

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»

**По курсу
«Моделирование антенно-фидерных устройств в среде Keysight Advanced
Design System»**

Москва, Зеленоград

2023

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 с 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.

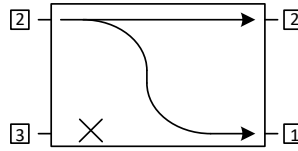
Продолжительность работы: 4 часа.

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.

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

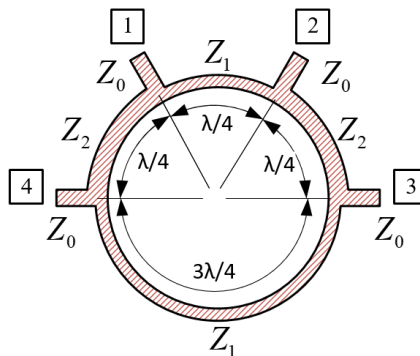
Теоретические сведения

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:

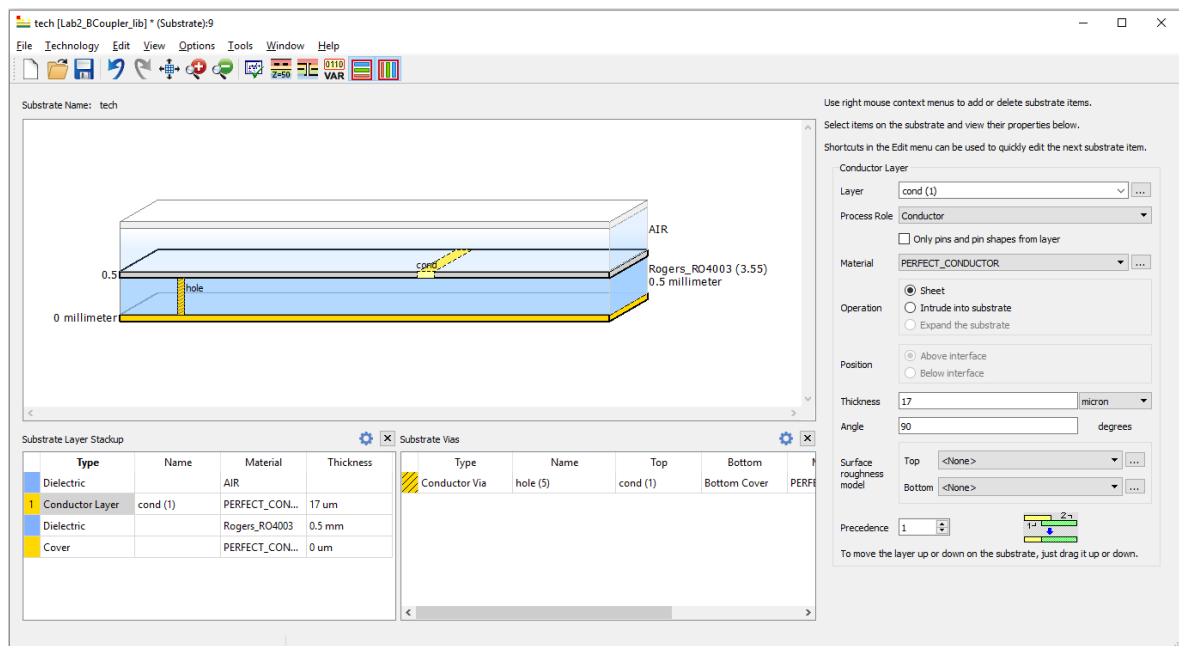
1. Составление модели на идеальных линиях передачи и моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.
2. Преобразование модели на идеальных линиях передачи в схемотехническое представление на заданной ВЧ-подложке с помощью инструмента LineCalc. Моделирование в режиме S-параметров и анализ результатов.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

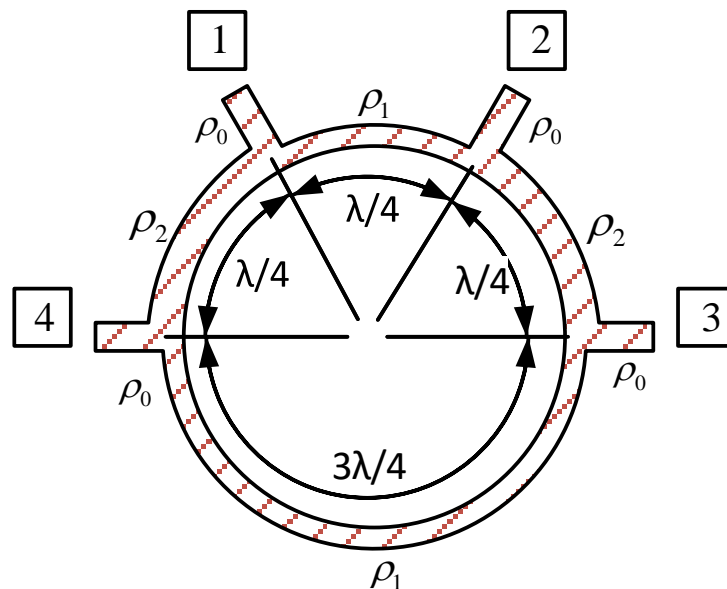
Проект должен быть подготовлен к ЕМ-моделированию, в том числе:

- 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

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

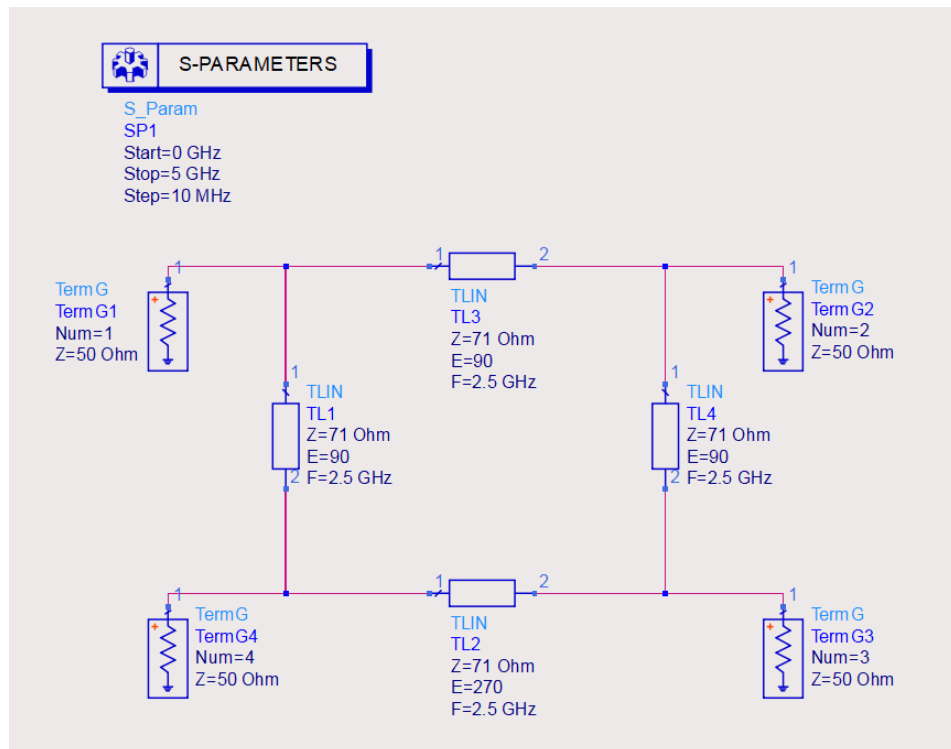
У гибридного кольцевого направленного ответвителя $\rho_1 = \rho_2 = \sqrt{2}$. При нормировке на $Z_0 = 50 \text{ Ом}$, ненормированные волновые сопротивления гибридного кольцевого направленного ответвителя $Z_1 = Z_2 = 71 \text{ Ом}$.

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

Создаем схему RRCoupler_Ideal. Собираем на идеальных линиях передачи (модель TLIN ).




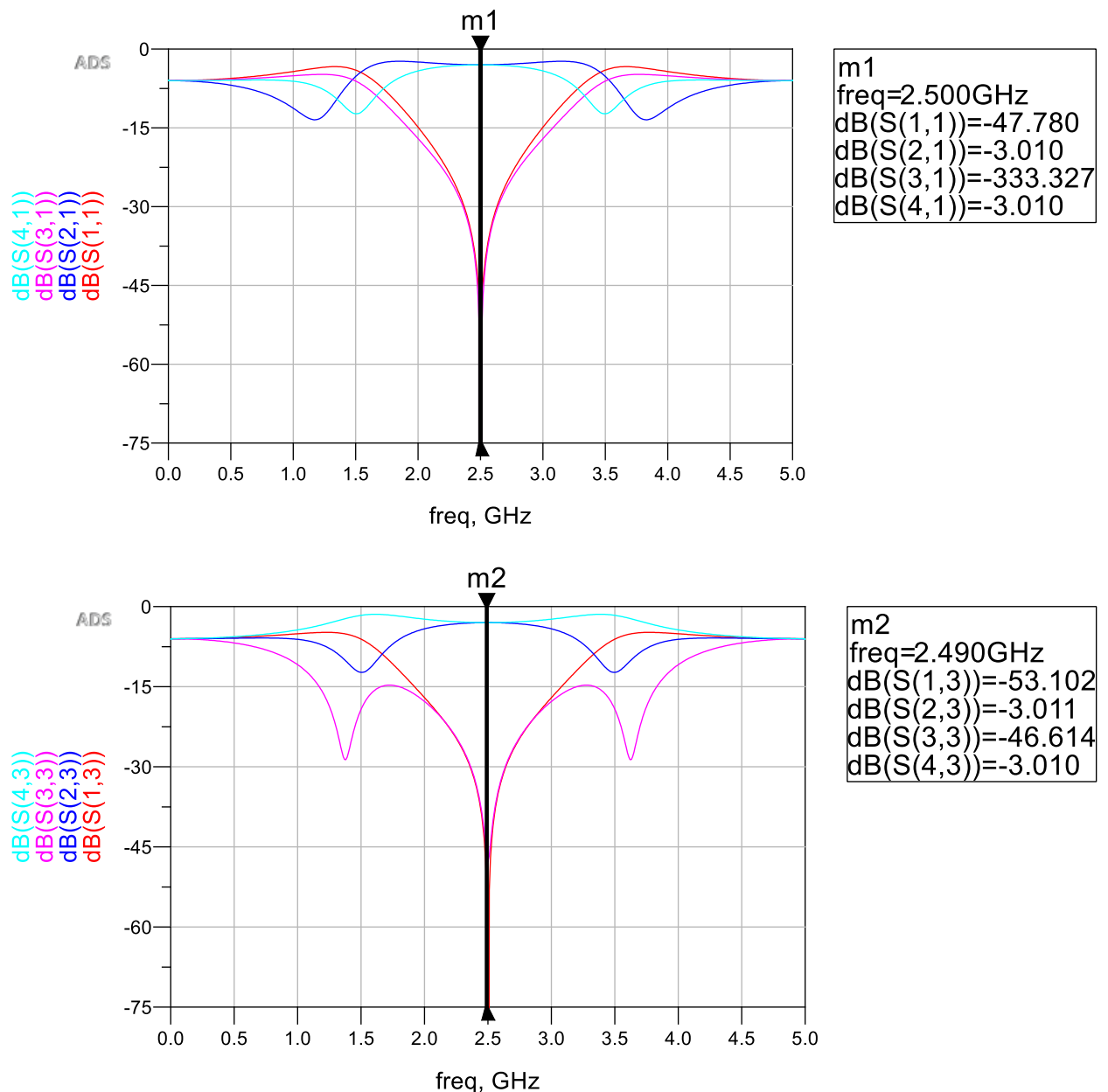
Нужно следить за нумерацией терминаторов Term (свойство Num). Оно определяет порядок обозначений в матрице S-параметров. Эту нумерацию надо будет сохранять одинаковой во всех схемах проекта, чтобы можно было сопоставлять графики.



Запускаем моделирование .

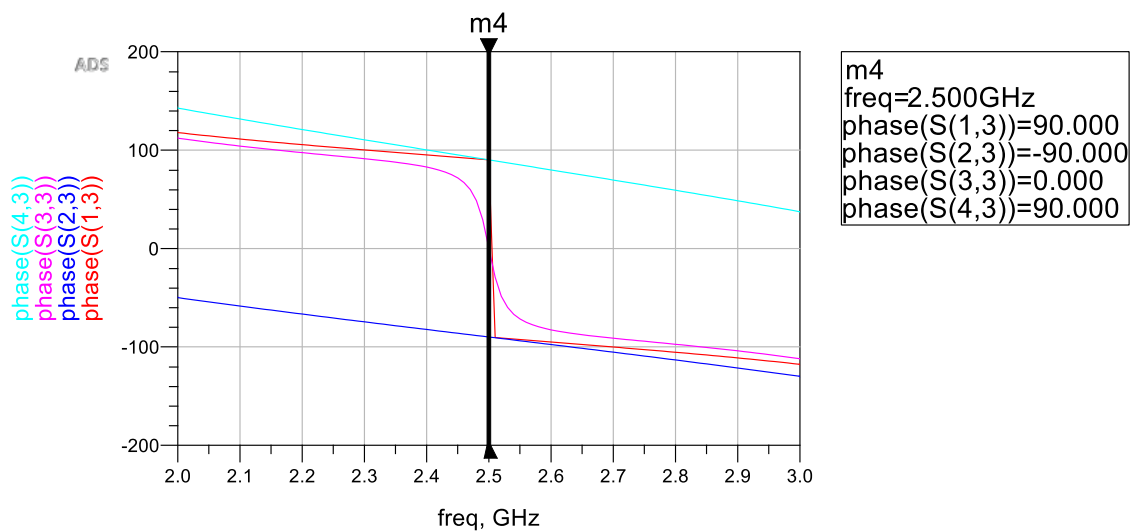
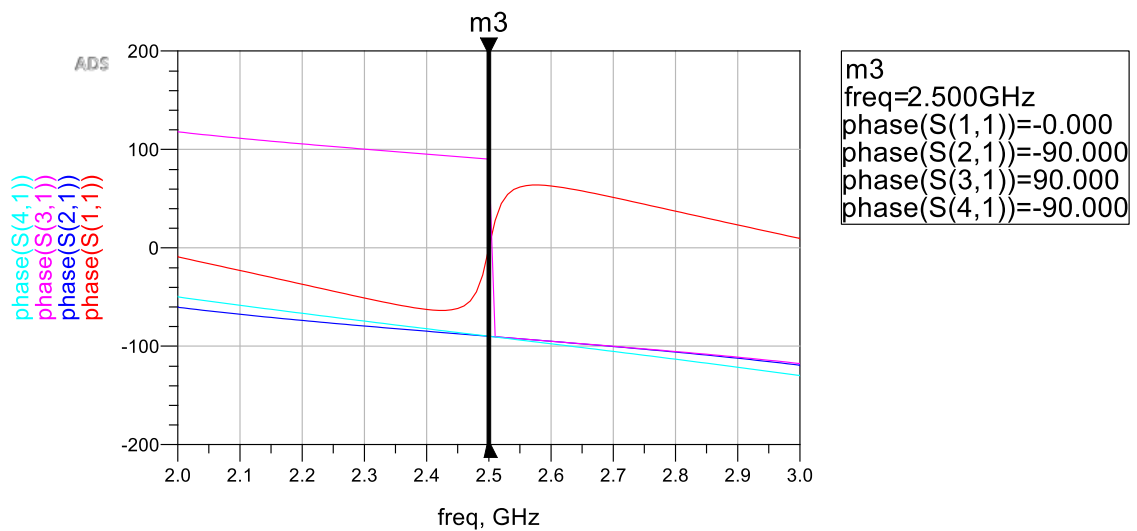
Lab1

Выводим две пары прямоугольных графиков – одна с амплитудными соотношениями относительно портов 1 и 3, вторая пара с фазовыми соотношениями 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:

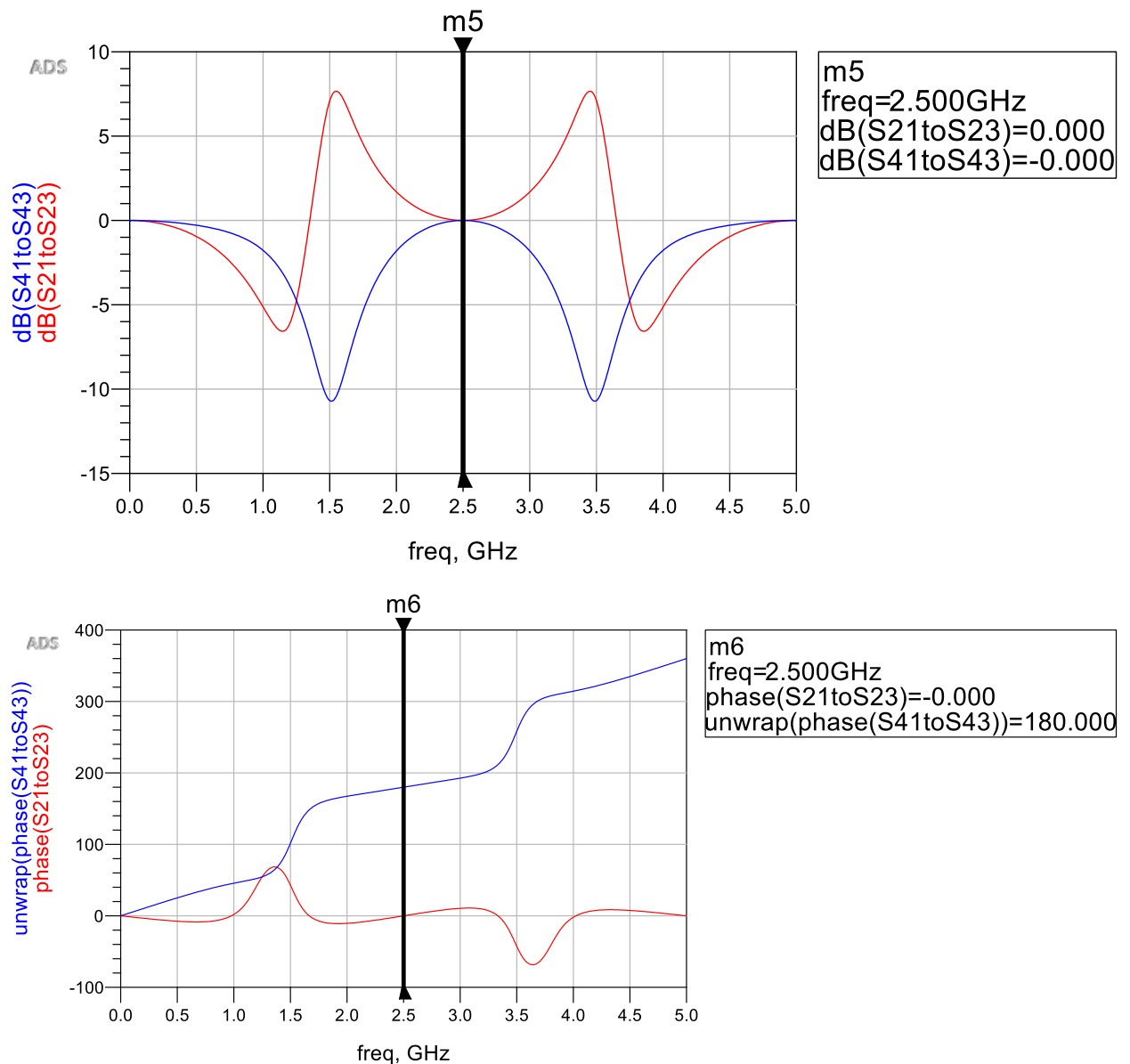
- для порта 1 сдвиг фаз в порты 2 и 4 одинаковый и составляет 270° (-90°);
- для порта 3 сдвиг фазы в порты 2 и 4 отличается на 180° ($\text{phase}(S_{23}) = -90^\circ$, $\text{phase}(S_{43}) = 90^\circ$);
- перегиб ФЧХ коэффициентов отражения $\text{phase}(S_{11})$ и $\text{phase}(S_{33})$ и разрыв 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° , его можно убрать, обернув выражение в функцию `unwrap()`).

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

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



По амплитудным соотношениям видно, что на центральной частоте каналы симметричны. А по фазе различаются на 180° . 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 направленный ответвитель 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

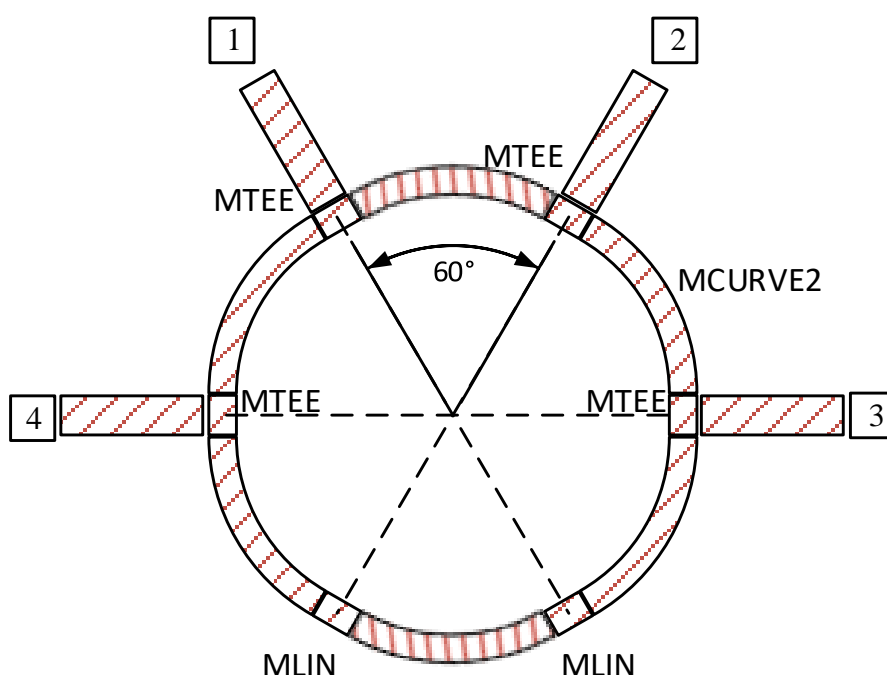
Z1 и Z2 незначительно отличаются от 71 Ом.

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° 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.

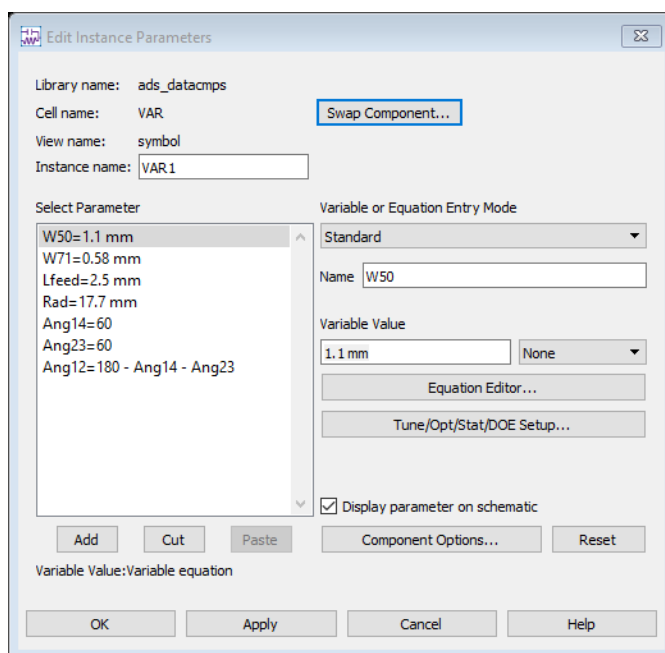
В проектируемом кольце дуги имеют электрическую длину 90° , при этом геометрический угол дуги равен 60° ($360^\circ/6$ – шесть участков дуг). Волновое сопротивление 71 Ом. Ширина дуг $W71 = 0,58$ мм. Длина по расчету 18,5 мм. Пересчитаем в радиус (т.к. в компонентах типа MCURVE2 задается радиус дуги).

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

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 $\text{Ang}12 = 180 - \text{Ang}14 - \text{Ang}23$.

Вносим все переменные в блок VAR.



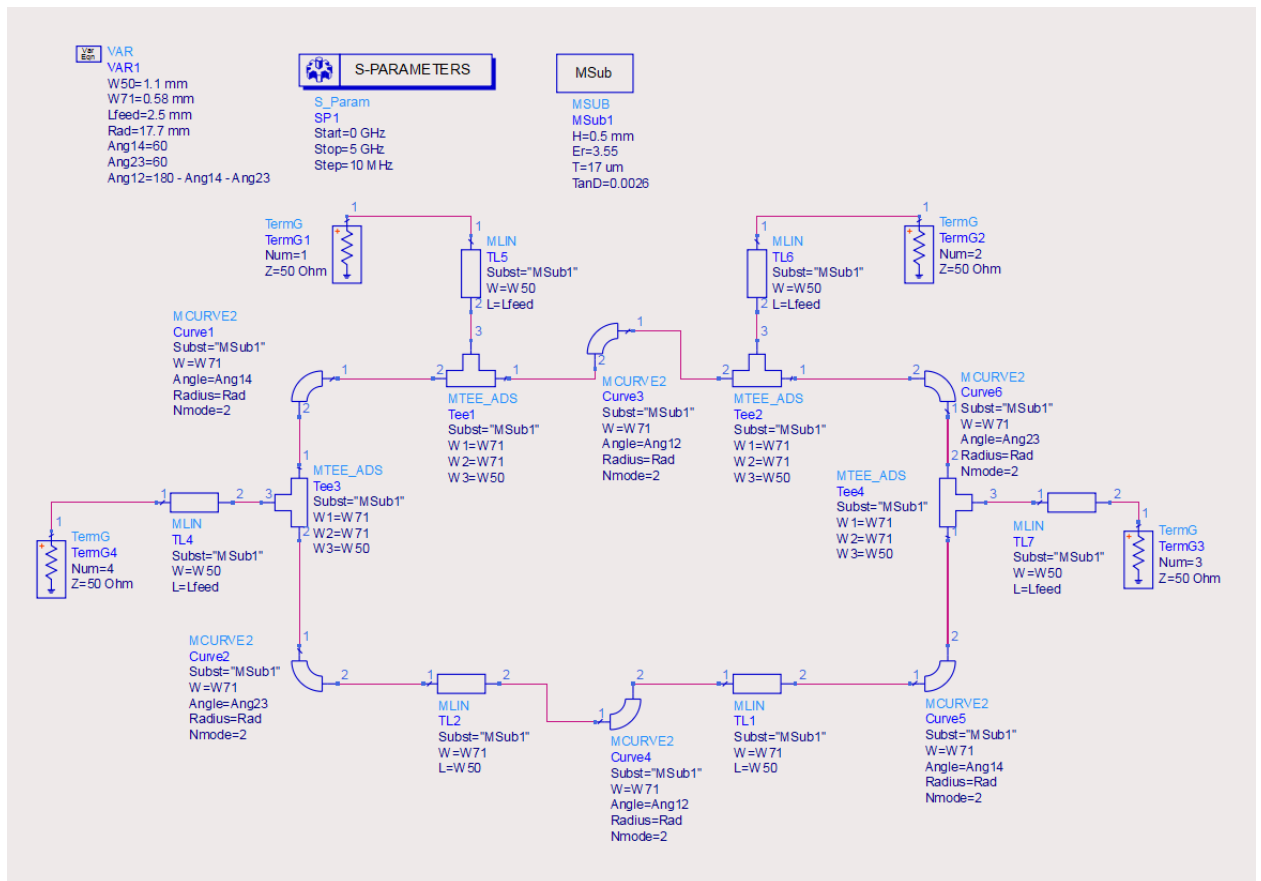
Далее строим схему моделирования на микрополосковых линиях MLIN, дугах MCURVE2 и тройниках MTEE_ADS.



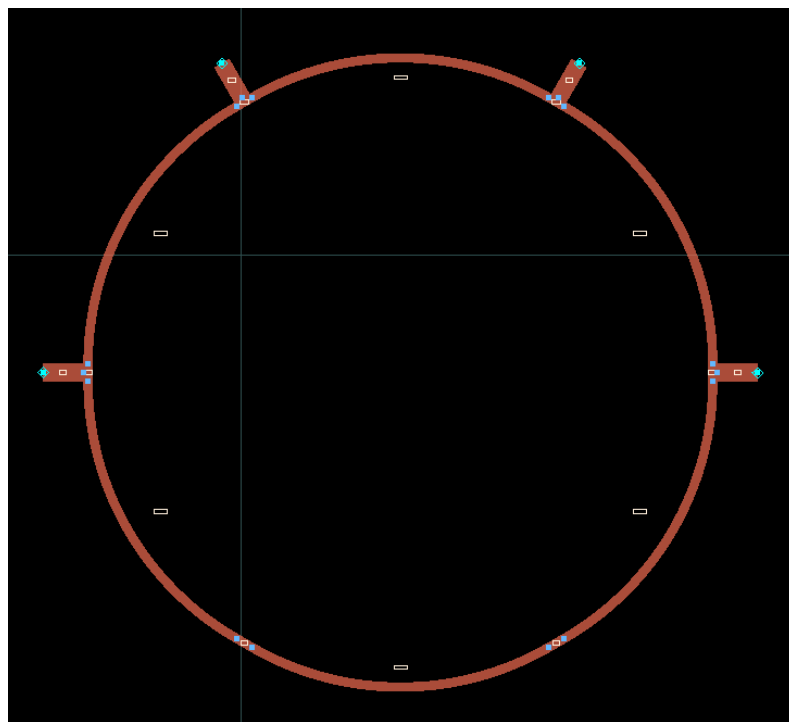
При расположении микрополосковых компонентов в схеме их можно только вращать (Rotate , Ctrl+R). Зеркалить (Mirror About X, Mirror About Y, Shift+X или + Y ) такие компоненты нельзя. Зеркалится только обозначение в схеме, при последующем переносе в топологию это приводит к некорректному построению.



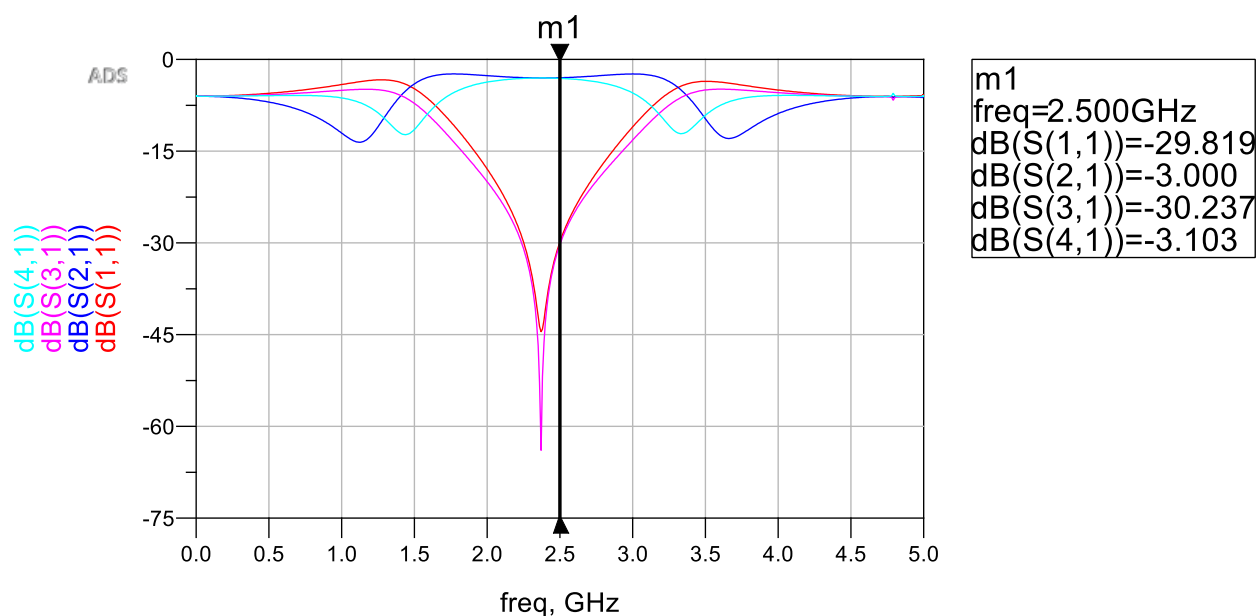
При расположении компонентов можно перемещать привязанную текстовую информацию по ПКМ – Move Component Text (F5), так, чтобы получать чистую и читаемую схему.



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.



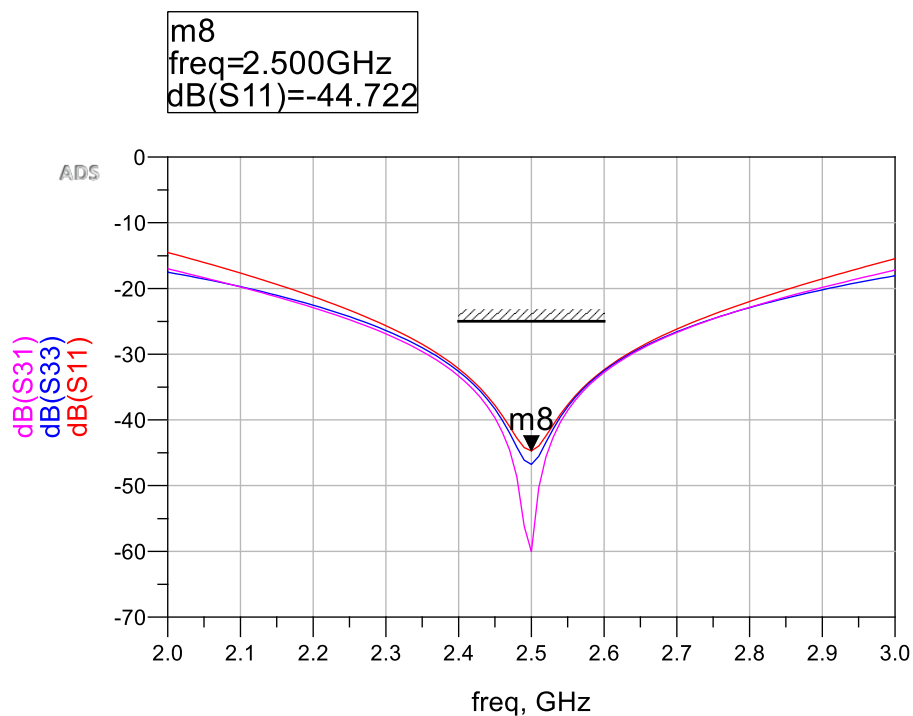
Результаты показывают, что рабочая частота устройства немного уплыла вниз. Связанно это с тем, что были добавлены тройники и их компенсирующие участки. Электрические длины дуг оказались больше, чем нужно.

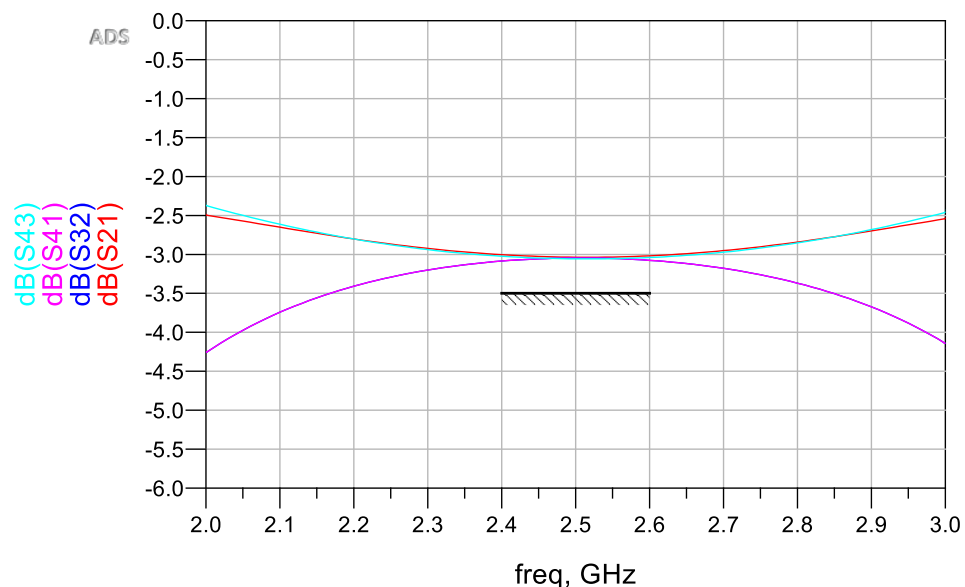
С помощью инструмента Tune или Optimization настроим кольцевой направленный ответвитель на 2,5 ГГц. Дополнительно настроим его так, чтобы он работал в некотором частотном диапазоне 2,4..2,6 ГГц. Наложим следующие ограничения:

- 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° более чем на 5° 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° .

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



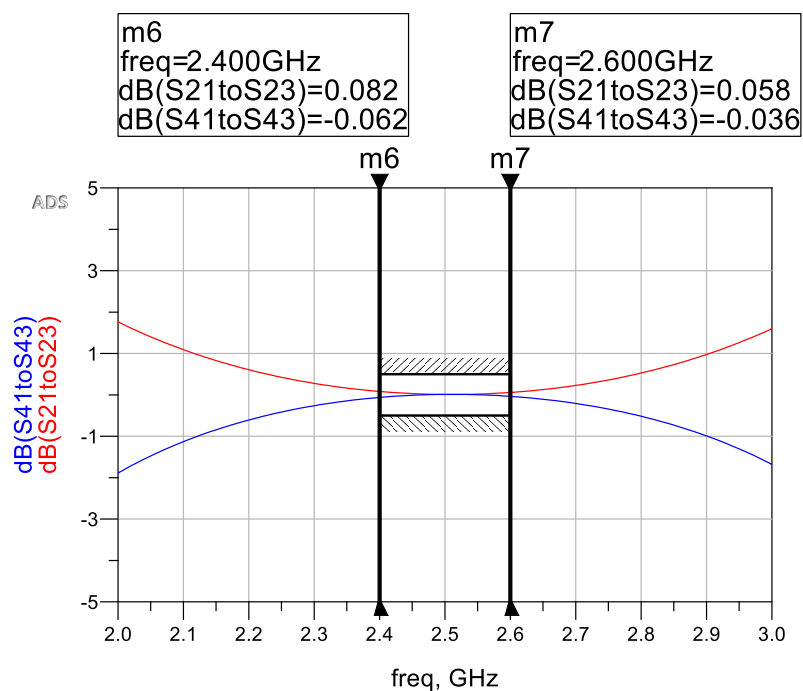


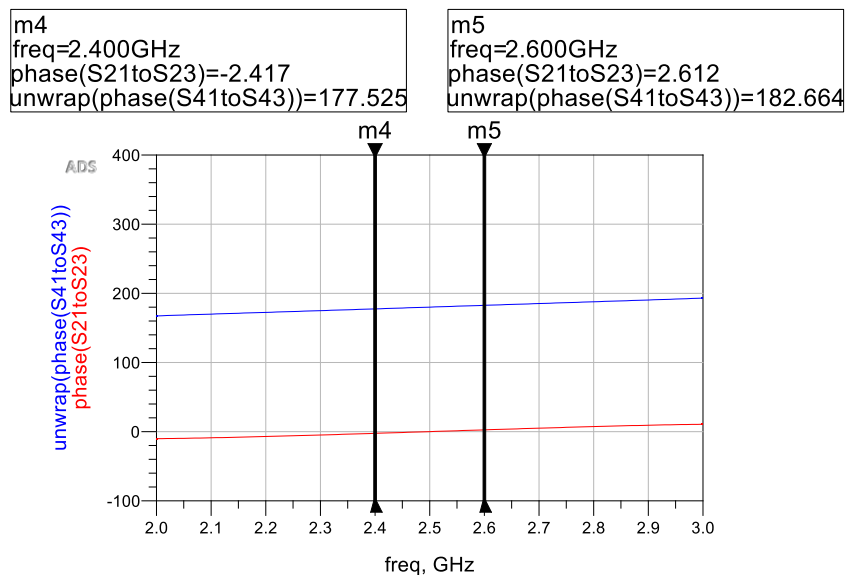
Проанализируем теперь подстроенные результаты.

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

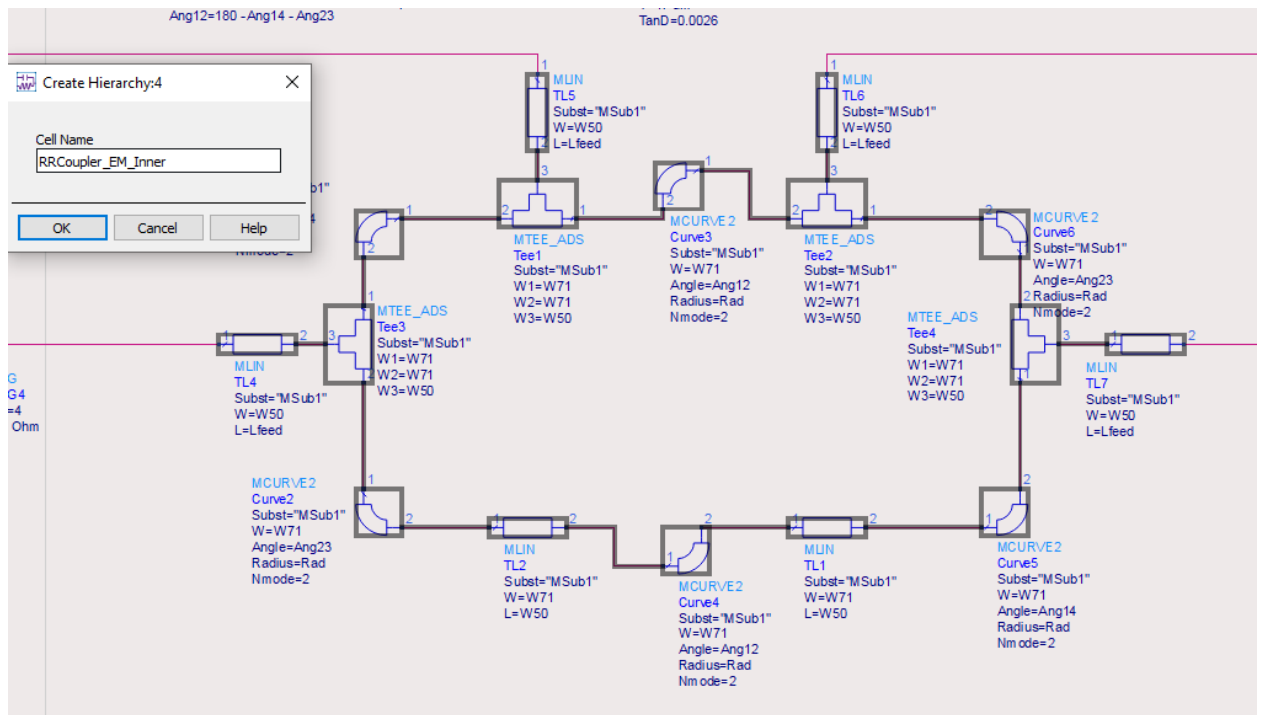
Lab1 Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Для параметризации топологии надо будет создать двухуровневую схему:

- 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.

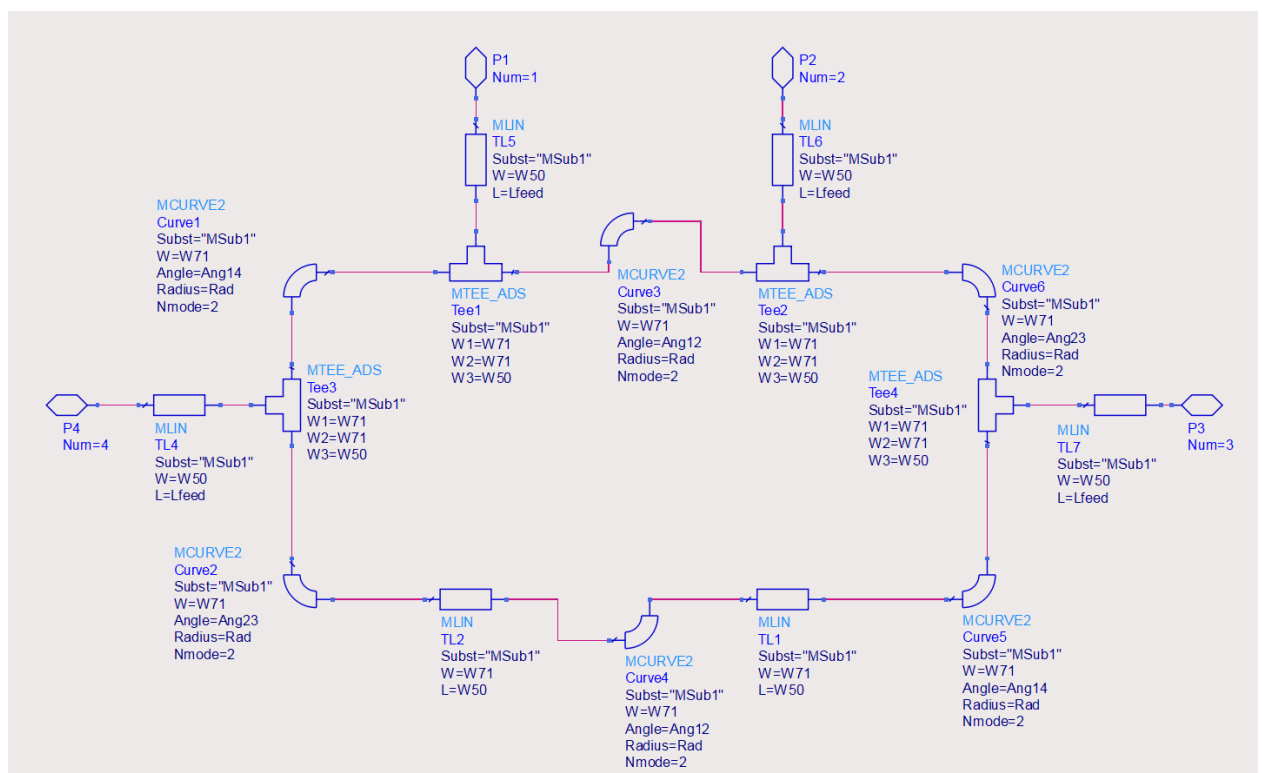
Схему нижнего уровня RRCoupler_EM_Inner надо будет сконвертировать в топологию; сделать всю ячейку RRCoupler_EM_Inner параметризированной и настроить параметры EM_моделирования (emSetup).

Далее кратко показаны основные картинки до начала моделирования

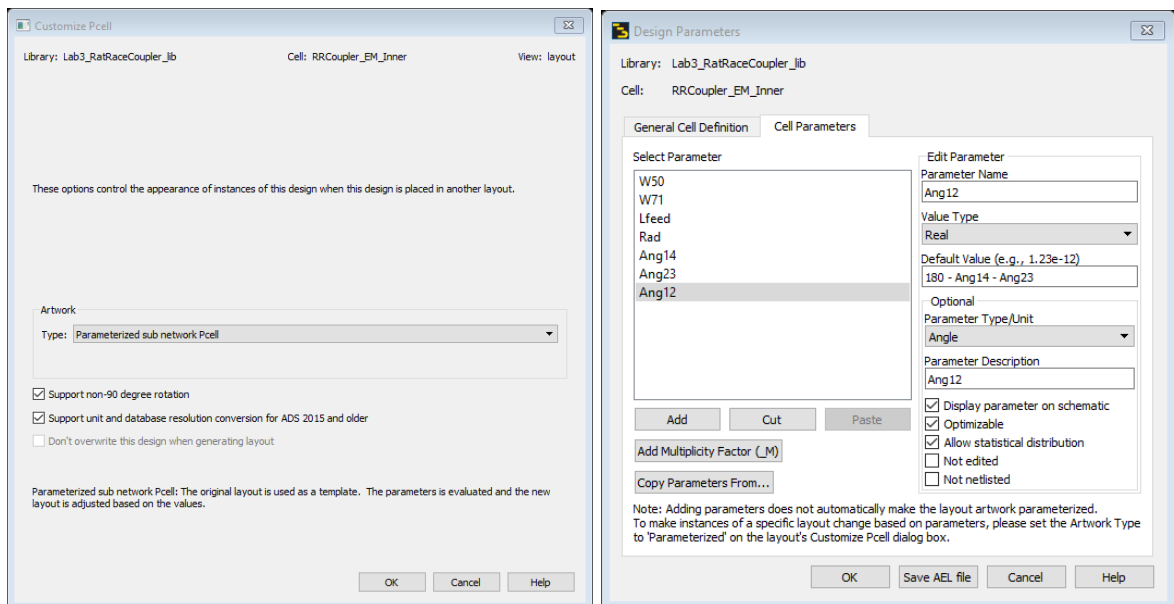
- создание иерархии





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





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

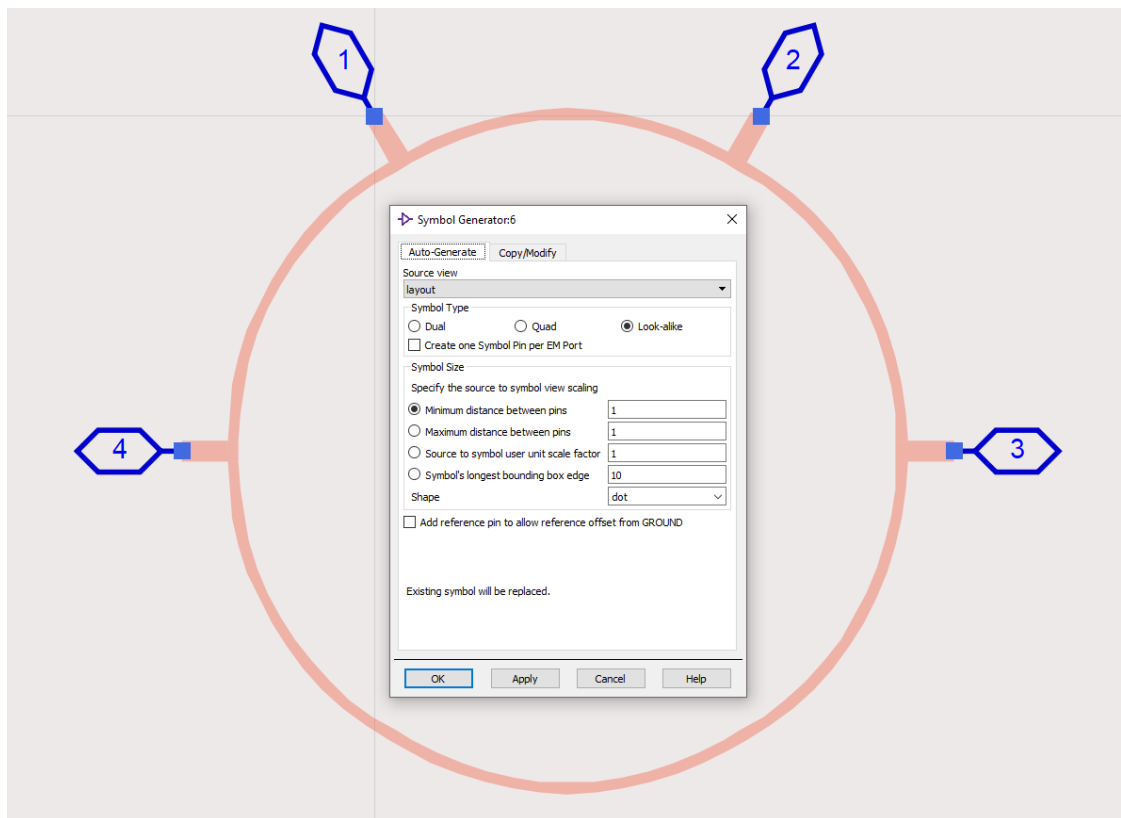
 **Frequency plan** - частотный план адаптивный от 0 до 5 ГГц, плюс точка 2,5 ГГц


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

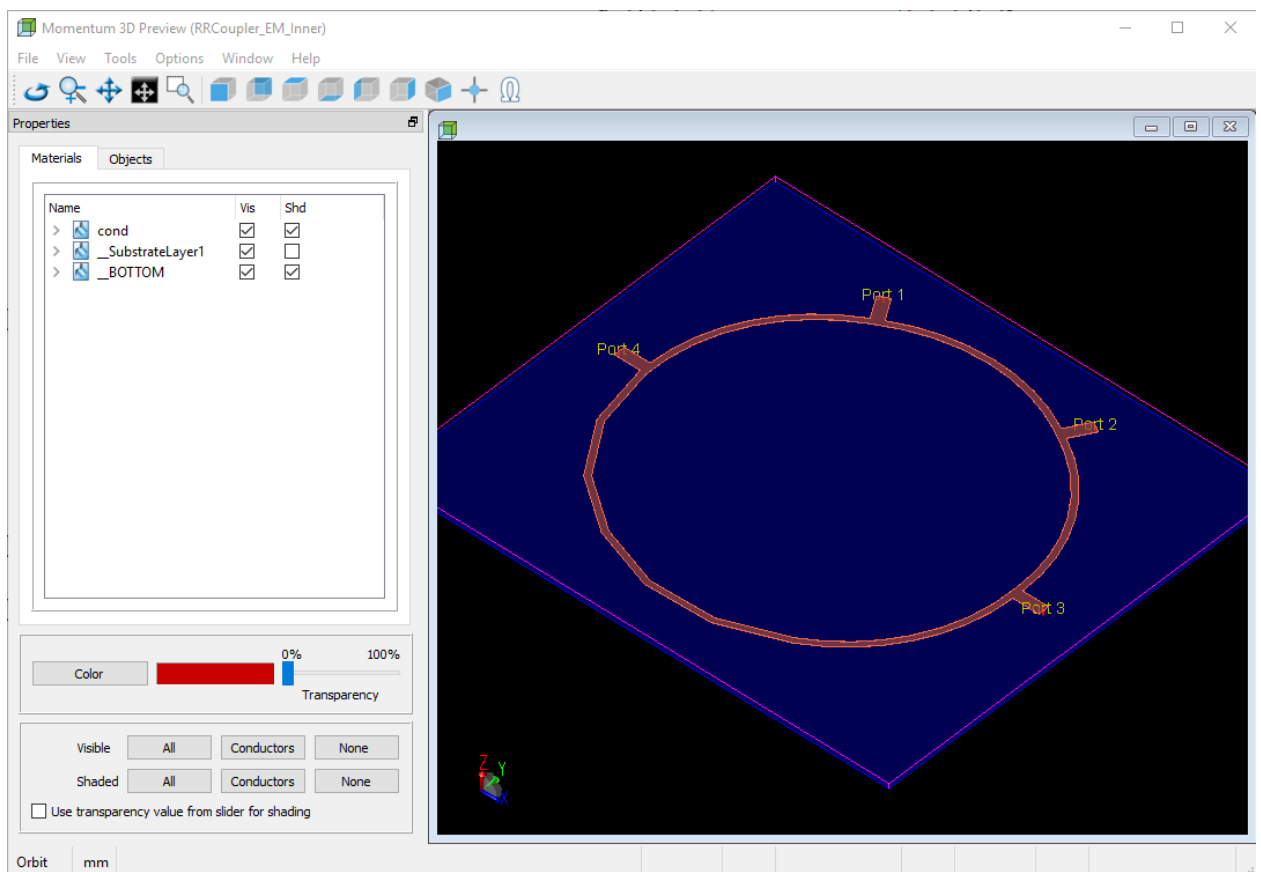
 **Options** - Mesh с точностью 40 ячеек/длина волны и включено автоматическое создание краевой сетки


 **Model** - включено создание и сохранение emModel

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

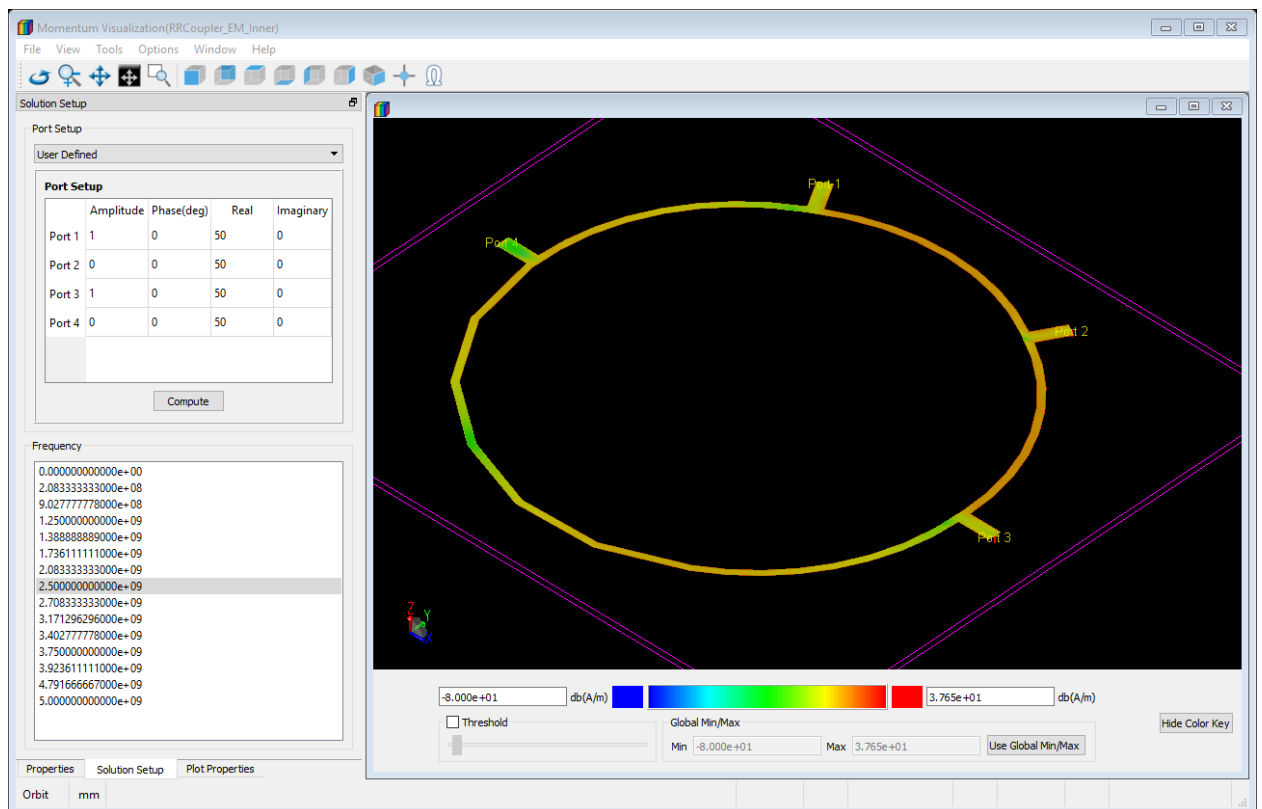


Перед запуском расчета можно по команде Tools - 3D EM Preview  вызвать отдельное окно, в котором будет показано, как будет считаться модель.

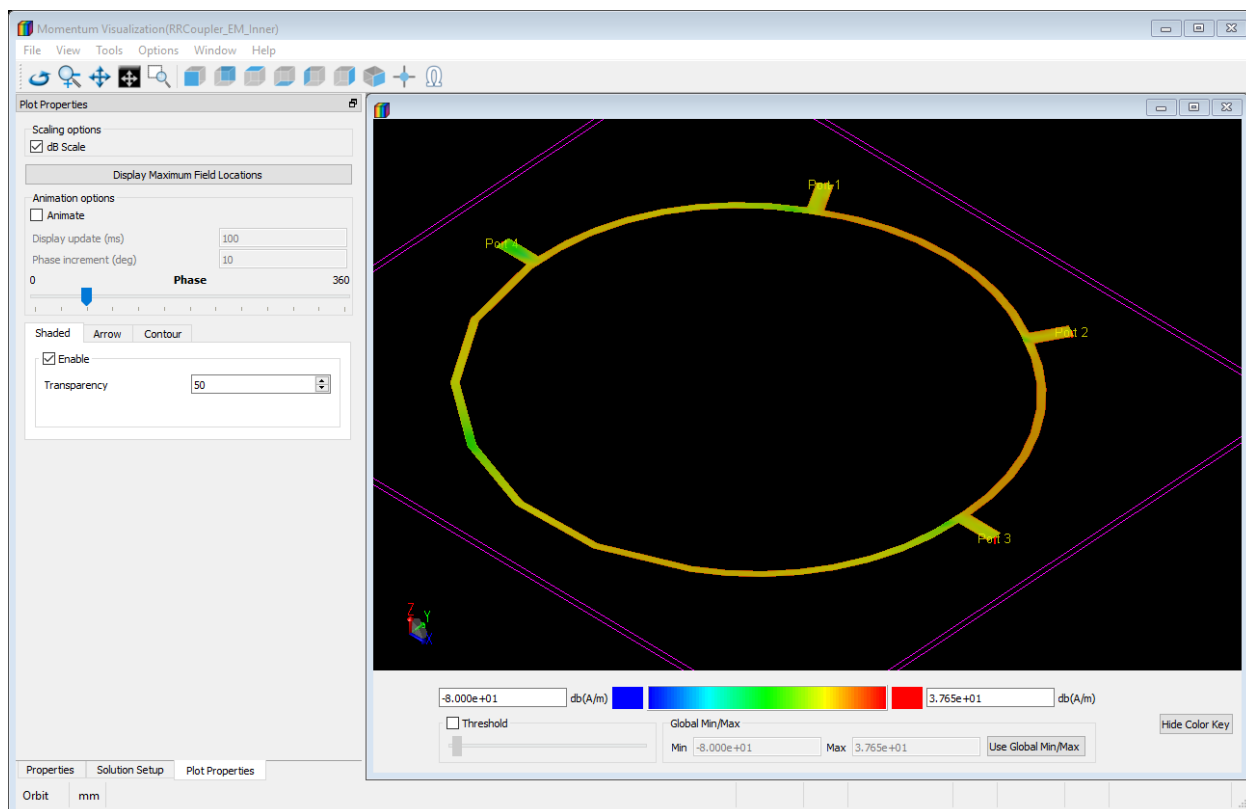


Один раз посчитаем топологию по запуску из текущего emSetup (Generate:S-Parameters). Т.к. в текущей топологии нет переходных отверстий, то посчитается она быстро. После расчета можно по команде Tools – Visualization  открыть окно визуализации результатов. Параметры отображения объектов в нем аналогичны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

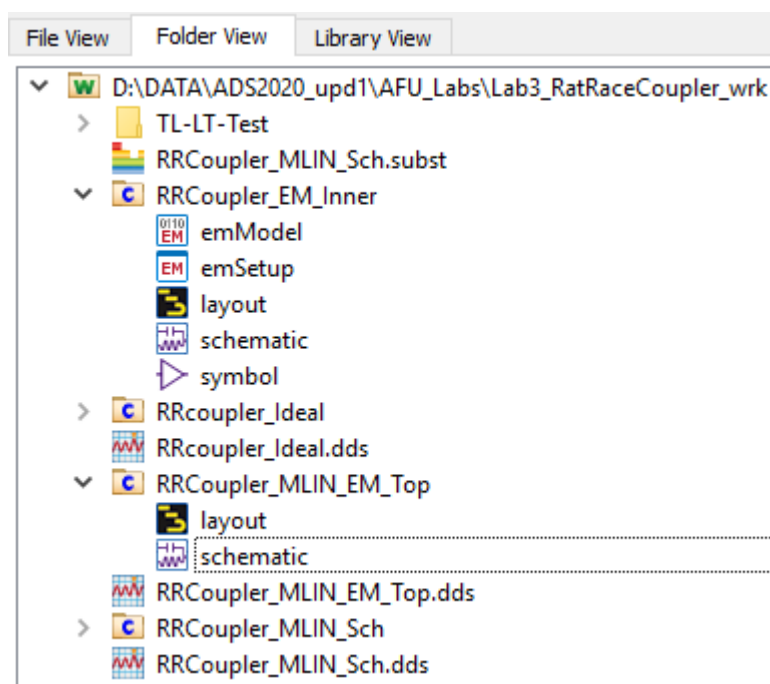


На вкладке Plot Properties включим логарифмический масштаб (галка dB Scale) и включим анимацию поверхностных токов.

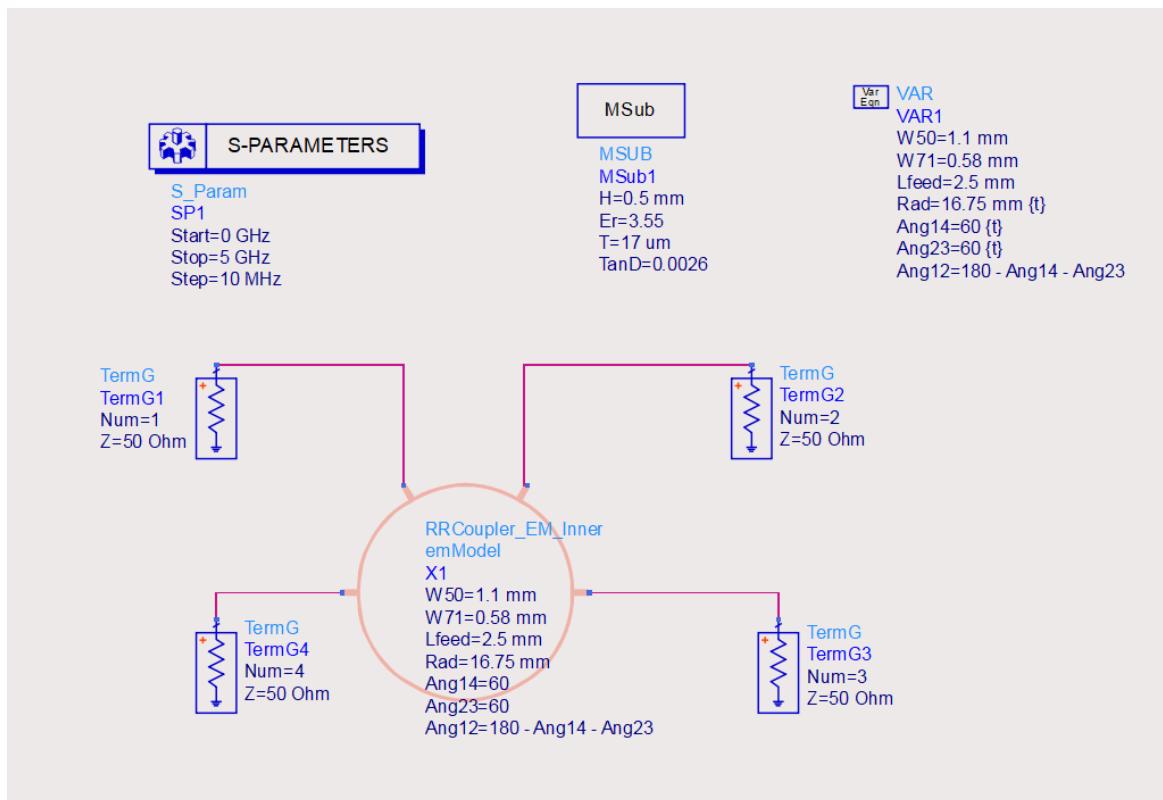


Видно, что на выходы 2 и 4 сигналы переходят со сдвигом 180° (положения зеленых максимумов при разных значениях ползунка Phase).

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



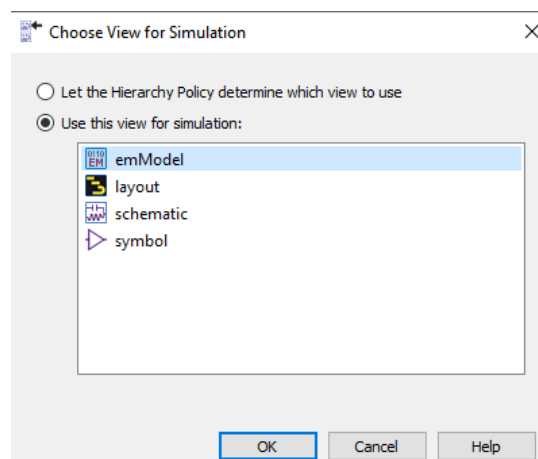
Вернемся в схему верхнего уровня RRCoupler_EM_Top.



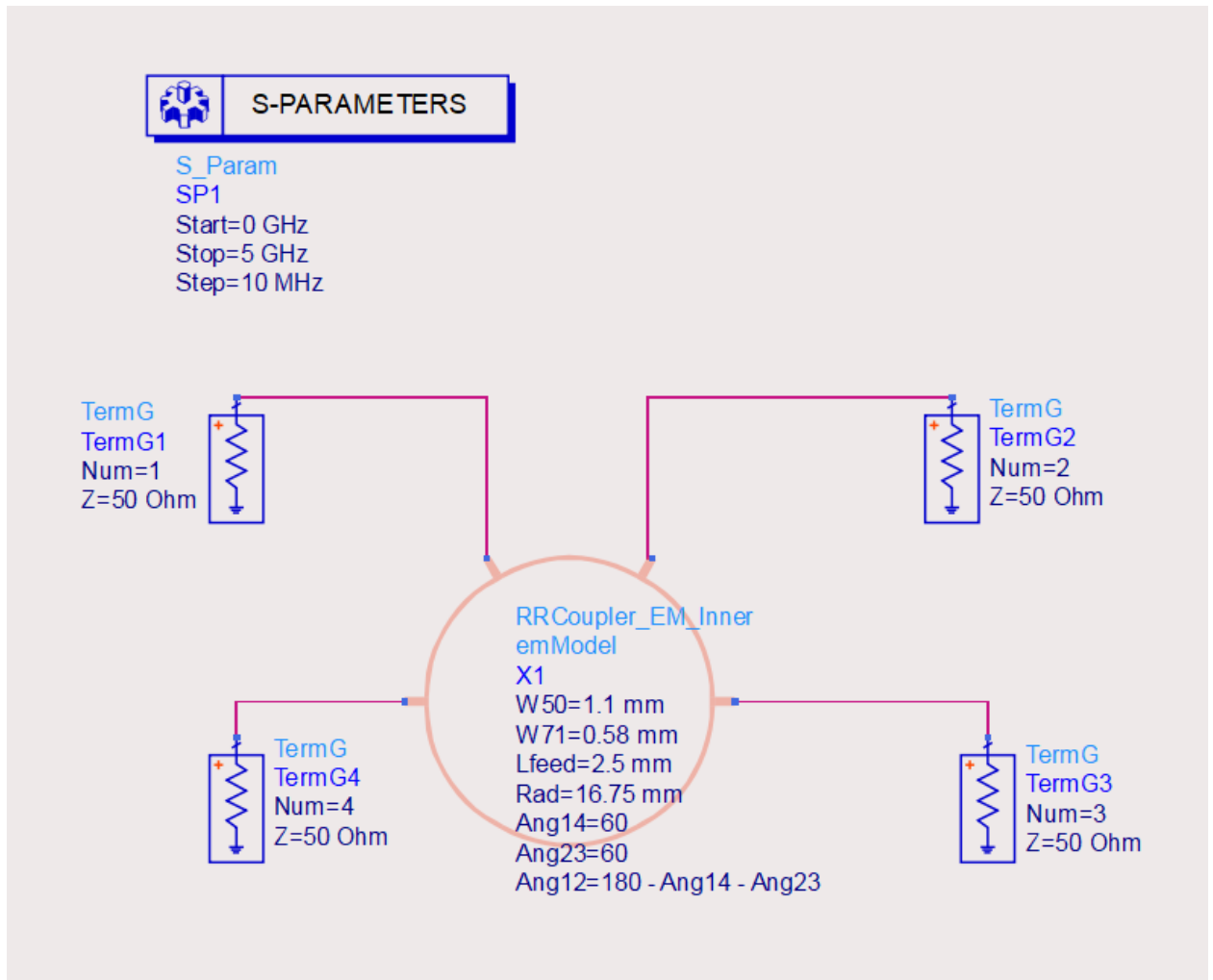
Приведем ее к следующему виду:

Lab1

- отключим MSub1, т.к. в ЕМ-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).

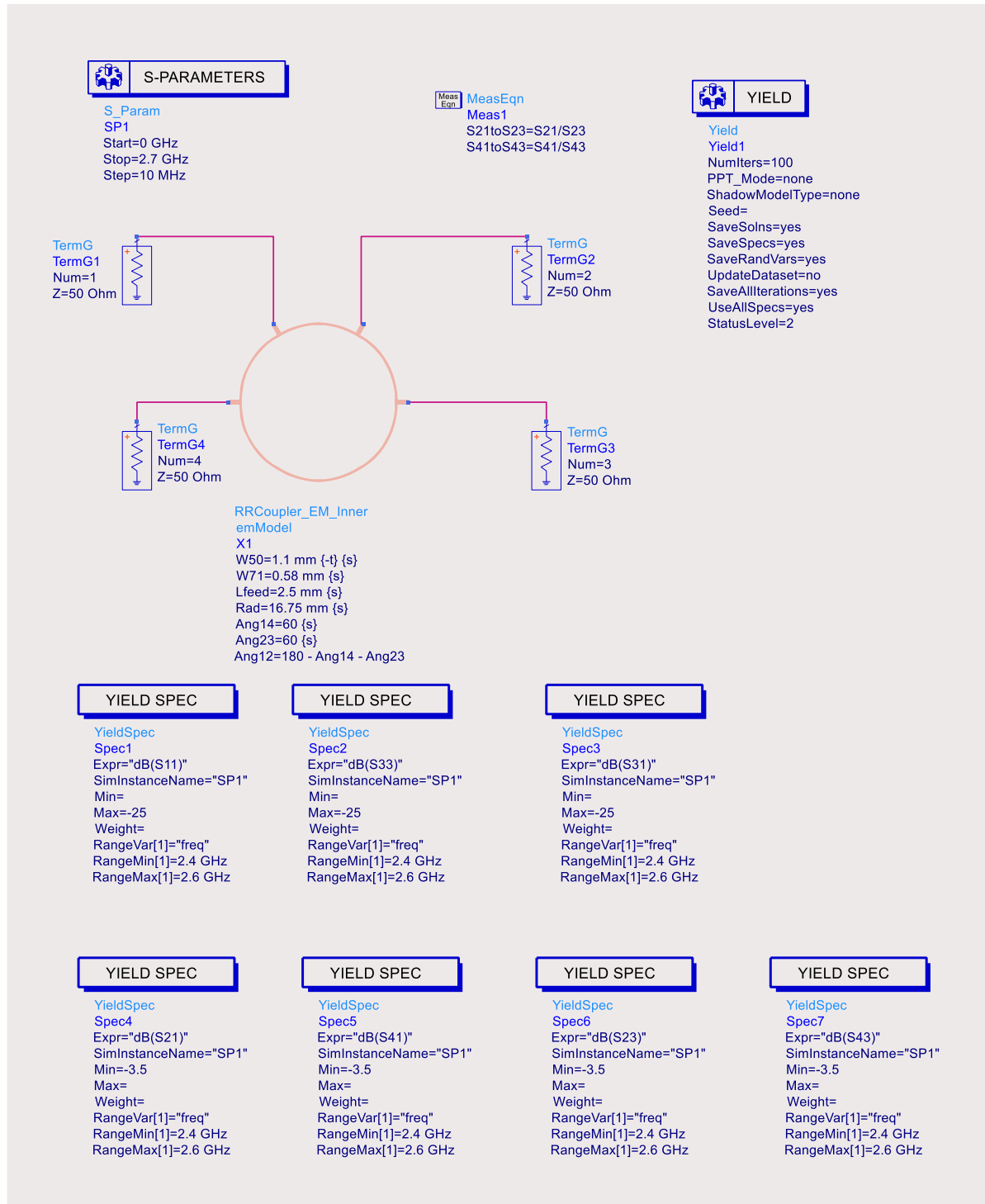
Смягчим требования по рабочему затуханию до -4 дБ.

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.



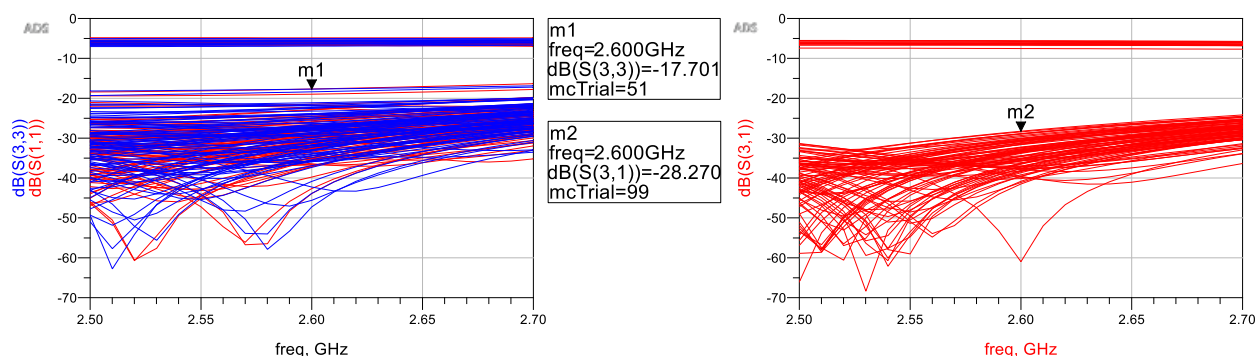
Запускаем расчет. Т.к. при данном расчете при каждом запуске расчета S-параметров будет запускаться подчиненный ЕМ-анализ, весь расчет будет идти довольно долго.

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

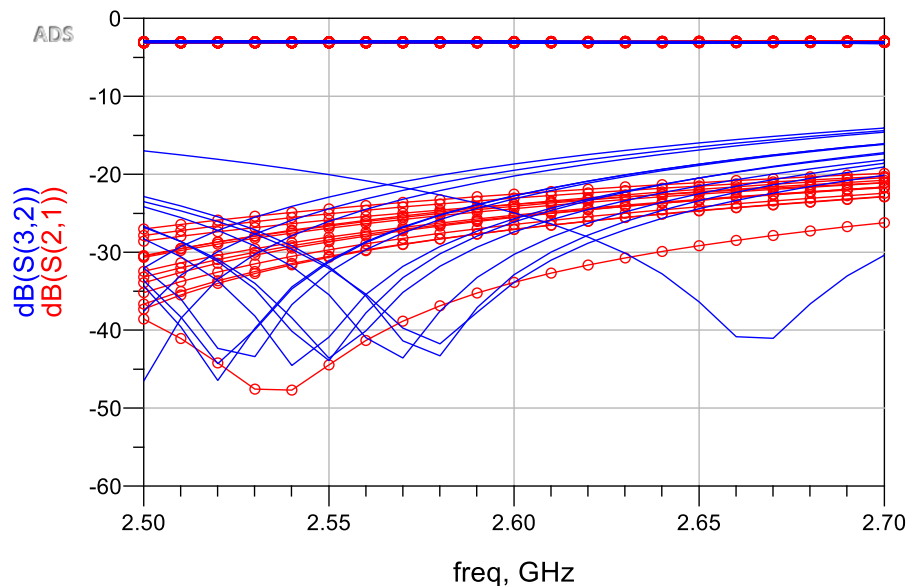
Получается успех всего в 62%. Это маловато, схема чувствительна к точности параметров. Надо проанализировать результаты, чтобы понять, в чем может быть причина проблема.

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

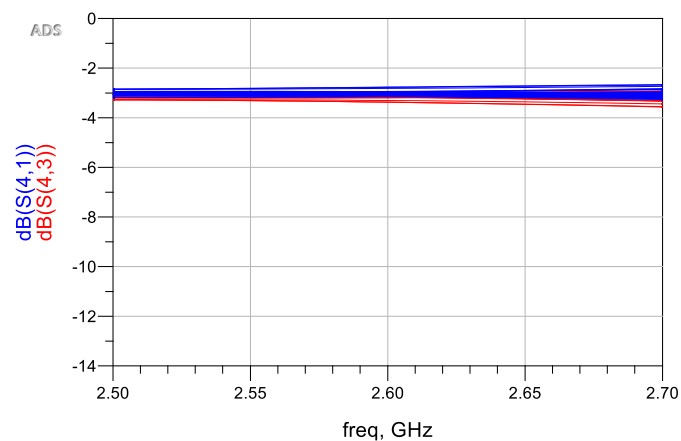


Видно, что кривые явно группируются в два кластера – близко к Yield-спецификации и далеко за ее пределами.

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_{feed} , W_{71} , Rad , Ang_{14} и 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

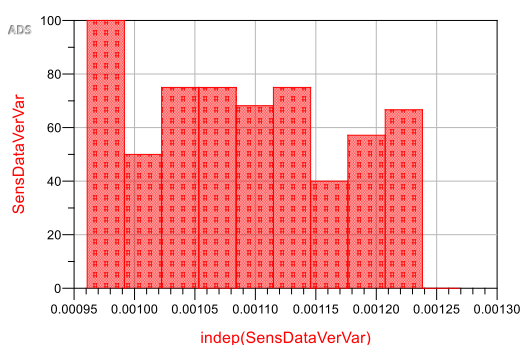
`Eqn`SensDataVerVar = histogram_sens(SensData, SensVar, SensYieldMin, SensYieldMax, freqMin, freqMax, NumBins)

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.

EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = W50

EqnSensYieldMax=-25

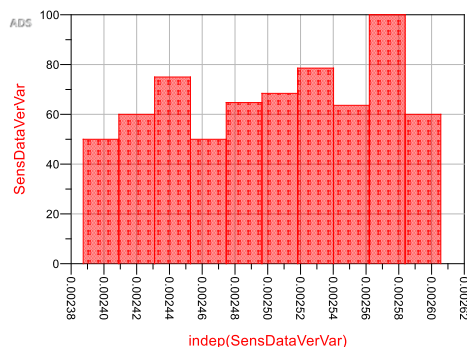
EqnSensYieldMin = -50



EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Lfeed

EqnSensYieldMax=-25

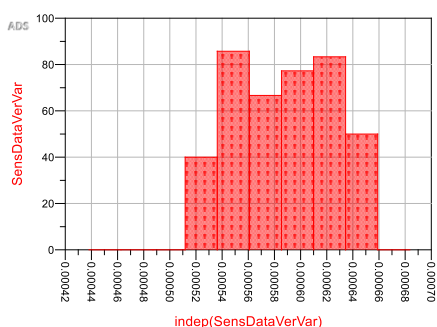
EqnSensYieldMin = -50



EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = W71

EqnSensYieldMax=-25

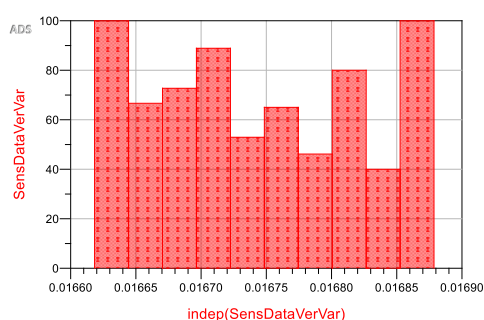
EqnSensYieldMin = -50



EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Rad

EqnSensYieldMax=-25

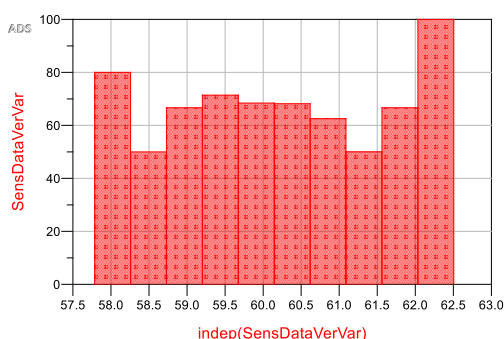
EqnSensYieldMin = -50



EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Ang14

EqnSensYieldMax=-25

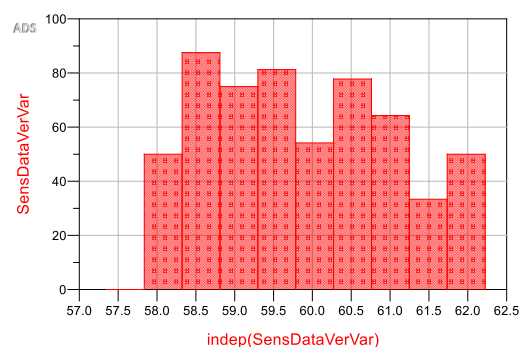
EqnSensYieldMin = -50



EqnSensData = dB(S11) EqnSensVar = Ang23

EqnSensYieldMax=-25

EqnSensYieldMin = -50



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.

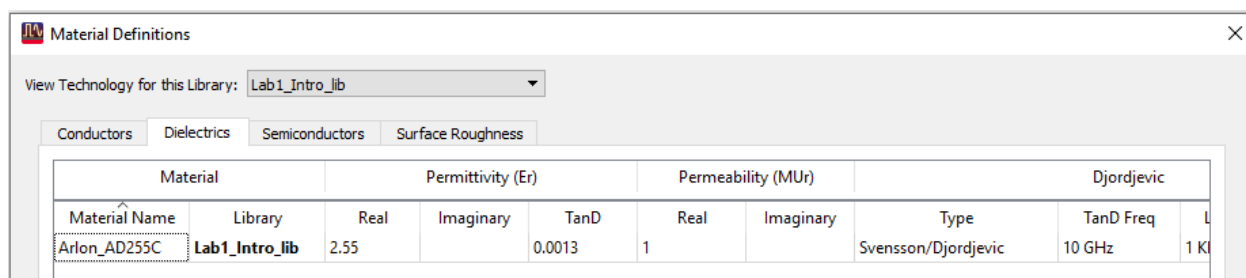
Варианты заданий приведены в таблице 1.

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 ϵ_r , ед.	6,15	6,15	3,55	3,55	3,66
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, ед.	0,0025	0,0025	0,0026	0,0026	0,004
	Толщина диэлектрика h , мм	0,25	0,64	0,813	0,508	0,254
	Толщина металлизации t , мкм	17	35	35	17	17
№ Варианта		6	7	8	9	10
Центральная частота F_c , ГГц		4,9	6,2	4,1	2,5	4,4
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO3003	RO3003	RO3010	RO3010
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ед.	3,66	3,0	3,0	10,2	10,2
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, ед.	0,004	0,0013	0,0013	0,0025	0,0025
	Толщина диэлектрика h , мм	0,508	0,76	1,52	1,28	0,64
	Толщина металлизации t , мкм	17	17	35	35	17

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



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

Этапы выполнения:

1. 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_{21} 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° , волновое сопротивление 71 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.