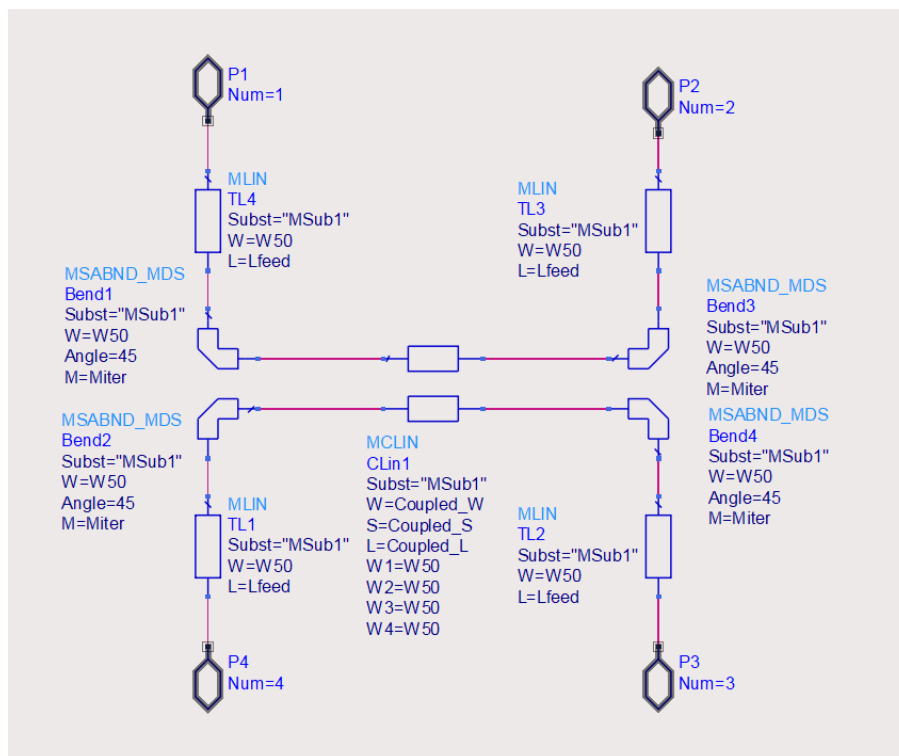
Схему нижнего уровня CLCoupler_EM_Inner надо будет сконвертировать в топологию; сделать всю ячейку CLCoupler_EM_Inner параметризированной и настроить параметры EM_моделирования (emSetup).

Далее кратко показаны основные картинки до начала моделирования

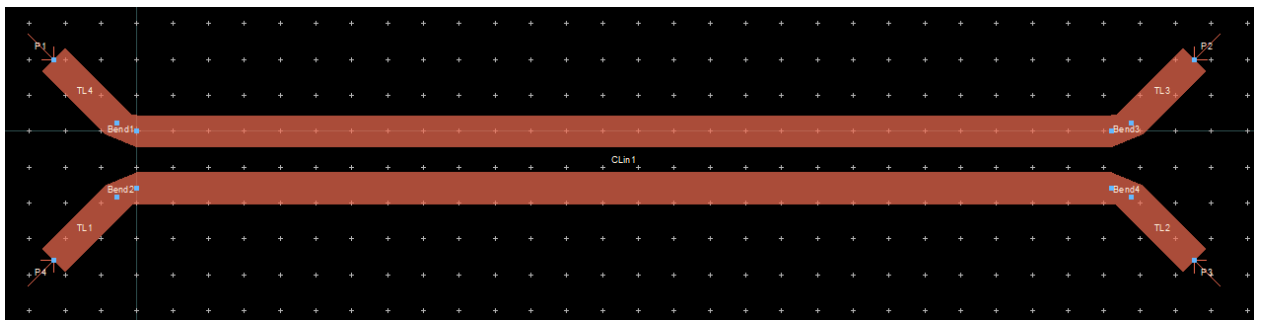
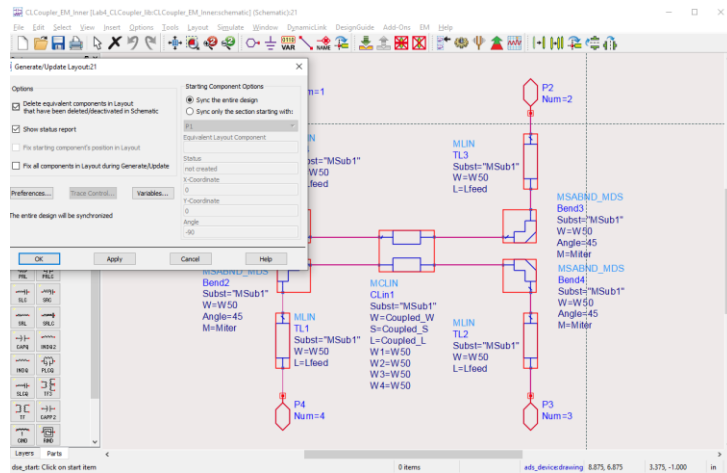
- создание иерархии



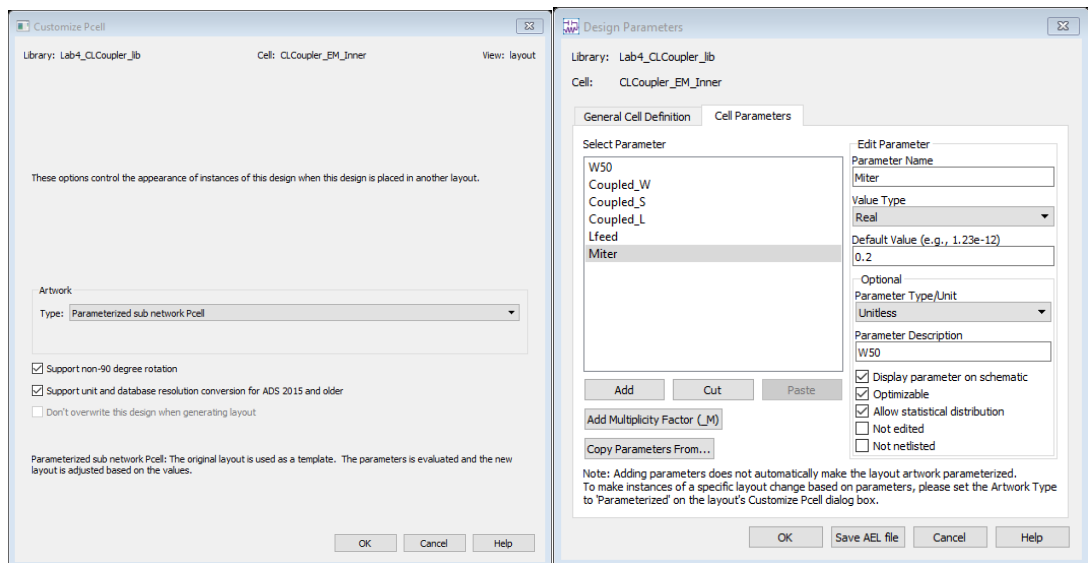
Автоматическое создание иерархий может выставить порядок пинов не в том порядке, как нам удобно. В примере переставлены местами пины P1, P2 и P4. Нужно эти пины переместить в нужные места (P1-P2 – основное плечо, P4-P3 - вторичное).





- генерация топологии подсхемы CLCoupler_EM_Inner





- параметризация ячейки CLCoupler_EM_Inner. Параметр Miter должен быть безразмерным (Unitless), остальные типа «длина» (Length).





Lab1 Далее надо настроить emSetup  подсхемы CLCoupler_EM_Inner. Задать следующие настройки:


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


 Substrate - убедиться, что привязана правильная подложка

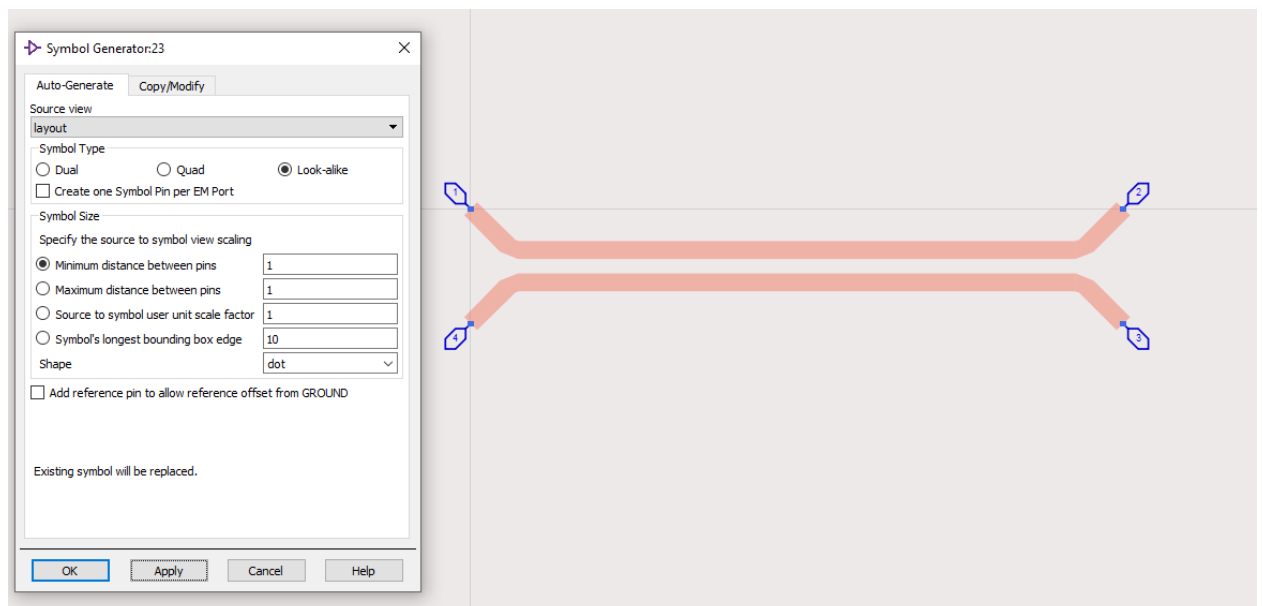
 **Frequency plan** - частотный план адаптивный от 0 до 3 ГГц, плюс точка 1,5 ГГц

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

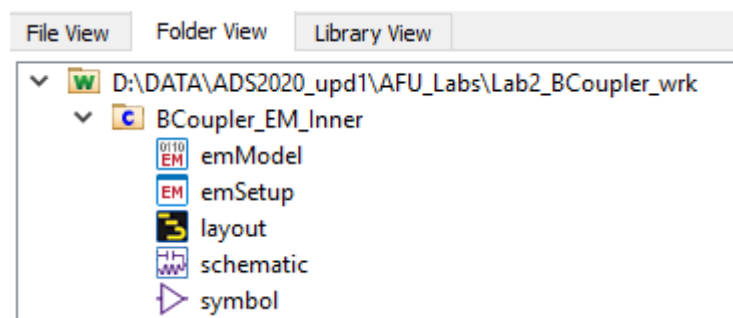
 **Options** - Mesh с точностью 40 ячеек/длина волны и включено автоматическое создание краевой сетки (Edge Mesh)

 **Model** - включено создание и сохранение emModel

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



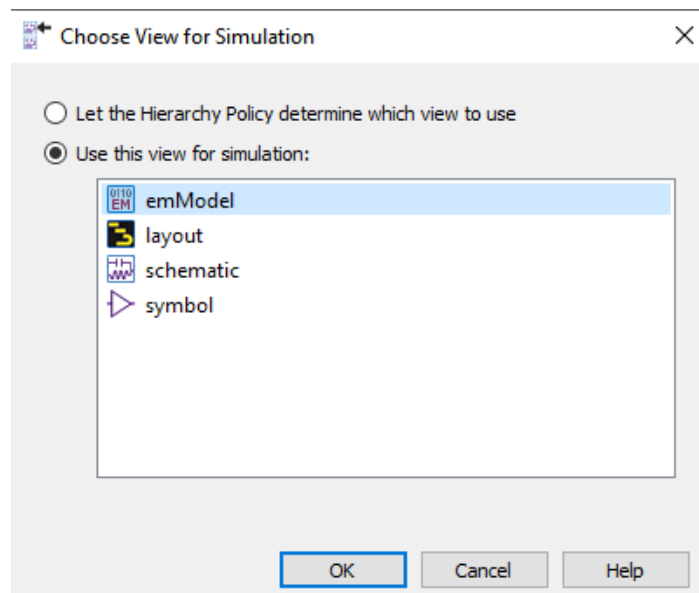
Полученные данные сохранены в emModel в составе ячейки CLCoupler_EM_Inner. Можно из основного окна ADS развернуть состав ячейки и открыть emModel.



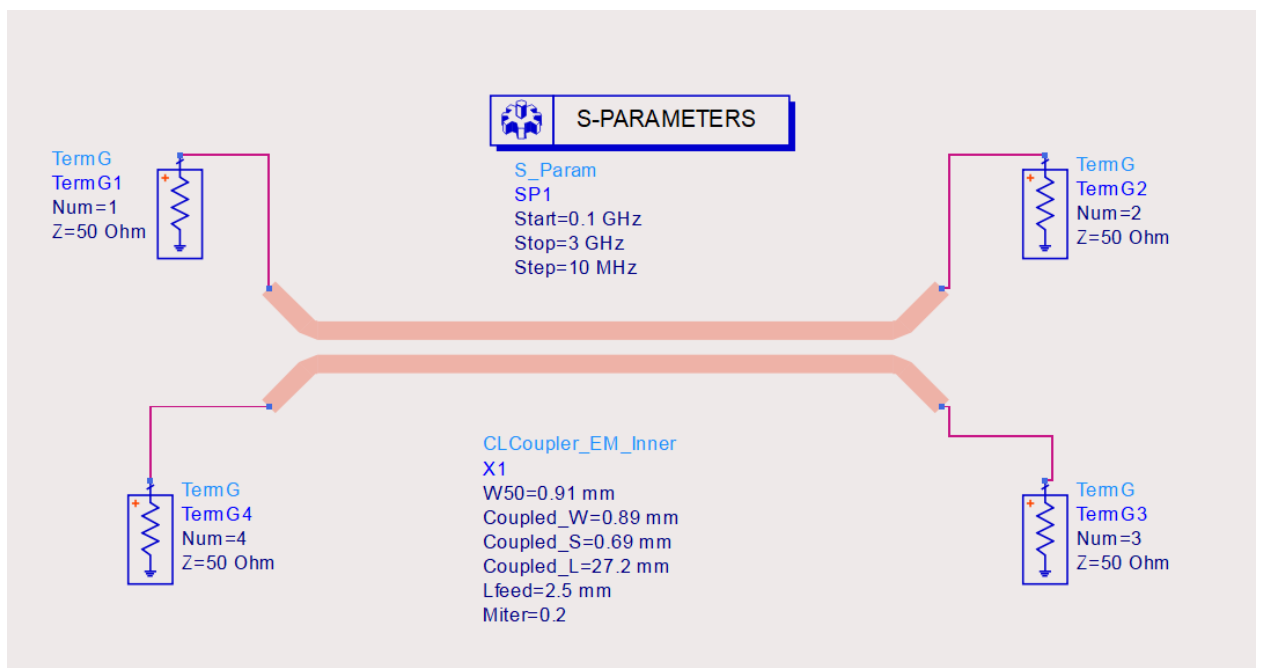
Вернемся в схему верхнего уровня CLCoupler_EM_Top. Приведем ее к следующему виду:

Lab1

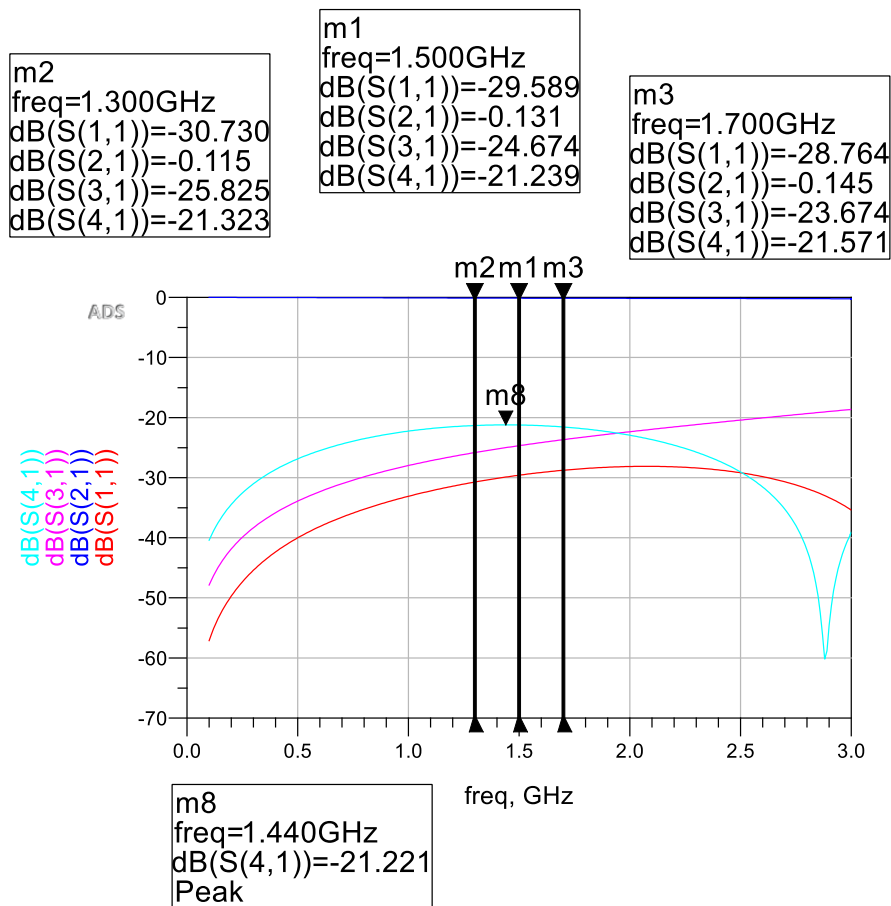
- отключим MSub1, т.к. в EM-анализе подложка берется из файла subst.
- отключим блок переменных VAR, т.к. переменные в топологию передаются через переменные ячейки.
- у подсхемы топологии CLCoupler_EM_Inner по ПКМ – Component – Choose View for Simulation установим, что результаты надо брать из emModel.



Общий вид схемы CLCoupler_EM_Top получится следующий



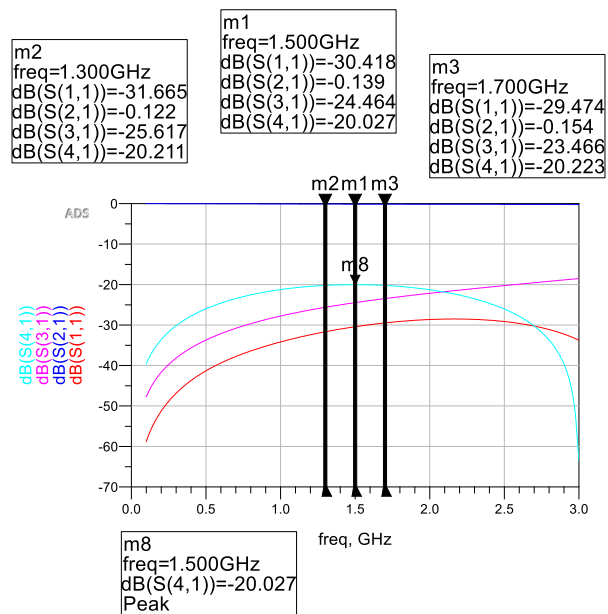
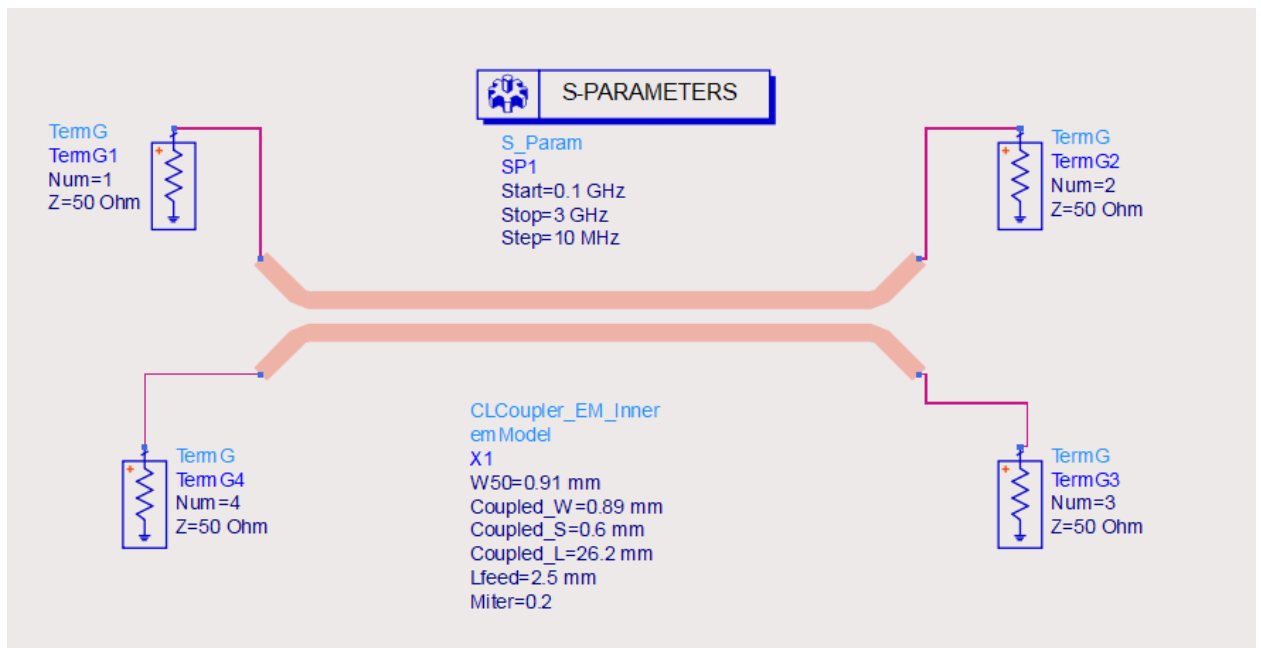
Запускаем расчет.



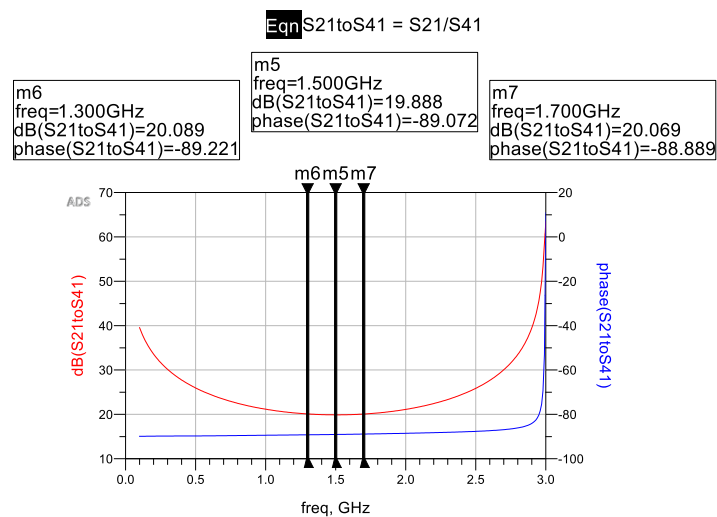
Рабочее затухание S21, развязка S31 и коэффициент отражения S11 практически не поменялись. А вот переходное ослабление S41 просело на 1 дБ и съехало по частоте. Сдвиг по частоте можно подправить слегка уменьшив длину связанного участка Coupled_L – т.к. добавление поворотов слегка увеличило эффективную длину связанного участка. Изменить переходное ослабление можно за счет небольшого уменьшения зазора Coupled_S, по принципу чем больше зазор – тем меньше связь между линиями. Подберем эти значения так, чтобы выйти на заданные –20 дБ на 1,5 ГГц.

Coupled_L → 26,2 мм.

Coupled_S → 0,6 мм.



Дополнительно проанализируем отношении плеч.



Видно, что слегка съехали фазовые соотношения. Но НО на связанных линиях как правило не используются в тех схемах, где требуется жесткая фазовая симметричность, необходима в первую очередь амплитудная стабильность. Данный НО на связанных линиях приемлем для использования.

Статистический анализ выхода годных

Lab1 Создадим копию схемы CLCoupler_EM_Top под названием CLCoupler_EM_Yield.

Проведем статистический анализ выхода годных (Yield) полученной топологии.

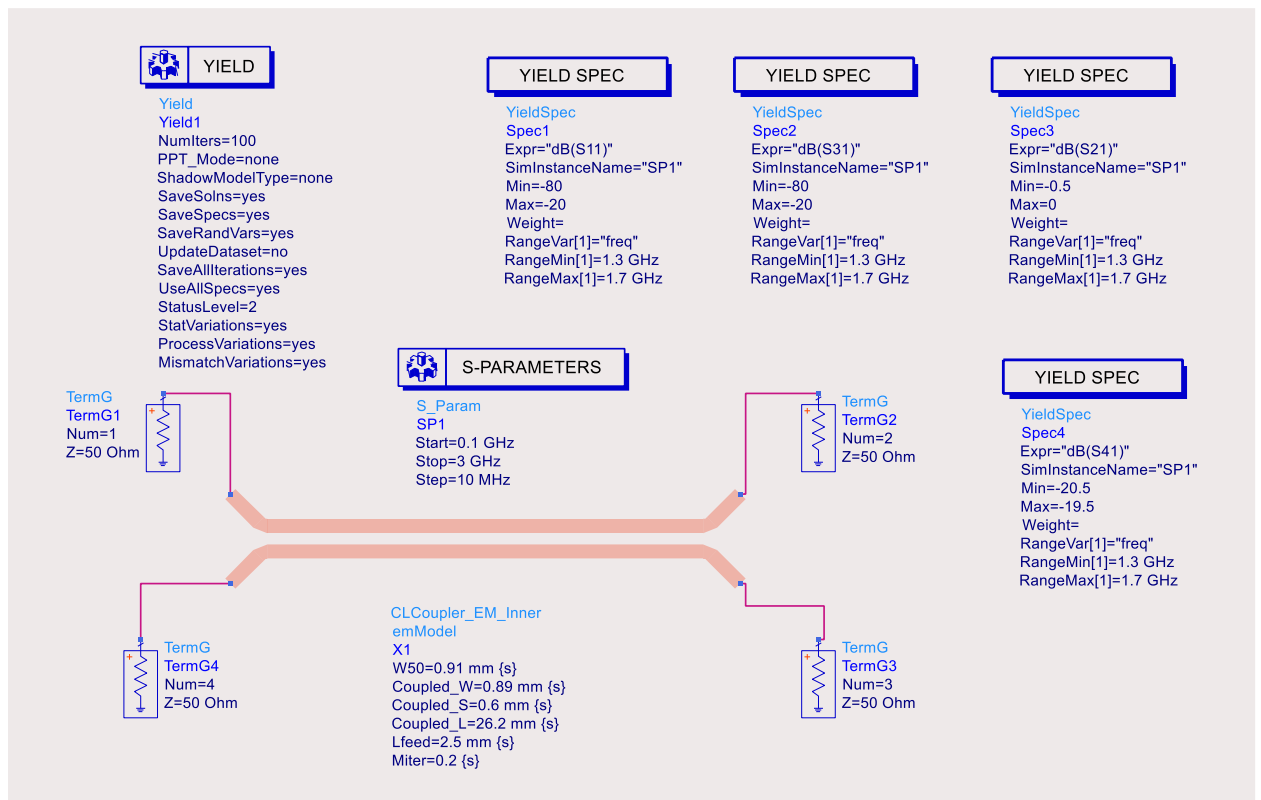
Оценим, как будет меняться коэффициент отражения S11, рабочее затухание S21, развязка S31 и переходное ослабление S41. Численные значения длин и зазора пусть могут иметь случайное значение в пределах $\pm 0,05$ мм (по нормальному распределению). Углы среза Miter $\pm 0,02$ (по нормальному распределению).

Simulation Variables Setup [Lab4_CLCoupler_lib:CLCoupler_EM_Yield:schematic]

Tuning Optimization Statistics DOE									
Name	Stat	Value	Unit	Type	Format	Min/+/-/+	Unit	M	
Lab4_CLCoupler_lib:CLCoupler_EM_Yield:schematic									
X1									
W50	<input checked="" type="checkbox"/>	0.91	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm		
Coupled_W	<input checked="" type="checkbox"/>	0.89	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm		
Coupled_S	<input checked="" type="checkbox"/>	0.6	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm		
Coupled_L	<input checked="" type="checkbox"/>	26.2	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm		
Lfeed	<input checked="" type="checkbox"/>	2.5	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm		
Miter	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2		Gaussian	+/- stddev	0.02			

Yield-спецификацию по коэффициенту отражения dB(S11) и развязке dB(S31) установим в пределах $-80..-20$ дБ. Yield-спецификацию по рабочему затуханию dB(S21) установим в пределах $-0.5..0$ дБ. Yield-спецификацию по переходному ослаблению dB(S41) установим в пределах $\pm 0,5$ дБ от заданного, т.е. $-21..-19$ дБ.

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



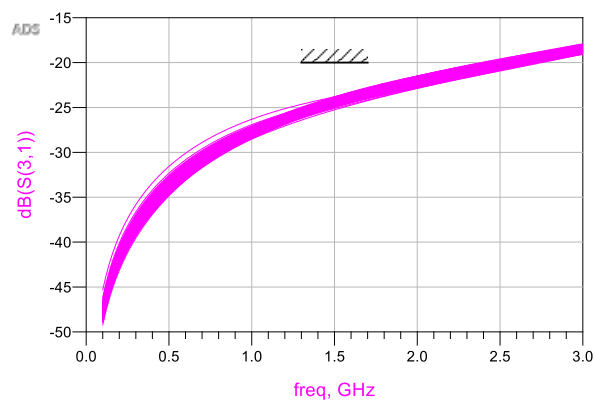
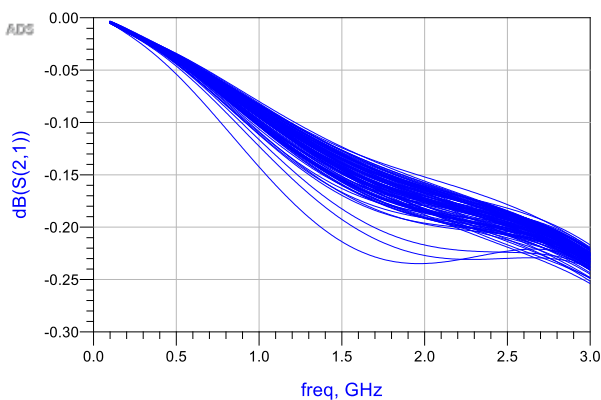
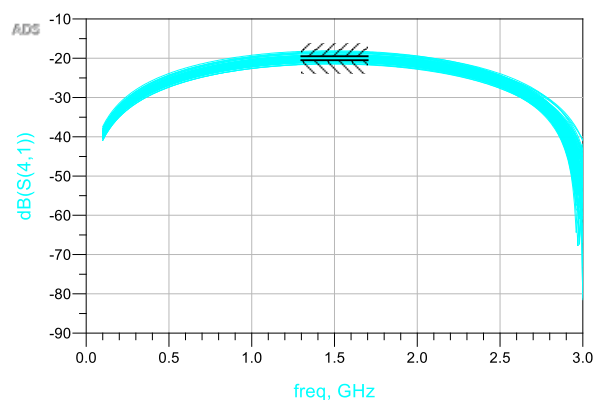
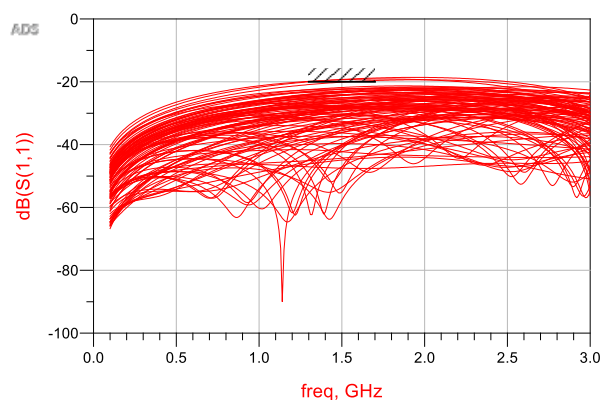
Запускаем расчет. Т.к. при данном расчете при каждом запуске расчета S-параметров будет запускаться подчиненный ЕМ-анализ, весь расчет будет идти какое-то время.

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

Yield	NumPass	NumFail
37.000	37.000	63.000

Получается успех всего в 37%. Это довольно мало, схема довольно чувствительна к точности параметров. Надо проанализировать результаты, чтобы понять, в чем может быть причина проблем.

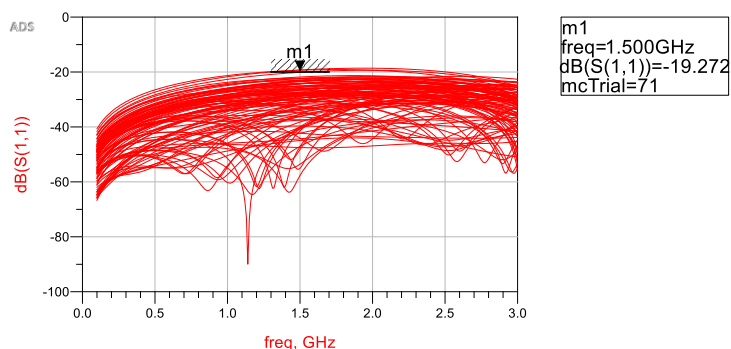
Выведем значения dB(S11), dB(S21), dB(S31) и dB(S41). Они были сохранены для каждой из попыток.



Видно, что по S21 ($>-0,5$ дБ) и S31 (<-20 дБ) попытки проходят всегда.

Очень много кривых S41 выходит за пределы $-20,5..-19,5$ дБ, т.е. нельзя однозначно определить, какая попытка хуже всех для S41.

На кривой S11 проходят почти все кривые. Поставим маркер на самой плохой и определим номер попытки (mcTrial). Это попытка 71.



Выведем в таблице значения переменных и пролистаем до попытки 71.

mcTrial	W50	Lfeed	Miter	Coupled_L	Coupled_S	Coupled_W
71	977.6 u	2.431 m	192.4 m	26.15 m	601.0 u	774.7 u
72	926.5 u	2.514 m	238.6 m	26.20 m	503.4 u	907.7 u
73	892.7 u	2.529 m	198.7 m	26.27 m	639.4 u	852.2 u
74	840.8 u	2.453 m	151.0 m	26.17 m	602.8 u	868.7 u

Практически все переменные незначительно ушли от номинальных, за исключением ширины Coupled_W. Предположение о влиянии этой переменной надо будет проверить далее.

Поисследуем чувствительность с помощью функции `histogram_sens()`.

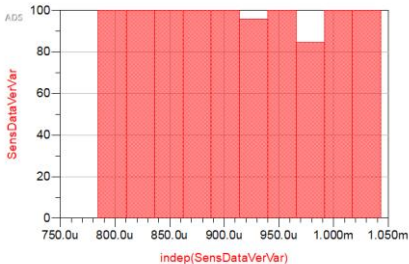
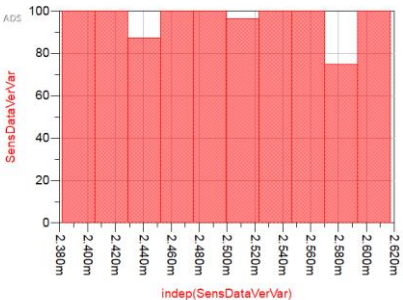
Т.к. по dB(S21) и dB(S31) проходят попытки в 100%, то их поведение исследовать не имеет смысла.

Чтобы не создавать множество выражений и графиков, вынесем в отдельные переменные исследуемые данные, их границы, переменную и частотный поддиапазон.

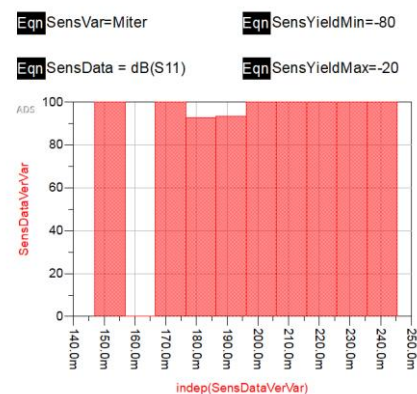
```
Eqn freqMin = 1.3 GHz   Eqn freqMax=1.7 GHz   Eqn NumBins = 10
Eqn SensDataVerVar = histogram_sens(SensData, SensVar, SensYieldMin, SensYieldMax, freqMin, freqMax, NumBins)

Eqn SensVar=W50   Eqn SensData = dB(S11)   Eqn SensYieldMin=-80   Eqn SensYieldMax=-20
```

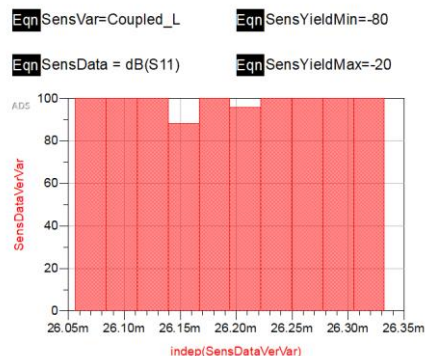
Пройдемся по результатам и оценим чувствительность по переменным.

Результат dB(S11)	
По W50 успех во всех значениях почти 100%, за исключением резкого провала к 0,75 мм. Это говорит о том, что нельзя слишком уменьшать ширину 50 Ом-ной линии	<div><div>Eqn SensVar=W50Eqn SensYieldMin=-80Eqn SensData = dB(S11)Eqn SensYieldMax=-20</div></div>
По Lfeed чувствительность практически отсутствует, что логично успех во всех значениях почти 100%	<div><div>Eqn SensVar=LfeedEqn SensYieldMin=-80Eqn SensData = dB(S11)Eqn SensYieldMax=-20</div></div>

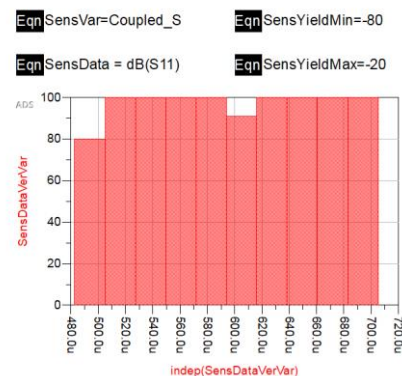
По Miter чувствительность практически отсутствует успех во всех значениях почти 100%. За исключением непонятного провала при Miter ~ 0,16. Скорее всего, не хватило числа попыток.



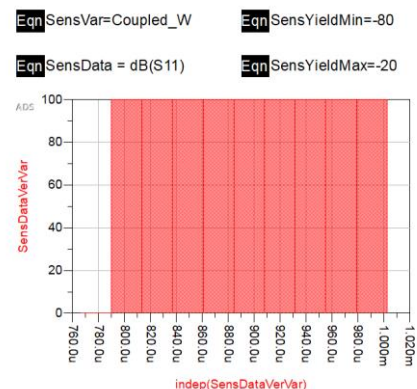
По Coupled_L чувствительность практически отсутствует, успех во всех значениях почти 100%



По Coupled_S чувствительность практически отсутствует, успех во всех значениях почти 100%. За исключением небольшого склона в нижних значениях

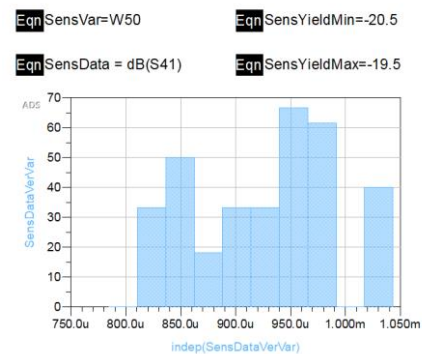


По Coupled_W успех во всех значениях почти 100%, за исключением резкого провала к 0,78 мм. Это говорит о том, что нельзя слишком уменьшать ширину линии связанного участка

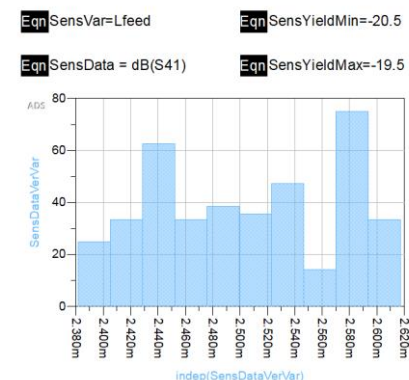


Результат dB(S41)

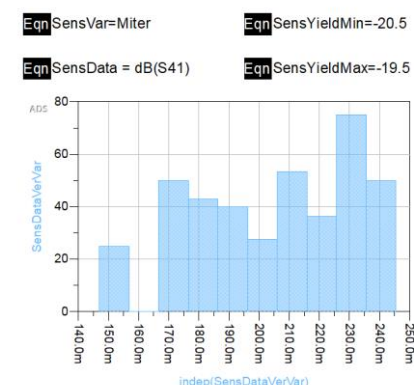
По W50 близко к 50% на большей части.
Нельзя меньше 0,8 мм



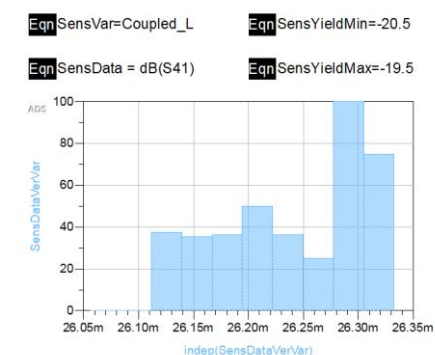
По Lfeed близко к 50% на большей части



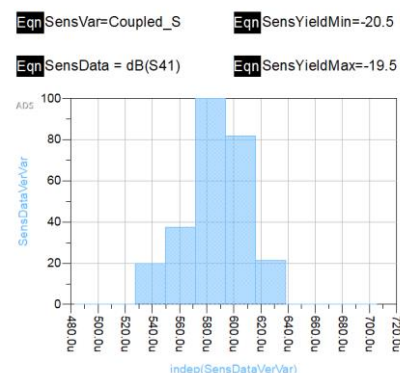
По Miter близко к 50% на большей части, за исключением небольшого пика близко к 0,23. Это поведение надо поисследовать отдельно.



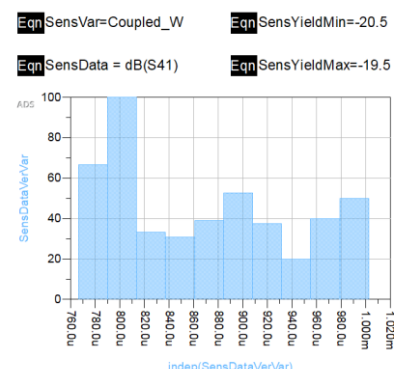
По Coupled_L чувствительность практически отсутствует на большей части, однако есть яркий пик близко к 26,3 мм.



По Coupled_S явный пик с центром 0,6 мм



По Coupled_W чувствительность практически отсутствует на большей части, однако есть яркий пик близко к 0,8 мм



Исходя из полученных выводов, получается, что надо обеспечить точное Coupled_S близко к 0,59 мм (номинальное 0,6 мм) и изменить Coupled_L на 26,3 мм (номинальное 26,2 мм) и Coupled_W на 0,8 мм (номинальное 0,89 мм). Дополнительно надо поисследовать поведение Miter в диапазоне 0,2..0,23. И еще раз провести анализ чувствительности, но теперь с учетом новых номинальных значений.

Задание на выполнение

В соответствии с вариантом рассчитать и спроектировать направленный ответвитель на связанных линиях на заданную частоту (F_c), переходное ослабление k и ВЧ-подложку. Провести настройку и исследование на схемном и топологическом уровнях.

Варианты заданий приведены в таблице 1.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

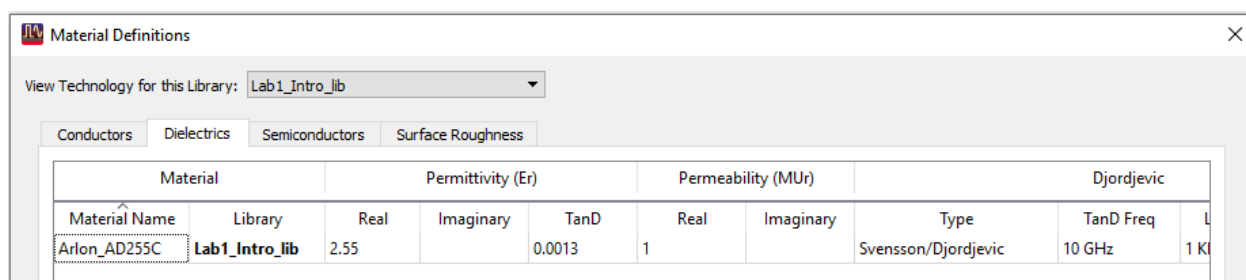
Таблица 1. Варианты заданий

№ Варианта		1	2	3	4	5
Центральная частота F_c , ГГц		9,5	6,5	5	6	4,7
Переходное ослабление, k , дБ		17	20	23	18	21
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 $\tan D$, 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

Таблица 1. Продолжение

№ Варианта		6	7	8	9	10
Центральная частота F_c , ГГц		4,9	6,2	4,1	2,5	4,4
Переходное ослабление, k , дБ		19	25	23	15	13
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. НО на связанных линиях на идеальных линиях передачи (ячейка CLCoupler_Ideal).

1.1. Составить схему для моделирования в режиме S-параметров НО на связанных линиях на идеальных линиях передачи.

- Компоненты брать из палитры TLines-Ideal.

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

- переходное ослабление k брать из таблицы 1.

1.2. Промоделировать в режиме S-параметров.

- Показать, что НО на связанных линиях 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. НО на связанных линиях в микрополосковом исполнении на схемном уровне (ячейка CLCoupler_MLIN_Sch).

2.1. Создать схему НО на связанных линиях в микрополосковом исполнении на основании результатов, полученных в п.1.

- Для расчета геометрических размеров одиночной микрополосковой линии и связанных линий использовать инструмент LineCalc.

- Компоненты брать из палиты TLines-Microstrip.

- Параметры подложки брать из таблицы 1.

- Подобрать оптимальный срез для поворота на 45° (ячейка optim_45bend) для заданной подложки и ширины 50 Ом.

- 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 $F_c \pm 10\%$.

- Считать, что НО на связанных линиях выполняет свою задачу, если

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

- б) Развязка S_{31} в рабочей полосе менее -20 дБ;

- в) Рабочее затухание S_{21} в рабочей полосе менее, чем $0,5$ дБ;

г) Переходное ослабление S_{41} в рабочей полосе соответствует заданному с точностью $\pm 0,5$ дБ;

е) Центральная частота, на которую настроен НО на связанных линиях близка к F_c (контролировать по положению максимума на S_{41}).

2.3. Если НО на связанных линиях не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить его.

2.4. После настройки определить свойства отношения плеч S_{21}/S_{41} в пределах $F_c \pm 10\%$ по амплитуде и фазе.

3. НО на связанных линиях в микрополосковом исполнении на топологическом уровне (ячейка верхнего уровня CLCoupler_EM_Top и подсхема CLCoupler_EM_Inner).

3.1. Создать параметризованную топологию НО на связанных линиях 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. Номинальные 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 $F_c \pm 10\%$.

- Считать, что НО на связанных линиях выполняет свою задачу, если:

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

- б) Развязка S_{31} в рабочей полосе менее -20 дБ;

в) Рабочее затухание S21 в рабочей полосе менее, чем 0,5 дБ;

г) Переходное ослабление S41 в рабочей полосе соответствует заданному с точностью $\pm 0,5$ дБ;

е) Центральная частота, на которую настроен НО на связанных линиях близка к Fc (контролировать по положению максимума на S41).

3.3. Если НО на связанных линиях не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить его.

4. Анализ выхода годных (ячейка верхнего уровня CLCoupler_EM_Yeld, использует созданную ранее под схему CLCoupler_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. Уровень среза может иметь погрешность $\pm 0,02$, распределенную нормально.

- Модель для исследования брать в топологическом представлении.

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

- Считать, что НО на связанных линиях выполняет свою задачу, если

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

- б) Развязка S31 в рабочей полосе менее -20 дБ;

- в) Рабочее затухание S21 в рабочей полосе менее, чем 0,5 дБ;

- г) Переходное ослабление S41 в рабочей полосе соответствует заданному с точностью $\pm 0,5$ 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, не знакомый 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_CLCoupler вместо непонятного Lab4 или Workspace4).

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. Сколько портовое устройство направленный ответвитель на связанных линиях? А сколько полюсником он является?

2. Направленный ответвитель при электрической длине связанного участка в 90° является сонаправленным или противонаправленным?

3. За какие из характеристик направленного ответвителя на связанных линиях влияет в первую очередь зазор между линиями связанном участке?

4. За какие из характеристик направленного ответвителя на связанных линиях влияет в первую очередь длина связанного участка?

5. Что такое режимы работы по четным и нечетным модам в связанных линиях?

6. Приведите возможную схему проходного детектора мощности с использованием направленного ответвителя на связанных линиях.

7. Зачем в работе проводилось моделирование среза поворота линии на 45° ? По каким критериям принималось решение, какой срез выбрать?

8. Поясните, почему направленный ответвитель на связанных линиях почти не используется как гибридный направленный ответвитель? Можете провести эксперимент с проектированием связанного участка.

9. Пусть построен направленный ответвитель на связанных линиях на переходное ослабление 20 дБ. На порт 1 подается 10 дБм гармонического

сигнала. Какие уровни сигналов в [дБм] можно ожидать на портах 2, 3 и 4? Направленный ответвитель считать идеальным. Нумерация портов соответствует используемой в задании.

10. Почему невозможно в микрополосковом исполнении получить идеальный (по согласованию и развязке) направленный ответвитель на связанных линиях? Что этому мешает?

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.

Перечень ресурсов сети «Интернет»

2. 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>

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

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

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

Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

6. Канал youtube образовательного центра Keysight EEsof EDA <https://www.youtube.com/user/KeysightEESOF>

7. Канал youtube Anurag Bhargava образовательного центра <https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>

8. Канал youtube Keysight EEsof EDA Field <https://www.youtube.com/c/EEsofAETips>

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.