

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

2025

## 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 .....	16
Задание на выполнение .....	30
Требования к отчёту .....	34
Задание на самостоятельную работу .....	35
Контрольные вопросы .....	36
Литература .....	37



## 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.

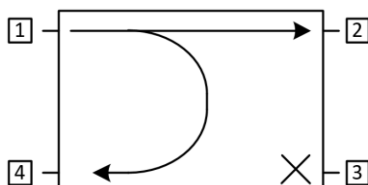
**Продолжительность работы:** 4 часа.

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.

<b>Lab1</b>	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

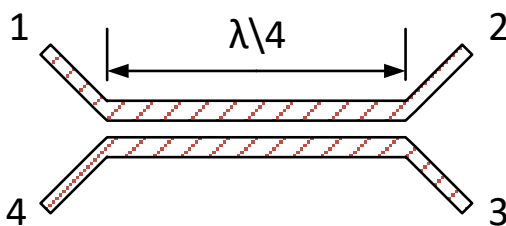
## Теоретические сведения

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 4х4.

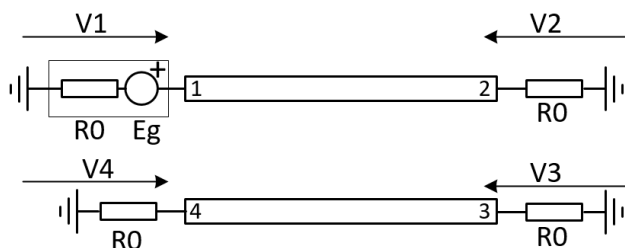


При использовании любых формул из источников нужно следить за нумерацией портов. Существует несколько различающихся принятых схем обозначений. Использование формул без учета нумерации портов, может привести к странным и некорректным результатам расчетов. В текущей работе нумерация портов отличается от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

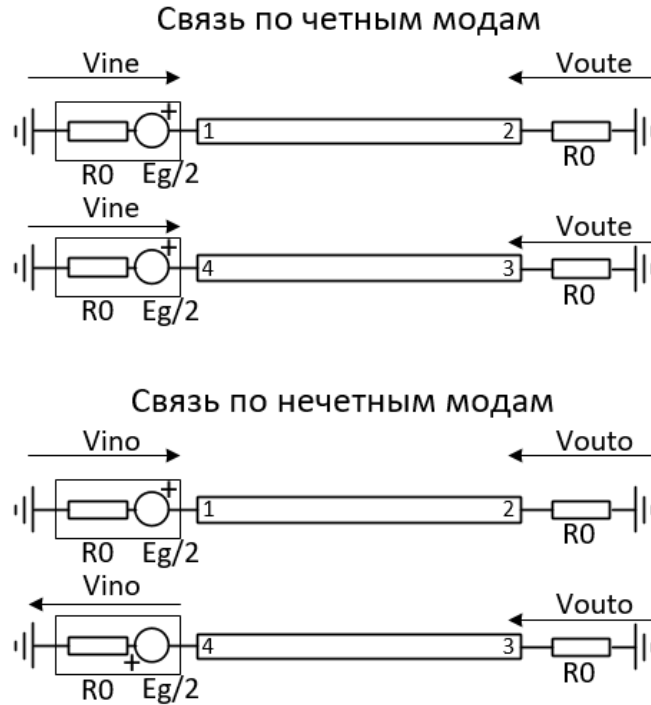
По сравнению с изученными ранее типами направленных ответвителей довольно широкополосной реализацией является направленный ответвитель на связанных линиях. В микрополосковом виде он может быть реализован в следующем виде



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  $a$  и 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

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

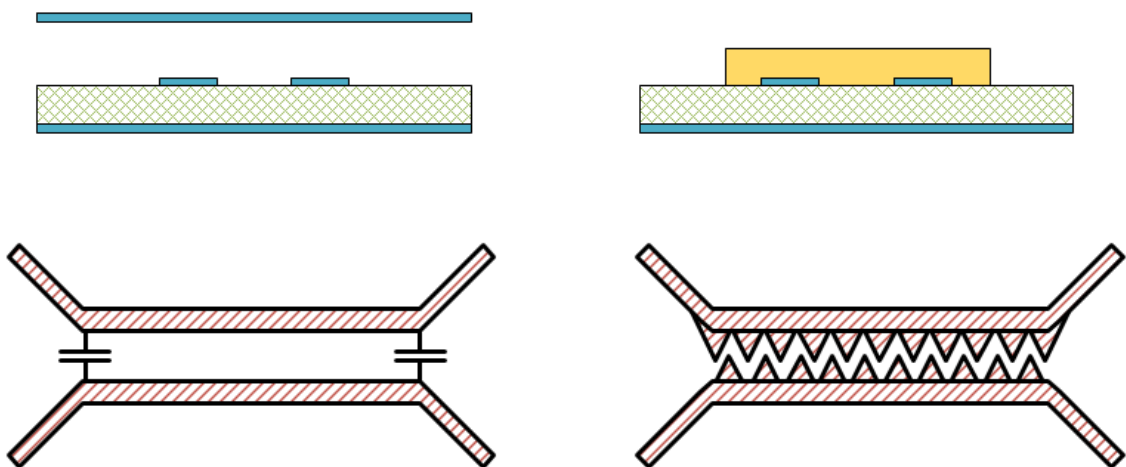
Если считать направленный ответвитель полностью согласованным ( $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$ ), имеющим идеальную развязку ( $S_{13} = S_{31} = S_{42} = S_{23} = 0$ ) и симметричным по рабочему затуханию ( $S_{21} = S_{12} = S_{43} = S_{34}$ ) и по переходному ослаблению ( $S_{41} = S_{14} = S_{32} = S_{23}$ ), 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  $90^\circ$ . 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 линий передачи с квази ТЕМ-волнами 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, т.к. 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 электромагнитного моделирования. Параметризация ЕМ-модели. При необходимости подстройка модели.

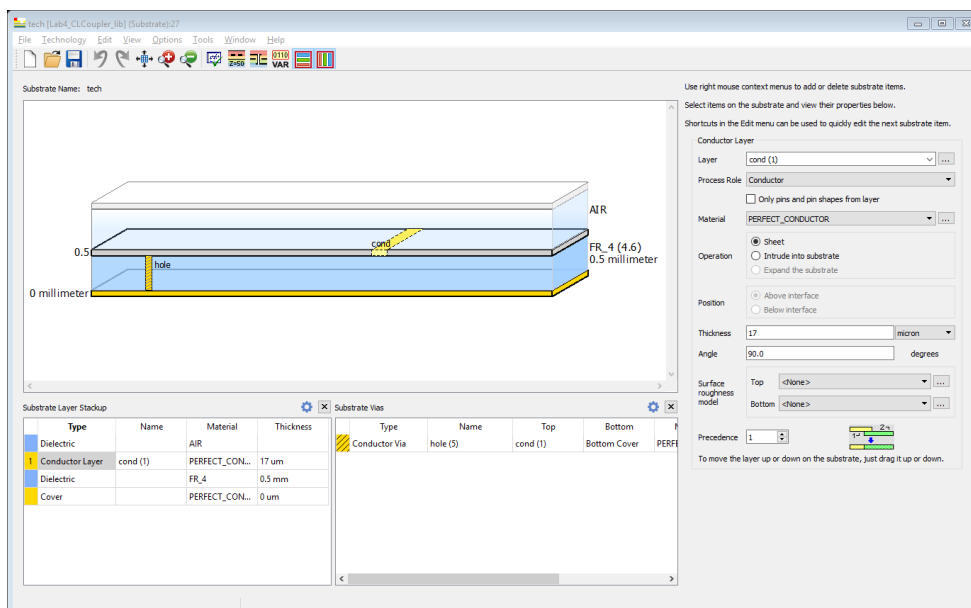
## Создание проекта

**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).

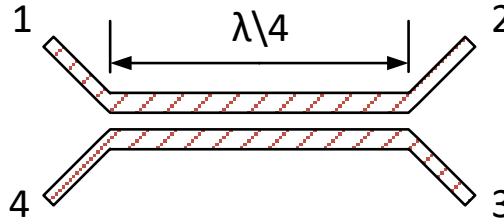
- единицы длин проекта – мм, с разрешением 10000 точек/мм

- 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  $Z_{\text{odd}}$  и четным модам  $Z_{\text{even}}$ , электрической длиной (обычно  $90^\circ$ ) и частотой  $F$ , относительно которой задана электрическая длина.

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

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

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

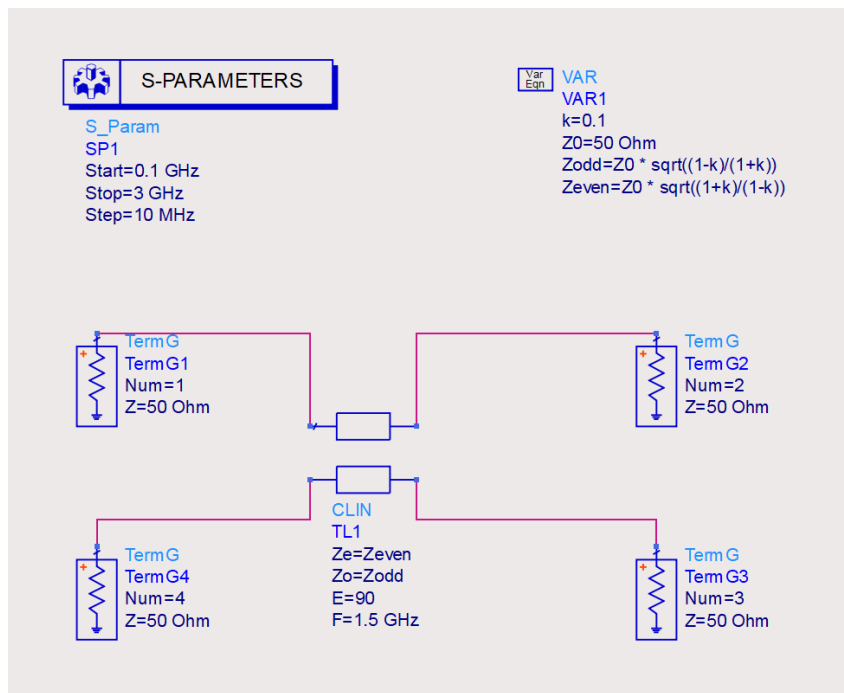
Также из формул выше следует однозначная связь  $Z_0 = \sqrt{Z_{\text{odd}} Z_{\text{even}}}$ .

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.

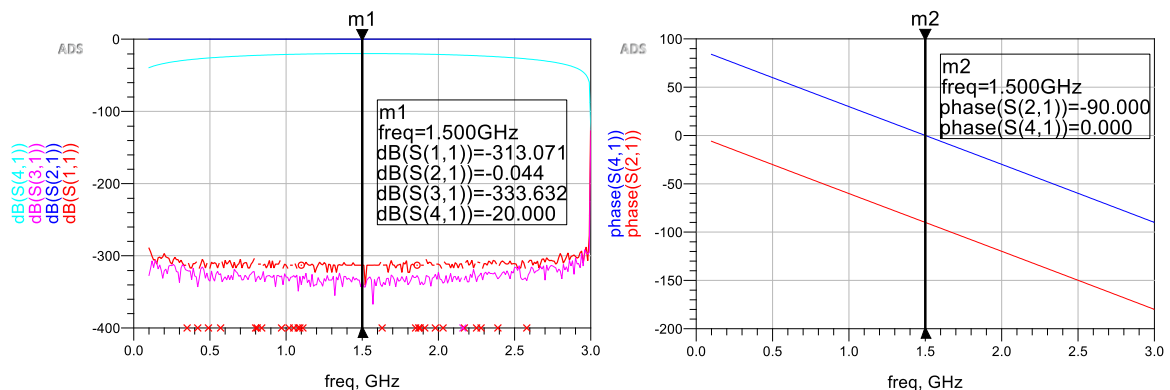




Запускаем моделирование .

## 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  $90^\circ$ ;

- 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  $90^\circ$  (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.

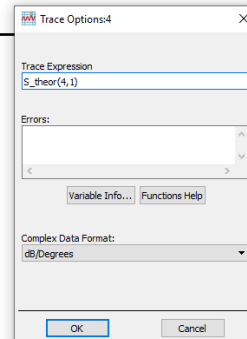
**Lab1** Создадим в этом же окне графиков идеальную теоретическую матрицу рассеяния и сравним с ней результаты моделирования на идеальных линиях передачи.

**Eqn** k = 0.1      **Eqn** gamma = k      **Eqn** beta = -j\*sqrt(1-k\*\*2)

**Eqn** S\_theor = {{0, beta, 0, gamma}, {beta, 0, gamma, 0}, {0, gamma, 0, beta}, {gamma, 0, beta, 0}}

Выведем в таблицу интересующие 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  $90^\circ$ .


### 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  $0,5$  мм, 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:

$Z_0$  - волновое сопротивление подводящих линий,  $50$  Ом;

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

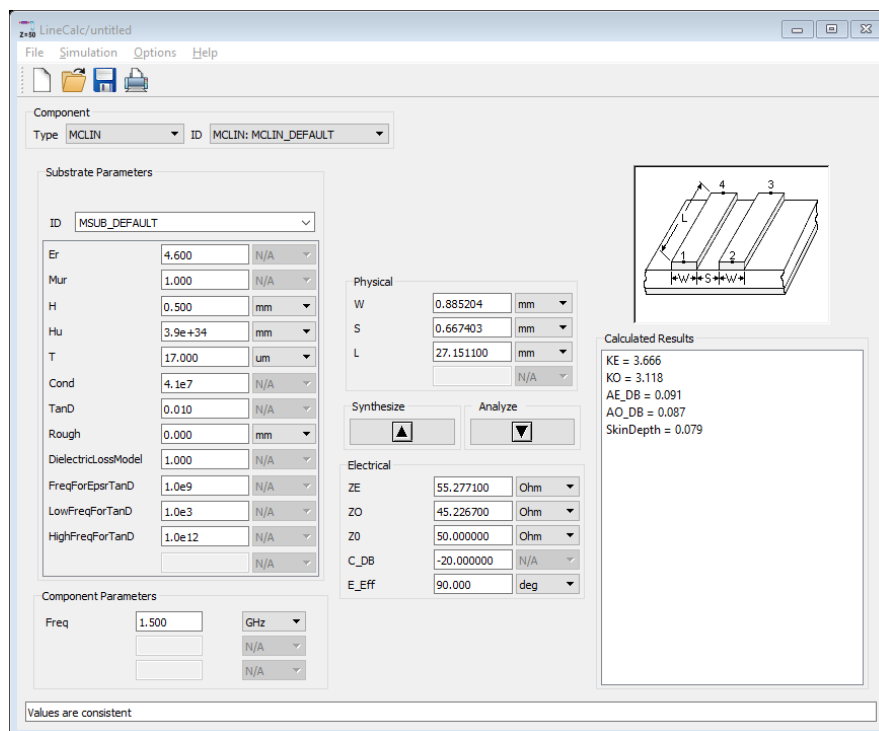
$Z_O$  - характеристическое сопротивление по нечетным модам ( $Z_{\text{odd}}$  в модели на идеальных линиях передачи выше) - напрямую в данном случае не задаём;

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

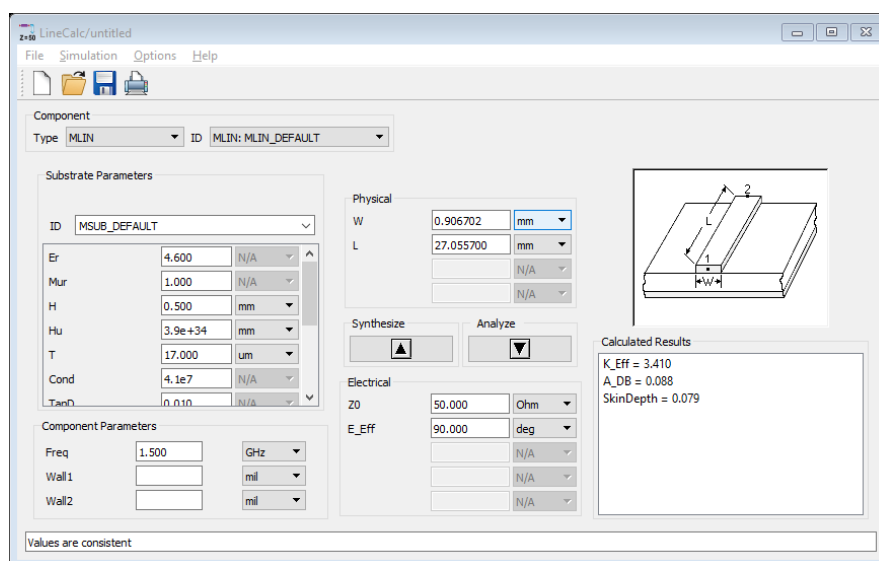
При задании двух из четырех параметров выше остальные два пересчитываются.

$E_{\text{Eff}}$  - отдельно надо задать электрическую длину связанного участка ( $90^\circ$ ).

Получаем геометрические параметры связанного участка: ширина линий  $CLC\_W = 0,89$  мм, зазор  $CLC\_S = 0,67$  мм, длина  $CLC\_L = 27,2$  мм.



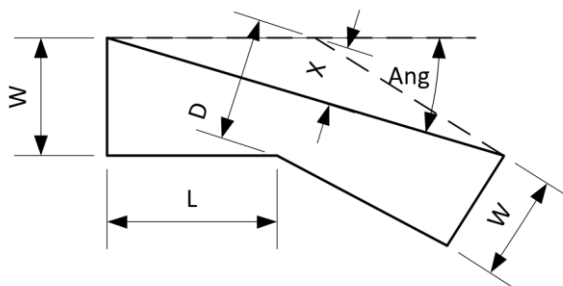
Отдельно определим волновое сопротивление одиночной микрополосковой линии  $W_{50} = 0,91$  мм.



Для отвода от связанного участка линии нужно повернуть. Будем использовать поворот на  $45^\circ$  со срезанным внешним углом MSABND\_MDS



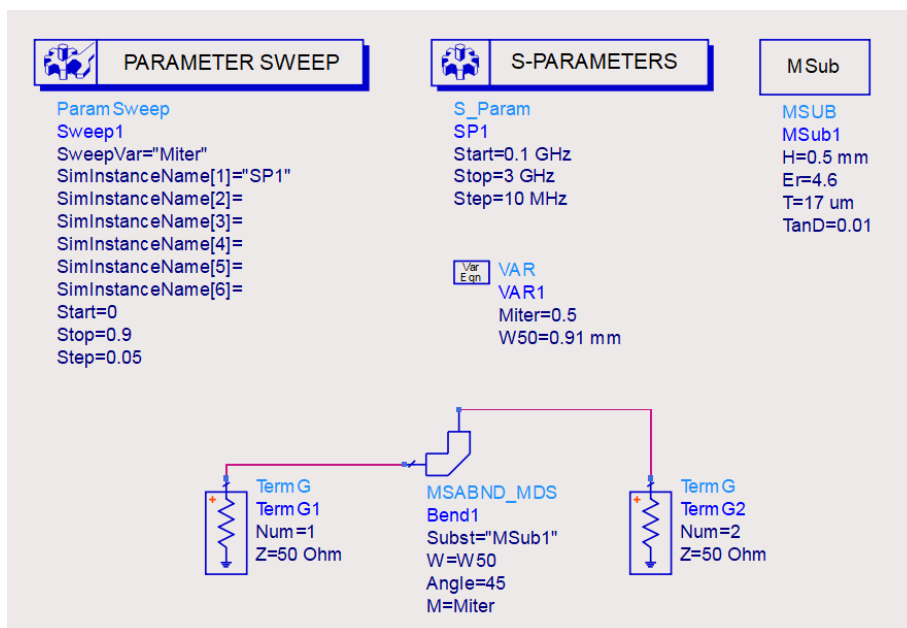
(палитра TLines-Microstrip).



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

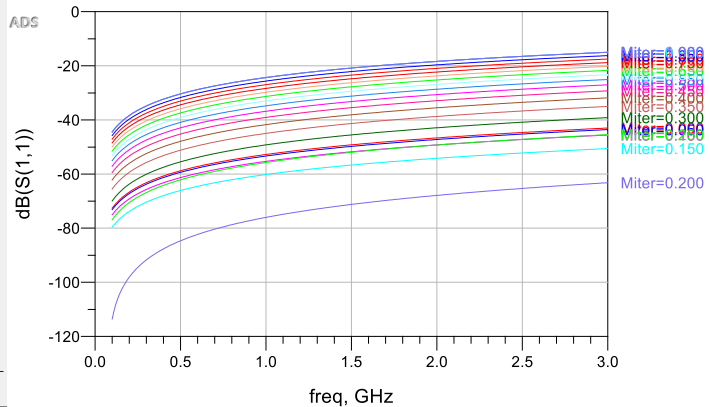
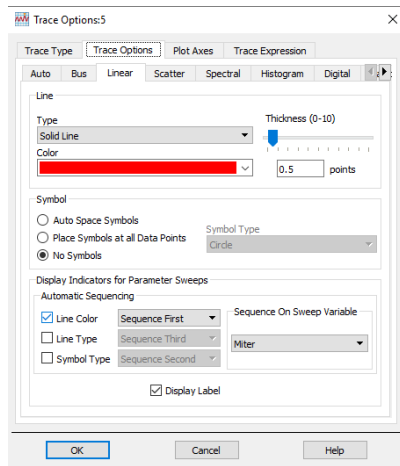
Для поворота на  $45^\circ$  неизвестно оптимальное значение среза  $M$  (Miter), его нужно подобрать отдельно в зависимости от подложки и ширины линии.

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.



По результатам S11 нужно выбрать тот уровень среза, который дает минимальный S11.

❗ При отображении семейства графиков для идентификации линий по независимой переменной вместо маркера можно в настройках графика включить пояснение надписью, цветом, типом линии или символом (галка Display Label и группа галок Automatic Sequencing на вкладке Trace Options - Linear).



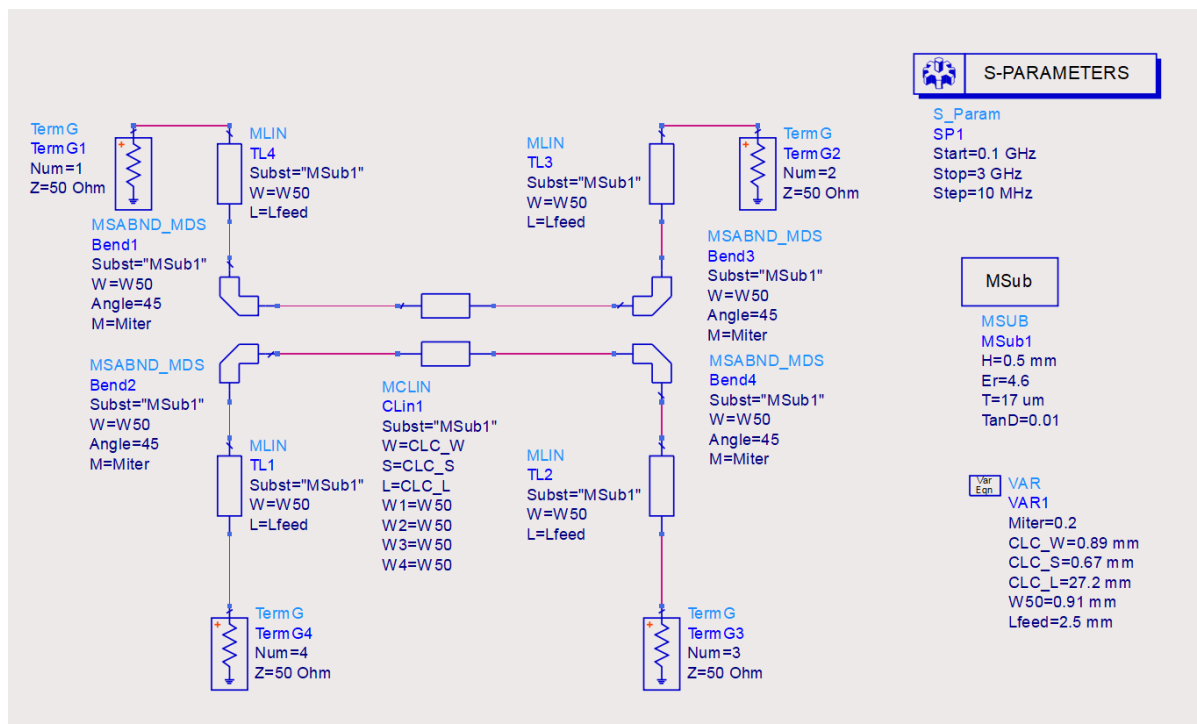
По результатам видно, что оптимальное значение среза на данной подложке и для данной ширины линии равно 0,2.

Собираем схему моделирования НО на связанных линиях на микрополосковых линиях (MLIN).





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

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



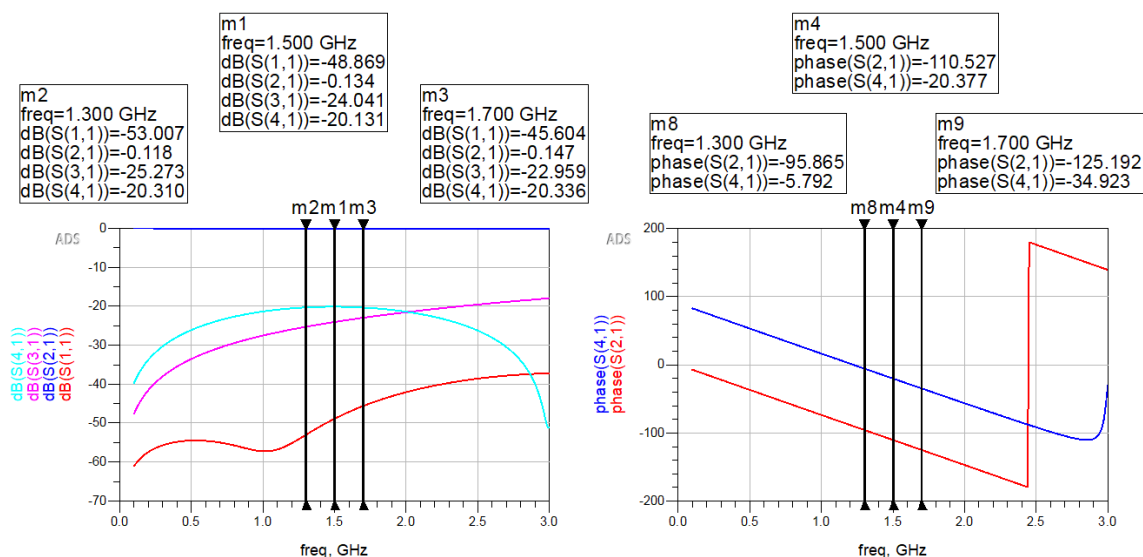


При расположении микрополоковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R), зеркалить (Mirror About X, Mirror About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению.



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, от -45 дБ;
- рабочее затухание dB(S21) в пределах 0,2 дБ;
- переходное ослабление dB(S41) близко к -20 дБ ( $k = 0,1$ ) с точностью порядка  $\pm 0,4$  дБ;
- развязка dB(S31) приняла более реальное значение -23..-25 дБ;
- разность фаз между выходными плечами равна  $90^\circ$ ;

- несмотря на работу на резонансном участке, устройство является довольно широкополосным, зафиксируем рабочую полосу как  $\pm 200$  МГц (13%).

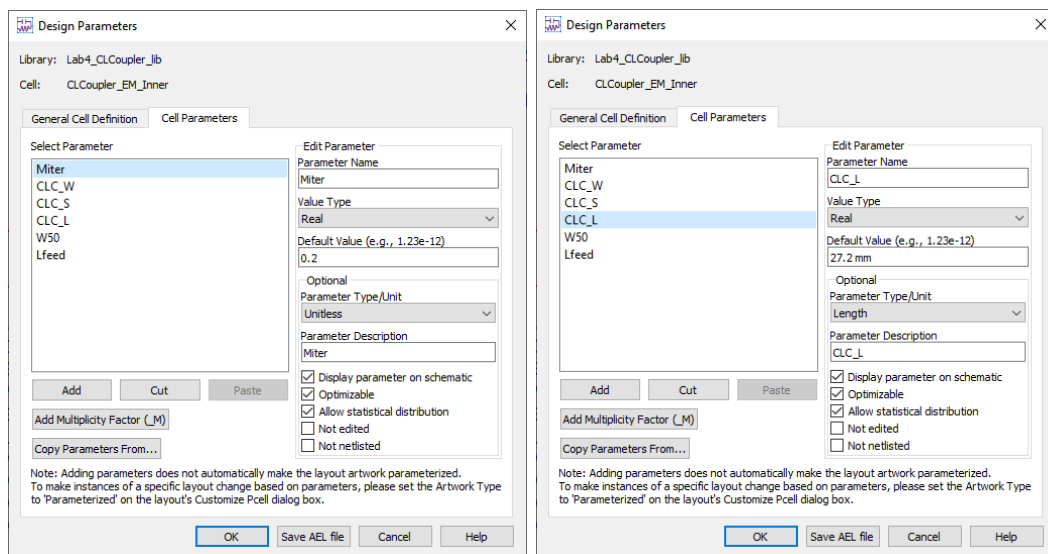
Подстройка модели не нужна.

### Модель на топологическом уровне

Перейдем к моделированию на топологическом уровне. Промоделируем направленный ответвитель на связанных линиях методом конечных элементов (FEM, Finite Element Method).

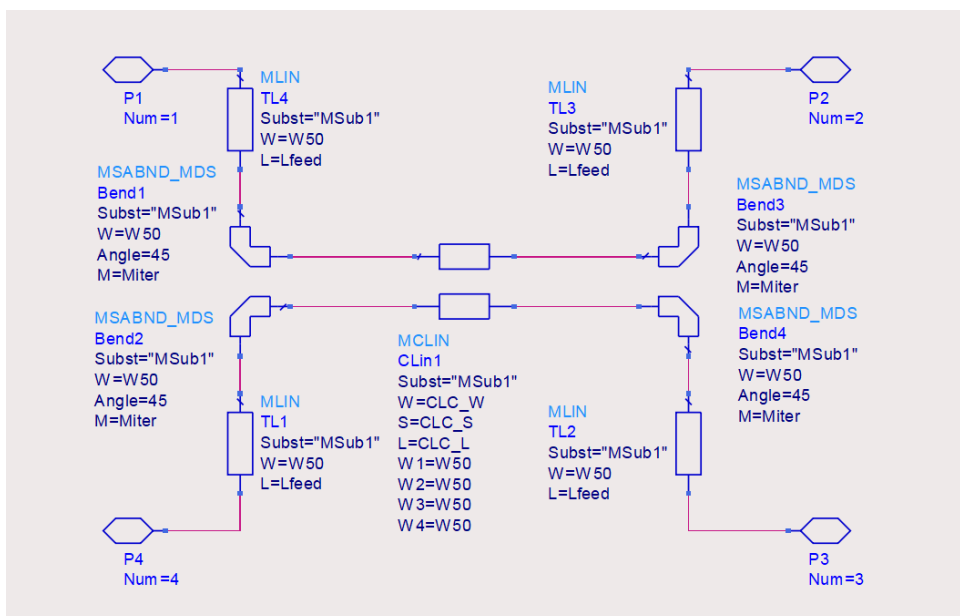
**Lab1** За основу возьмем спроектированную ранее схему CLCoupler\_MLIN. Создаем копию этой ячейки под CLCoupler\_EM\_Inner.

В ячейке CLCoupler\_EM\_Inner в схеме по команде File – Design Parameters, на вкладке Cell Parameters создаем список переменных ячейки на основе подобранных на схемном уровне параметров. Параметру Miter укажем тип Unitless, остальным тип Length.



Далее в схеме уберем терминаторы, блок VAR, определение подложки MSUB и контроллер симуляции. Вместо портов поставим пины. При установке пинов нужно проследить, чтобы их нумерация совпадала с используемой в проекте.

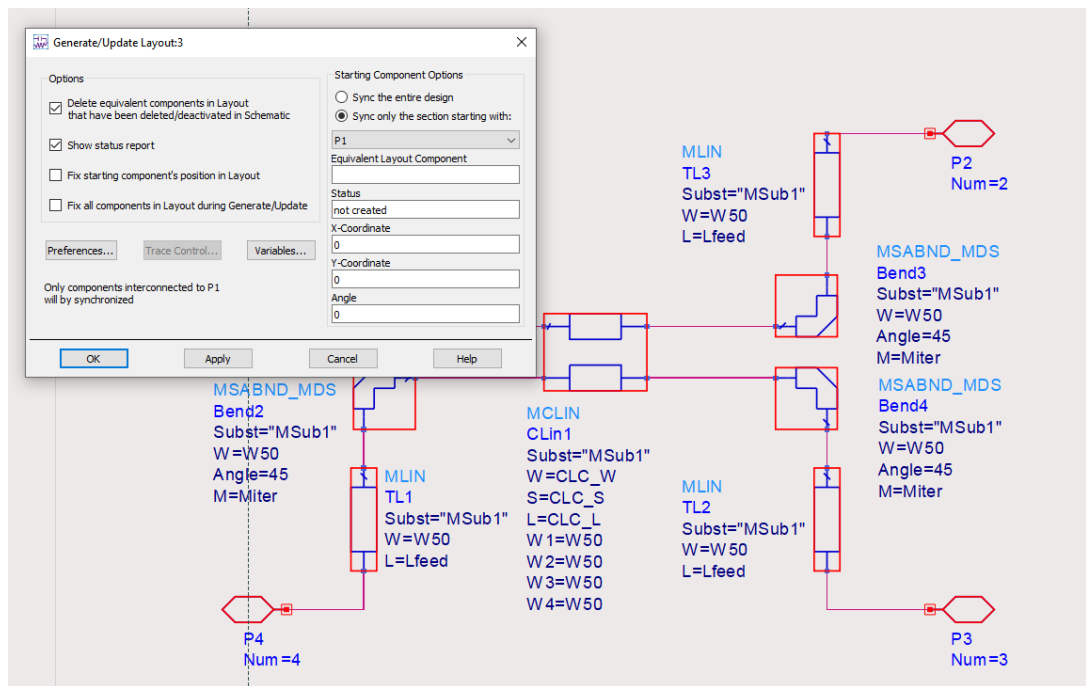




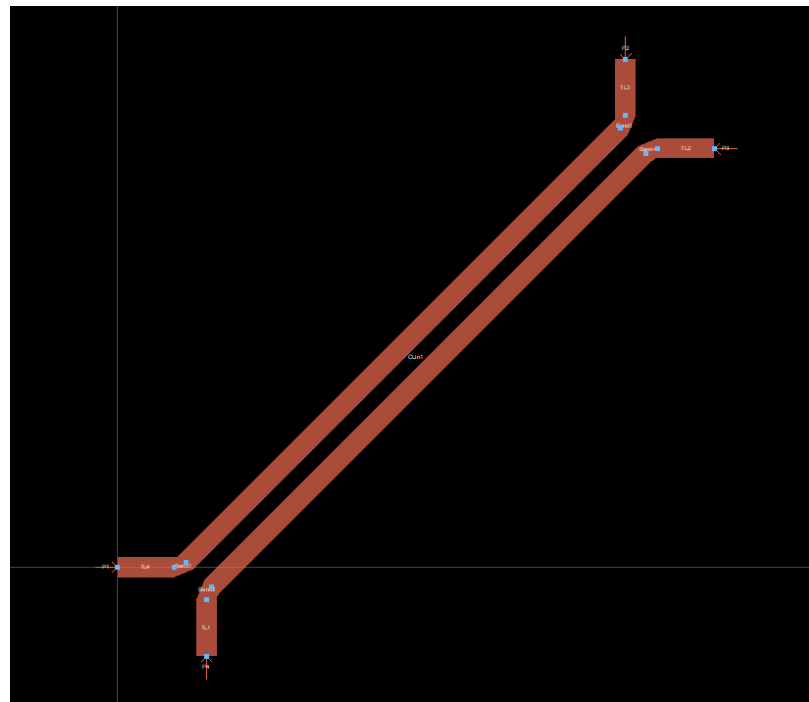
Далее создается топология на основе схемы по команде Layout – Generate/Update Layout. Здесь можно предварительно учесть некоторые особенности работы портов в режиме моделирования FEM и того, какой вид калибровки к портам планируется применить.

В режиме моделирования FEM TML-калибровка применяется только для волноводных портов. Волноводные порты в свою очередь должны располагаться на границах области моделирования, которая как правило представляет из себя параллелепипед (FEM-куб). Таким образом для желаемой схемы моделирования модель должна располагаться так, чтобы порты оказались на границах окружающего прямоугольника. Т.к. в модели используются повороты на  $45^\circ$ , то все порты находятся в прямоугольной проекции друг относительно друга. И если зафиксировать в нужном положении один из портов, то остальные автоматически окажутся в нужных положениях.

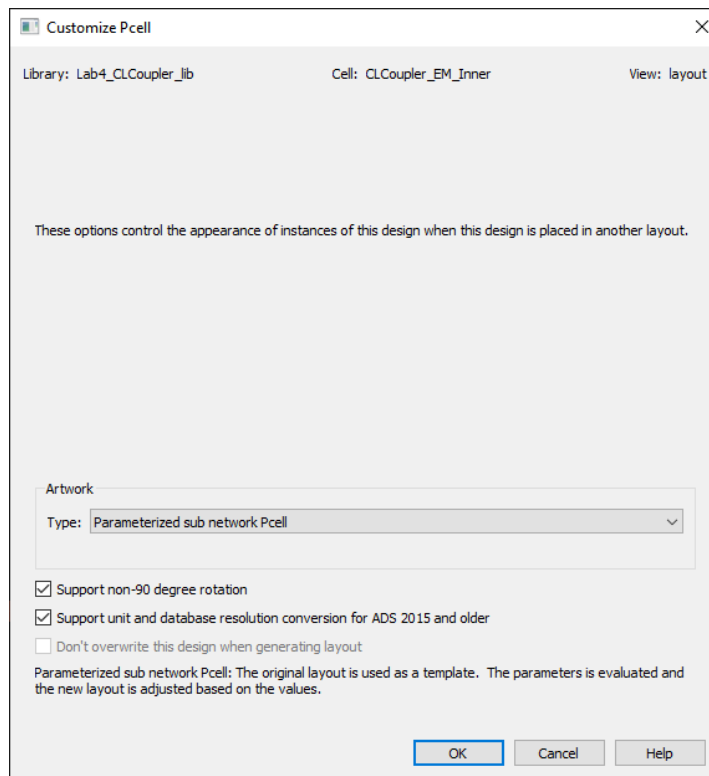
При генерации топологии выберем опорным порт P1, координаты ему установим (0, 0) и направление  $0^\circ$ .



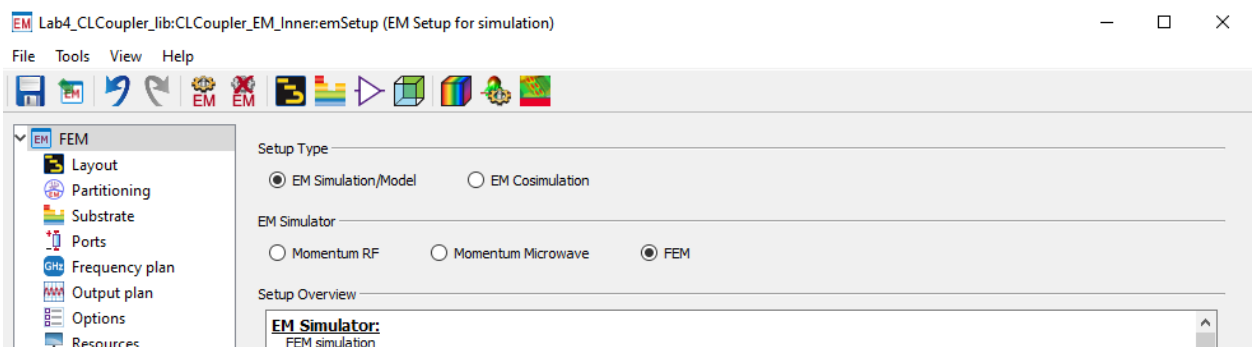
Сгенерированная топология должна выглядеть приблизительно как показана ниже.



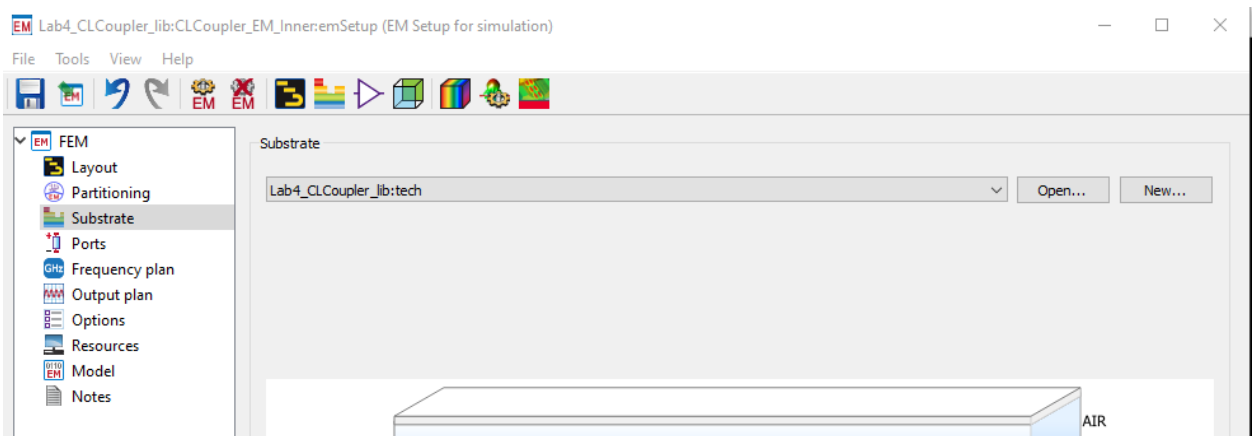
В топологии нужно по команде File – Customize PCell убедиться, что в выпадающем списке Artwork Type стоит Parameterized sun network Pcell.



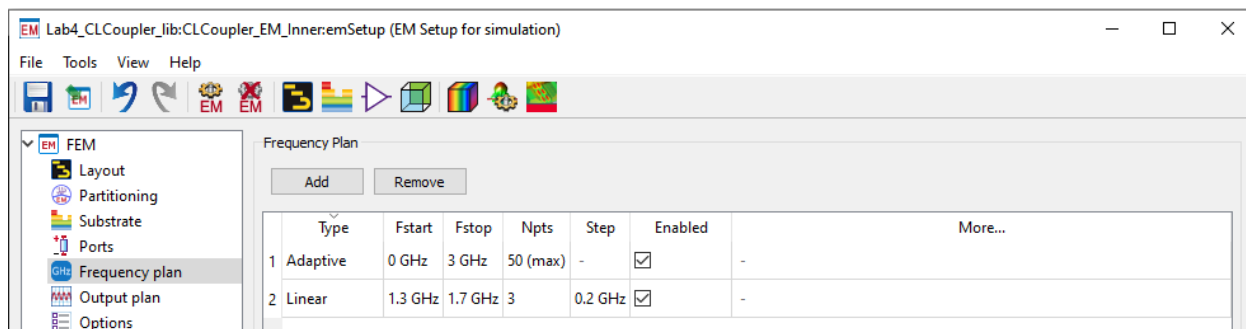
Далее создается emSetup и настраивается моделирование. Режим моделирования указываем FEM.



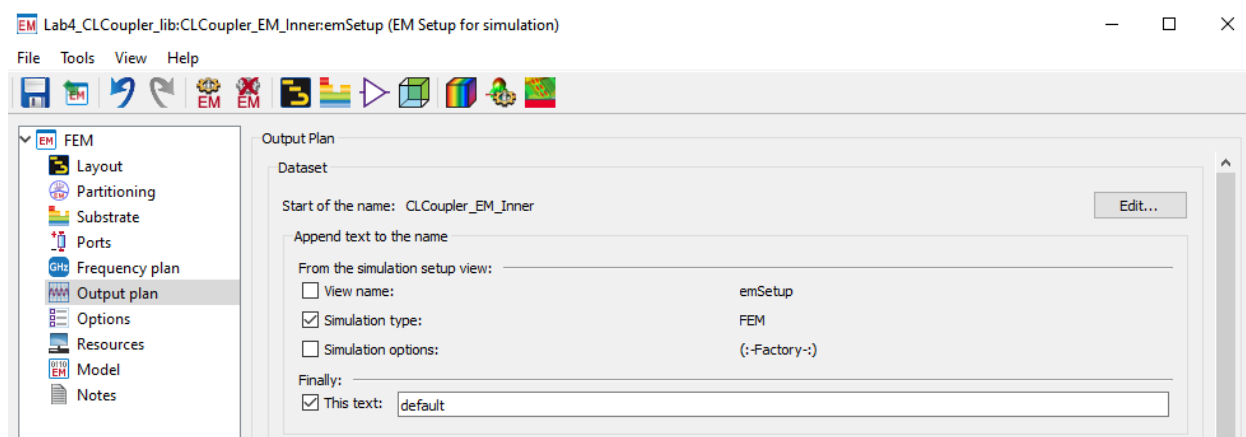
На вкладке Substrate нужно привязать технологическую подложку.



Частотный план зададим комбинированный, адаптивный в диапазоне от 0 до 3 ГГц, а также три фиксированных точки, центральную частоту 1,5 ГГц и границы выбранного частотного диапазона 1,3 ГГц и 1,7 ГГц.



Результаты моделирования мы будем сравнивать в зависимости от некоторых настроек. Чтобы отличить получаемый результат при настройках по умолчанию, добавим в название датасета суффикс default.



Далее надо настроить параметры расчетной области FEM-куба и параметры сетки. В реализации FEM-солвера Advanced Design System управление размером FEM-куба возможно тремя способами:

- через указание увеличения расчётной области по отношению к моделируемой геометрии (FEM padding);
- через определение положения волноводных портов на границах FEM-куба;
- с помощью специальной графики в выделенном слое Bounding Box.

В моделировании мы будем использовать внутренние порты (не волноводные). Размер FEM-куба будем задавать через параметры увеличения.

Для выбора размера увеличения можно воспользоваться следующими границами:

- для излучающих структур не менее, чем на  $\lambda/4$ ;
- для не- или слабоизлучающих структур не менее, чем на  $\lambda/10$ .

Дополнительно для планарных структур еще необходимо проследить, чтобы вертикальное увеличение было не менее, чем на  $6..8h$ , где  $h$  – толщина подложки.

Длина волны  $\lambda$  берется для пространства, в котором распространяется электромагнитная волна (как правило, это свободное пространство) и для частоты из интересующего диапазона. Здесь сразу видно некоторое противоречие с параметрами шага сетки и интересующим частотным диапазоном. Шаг сетки рассчитывается как правило исходя из максимальной частоты в расчете, а увеличение расчетной области – исходя из минимальной частоты расчета. При FEM-расчете вся расчетная область разбивается на сетку и при большой разнице между максимальной и минимальной частоты в расчете – требования на вычислительные ресурсы могут стать неподъемным. Для решения этой проблемы может быть эффективно разбить расчет на несколько частотных поддиапазонов, где увеличение расчетной области и шаг сетки не так различаются.

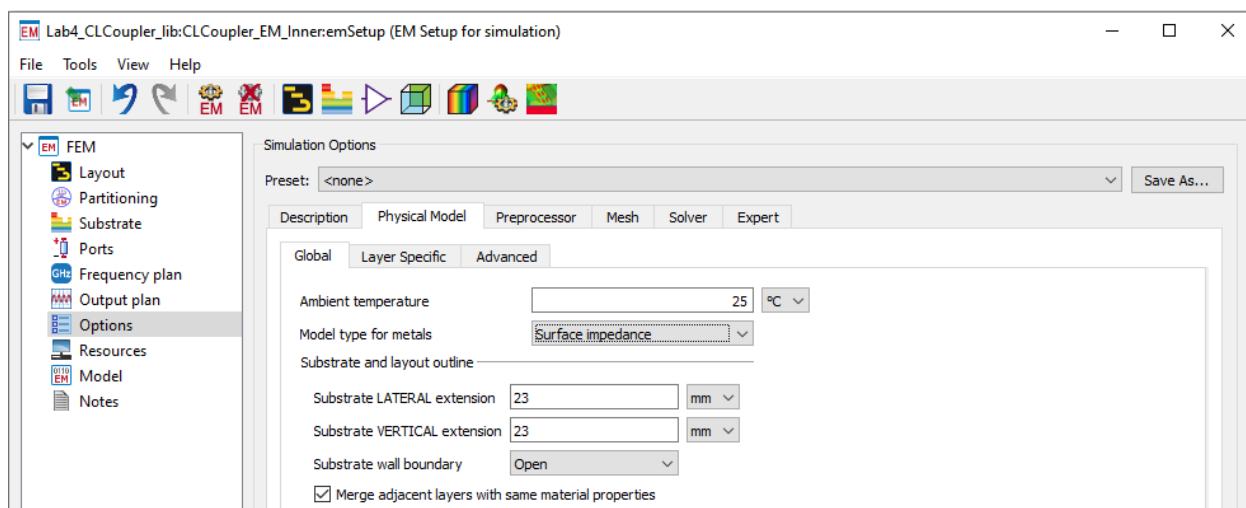
Для расчета размера увеличения опорной выберем нижнюю частоту рабочего диапазона 1,3 ГГц. Проектируемый направленный ответвитель можно отнести к неизлучающим структурам, поэтому увеличение с достаточной уверенностью можно взять как

$$\frac{\lambda}{10} = \frac{c}{1,3 \text{ ГГц}} / 10 = 23 \text{ мм}.$$

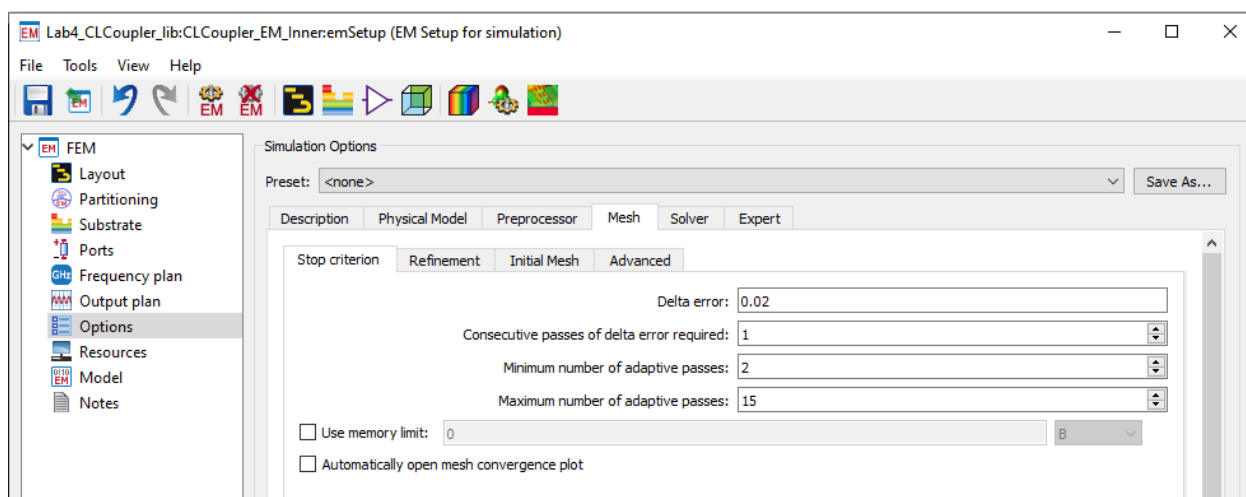
Также проконтролируем минимальное значение вертикального увеличения с учетом толщины диэлектрика 0,5 мм.

$$(6..8) \times 0,5 \text{ мм} = 3..4 \text{ мм}, \text{ что с запасом меньше } 23 \text{ мм}.$$

Параметры увеличения задаются на вкладке Options в подвкладке Physical Model/Global, параметры Substrate LATERAL extension и Substrate VERTICAL extension. Также укажем, что граница Open (свободное пространство).



Далее настраивается сетка. На вкладке Options в подвкладке Mesh/Stop criterion снимем галку Automatically open mesh convergence plot, в котором показывается текущее состояние ошибки расчета. Эти данные копируются в логи расчета, поэтому отдельный график для них как правило не очень нужен.



На вкладке Options в подвкладке Mesh/Refinement настроим правила уплотнения сетки. В методе моделирования FEM при первоначальном этапе построения сетки выполняется этап автоматического уплотнения сетки. На этом этапе проводится несколько последовательных расчетов на некоторых отобранных частотах с постепенно уплотняемой сеткой. Как только результаты расчётов при уплотнении сетки начинают совпадать, считается, что сетка построена и можно проводить расчеты для всех остальных частот. В Advanced Design System поддерживается четыре режима уплотнения сетки:

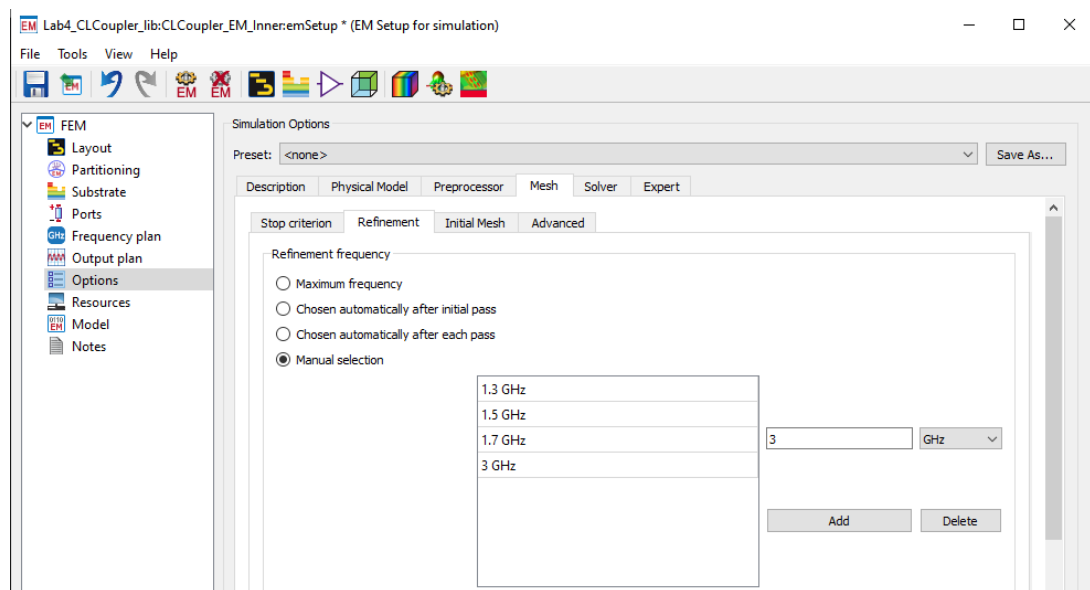
- Maximum frequency – уплотнение сетки считается по максимальной частоте расчета. Это довольно универсальный метод, часто используется во многих САПР. Но он может подвести, если интересуют результаты на конкретных частотах, которые значительно отличаются от максимальной

частоты расчета. Особенно такое возможно, если интересующая частота в несколько раз меньше верхней в расчете.

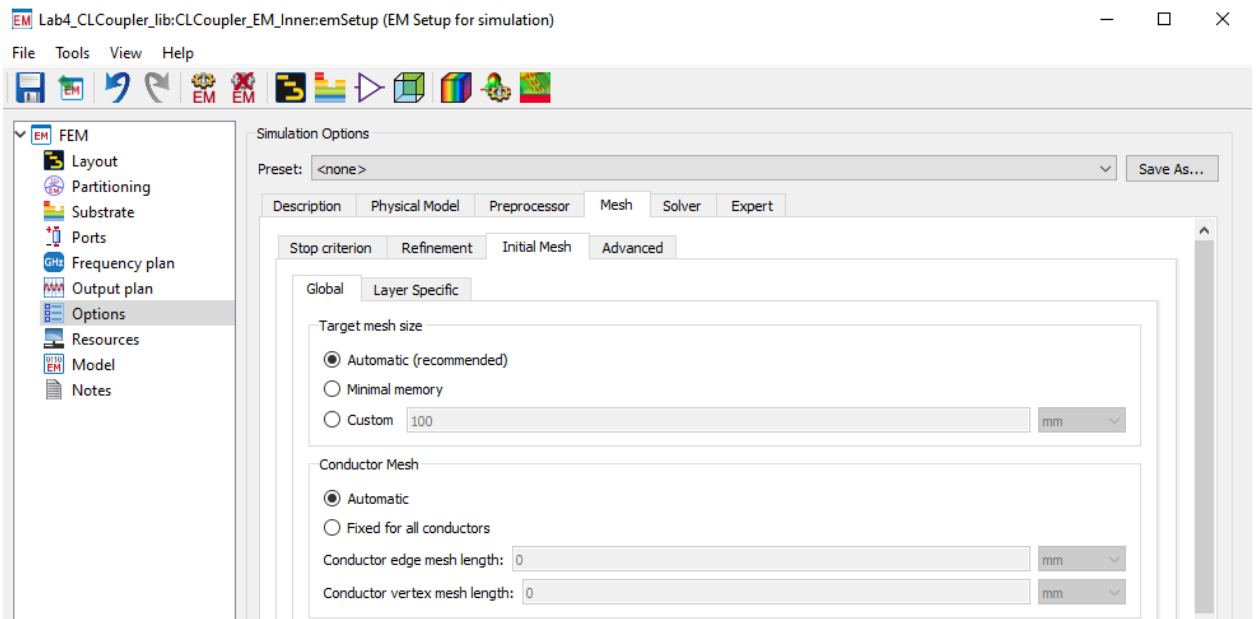
- Manual selection – уплотнение сетки на указанном списке частот. Уплотнение сетки идет до тех пор, пока на всём пользовательском списке частот результаты не перестанут меняться.



- Также доступны два автоматических режима Chosen automatically after initial pass и Chosen automatically after each pass, которые сами выбирают частоты, на которых надо проверять уплотнение сетки. Как правило, это такие частоты, при которых диагональные элементы результирующей матрицы S-параметров (коэффициенты отражения) близки к 0.

У нас довольно простая топология, кроме того, есть некоторый частотный диапазон, где поведение интересует более достоверно. Выберем режим Manual selection и введём туда частоты 1,3 ГГц, 1,5 ГГц, 1,7 ГГц (по рабочему частотному диапазону) и максимальную частоту расчета 3 ГГц.

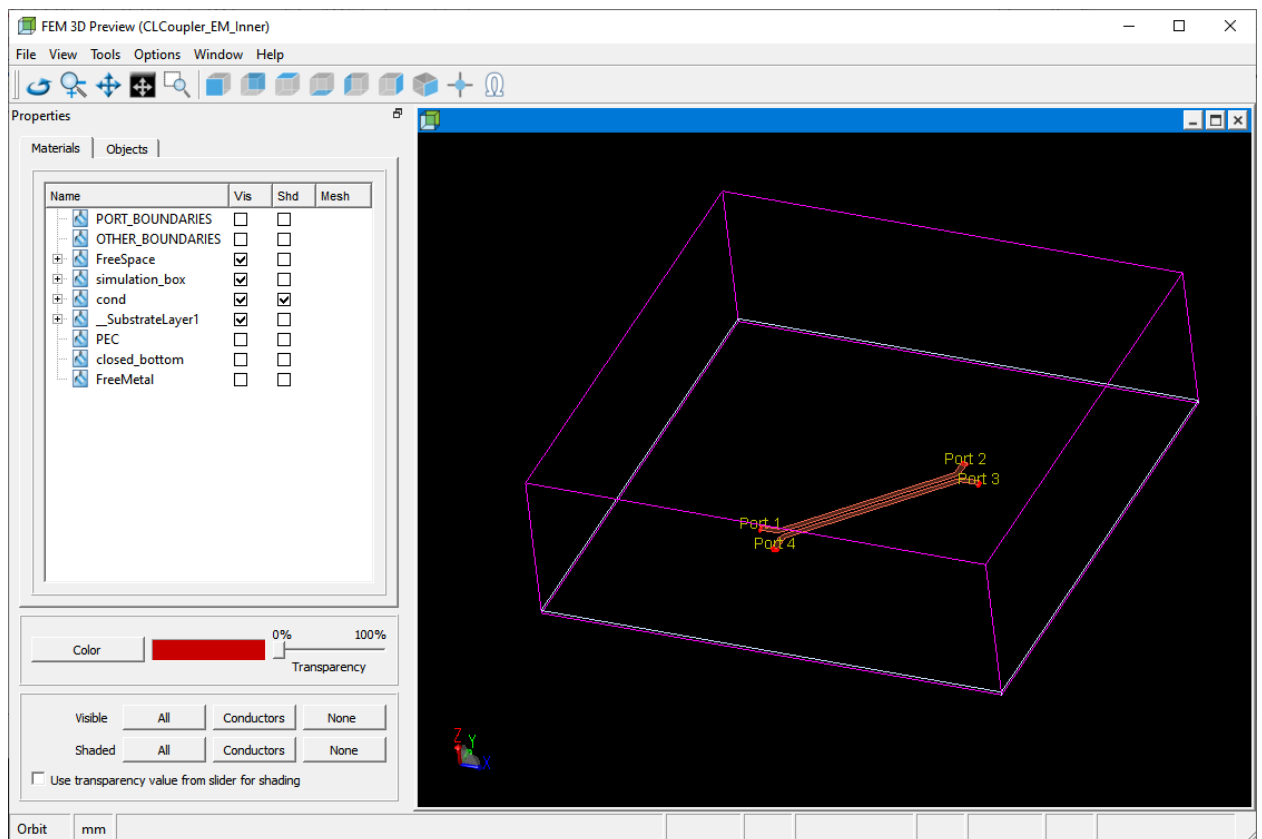


На вкладке Options в подвкладке Mesh/Initial Mesh установим проводящим поверхностям автоматический размер сетки (Conductor Mesh = Automatic).



На вкладке Port идет управление портами. Будем использовать тип калибровки Auto, который для FEM-солвера совпадает с прямой запиткой Direct. Нужно обновить определение портов, нажав на кнопку , чтобы она стала зеленой .

По меню Tools –3D EM Preview можно открыть отдельное окно, в котором будет показана полная геометрия планируемого расчета.



Запускаем расчет.

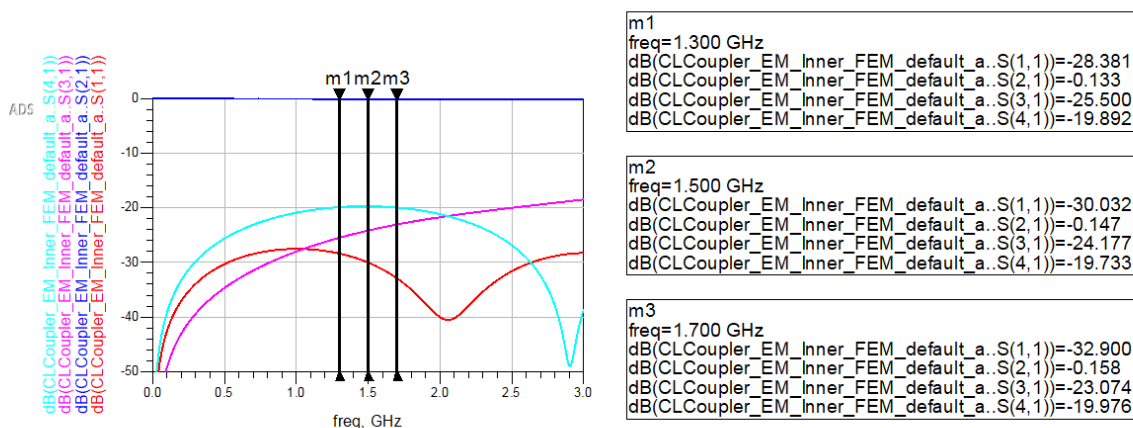


При расчете первым будет идти этап уплотнения сетки. В логах он называется REFINING.



REFINING											
level	frequency	MESHING			SOLVING						
		nbTetr	Elapsed time	CPU time	nbUnknowns	mem(GB)	Elapsed time	CPU time	Delta(S)	solver	nbIter
1	1.300 GHz	28654	00:00:03.5	00:00:03.5	164854	1.108	00:00:04.4	00:00:19.3	/		Dm64
	1.111					00:00:01.9	00:00:11.7	/		Dm64	
	1.112					00:00:01.8	00:00:10.4	/		Dm64	
	1.112					00:00:01.8	00:00:10.8	/		Dm64	
2	1.300 GHz	33007	00:00:01.8	00:00:01.8	191326	1.349	00:00:05.3	00:00:23.0	0.0048 [->0.0200]		Dm64
	1.352					00:00:02.7	00:00:16.2	0.0049 [->0.0200]		Dm64	
	1.354					00:00:02.9	00:00:17.0	0.0048 [->0.0200]		Dm64	
	1.355					00:00:02.7	00:00:15.6	0.0042 [->0.0200]		Dm64	
	( 1.500 GHz)								0.0049 [->0.0200]		

По окончании расчетов можно вывести графики. Как результат расчета создаются три датасета. В датасете без суффикса (CLCoupler\_EM\_Inner\_FEM\_default) хранятся данные, полученные на частотах расчета. В датасете с суффиксом «\_a» (CLCoupler\_EM\_Inner\_FEM\_default\_a) хранятся данные, интерполированные на весь частотный диапазон. В датасете с суффиксом «\_c» (CLCoupler\_EM\_Inner\_FEM\_default\_c) хранится история ошибки расчета.

Выведем амплитудные характеристики на дополнительную область графиков из датасета CLCoupler\_EM\_Inner\_FEM\_default\_a.



Результаты моделирования похожи на полученные на схемном уровне.

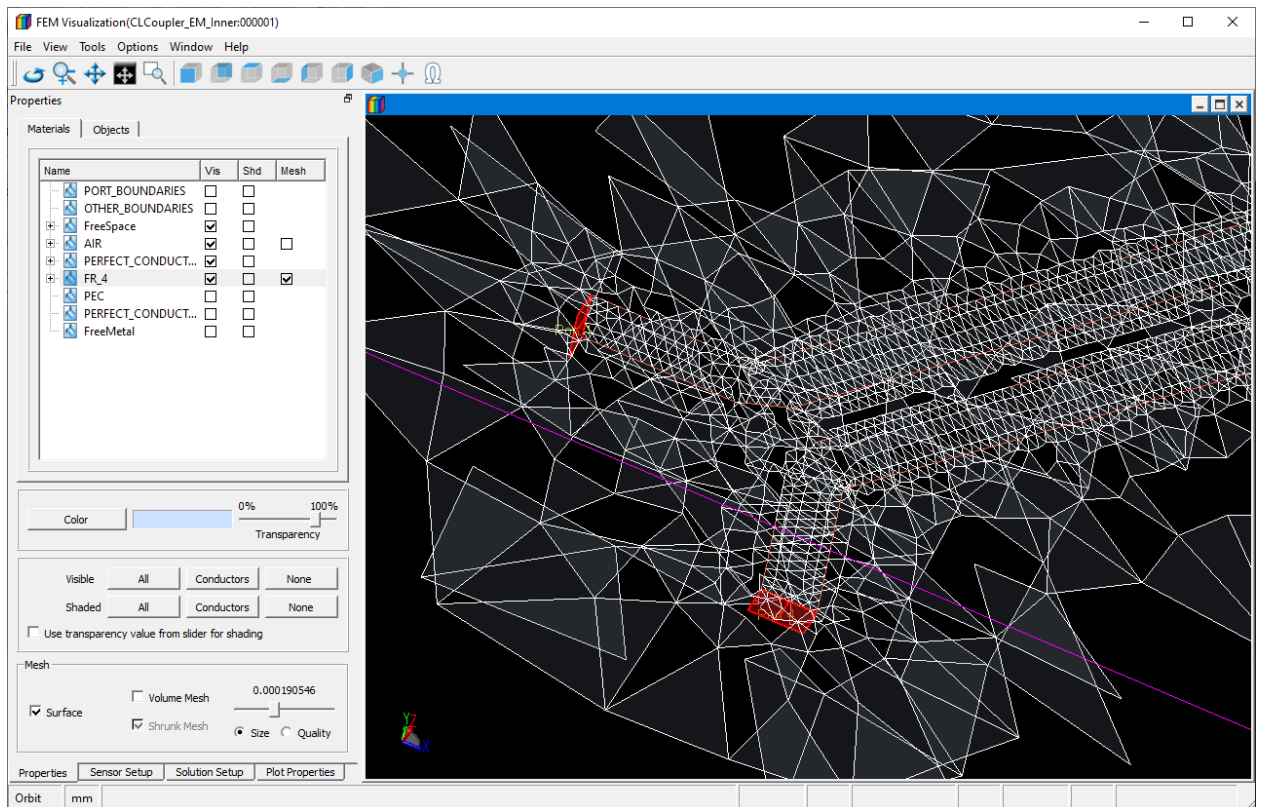
Также по окончании расчета можно изучить, как выглядит итоговая сетка расчета. Для этого из окна emSetup запустить команду Tools – Visualization  (или из окна топологии по команде EM – Post-Processing – Visualization  ).

В окне визуализации результатов в таблице Materials появится столбик с галками Mesh. В текущем проекте разбиение проводилось и привязывалось

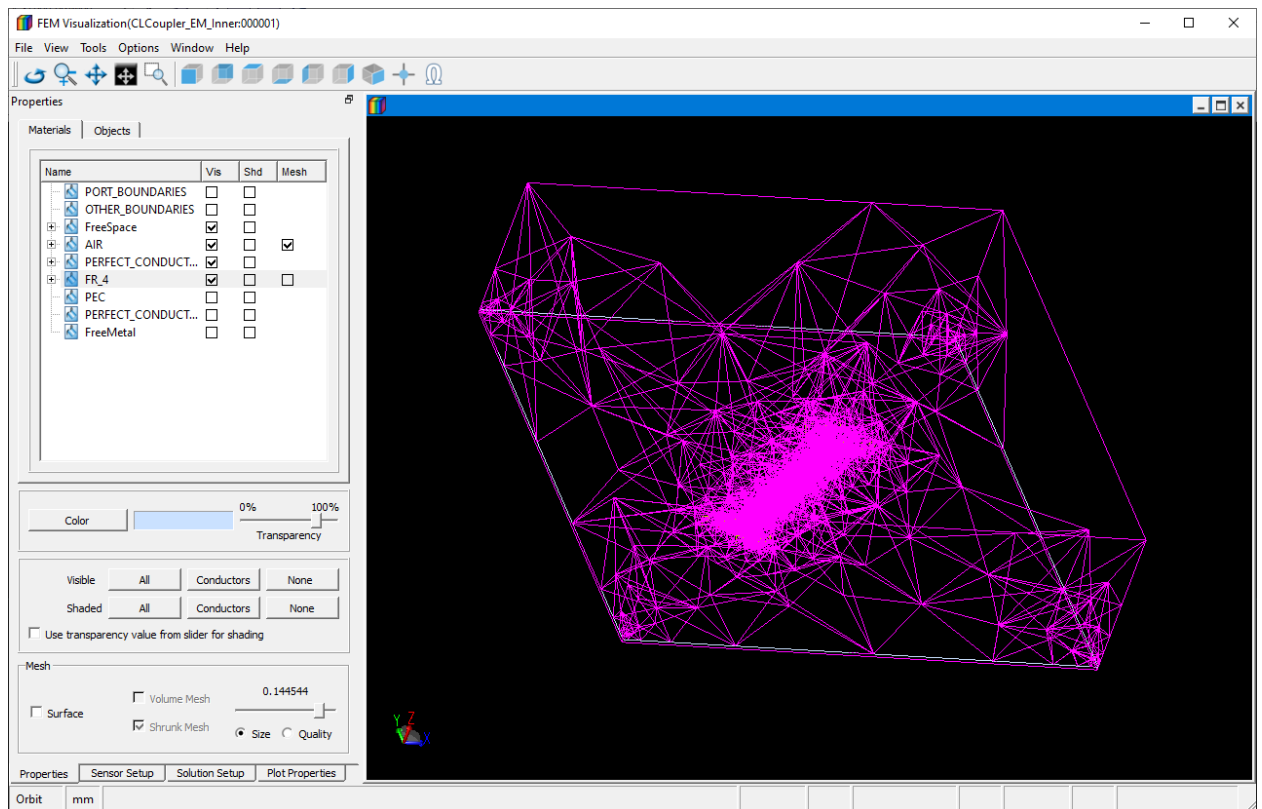
к диалектикам воздуху (Air) и подложке FR4; металлические объекты не разбиваются по внутренностям, а только по поверхностям и их стека привязывается к сетке в диэлектриках.

Включим отображение сетки по диэлектрику подложки FR4 и переключим ее в режим Surface. Так хорошо будет видно, как было выполнено разбиение рядом с полосками. Дополнительно ползунков Size/Quality можно контролировать какой максимальный размер сетки показывать.

Видно, что вдоль полосков разбиение более плотное, чем вдали от них.

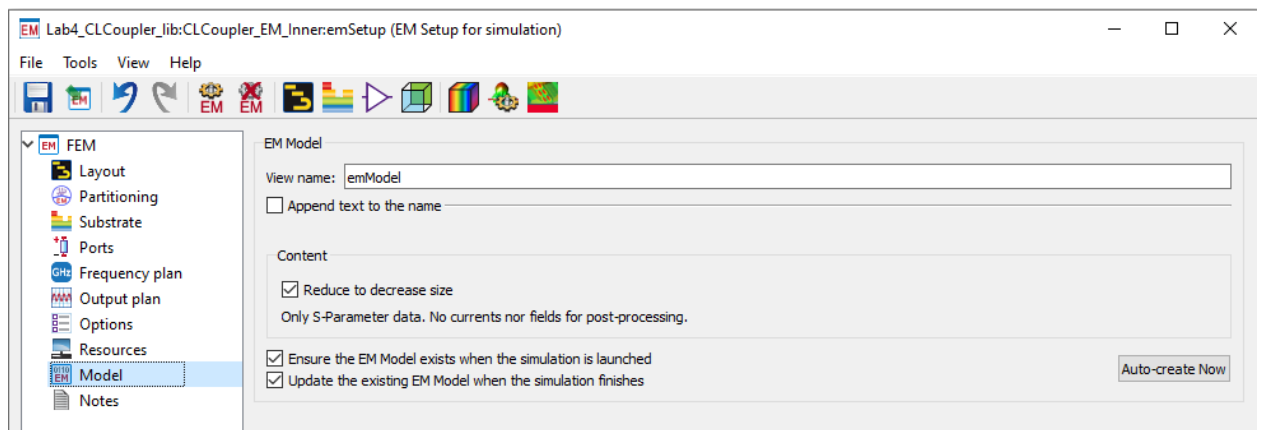


Аналогично можно включить отображение разбиения по объему воздуха, но теперь в объемном режиме. Аналогично видно, что сетка уплотняется близи к полоскам.

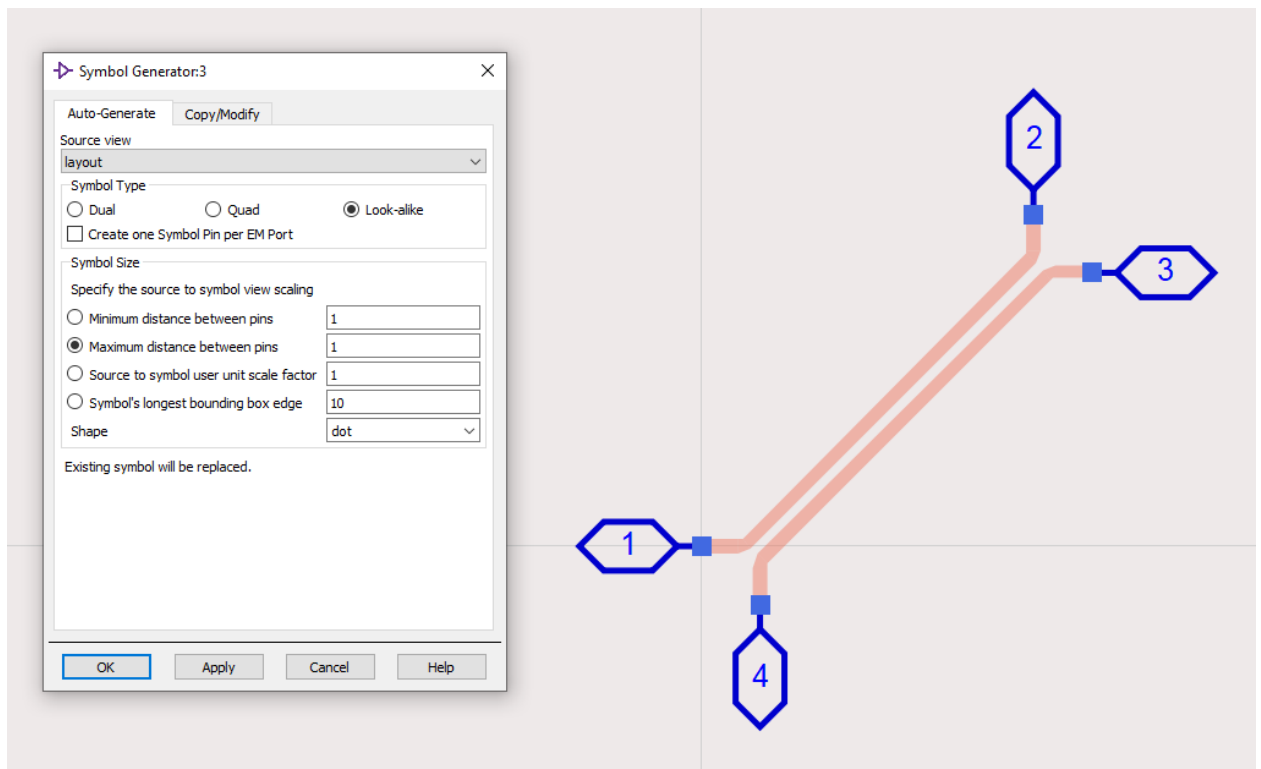


Работа с настройкой параметров моделирования закончена, можно доводить модель до параметризированной emModel.

В emSetup на вкладке Model настраиваем сохранение результатов в emModel.



Далее создаем символ для ячейки CLC\_EM\_Inner. Символ создаем аналогичный топологии.

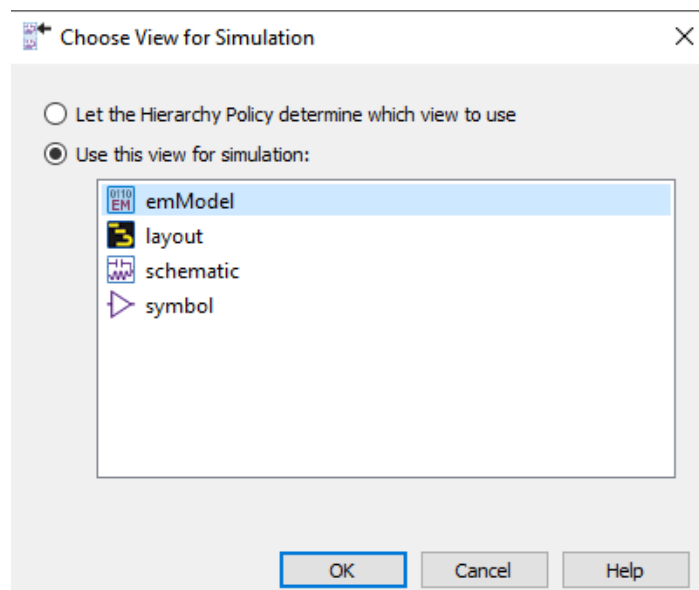


Создаем схему верхнего уровня CLCoupler\_EM\_Top, в которой донастраиваем моделирование. Приведем ее к следующему виду:

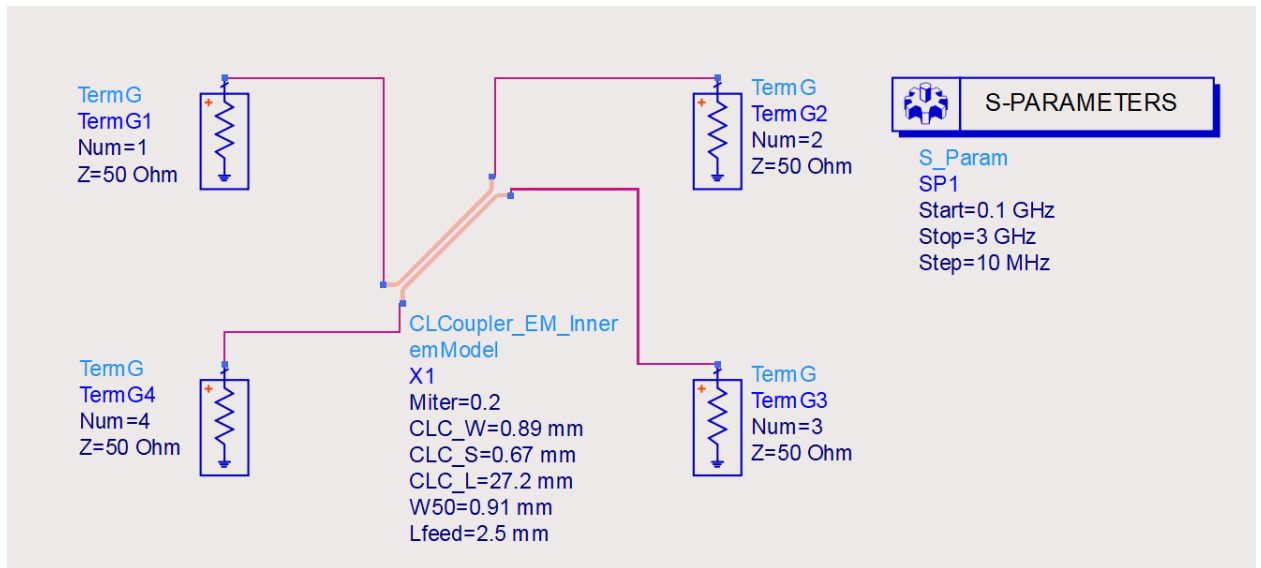
**Lab1** - в ней не нужен MSub1, т.к. в EM-анализе подложка берется из файла subst.

- в ней не нужен блок переменных VAR, т.к. переменные в топологию передаются через переменные ячейки.

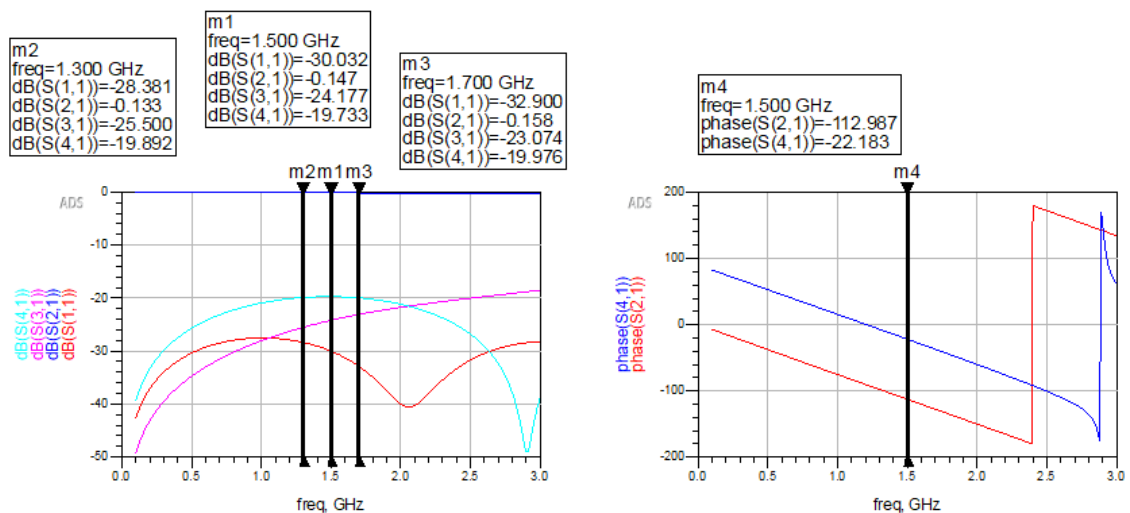
- у подсхемы топологии CLCoupler\_EM\_Inner по ПКМ – Component – Choose View for Simulation установим, что результаты надо брать из emModel.



Общий вид схемы CLCoupler\_EM\_Top получится следующий



Запускаем расчет.



Результаты моделирования практически не поменялись по сравнению со схемной моделью.

В случае, если параметры уедут, то их можно подстроить. Сдвиг по частоте можно подправить, поработав с длиной связанного участка CLC\_L – т.к. добавление поворотов может несколько увеличить эффективную длину связанного участка. Изменить переходное ослабление можно за счет небольшого изменения зазора CLC\_S, по принципу чем больше зазор – тем меньше связь между линиями.

### 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.

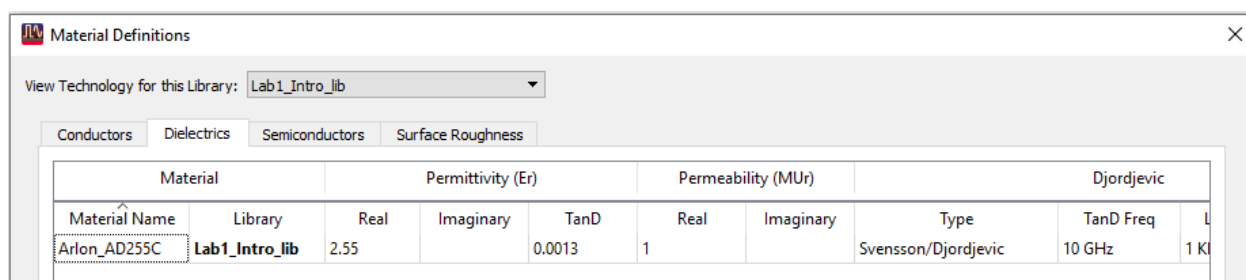
**Таблица 1. Варианты заданий**

№ Варианта		1	2	3	4	5
Центральная частота $F_c$ , ГГц		2,2	3,0	3,8	4,6	5,4
Переходное ослабление, $k$ , дБ		18	21	22	19	20
Параметры подложки	Именование материала	4,5	4,5	6,15	6,15	3,66
	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , ед.	0,01	0,01	0,0038	0,0038	0,004
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan D$ , ед.	0,71	0,51	0,61	0,406	0,508
	Толщина диэлектрика $h$ , мм	17	35	35	17	17
	Толщина металлизации $t$ , мкм	4,5	4,5	6,15	6,15	3,66

Таблица 1. Продолжение

№ Варианта		6	7	8	9	10
Центральная частота $F_c$ , ГГц		6,2	7,0	7,8	8,6	9,4
Переходное ослабление, $k$ , дБ		25	19	24	18	15
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO4003C	RO4003C	RO3003	RO3003
	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , ед.	3,66	3,55	3,55	3,0	3,0
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ , ед.	0,004	0,0026	0,0026	0,0013	0,0013
	Толщина диэлектрика $h$ , мм	0,338	0,305	0,203	0,25	0,13
	Толщина металлизации $t$ , мкм	17	17	35	35	17

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



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

### Этапы выполнения:

1. 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  $45^\circ$  (ячейка optim\_45bend) для заданной подложки и ширины 50 Ом.

- Дополнительно добавить 50 Омные участки длиной около 2-2,5 ширин 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 1 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), метод моделирования FEM.

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 Finite Element Method (FEM).

- Для портов использовать калибровку Auto (Direct).

- Увеличение расчетной области задавать исходя из правила  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  определяется как длина волны в свободном пространстве по нижней частоте рабочего диапазона.

- Расчет уплотнения сетки разбиения выполнять с указанием пользовательских частот: три из рабочего диапазона (центральную и граничные) и верхняя частота расчета.

- По окончании расчета отобразить и изучить, какая получилась сетка разбиения.

- 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  $S_{21}$  в рабочей полосе менее, чем  $1$  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  $S_{41}$ ).

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

### **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 курсового проекта.

## Контрольные вопросы

1. Сколько портовым устройством является направленный ответвитель на связанных линиях? А сколько полюсником он является?
2. Направленный ответвитель при электрической длине связанного участка в  $90^\circ$  является сонаправленным или противонаправленным?
3. На какие из характеристик направленного ответвителя на связанных линиях влияет в первую очередь зазор между линиями в связанном участке?
4. На 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  $45^\circ$ ? По каким критериям принималось решение, какой срез выбирать?
8. Поясните, почему направленный ответвитель на связанных линиях почти не используется как гибридный направленный ответвитель? Можете провести эксперимент с проектированием связанного участка на переходное ослабление в 3 дБ.
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? Согласование и развязку направленного ответвителя считать идеальными. Рабочее затухание 0,5 дБ на рабочей частоте. 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.