

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 №3**

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

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

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

Москва, Зеленоград

2024

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Оглавление .....  | 2  |
| Введение .....  | 2  |
| Теоретические сведения .....                                | 3  |
| Методика выполнения работы .....                            | 5  |
| Создание проекта .....                                      | 5  |
| Модель на идеальных линиях передачи .....                   | 6  |
| Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении ..... | 12 |
| Модель на топологическом уровне .....                       | 18 |
| Статистический анализ выхода годных .....                   | 26 |
| Задание на выполнение .....                                 | 31 |
| Требования к отчёту .....                                   | 35 |
| Задание на самостоятельную работу .....                     | 36 |
| Контрольные вопросы .....                                   | 37 |
| Литература .....  | 38 |



## Введение

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

**Используемое оборудование или ПО:** материал подготовлен на основании версии Keysight Advanced Design System 2023. Однако, в работе не используются никакие специфичные для данной версии инструменты, все используемое и описываемое существует в ADS практически в таком же виде как минимум с версии ADS 2011.11.

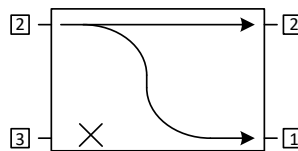
**Продолжительность работы:** 4 часа.

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

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

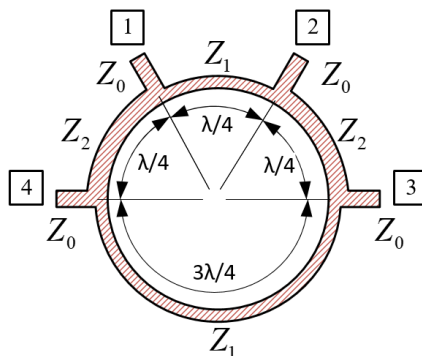
## Теоретические сведения

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



При 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].

Одним из примеров реализации направленного ответвителя является кольцевой направленный ответвитель (Rat-Race Coupler). Его реализацию на линиях передачи можно привести в следующем виде ( $Z_0$  – волновое сопротивление подводящих линий,  $Z_1$  – волновое сопротивление параллельных участков,  $Z_2$  – волновое сопротивление последовательных участков):



Анализ кольцевого направленного ответвителя проще проводить в понятиях нормированных импедансов  $\rho = Z/Z_0$ . В этом случае расписав выражение для баланса энергий можно получить  $\frac{1}{\rho_1^2} + \frac{1}{\rho_2^2} = 1$ .

Если ввести коэффициент деления по мощности между основным и ответвленным плечом  $m$ , то для нормированных проводимостей можно определить  $\rho_1 = \sqrt{m+1}$  и  $\rho_2 = \sqrt{\frac{m+1}{m}}$  соответственно.

При использовании кольцевого направленного ответвителя как гибридного ( $m=1$ ), можно определить требования на импедансы участков линий как  $\rho_1 = \rho_2 = \sqrt{2}$  или  $Z_1 = Z_2 = 71 \text{ Ом}$  (при нормировке на  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ ). В этом случае его матрицу S-параметров можно свести к следующему виду:

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

где  $y_1 = 1/\rho_1$  и  $y_2 = 1/\rho_2$  - нормированные проводимости соответствующих участков.

Также видно, что если за основной порт взять 1, за второй (изолированный) порт 3 и подавать на них сигналы, то на порт 2 эти сигналы выйдут синфазно, а на порт 4 – противофазно. Это позволяет использовать гибридный кольцевой направленный ответвитель для формирования суммарно-разностного сигнала (Hybrid-180° Coupler).

Для кольцевого направленного ответвителя верны все те же рассуждения, что и для двушлейфного направленного ответвителя. В том числе для него аналогично можно использовать следующий список характеристик:

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

Видно, что между тремя из этих параметров существует взаимосвязь

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

Гибридный кольцевой направленный ответвитель часто используется для формирования суммарно-разностного сигнала, в том числе в балансных схемах смесителей.

## Методика выполнения работы

Маршрут работы следующий:

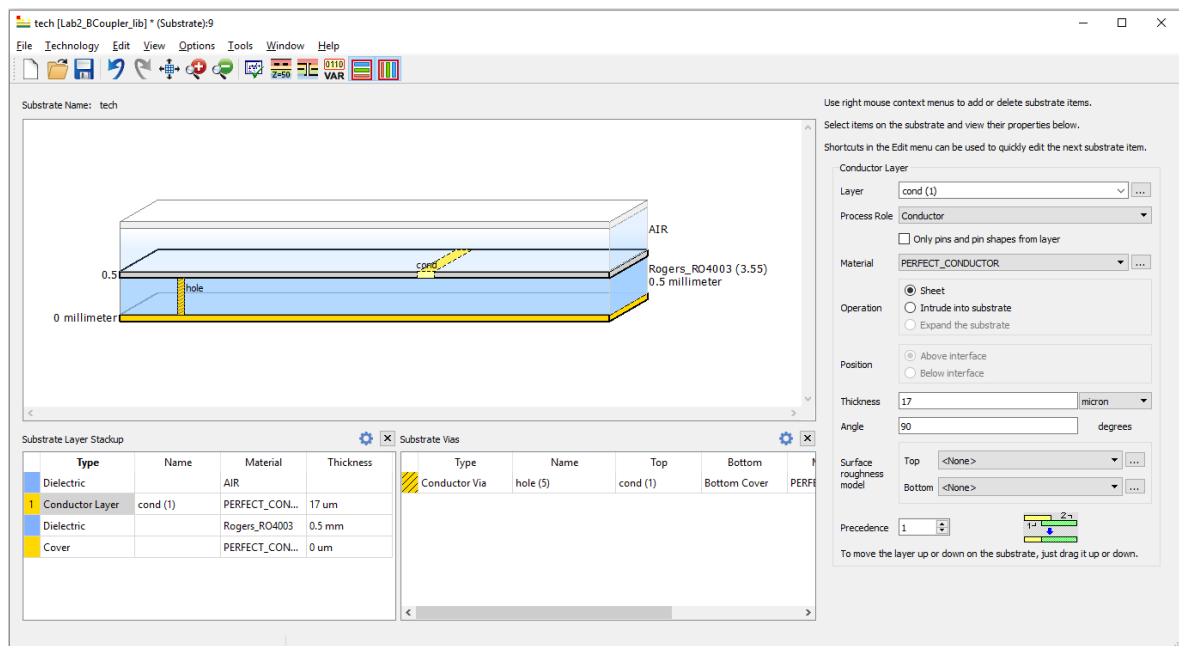
1. Составление модели на идеальных линиях передачи и моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.
2. Преобразование модели на идеальных линиях передачи в схемотехническое представление на заданной ВЧ-подложке с помощью инструмента LineCalc. Моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.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

### Создание проекта

#### Lab1

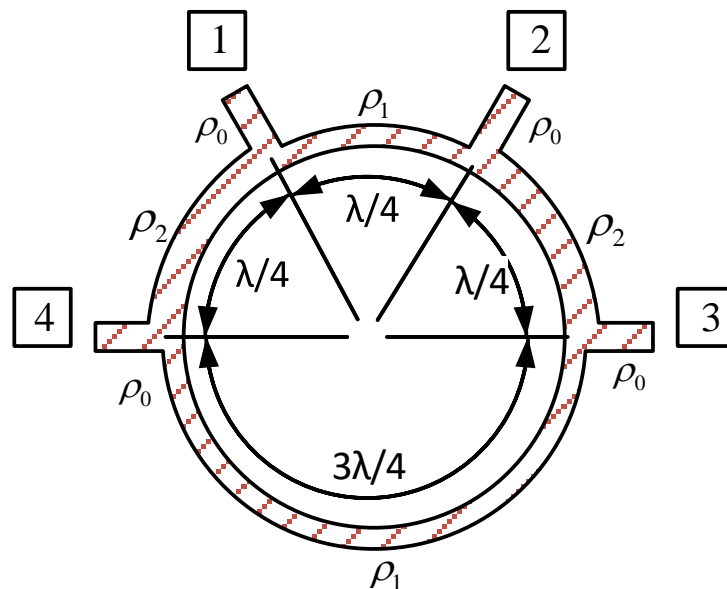
Проект должен быть подготовлен к ЕМ-моделированию, в том числе:

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



## Модель на идеальных линиях передачи

Кольцевой направленный ответвитель общего вида (Rat-Race Coupler, кольцевой направленный ответвитель) при описании его на идеальных линиях передачи описывается следующим рисунком.




Если ввести коэффициент деления по мощности между основным и ответвленным плечом  $m$ , то нормированные волновые сопротивления участков равны

$$\rho_1 = \sqrt{m+1} \text{ и } \rho_2 = \sqrt{\frac{m+1}{m}} \text{ соответственно.}$$

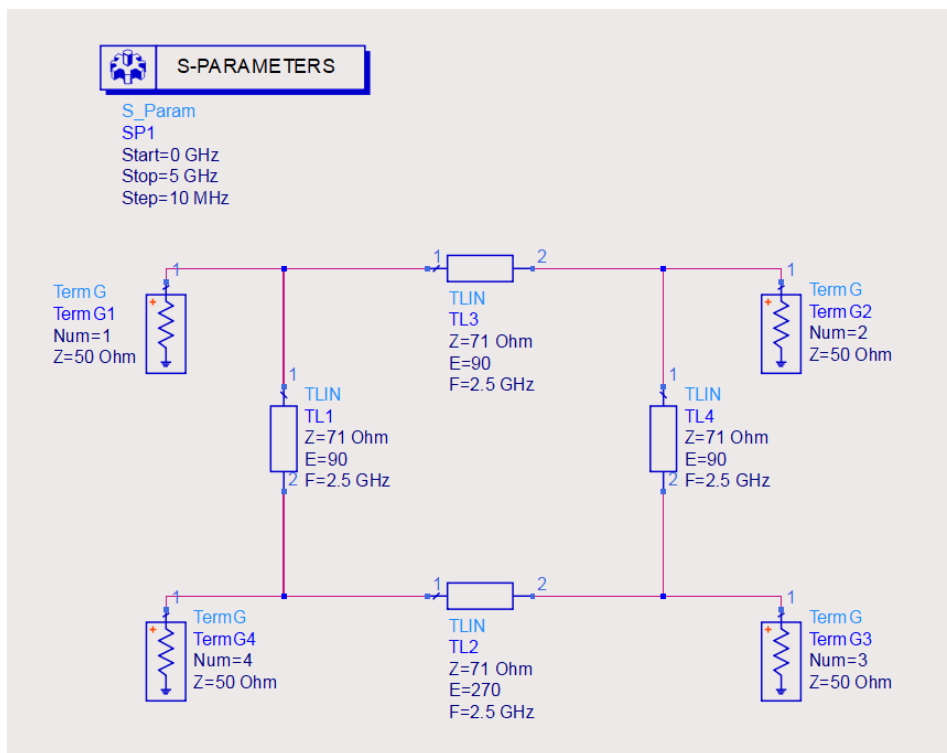
У гибридного кольцевого направленного ответвителя  $\rho_1 = \rho_2 = \sqrt{2}$ . При нормировке на  $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ , ненормированные волновые сопротивления гибридного кольцевого направленного ответвителя  $Z_1 = Z_2 = 71 \text{ Ом}$ .

Пусть кольцевой направленный ответвитель настроен на частоту 2,5 ГГц.

Создаем схему RRCoupler\_Ideal. Собираем на идеальных линиях передачи (модель TLIN )




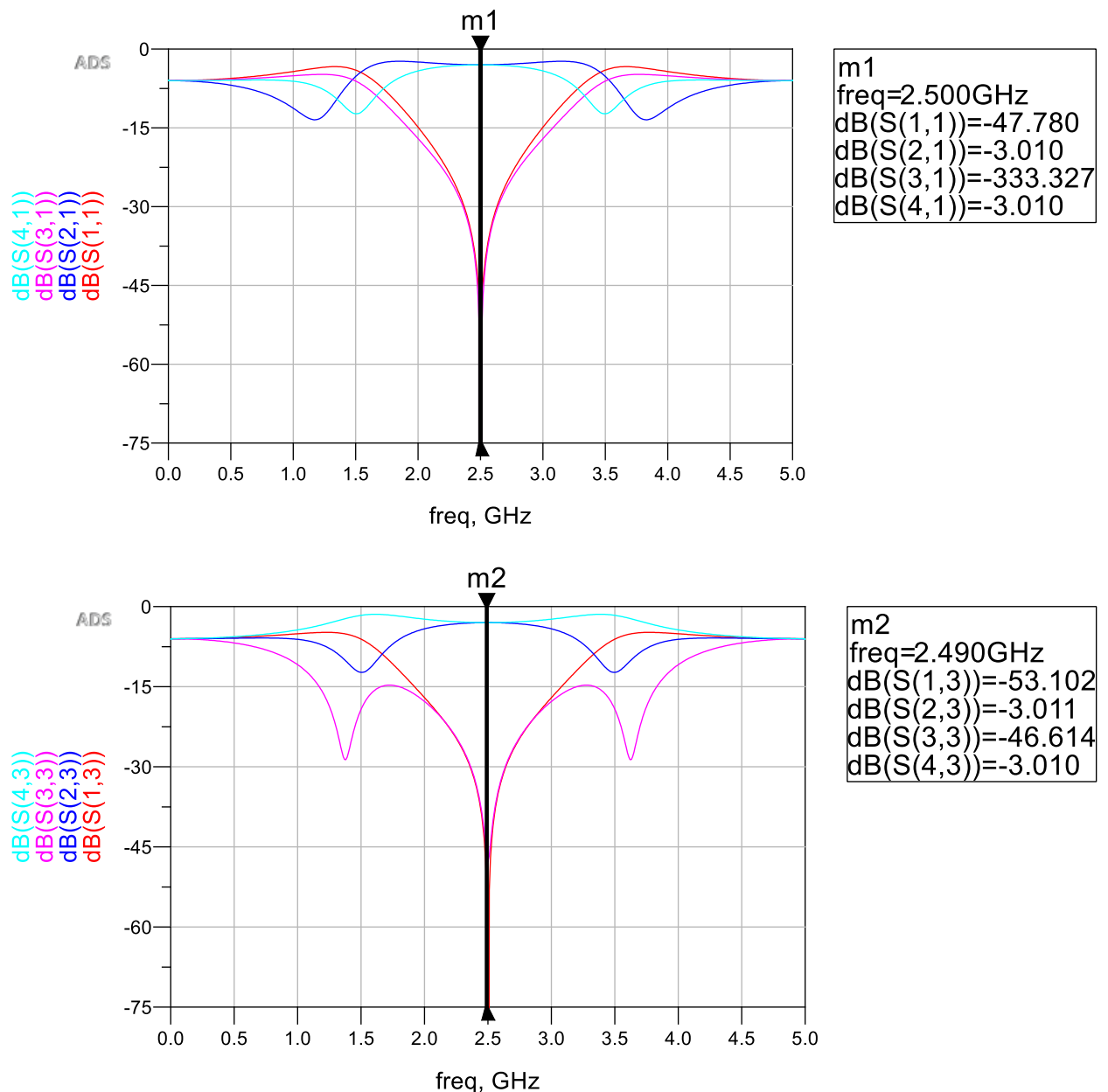
Нужно следить за нумерацией терминаторов Term (свойство Num). Оно определяет порядок обозначений в матрице S-параметров. Эту нумерацию надо будет сохранять одинаковой во всех схемах проекта, чтобы можно было сопоставлять графики.



Запускаем моделирование .

## Lab1

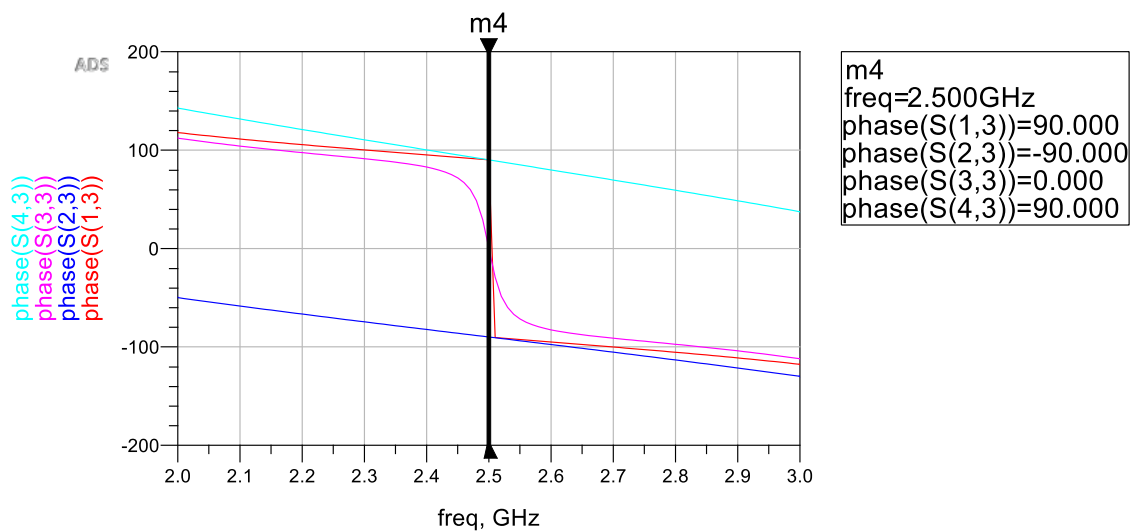
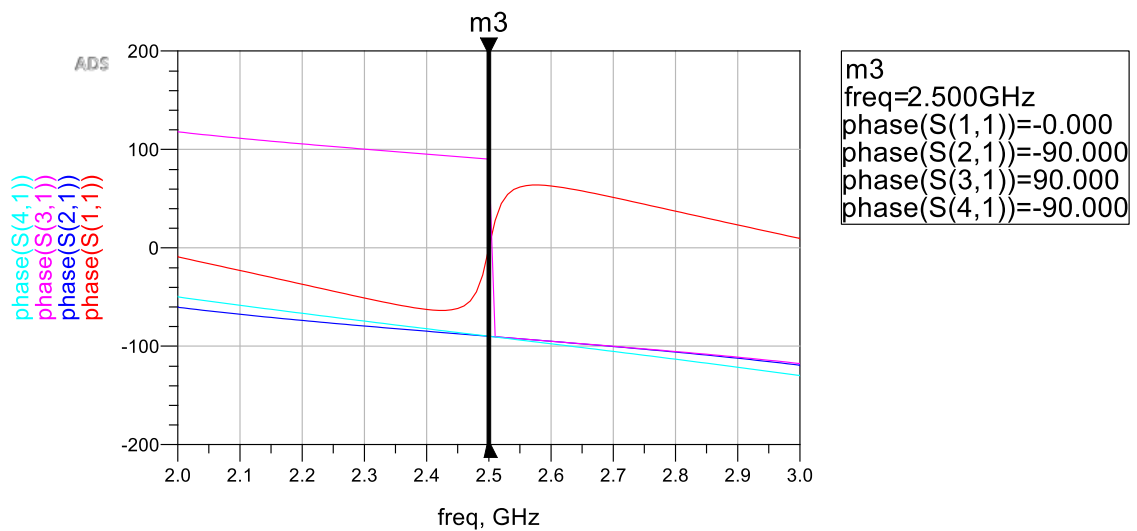
Выводим две пары прямоугольных графиков – одна с амплитудными соотношениями относительно портов 1 и 3, вторая пара с фазовыми относительно тех же портов. Для создания фазовых соотношений надо при выборе комплексных данных выбирать постобработку phase (результат в градусах). Для отображения данных для нескольких графиков воспользуемся линейным маркером .



Для амплитудных соотношений видно, что при подаче сигнала в порты 1 или 3 устройство на центральной частоте:

- имеет очень хорошее согласование по входу dB(S11) и dB(S33) → – 45 дБ;
- рабочие затухания порта 1 dB(S21) и порта 3 dB(S23), и соответствующие переходные ослабления dB(S41) и dB(S43) близки к –3 дБ, т.е. устройство гибридное;
- развязка dB(S31) также большая;
- устройство настроено точно на 2,5 ГГц – видно по положению провала на dB(S11), dB(S33) и dB(S31).





При анализе фазовых соотношений видно:

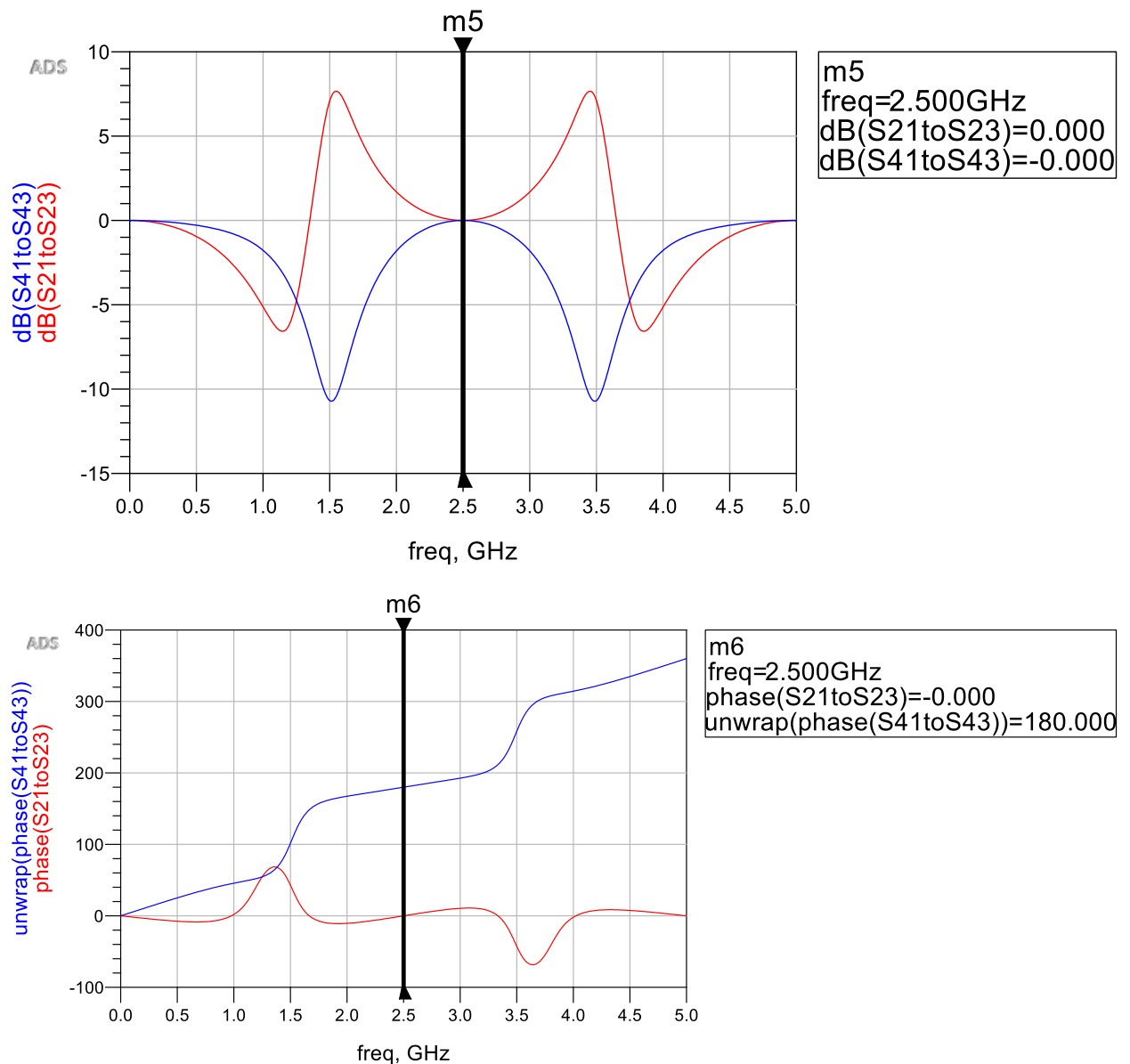
- для порта 1 сдвиг фаз в порты 2 и 4 одинаковый и составляет  $270^\circ$  ( $-90^\circ$ );
- для порта 3 сдвиг фазы в порты 2 и 4 отличается на  $180^\circ$  ( $\text{phase}(S_{23}) = -90^\circ$ ,  $\text{phase}(S_{43}) = 90^\circ$ );
- перегиб ФЧХ коэффициентов отражения  $\text{phase}(S_{11})$  и  $\text{phase}(S_{33})$  и разрыв ФЧХ развязки  $\text{phase}(S_{31})$  на частоте 2,5 ГГц также косвенно говорят о том, что кольцевой направленный ответвитель настроен эту частоту.

Кольцевой направленный ответвитель часто используют для формирования суммарно-разностных сигналов. Пусть сигналы подают на порты 1 (основной вход) и 3 (изолированный вход), а снимают с портов 2 (суммарный выход) и 4 (разностный выход).

Оценим симметричность сигналов. При снятии сигнала с порта 2 это  $S_{21}/S_{23}$ , а при снятии с порта 4  $S_{41}/S_{43}$ . Введём их как выражения и выведем амплитудные и фазовые соотношения (если на фазовом соотношении возникает скачок через  $360^\circ$ , его можно убрать, обернув выражение в функцию `unwrap()`).

$$\text{Eqn } S_{21toS23} = S_{21}/S_{23}$$

$$\text{Eqn } S_{41toS43} = S_{41}/S_{43}$$



По амплитудным соотношениям видно, что на центральной частоте каналы симметричны. А по фазе различаются на  $180^\circ$ . Т.е. при выбранной

схеме включения и нумерации портов, порт 2 будет суммарным выходом, а порт 4 – разностным.

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

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

где  $y_1 = 1/\rho_1$  и  $y_2 = 1/\rho_2$  - нормированные проводимости соответствующих участков (введены выше).

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

**Eqn** CouplingCoeff = 1

**Eqn** Yn\_1 = 1/sqrt(CouplingCoeff+1)

**Eqn** Yn\_2=sqrt(CouplingCoeff/(CouplingCoeff+1))

**Eqn** S\_theor = -j\*{{0, Yn\_1, 0, Yn\_2}, {Yn\_1, 0, Yn\_2, 0}, {0, Yn\_2, 0, -Yn\_1}, {Yn\_2, 0, -Yn\_1, 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.

Таблица будет выглядеть следующим образом.

| S_theor(1,1)         | S_theor(2,1)    | S_theor(3,1)         | S_theor(4,1)    |
|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| <-infinity> / 0.0000 | -3.010 / -90.00 | <-infinity> / 0.0000 | -3.010 / -90.00 |

| S_theor(1,3)         | S_theor(2,3)    | S_theor(3,3)         | S_theor(4,3)   |
|----------------------|-----------------|----------------------|----------------|
| <-infinity> / 0.0000 | -3.010 / -90.00 | <-infinity> / 0.0000 | -3.010 / 90.00 |

Коэффициенты отражения S11 и S33, а также развязка S31 имеют значение по амплитуде  $-\infty$  дБ (поэтому на фазу смотреть не имеет смысла).

Рабочие затухания S21 и S32 и переходные ослабления S41 и S43 равны –3 дБ. По фазовым соотношениям видны суммарный и разностный выходы.

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

$$\text{Eqn } Z_0 = 50 \quad \text{Eqn } Z_1 = Z_0/Y_{n\_1} \quad \text{Eqn } Z_2 = Z_0/Y_{n\_2}$$

| Yn_1  | Yn_2  | Z1     | Z2     |
|-------|-------|--------|--------|
| 0.707 | 0.707 | 70.711 | 70.711 |

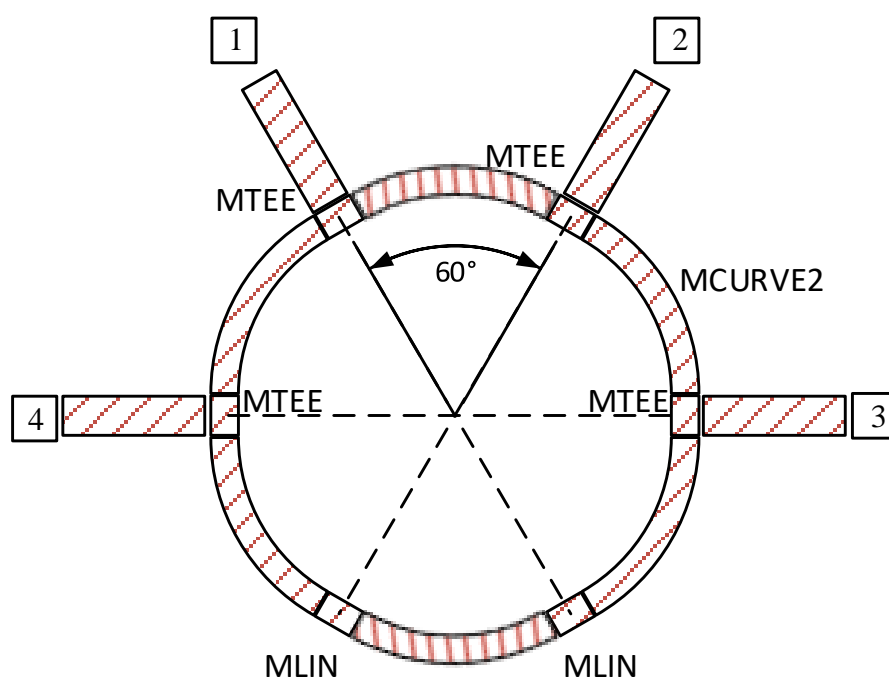
Z1 и Z2 незначительно отличаются от 71 Ом.

### Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении

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

Создаем новую схему RRCoupler\_MLIN\_Sch.

Для того, чтобы сгенерированный схематик можно было превратить в топологию (кольцо замкнулось нормально), разобьём нижнюю дугу на три по  $60^\circ$  и дополнительно внесем два участка MLIN с длиной, равной W50 (для компенсации двух верхних тройников) и шириной W71.



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

Расчет ведем для частоты 2,5 ГГц.

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

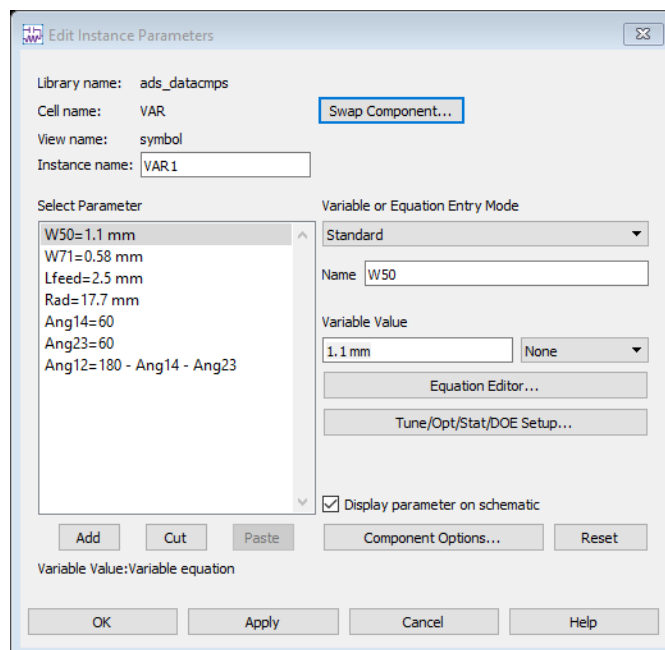
В проектируемом кольце дуги имеют электрическую длину  $90^\circ$ , при этом геометрический угол дуги равен  $60^\circ$  ( $360^\circ/6$  – шесть участков дуг). Волновое сопротивление 71 Ом. Ширина дуг  $W71 = 0,58$  мм. Длина по расчету 18,5 мм. Пересчитаем в радиус (т.к. в компонентах типа MCURVE2 задается радиус дуги).

$$\text{Rad} = \frac{18,5}{2\pi} \cdot \frac{360^\circ}{60^\circ} \approx 17,7 \text{ мм}$$

Участки со стороны портов будем задавать как MLIN шириной  $W50 = 1,1$  мм, небольшой длины  $L_{\text{feed}} = 2,5$  мм.



Чтобы можно поиграться с угловым размером между выводами, введем угловые переменные Ang14 и Ang 23 = 60, задающие угловое расстояние в градусах между парами портов 1-4 и 2-3 соответственно. Для полной симметрии угол между портами 1-2 будет высчитываться из них как  $\text{Ang12} = 180 - \text{Ang14} - \text{Ang23}$ .

Вносим все переменные в блок VAR.



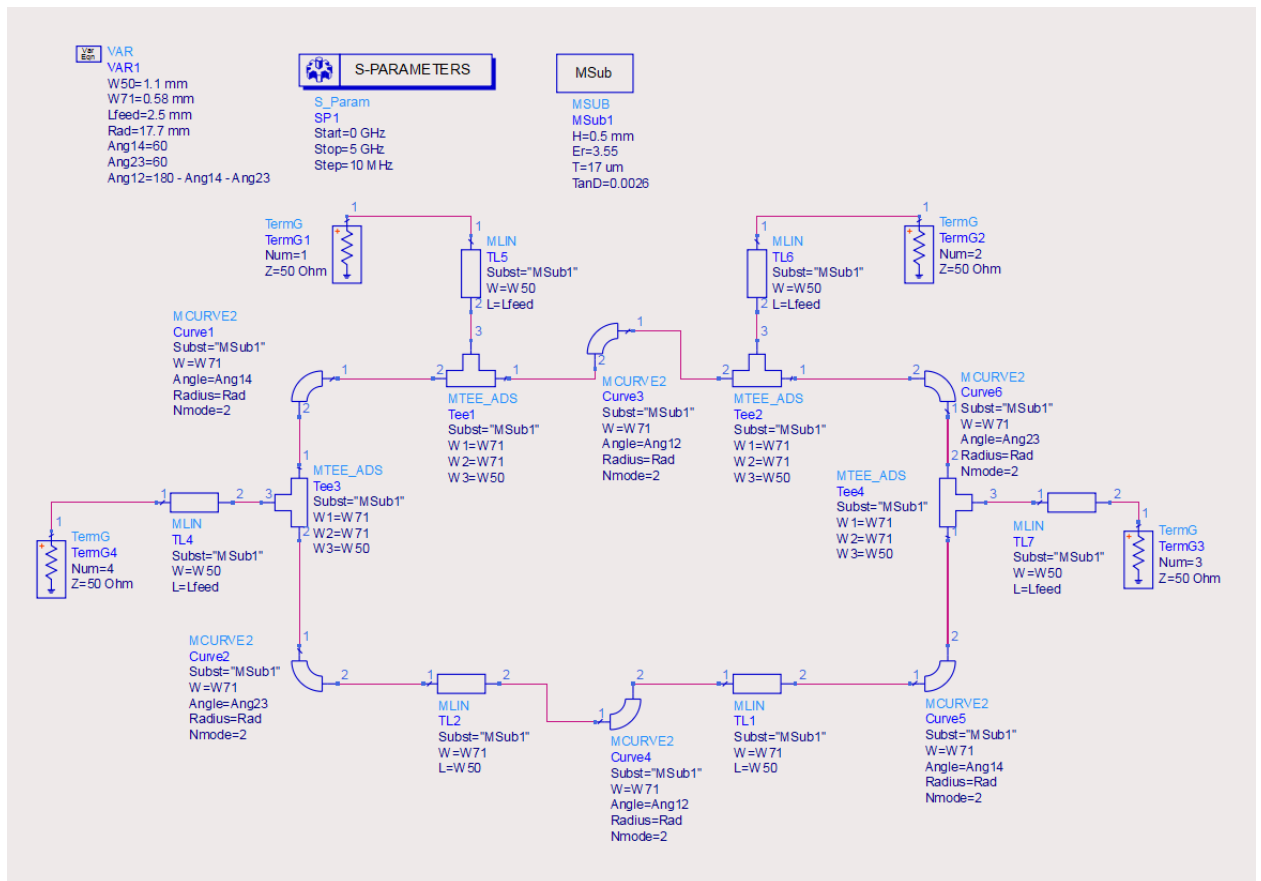
Далее строим схему моделирования на микрополосковых линиях MLIN, дугах MCURVE2 и тройниках MTEE\_ADS.



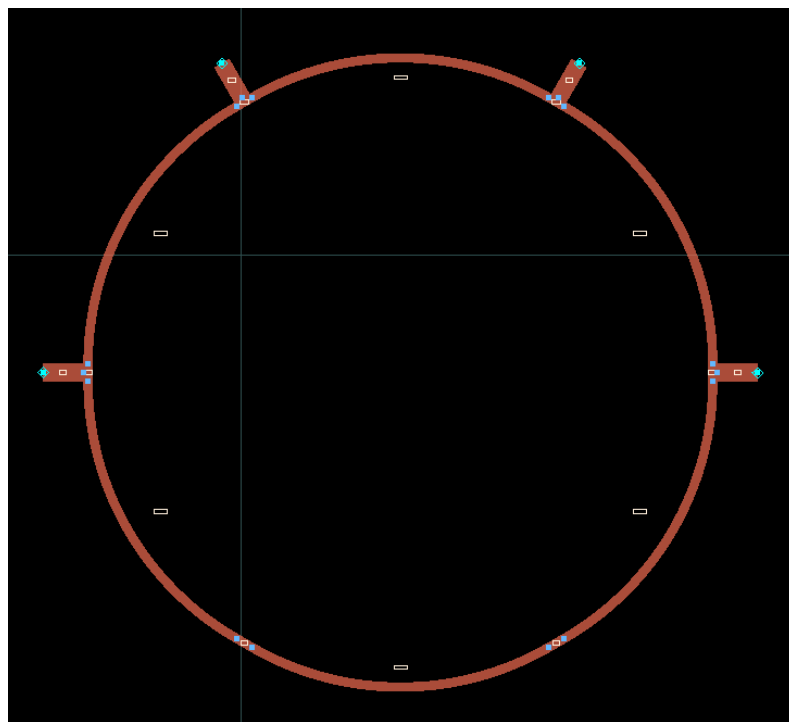
При расположении микрополосковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R). Зеркалить (Mirror About X, Mirror About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению.



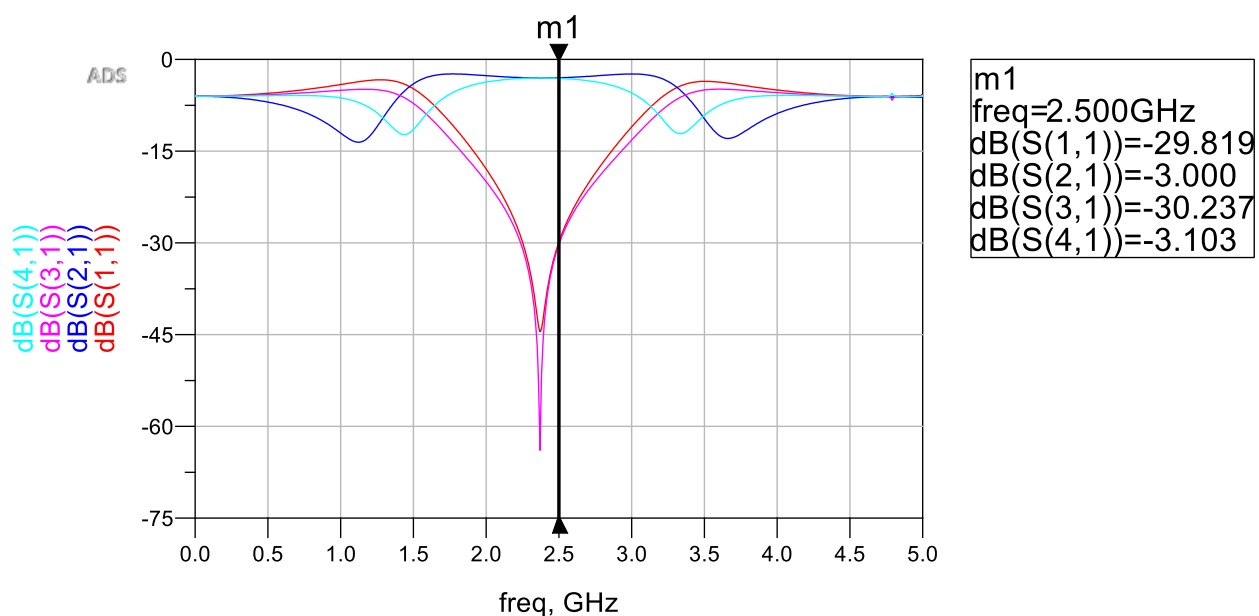
При расположении компонентов можно перемещать привязанную текстовую информацию по ПКМ – Move Component Text (F5), так, чтобы получать чистую и читаемую схему.



Т.к. данная схема довольно сложна и присутствуют взаимосвязанные участки, то лучше сразу после построения схемы по команде Layout – Generate/Update Layout проверить, что топологическое представление корректно (без сохранения топологии).



Запускаем моделирование. В области графиков строим амплитудные характеристики относительно порта 1.



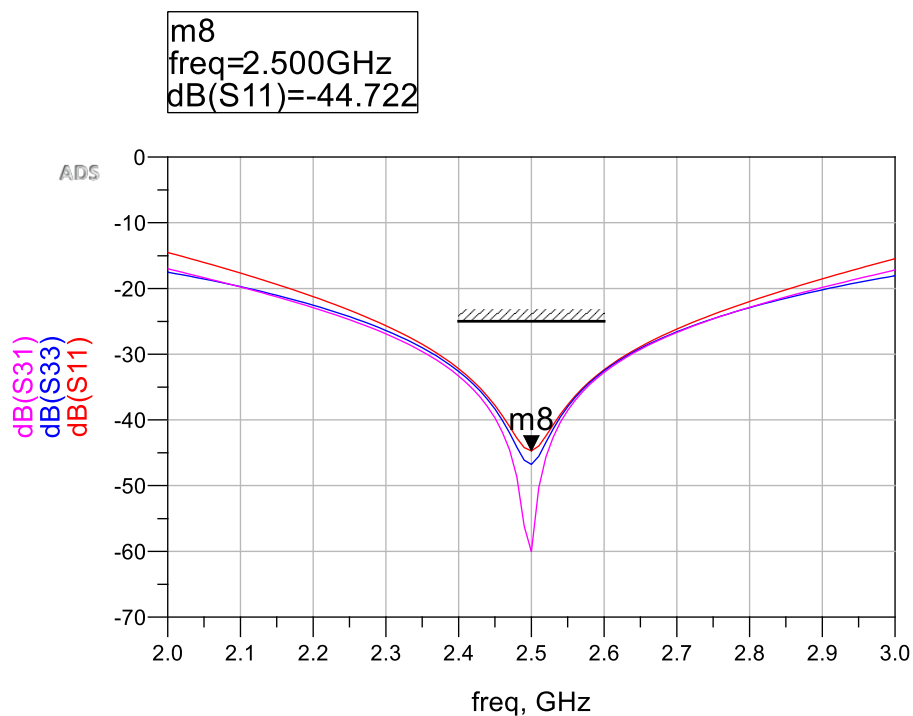
Результаты показывают, что рабочая частота устройства немного уплыла вниз. Связанно это с тем, что были добавлены тройники и их компенсирующие участки. Электрические длины дуг оказались больше, чем нужно.

С помощью инструмента Tune или Optimization настроим кольцевой направленный ответвитель на 2,5 ГГц. Дополнительно настроим его так, чтобы он работал в некотором частотном диапазоне 2,4..2,6 ГГц. Наложим следующие ограничения:

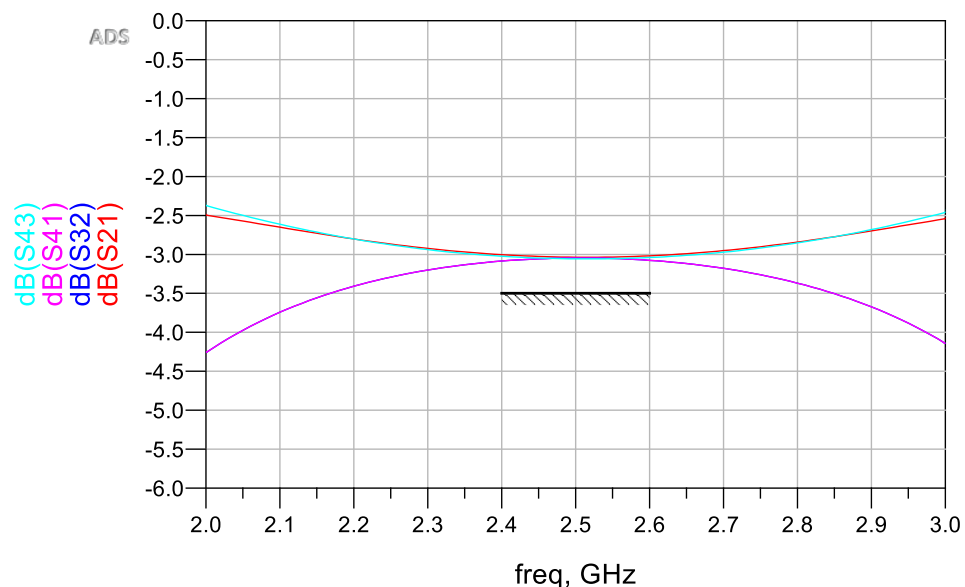
- коэффициенты отражения  $\text{dB}(S_{11})$  и  $\text{dB}(S_{33})$  и развязка  $\text{dB}(S_{31})$  не должны превышать  $-25$  дБ в данном частотном диапазоне;
- положение провалов коэффициентов отражения  $\text{dB}(S_{11})$  и  $\text{dB}(S_{33})$  и развязки  $\text{dB}(S_{31})$  должны быть как можно более к  $2,5$  ГГц;
- рабочее затухание  $\text{dB}(S_{21})$  и  $\text{dB}(S_{32})$  и переходные ослабления  $\text{dB}(S_{41})$  и  $\text{dB}(S_{43})$  не должны опускаться меньше  $-3,5$  дБ;
- на графиках  $\text{dB}(S_{21\text{to}S_{23}})$  и  $\text{dB}(S_{41\text{to}S_{43}})$  не должны отличаться более чем на  $0,5$  дБ в рабочей полосе;
- на графиках  $\text{phase}(S_{21\text{to}S_{23}})$  и  $\text{phase}(S_{41\text{to}S_{43}})$  разница фаз не должны отличаться от  $180^\circ$  более чем на  $5^\circ$  в рабочей полосе;

Имеет смысл работать с переменной Rad с шагом  $0,05$  мм, уходить от номинального значения стоит не более, чем на  $20\%$ . Шириной W71 можно поиграться для возможного расширения полосы за счет уменьшения развязки на центральной частоте. Перекос амплитудных характеристик можно подправить с помощью Ang14 и Ang23, но не более, чем на пару градусов от  $60^\circ$ .

В примере подобранные значения  $\text{Rad} = 16,75$  мм.





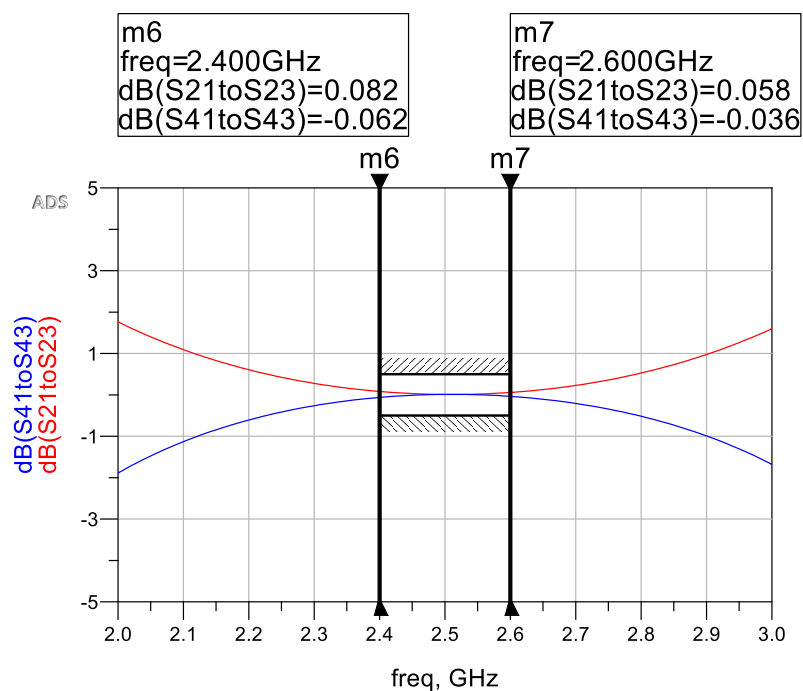


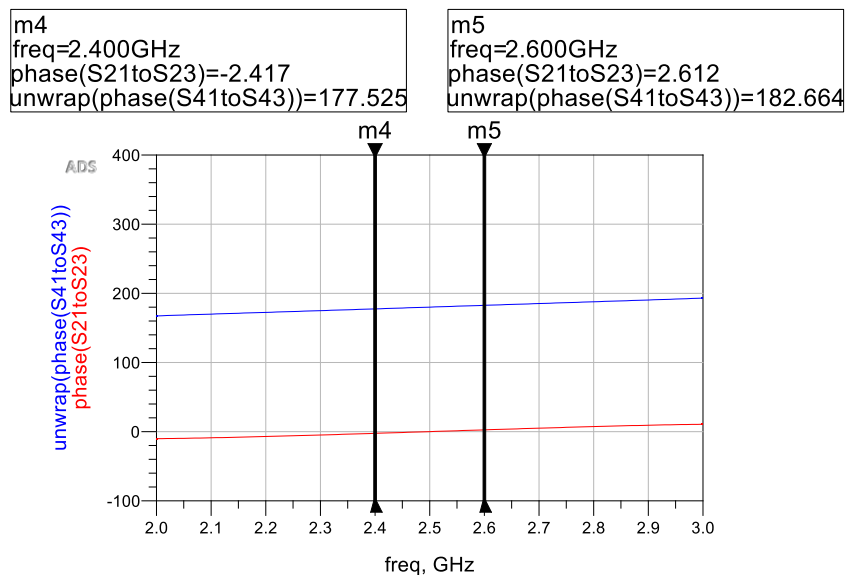
Проанализируем теперь подстроенные результаты.

Как и было запланировано, центральная частота 2,5 ГГц. Амплитудные и частотные характеристики в полосе 2,4..2,6 ГГц соответствуют ожидаемым.

Также проверим стабильность работы кольцевого направленного ответвителя как суммарно-разностного устройства (анализ S21toS23 и S41toS43). Выведем на прямоугольные графики амплитуду в дБ и фазу этих соотношений и поставим маркеры по краям заданного частотного диапазона

$$\text{Eqn } S21toS23 = S21/S23 \quad \text{Eqn } S41toS43 = S41/S43$$





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

### Модель на топологическом уровне

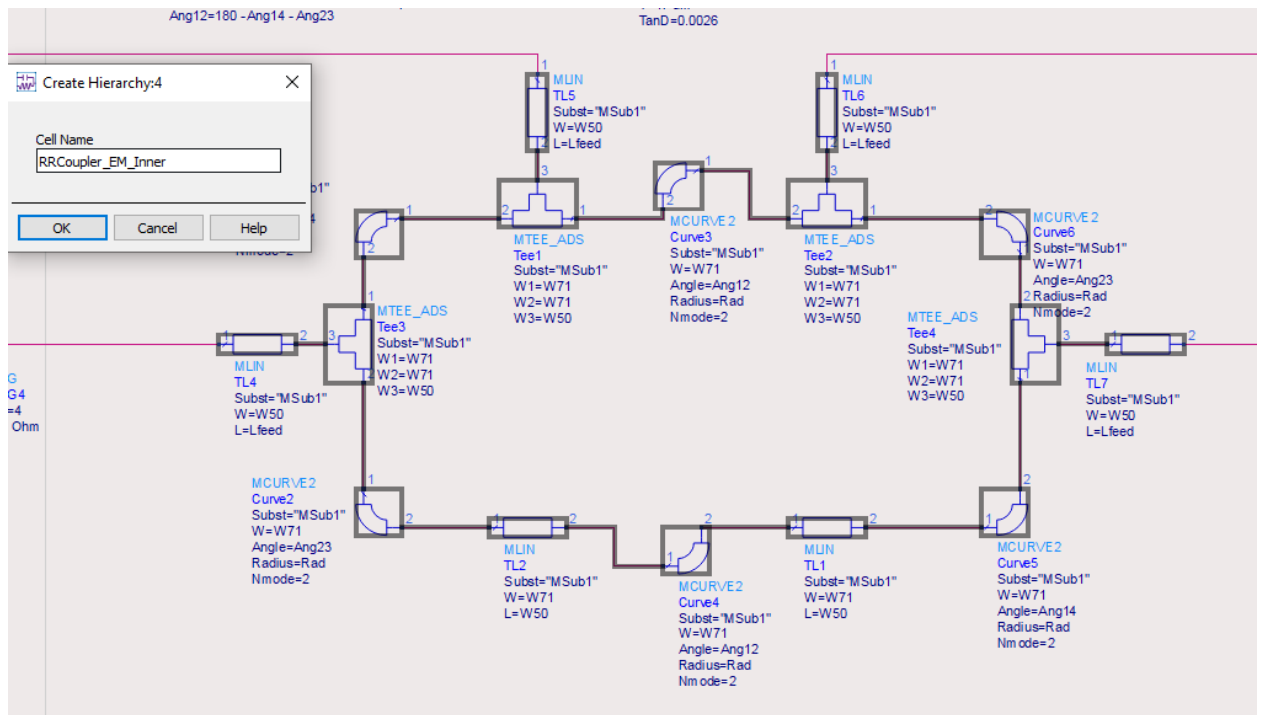
**Lab1** Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Для параметризации топологии надо будет создать двухуровневую схему:

- схема верхнего уровня RRCoupler\_EM\_Top, в которой будет контроллер S-параметров, терминаторы и все измерительные выражения.
- схема нижнего уровня RRCoupler\_EM\_Inner, только с микрополосками (MCURVE2, MLIN и MTEE\_ADS), подключённая наверх через пины.

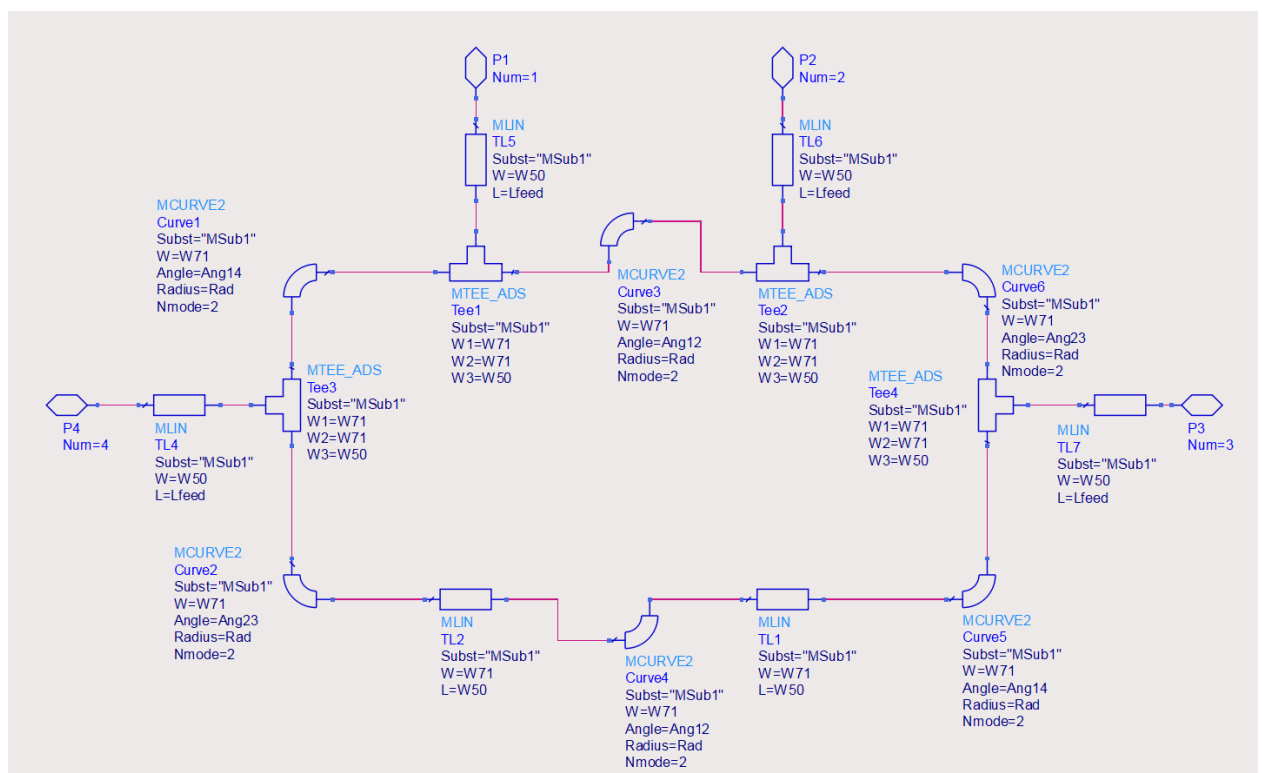
Схему нижнего уровня RRCoupler\_EM\_Inner надо будет сконвертировать в топологию; сделать всю ячейку RRCoupler\_EM\_Inner параметризированной и настроить параметры EM\_моделирования (emSetup).

Далее кратко показаны основные картинки до начала моделирования

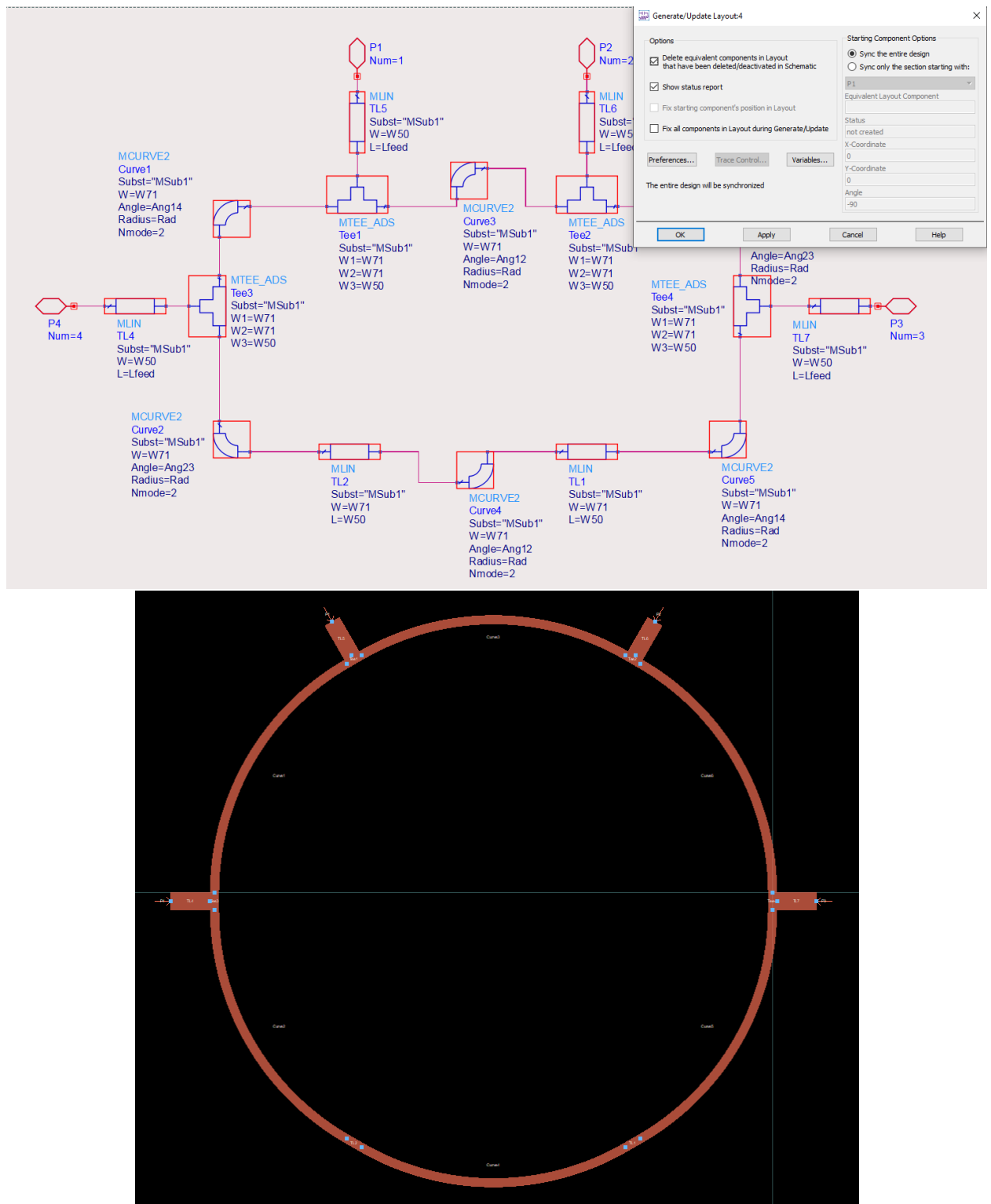
- создание иерархии



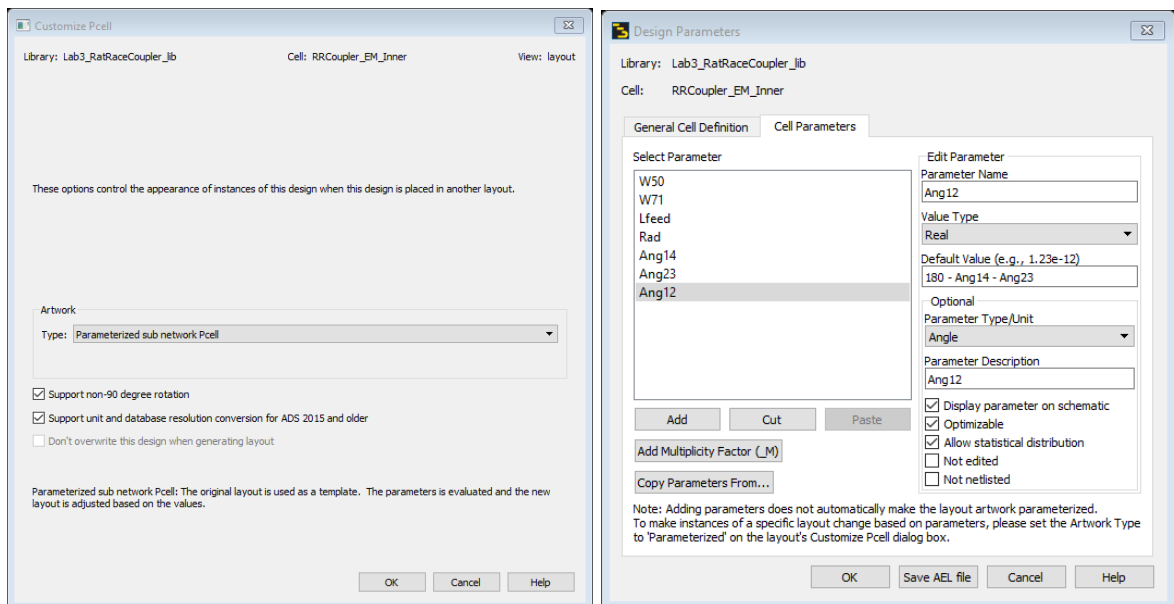
Автоматическое создание иерархий может выставить порядок пинов не в том порядке, как нам удобно. В примере съехала нумерация пинов на один. Нужно эти пины переместить в нужные места (P4 - P1 – P2 - P3 по кольцу).





- генерация топологии подсхемы RRCoupler\_EM\_Inner





- параметризация ячейки RRCoupler\_EM\_Inner (для угловых размеров Ang14, Ang23 и Ang12 нужно выставить угловой тип)





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


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


 **Substrate** - убедиться, что привязана правильная подложка

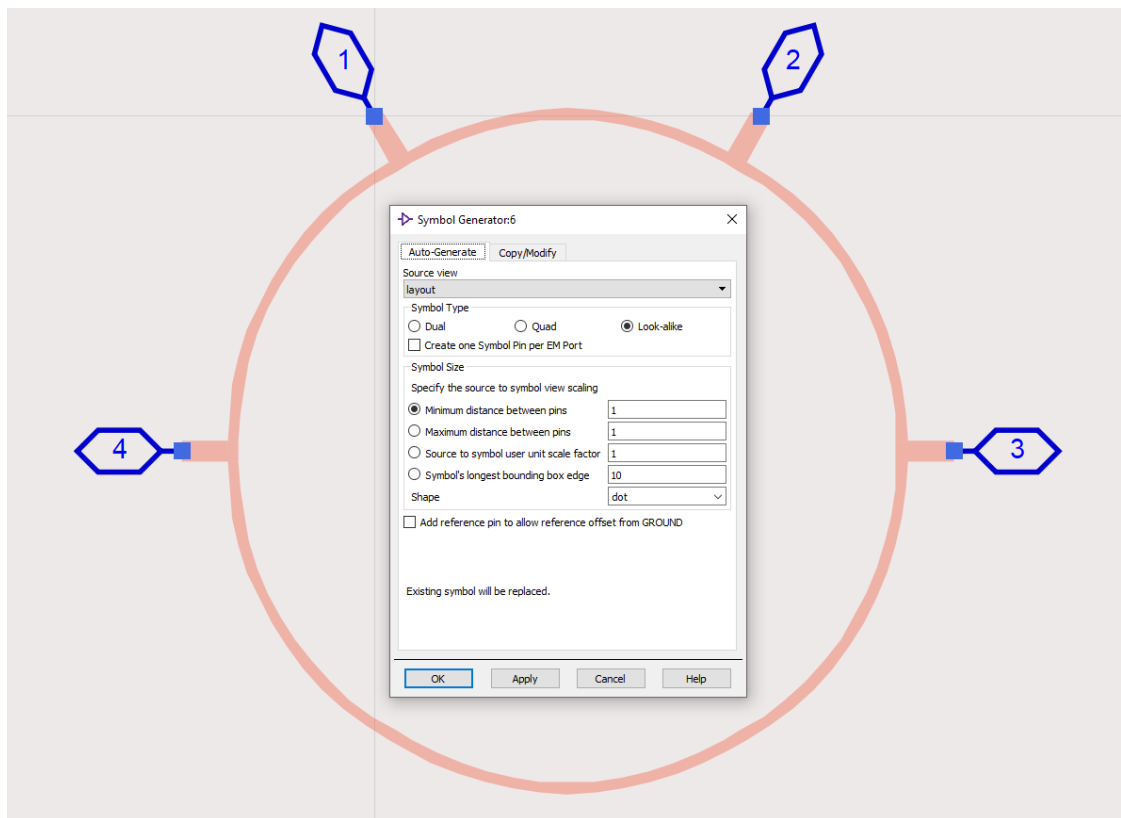
 **Frequency plan** - частотный план адаптивный от 0 до 5 ГГц, плюс точка 2,5 ГГц


 **Output plan** - отключено автоматическое отображение результатов и включено сохранение токов (для возможности визуализации поверхностных токов) для всех расчетных частот.

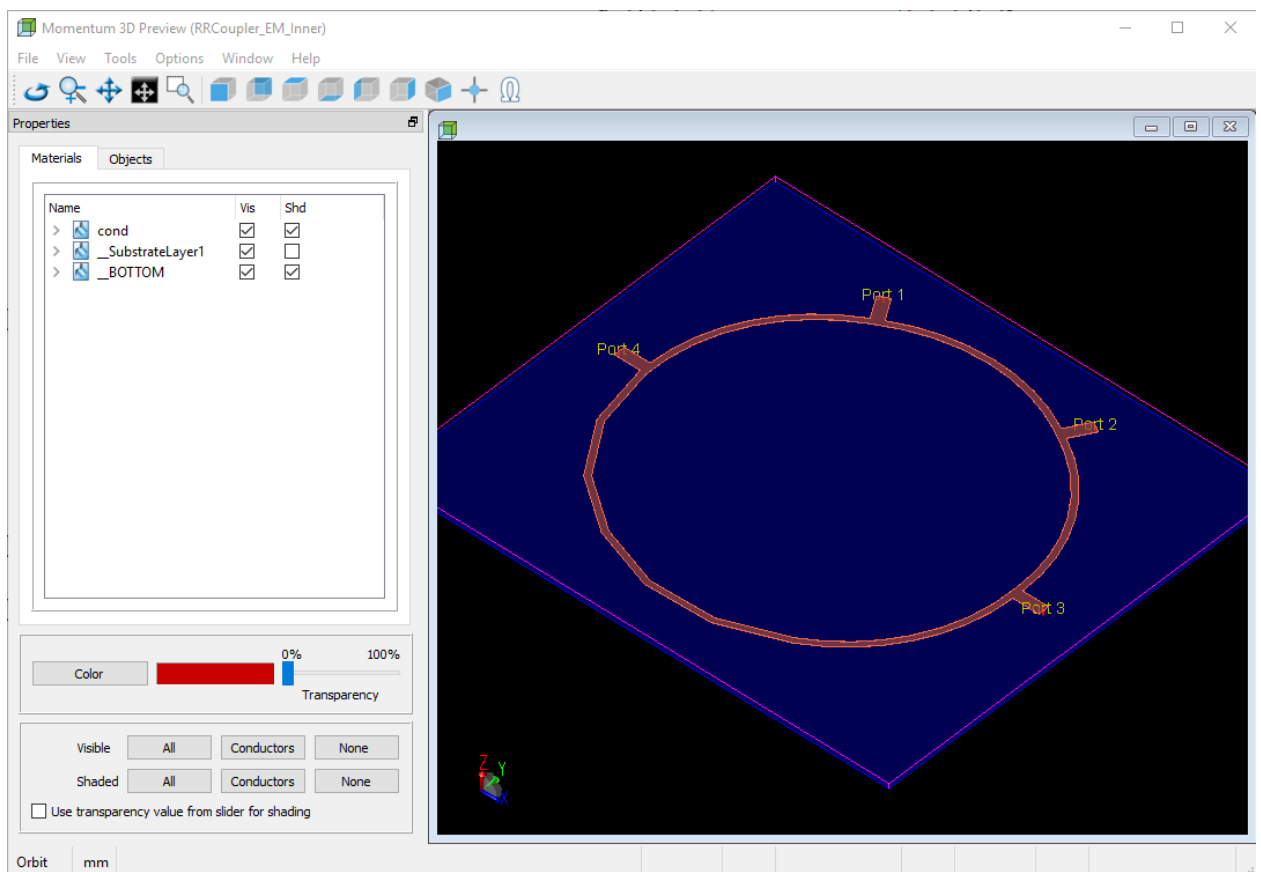
 **Options** - Mesh с точностью 40 ячеек/длина волны и включено автоматическое создание краевой сетки


 **Model** - включено создание и сохранение emModel

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

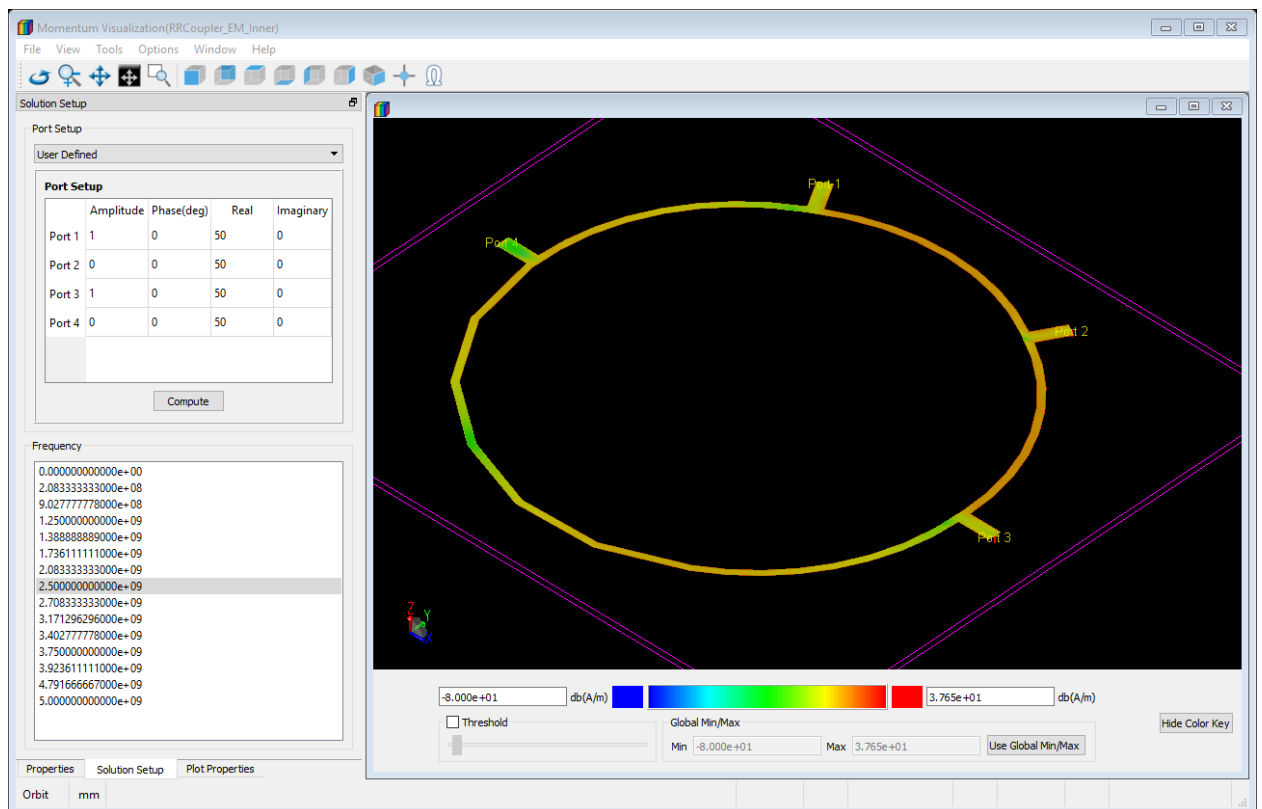


Перед запуском расчета можно по команде Tools - 3D EM Preview  вызвать отдельное окно, в котором будет показано, как будет считаться модель.

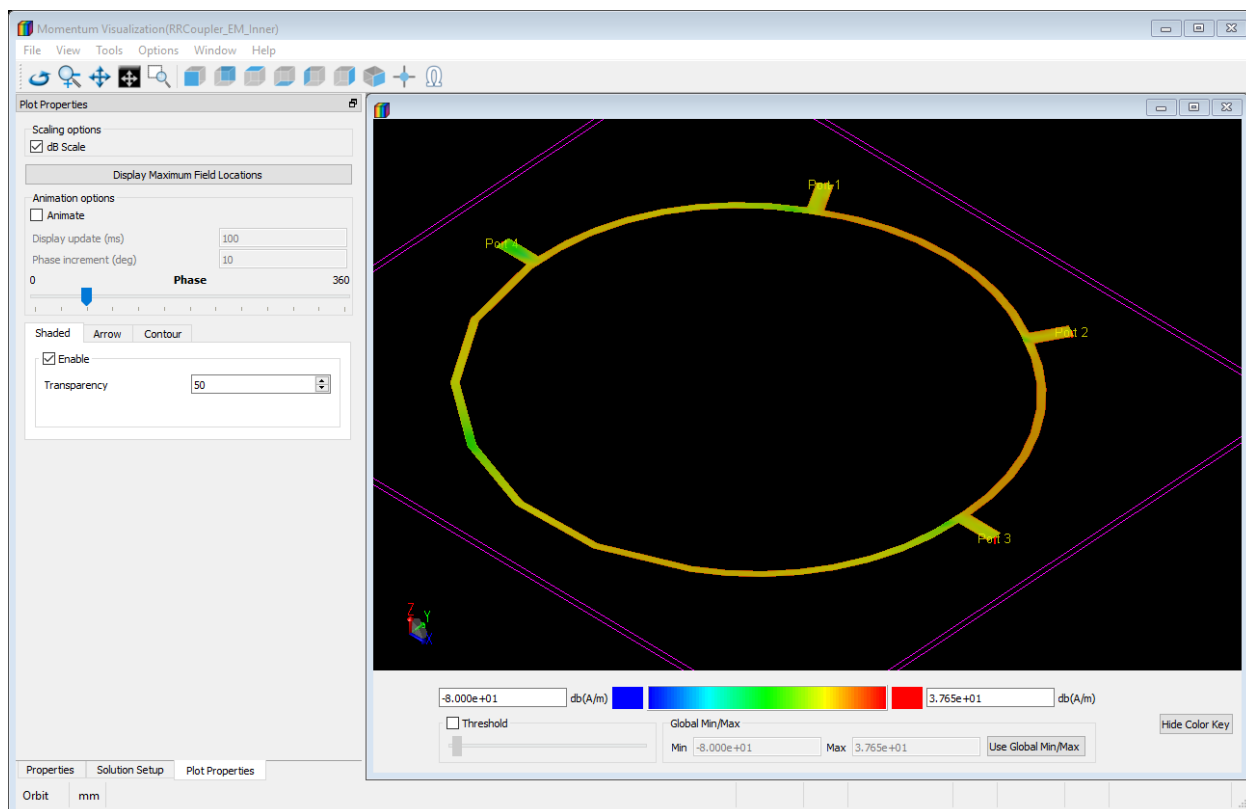


Один раз посчитаем топологию по запуску из текущего emSetup (Generate:S-Parameters). Т.к. в текущей топологии нет переходных отверстий, то посчитается она быстро. После расчета можно по команде Tools – Visualization  открыть окно визуализации результатов. Параметры отображения объектов в нем аналогичны окну 3D EM Preview. Для настройки отображения результатов (поверхностных токов), нужно выполнить две настройки. На вкладке Solution Setup выбрать порт (или комбинацию портов) в списке Port Setup, относительно которого отображать результат и частоту отображения (список Frequency). Список частот соответствует тем частотам, для которых сохранялись поверхностные токи.

Выберем комбинированное отображение относительно порта 1 и 3 (список Port Setup = User Defined и амплитуды на портах по 1) на частоте 2,5 ГГц.

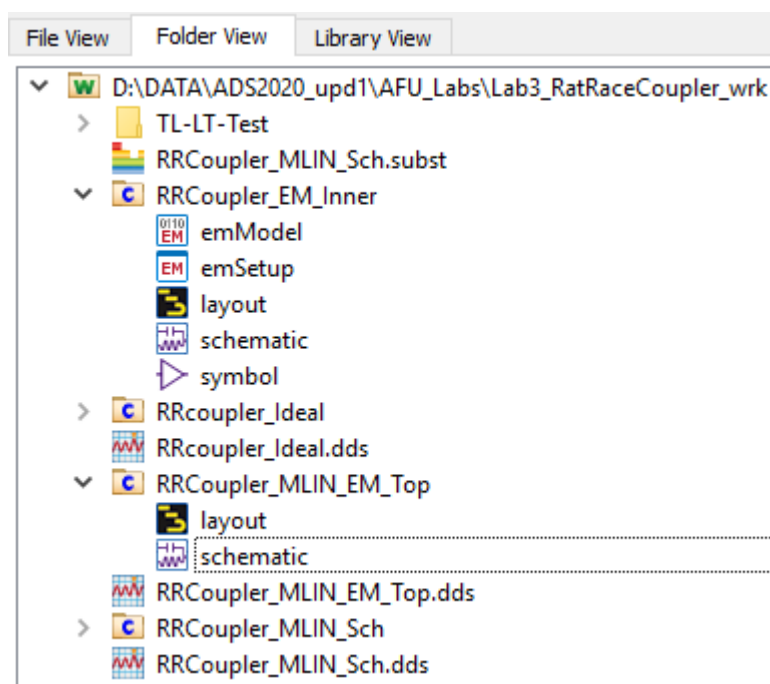


На вкладке Plot Properties включим логарифмический масштаб (галка dB Scale) и включим анимацию поверхностных токов.



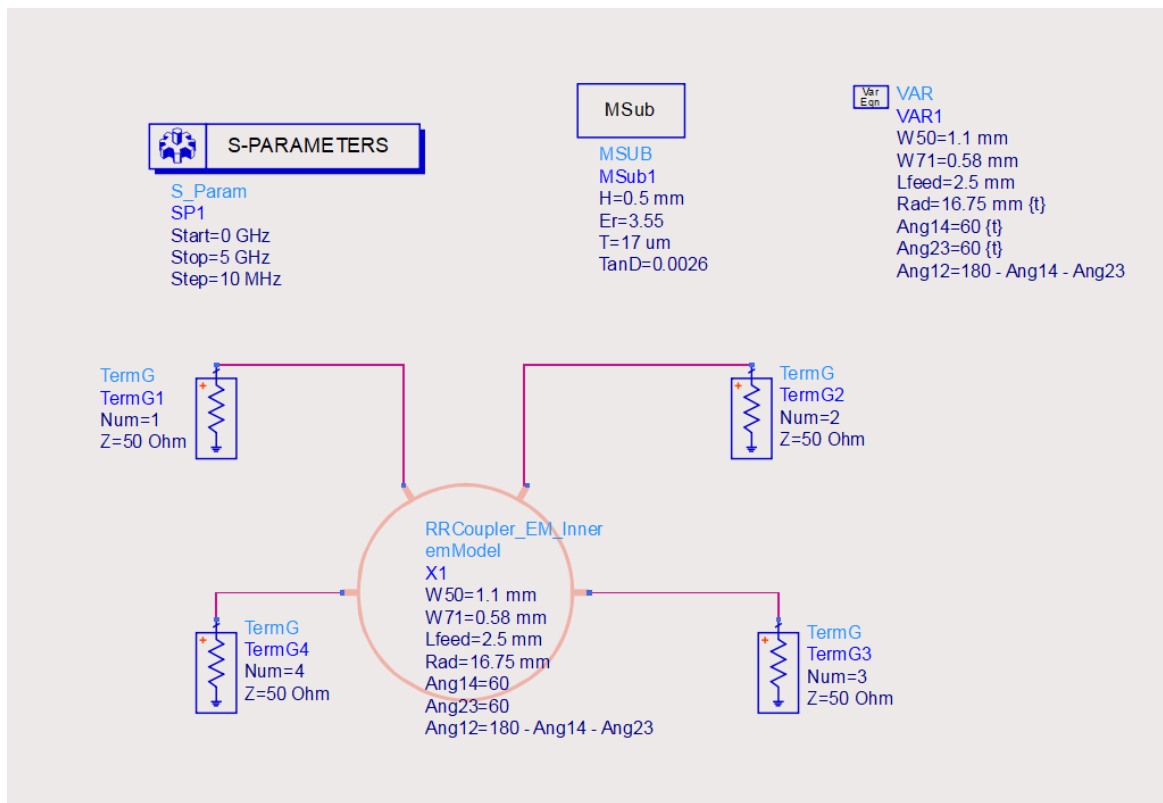
Видно, что на выходы 2 и 4 сигналы переходят со сдвигом  $180^\circ$  (положения зеленых максимумов при разных значениях ползунка Phase).

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



Вернемся в схему верхнего уровня RRCoupler\_EM\_Top.

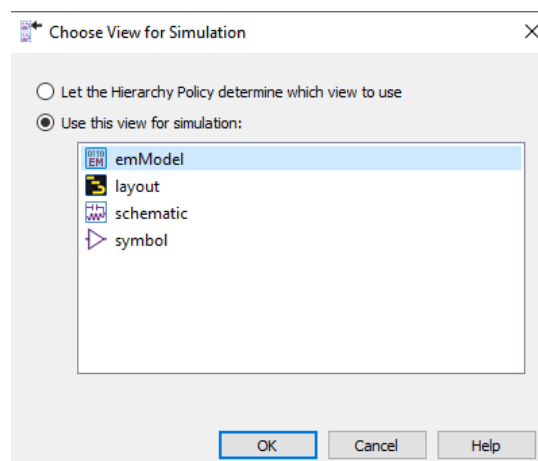




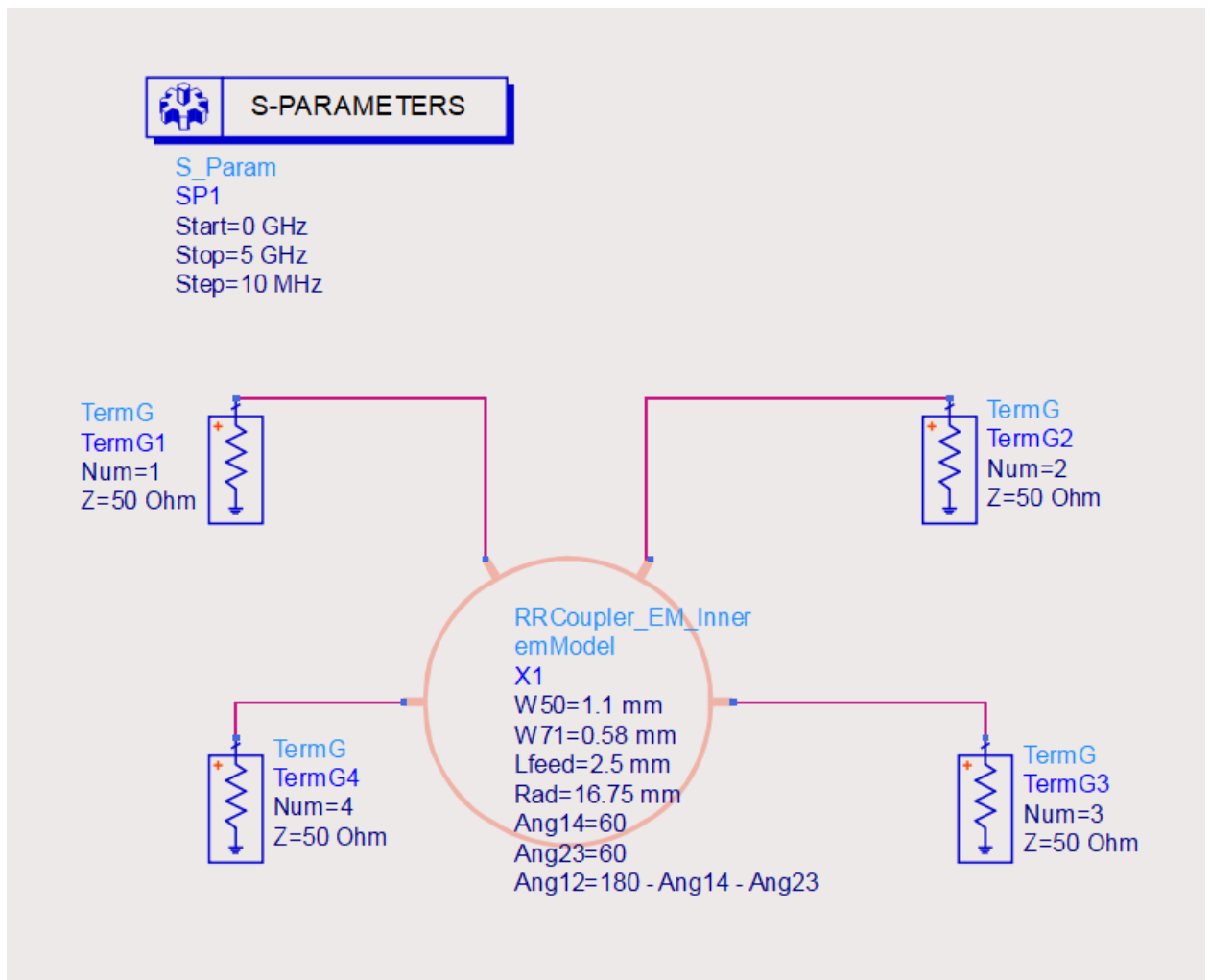
Приведем ее к следующему виду:

## 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.
- проконтролируем положение терминаторов, чтобы можно было сравнивать результаты с предыдущими.
- у подсхемы топологии RRCoupler\_EM\_Inner по ПКМ – Component – Choose View for Simulation установим, что результаты надо брать из emModel.



Общий вид схемы RRCoupler\_EM\_Top получится следующий



Запускаем расчет. Характеристики по сравнению со схемотехническим анализом практически не изменились.

При необходимости можно провести настройку.

### Статистический анализ выхода годных

Проведем статистический анализ выхода годных (Yield) полученной топологии.

Оценим, как будут меняться коэффициенты отражения S11 и S33, развязка S31, и ослабления S21, S32, S41 и S43. Численные значения длин путь могут иметь случайное значение в пределах  $\pm 0,05$  мм (по нормальному распределению). Угловые  $\pm 1^\circ$  (по нормальному распределению).

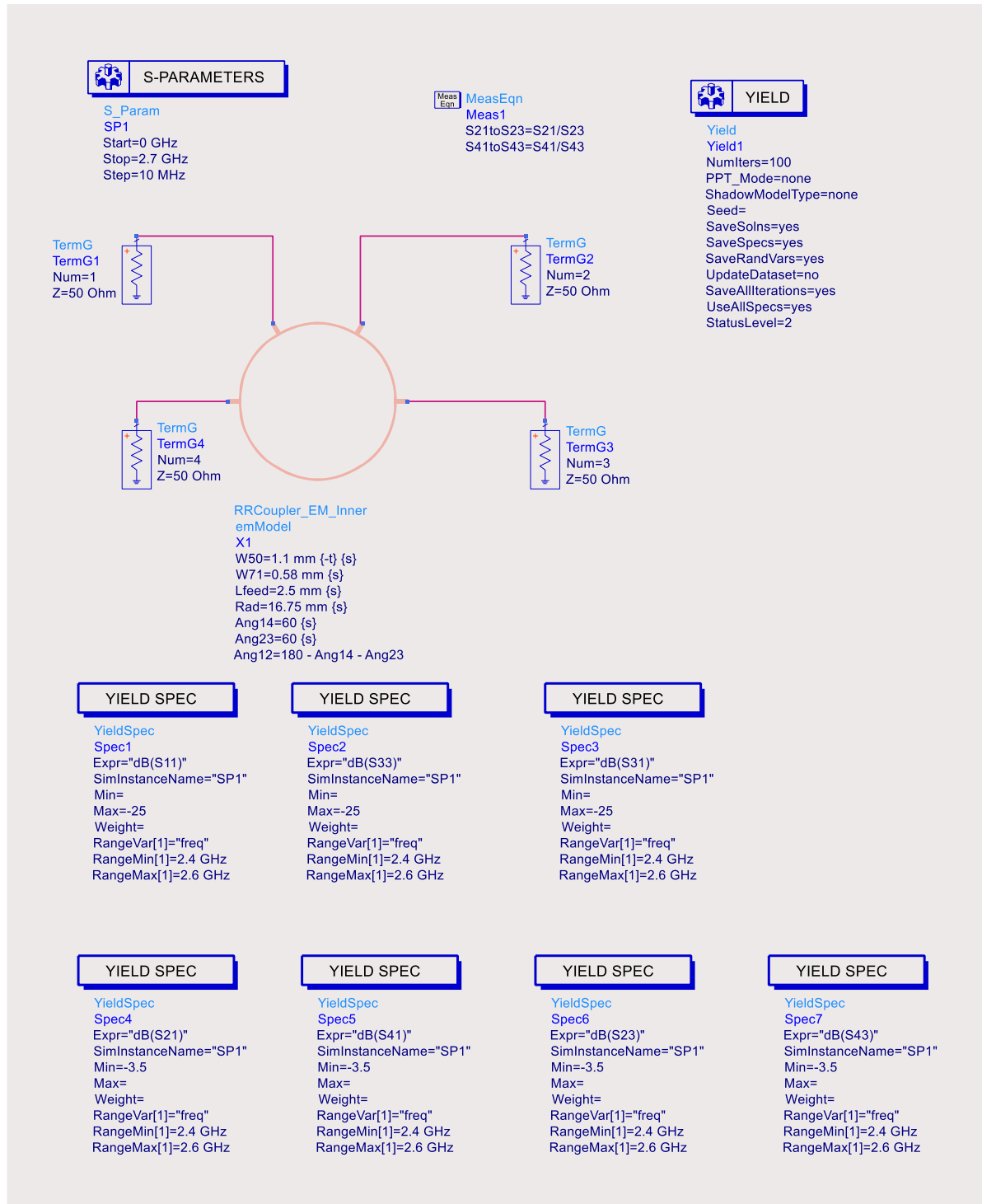
Смягчим требования по рабочему затуханию до -4 дБ.

## Lab1

Создадим копию схемы RRCoupler\_\_EM под названием RRCoupler\_EM\_Yield.

Yield-спецификацию по dB(S11), dB(S33) и dB(S31) установим в пределах max = -25 дБ. Yield-спецификацию по dB(S21), dB(S32), dB(S41) и dB(S43) установим в пределах min = -4 дБ. Все спецификации в частотном поддиапазоне 2,4..2,6 ГГц.

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



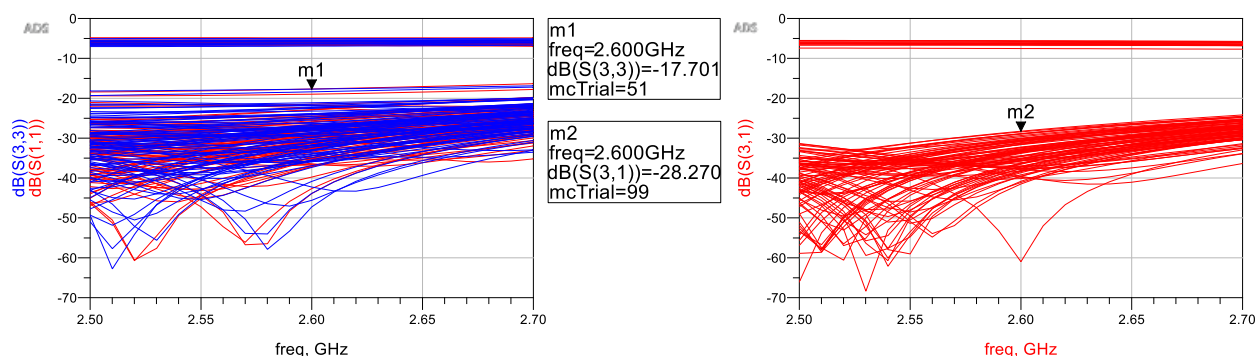
Запускаем расчет. Т.к. при данном расчете при каждом запуске расчета S-параметров будет запускаться подчиненный ЕМ-анализ, весь расчет будет идти довольно долго.

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

| Yield  | NumFail | NumPass |
|--------|---------|---------|
| 62.000 | 38.000  | 62.000  |

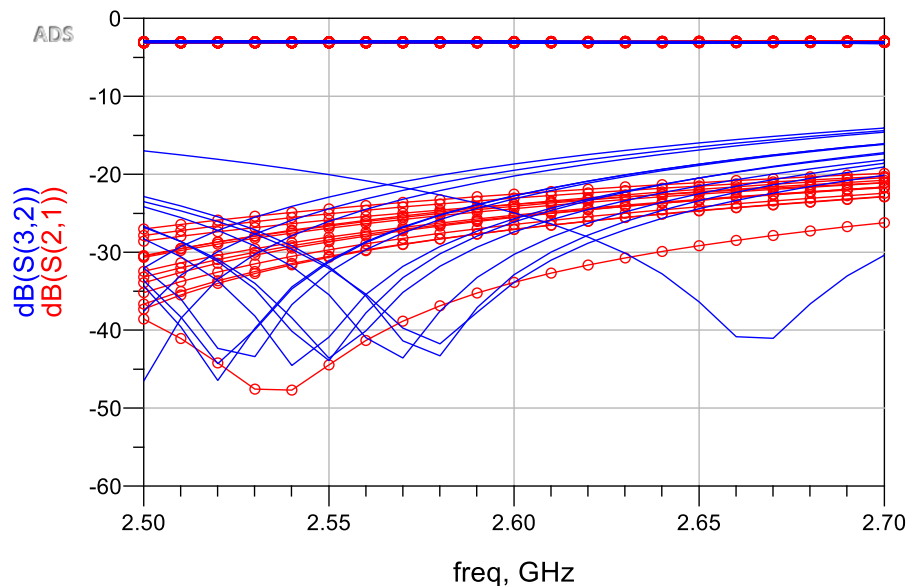
Получается успех всего в 62%. Это маловато, схема чувствительна к точности параметров. Надо проанализировать результаты, чтобы понять, в чем может быть причина проблема.

Выведем значения dB(S11), dB(S33) и dB(S31). Они были сохранены для каждой из попыток. Поставим маркеры на самых плохих результатах.

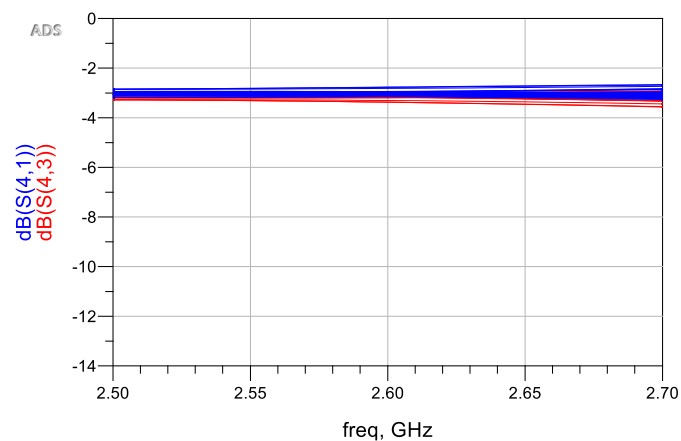


Видно, что кривые явно группируются в два кластера – близко к Yield-спецификации и далеко за ее пределами.

Для коэффициента передачи dB(S21) и dB(S32) кривые группируются аналогично, часть попыток проходит легко, часть нет.



Для коэффициентов передачи  $\text{dB}(S_{41})$  и  $\text{dB}(S_{43})$  попытки проходят всегда.



Нужно понять, точность какого параметра влияет на результативность попыток. Параметры – это  $W_{50}$ ,  $L_{\text{feed}}$ ,  $W_{71}$ ,  $\text{Rad}$ ,  $\text{Ang}_{14}$  и  $\text{Ang}_{23}$ .

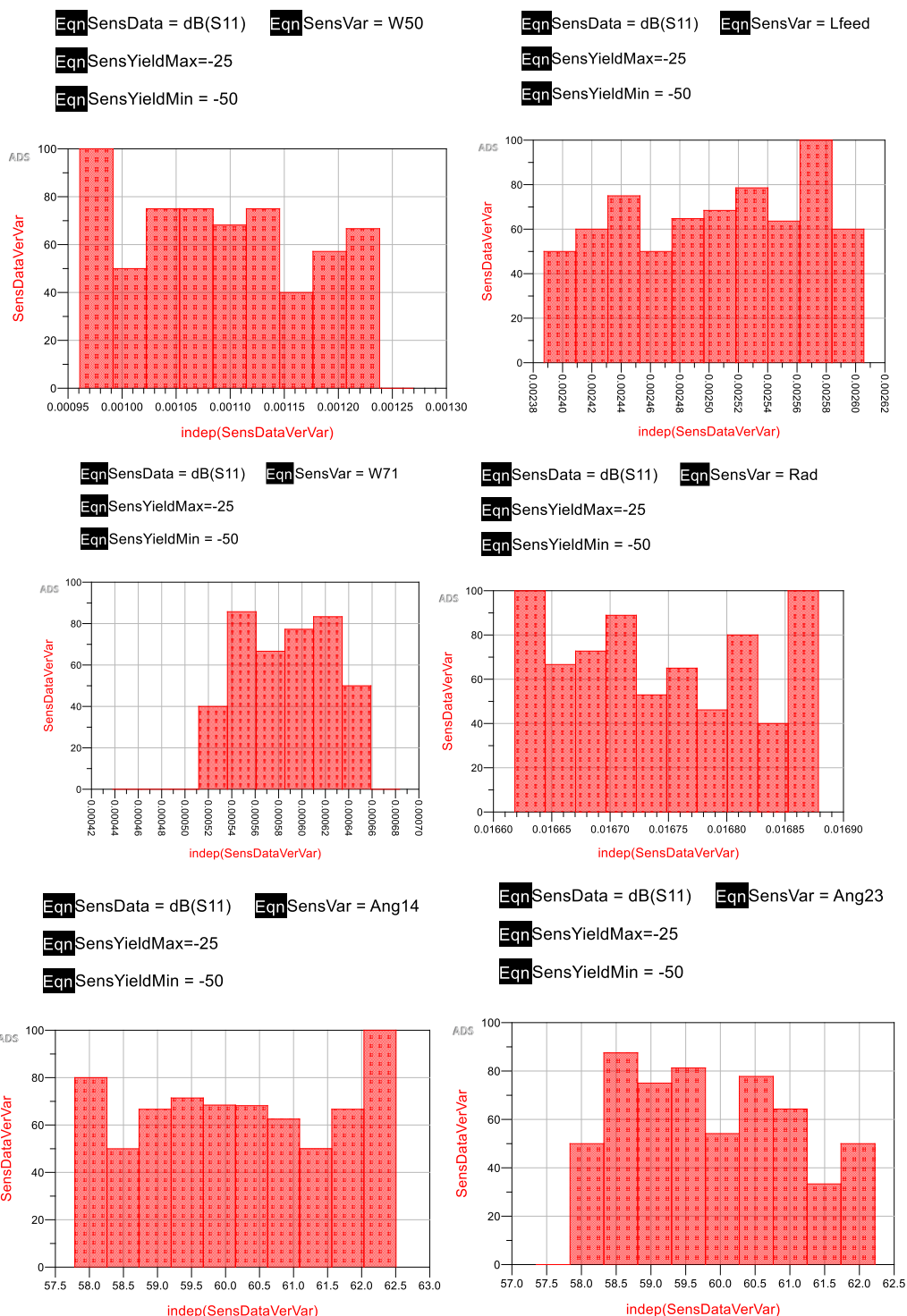
Т.к. по  $\text{dB}(S_{41})$  и  $\text{dB}(S_{43})$  проходят попытки в 100%, то их поведение исследовать не имеет смысла.

Поисследуем чувствительность с помощью функции `histogram_sens()`. Чтобы не создавать множество выражений и графиков, вынесем в отдельные переменные исследуемые данные, их границы, переменную и частотный поддиапазон.

`Eqn`freqMin = 2.4 GHz    `Eqn`freqMax=2.6 GHz    `Eqn`NumBins = 10

`Eqn`SensDataVerVar = histogram\_sens(SensData, SensVar, SensYieldMin, SensYieldMax, freqMin, freqMax, NumBins)

Поведение dB(S11) по списку переменных. Видно, что влияния по W50 и Lfeed нет. По W71 группировка горба вокруг 0,58 мм (номинального). По остальным переменным зависимость слабая, но все группируются вокруг номинальных значений.



Аналогично нужно пройтись по всем остальным переменным и выяснить, какие больше всего влияют на отклик.

### Задание на выполнение

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

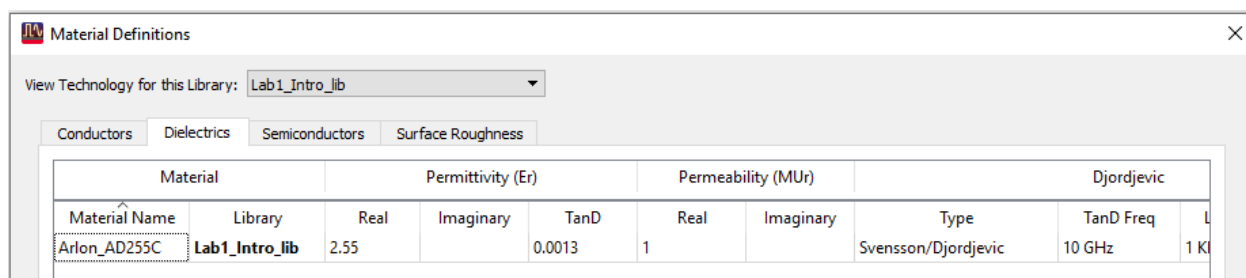
Варианты заданий приведены в таблице 1.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

*Таблица 1. Варианты заданий*

| № Варианта                      |  | 1       | 2      | 3       | 4       | 5       |
|---------------------------------|--|---------|--------|---------|---------|---------|
| Центральная частота $F_c$ , ГГц |  | 9,5     | 6,5    | 5       | 6       | 4,7     |
| Параметры подложки              | Именование материала   | RO3006  | RO3006 | RO4003C | RO4003C | RO4350B |
|                                 | Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , 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      |
| № Варианта                      |  | 6       | 7      | 8       | 9       | 10      |
| Центральная частота $F_c$ , ГГц |  | 4,9     | 6,2    | 4,1     | 2,5     | 4,4     |
| Параметры подложки              | Именование материала   | RO4350B | RO3003 | RO3003  | RO3010  | RO3010  |
|                                 | Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , ед. | 3,66    | 3,0    | 3,0     | 10,2    | 10,2    |
|                                 | Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan D$ , 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. Кольцевой направленный ответвитель на идеальных линиях передачи (ячейка RRCoupler\_Ideal).

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

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

1.2. Промоделировать в режиме S-параметров.

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

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

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



- Для расчета геометрических размеров микрополосков использовать инструмент LineCalc.

- Компоненты брать из палитры TLines-Microstrip.

- Параметры подложки брать из таблицы 1.

- Дополнительно добавить 50 Омные участки длиной около 2-2,5 ширины 50 Ом-ной линии со стороны портов 50 Ом.

2.2. Провести моделирование в режиме S-параметров.

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

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 5\%$ .

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

- а) Коэффициенты отражения  $S_{11}$  и  $S_{33}$  в рабочей полосе менее  $-25$  дБ;

- б) Развязка  $S_{31}$  в рабочей полосе менее  $-25$  дБ;

- в) Рабочие затухания и переходные ослабления  $S_{21}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{41}$  и  $S_{43}$  в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

- г) Центральная частота, на которую настроен кольцевой направленный ответвитель близка к  $F_c$  (контролировать по положению провала на  $S_{11}$ ,  $S_{33}$  и  $S_{31}$ ).

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

2.4. Оценить стабильность работы кольцевого направленного ответвителя как суммарно-разностного устройства ( $S_{21}/S_{23}$  и  $S_{41}/S_{43}$ ) по амплитуде и по фазе.

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

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

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

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

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

### 3.2. Провести ЕМ-моделирование топологии.

- Метод моделирования брать Momentum Microwave.

- Результаты хранить с использованием emModel.

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

- Сравнить результаты с результатами п.2.

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 5\%$ .

- Считать, что кольцевой направленный ответвитель выполняет свою задачу, если выполняются требования, если:

а) Коэффициенты отражения  $S_{11}$  и  $S_{33}$  в рабочей полосе менее  $-20$  дБ;

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

в) Рабочие затухания и переходные ослабления  $S_{21}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{41}$  и  $S_{43}$  в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;

г) Центральная частота, на которую настроен кольцевой направленный ответвитель близка к  $F_c$  (контролировать по положению провала на  $S_{11}$ ,  $S_{33}$  и  $S_{31}$ ).

3.3. Если кольцевой направленный ответвитель не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить его.

4. Анализ выхода годных (ячейка верхнего уровня RRCoupler\_EM\_Yeld, использует созданную ранее подсхему RRCoupler\_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.
- Считать, что угловые размеры могут иметь погрешность  $\pm 0,5^\circ$ , распределенную нормально.
- Модель для исследования брать в топологическом представлении.
- Если расчет одной попытки идет долго, то верхнюю границу диапазона частот моделирования можно сократить  $F_c + 20\%$ .
- Считать, что кольцевой направленный ответвитель выполняет свою задачу, если:
  - а) Коэффициенты отражения  $S_{11}$  и  $S_{33}$  в рабочей полосе менее  $-25$  дБ;
  - б) Развязка  $S_{31}$  в рабочей полосе менее  $-25$  дБ;
  - в\*) Рабочие затухания и переходные ослабления  $S_{21}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{41}$  и  $S_{43}$  в рабочей полосе менее, чем  $3,5$  дБ;
  - г) Центральная частота, на которую настроен кольцевой направленный ответвитель близка к  $F_c$  (контролировать по положению провала на  $S_{11}$ ,  $S_{33}$  и  $S_{31}$ ).

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

4.2. По результатам статистического моделирования провести анализ результатов.

- Если топология имеет процент выхода годных (Yield) меньше 100%, то провести анализ гистограммой чувствительности по параметрам и найти возможное решение для получения более устойчивого решения.
- Если топология имеет процент выхода годных (Yield) близко к 100%, то увеличить возможный разброс значений параметров и провести анализ гистограммой чувствительности по параметрам и найти, какие из параметров начинает влиять на устойчивость решения.

### **Требования к отчёту**

Отчет о выполненной лабораторной работе должен представлять из себя структурированное описание всей выполненной работы, в том числе должен содержать:

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

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

Готовый отчет необходимо экспортировать в pdf.

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

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

По окончании выполнения лабораторной работы и подготовки отчета, отчет и архив проекта надо выложить в ОРИОКС в домашнее задание в дисциплину, привязав к контрольному мероприятию ЗЛР (Защита лабораторных работ). Именование отчета и архива проекта должно давать возможность точно понять, к какой теме лабораторной работы они относятся (Например, AFU\_Lab\_RRCoupler вместо непонятного Lab3 или Workspace3).

### **Задание на самостоятельную работу**

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

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо продумать шаблон отчета, при необходимости внести краткие теоретические сведения, продумать и наметить количество, вид и расположение таблиц и

графиков с измеренными данными. Для получения допуска необходимо подробно изучить теоретический материал.

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

### **Контрольные вопросы**

1. Какая размерность матрицы S-параметров кольцевого направленного ответвителя? Какие есть особенности у этой матрицы?

2. Что такое рабочее затухание кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?

3. Что такое переходное ослабление кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?

4. Что такое развязка (изоляция) кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?

5. Что такое направленность кольцевого направленного ответвителя? Как она определяется из матрицы S-параметров?

6. Как с помощью кольцевого направленного ответвителя можно сформировать суммарно-разностный сигнал? Какие требования при этом нужно наложить на кольцевой направленный ответвитель?

7. В какой части диаграммы Смита на графике  $S_{11}$  должна находиться точка, близкая к рабочей частоте кольцевого направленного ответвителя? Нумерация портов соответствует используемой в работе.

8. Пусть у вас рассчитаны физические размеры микрополосковой линии (электрическая длина  $90^\circ$ , волновое сопротивление  $71 \text{ Ом}$ ) на выбранной подложке на рабочей частоте. Покажите, как нужно рассчитывать геометрические размеры дуг в проектируемом гибридном кольцевом направленном ответвителе.

9. Какие электрические длины должны быть у участков в гибридном кольцевом направленном ответвителе?

10. Какие волновые сопротивления должны быть у участков в гибридном кольцевом направленном ответвителе?

## Литература

1. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2017. — 316 с. — ISBN 978-5-91359-236-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107661> (дата обращения: 02.02.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Microwave Engineering, 4th Edition, David M. Pozar, 2011, ISBN 978-0470631553.

### *Перечень ресурсов сети «Интернет»*

3. Сборник примеров работы в ADS «ADS Example Book: Focused on RF and Microwave Design», доступен после свободной регистрации <https://www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=RU&lc=rus&ckey=2704333&id=2704333&cmpid=zzfindeesof-ads-rfmw-examples>
4. База знаний Образовательного центра Keysight EEsof EDA Knowledge Center, доступен после свободной регистрации, <http://edadocs.software.keysight.com/display/support/Knowledge+Center>
5. Тематический раздел «Rf & Microwave Design» форума electronix.ru, доступен после свободной регистрации, <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=63>
6. Интернет-энциклопедия разработчиков СВЧ-аппаратуры «Microwaves101» <https://www.microwaves101.com>

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

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

### **Разработчик:**

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.