

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 №1**

**«Расчет и моделирование согласующей микрополосковой цепи»**

**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.....	6
Запуск ADS и создание проекта .....	7
Использование инструмента SmithChart.....	16
Модель на идеальных линиях передачи.....	20
Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении .....	41
Модель на топологическом уровне .....	49
Оптимизация.....	80
Быстрое создание определения подложки из MSUB .....	84
Задание на выполнение.....	87
Требования к отчёту.....	92
Задание на самостоятельную работу.....	93
Контрольные вопросы .....	94
Литература .....	95

## Введение

**Цель работы:** ознакомится с базовым маршрутом моделирования и проектирования планарных (микрополосковых) устройств в среде Keysight Advanced Design System (ADS) на примере согласующей цепи с короткозамкнутым шлейфом.

**Используемое оборудование или ПО:** материал подготовлен на основании версии Keysight Advanced Design System 2024. 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 2011.10.

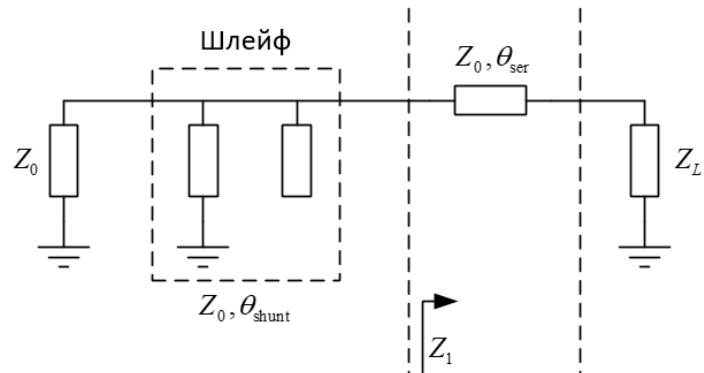
**Продолжительность работы:** 4 часа.

Предполагается, что студент практически не знаком с приемами работы в ADS. Подробно показаны базовые приемы работы в ADS.

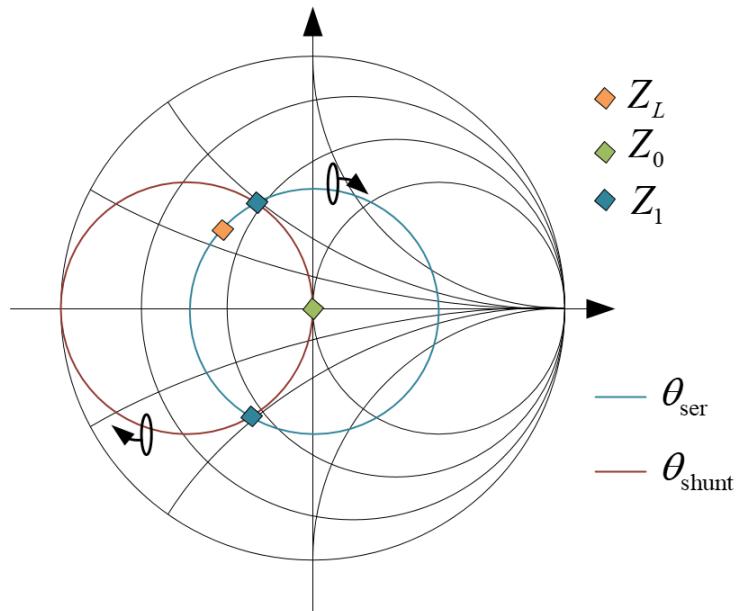
	показывает места, за которыми надо особенно следить и где легко совершить ошибку
	показывает приемы, значительно упрощающие или ускоряющие использование ADS

## Теоретические сведения

Известна методика узкополосного согласования комплексного импеданса с действительным импедансом (обычно на стандартное сопротивление 50 Ом или 75 Ом) с помощью короткозамкнутых или разомкнутых шлейфов [2]. В общем виде данную технику можно представить в следующем виде:



Пусть для линий передачи выбрано стандартное волновое сопротивление 50 Ом (такое же, как и для нормировки S-параметров). Тогда данную схему согласования можно изобразить на диаграмме Смита следующим образом.



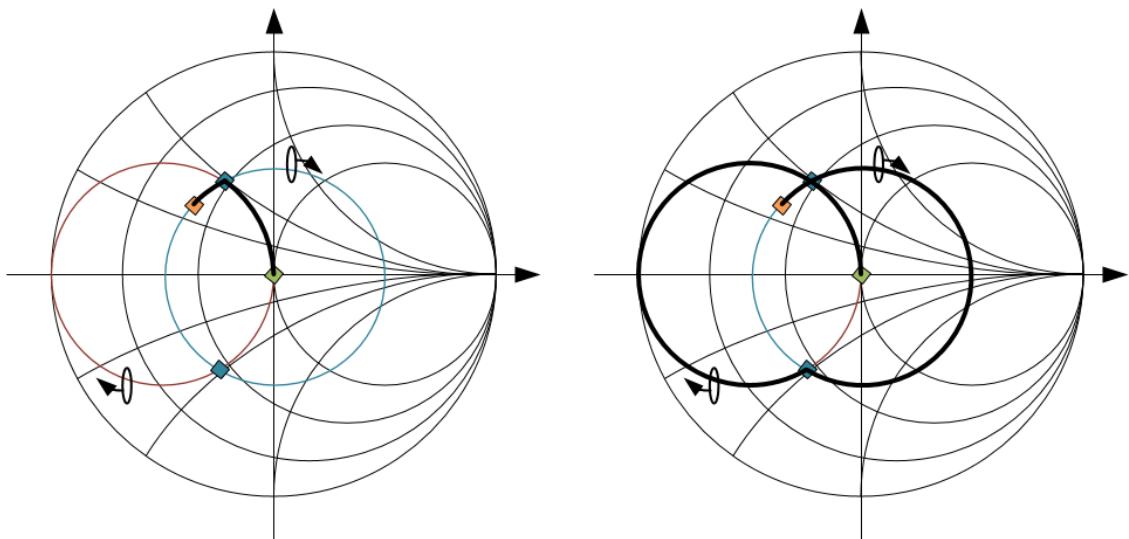
Направление отсчета электрических длин  $\theta_{\text{ser}}$  и  $\theta_{\text{shunt}}$  определяется тем, что расчет идет от нагрузки  $Z_L$  (показано стрелками). Положение окружностей последовательного и параллельного участков определяется тем, что их волновое сопротивление равно стандартному 50 Ом.

При расчёте от нагрузки  $Z_L$  с графической точки зрения это означает, что сначала нужно двигаться по последовательному шлейфу  $\theta_{\text{ser}}$  до одной из точек  $Z_1$ . А затем с помощью параллельного шлейфа  $\theta_{\text{shunt}}$  из выбранной  $Z_1$  перейти в  $Z_0$  (центр).

Нужно помнить, что как последовательный, так и параллельный (неважно, разомкнутый или короткозамкнутый) шлейф делает полный круг за  $180^\circ$  электрической длины.

При определении длины параллельного участка  $\theta_{\text{shunt}}$  нужно помнить, что для разомкнутого шлейфа - его электрическая длина ведет отсчет от  $0^\circ$ . А вот наличие КЗ на конце короткозамкнутого шлейфа сразу добавляет  $90^\circ$  к его электрической длине, т.е. нулевая физическая длина соответствует электрической длине в  $90^\circ$ . При переходе через  $180^\circ$  у короткозамкнутого шлейфа можно вычесть  $180^\circ$ .

Видно, что возможно два решения – две точки  $Z_1$ . И на каждую точку  $Z_1$  можно выбрать разомкнутый или короткозамкнутый шлейф с пересчетом электрической длины на  $90^\circ$ .



С точки зрения только центральной частоты любое из четырех решений равнозначно. Как правило, конкретное решение выбирают исходя из применяемой линии передачи и желаемого поведения в частотной полосе.

С конструктивной точки зрения, короткозамкнутые шлейфы не очень желательны при реализации линий в микрополосковом или копланарном виде на печатной плате, т.к. требуется создание переходного отверстия. Для некоторых видов подложек (керамические подложки, поликор и пр.) создание

переходных отверстий может быть технологически сложным или даже невозможным. Фиксированное положение отверстия может не давать возможности проводить регулировку за счет подрезки или наращивания шлейфа, как это легко делать для разомкнутого шлейфа. Также при использовании микрополосковых линий не только для ВЧ-сигнала, но и для подачи питания или смещения, нужно следить, чтобы постоянный ток не утекал через отверстие в землю.

Однако, для таких линий передачи, как волновод или коаксиальный кабель может выйти так, что разомкнутый конец шлейфа электрически большой, излучает и его больше нельзя считать идеальным ХХ (появится дополнительная эквивалентная излучению комплексная нагрузка). В этом случае, более предпочтительными могут оказаться шлейфы с КЗ.

С частотной же точки зрения присутствует простое рассуждение – чем больше электрическая длина параллельного участка – тем более резонансной и, соответственно, узкополосной является согласующая цепь.

В любом случае, часто интересует поведение согласующей цепи не только на центральной частоте, но еще и в некотором диапазоне. Наиболее эффективно данные расчеты проводить с специализированных САПР.

## **Методика выполнения работы**

Типовой маршрут работы с полосковыми устройствами обычно следующий:

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

На этапах 2 и 3 возможна необходимость подстройки по параметрам, что возможно с использованием инструментов Tune или Optimization в ADS.

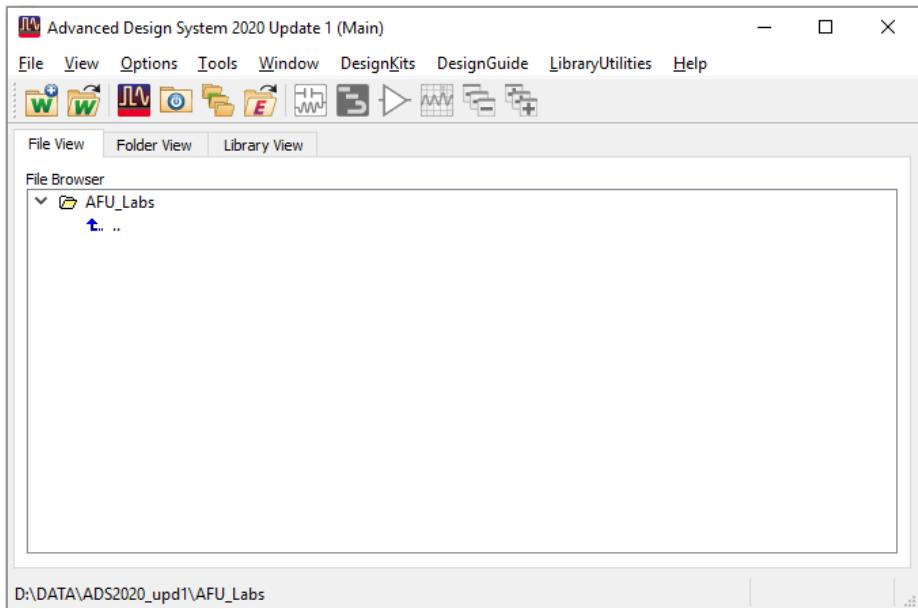
Для расчета согласующей цепи на идеальных линиях передачи используется инструмент SmithChart.

Отдельно расписано, как на основе внесенной в схему MSUB, автоматически создать определение подложки.

В текущей работе освоим этапы с 1 по 3. Статистический анализ будем проводить в последующих работах на вычислительно более простых моделях.

## Запуск ADS и создание проекта

Основное приложение ADS называется «Advanced Design System».



В этом окне создается проект, идет работа с содержимым открытого проекта, находятся глобальные настройки ADS, подключаются библиотеки компонентов (DesignKits и libs) и различного вида расширения (DesignGuides и APPs), а также вызывается справка и примеры.

Для создания проекта нужно вызвать команду File – New Workspace

При создании нового проекта запускается мастер. На первом этапе нужно указать папку, где будет храниться проект и имя проекта.

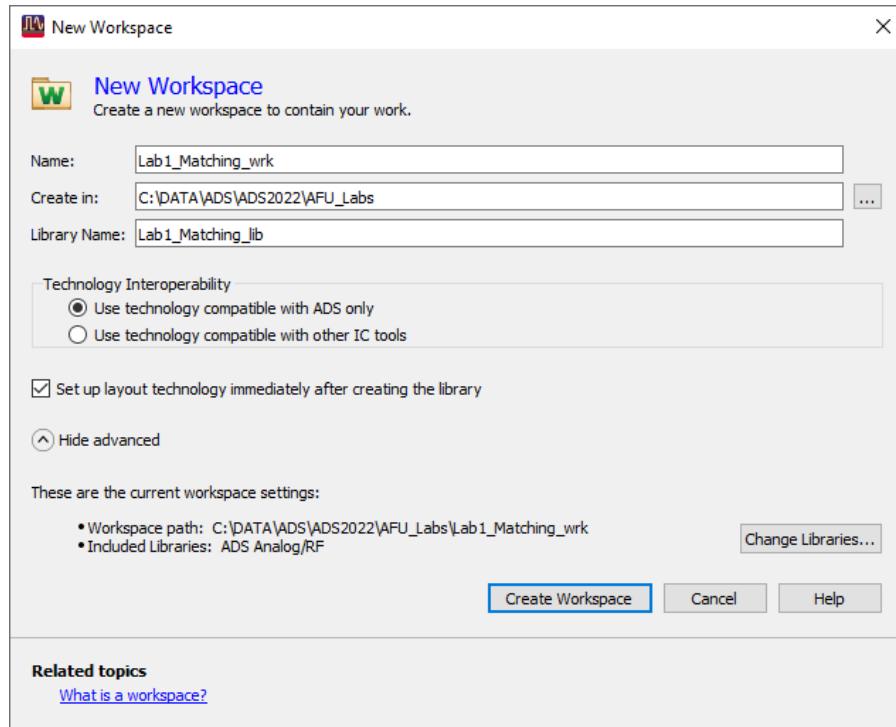
Проект является папкой с суффиксом «\_wrk». Кроме того, к проекту сразу привязывается базовая библиотека проекта (подпапка с суффиксом «\_lib»), в которую будут сохраняться все схемы, топологии, символы ячеек и некоторые другие сущности в текущем проекте.



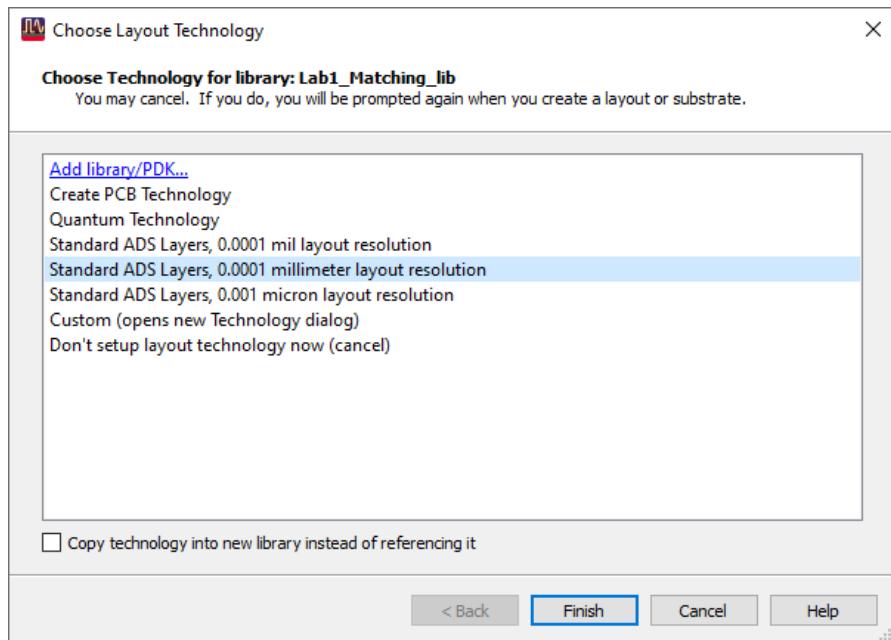
Проект должен находится по пути, где нет неанглийских символов, пробелов и иных спецзнаков. Назван он тоже должен быть по этим же правилам.

При создании нового проекта можно сразу задать технологию его базовой библиотеки (назначение топологических слоев, единицу длины и ее разрешение) и подключить внешние к проекту библиотеки. В текущем маршруте дополнительных к встроенной библиотеке «ADS Analog/RF» со стандартными компонентами библиотек не надо (по кнопке «Change Libraries» ничего делать не надо). Но определить технологию надо (галка Set up layout

technology immediately after creating the library). Т.к. работать мы планируем только в ADS, то можно оставить выбор Technology Interoperability = Use technology compatible with ADS only.

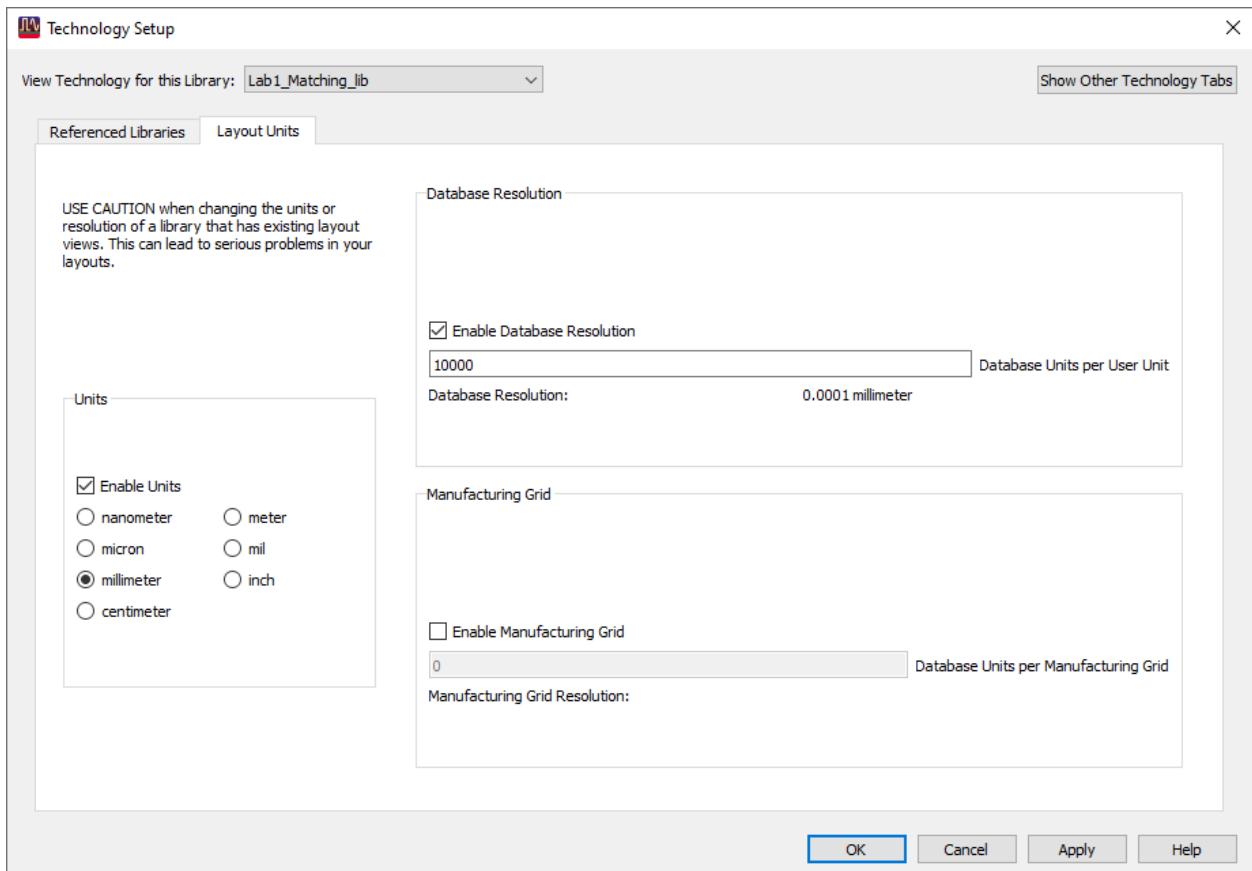


В окне Choose Layout Technology выбираем стандартную библиотеку ADS, в мм, с разрешением 0,0001мм.

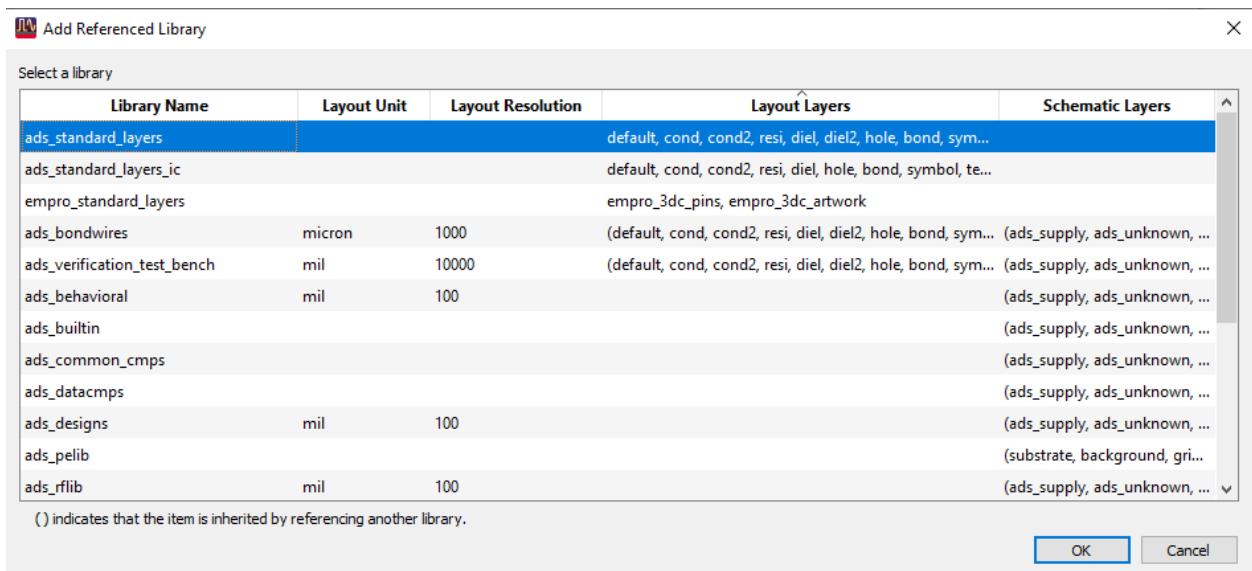


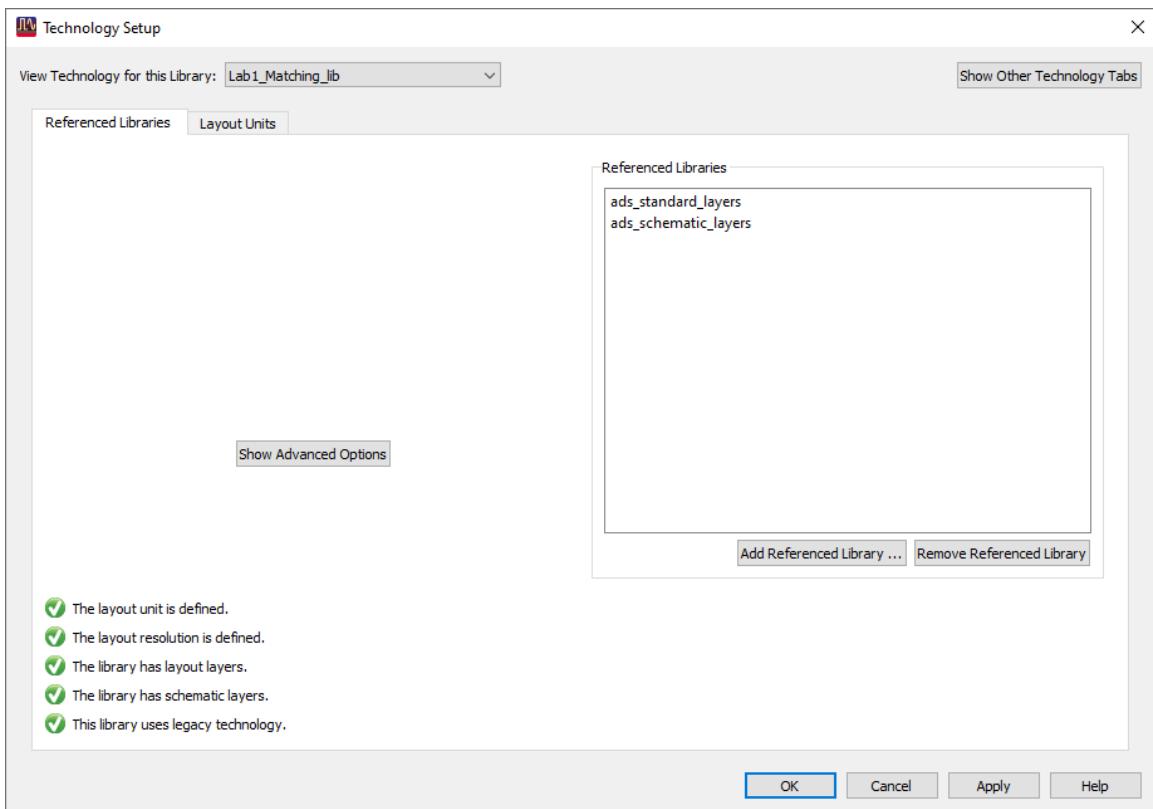
Если при создании проекта данные этапы были пропущены, то все это можно задать вручную. В основном окне ADS по команде Options - Technology – Technology Setup для базовой библиотеки проекта на вкладке Layout Units нужно:

- в группе Units включить галку Enable Units и выбрать миллиметры;
- в группе Database Resolution включить галку Enable Database Resolution и ввести точность 10000 на единицу длины, так чтобы разрешение стало 0,0001 мм.



На вкладке Reference Libraries в группе Referenced Libraries по кнопке Add Referenced Library в списке найти и добавить библиотеку «ads\_standard\_layers».

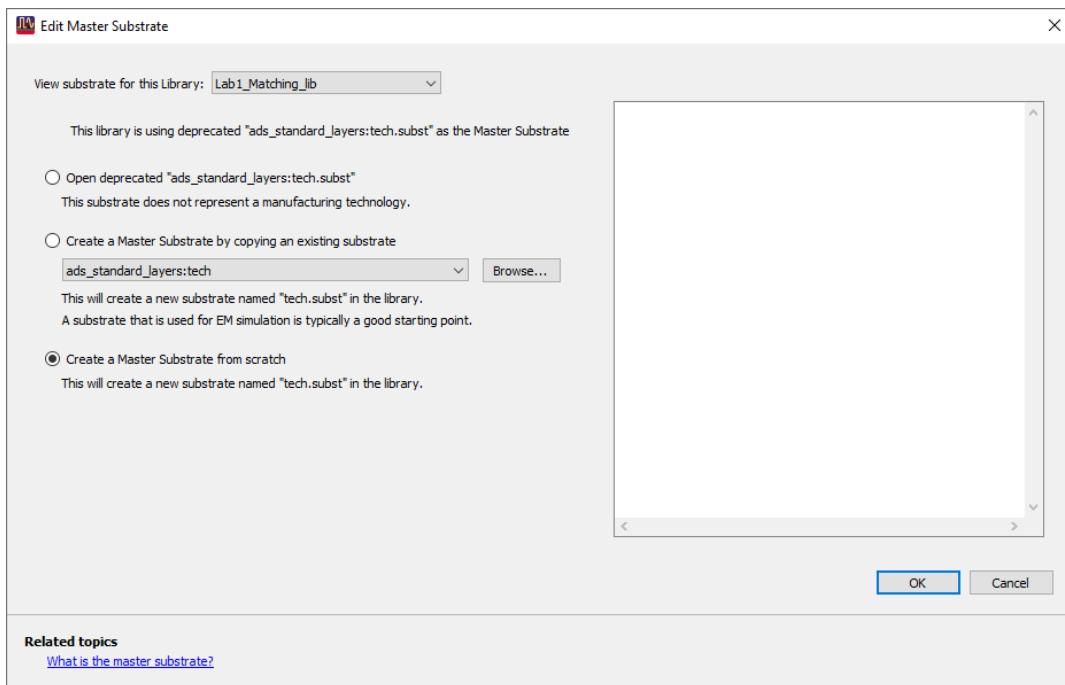




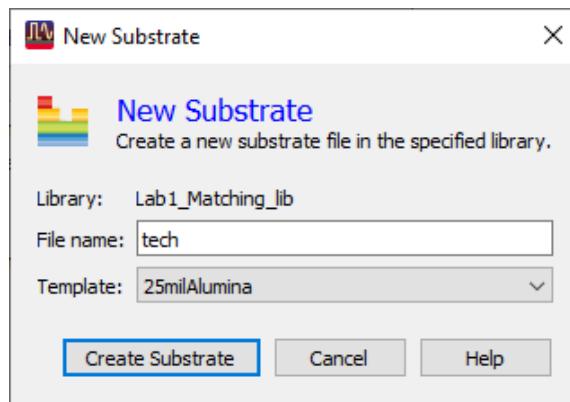
В списке Referenced Libraries должны остаться библиотеки «asd\_standard\_layer» (назначение топологических слоев) и «ads\_schematic\_layer» (назначение слоев для отображения в схемах). Для выбранного маршрута этого достаточно.

Также нужно создать определение подложки .subst. Создадим технологическое определение подложки tech.subst. Эта подложка более универсальна и может использоваться как для ЕМ-моделирования, так и для 3D-визуализации топологии и некоторых других продвинутых инструментов.

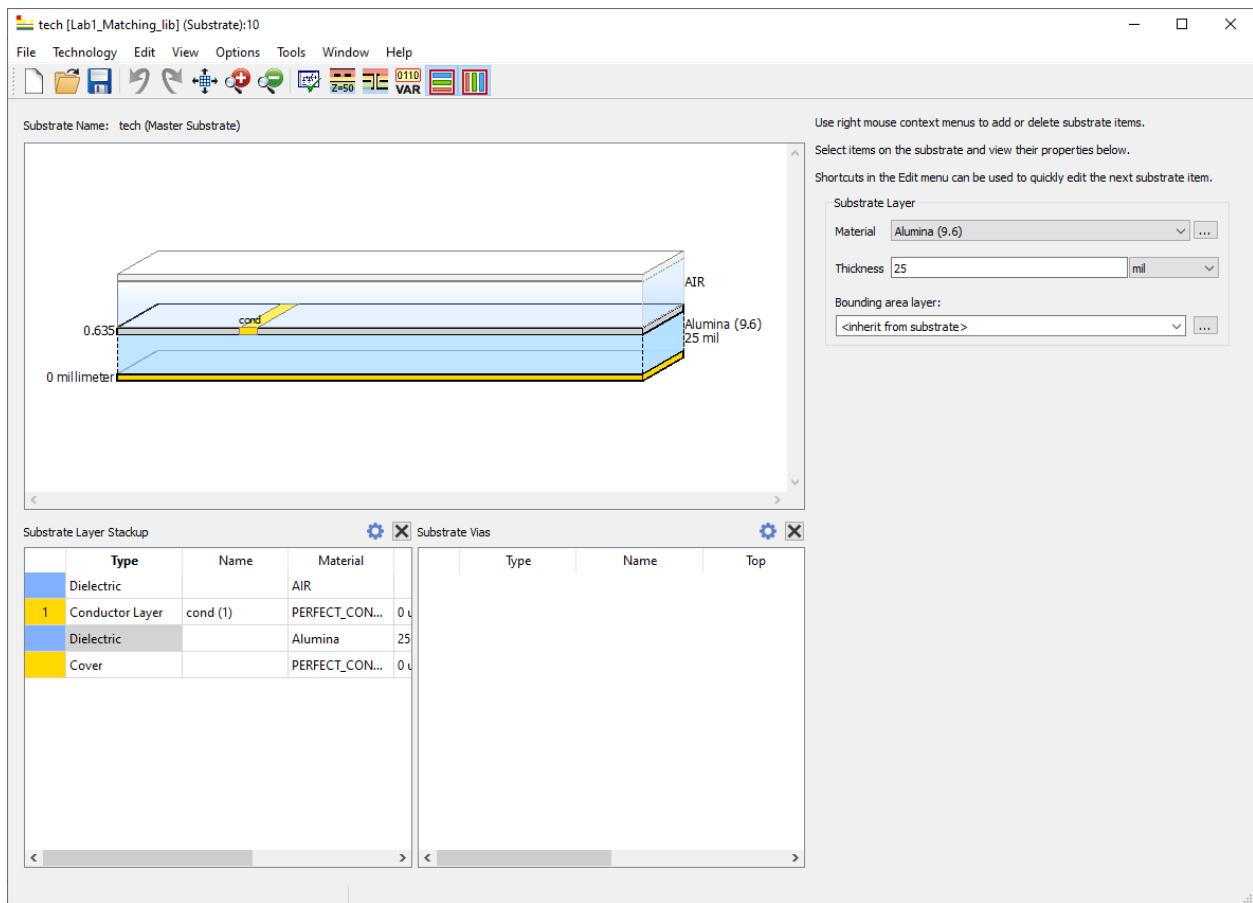
Для этого в основном окне ADS по Options – Technology – Edit Stackup (tech.subst) запускаем мастер создания 3D-подложки.



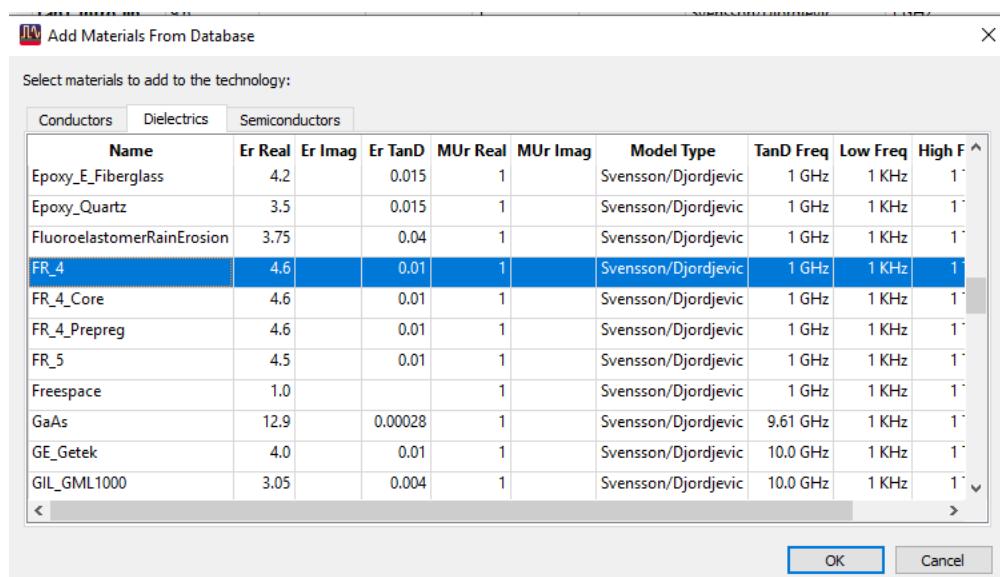
Выбираем Create the master substrate from scratch. В окне New Substrate оставляем имя подложки tech, в качестве шаблона используем 25milAlumina.



В открывшемся окне редактора 3D-положки надо провести несколько модификаций.



В основном окне выбираем слой диэлектрика. В правой части появляется окно его настройки. В списке материалов (Material) по умолчанию как правило загружены только воздух и Alumina. Чтобы добавить новый материал, нужно нажать на кнопку справа от выпадающего списка Materials. В открывшемся окне в нижней части нажимаем на кнопку Add From Database, и таблице с диэлектриками ищем FR-4. Выбираем его, нажимаем OK.



Material Definitions

View Technology for this Library: Lab1\_Matching.Lib

Material		Permittivity (Er)			Permeability (MuR)		Djordjevic			
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary	Type	TanD Freq	Low Freq	Hi
Alumina	Lab1_Matchin...	9.6			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
FR_4	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
FR_4_Core	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
FR_4_Prepreg	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
SolderMask	Lab1_Matchin...	3.3			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH

Add Dielectric Add From Database... Remove Dielectric

OK Cancel Apply Help

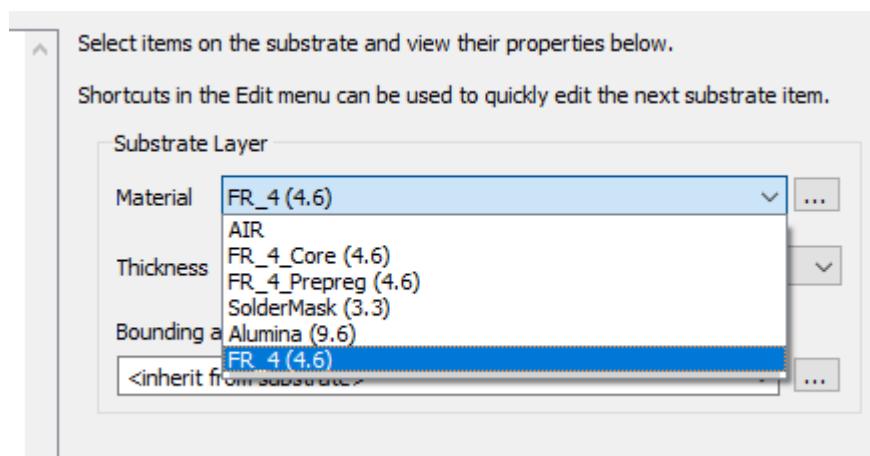
Если используемого материала в базе материалов ADS нет, его надо самостоятельно определить по кнопке Add Dielectric. В этом случае, для стандартной модели подложек кроме указания относительной диэлектрической проницаемости Er и тангенса угла диэлектрических потерь TanD, полезно еще задавать частоту, относительно которой задан TanD в параметр TanD Freq. Для ВЧ-диэлектриков это как правило 10 ГГц, для не ВЧ (таких как FR4) обычно 1 ГГц. Уточнять нужно в документации на диэлектрик.

Material Definitions

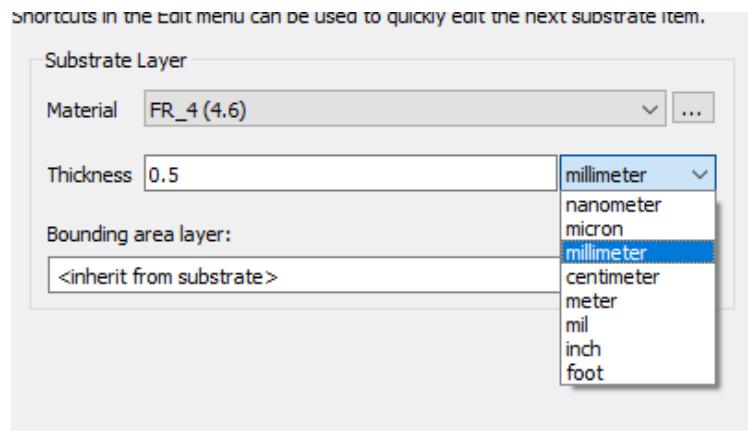
View Technology for this Library: Lab1\_Matching.Lib

Material		Permittivity (Er)			Permeability (MuR)		Djordjevic			
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary	Type	TanD Freq	Low Freq	Hi
AIR	Lab1_Matchin...	1		0	1	0	Frequency Independent			
Alumina	Lab1_Matchin...	9.6			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1
Arlon_AD255C	Lab1_Matchin...	2.55		0.0013	1		Svensson/Djordjevic	10 GHz	1 KHz	1
FR_4	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1

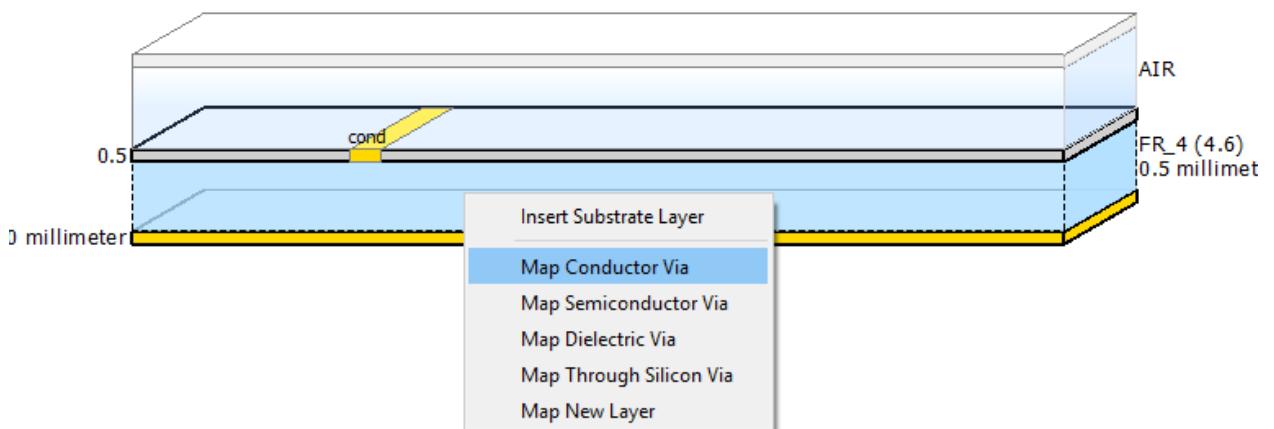
После этого, диэлектрику можно присвоить материал FR-4.



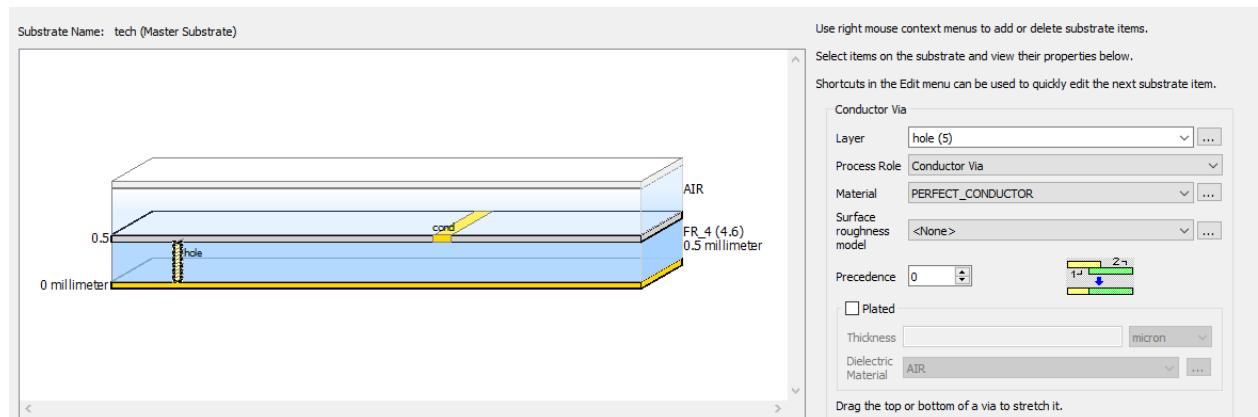
Также, устанавливаем диэлектрику толщину 0,5мм.



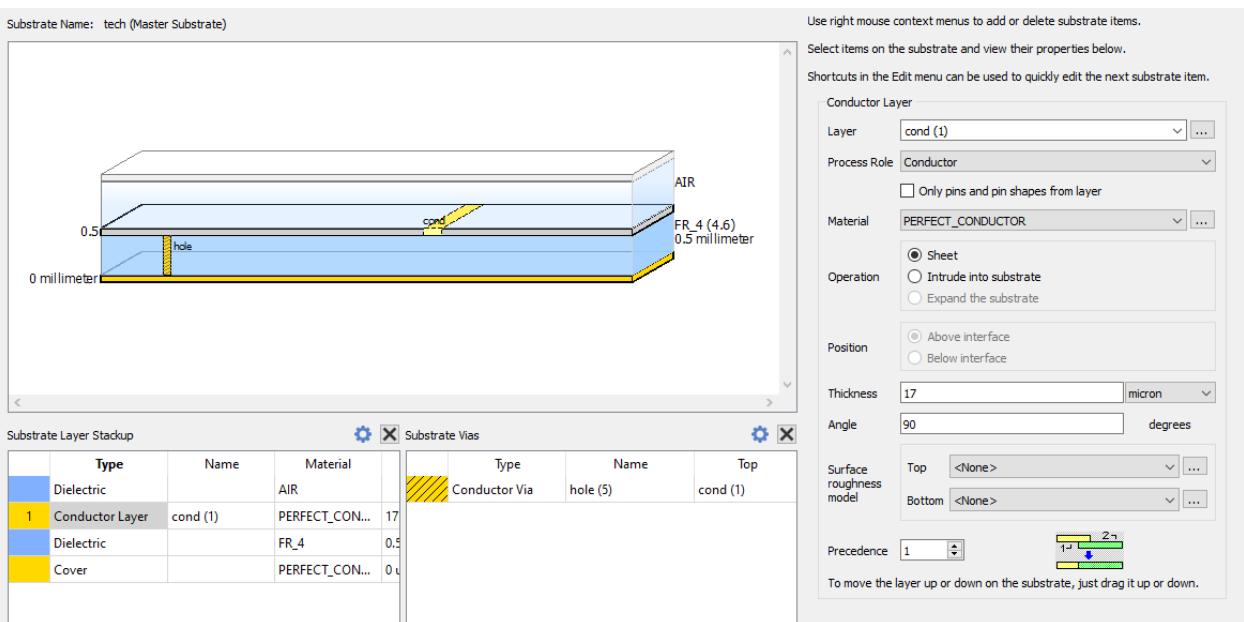
Далее нужно создать переходное отверстие и привязать к нему слой. Для этого, в основном окне по диэлектрику ПКМ – Map Conductor Via.



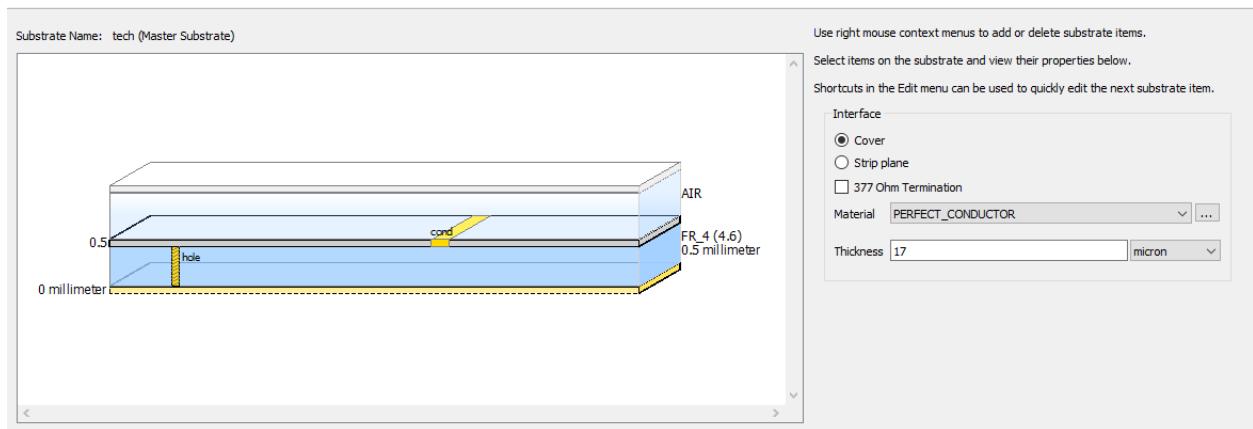
Созданный слой для отверстий должен соответствовать слою hole (5) из стандартной библиотеки слоев ads\_standard\_layers, иметь роль Conductor Via и материал PERFECT\_CONDUCTOR.



Далее, в основном окне выбираем верхний слой проводников cond (1). Этот слой соответствует металлизации на верхнем слое. Имеет роль Conductor, материал PERFECT\_CONDUCTOR, моделировать его будем как поверхность (Operation = Sheet), с толщиной 17 мкм.



Окончательно, нижний слой земли будет моделироваться бесконечным (Interface = Cover), с толщиной 17 мкм, материал PERFECT\_CONDUCTOR.



Создание базовой 3D-подложки закончено. Данная подложка кроме прочего применима для ЕМ-моделирования микрополосковых устройств и является одной из самых простых.

## Использование инструмента SmithChart

Для расчета электрических параметров согласующих цепей на идеальных компонентах воспользуемся инструментом SmithChart.

Запускается данный инструмент по команде Tools – Smith Chart из окна схемы.

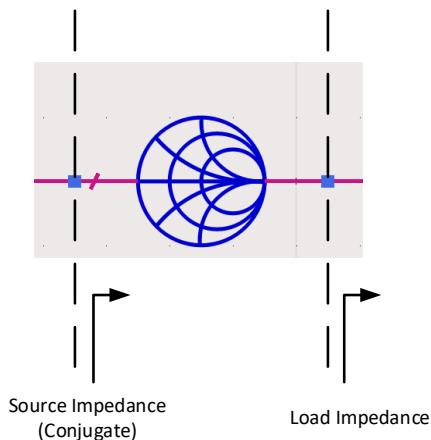
По техническому заданию, нам надо согласовать  $Z_S = 50 \text{ Ом}$  с  $Z_L = 35+j15 \text{ Ом}$  на частоте 2,5 ГГц с использованием короткозамкнутого шлейфа. Волновые сопротивления линий выбраны 50 Ом.

В открывшемся окне изначально надо задать следующие настройки:

- частота расчета, поле Freq (GHz) = 2.5
- нормировка относительно 50 Ом, поле Z0 (Ohms) = 50 и включена галка Normalize.

Далее нужно задать точки входного и выходного сопротивлений.

 В инструменте SmithChart при настройках по умолчанию,  $Z_S^*$  - это входной импеданс согласующей цепи, а  $Z_L$  – импеданс нагрузки, на которую подключают согласующую цепь. Если даны импеданс источника  $Z_S$  или желаемый выходной импеданс согласующей цепи  $Z_L^*$ , то эти данные надо комплексно-сопрягать.



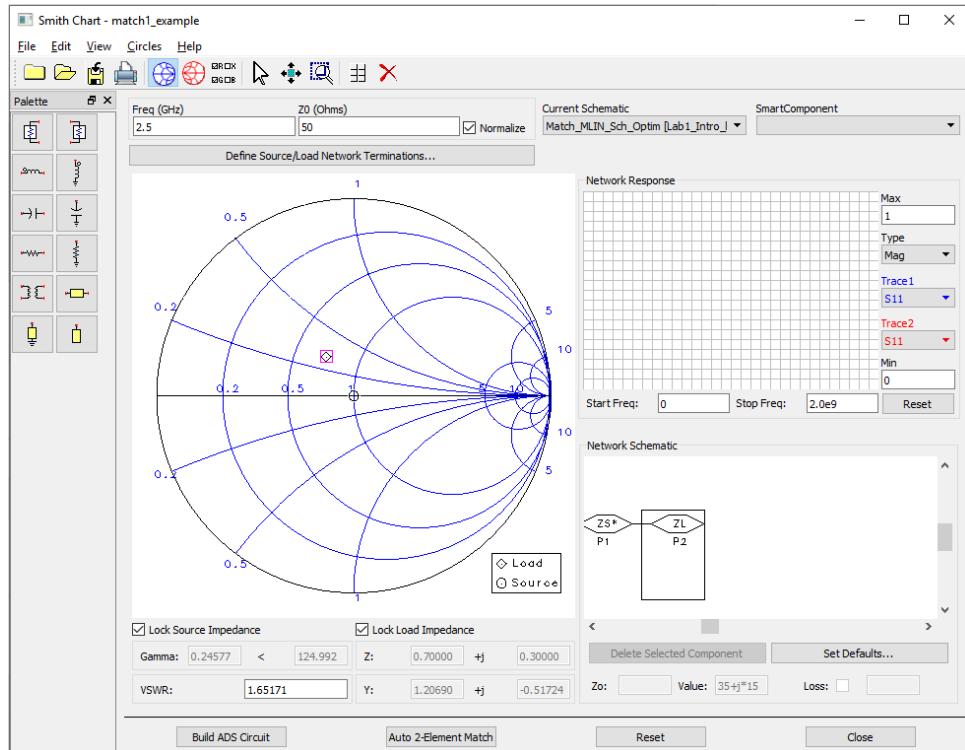
Известно, что любой точке на диаграмме Смита соответствуют несколько взаимно однозначных значений – коэффициент отражения (поле Gamma в виде амплитуда/фаза в градусах), нормированные относительно заданного в поле Z0 импеданса и проводимости (поля Z и Y в форме Re/Im). Для любой точки также показывается ее КСВН относительно коэффициента отражения (поле VSWR). Также для портов в поле Value можно задавать полный импеданс.

Для текущей задачи:

$ZS^*$  -  $Zo=50$ , центр диаграммы Смита (или эквивалентно Gamma = 0,  $Z=1+j0$  или  $Z=1+j0$ ).

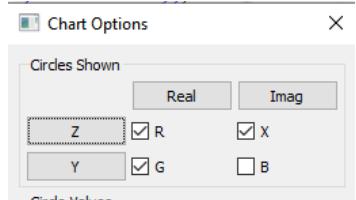
$ZL$  соответствует сопротивлению нагрузки, в поле Value введём  $35+j*15$ .

Чтобы случайно не сдвинуть эти точки, включаем галки Lock Source Impedance и Lock Load Impedance.

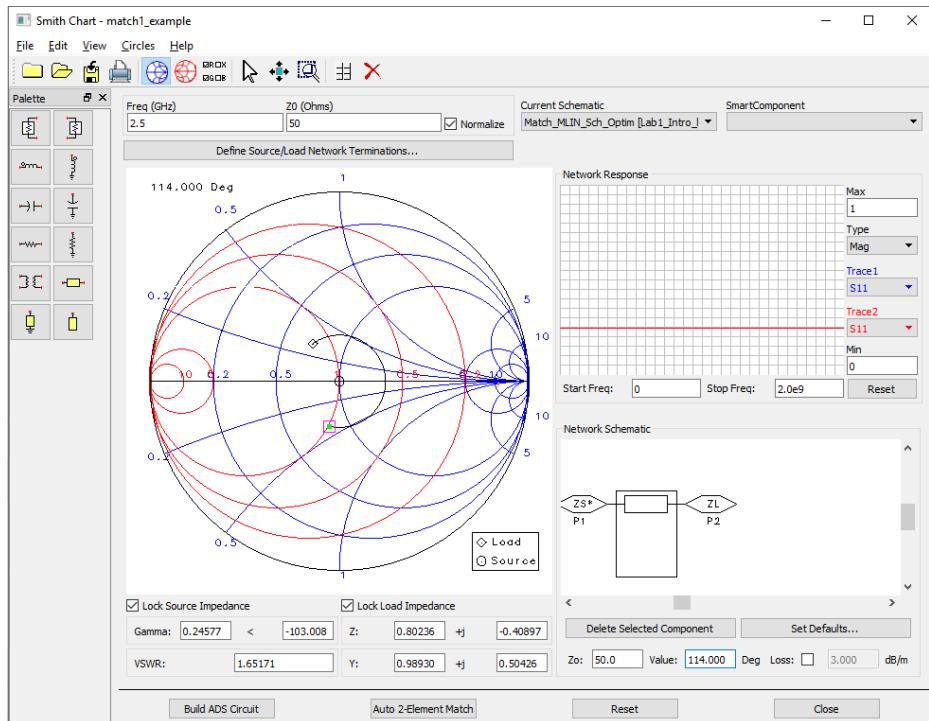


Идеальные компоненты добавляются из палитры. При их добавлении графика рисуется в сторону генератора от нагрузки. Шлейфы по умолчанию добавляются с волновым сопротивлением нормировки схемы (50 Ом в примере).

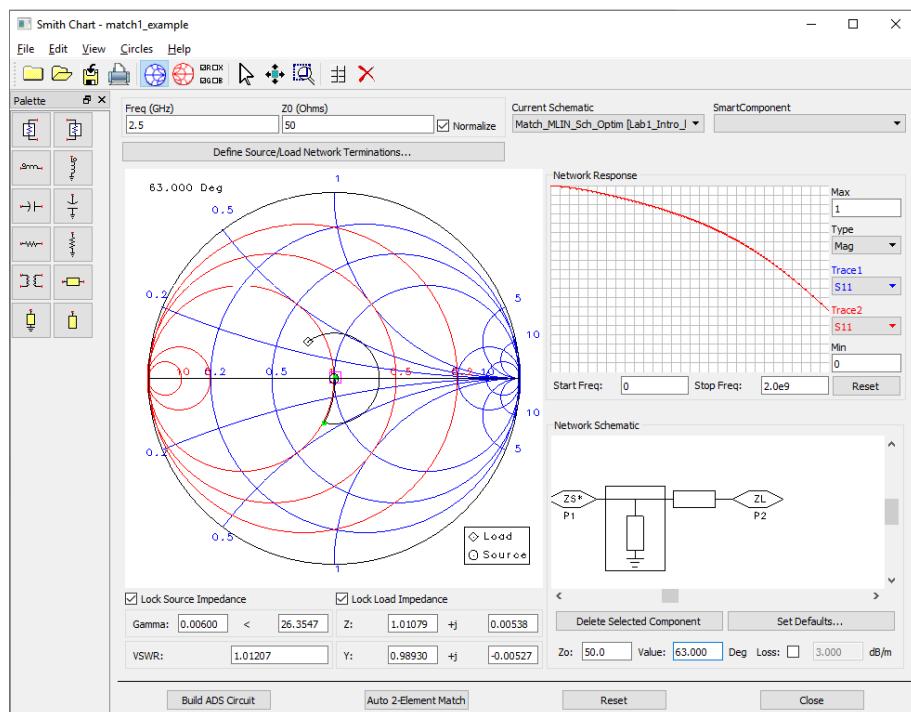
Сначала добавим последовательную линий передачи . После добавления появится дуга вокруг центра (т.е. ее волновое сопротивление 50 Ом). Точку поставим приблизительно на линии постоянного  $y=1$  (т.к. короткозамкнутый шлейф при подключении на 50 Ом-ную линию движется по линии  $y=1$ ). Для отображения линии  $y=1$  по команде View – Chart Options можно включить отображение линий постоянной действительной части проводимостей.



Вид диаграммы Смита.

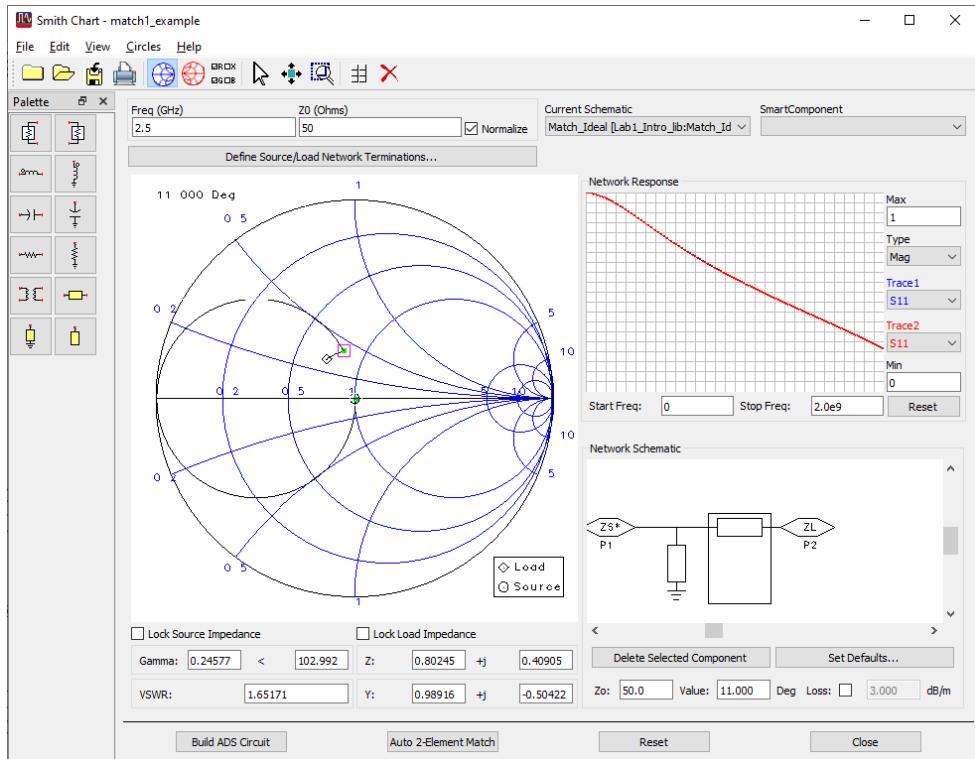


Далее, добавляем короткозамкнутый шлейф . Ведем точку к  $ZS^*$  (центру диаграммы Смита).



При необходимости, можно подправить положение точек как двигая их по диаграмме Смита, так и правя связанные данные. В левой части показываются координаты точки, в которую пришла цепь со стороны нагрузки после компонента, выбранного в поле Network Schematic. Под полем Network Schematic показываются параметры выбранного компонента (для линий передачи - это электрическая длина и волновое сопротивление, для емкостей, резисторов и индуктивностей это их номинал).

Для найденного решения еще есть парное к нему (в работе не используется).



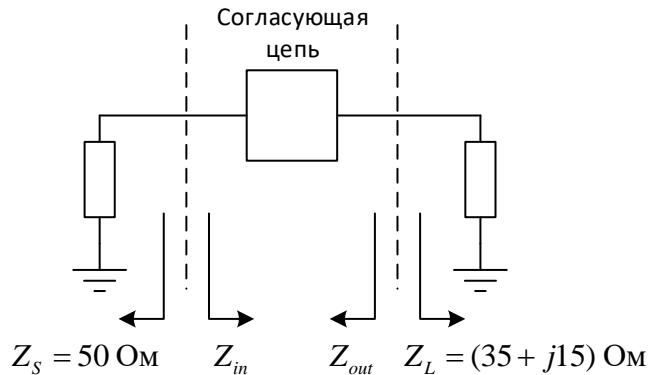
Любой добавленный компонент можно удалить по кнопке Delete Selected Component (при выбранном компоненте в поле Network Schematic).

Сеанс в SmithChart можно сохранить на будущее .

Сеанс в SmithChart можно связывать с установленными в схемах умными компонентами типа DA\_SmithChart (управляется выпадающими списками Current Schematic и SmartComponent) для синтеза согласующих подсхем. В данной лабораторной работе такая возможность не используется.

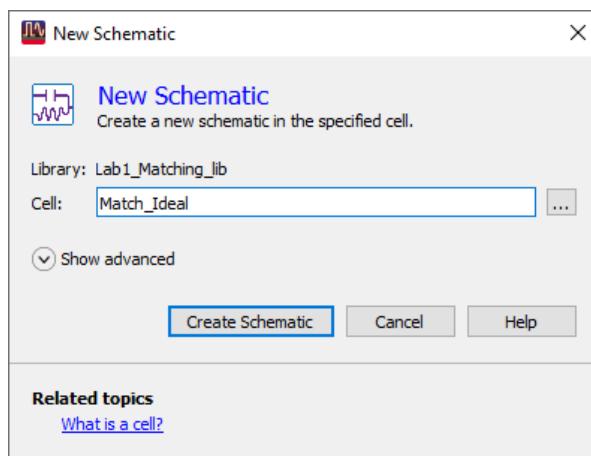
## Модель на идеальных линиях передачи

Пусть необходимо составить согласующую цепь для согласования источника  $Z_s = 50 \text{ Ом}$  с нагрузкой  $Z_L = (35 + j15) \text{ Ом}$  на частоте 2,5 ГГц.

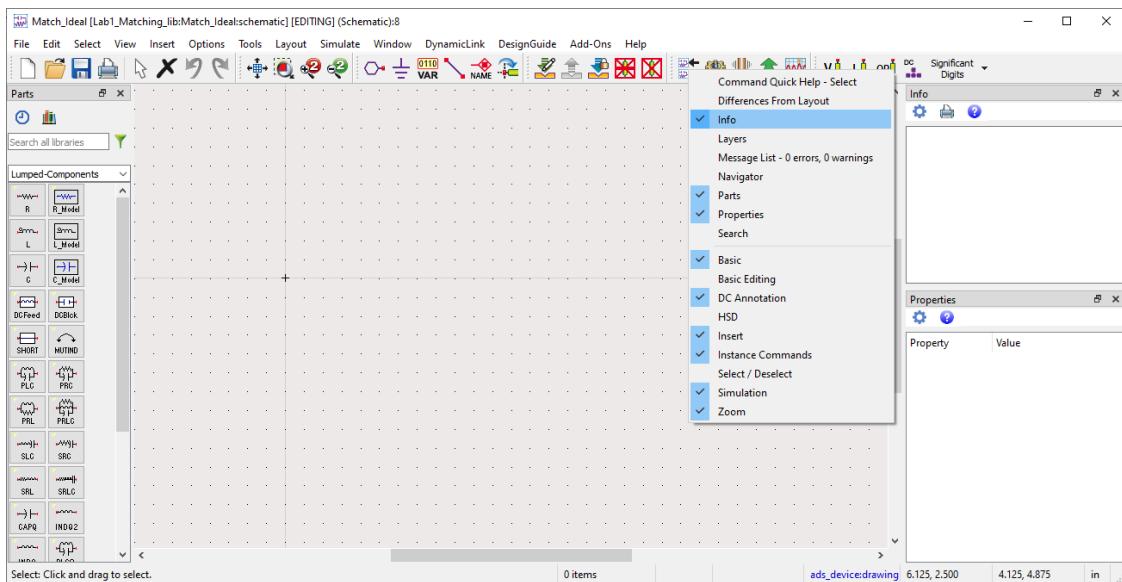


Создание новой схемы делается по команде File – New – Schematic .

Каждая новая схема создается в ячейке (Cell, единица структурирования в библиотеке проекта). По умолчанию, каждая новая схема хранится в новой ячейке. Назовем «Match\_Ideal».

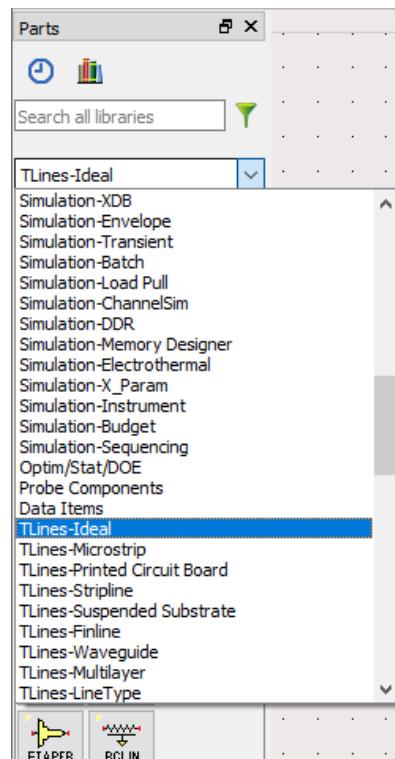


Откроется новое окно редактора схемы.



Настройка отображения тулбаров и боковых окон осуществляется либо по командам в меню View – Docking Windows, либо по ПКМ в области тулбаров.

Компоненты добавляются из бокового окна Parts. Большая часть компонентов расположена в различных палитрах. Палитра выбирается по выпадающему списку.



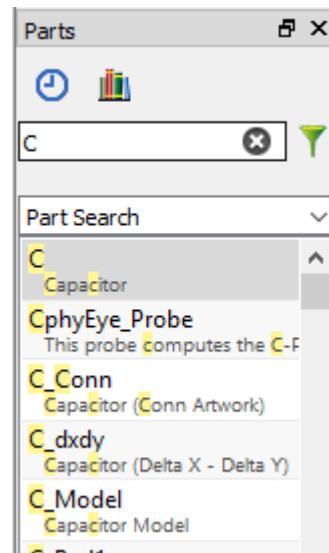
Если компонент не добавлен в какую-либо палитру или неизвестно его точное имя, то можно открыть окно Library Browser (Insert – Component – Component Library, быстрая клавиша «I»), где можно осуществлять поиск и подбор по описанию.

Component Library

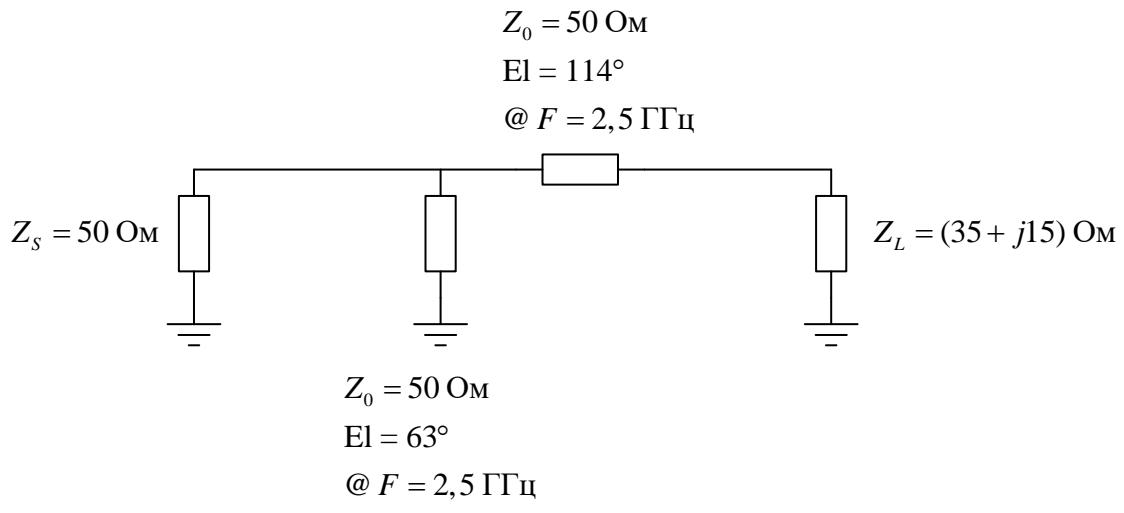
Component	Description	Library	Vendor	Placement	Availability	UI	License
5G_FBMC_Rx_AWGN_Analysis	5G FBMC Rx AWGN Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
5G_FBMC_Tx_Analysis	5G FBMC Tx Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
5G_FBMC_Tx_Source_Analysis	5G FBMC Tx Source Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AC	AC Small-Signal Simulation	Simulation-AC	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ACPR_Measurement_Analysis	ACPR Measurement Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ACPWDS_MDS		ads_tlines	Both	Available	N/A	N/A	
ACPWT_MDS		ads_tlines	Both	Available	N/A	N/A	
actHInOut		ads_schematic...	Both	Available	N/A	N/A	
actHInp		ads_schematic...	Both	Available	N/A	N/A	
actHOut		ads_schematic...	Both	Available	N/A	N/A	
ADS_Diode_Model	ADS Root Diode Model	Devices-Diodes	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADS_FET	ADS Root field effect transistor	Devices-GaAs	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADS_FET_Model	ADS Root field effect transistor Model	Devices-GaAs	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADS_MOS	ADS Root MOS Transistor	Devices-MOS	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADS_MOS_Model	ADS Root MOS Transistor Model	Devices-MOS	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADSDiode	ADS Root Diode	Devices-Diodes	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADSHBT_Model	ADS Heterojunction Bipolar Transistor Model	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADSHBT_NPN	ADS Heterojunction Bipolar Transistor, NPN	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
ADSHBT_NPN_Th	ADS Heterojunction Bipolar Transistor w/ Thermal...	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
Advanced_Curcice2_Model	Advanced_Curcice2 Model	Devices-GaAs	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AGC_Amp	Voltage-controlled amplifier	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AGC_Amp	Voltage-controlled amplifier	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AGC_PwrControl	AGC loop power control	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AGC_PwrControl	AGC loop power control	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AgilentIBT_Model	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor Model	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AgilentIBT_NPN	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor, NPN	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AgilentIBT_NPN_Th	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor w/ Thermal...	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AIRIND1	Libra Aircore Inductor (Wire Dia.)	Passive-RF Circ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AIRIND2	Libra Aircore Inductor (Wire Gauge.)	Passive-RF Circ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AM_DemodTuned	AM Demodulator, Tuned	System-Mod/D...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AM_ModTuned	AM Modulator, Tuned	System-Mod/D...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AmplH1H2	Amplifier model based on 1st and 2nd harmonic ...	System-Data M...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AmplH1H2_Setup	Amplifier model based on 1st and 2nd harmonic ...	System-Data M...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
Amplifier	AmpH1H2 setup	ads_behavioral	Both	Available	N/A	N/A	
Amplifier2		System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
AmplifierP2D		System-Data M...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
* C_F_Probe	RF System Amplifier, Polynomial Model for Nonlin...	C_F_Probe	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	
2492 items found							

Download Libraries...

Также в панели Parts доступен режим поиска по имени компонента Part Search.



Составляем схему. Данное согласование  $Z_S = 50 \text{ Ом}$  с нагрузкой  $Z_L = (35 + j15) \text{ Ом}$  ( $F = 2,5 \text{ ГГц}$ ) можно провести на следующей конфигурации линий передачи (посчитано ранее):



Идеальные линии передачи находятся в палитре TLines-Ideal.

Линия передачи, задаваемая волновым сопротивлением и электрической длиной (на заданной частоте) называется Libra Ideal 2-Terminal Transmission Line (короткое имя TLIN).

Короткозамкнутая на землю идеальная линия передачи (короткозамкнутый шлейф) называется Libra Ideal Transmission Short-Circuited Stub (короткое имя TLSC).

В режиме моделирования S-параметров порты с импедансом задаются с помощью блоков Impedance Termination for S-Parameters (короткое имя Term)



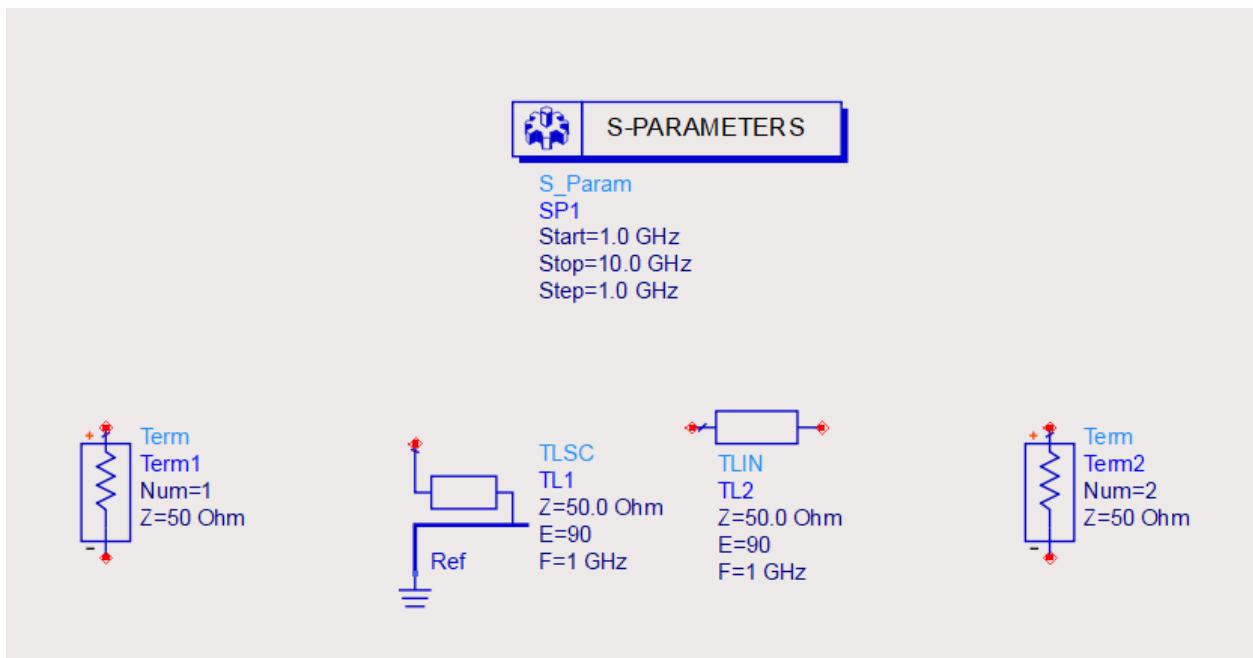
. Находятся они в палитре Simulation-S\_Param.

В ADS нужно в схему добавлять контроллеры выбранного вида симуляции. Для режима S-параметров используется контроллер S-parameter

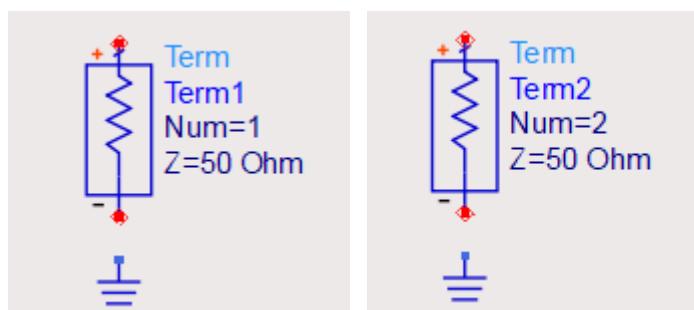


Simulation (короткое имя S\_Param). Находится он в палитре Simulation-S\_Param.

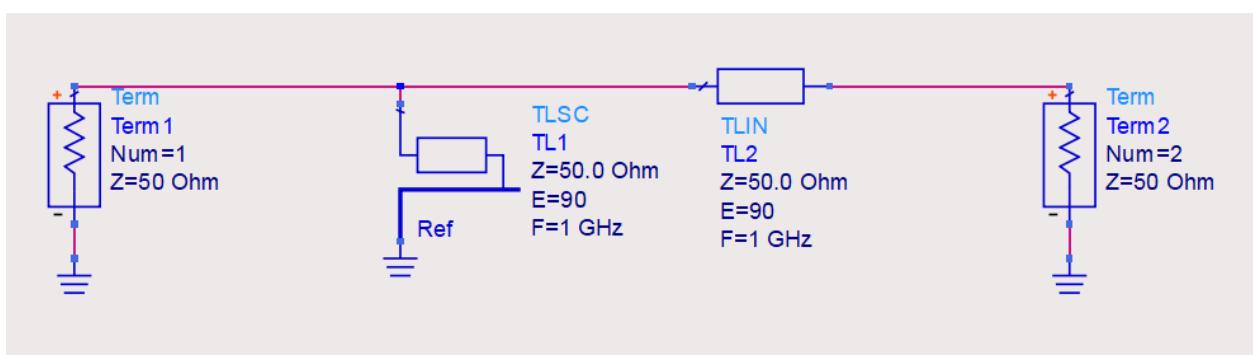
Расположим компоненты в соответствии со следующим рисунком.



Терминалы должны быть отрицательным выходом присоединены к земле. Земляной контакт ставится по команде Insert – Ground .



Далее нужно соединить цепи. Цепь ставится по команде Insert – Wire (Ctrl+W).



Далее нужно установить компонентам нужные параметры.

Каждый компонент после установки в схему рядом со своим обозначением имеет несколько строк:

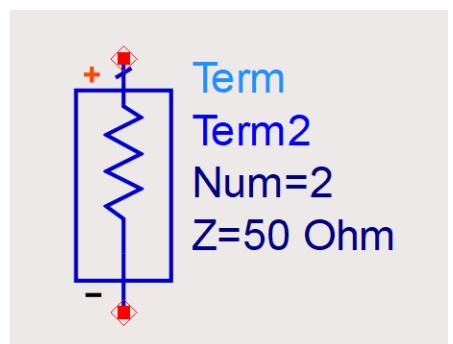
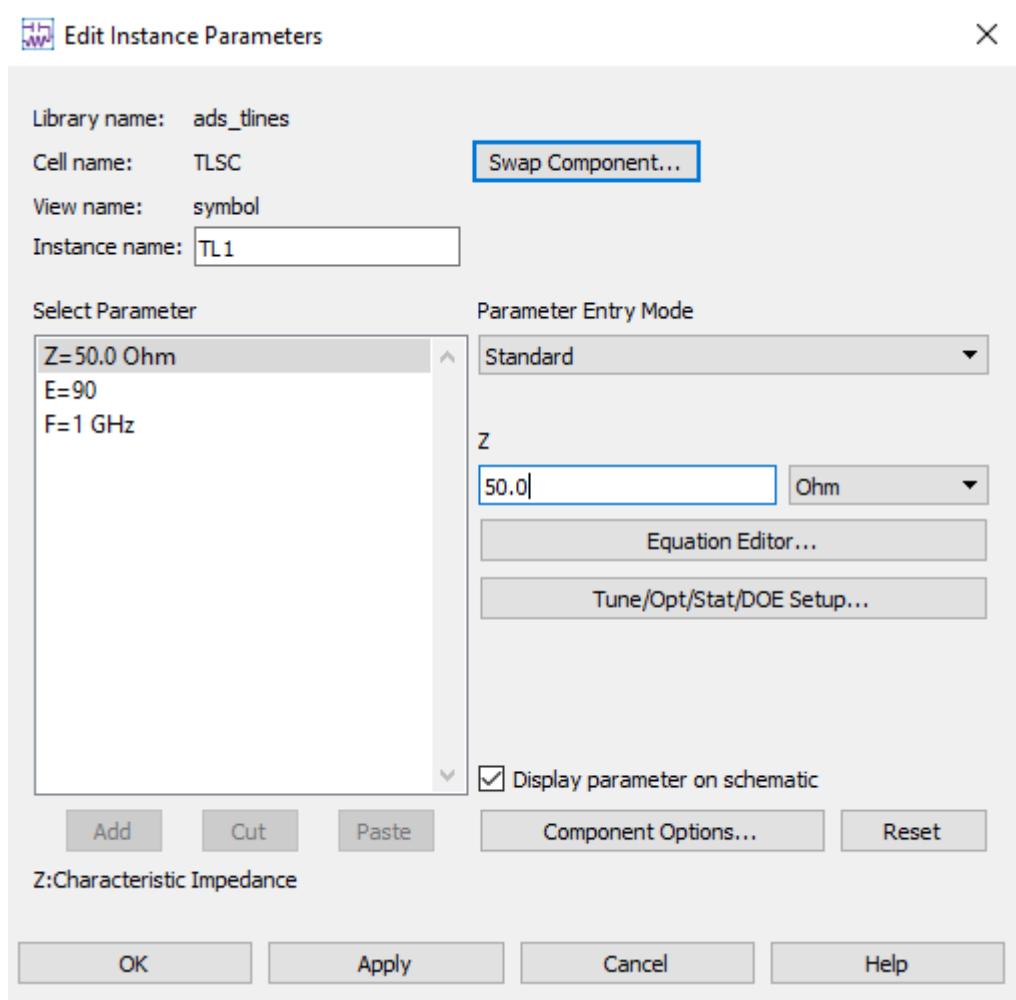
- Светло-голубая «Term» строка (при настройках цветов по умолчанию) – это краткое имя компонента (аналогично поиску в панели Part).

- Синяя строка «Term2» - позиционное обозначение компонента (Instance name, RefDes). Обычно имеет формат «Имя + порядковый номер». Можно свободно менять для удобства.

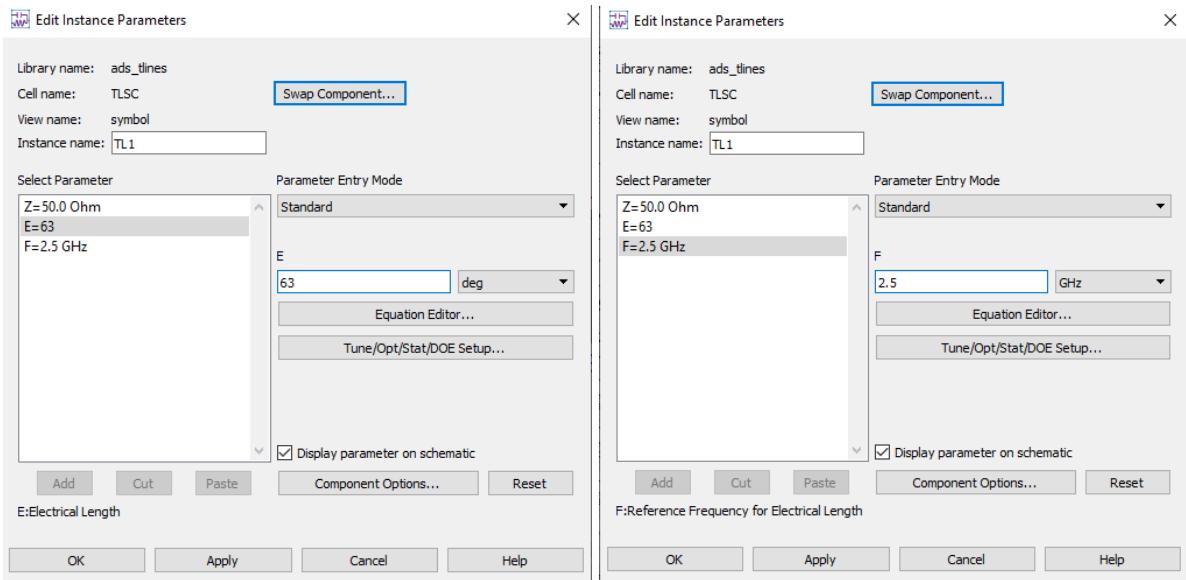
- Одна или несколько темно-синих строк («Num=2» и «Z=50 Ohm») – это вынесенные для отображения в схеме параметры компонента.

Параметры можно задавать, как находясь внутри компонента (ДЛКМ по компоненту или ПКМ – Component – Edit Component Parameters), так и снаружи. Снаружи можно менять только те параметры, которые вынесены для отображения.

Заходим в свойства короткозамкнутого шлейфа TL1.



Список параметров компонента находится в группе Select Parameter. Волновое сопротивление (Z) по умолчанию 50 Ом соответствует необходимому. Электрическую длину (E) выставляем 63°, референсную частоту (F) 2,5 ГГц.

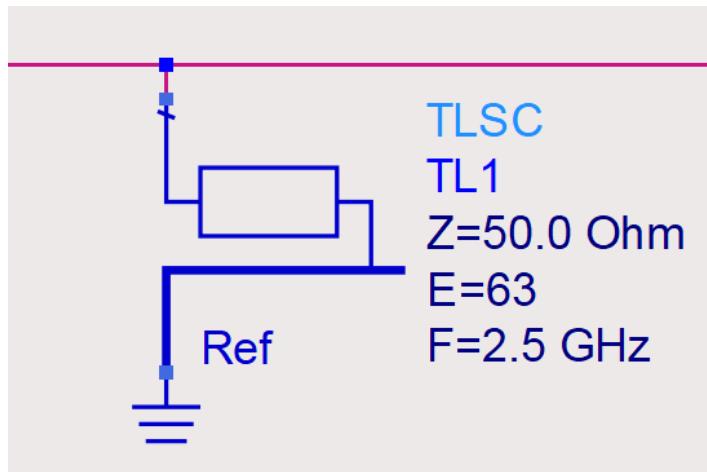


При выборе параметра в нижней части появляется строка-подсказка, что это за параметр; в поле справа от значения можно выбрать единицу; галочка «Display parameter on schematic» управляет отображением параметра под символом компонента в схеме; по кнопке «Equation Editor» параметру можно присвоить специальное выражение, ранее определенное в схеме; по кнопке «Tune/Opt/Stat/DOE Setup» определяется, используется ли данный параметр при подстройке, оптимизации, статистическом анализе и DOE (Design for Optimization, отдельный вид оптимизации) и как он может в этом виде моделирования меняться.

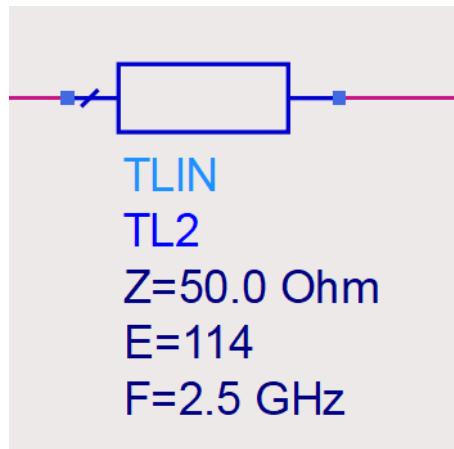


При заполнении параметров надо внимательно следить, чтобы был использован правильный десятичный разделитель (точка, а не запятая), не было никаких лишних или неанглийских символов, были использованы правильные скобки и пр.

После изменения параметров, короткозамкнутый шлейф TL1 в схеме должен выглядеть следующим образом.

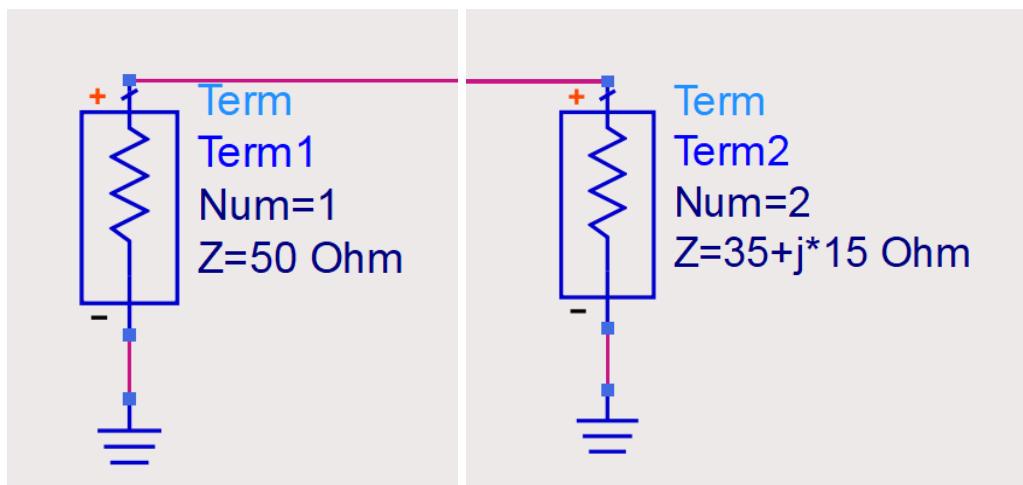


Линии передачи TL2 установим волновое сопротивление  $Z = 50 \Omega$ , электрическую длину ( $E = 114$ ), референсную частоту ( $F = 2.5 \text{ GHz}$ ).



Входной терминатор должен иметь свойство  $\text{Num}=1$  (номер порта в матрице S-параметров) и волновое сопротивление  $Z=50 \Omega$ .

Выходной терминатор должен иметь свойство  $\text{Num}=2$  и имеет комплексное сопротивление  $Z=35 + j*15 \Omega$  (имитирующее сопротивление нагрузки).



Окончательно настроим контроллер симуляции. Его параметры сгруппированы по вкладкам. На вкладке Frequency установим, чтобы симуляция проходила от частоты 1 ГГц до частоты 5 ГГц с шагом 10 МГц.

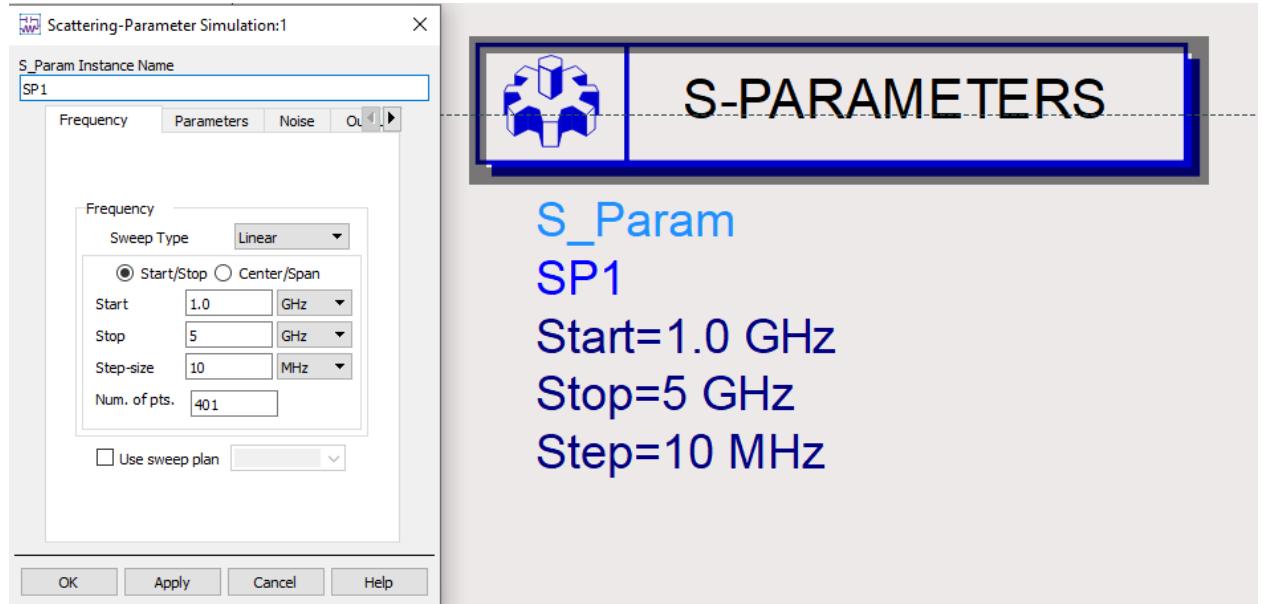
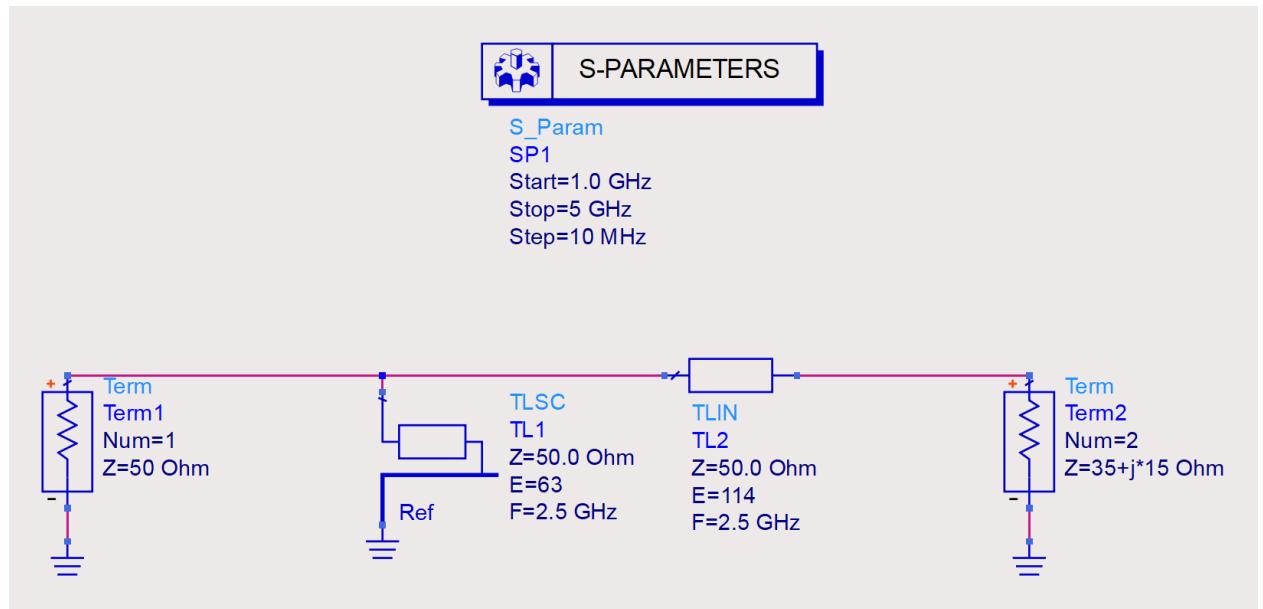
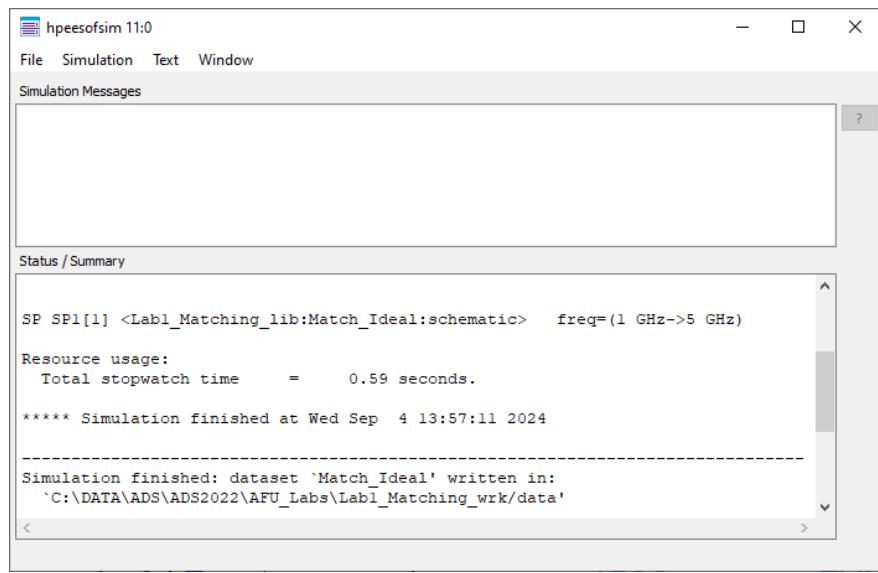


Схема для моделирования собрана. В общем виде она должна выглядеть следующим образом.



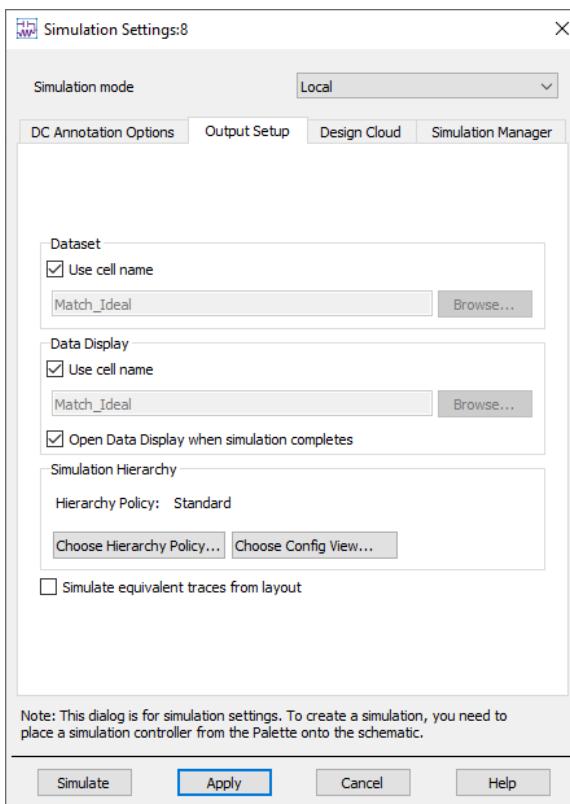
Запуск моделирования из схемы осуществляется по команде Simulate – (клавиша «F7»).

Во время симуляции открывается окно логгера симуляций hpeesofsim. В него вводится текущий лог симуляции, а также вся необходимая информация при наличии предупреждений и ошибок.

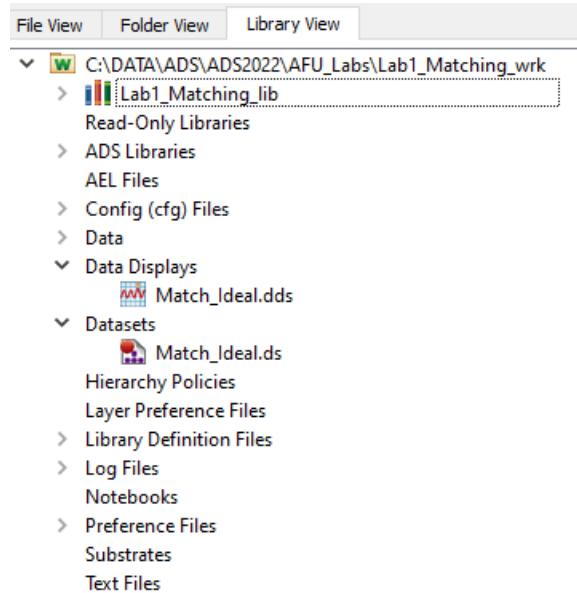


В ADS при настройках симуляции умолчанию контроллер симуляции после расчета создает результат расчета (датасет, файл с расширением \*.ds) и автоматически открывается окно графиков (файл с расширением \*.dds) с привязанным базовым датасетом. Все они имеют одинаковое имя, по имени ячейки.

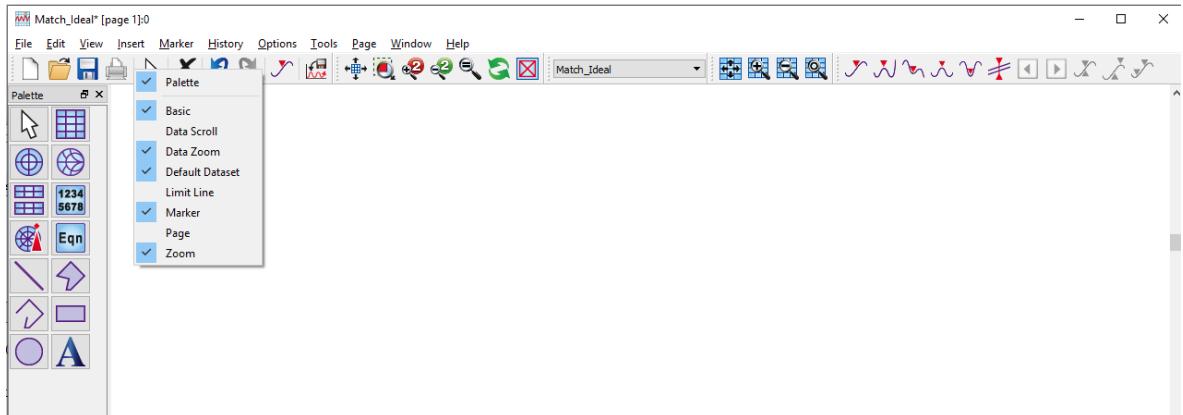
Можно настроить так, чтобы схема писала результаты в разные датасеты. В какой датасет будет писаться результат расчета и будет ли автоматом создано окно графиков определяется настройками Simulate – Simulation Setting на вкладке Output Setup.



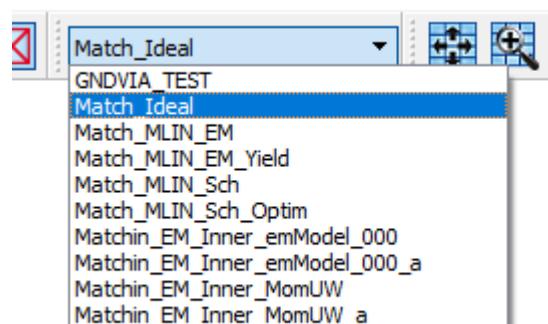
Все созданные в текущем проекте датасеты и окна графиков можно увидеть в основном окне ADS в режиме отображения Library View в списках Datasets и Data Displays. Физически файлы датасеты хранятся в подпапке \data. Файлы окон графиков в корневой папке проекта \_wrk.



Так же, как и у окна редактора схем, внешний вид (включенные тулбары и боковые панели) определяются по ПКМ по области тулбаров.



Привязанный к области графиков датасет можно изменить в выпадающем списке в тулбаре Default Dataset.

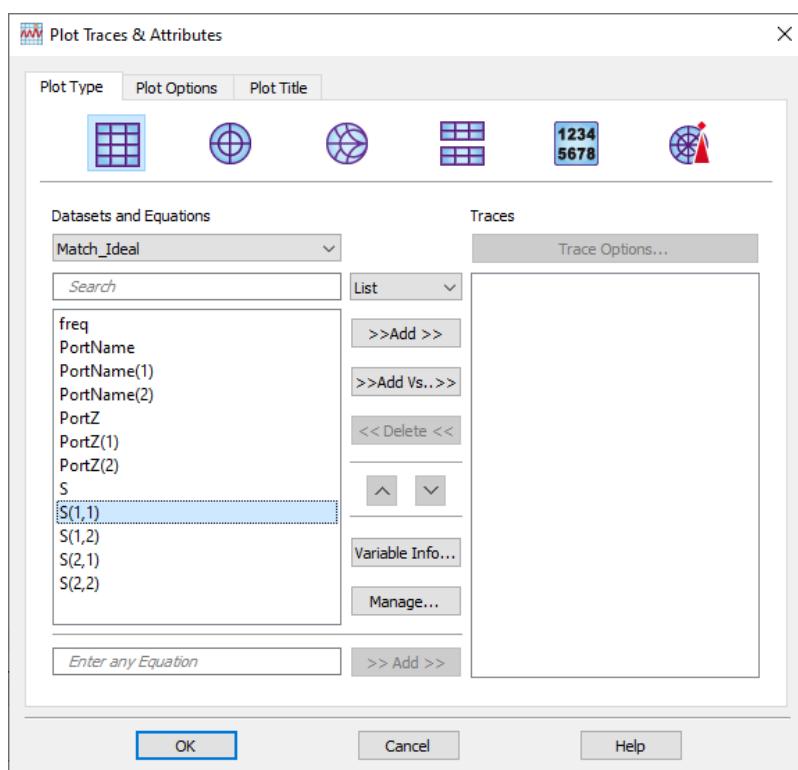


Создадим прямоугольное полотно для графиков, где будут показаны амплитуды коэффициента отражения по входу и коэффициента передачи (в дБ) в зависимости от частоты. Полотно графика создаются из боковой панели

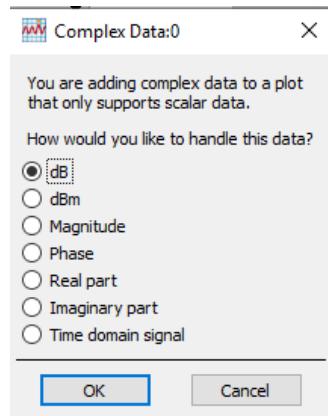


Palette. Для прямоугольного полотна это .

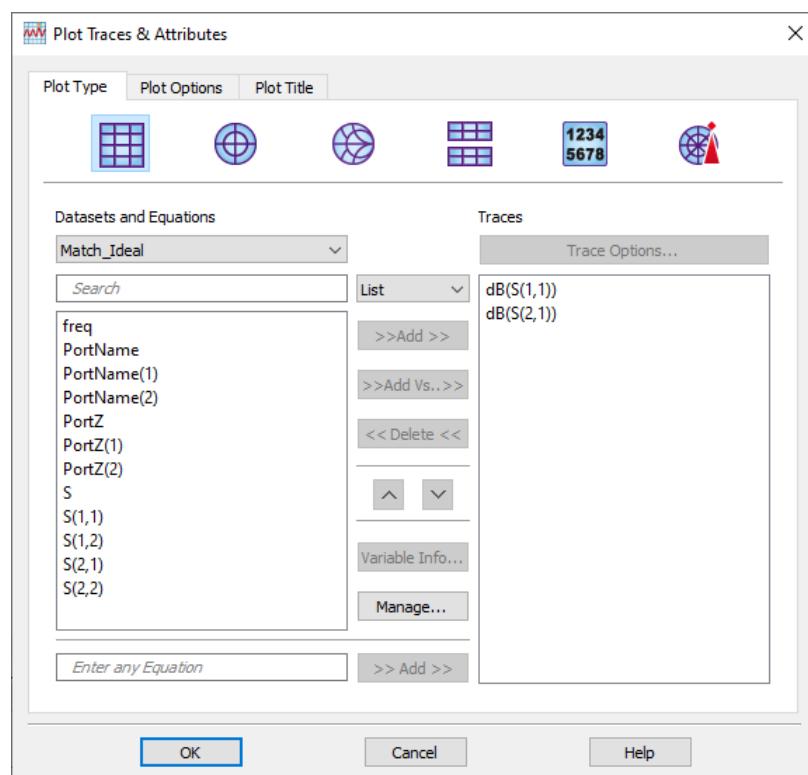
После размещения полотна графика, откроется окно Plot Traces & Attributes, где будет предложен выбор данных для отображения на полотне. В верхней части под выбором типа полотна графика есть выпадающий список «Datasets and Equations». Он позволяет на одно полотно выводить графики из разных датасетов. По умолчанию, в этом списке выведен датасет, привязанный к схеме.



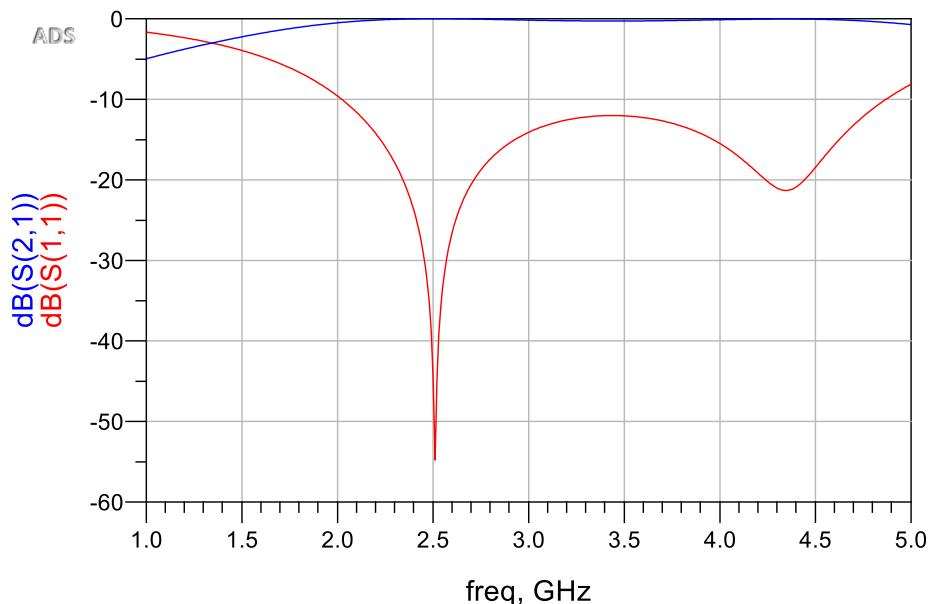
Для входного коэффициента отражения нужно выбрать результат « $S(1,1)$ » нажать кнопку «>>Add>>» (или ДЛКМ по результату). Т.к.  $S(1,1)$  – это комплексные данные, то будет предложено несколько вариантов преобразования для отображения на прямоугольном полотне. Нас интересует амплитуда в логарифмическом масштабе, выбираем преобразование «dB».



В правой части в списке «Traces» появится выражение « $\text{dB}(\mathbf{S}(1,1))$ ». Аналогично сделаем для « $\mathbf{S}(2,1)$ ».

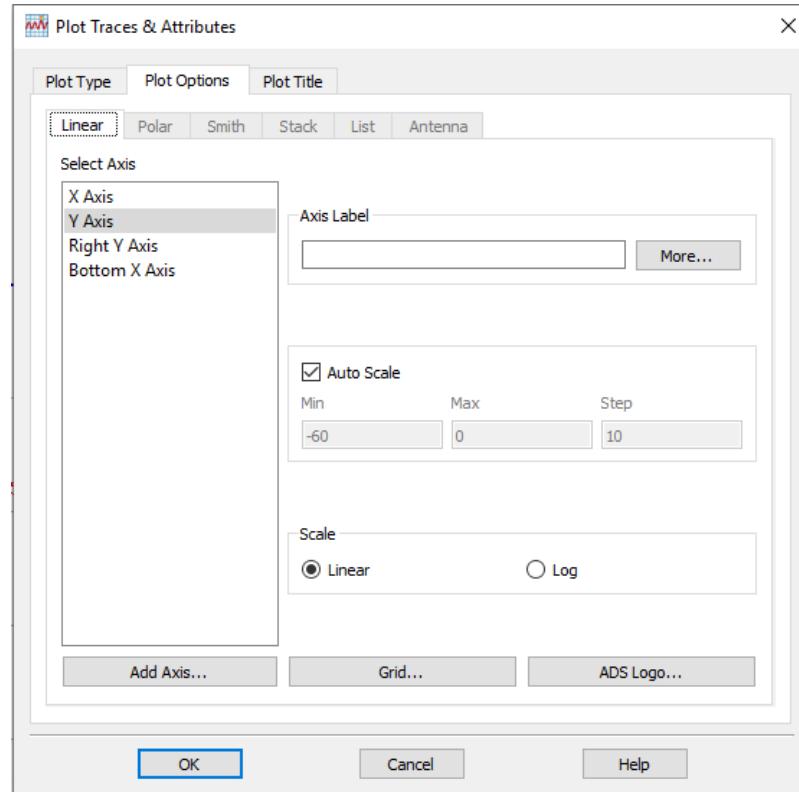


После нажатия на «OK» появился прямоугольное полотно графиков.



Дополнительно можно настроить стиль отображения как всего полотна, так и отдельных графиков на нем. Вход в настройки полотна осуществляется по команде в свободной части полотна графика ПКМ – Item Options (или ДЛКМ).

При переходе на вкладки Plot Options можно управлять осями на графике (диапазон, шаг, логарифмический или линейный масштаб, подписи осей, числовой формат осей, добавить правую или верхнюю дополнительную ось и пр.).



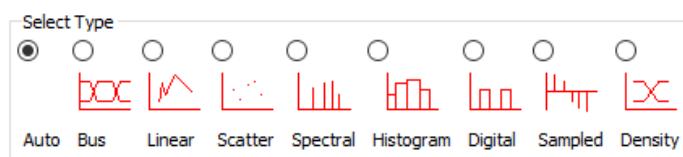
На вкладке Plot Title можно задать подпись всему графику.

На вкладке Plot Type можно нажатием на стиль полотна в заголовке сконвертировать график в полярный, диаграмму Смита, таблицу и пр.

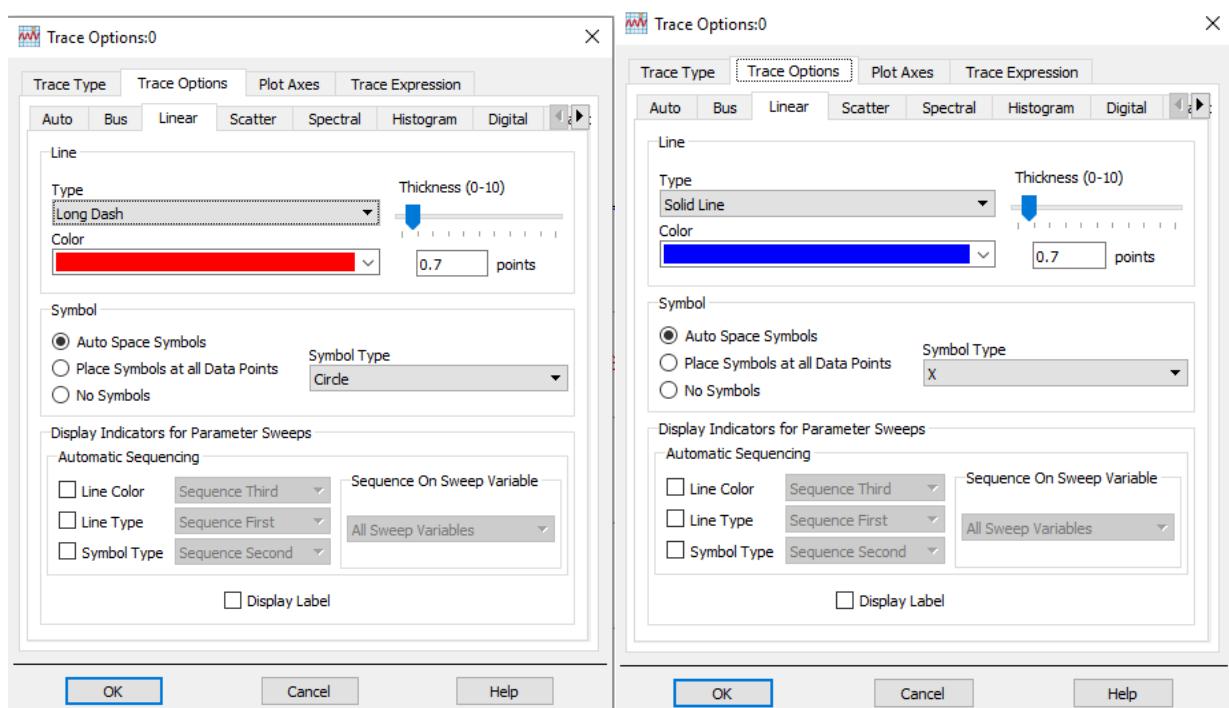


Настройки отдельных графиков осуществляются по кнопке Trace Options при выбранном графике в списке Traces (или ДЛКМ по выражению в или ДЛКМ точно по линии или заголовку графика в полотне графиков).

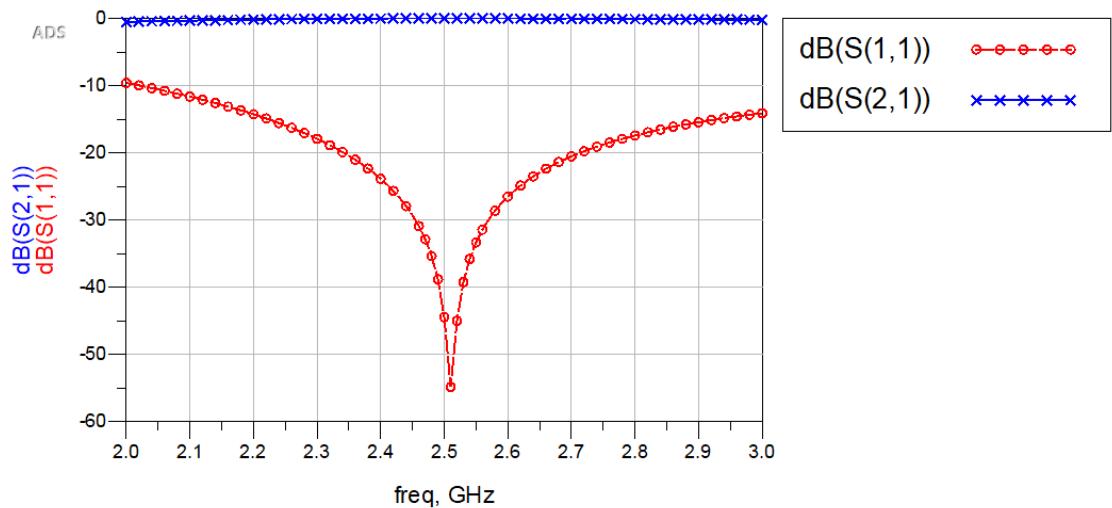
Графикам в зависимости от стиля полотна можно назначать допустимые виды (линии, точки, спектральный, гистограмма и пр.). Определяется на вкладке Trace Type.



На вкладке Trace Options идут управление выбранным стилем графика (толщина и стиль линии, метки, дополнительная цветовая индикация для многомерных результатов и пр.). Например, для dB(S(1,1)) поставим пунктирную линию Long Dash толщиной 0,7pxl, стиль промежуточных меток Circle. Для dB(S(2,1)) установим непрерывную линию Solid Line толщиной 0,7pxl, промежуточные метки X.

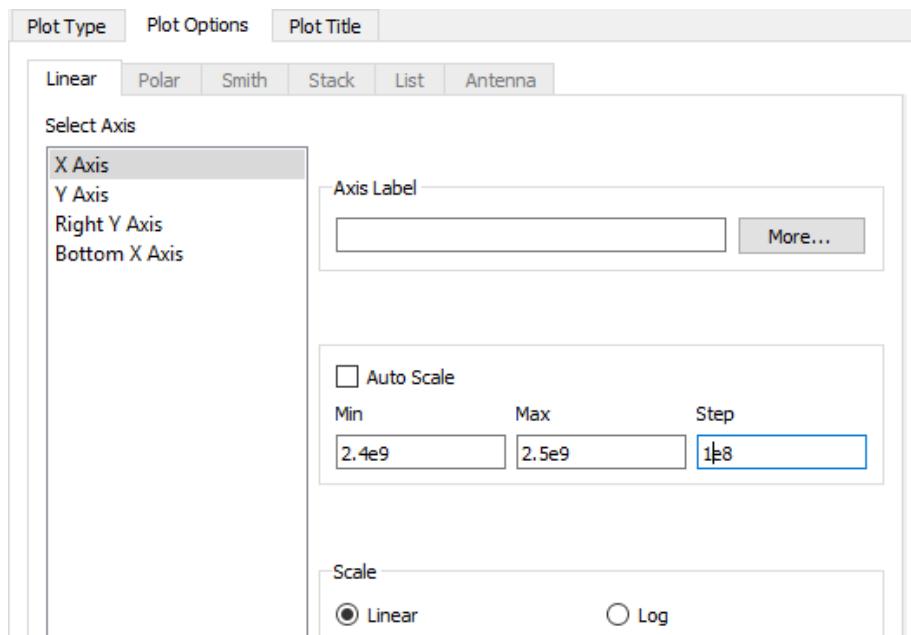


Для отображения легенды в отдельном окне нужно в свободном месте полотна ПКМ – Insert Legend.

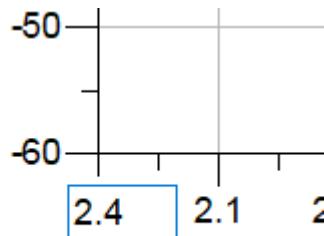


Управлять диапазонами осей можно несколькими путями:

1. В настройках полотна на вкладке Plot Options, выбрав нужную ось в списке Select Axes и выставив диапазон и шаг (сняв галку Auto Scale).



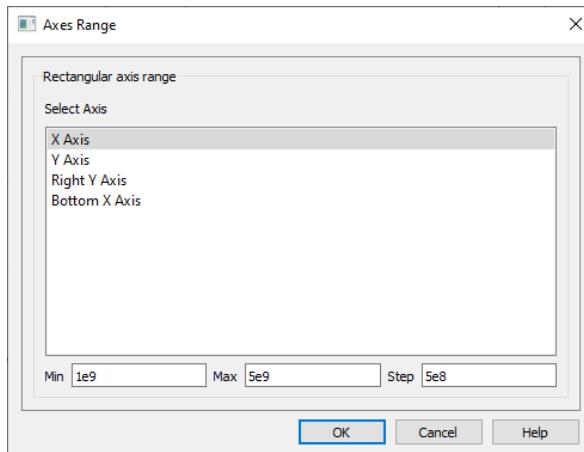
2. На уровне окна графика (щелкнув по крайним значениям X- и Y-диапазонов и введя нужное число).



3. С помощью команд меню View – Zoom Data. Они же расположены в тулбаре Data Zoom.

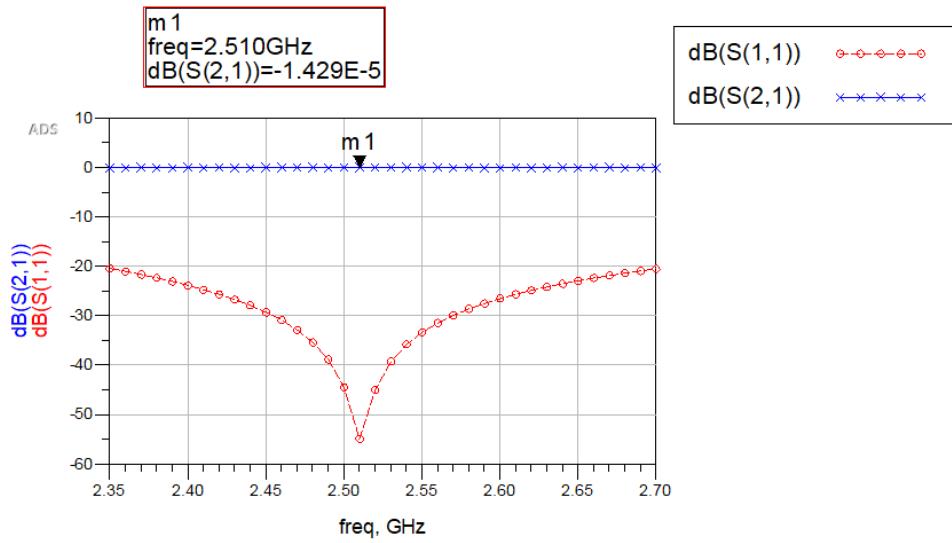


4. В области графика по команде ПКМ-Axes-Range.. открыть окно Axes Range.



Для чтения данных с графика удобно использовать маркеры. Маркеры ставятся по команде Marker – New (Ctrl+M) или по команде Insert A New Marker  из тулбара Marker.

При установке маркера ему автоматически присваивается имя (m+номер) и добавляется поле с описанием этого маркера.



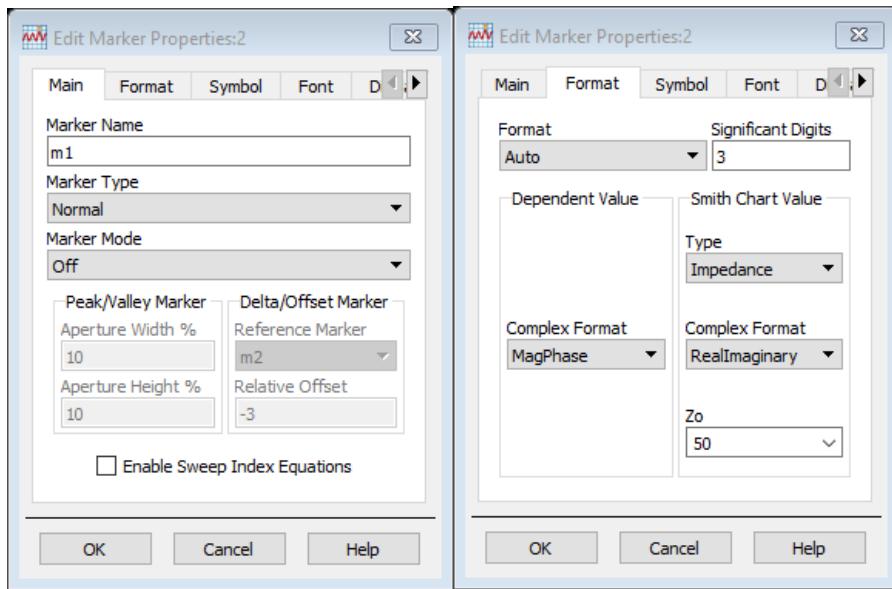
Маркер можно двигать как мышкой, так и по клавишам «Влево/Вправо»,

а также по командам из тулбара Marker. Маркер двигается только по точкам, существующим в датасете (пропуская промежуточные интерполированные для непрерывного отображения участки).

Если нужно поставить маркер в точное положение по независимой переменной (ось X в прямоугольных графиках), то можно вручную ввести желаемое положение.

m 1  
freq: 2.5GHz  
 $\text{dB}(S(2,1)) = -1.429E-5$

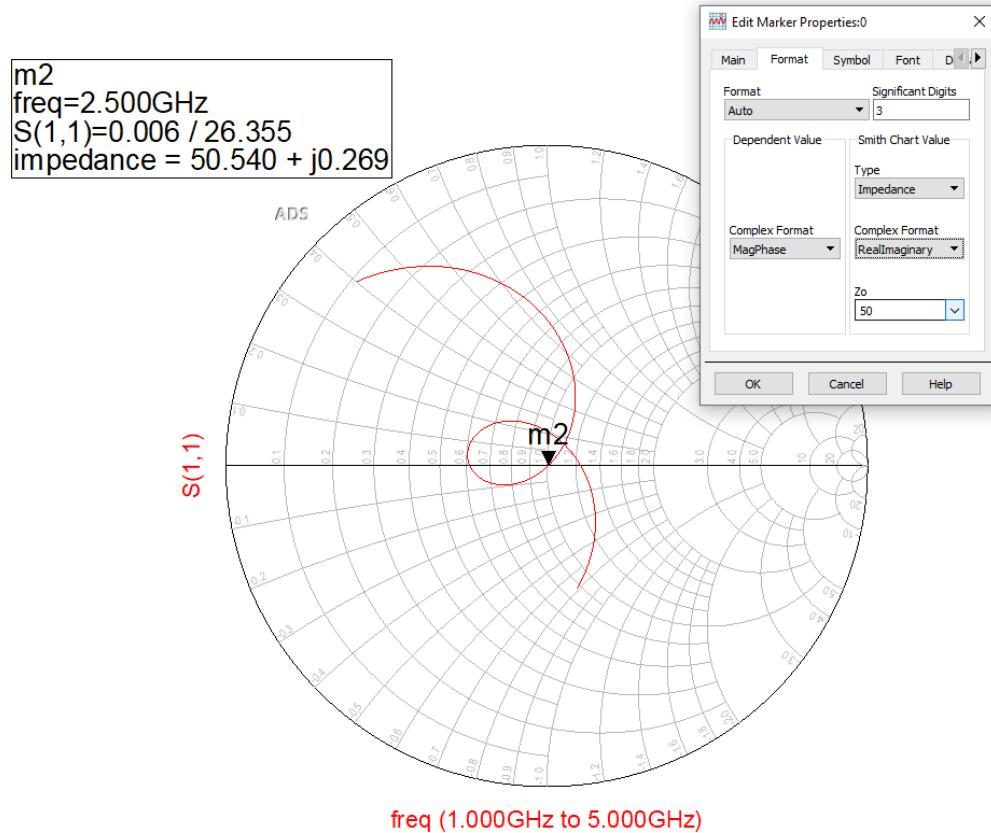
Для настроек формата отображения можно по ДЛКМ зайти в свойства маркера. На вкладке Main можно изменить имя маркера, изменить тип (минимум, максимум, оффсет и т.д.).



На вкладке Format определяется формат отображения чисел (число знаков после запятой, стиль отображения мантиссы и пр.), в том числе комплексных чисел (амплитуда/фаза в градусах, амплитуда/фаза в радианах, действительная/мнимая часть и пр.) и связанных данных на диаграмме Смита.

Дополнительно выведем диаграмму Смита  с  $S(1,1)$ . Диаграмма Смита предназначена для отображения комплексных чисел, поэтому при добавлении  $S(1,1)$  нет предложения по постобработке результатов, как для прямоугольного полотна.

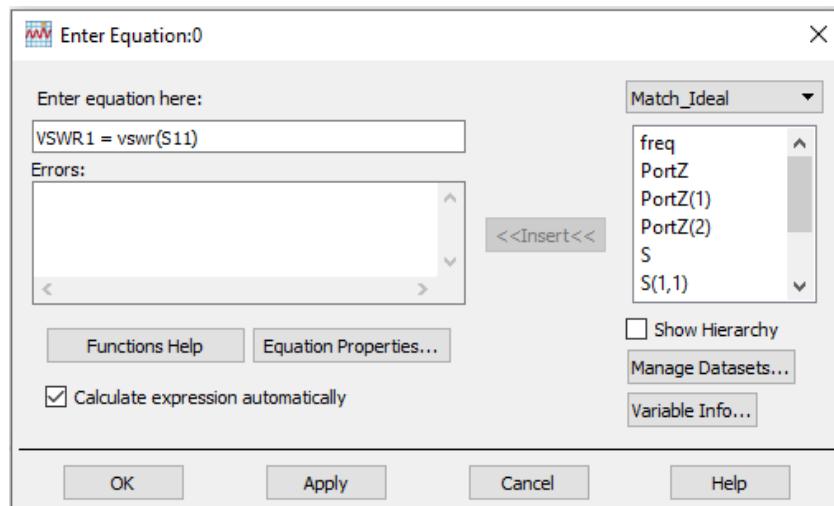
Поставим маркер на частоту 2,5 ГГц и настроим его так, чтобы отображался ненормированный импеданс относительно 50 Ом.



Последним создадим график КСВН по выходу. Этот график является производным от  $S(1,1)$ . Воспользуемся выражением.



Создаем выражение по Insert – Equation. В открывшемся окне пишем выражение следующего вида ( $S11$  является встроенным алиасом к  $S(1,1)$ ):

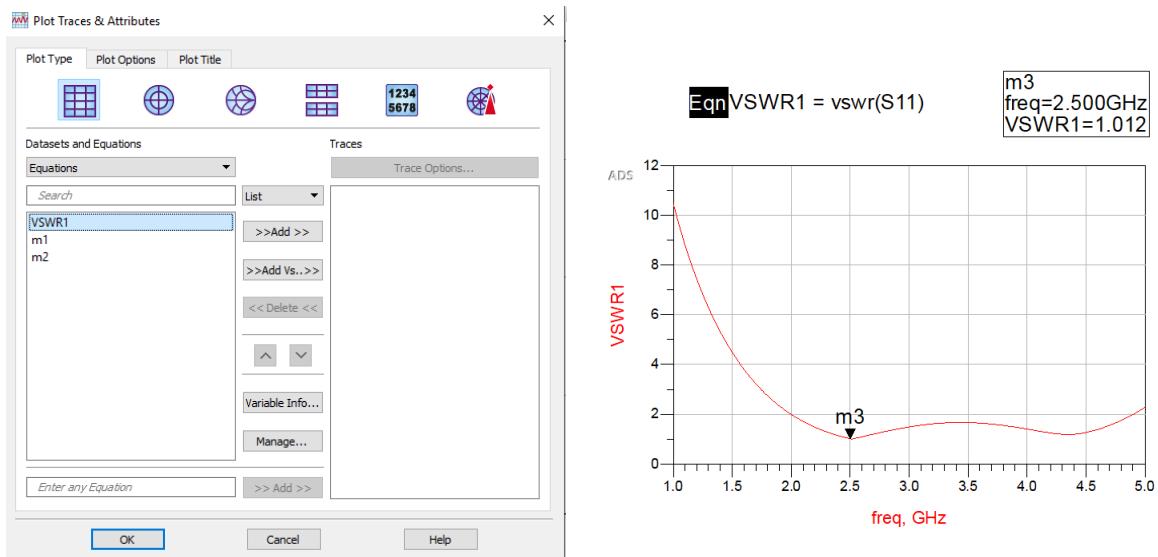


В данном окне показываются найденные ошибки при наборе выражений, а также информации о доступных существующих переменных и

результатах в датасетах. Функция `vswr()` является встроенной и рассчитывает КСВН исходя из соответствующего коэффициента отражения.

$$\text{Eqn} \boxed{\text{VSWR1} = \text{vswr}(S11)}$$

Чтобы вывести на полотно графика выражение, определенное в окне графиков, нужно в списке Datasets and Equations выбрать датасет Equations. В нем расположены все определенные в текущем окне графиков выражения, а также маркеры.



Вообще, расчет КСВН является довольно частым. Для его расчета существует специальное измерительное выражение, которое можно ставить сразу в схему (будет показано дальше).

В дальнейшем так подробно приемы работы с окном графиков расписываться не будут, только если это не какой-то новый прием.

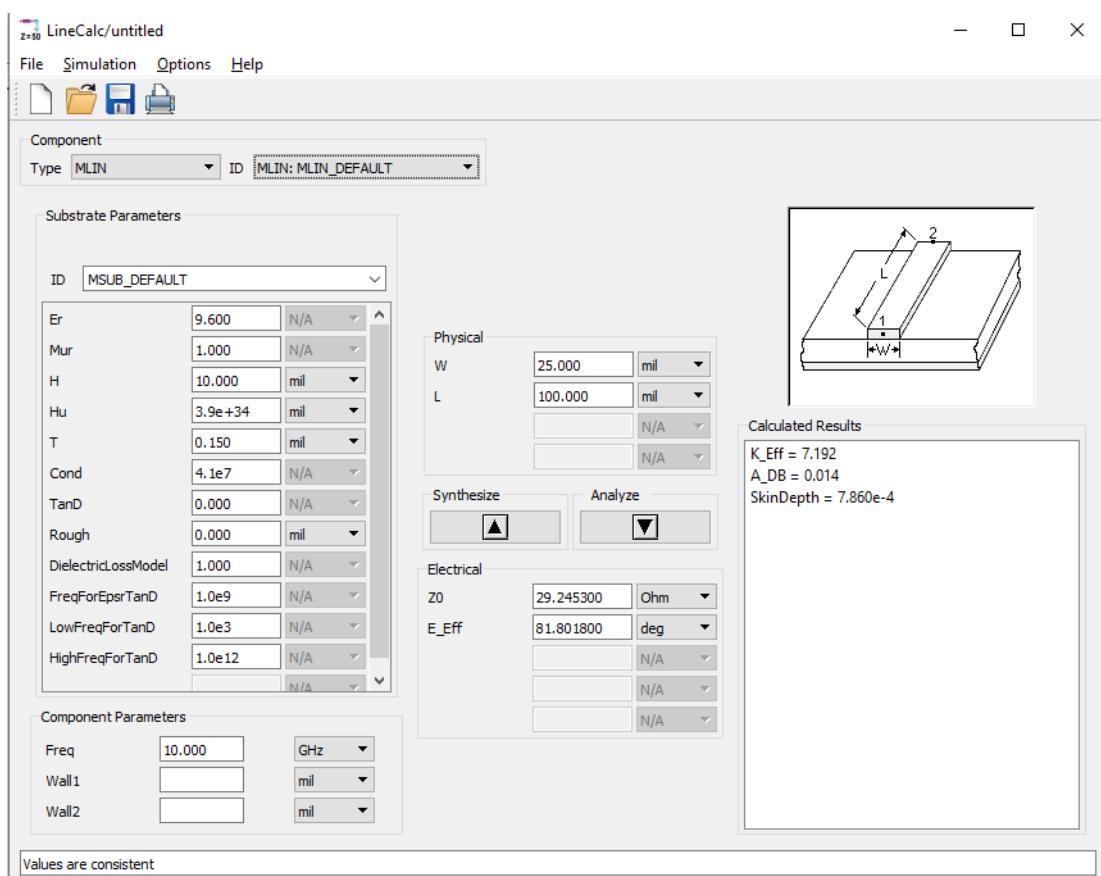
## Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении

Преобразуем рассчитанную ранее согласующую цепь из идеальных линий передачи в микрополосковое представление на схемном уровне.

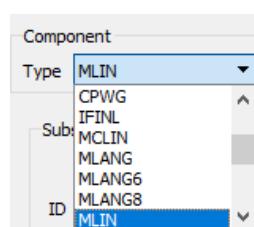
Создаем новую ячейку Match\_MLIN\_Sch со схемой.

Пусть решено проводить проектирование микрополосковой согласующей цепи на подложке FR-4. Будем считать, что данная подложка имеет  $\text{Er} = 4,6$ ,  $\text{TanD} = 0,01$ .

Для расчета геометрических размеров нескольких видов линий передачи используется встроенная в ADS утилита LineCalc. Запускается она по команде в схеме Tools – LineCalc – Start LineCalc .

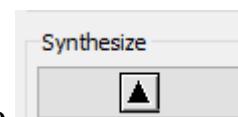


В открывшемся окне нужно сначала выбрать тип линии передачи. Микрополосковая линия имеет обозначение MLIN (выбор в списке Component - Type).

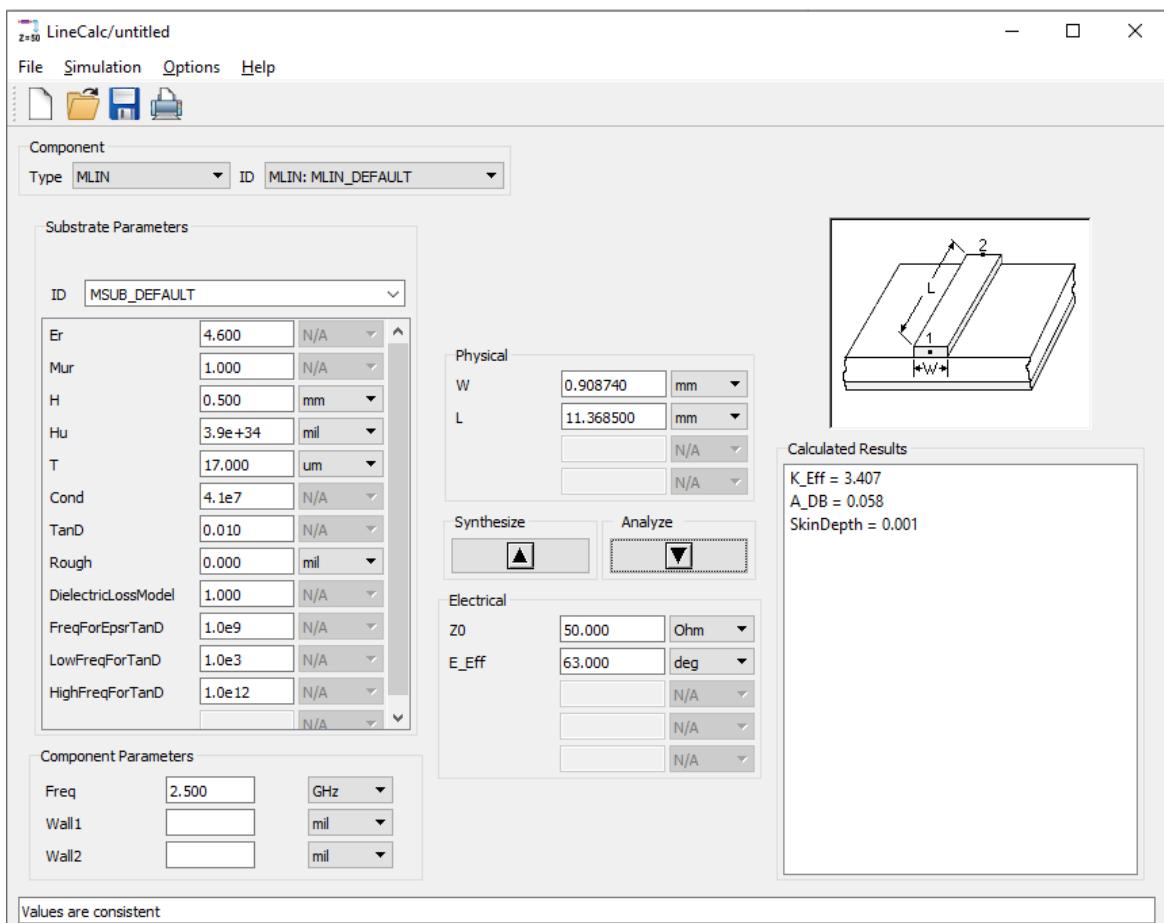


Затем нужно внести геометрические размеры и электрические параметры (показаны измененные относительно по умолчанию):

- Относительная диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon_r = 4.6$
- Толщина подложки,  $H = 0.5 \text{ mm}$
- Толщина металлизации,  $T = 17 \text{ um}$
- Тангенс угла диэлектрических потерь,  $\tan D = 0.01$
- Частота расчета,  $F = 2.5 \text{ GHz}$
- Желаемое волновое сопротивление,  $Z = 50 \text{ Ohm}$
- Желаемая электрическая длина,  $E_{\text{Eff}} = 63 \text{ deg}$



После надо нажать на кнопку Synthesize . Пройдет расчет физических размеров (синтез). Аналогично, по кнопке Analyze можно рассчитать, каким электрическим параметрам соответствуют физические размеры (анализ).



Аналогично повторяем для последовательного участка.

Для короткозамкнутого шлейфа получается размер  $W = 0,9$  мм,  $L = 11,4$  мм. Для последовательного участка  $W = 0,9$  мм,  $L = 20,6$  мм.



Если у расчетного участка получается слишком короткая длина по отношению к ширине (порядка 1 к 1,5 или хуже), то этому участку необходимо добавить  $180^\circ$  длины. Микрополосковые линии с малым отношением длины к ширине перестают работать как линии передачи, превращаясь в плохо предсказуемую без EM-анализа локальную неоднородность.

LineCalc больше нам не нужен, можно закрывать.

Микрополосковые линии находятся в палитре TLines-Microstrip. Нужно будет использовать следующие компоненты:



MSUB – определение подложки



MLIN – микрополосковая линия



MTEE\_ADS – Т-образное соединение



VIAGND – модель отверстия на землю

Т.к. у нас в этой схеме присутствуют повторяющиеся значения у разных компонентов, то вынесем эти значения в переменные. Переменные в схему



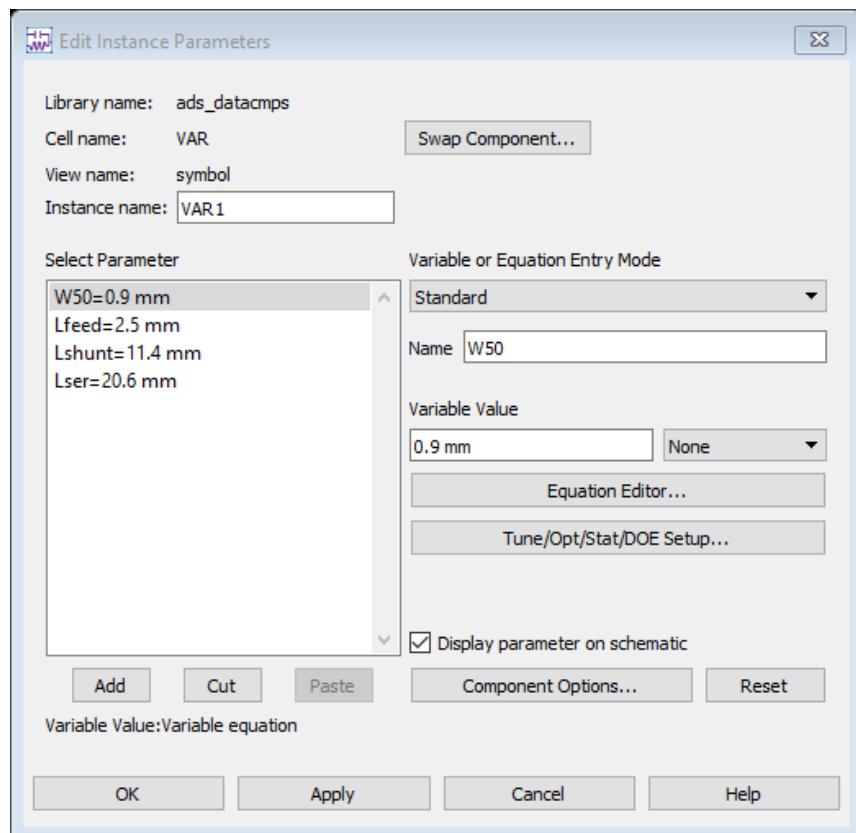
ставятся по команде Insert – VAR.

Добавим следующий список переменных (таблица 1).

**Таблица 1.**

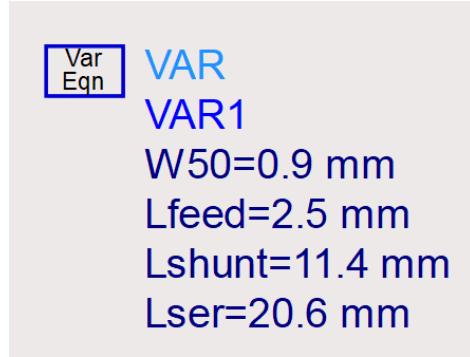
Имя переменной	Значение	Описание переменной
W50	0.9 mm	Ширина 50Ом-ной линии
Lfeed	2.5 mm	Длина дополнительного участка со стороны 50Ом
Lshunt	11.4 mm	Длина короткозамкнутого шлейфа
Lser	20.6 mm	Длина последовательного участка

Находясь внутри блока переменных, переменные можно добавлять, заполнив поля Name и Value, и нажав Add.



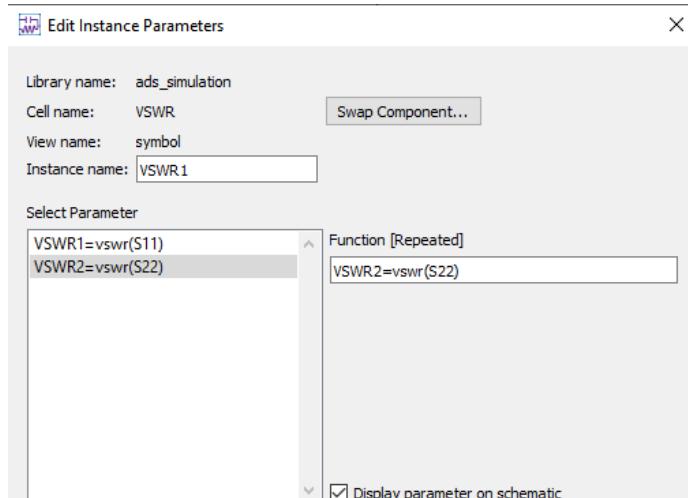
Для удобного обращения с переменными единицы в большинстве случаев лучше сразу прописывать вместе с суффиксом единицы (mm, GHz и пр.) в поле Value через пробел. При этом при использовании этой переменной в блоках нужно удалять множители единиц. При задании использования переменных в блоках ADS воспринимает единицы как множители относительно СИ (при настройках по умолчанию, за исключением базовой единицы длины, которая определяется настройками библиотеки). Т.е. если есть переменная «Lser = 5.5 mm», и она использована в каком-то блоке как «L = Lser mm», то присвоенная длина будет иметь значение  $5,5 \text{e}^{-6} = 5,5 \text{ мкм}$ .

Заполненный блок VAR со стороны схемы выглядит так



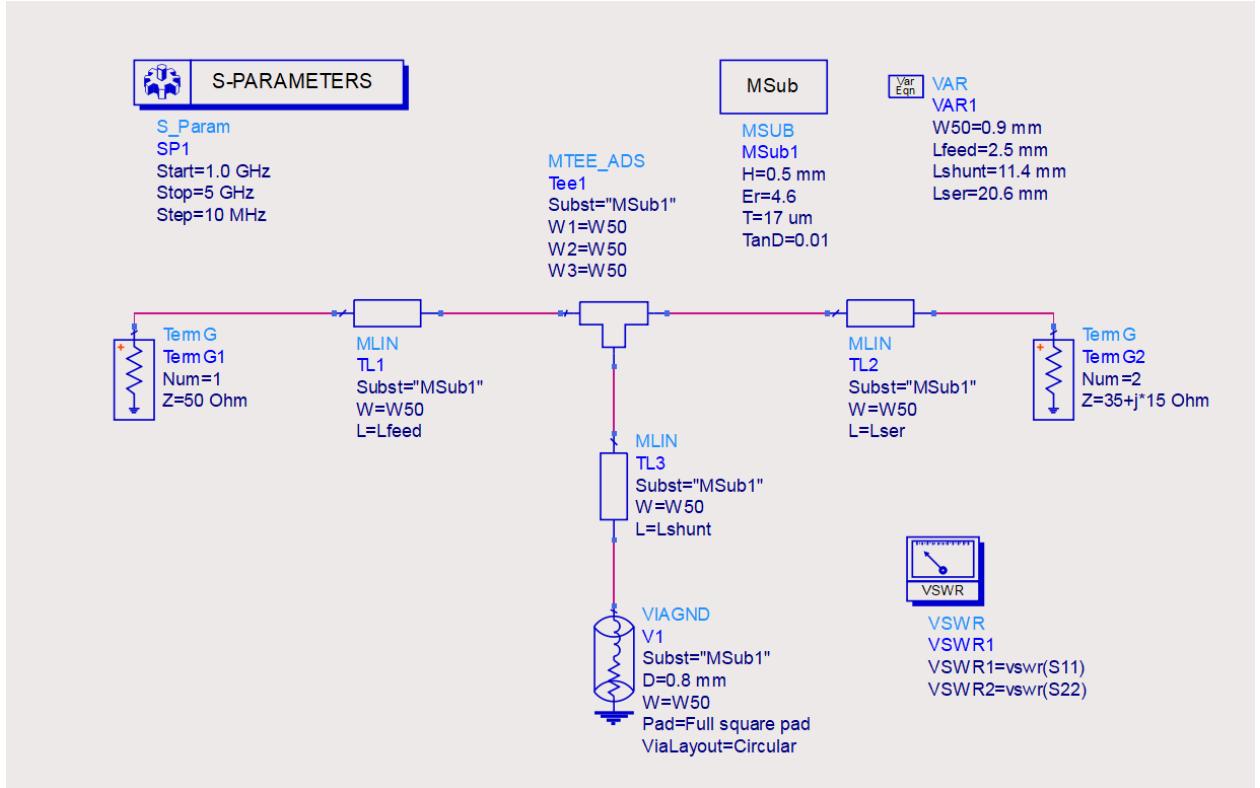
Заполним остальную часть схемы с использованием перечисленных выше компонентов.

Дополнительно поставим блок VSWR (палитра Simulation-S\_Param), чтобы в датасете сразу был расчет КСВН по входу. Находясь в нем по кнопке Add добавим еще расчет VSWR2 (из S22).

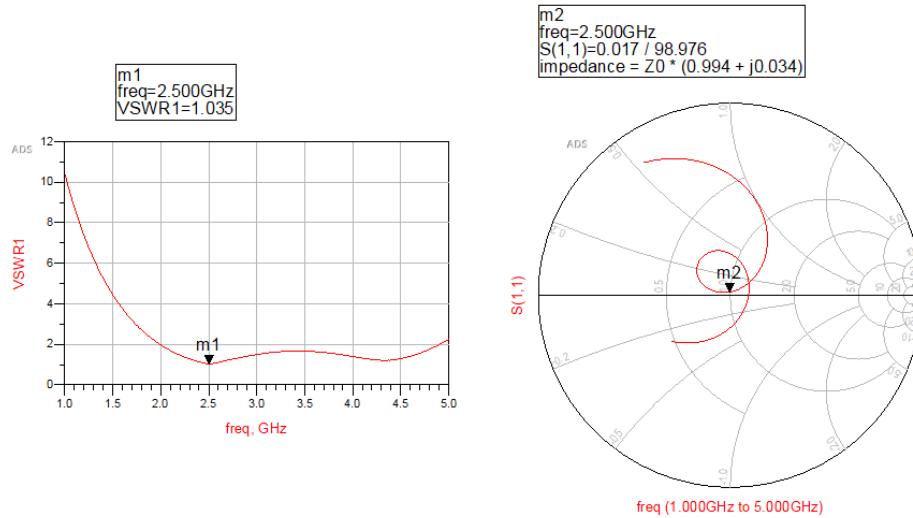


Модель отверстия возьмем VIAGND, с заполнением металлом столбика (параметр ViaLayout = Circular), диаметром отверстия (параметр D) ~50..80% от W50 (в примере 0,8 мм) и типом пада – полный квадрат (параметр Pad = Full square pad).

Общая схема будет выглядеть, как показано ниже.

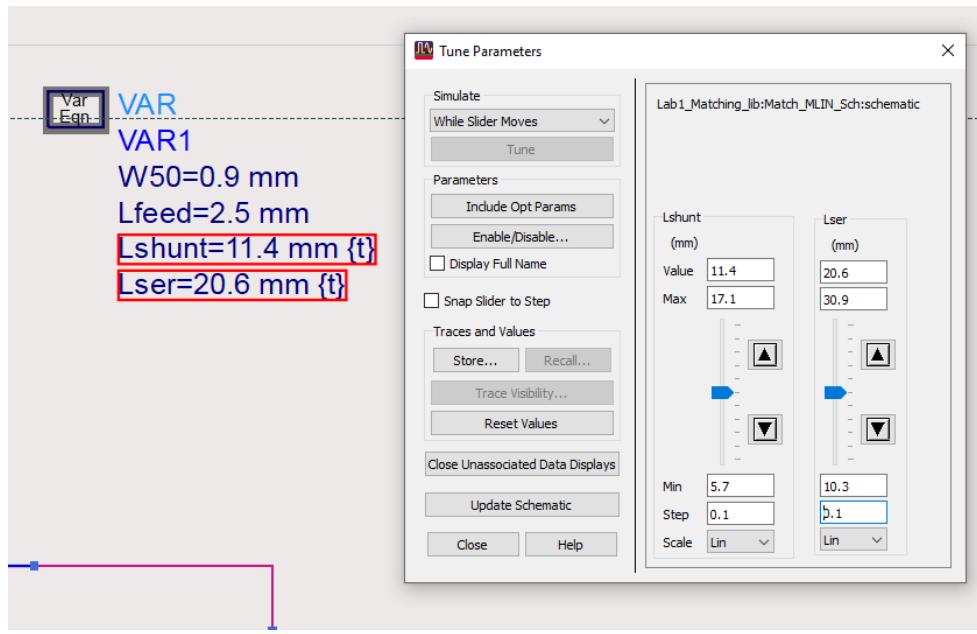


Запускаем расчет и строим графики.

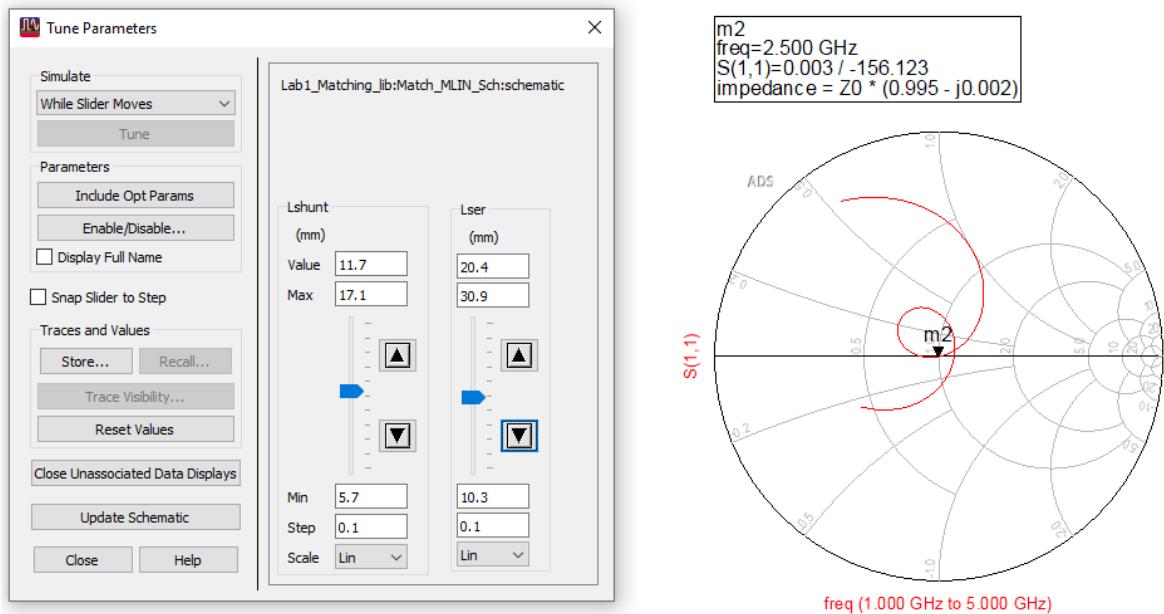


Видно, что на заданной частоте КСВН близко к 1 и S11 практически в центре. Для того, чтобы окончательно довести согласование на частоте 2,5ГГц до идеала, воспользуемся инструментом Tune по команде Simulate – Tuning в окне схемы. Откроется окно управления Tune.

Чтобы добавить параметр в список изменяемых, надо щелкнуть по этому параметру. Поработаем с длинами согласующих участков Lser и Lshunt. В схеме данные параметры подсветятся красным и получат суффикс {t}.



Выставим им шаг на изменение 0,1мм, и двигая по слайдеру (или щелкая по и ), подберем такие значения Lshunt и Lser, чтобы согласование стало идеальным.

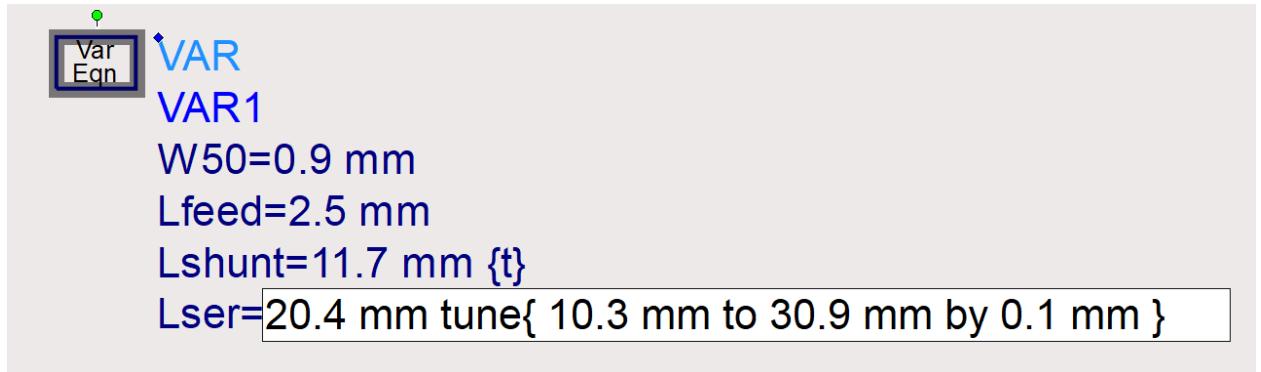


По окончании тюна, нужно обязательно нажать на кнопку Update Schematic, чтобы подобранные значения сохранились в схеме.

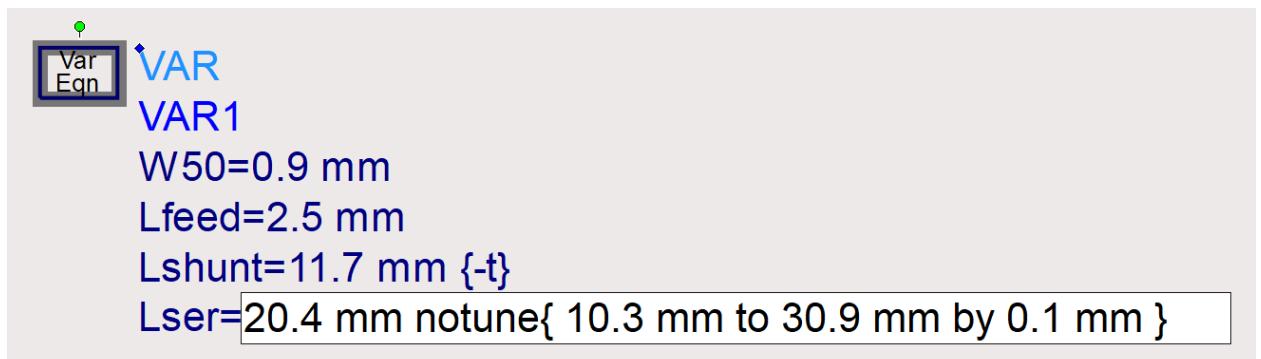
Также при работе с Tune, иногда полезно сохранить какое-то удачно подобранное состояние или сбросить все изменения в исходное. Для этого служат кнопки Store/Recall и Reset Values.

Все переменные, ранее участвовавшие в тюне, получили в схеме свое значение суффикс  $\{t\}$ . При щелчке по значению переменной Lser суффикс  $\{t\}$

раскроется в полную строку `tune{10.3 mm to 30.9 mm by 0.1 mm}`. Это обозначение того, что переменная `Lser` разрешена к тюну в дискретном диапазоне от 10,3 мм до 30,9 мм с шагом 0,1 мм. В следующий раз, как тюн будет запущен, эта переменная сразу загрузится в список изменяемых переменных.

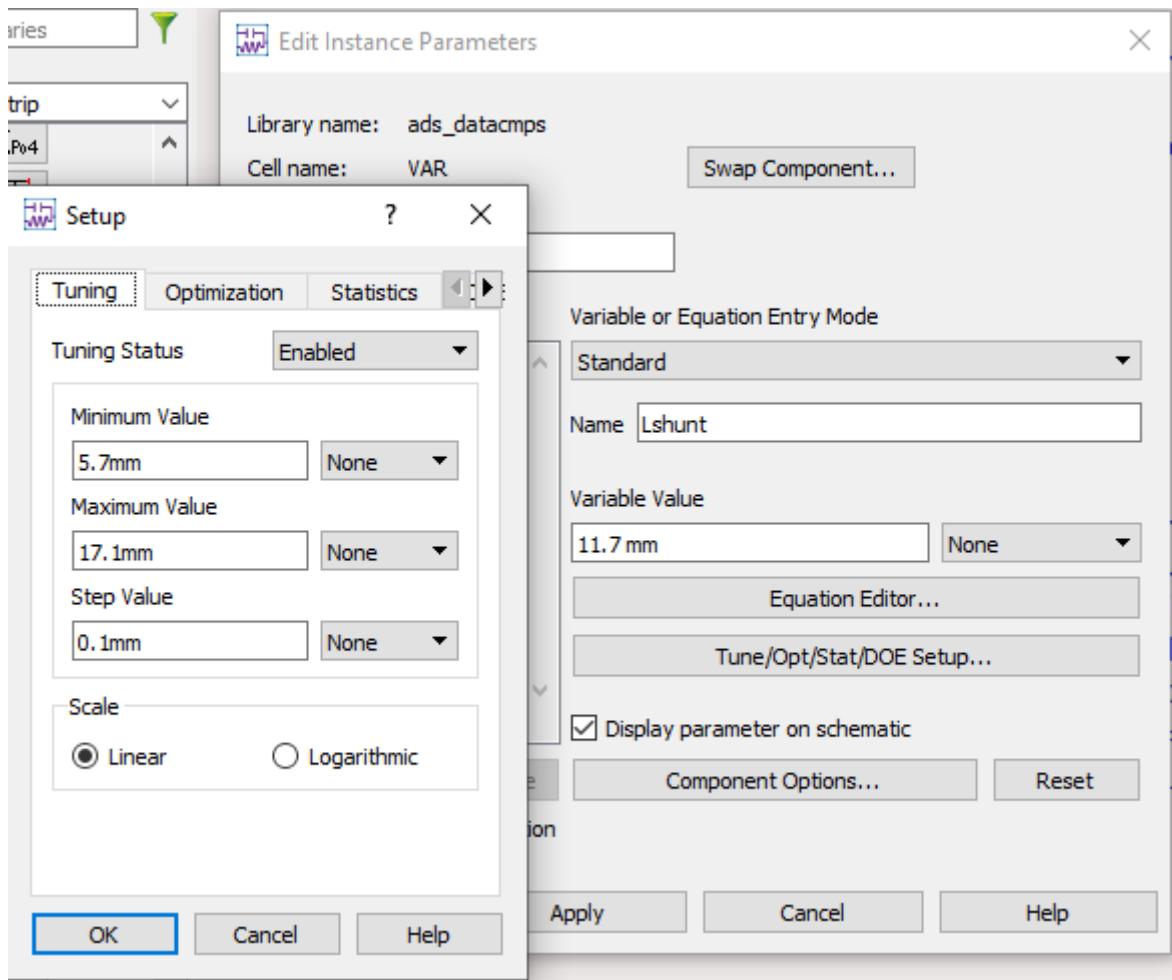


Если настройки диапазона тюна для переменной желательно сохранить, но следующий тюн ее использовать не должен, то в строке достаточно заменить `tune` на `notune`. В кратком отображении это выглядит как `{-t}`.



Если настройки диапазона тюна для переменной больше не нужны, то данную часть строки можно удалить.

Настройки переменных для тюна можно задать, находясь в компоненте, если выбрать переменную и нажать на кнопку `Tune/Opt/Stat/DOE Setup` и перейти на вкладку `Tuning`



Также есть отдельное окно (Simulate – Simulation Variables Setup), где можно централизовано управлять переменными всей схемы.

Simulation Variables Setup [Lab1_Matching.lib:Match_MLIN_Sch:schematic]											
Name	Tune	Value	Unit	Format	Min/+/-/+	Unit	Max	Unit	Step	Unit	
TL1	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear							
TL2	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear							
TL3	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear							
VAR1	<input type="checkbox"/>	0.9 mm	linear								
	<input type="checkbox"/>	2.5 mm	linear								
	<input checked="" type="checkbox"/>	11.7 mm	linear	5.7 mm							
	<input checked="" type="checkbox"/>	20.4 mm	linear	10.3 mm	17.1 mm	30.9 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm		
MSub1	<input type="checkbox"/>	0.5	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	4.6	linear								
	<input type="checkbox"/>	1	linear								
	<input type="checkbox"/>	1.0E+50	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	1e+33	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	17	um	linear							
	<input type="checkbox"/>	0.01	linear								
	<input type="checkbox"/>	0	mm	linear							
	<input type="checkbox"/>	1.0	GHz	linear							
	<input type="checkbox"/>	1.0	dB	linear							

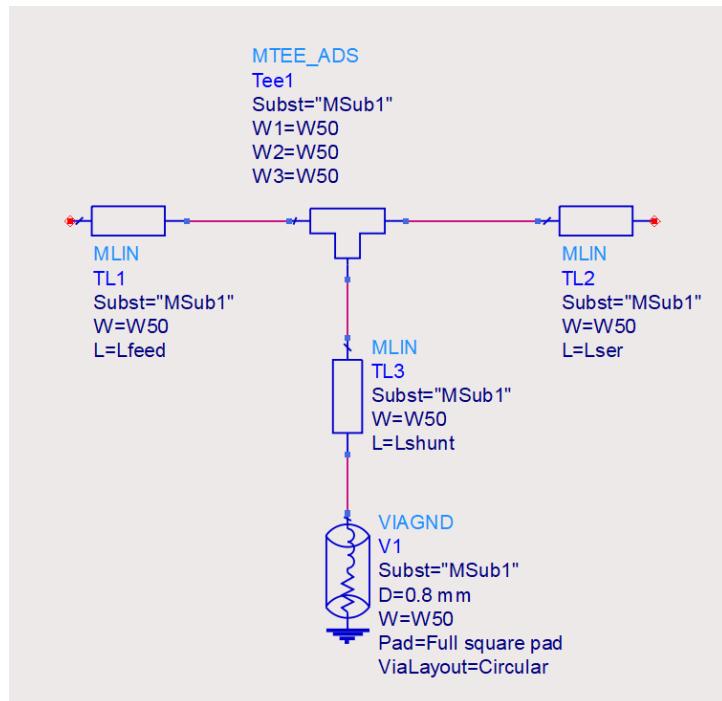
## Модель на топологическом уровне

Следующий этап – провести ЕМ-анализ планарного устройства.

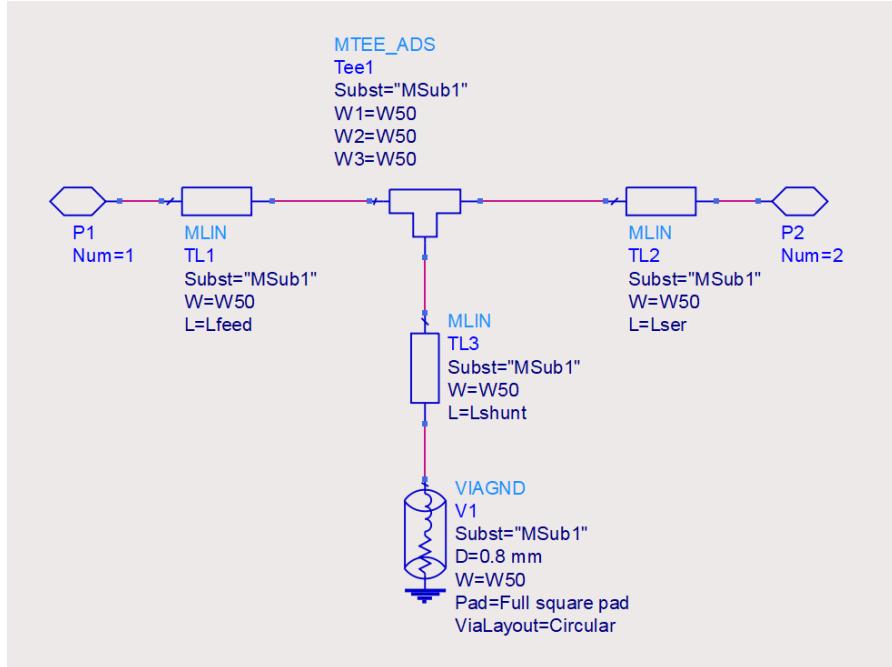
Advanced Design System поддерживает моделирование методом моментов (МоМ) и методом конечных элементов (FEM). Оба эти метода частотные и хорошо подходят для моделирования планарных структур. Воспользуемся методом моделирования МоМ как вычислительно экономным для моделирования планарных структур с бесконечным опорным слоем (землей).

В Advanced Design System можно быстро провести EM-анализ фиксированной топологии. Однако, параметрический анализ в этом случае провести не получится. Для этого нужно создать двух уровневую схему. Модель нижнего уровня будет представлять собой параметрический топологический компонент с привязанными к нему настройками EM-симулятора и представлением emModel для хранения результатов EM-моделирования. А модель верхнего уровня будет использована для задания параметров топологии плюс в нее можно внести различные дополнительные измерительные выражения.

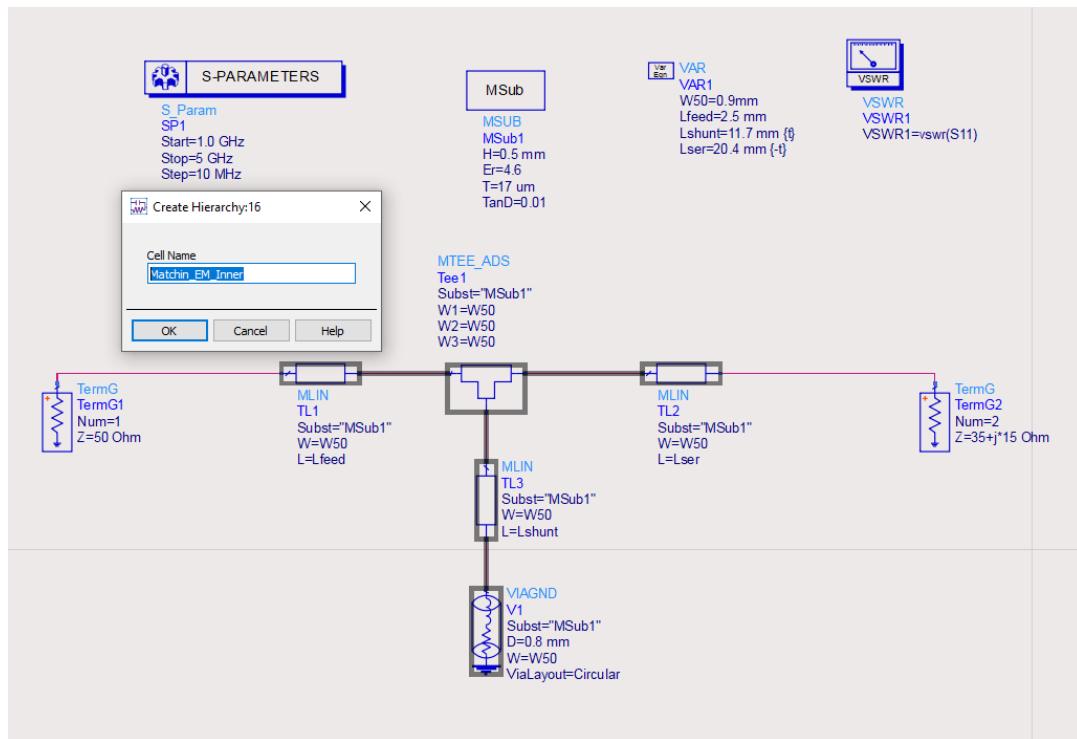
Создадим ячейку Matching\_EM\_Inner, в которую скопируем только полосковые компоненты, т.е. те, у которых есть топологическое представление. Контроллер симуляции, блок VAR, терминаторы и измерительные выражения сюда копировать не надо.



По команде Insert – Pin разместим два пина.



**!** Не обязательно создавать внутреннюю ячейку отдельно. Существует команда Component – Create Hierarchy, которая автоматически создает внутреннюю подсхему и отправляет в нее выбранные компоненты.



Во внутренней ячейке Matching\_EM\_Inner микрополосковым компонентам неоткуда брать значения переменных W50, Lfeed, Lshunt и Lser. Определим их на уровне ячейки. Для этого запустим команду File – Design Parameters и перейдем на вкладку Cell Parameters.

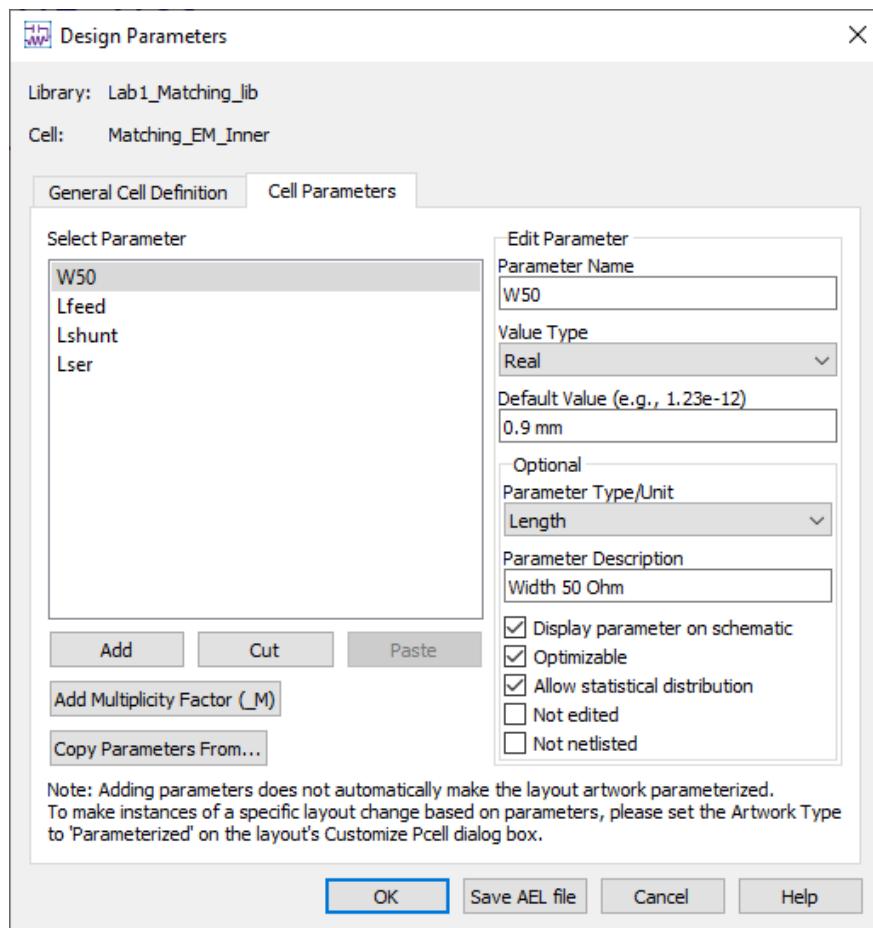
Для создания параметра ячейки необходимо дать ему имя, тип значения (действительное, целое, комплексное, строка), значение по умолчанию, тип единицы (длина, угол, сопротивление и пр.) и добавить описание.

Также доступны галки, определяющие что разрешено делать с параметром. Значения по умолчанию (Display parameter on schematic = true, Optimizable = true, Allow statistical distribution = true, Net edited = false и Net netlisted = false) как правило хорошо подходят для переменных, задающих обычные типы численных данных.

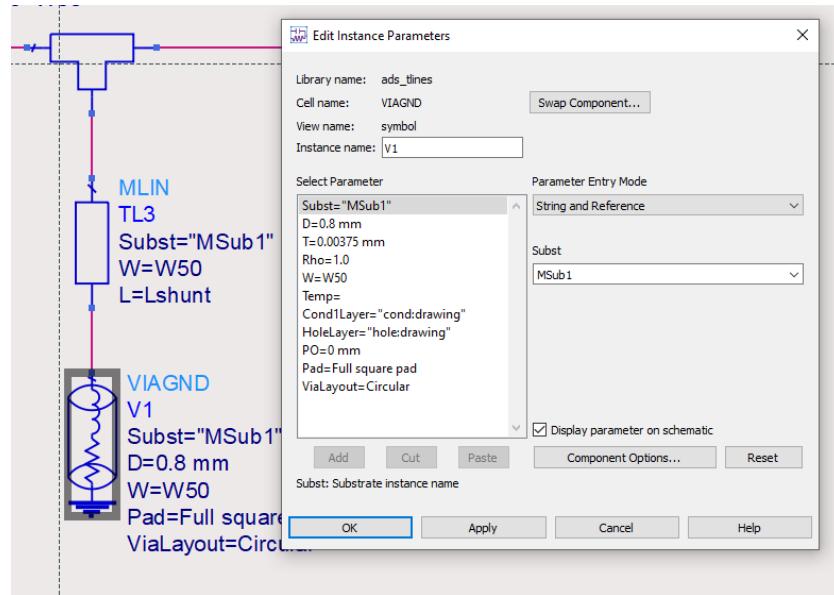
С учетом выполненного на схемном уровне тюна, у нас имеется следующий список переменных ячейки (таблица 2).

**Таблица 2. Параметры ячейки MLIN\_EN\_Inner**

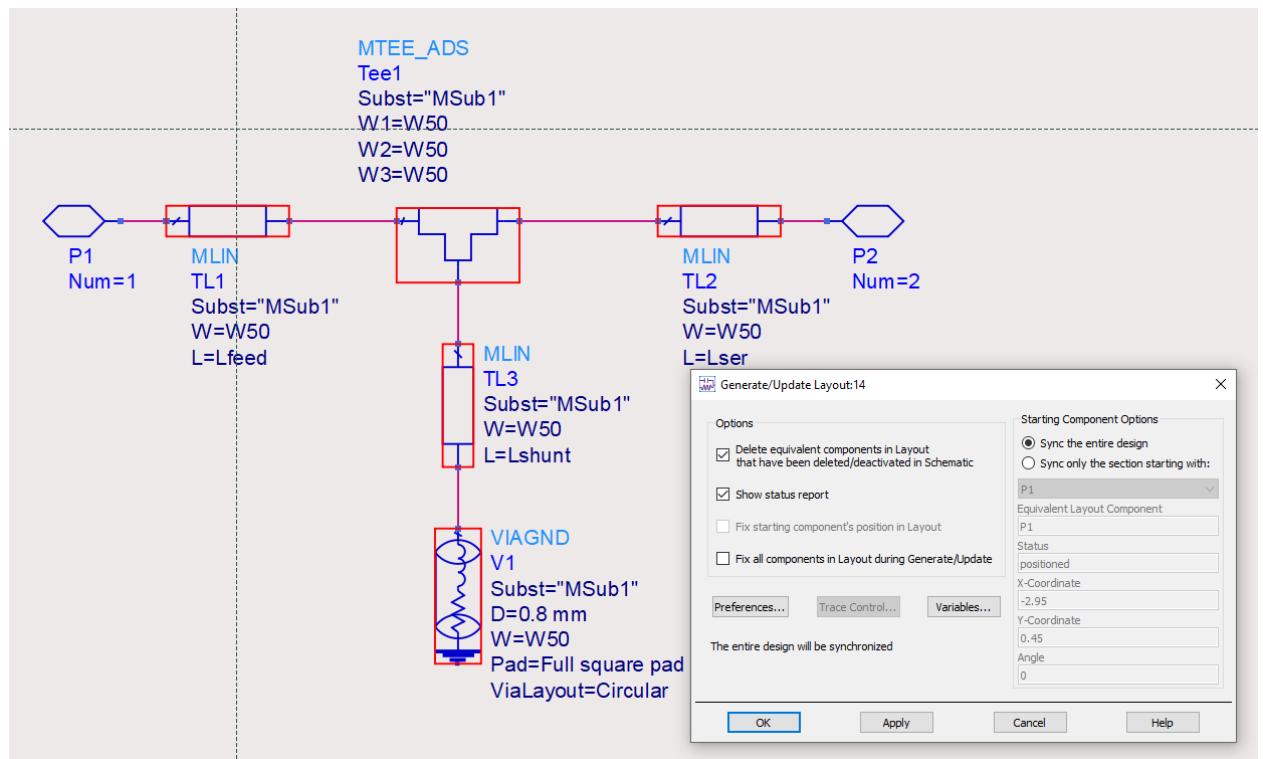
Имя переменной	Тип значения	Значение	Тип переменной	Смысл переменной
W50	Real	0.9 mm	Length	Width 50 Ohm
Lfeed	Real	2.5 mm	Length	Feed Length
Lshunt	Real	11.7 mm	Length	Shunt Length
Lser	Real	20.4 mm	Length	Series Length



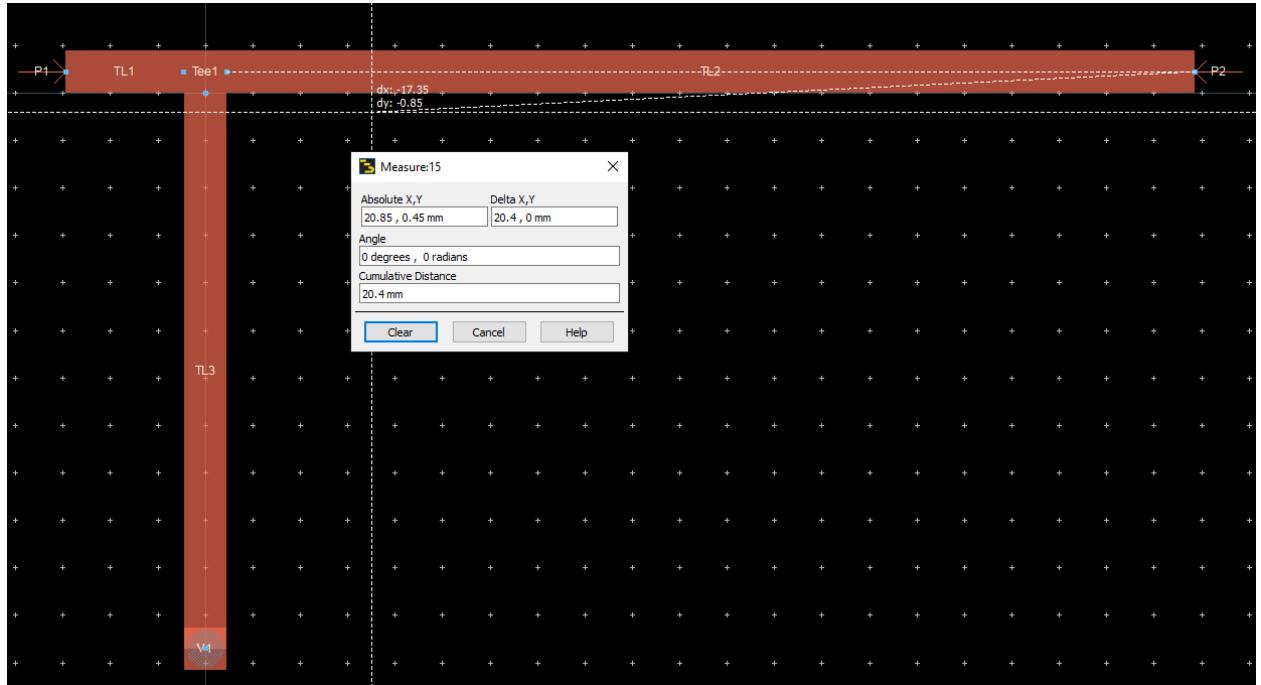
Теперь можно сгенерировать топологию на основе схемы. Но перед этим необходимо проверить соответствие слоев. Некоторые компоненты переопределяют их назначение по сравнению со стандартной схемой, особенно модели отверстий. Графика верхнего слоя должна переходить в слой cond(1), а отверстий в слой hole(5), аналогично технологической подложки проекта .subst.



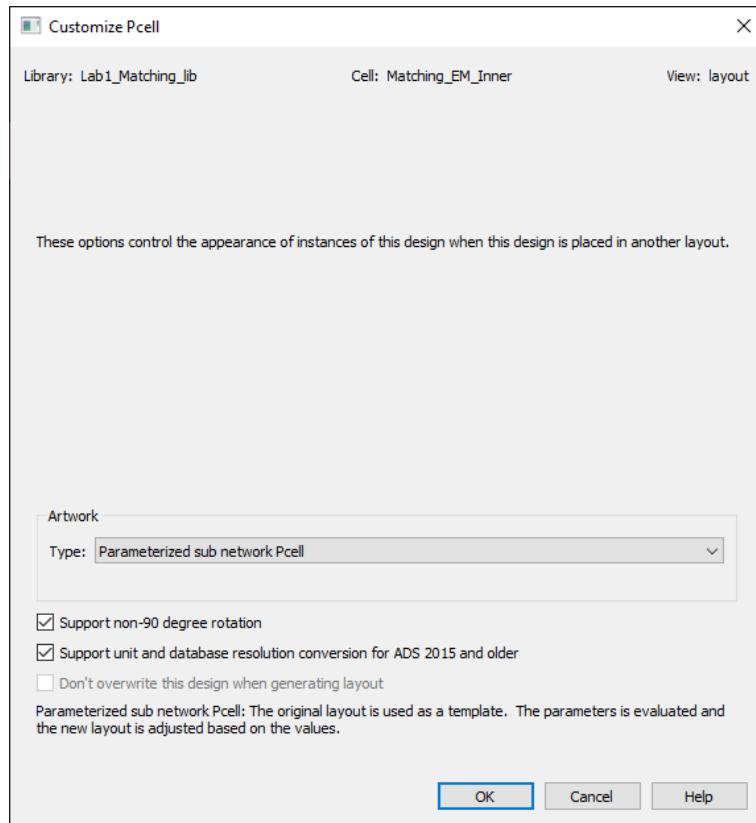
Автоматическая генерация топологии делается по команде Layout – Generate/Update Layout из окна схемы. При этом в схеме красным прямоугольником отмечаются все компоненты, которые будут участвовать в генерации топологии.



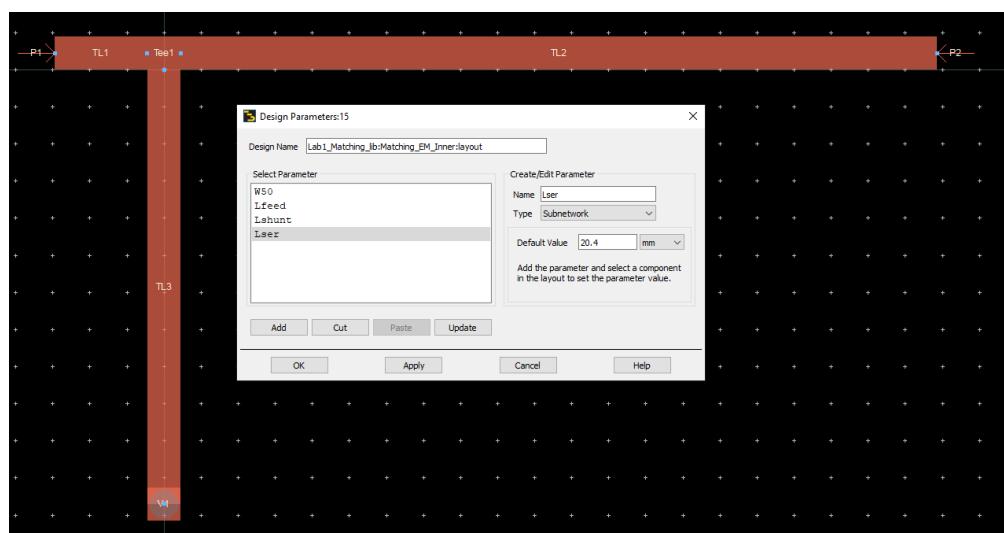
Топология Matching\_EM\_Inner создана. Можно, используя линейку (Insert – Measure, Ctrl+M) пройтись по характерным размерам, и убедиться, что генерация прошла корректно и размеры участков соответствуют заданным значениям в переменных.



Чтобы ячейка matching\_EM\_Inner вела себя как полноценный топологический компонент, еще нужно убедится, что в меню File – Customize Pcell (из окна топологии, в схеме этого меню нет) в настройке Artwork Type стояло значение Parameterized sub network Pcell.

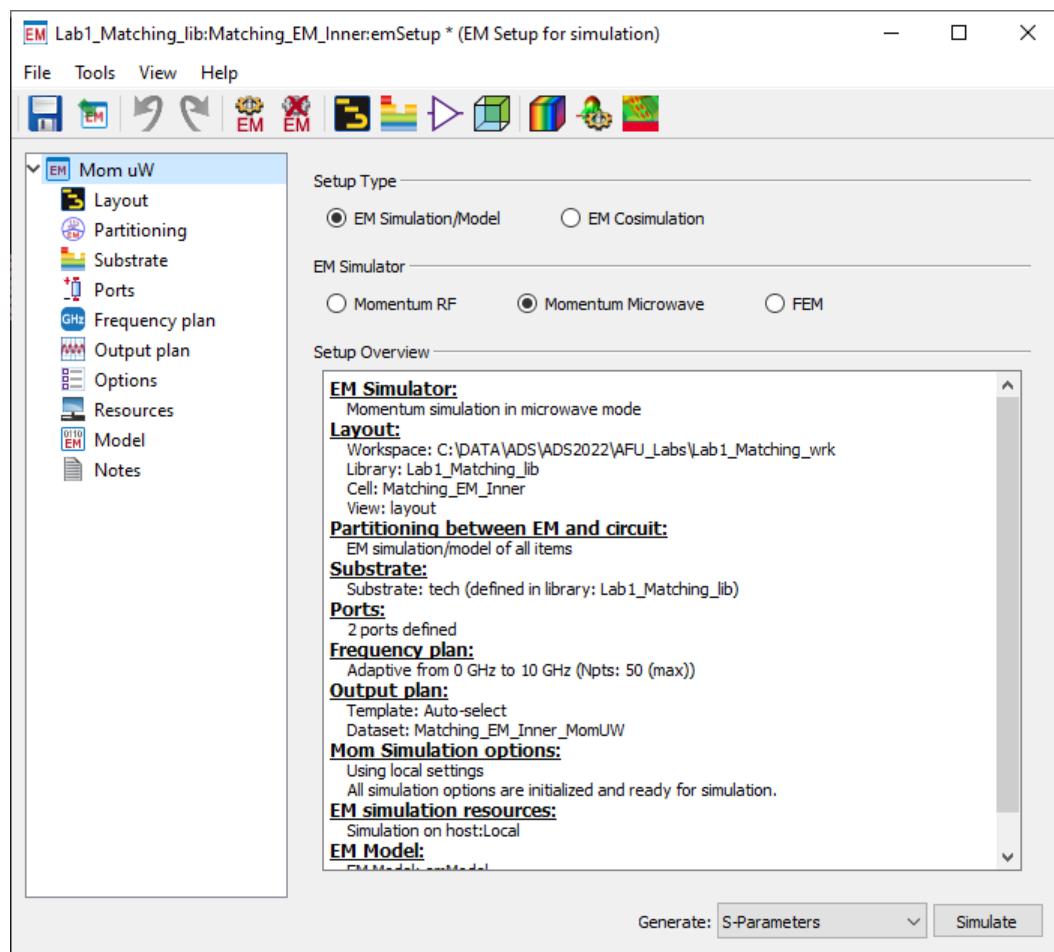


Вообще, такие параметры ячейки, как длина или угол, можно еще создавать из окна топологии по команде EM – Component – Parameters. Но это удобно, если топология исходно собирается в окне топологии, без участия схемы-источника. Переменные в этом окне должны иметь тип Subnetwork, как задающие размеры входящих компонентов.



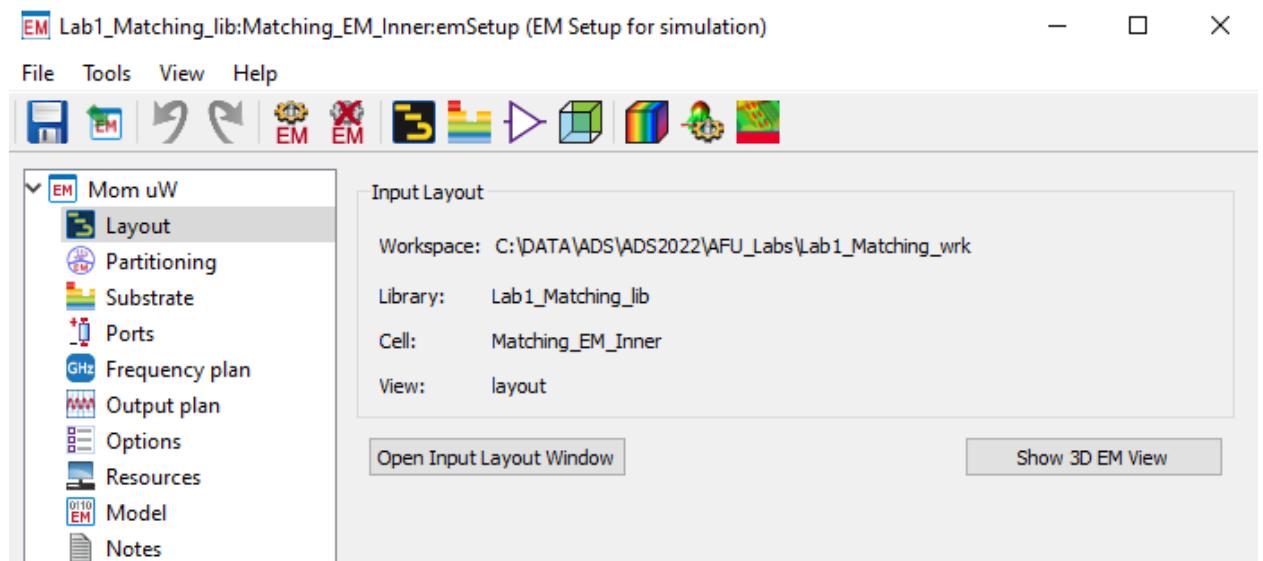
Далее необходимо настроить параметры моделирования. Для этого во внутренней ячейке Matching\_EM\_Inner необходимо создать сущность emSetup. Это можно сделать в основном окне ADS по ПКМ – New – EmSetup

или в окне топологии по команде EM – Simulation Setting (F6).

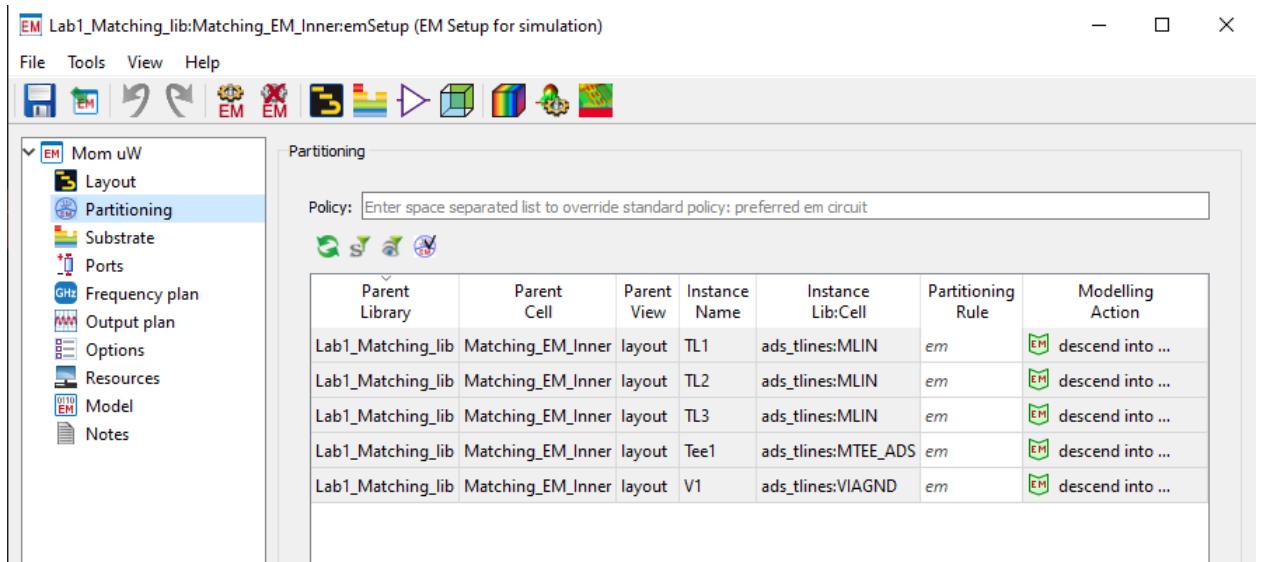


На основной вкладке определяется ЕМ-симулятор и настройки косимуляции. В текущей схеме косимуляции нет, выбираем Setup Type = EM Simulation/Model и симулятор Momentum Microwave (сокращенно Mom uW).

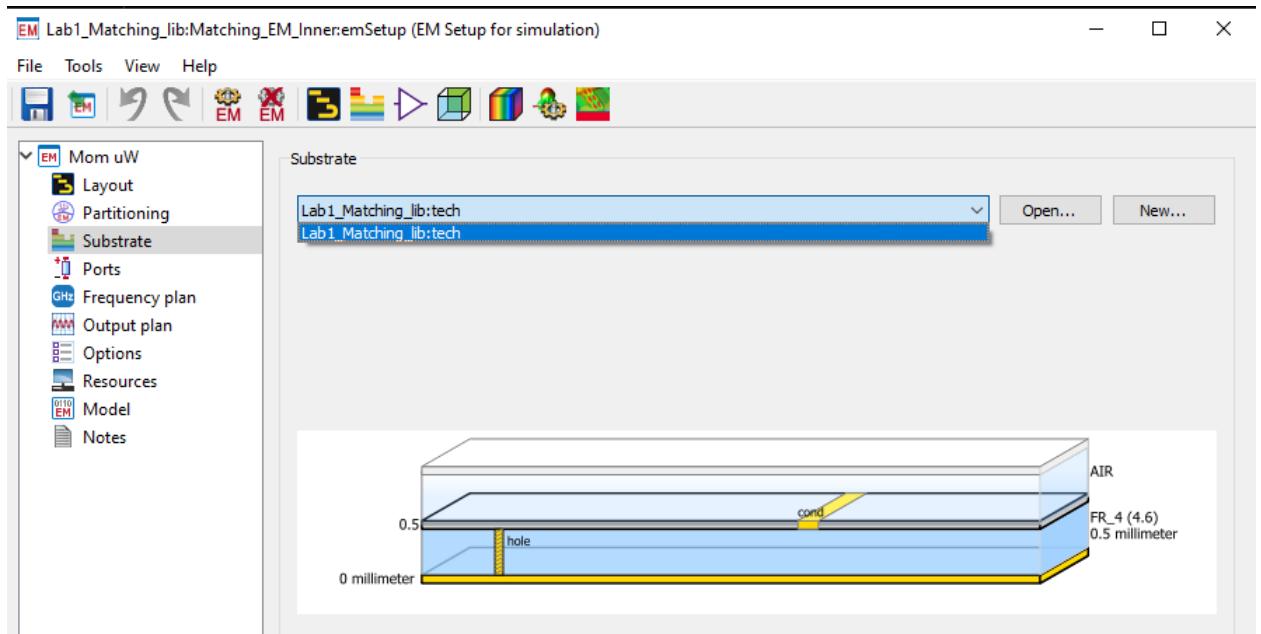
На вкладке Layout определяется, какая топология будет рассчитываться (если их несколько в ячейке, например). В данном случае автоматически подтягивается топология в ячейке Matching\_EM\_Inner.



На вкладке Partitioning определяется, как будут вести себя дискретные модели и подключенные внешние модели при косимуляции. В текущем режиме косимуляции нет, все элементам установлено правило *em*, т.е. всё считается выбранным EM-симулятором.



На вкладке Substrate можно в выпадающем списке выбрать определение подложки, если их в проекте или подключенных библиотеках несколько. В нашей схеме она одна технологическая и подтягивается автоматически.

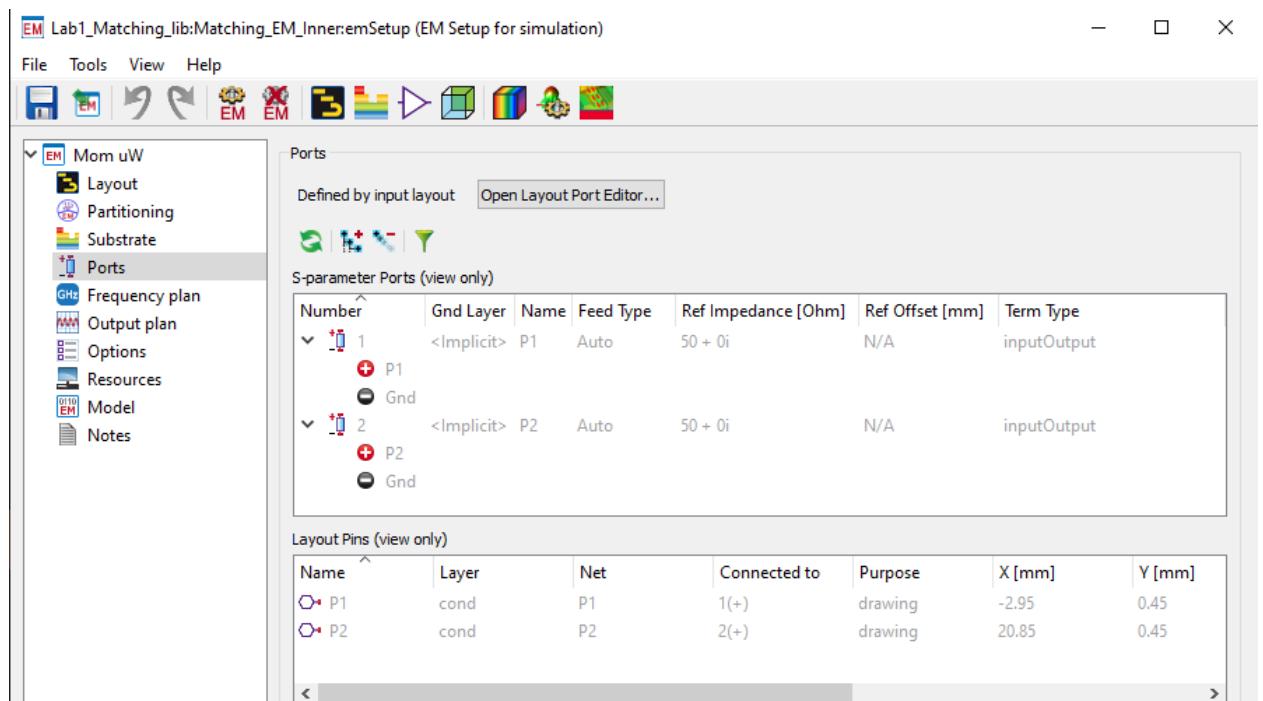


На вкладке Ports настраиваются порты. Автоматически созданные порты в большинстве случаев подходят для моделирования подключения микрополосковых устройств в другим устройствам. Если нужно изменить настройки портов, то по кнопке Open Layout Port Editor их можно настроить отдельно.

Несмотря на то, что можно задавать портам комплексное сопротивление, при ЕМ-анализе это может быть не самым правильным решением. Корректнее отдельно посчитать матрицу S-параметров микрополоскового устройства, нормированную на какое-либо стандартное волновое сопротивление (например, 50 Ом), а только затем пересчитать ее с подключением к комплексной нагрузке, как мы будем делать в схеме верхнего уровня.

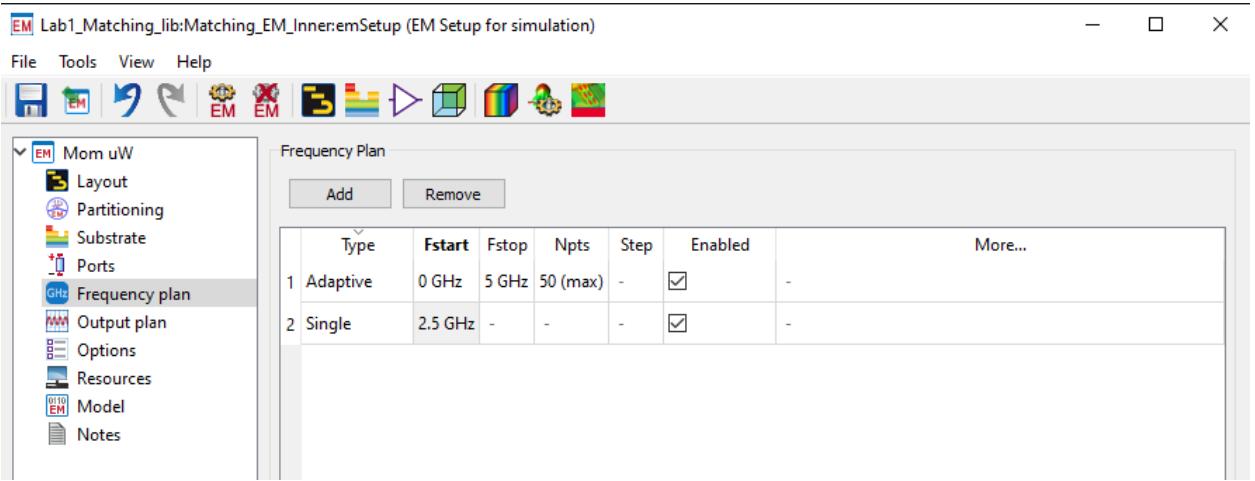
Таким образом, получается два порта, каждый собран из соответствующего пина (P1 и P2, +) и парной им земли (-), имеют калибровку TML (устанавливается автоматически для имитации подключения к длинной линии) и волновое сопротивление 50 Ом.

Для корректного моделирования необходимо, чтобы определение портов было актуально – символ  был зеленого цвета. Если данный символ коричневого цвета  , то нужно на него нажать для обновления определения портов.

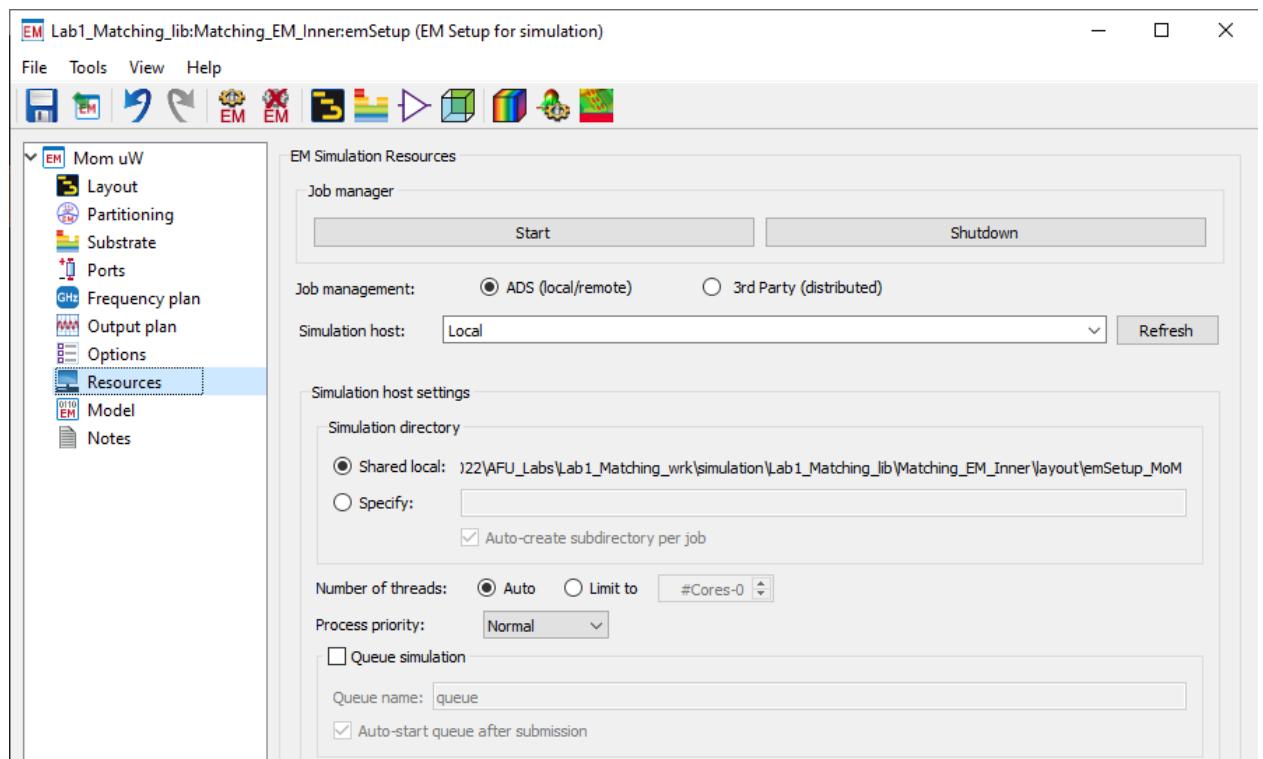


На вкладке Frequency plan задается частотный план расчета. Установим два плана, адаптивный подбор частотного шага (Adaptive), от 0 ГГц до 5 ГГц (макс 50 точек) и дополнительно точно на 2,5 ГГц (Single) на интересующую центральную частоту. В адаптивном частотном плане невозможно предварительно узнать, на каких частотах будет вестись расчет, частотные точки подбираются автоматически. Данные на промежуточных частотных точках будут интерполированными. Если нужны точные данные на какой-то

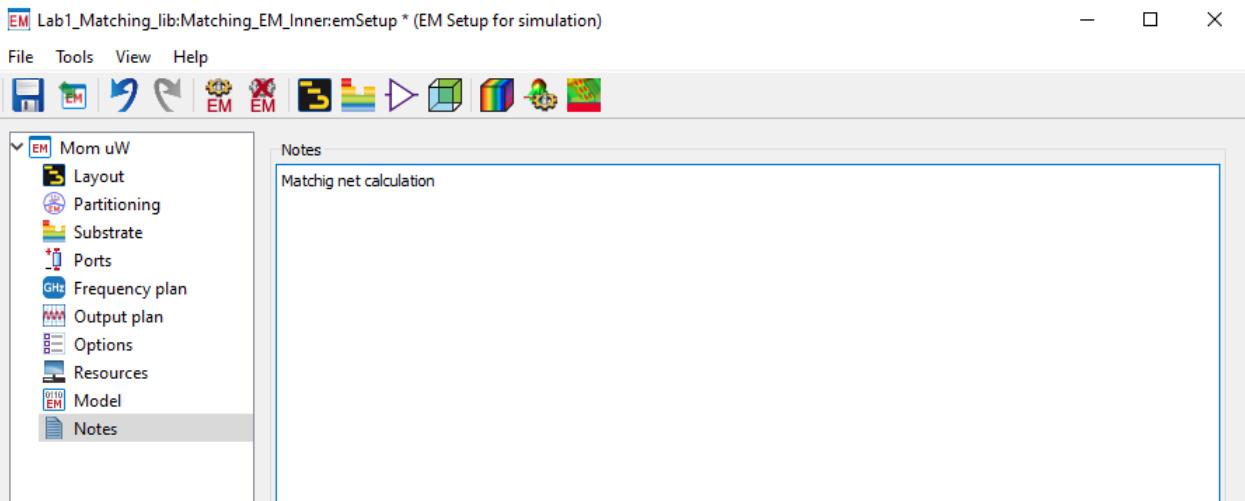
частоте или известно, что какие-то частоты адаптивный подбор шага может пропустить, а они важны (при поиске резонансов или расчете добротности сильно-резонансных цепей такое необходимо, например), то эти частоты нужно указывать принудительно.



На вкладке Resources задаются настройки ядра симулятора. Расчет можно вести на локальной машине или отправить на удаленный расчет.



На вкладке Notes можно добавить какие-нибудь записи о расчете.



Финальные настройки вкладок Output plan, Options и Model будем задавать после того, как проведем исследование плотности сетки. Прежде чем идти дальше, необходимо определить оптимальные для текущей топологии параметры сетки разбиения.

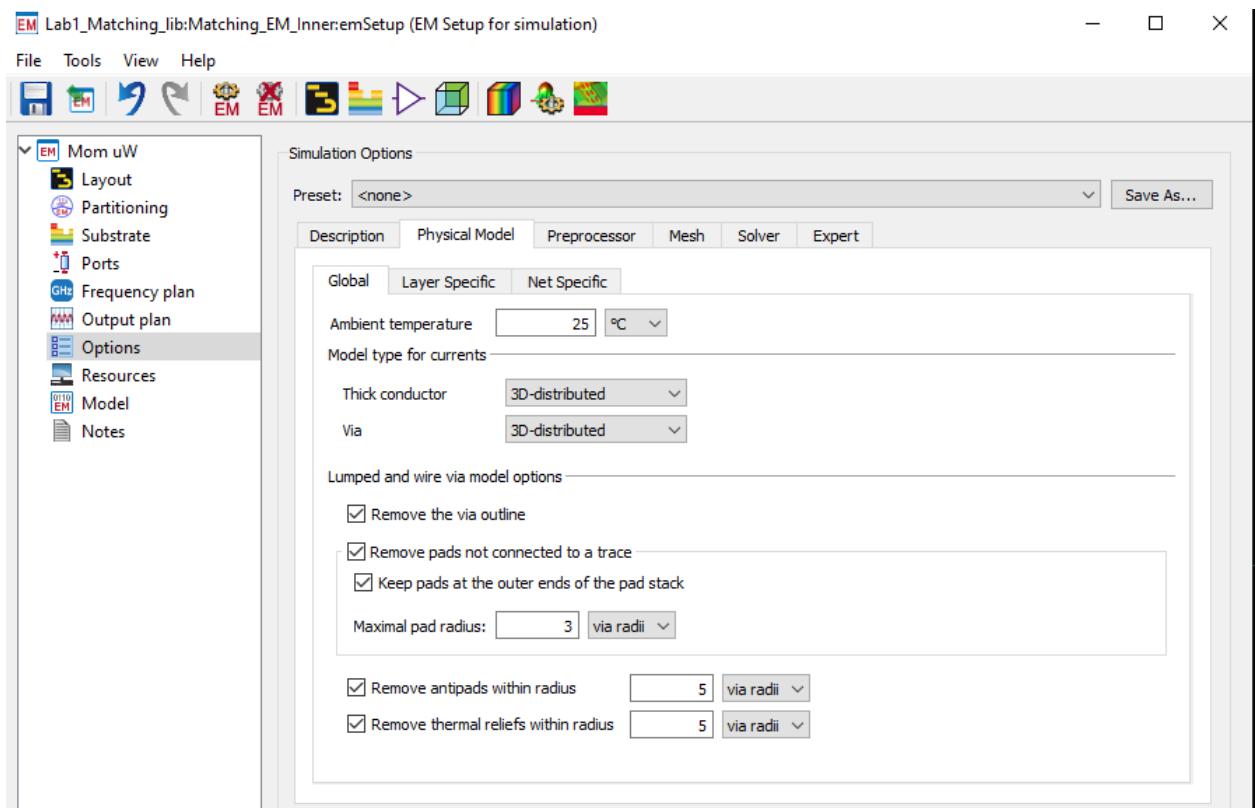
По умолчанию, для метода МоМ в настройках стоит сетка 20 ячеек/длину волны. Чем сетка плотнее, тем более достоверные результаты моделирования будут получены. Однако очевидный размен на это – необходимые вычислительные ресурсы компьютера, пропорциональные квадрату разбиения (т.к. у нас планарная структура). Нужно подобрать такую сетку, которая будет давать достоверные результаты с минимальным разбиением. Как правило при подборе сетки начинают с какого минимального стандартного значения и несколько раз уплотняют. Если при дальнейшем уплотнении сетки результаты меняются перестали, то можно остановиться на предыдущей плотности сетки.

При этом иногда для отдельных мест, про которые по ожидаемой физике процесса известно, что в них поля более неравномерны, чем в остальной части топологии, необходимо принудительно указывать повышенную плотность сетки. В текущей работе топология довольно простая и данная возможность не используется.

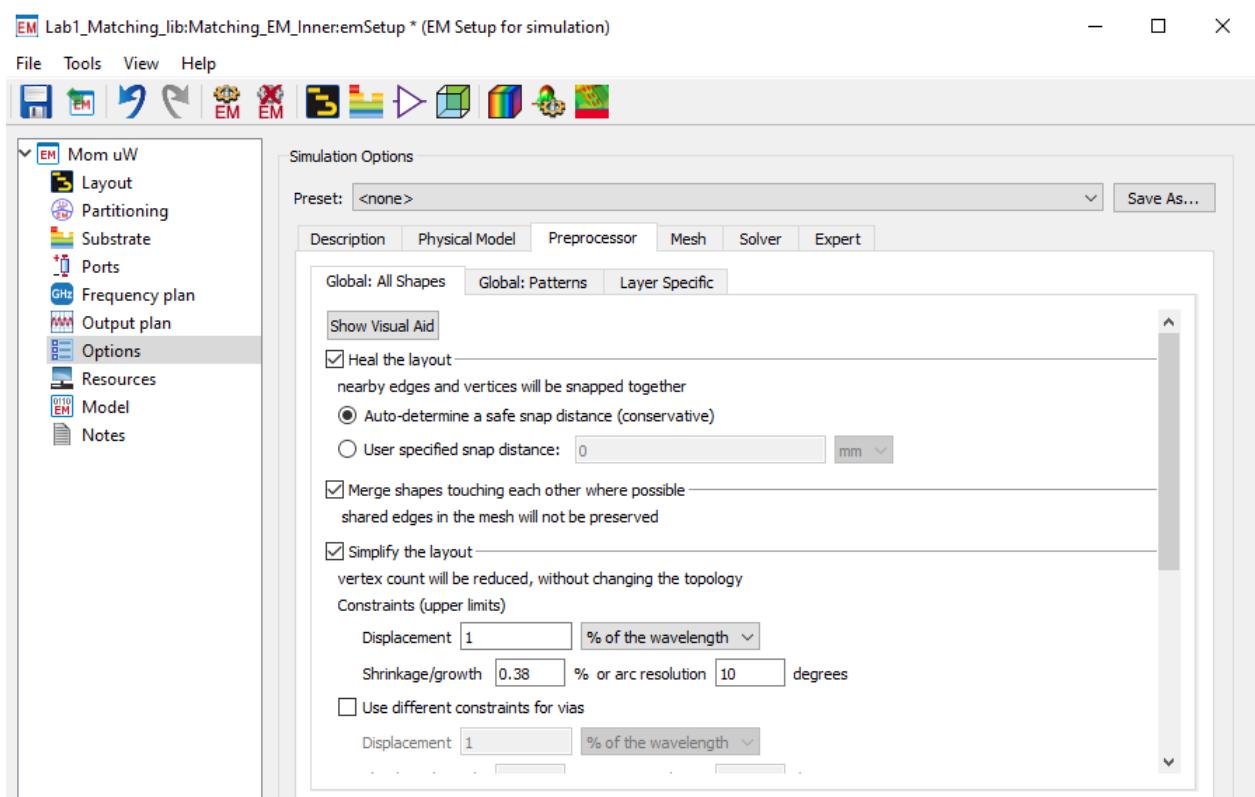
Проверим, как на результаты моделирования будет влиять сетки 10, 20, 40, 80 и 120 ячеек/длина волны. Также в настройках есть настройка упрощения сетки, изучим влияние этой настройки.

На вкладке Options на подвкладке Physical Model/Global установим, что отверстия считаются как 3D-объекты (Via = 3D-distributed). Дополнительно на подвкладках Physical Model/Layer Specific и Physical Model/Net Specific можно

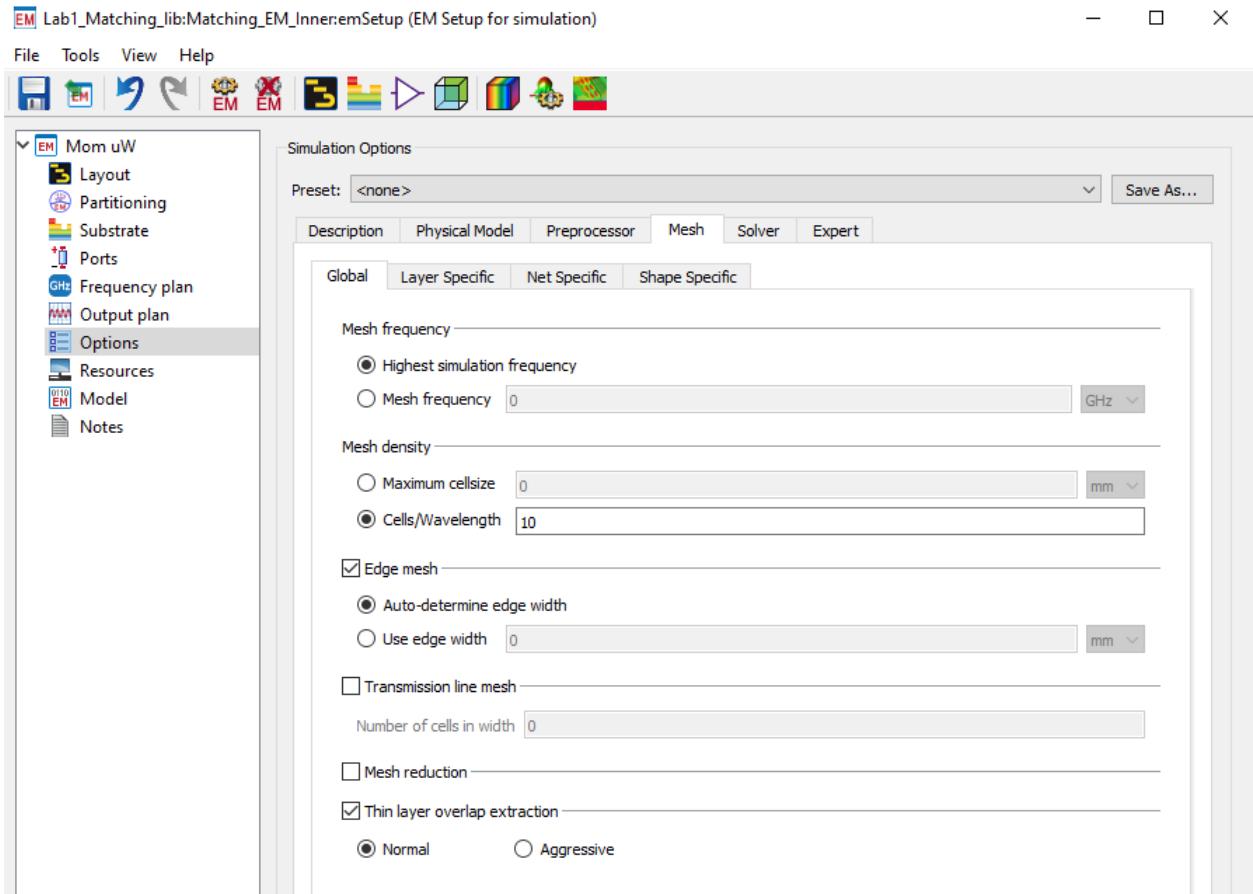
даные настройки переопределить для отдельных цепей или слоев (в данной работе избыточно и не используется).



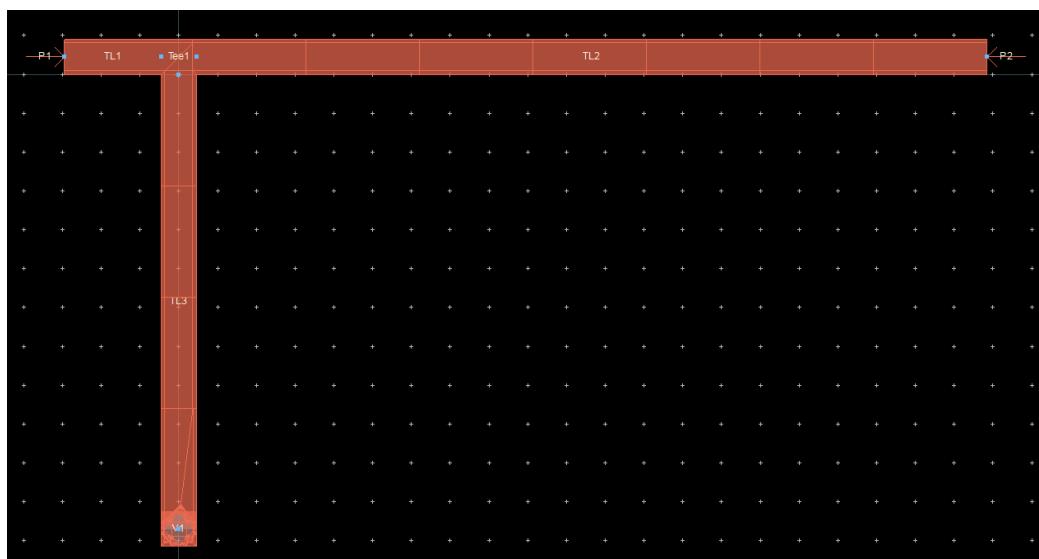
На вкладке Options на подвкладке Preprocessor/Global Preprocessor определяется, как будет упрощена топология. Установим, что дуги аппроксимируются по  $10^\circ$  вместо  $45^\circ$  (настройка arc resolution = 10).



На вкладке Options на подвкладке Mesh настраивается сетка. Разбиение будем делать по максимальной частоте расчета (5 ГГц) Mesh frequency = Highest simulation frequency. Для первого грубого расчета плотность Mesh density поставим 10 ячеек/длину волны. Включим автоматическое построение сетки вдоль краев (Edge Mesh, Auto-determine edge width). И отключим упрощение сетки Mesh reduction = false.

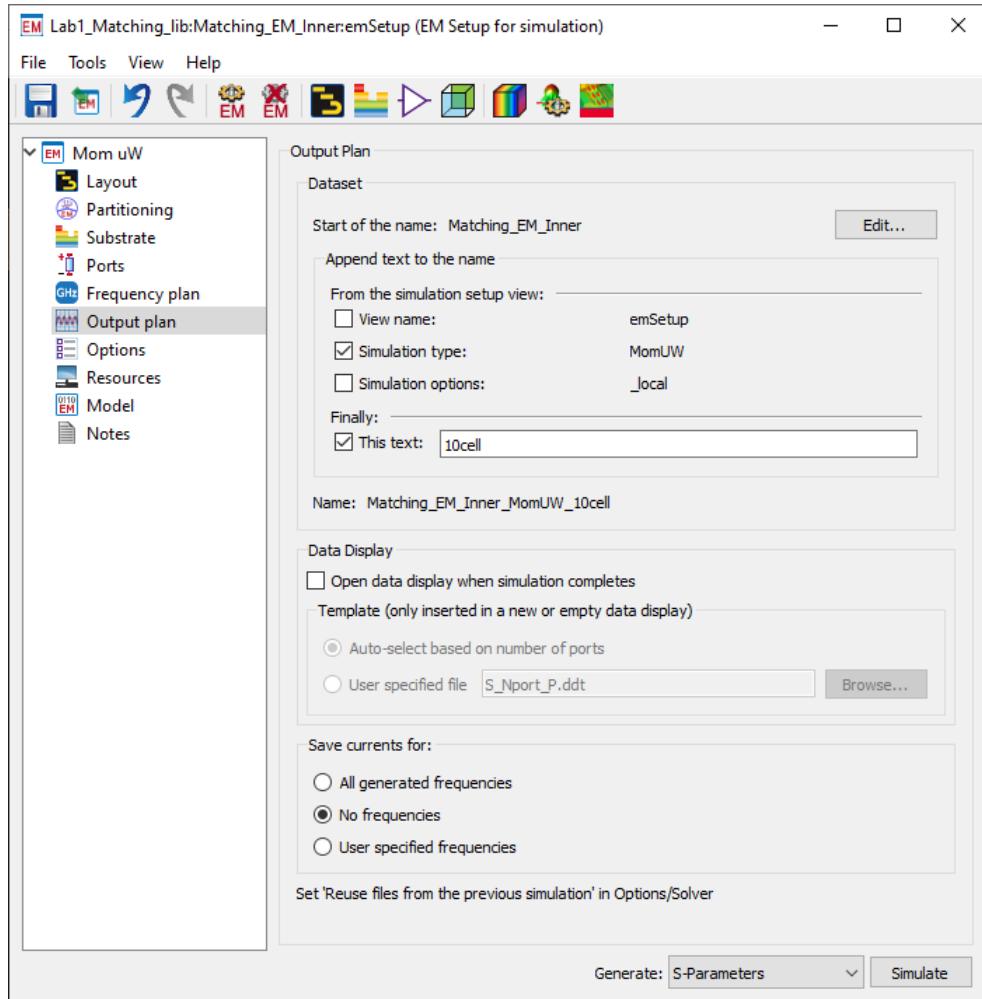


Внизу этого окна в выпадающем списке выберем Generate: Mesh и нажмем Go. В окне топологии появится сгенерированная сетка.

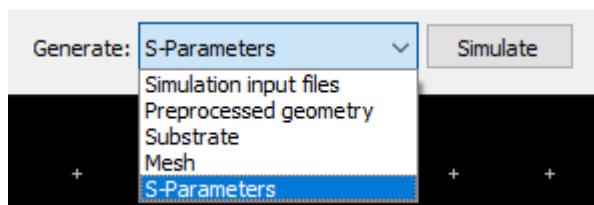


Видно, что стека получена довольно разреженная.

Вернемся в окно emSetup и донастроим симуляцию. На вкладке Output plan задается имя датасета, в который идет запись результатов (группа настроек Dataset). Кроме того, можно настроить автоматическое создание графика по шаблону (группа Data Display) и выбрать, как сохранять токи (группа Save currents for). Установим настройки имени датасета так, чтобы он получил имя «Matching\_EM\_Inner\_MomUM\_10cell» (контролируется в строке Name:) Автооткрытие области графиков отключим и сохранение токов тоже.

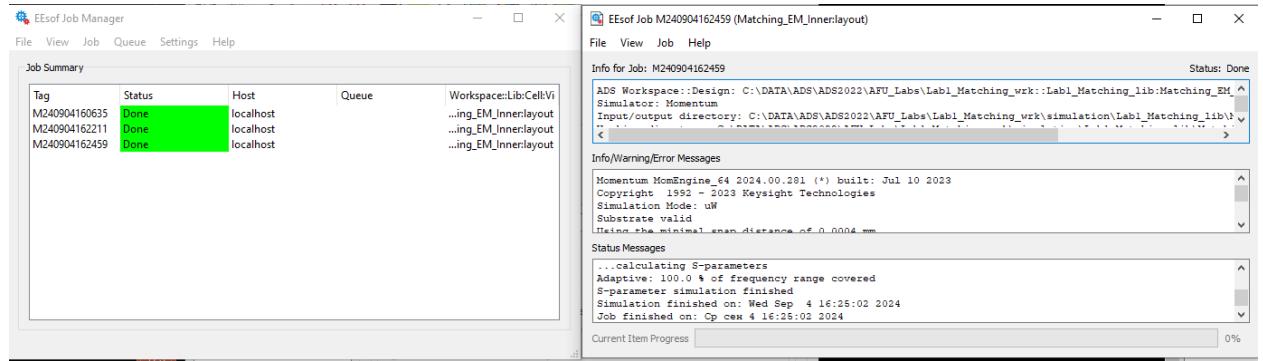


EM-анализ для определения сетки готов к расчету. Внизу в выпадающем списке выбираем Generate: S-parameters и нажимаем кнопку Simulate.

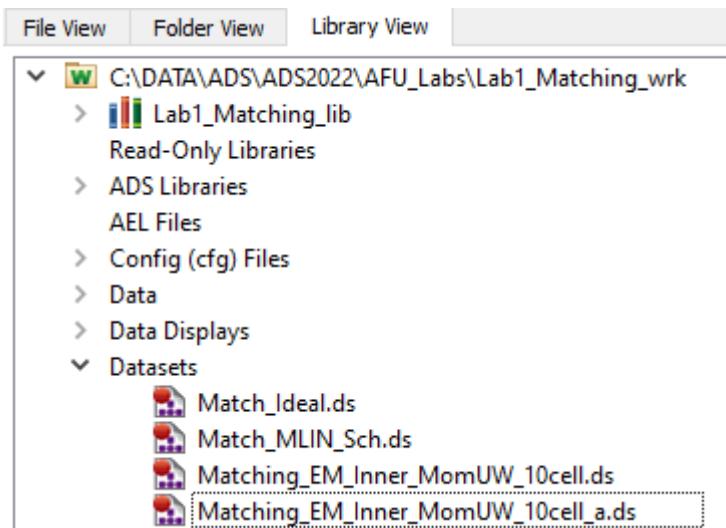


Откроется окно Job Manager и логгер текущего EM-расчета EESof Job. По этим окнам можно узнать, как идет расчет. При необходимости, идущий

расчет можно остановить. Там же можно открыть логи законченных EM-расчетов. Кроме информации о длительности EM-расчета, можно узнать размер матрицы расчета (Matrix size). Размер этой матрицы определяет сложность расчета методом моментов, появляется в начале расчета и позволяет оценить, как долго будет проводиться расчет.



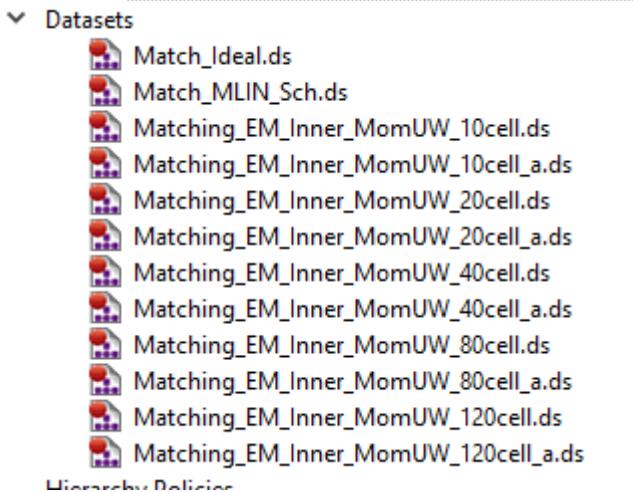
Т.к. мы отключили автооткрытие области графиков, то никакие окна не открылись. При этом в подпапке /data появились парные датасеты Matching\_EM\_Inner\_MomUW\_10cell.ds и Matching\_EM\_Inner\_MomUW\_10cell\_a.ds. Они также отображаются в папке Dataset в основном окне ADS в режиме Library View.



Датасет Matching\_EM\_Inner\_MomUW\_10cell – это результаты расчета по заданным частотным точкам плюс в выбранных симулятором промежуточных. Парный к нему с суффиксом «\_a» - это датасет с интерполированными на промежуточные частотные точки данными. Как результат обычно используется интерполированный датасет «\_a».

Для сравнения влияния плотности сетки нам нужно набрать несколько датасетов. Последовательно устанавливая плотность сетки на 20, 40, 80 и 120 ячеек/длина волны (Options/Global/Cells/Wavelength) и изменения

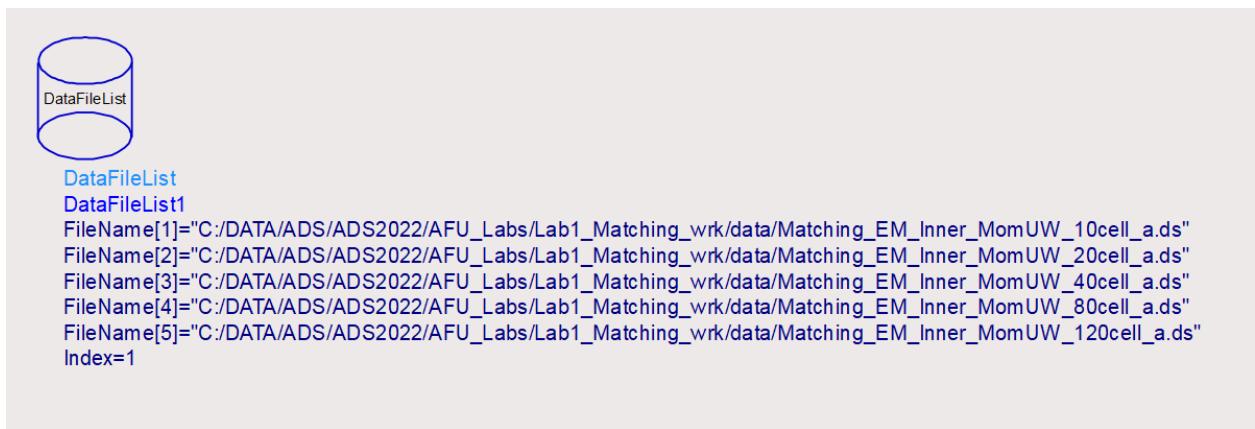
соответствующий пользовательский суффикс в имени датасета (Output plan/This text), наберем необходимое число датасетов.



Несмотря на то, что датасет можно загрузить в любой график без перерасчета, в текущей задаче это некорректно. Т.к. данные датасеты получены при условии нагрузки топологии на 50 Ом по входу и по выходу. А нас интересует поведение при комплексной выходной нагрузке  $35 + j \cdot 15$  Ом. Создадим схему, в которой сравним эти результаты (схема Matching\_Mesh) с учетом комплексной нагрузки.



Для загрузки датасетов будем использовать блок DataFileList из палитры Simulation-Batch. В него по кнопке Add укажем имена полученных датасетов «\_a».

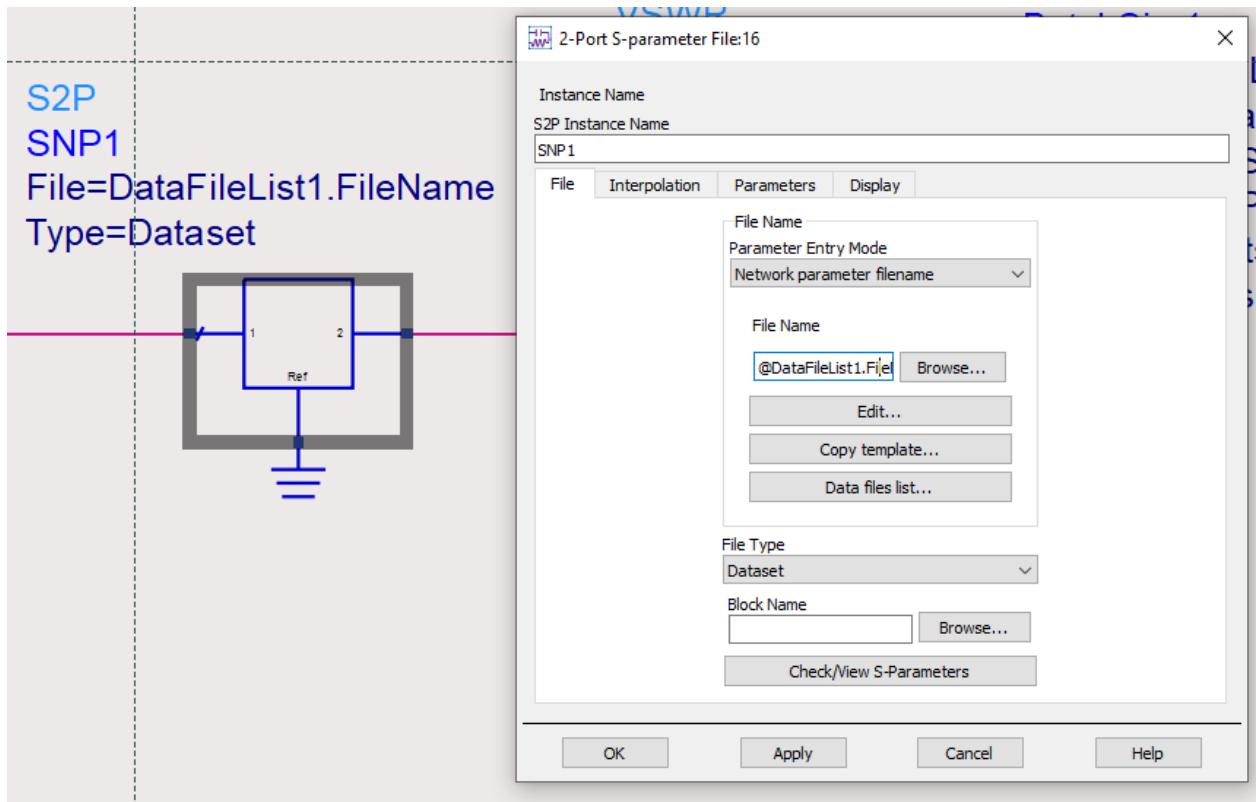


В моделировании будет участвовать блок S2P, которому в параметр File впишем имя текущего файла из блока DataFileList. Также укажем, что тип данных – Dataset.

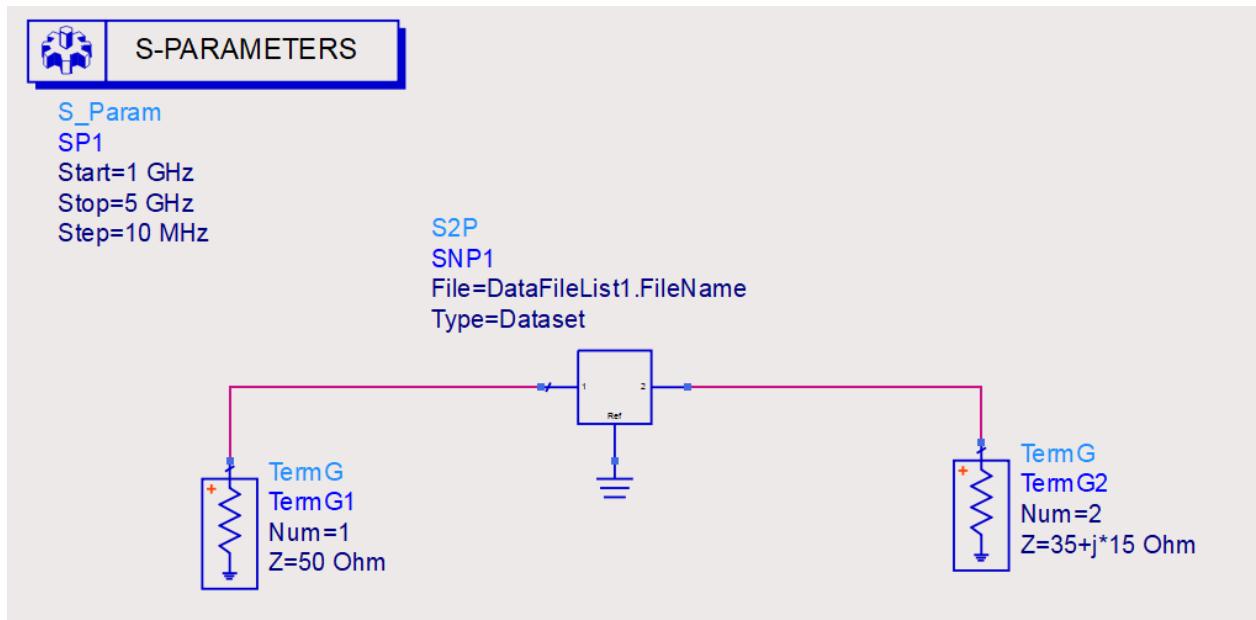


При присвоении параметру строкового значения из переменной (как у параметра File в блоке S2P) на уровне схемы имя переменной должно

быть без двойных кавычек (как было бы при интерпретации значения как строки), а при задании из свойств компонента с префиксом @ (как ссылка).

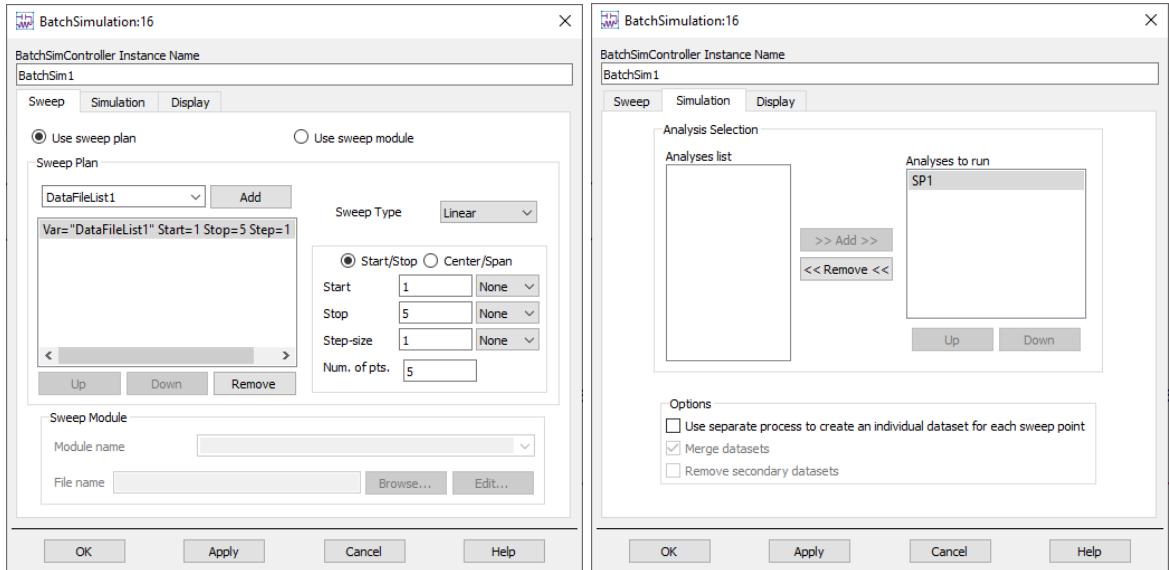


Основной контроллер симуляции S-параметров и терминалы скопируем из предыдущих схем.

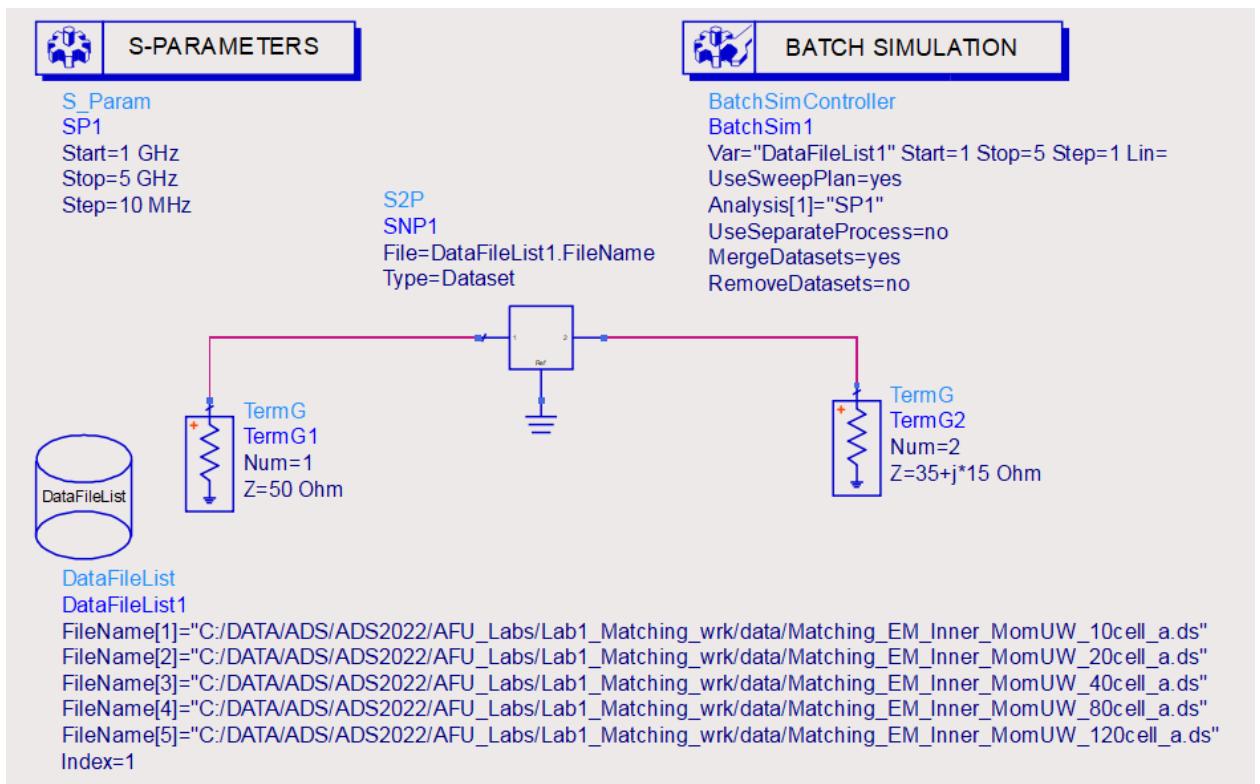


Перебор подгружаемых файлов сделаем с помощью контроллера симуляции BatchSimController из палитры Simulation-Batch. В нем выбираем режим перебора Use sweep plan со ссылкой на DataFileList1. У нас 5

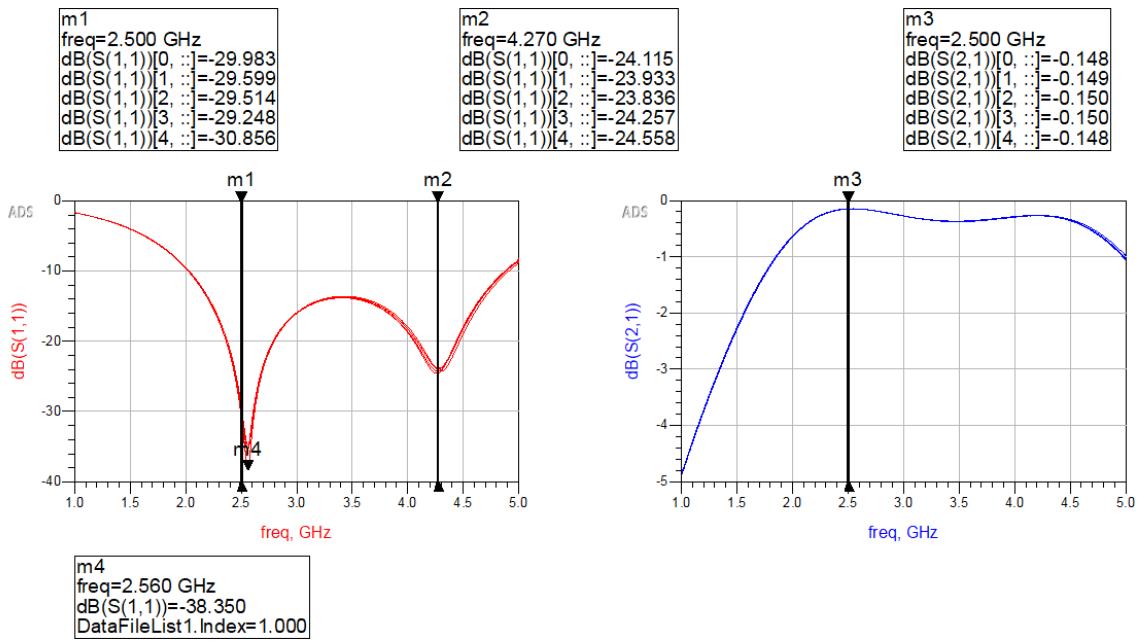
файлов, индексация в блоке DataFileList идет с 1, поэтому укажем перебор от 1 до 5 с шагом 1. На вкладке Simulation выберем подчиненный симулятор SP1, без разбиения датасетов для каждого шага перебора.



Перед запуском схема Matching\_Mesh должна выглядеть приблизительно следующим образом.



Строим графики dB(S11) и dB(S21).

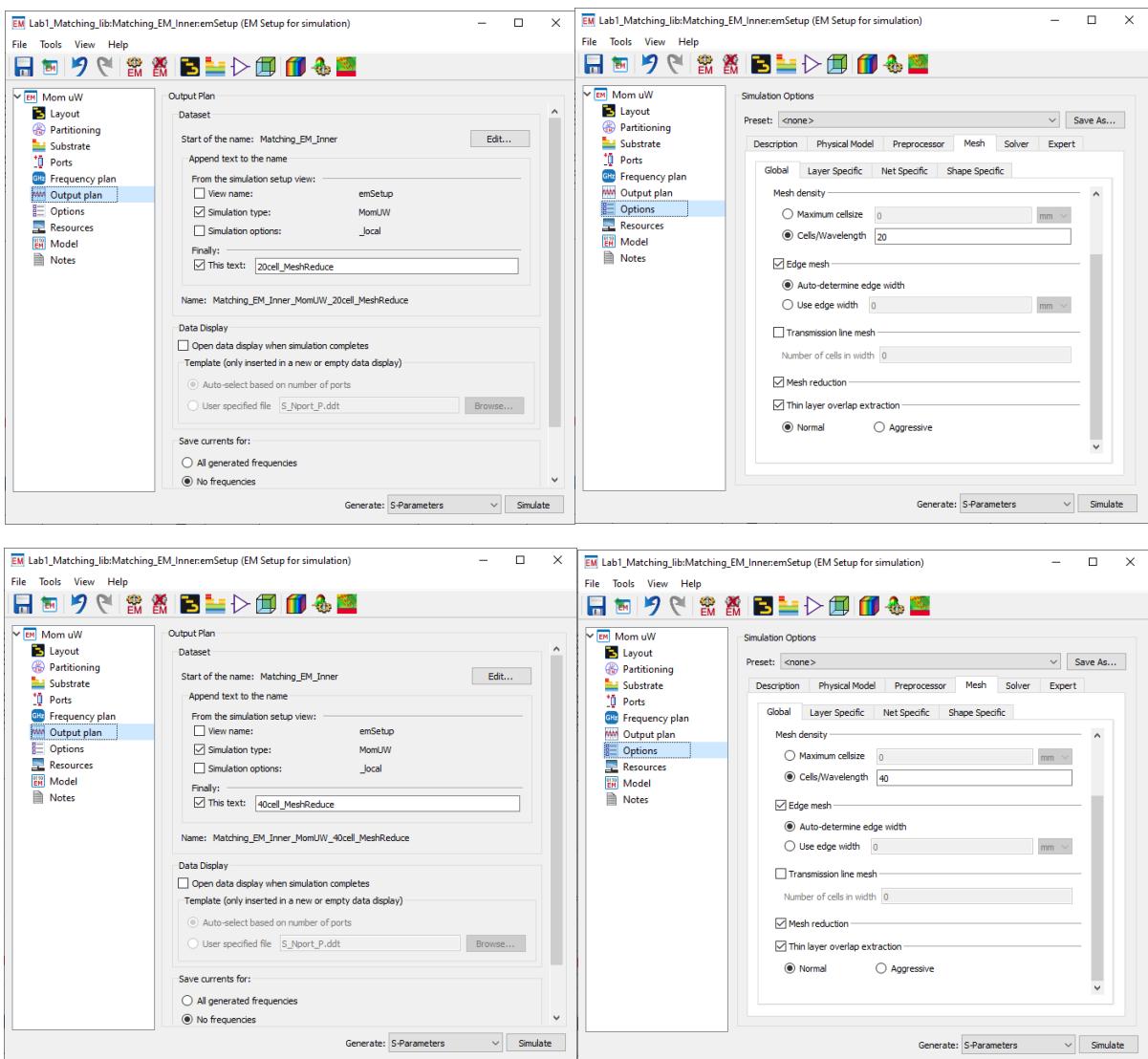


По результатам анализа видно, что на S21 влияние сетки при выбранных плотностях пренебрежимо мало.

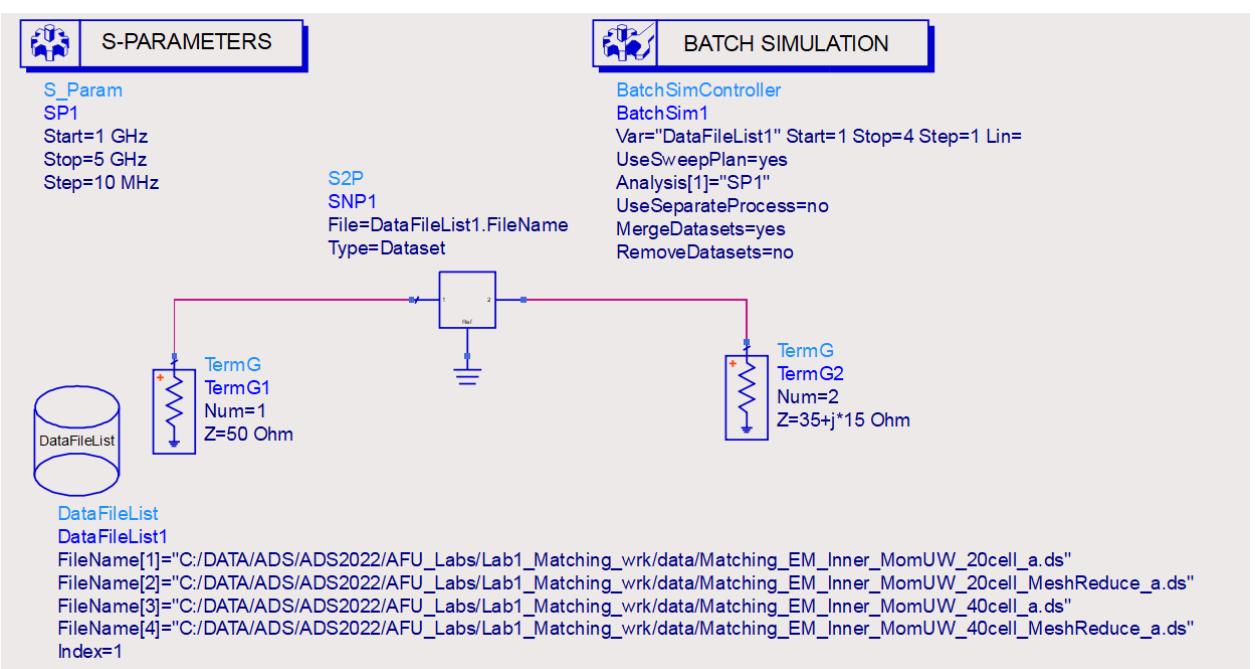
А вот по S11 в нулях есть зависимость. На интересующей частоте 2,5 ГГц влияние сетки довольно мало, ошибка не более 1 дБ. При этом уровень и положение основного нуля S11, близкого к 2,5 ГГц (маркер m4), плавает. По положению и глубине этого нуля мы определяем частоту, на которую настроена согласующая цепь. Поэтому его нужно учитывать.

При анализе результатов нужно помнить, что индексация в датасетах (результатах) идет от 0, а не от 1 (как в блоке DataFileList). На результате 0 (сетке 10ячеек/длина волны) получаются более оптимистичные результаты, чем при более плотных сетках, что явно недостоверно. Сетки 20, 40, 80 и 120 ячеек/длина волны дают близкие друг к другу результаты. Отбросим сетку 10 ячеек/длина волны как слишком грубую.

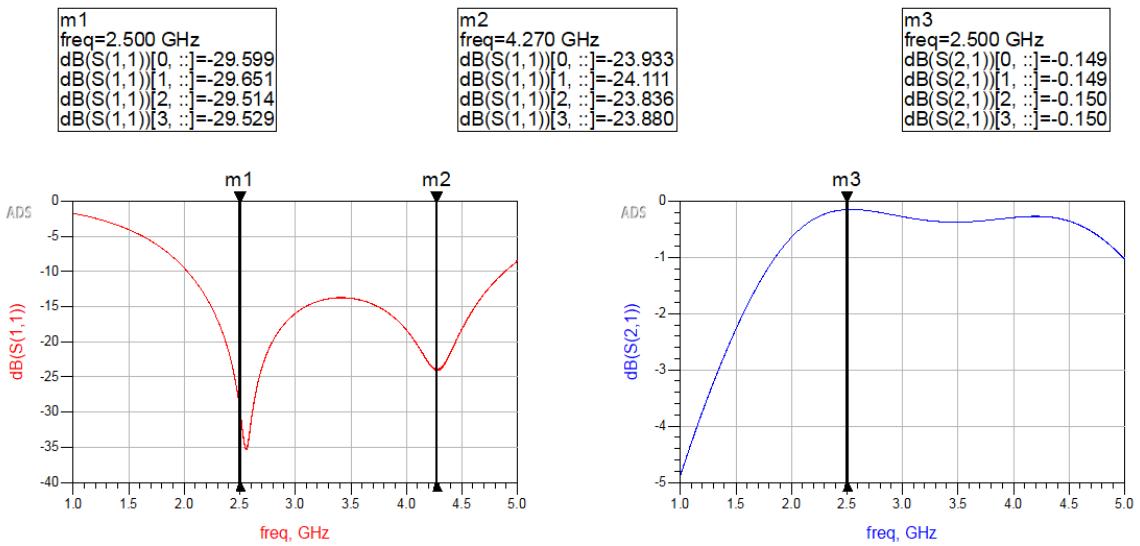
Теперь исследуем влияние упрощения сетки. Вернемся в emSetup и для сеток 20 и 40 ячеек/длина волны включим упрощение сетки (Mesh reduction = true) и сохраним результаты моделирования в отдельные датасеты «\_20cells\_MeshReduce» и «\_40cells\_MeshReduce» соответственно.



Обновим список подгружаемых файлов в схеме Matching\_Mesh и сравним.



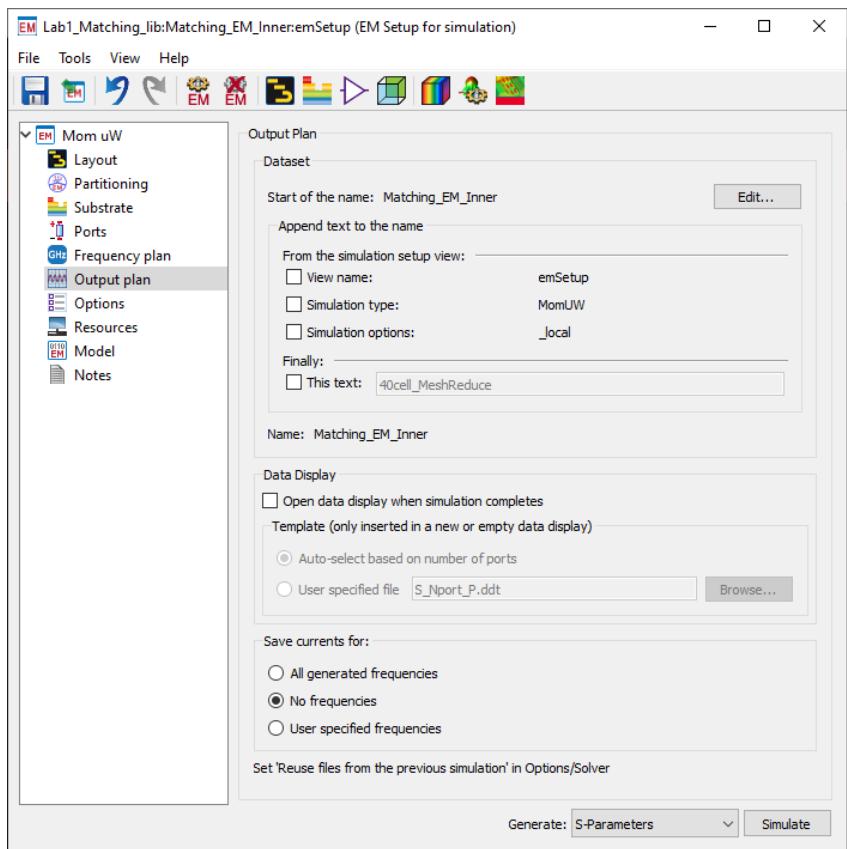
Разница практически отсутствует. Значит, упрощение сетки для текущей топологии можно использовать без ограничений. Это дополнительно ускоряет расчет.



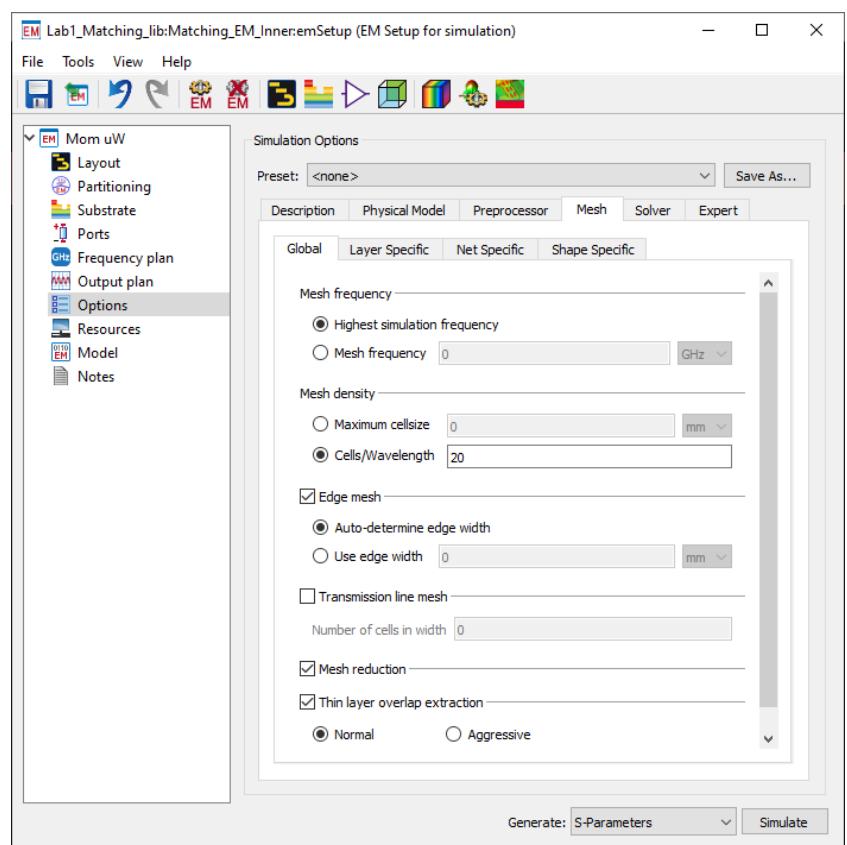
Исходя из проведенного выше мини-исследования можно сделать вывод, что для текущей топологии разбиение 20 ячеек/длина волны с упрощением сетки допустимо и дает приемлемо точные результаты. Более плотную сетку нет смысла использовать. Т.к. при параметризации топологии мы не уйдем далеко от номинальных значений размеров, можно использовать полученные параметры плотности сетки.

Донастроим emSetup, для формирования полноценной параметрической топологии.

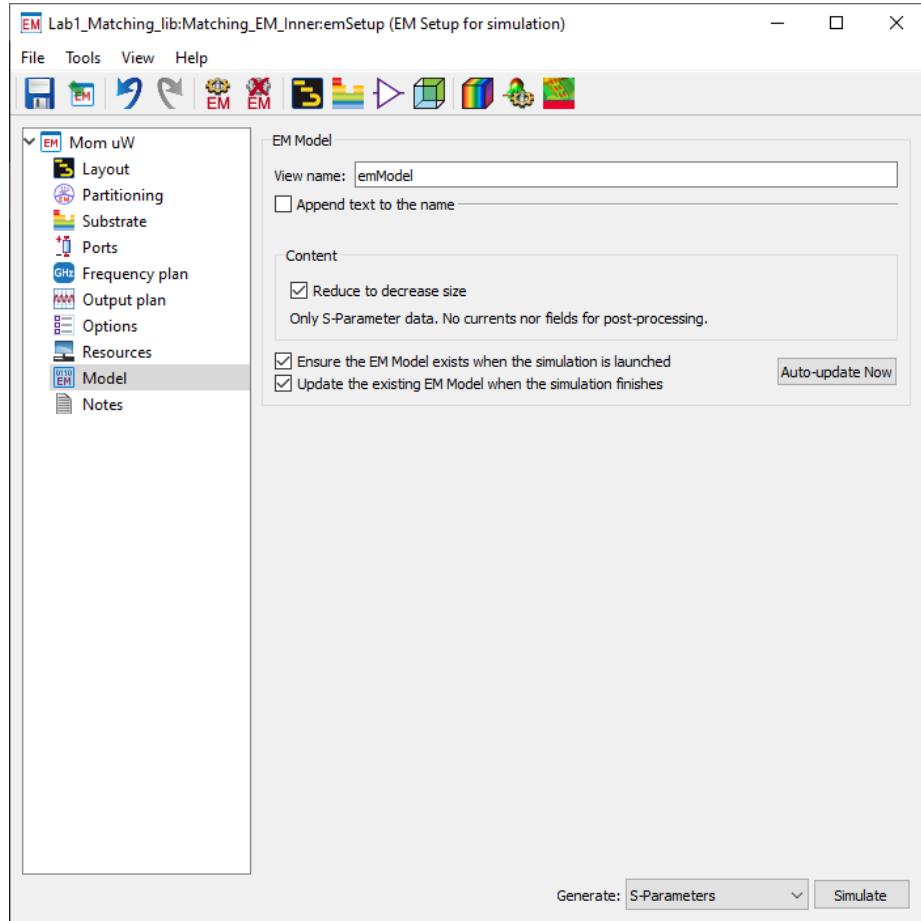
На вкладке Output plan убираем все галки дополнительных суффиксов для имени датасета.



На вкладке Options подвкладке Mesh/Global устанавливаем выбранную ранее сетку 20 ячеек/длина волны и включаем упрощение сетки (Mesh reduction = true).



На вкладке Model ставим галки как показано ниже и нажимаем кнопку Auto-create Now. Данная вкладка управляет сохранением результатов в представление emModel.

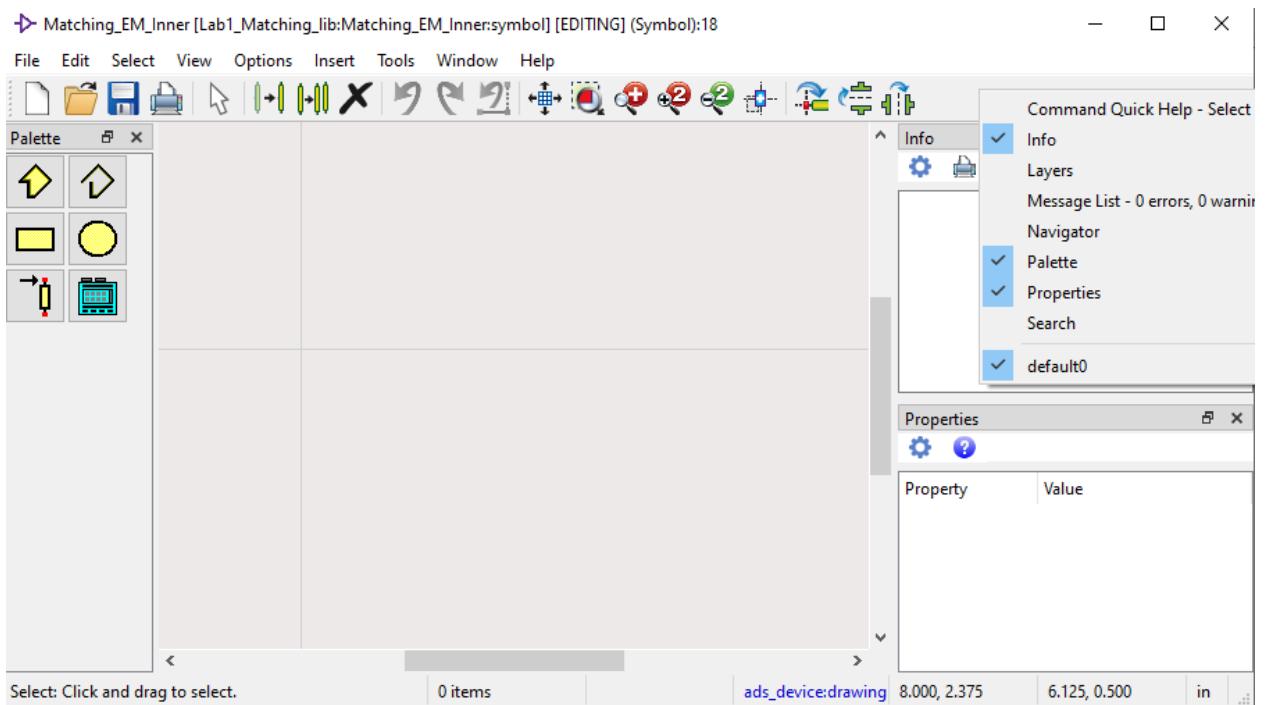


Теперь в ячейке Matching\_EM\_Inner появилась сущность emModel, являющаяся хранилищем результатов ЕМ-моделирования при различных значениях параметров. Его мы будем использовать в верхней схеме.

Чтобы можно было вставить ячейку Matching\_EM\_Inner в другие схемы, ей необходим символ. Создание символа ячейки автоматически запускается, если ячейку без символа попытаться вставить в другую схему. Также можно в основном окне ADS выполнить команду по ячейке ПКМ – New – Symbol. И в emSetup доступен вызов окна редактора символа по кнопке Open Symbol Editor



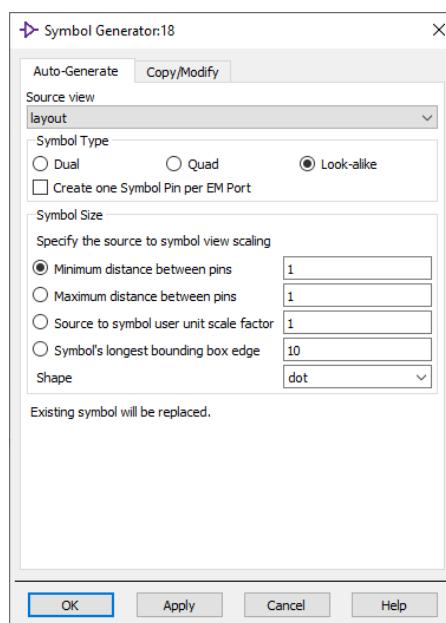
Окно редактора символа является упрощенным редактором схем и управляет аналогично. В палитре расположены основные инструменты создания графических примитивов.



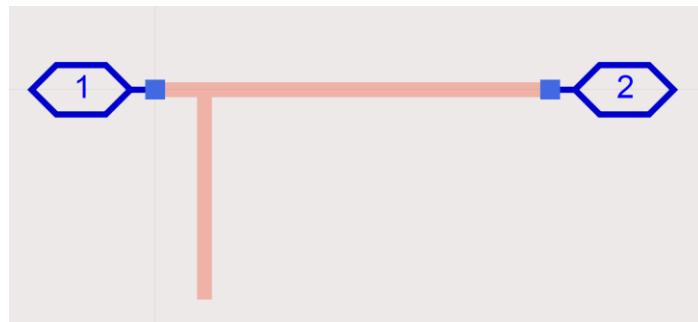
Символ можно нарисовать вручную. Но более удобно сгенерировать автоматически. Для этого нужно запустить мастер генерации по команде Insert



– Generate Symbol. Выберем режим Auto-Generate, источник графики топологии (Source view = layout), вид аналогично топологии (Symbol Type = Look-alike). Для получения нормального вида символа еще возможно надо будет поиграться с группой параметров Symbol Size, управляющих общим масштабом символа.



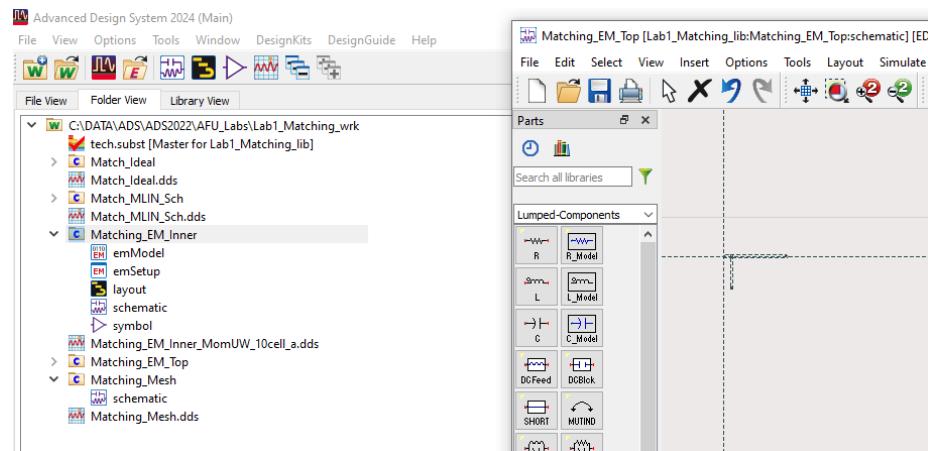
Графика в редакторе символа примет вид аналогичный топологии.



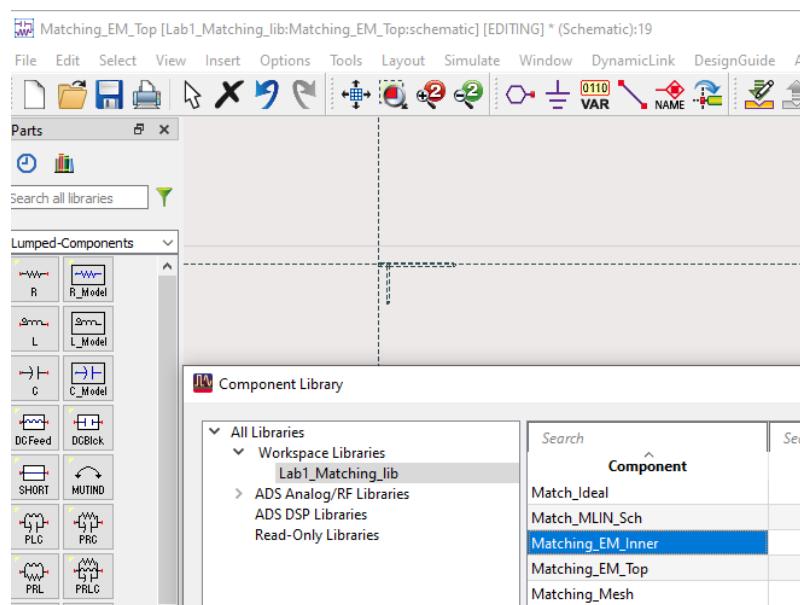
Соберем схему верхнего уровня Matching\_EM\_Top, в которой будем вызывать EM-анализ подсхемы Matching\_EM\_Inner.

Подсхемы можно размещать в другие схемы несколькими способами:

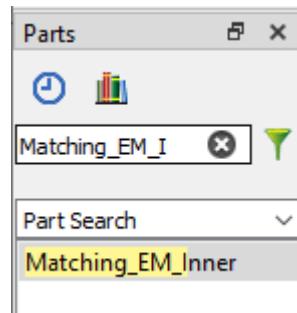
- перетаскивая ячейку подсхемы из основного окна ADS в схему



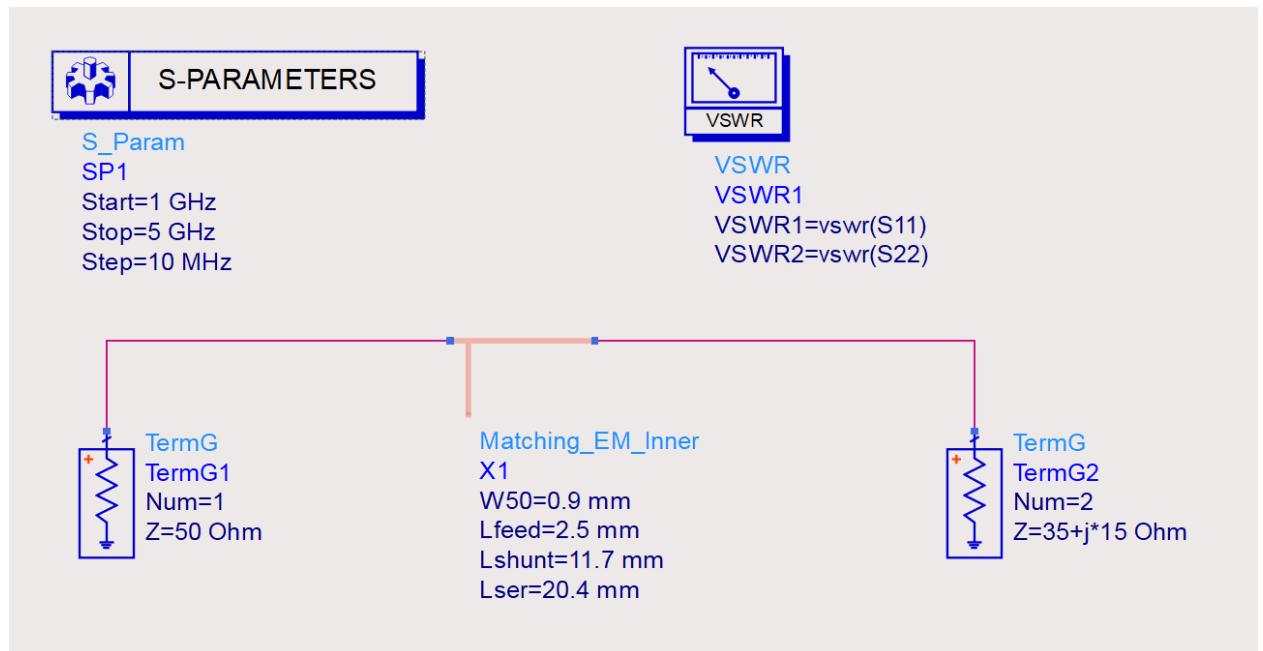
- из окна Component Library, из группы библиотек Workspace Libraries



- в поиске в поле Part Search по имени подсхемы

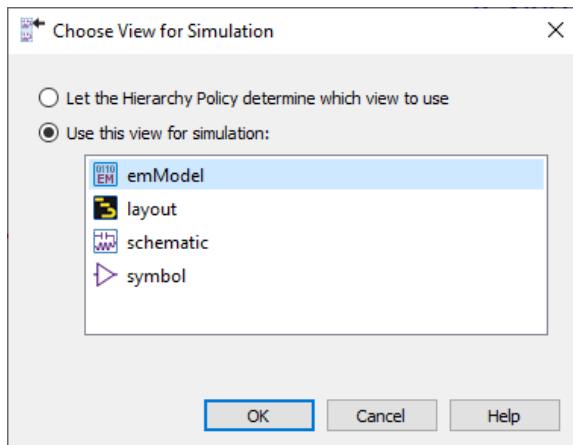


Дополним схему контроллером симуляции S\_param, измерителем КСВН и терминаторами.

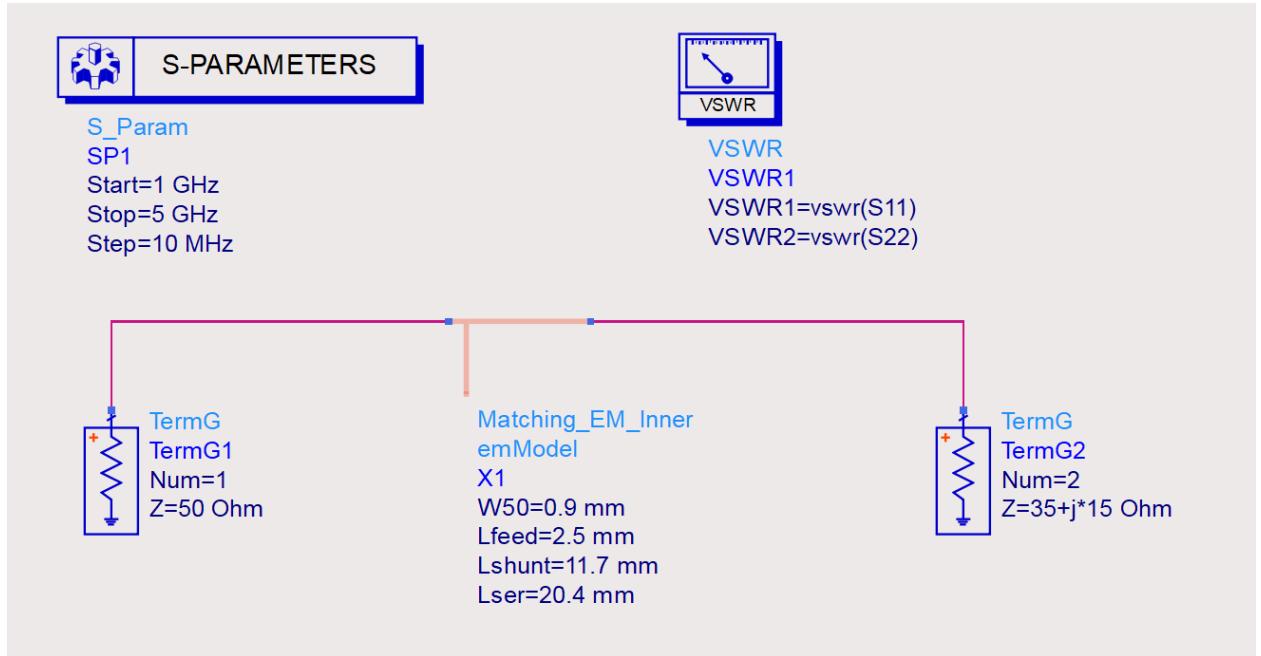


В ячейке Matching\_EM\_Inner сейчас находится четыре представления, схема (schematic), символ (symbol), топология (layout) и emModel. Нужно указать симулятору, какое из этих представлений использовать для расчета.

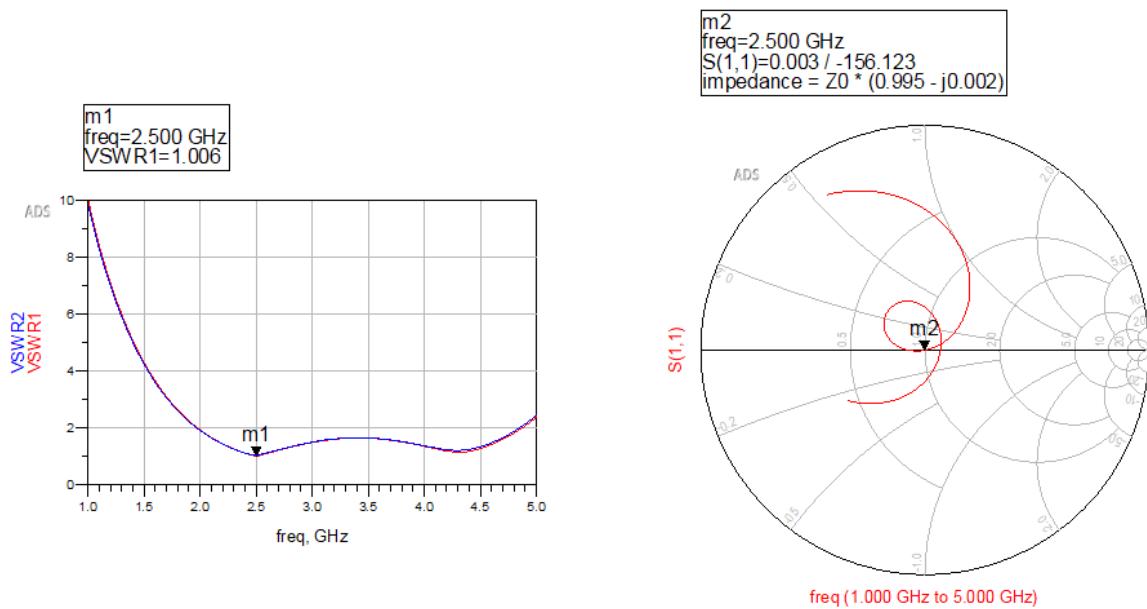
Для этого по команде ПКМ – Component – Choose View for Simulation выбрать emModel.



У подсхемы под именем появится дополнительная строка emModel, показывающая, что для расчета будет использована emModel. Схема готова к моделированию.



Проанализируем результаты.

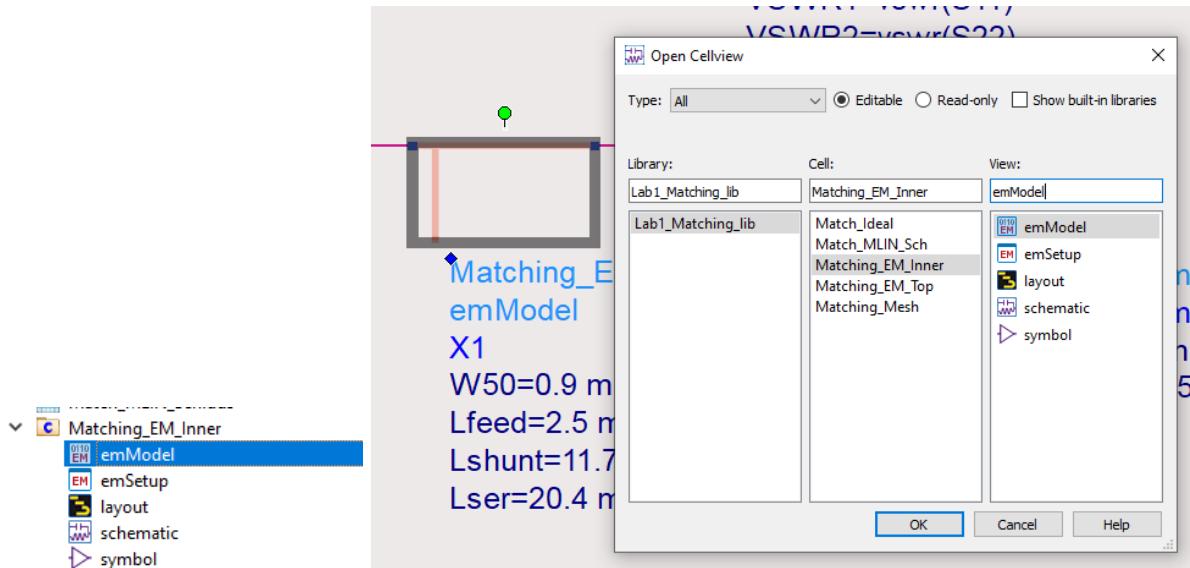


Согласование на центральной частоте чуть-чуть уплыло, но практически незначимо. При необходимости можно провести подстройку.

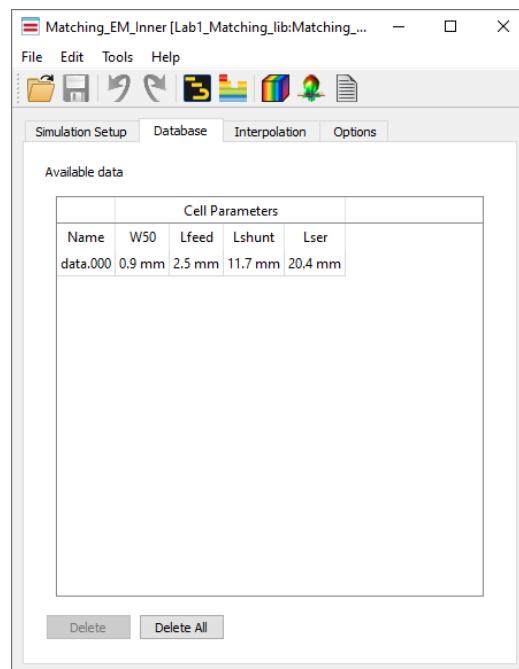
При изменении параметров подсхемы Matching\_EM\_Inner (размеров W50, Lfeed, Lshunt и Lser) при запуске расчета на уровне схемы Matching\_EM\_Top, контроллер симуляции будет запрашивать у представления emModel в подсхеме Matching\_EM\_Inner, существуют ли

результаты расчета с текущими параметрами. Если такие есть, то они быстро достаются из хранилища emModel. Если таких нет, то запускается подчиненный ЕМ-расчет. При этом параметры симуляции берутся из emSetup.

Можно узнать, для каких значений параметров сохранены данные. Для этого нужно открыть emModel. Это можно сделать из основного окна ADS или по команде ПКМ – Open Instance View и выбрать представление emModel.



О открывшемся окне на вкладке Database перечислены значения параметров, для которых сохранены результаты.



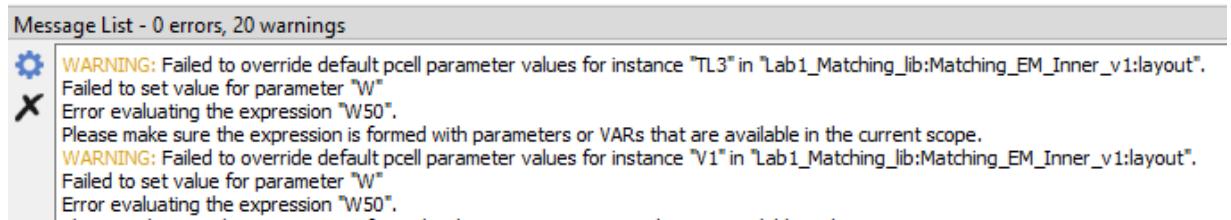
Представление emModel старается следить, чтобы результаты моделирования соответствовали настройками моделирования, в том числе выбранному ЕМ-симулятору, шаблону топологии, списку и типам

переменных, примененной подложке и пр. При изменении этих настроек emModel выдает предупреждение, что сохраненные результаты больше не могут считаться достоверными и удаляются. Но иногда у нее это не получается. В этом случае, необходимо вручную удалить в ячейке emModel и пересоздать его заново.

При создании параметризированной топологии нужно правильно и выполнить все этапы, описанные выше. Если где-то ошибиться, то параметризация топологии не отработает или отработает неправильно. Связано это может быть с несколькими типовыми причинами.

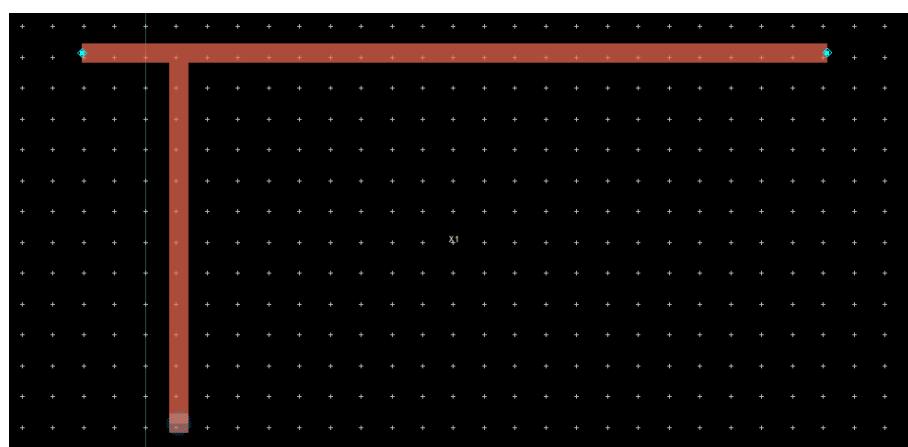


Ошибки в задании или использовании переменных ячейки. Понять, что причина можно по окну Message List, которое по умолчанию привязано ко всем окнам редакторов. В нем появятся предупреждения о невозможности присвоить значение параметра из переменной.



При наличии этой ошибки топология строится, но составные части подставляют вместо значений переменных значения в блоках по умолчанию. Например, компонент MLIN для ширины имеет значение по умолчанию 0,625 мм и будет подставлять его, если не сможет увидеть переменную.

Можно создать временную топологическую ячейку верхнего уровня, в которую внести подсхему нижнего уровня. И с помощью линейки (Ctrl+M) проверить корректность задаваемых размеров.

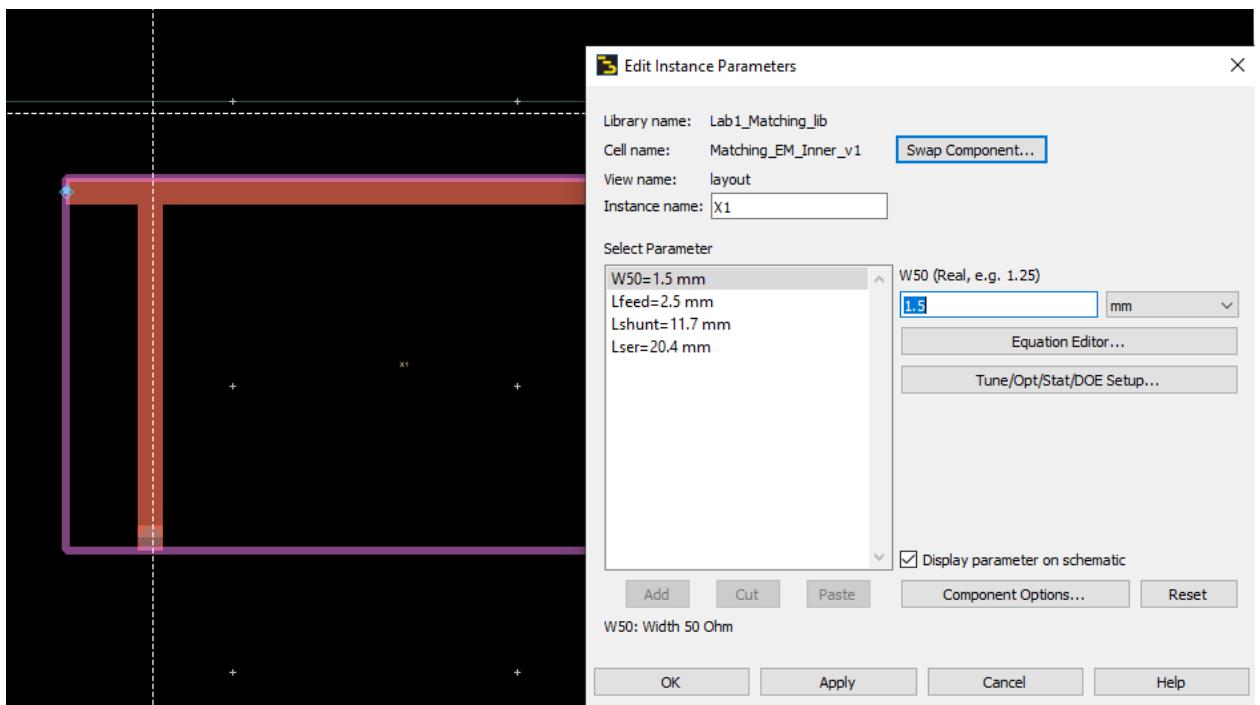


Для исправления этой ошибки необходимо проверить корректность определения переменных (имен, типов, значений по умолчанию и пр).



Ошибка в типе ячейки. Нужно проверить, что тип ячейки стоит параметризированной топологией. Из окна топологии File – Customize Pcell в настройке должен стоять тип Type = Parameterized sub network Pcell. Если эта настройка некорректна, то ошибок выдаваться не будет, но топология будет фиксированной и никак не будет зависеть от изменения параметров ячейки.

Это легко можно увидеть, если создать временную топологическую ячейку верхнего уровня, и изменяя параметры подсхемы, увидеть, что топология не перестраивается.



При долгой активной работе с одной ячейкой с постоянным изменением параметров ЕМ-анализа, состава шаблона топологии, списка переменных ячейки и пр., влияющим на констистенность результатов в emModel, может возникнуть ситуация, что индекс результатов разрушился. В этом случае симуляция будет отрабатывать с ошибкой или результаты престанут соответствовать ожидаемым. В этом случае проще всего создать копию всей внутренней ячейки без emModel с новым именем и использовать в дальнейшем ее.

## Оптимизация

Покажем, как в ADS задавать оптимизацию. Оптимизация в ADS состоит из трех составляющих:



- Optim - контроллер оптимизации (палитра Optim/Stat/DOE). Он управляет, каким алгоритмом оптимизации работать и какие сохранять промежуточные результаты.

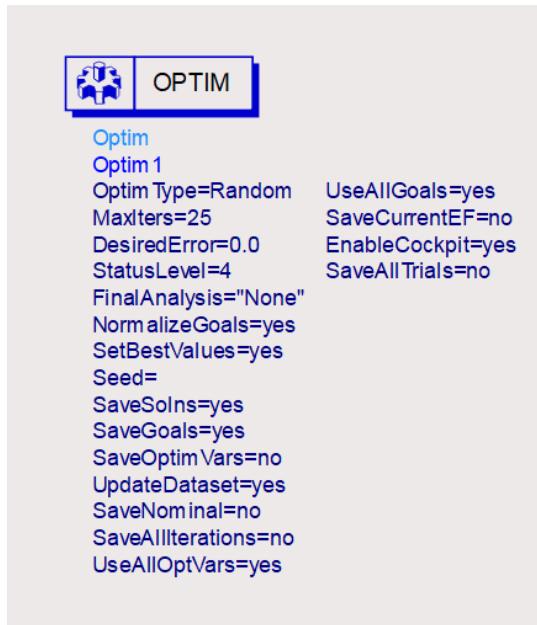


- Goal - цель - одно или несколько измерительных выражений и границы, в которые их надо загнать (палитра Optim/Stat/DOE). На основании всех целей формируется общая целевая функция (Error Function) в понятиях теории оптимизации и задача оптимизации сравнивать ее с нулем.

- Переменные и допустимые диапазоны их изменений, задается аналогично настройкам Tune.

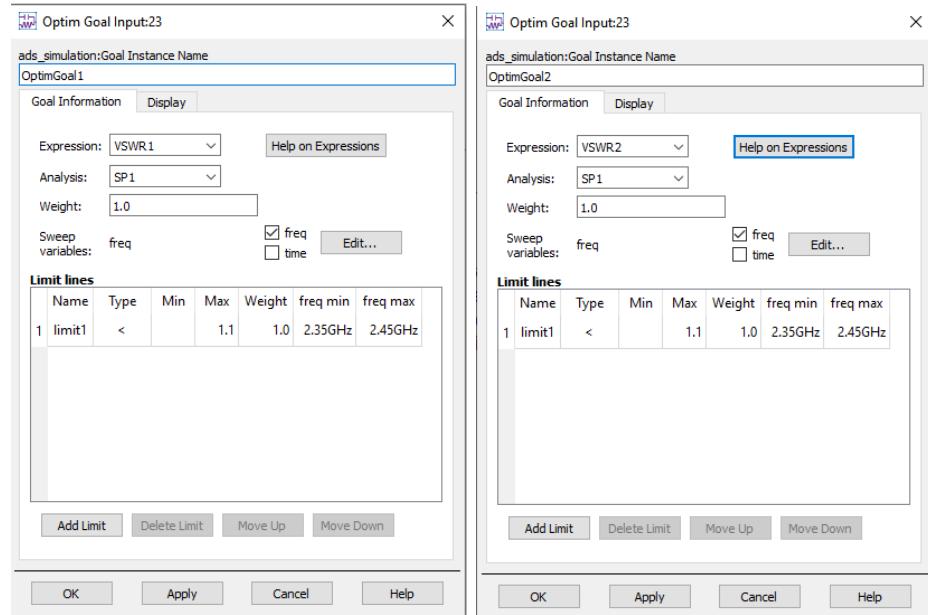
Создадим копию схемы Matching\_MLIN\_Sch под названием Matching\_MLIN\_Sch\_Optim.

Вынесем блок Optim с настройками по умолчанию. В ADS начиная с версии 2011.10 появилось отдельное окно Optimization Cockpit, в котором удобно управлять оптимизацией во время расчета.

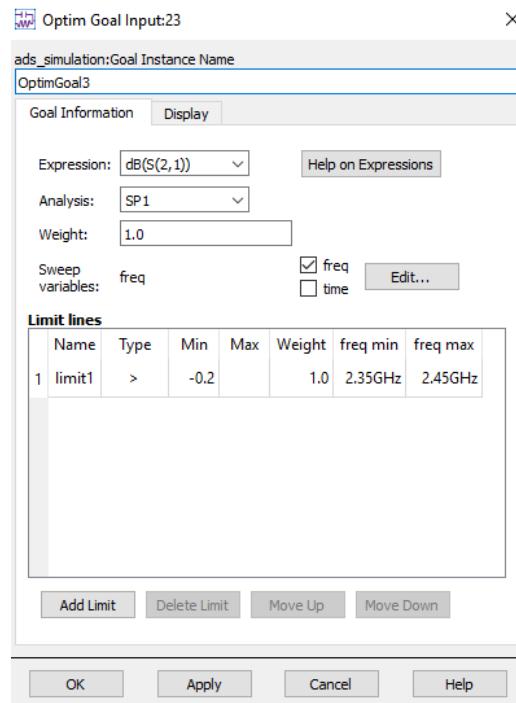


Добавим цели (Goal). Целей добавим три:

- VSWR1 и VSWR2 меньше 1,1 в частотном диапазоне 2,35-2,45ГГц.  
Целям также нужно указывать, из какого контроллера симуляции они берут результаты (SP1)



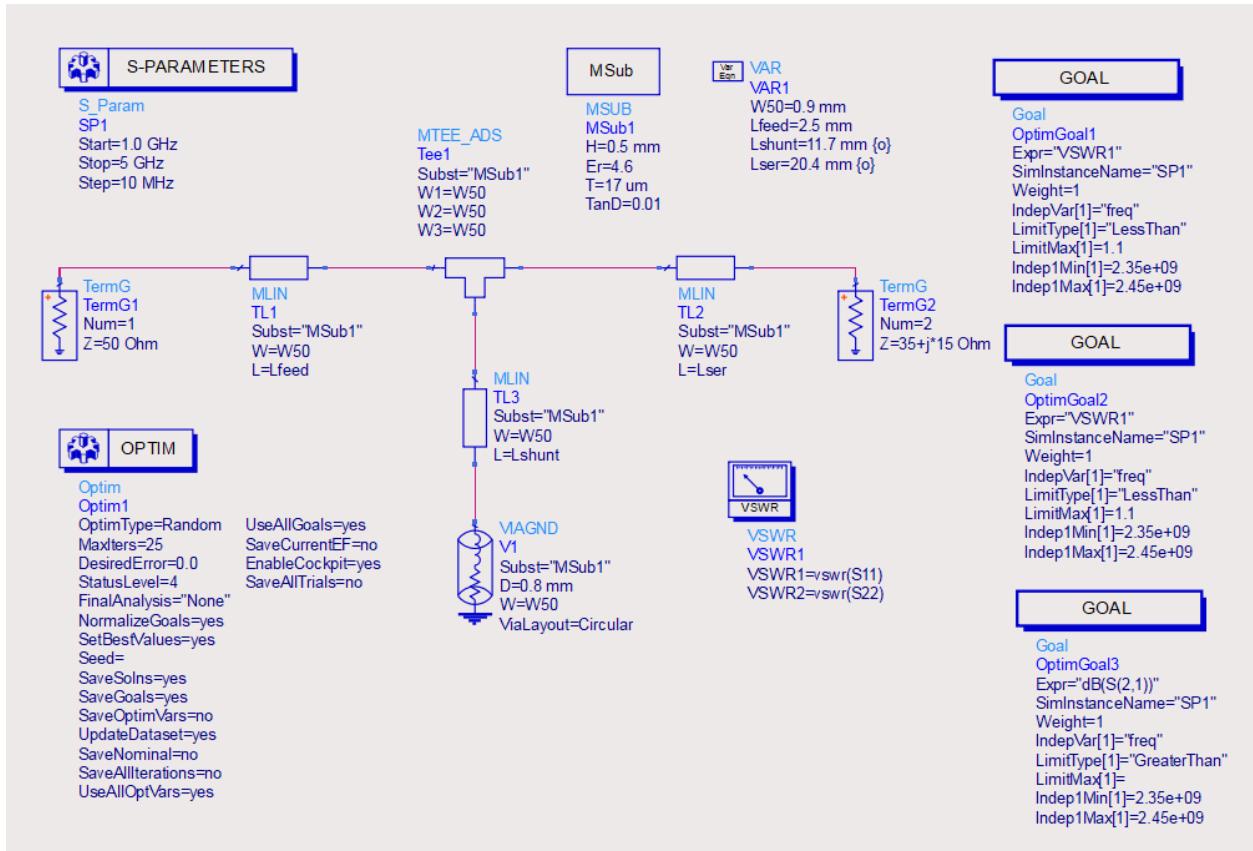
-  $\text{dB}(S(2,1)) >-0.2$  в частотном диапазоне 2,35-2,45ГГц, контроллер симуляции SP1. Если выражения « $\text{dB}(S(2,1))$ » среди определенных на схеме нет, его нужно вписать самостоятельно.



Разрешим меняться Lshunt в диапазоне от 11 мм до 13 мм с шагом 0,05 мм и Lser в диапазоне от 19 мм до 22 мм с шагом 0,05 мм (показано через окно Simulation Optimization)

Simulation Variables Setup [Lab1_Intro.lib:Match_MLN_Sch_Optim:schematic]											
Tuning		Optimization		Statistics		DOE					
Name	Optimize	Value	Unit	Format	Min/+/-/+	Unit	Max	Unit	Step	Unit	
W50	<input type="checkbox"/>	0.9 mm		min/max							
Lfeed	<input type="checkbox"/>	2.5 mm		min/max							
Lshunt	<input checked="" type="checkbox"/>	11.7 mm		max/min/step	11 mm		13 mm		0.05 mm		
Lser	<input checked="" type="checkbox"/>	20.4 mm		max/min/step	19 mm		22 mm		0.05 mm		

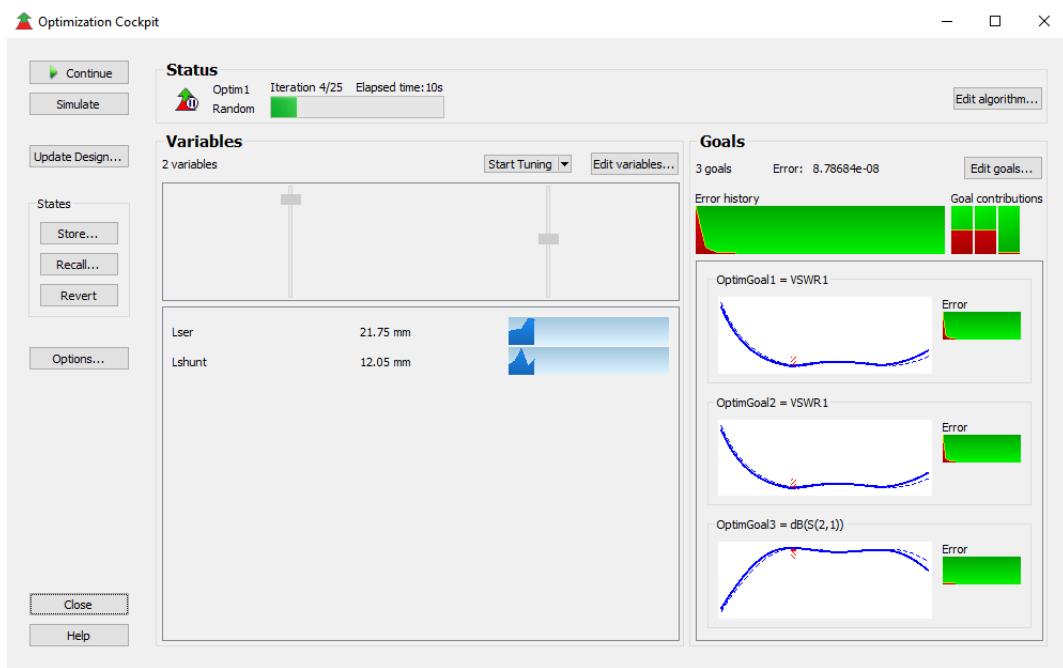
Общая схема будет выглядеть, как показано ниже.



После настроек запускаем оптимизацию по команде Simulate – Optimize



Запустится окно Optimization Cockpit, в котором показано текущее состояние оптимизации – выбранный алгоритм и номер шага оптимизации, состояние переменных и выполнения целей, а также общее значение целевой функции.

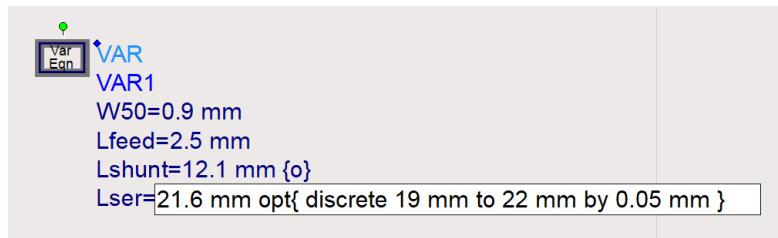


По кнопкам Start Tuning и Edit Variables можно вручную изменять значения переменных, в том числе допустимый диапазон. По кнопке Edit Goals можно подправить цели. По кнопке Edit algorithm можно сменить алгоритм оптимизации. Также доступно сохранение состояний (группа States).

Как только значение Error достигнет 0, цели будут достигнуты.

По окончании оптимизации, по кнопке Update Design новые значения переменных надо будет перенести в схему обратно.

Как и при Tune, все переменные, использованные в оптимизации, имеют сокращенный суффикс {o}, с синтаксисом, аналогичным Tune.

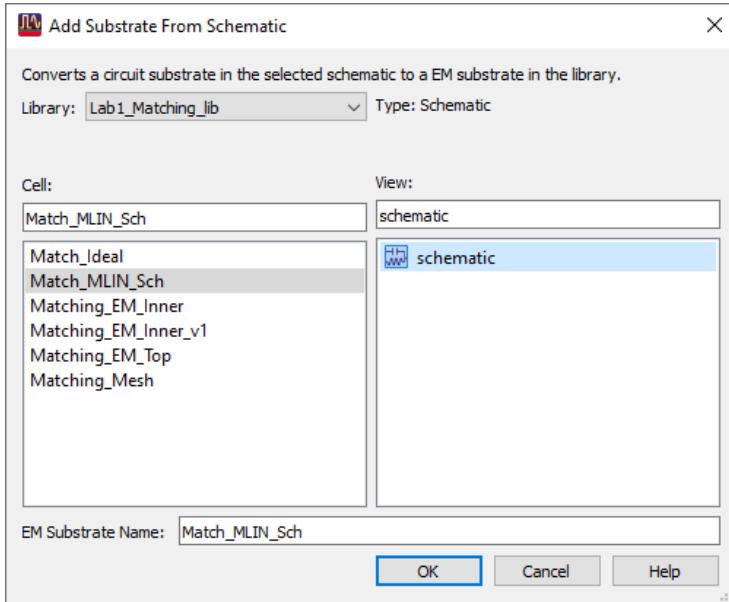


Оптимизацию редко делают на топологическом уровне (EM-анализ), т.к. даже самые простые случаи требуют по несколько расчетов с различными состояниями переменных на один шаг оптимизации. С учётом того, что EM-анализ на каждом шаге может идти довольно долго, это имеет смысл только при доступе к мощным вычислительным центрам или при работе с простыми топологиями.

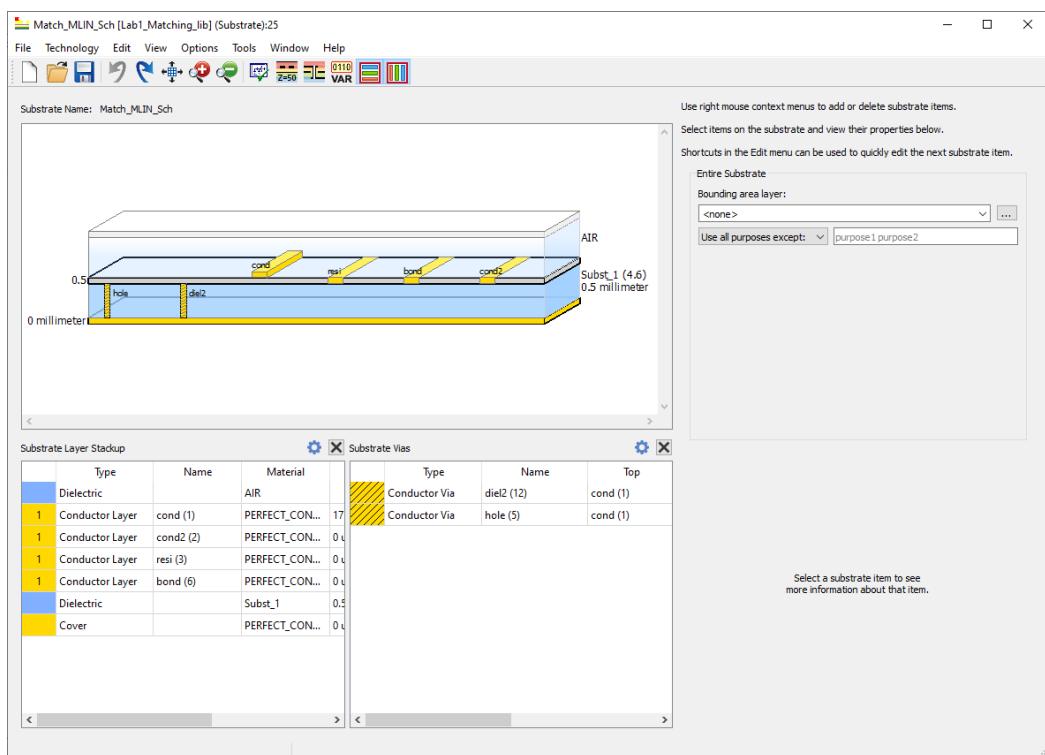
## Быстрое создание определения подложки из MSUB

Покажем инструмент быстрого создания определения подложки на основе существующего в схеме блока MSUB.

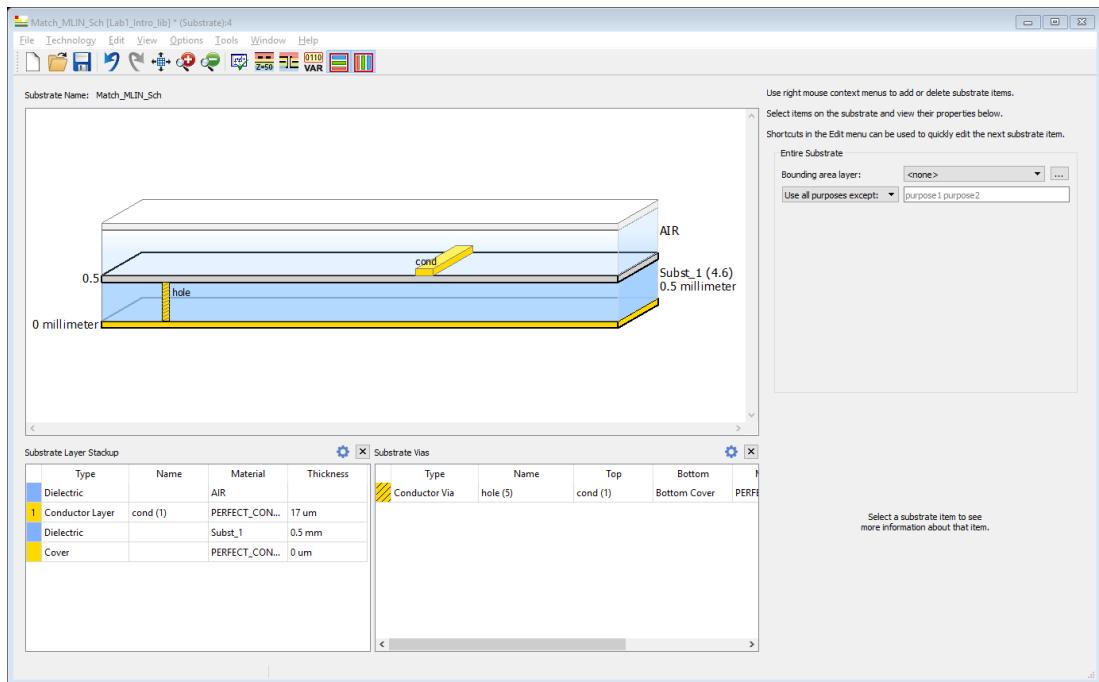
В основном окне ADS команда File – Import – Substrate From Schematic. Откроется окно всех ячеек текущего проекта (и других подключенных библиотек). В этом окне выбираем ячейку, в которой находится MSUB.



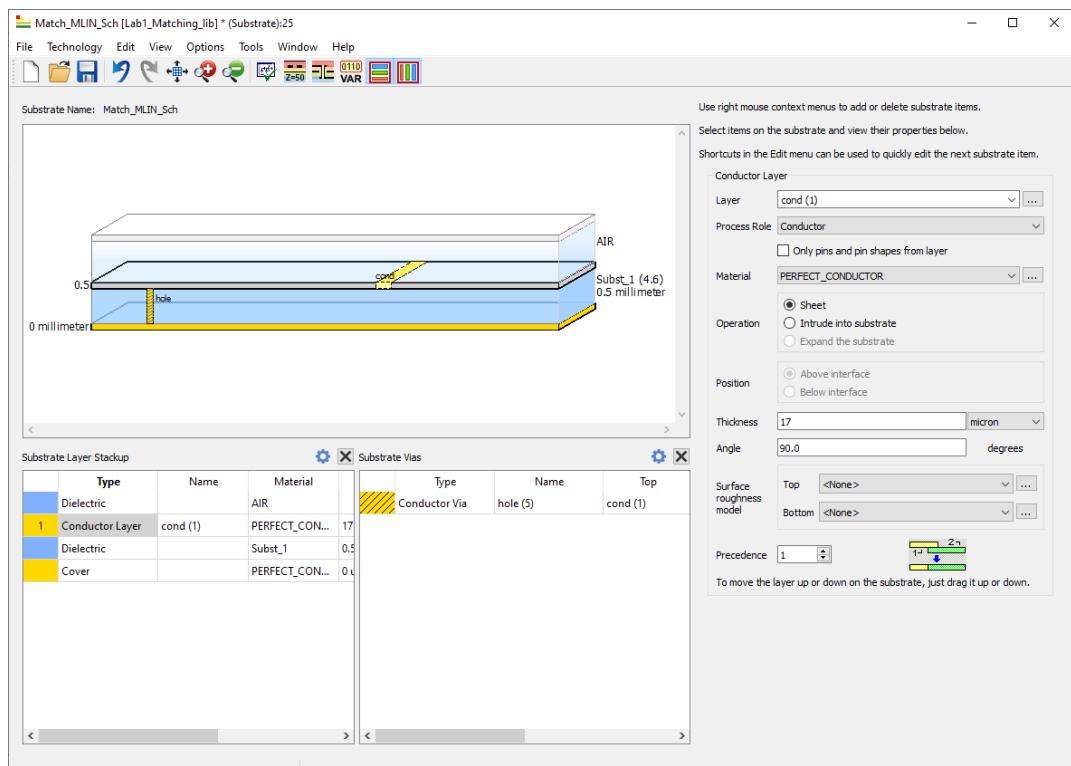
Откроется окно редактора определения подложки. Немного подчистим полученное определение.



Удалим слои cond2, resi, bond и отверстие diel2, которых у нас нет.



Проверим, что слою cond установлена желаемая толщина (17 мкм) и тип (Sheet).



Для материала диэлектрика создан новый материал с названием по умолчанию «Subst\_1». Его лучше переименовать в правильное название, чтобы в будущем не путаться.

Material Definitions

View Technology for this Library: Lab1\_Matching.lib

Conductors		Dielectrics		Semiconductors		Superconductors		Surface Roughness				
Material		Permittivity (Er)			Permeability (MUR)			Djordjevic				
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary	Type	Frequency	TanD Freq	Low Freq		
AIR	Lab1_Matchin...	9.6			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1		
Alumina	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1		
FR_4	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1		
FR_4_Core	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1		
FR_4_Prepreg	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1		
FR4_Imported	Lab1_Matchin...	4.6		0.01	1	0	Frequency Independent					
SolderMask	Lab1_Matchin...	3.3			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1		

Add Dielectric Add From Database... Remove Dielectric

OK Cancel Apply Help

Данная подложка сохраняется как обычное определение EM-подложки (только для EM-моделирования), которых в пределах проекта может быть несколько. Чтобы использовать ее как технологическую подложку tech.subst (глобально для библиотеки, для отображения в режиме 3D, для использования продвинутых инструментов типа RFPro, PIPro/SIPro и пр.), нужно на ее основе создать технологическую подложку по Options – Technology – Edit Stackup или переименовать в tech.subst.

## Задание на выполнение

В соответствии с вариантом рассчитать и спроектировать согласующую цепь с короткозамкнутым шлейфом на заданные входные ( $Z_S$ ) и выходные ( $Z_L$ ) сопротивления на заданную частоту ( $F_c$ ) и ВЧ-подложку. Провести ее настройку и исследование на схемном и топологическом уровнях.

Варианты заданий приведены в таблице 3.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

**Таблица 3. Варианты заданий**

№ Варианта	1	2	3	4	5
Центральная частота $F_c$ , ГГц	2,2	3,0	3,8	4,6	5,4
Импеданс источника $Z_S$ , Ом	50	32-j12	50	60+j12	50
Импеданс нагрузки $Z_L$ , Ом	27+j7	50	65-j15	50	25-j20
Параметры подложки	Именование материала	FR-4	FR-4	RO4360	RO4360
	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ , ед.	4,5	4,5	6,15	6,15
	Тангенс угла диэлектрических потерь TanD, ед.	0,01	0,01	0,0038	0,0038
	Толщина диэлектрика $h$ , мм	0,71	0,51	0,61	0,406
	Толщина металлизации $t$ , мкм	17	35	35	17

**Таблица 3. Продолжение**

№ Варианта	6	7	8	9	10
Центральная частота Fc, ГГц	6,2	7,0	7,8	8,6	9,4
Импеданс источника ZS, Ом	21-j10	50	60-j15	50	55-j18
Импеданс нагрузки ZL, Ом	50	65+j22	50	25+j10	50
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO4003C	RO4003C	RO3003
	Относительная диэлектрическая проницаемость Er, ед.	3,66	3,55	3,55	3,0
	Тангенс угла диэлектрических потерь TanD, ед.	0,004	0,0026	0,0026	0,0013
	Толщина диэлектрика h, мм	0,338	0,305	0,203	0,25
	Толщина металлизации t, мкм	17	17	35	35

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. Создание и настройка проекта.
  - 1.1. Создать проект, технологию брать 0.0001mm.
  - 1.2. Создать технологическую подложку проекта tech.subst в соответствии с вариантом задания.
2. Согласующая цепь на идеальных линиях передачи (ячейка Matchin\_Ideal).
  - 2.1. Рассчитать параметры участков согласующих линий на идеальных линиях передачи.
    - Рассчитать электрическую длину и волновое сопротивление, заданные относительно частоты.

- Считать можно вручную, графически с использованием циркуля, линейки и диаграммы Смита или с использованием инструмента SmithChart.

2.2. 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 Fc.

2.3. Промоделировать в режиме S-параметров.

- Показать, что согласующая цепь выполняет поставленную на нее задачу.

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 2\%$ .

- Считать, что согласующая цепь выполняет свою задачу, если КСВН по входу и по выходу не более 1,2, а коэффициент передачи dB(S21) не менее – 0,2 дБ.

3. Согласующая цепь в микрополосковом исполнении на схемном уровне (ячейка Matching\_MLIN\_Sch).

3.1. Создать схему согласующей цепи в микрополосковом исполнении на основании результатов, полученных в п.2.

- Для расчета геометрических размеров микрополосков использовать инструмент LineCalc.

- Компоненты брать из палитры TLines-Microstrip.

- Параметры подложки брать из таблицы 3.

- Диаметр отверстия на землю не менее 0,4 мм, ширина пояска металлизации отверстия – по ширине 50 Ом-ной линии, тип пада - прямоугольник.

- Дополнительно добавить 50 Ом-ный участок длиной около 2-2,5 ширин 50 Ом-ной линии со стороны действительного импеданса 50 Ом (с округлением до 0,1 мм).

3.2. Провести моделирование в режиме S-параметров.

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

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 2\%$ .

- Считать, что согласующая цепь выполняет свою задачу, если КСВН по входу и по выходу не более 1,2, а коэффициент передачи dB(S21) не менее – 0,2 дБ.

3.3. Если согласующая цепь не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить ее.

4. Согласующая цепь в микрополосковом исполнении на топологическом уровне (ячейка верхнего уровня Matching\_EM\_Top и подсхема Matching\_EM\_Inner).

4.1. Создать параметризованную топологию согласующей цепи в микрополосковом исполнению с использованием результатов п.3.

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

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

#### 4.2. Провести анализ сетки разбивения

- Метод моделирования брать Momentum Microwave.

- Сетки брать 10, 20, 40, 80 и 120 ячеек/длина волны без упрощения и с упрощением сетки.

- С помощью дополнительной схемы Matching\_Mesh выбрать оптимальную сетку моделирования.

#### 4.3. Провести ЕМ-моделирование топологии.

- Используя результаты п.4.2, задать параметры сетки.

- 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.3.

- Результаты контролировать в диапазоне частот  $F_c \pm 2\%$ .
  - Считать, что согласующая цепь выполняет свою задачу, если КСВН по входу и по выходу не более 1,2, а коэффициент передачи dB(S21) не менее – 0,2 дБ.
- 4.3. Если согласующая цепь не проходит по требованиям, с помощью инструментов Tune или Optimization настроить ее.

## Требования к отчёту

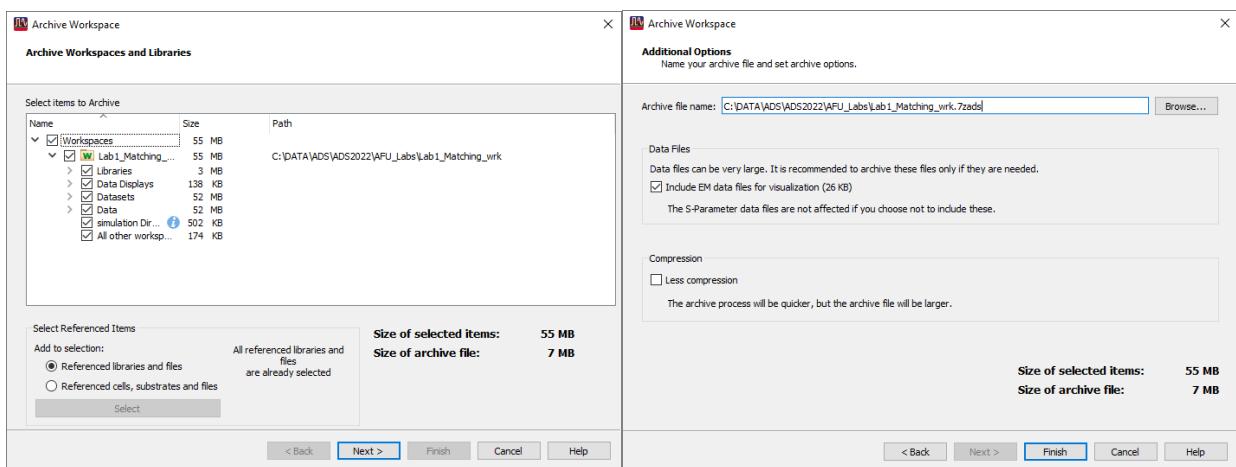
Отчет о выполненной лабораторной работе должен представлять из себя структурированное описание всей выполненной работы, в том числе должен содержать:

- 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 экспорттировать 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 фактически является 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\_Lab1\_Matching вместо непонятного Lab1 или Workspace1).

### **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. Что такое микрополосковая линия передачи? Какими параметрами она определяется?
2. Укажите, как соотносятся между собой электрические параметры (волновое сопротивление и электрическая длина) и физические параметры (ширина и длина) микрополосковой линии передачи на фиксированной подложке на заданной частоте?
3. Какая размерность и состав матрицы S-параметров согласующей цепи?
4. Приведите типовой вид графика  $|S_{11}|$  [в разах] согласующей цепи, настроенной на некоторую частоту  $F_c$ ? А как будет выглядеть данный график в [дБ]?
5. Приведите типовой вид графика  $|S_{21}|$  [в разах] согласующей цепи, настроенной на некоторую частоту  $F_c$ ? А как будет выглядеть данный график в [дБ]?
6. Какой точке на диаграмме Смита соответствует  $Z_0 = 50\Omega$  (при нормировке сопротивлений относительно 50 Ом)?
7. Пусть на диаграмму Смита выведена частотная зависимость коэффициента отражения  $S_{11}$  согласующей цепи, настроенной на некоторую частоту  $F_c$ . В какой части графика на диаграмме Смита будет находиться точка, соответствующая частоте  $F_c$ ?
8. Пусть на диаграмму Смита выведена частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  согласующей цепи, настроенной на некоторую частоту  $F_c$ . В какой части графика на диаграмме Смита будет находиться точка, соответствующая частоте  $F_c$ ?
9. Как на частотные свойства согласующей цепи повлияет добавление со стороны нагрузки 50 Ом короткого ( $\sim 2..3$  ширины линии) участка с волновым сопротивлением 50 Ом?
10. Поясните смысл проведенных в работе экспериментов с параметрами сетки разбиения. На что она влияет и как правильно контролировать сетку?

## 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

### 3. Перечень ресурсов сети «Интернет»

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>

6. Репозиторий с методическими указаниями по лабораторным работам <https://github.com/dee3mon/Keysight-ADS-Microstrip-methodic>

7. Репозиторий с методическими указаниями по лабораторным работам <https://github.com/dee3mon/Keysight-ADS-RFDevices-methodic/>

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

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

9. Канал youtube Anurag Bhargava <https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>

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

### Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.