

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»

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

Москва, Зеленоград

2023

Оглавление

Оглавление	2
Введение	2
Теоретические сведения	3
Методика выполнения работы	3
Запуск ADS и создание проекта	4
Модель на идеальных линиях передачи	8
Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении	28
Модель на топологическом уровне	37
Оптимизация	60
Статистический анализ выхода годных	64
Использование инструмента SmithChart	73
Быстрое создание определения подложки из MSUB	77
Задание на выполнение	80
Требования к отчёту	84
Задание на самостоятельную работу	86
Контрольные вопросы	86
Литература	87

Введение

Цель работы: ознакомится с базовым маршрутом моделирования и проектирования планарных (полосковых) 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 2020 upd1. 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. Показан типовой маршрут работы, которому надо будет следовать при выполнении нескольких следующих лабораторных работ, посвященных моделированию и проектированию полосковых устройств.

	показывает места, за которыми надо особенно следить и где легко совершить ошибку
---	--

Теоретические сведения

//TODO

Методика выполнения работы

Типовой маршрут работы с полосковыми устройствами 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). Параметризация EM-модели. При необходимости подстройка модели.
4. Статистический анализ выхода годных EM-модели по точности размеров.

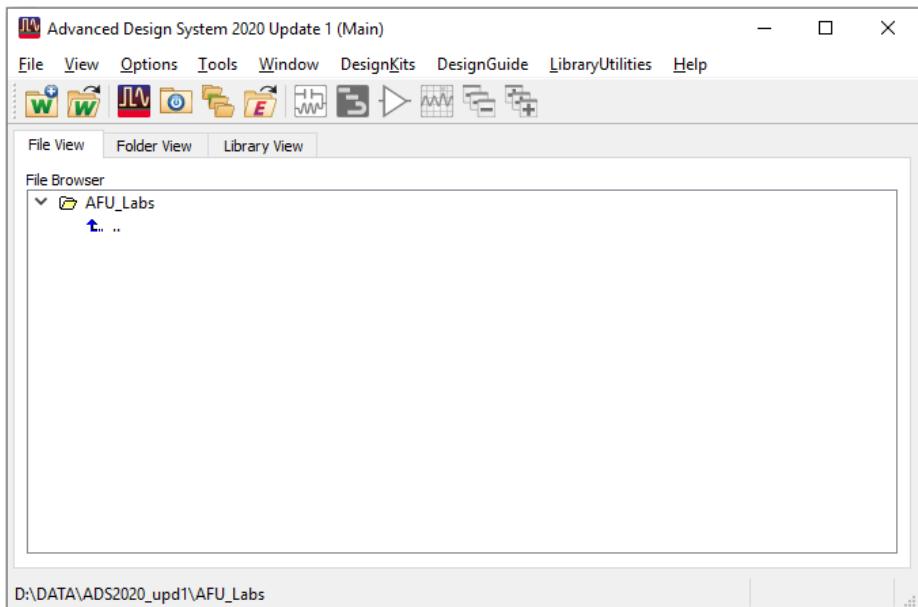
На этапах 2 и 3 возможна необходимость подстройки по параметрам, что возможно с использованием инструментов Tune или Optimization в ADS.

Для расчета согласующей цепи на идеальных линиях передачи отдельно приведено описание использования инструмента SmithChart.

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

Запуск ADS и создание проекта

Основное приложение ADS версии ADS2020Upd1 называется «Advanced Design System 2020 Update 1».



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



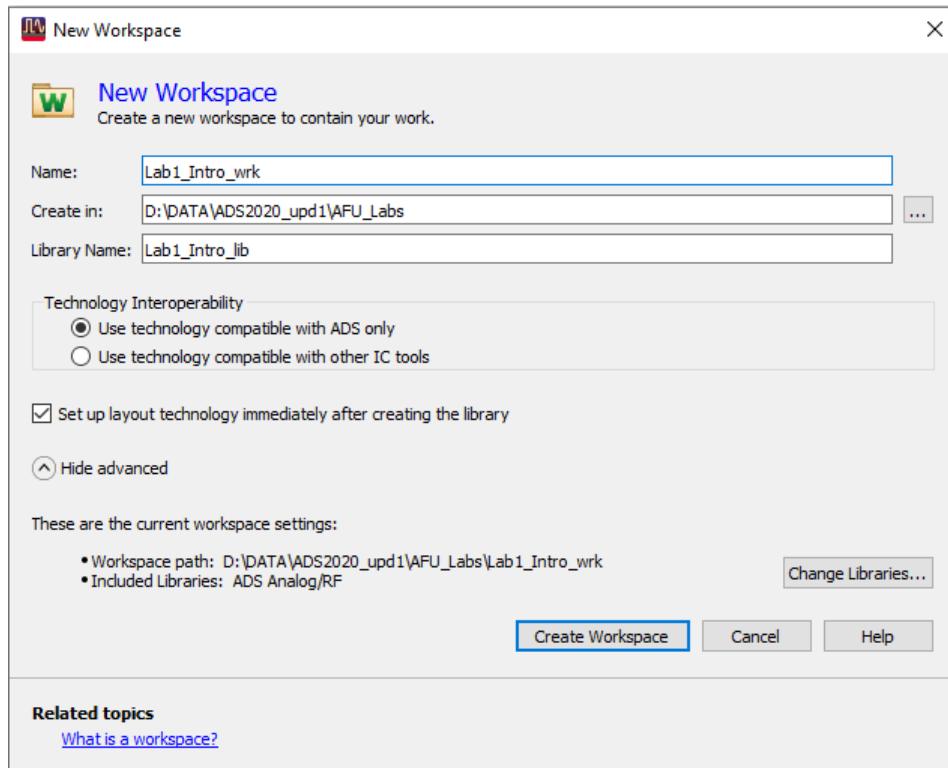
При создании нового проекта запускается мастер. На первом этапе нужно указать папку, где будет храниться проект и имя проекта.

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 в текущем проекте.

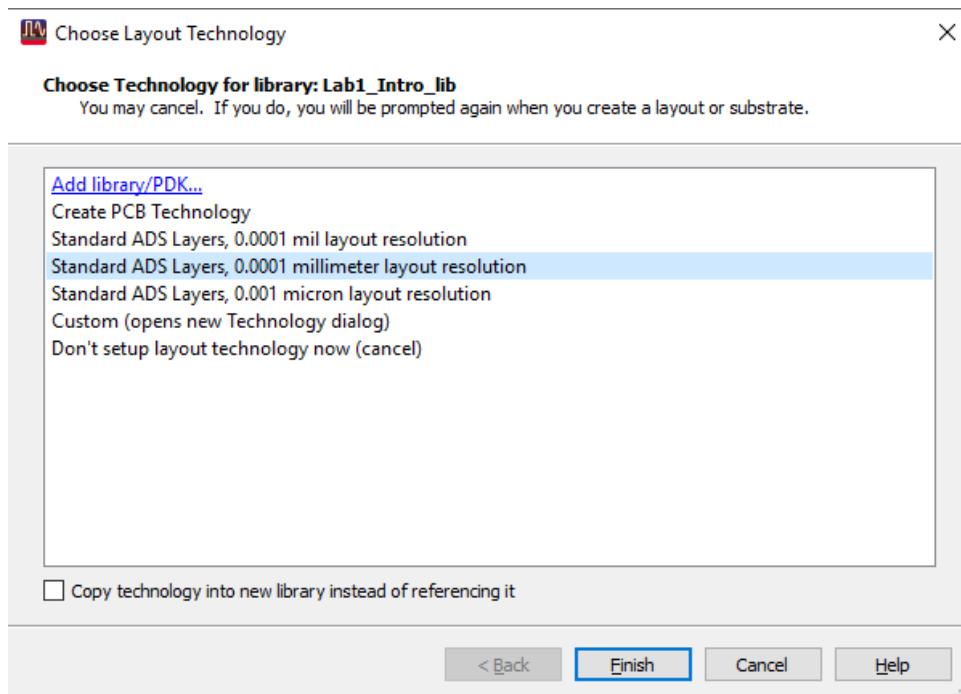
 Проект должен находиться по пути, где нет неанглийских символов, пробелов и иных спецзнаков. Назван он тоже должен быть по этим же правилам.

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.

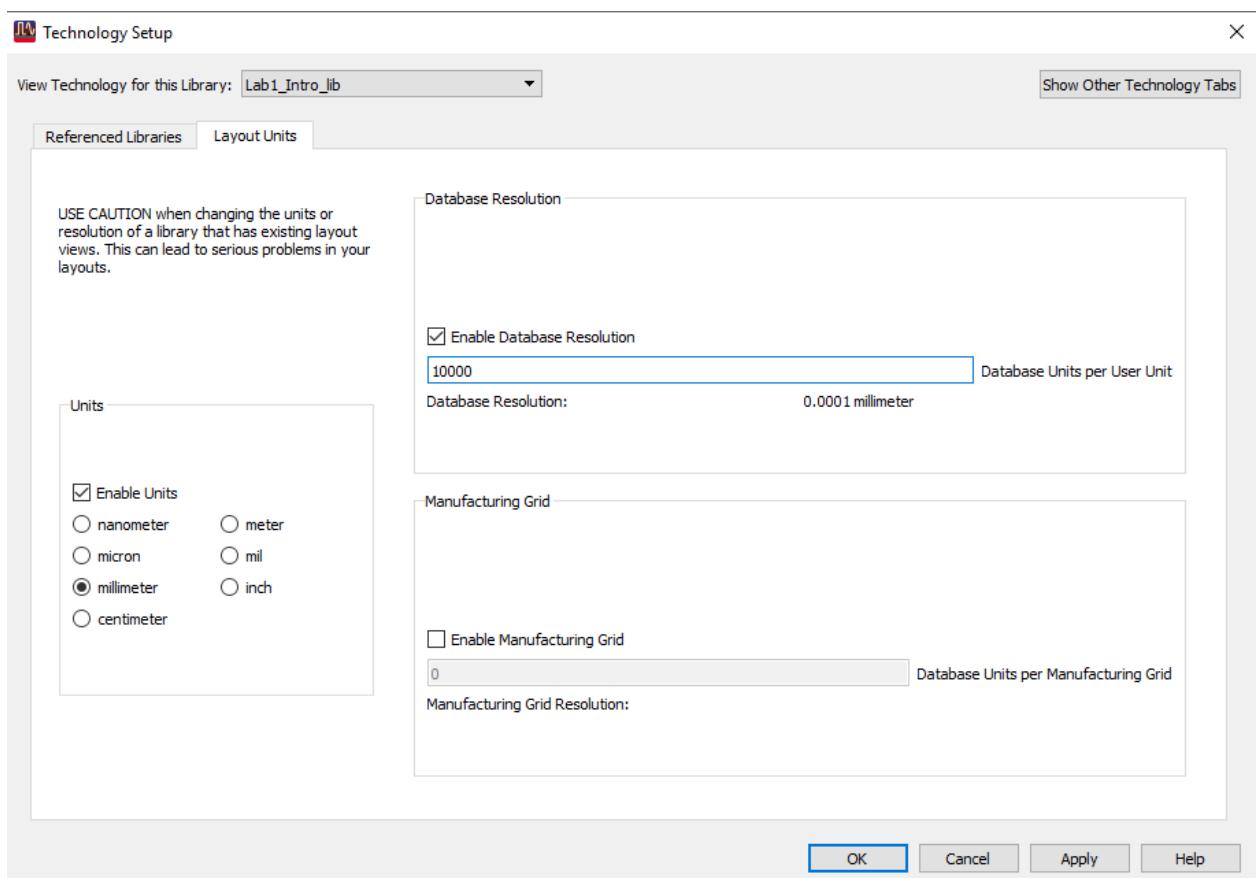


В окне Choose Layout Technology выбираем стандартную библиотеку ADS, в мм, с разрешением 0,0001мм.

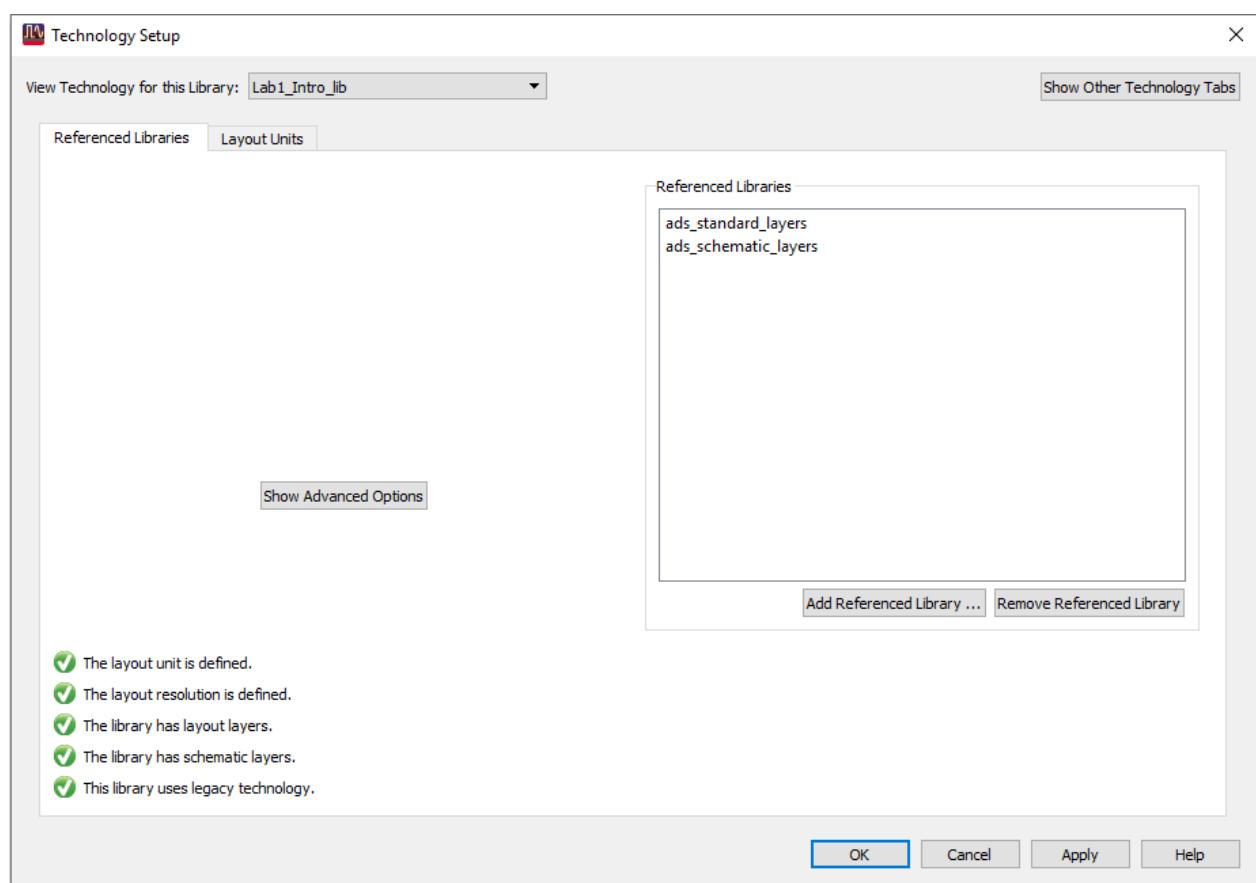
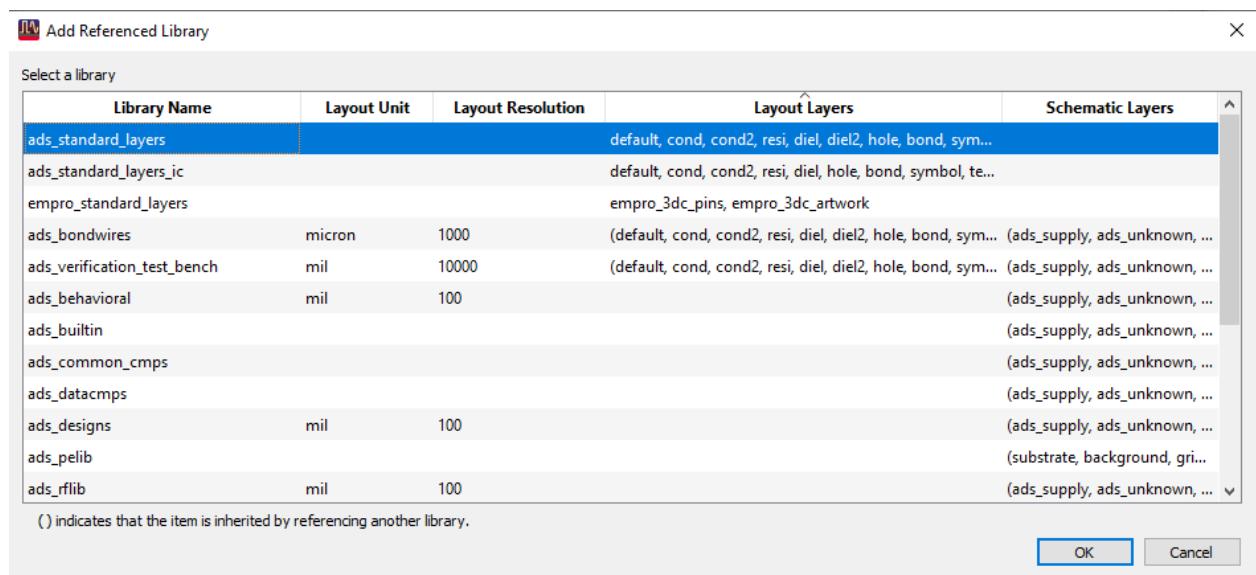


Если при создании проекта данные этапы были пропущены, то все это можно задать вручную. В основном окне ADS по команде Options - Technology – Technology Setup для базовой библиотеки проекта на вкладке Layout Units нужно:

- 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.



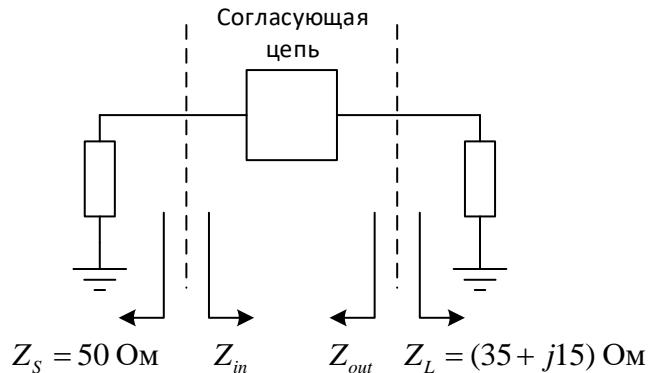
На вкладке Reference Libraries в группе Referenced Libraries по кнопке Add Referenced Library в списке найти и добавить библиотеку «ads_standard_layers».



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.

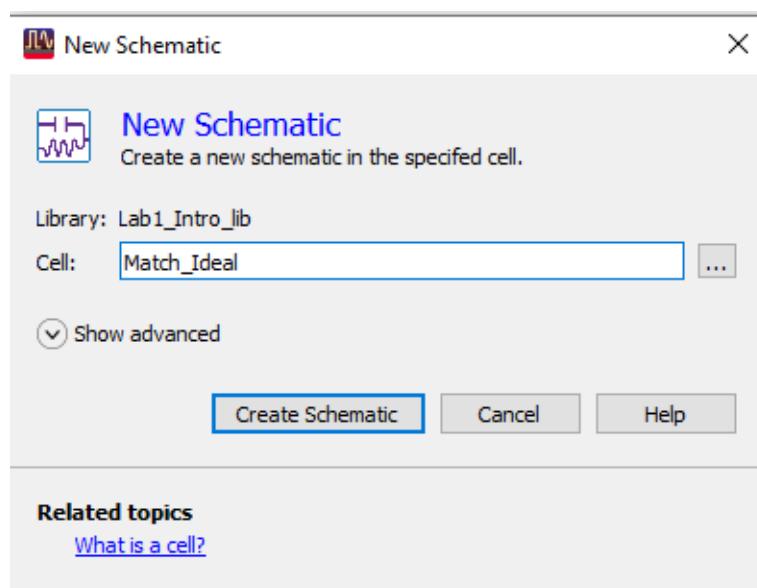
Модель на идеальных линиях передачи

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.

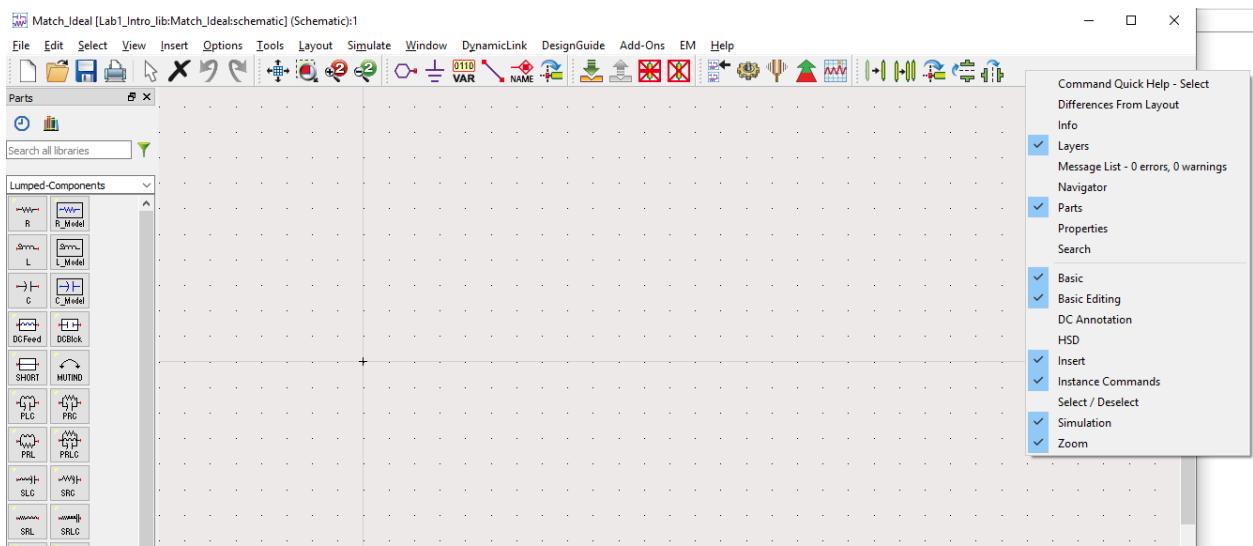


Создание новой схемы делается по команде File – New – Schematic .

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

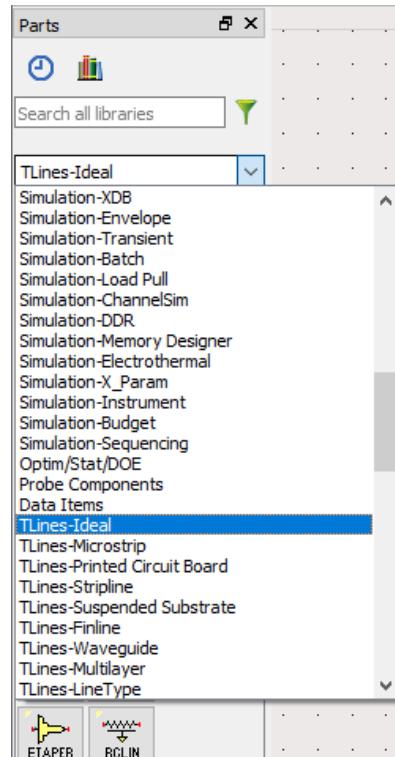


Откроется новое окно редактора схемы.



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.

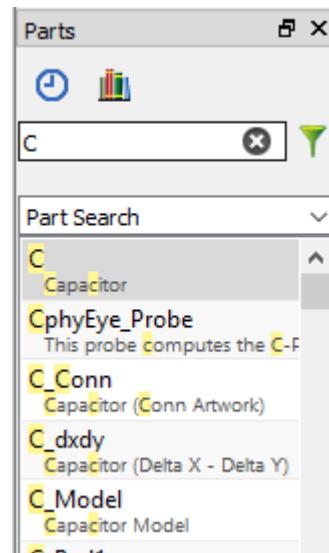


Если компонент не добавлен в какую-либо палитру или неизвестно его точное имя, то можно открыть окно Library Browser (Insert – Component – Component Library, быстрая клавиша «I»), где можно осуществлять поиск и подбор по описанию.

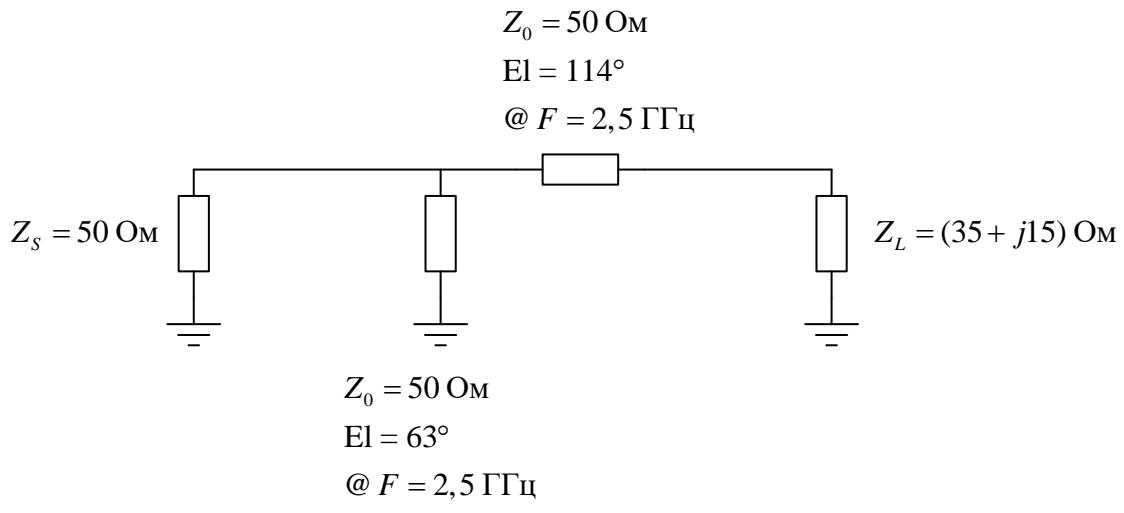
Component Library

Search Component	Search Description	Search Library	Search Vendor	Search Placement	Search Availability	Search Utl	Search License
5G_FBMC_Rx_AWGN_Analysis	5G FBMC Rx AWGN Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
5G_FBMC_Tx_Analysis	5G FBMC Tx Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
5G_FBMC_Tx_Source_Analysis	5G FBMC Tx Source Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AC	AC Small-Signal Simulation	Simulation-AC	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ACPR_Measurement_Analysis	ACPR Measurement Analysis VTB	ads_verification...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ACPWDS_MDS		ads_tlines	Both	Available	N/A	N/A	N/A
ACPWT_MDS		ads_tlines	Both	Available	N/A	N/A	N/A
actHInOut		ads_schematic...	Both	Available	N/A	N/A	N/A
actHInp		ads_schematic...	Both	Available	N/A	N/A	N/A
actHOut		ads_schematic...	Both	Available	N/A	N/A	N/A
ADS_Diode_Model	ADS Root Diode Model	Devices-Diodes	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADS_FET	ADS Root field effect transistor	Devices-GaAs	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADS_FET_Model	ADS Root field effect transistor Model	Devices-GaAs	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADS_MOS	ADS Root MOS Transistor	Devices-MOS	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADS_MOS_Model	ADS Root MOS Transistor Model	Devices-MOS	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADSDiode	ADS Root Diode	Devices-Diodes	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADSBiBT_Model	ADS Heterojunction Bipolar Transistor Model	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADSBiBT_NPN	ADS Heterojunction Bipolar Transistor, NPN	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
ADSBiBT_NPN_Th	ADS Heterojunction Bipolar Transistor w/ Thermal...	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
Advanced_Curcice2_Model	Advanced_Curcice GaAsFET Model	Devices-GaAs	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AGC_Amp	Voltage-controlled amplifier	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AGC_Amp	Voltage-controlled amplifier	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AGC_PwrControl	AGC loop power control	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AGC_PwrControl	AGC loop power control	System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AgilentIBT_Model	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor Model	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AgilentIBT_NPN	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor, NPN	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AgilentIBT_NPN_Th	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor w/ Thermal...	Devices-BJT	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AIRIND1	Libra Aircore Inductor (Wire Dia.)	Passive-RF Circ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AIRIND2	Libra Aircore Inductor (Wire Gauge.)	Passive-RF Circ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AM_DemodTuned	AM Demodulator, Tuned	System-Mod/D...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AM_ModTuned	AM Modulator, Tuned	System-Mod/D...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AmplH1H2	Amplifier model based on 1st and 2nd harmonic ...	System-Data M...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AmplH1H2_Setup	Amplifier model based on 1st and 2nd harmonic ...	System-Data M...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
Amplifier	AmpH1H2 setup	ads_behavioral	Both	Available	N/A	N/A	N/A
Amplifier2		System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
AmplifierP2D		System-Amps ...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
*P2D File Amplifier (PDD-based model for single c...		System-Data M...	NOLAYOUT	Available	N/A	N/A	N/A
2492 items found							

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 (описано в разделе Использование инструмента SmithChart):



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



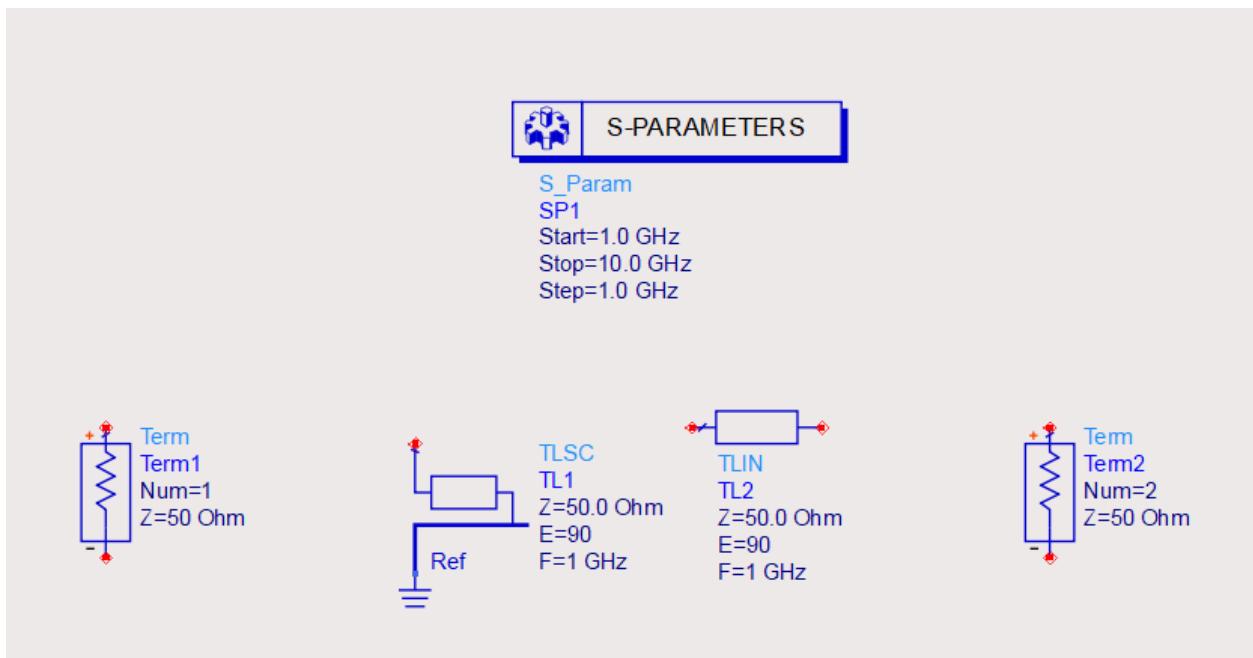
Term). Находятся они в палитре Simulation-S_Param.

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

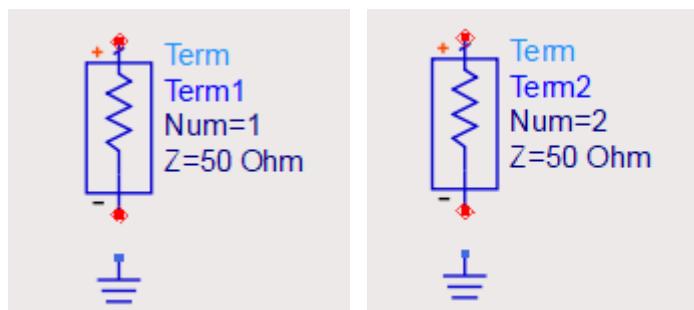


Simulation (короткое имя S_Param). Находится он в палитре Simulation-S_Param.

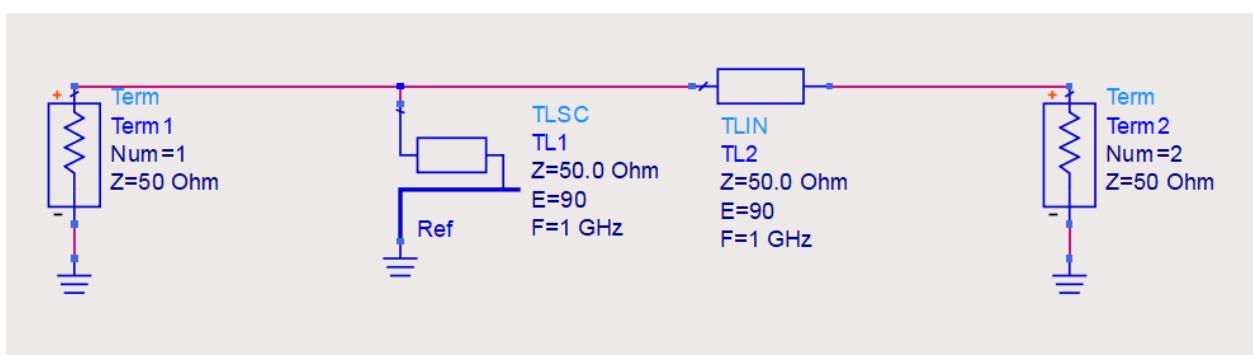
Расположим компоненты в соответствии со следующим рисунком.



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:

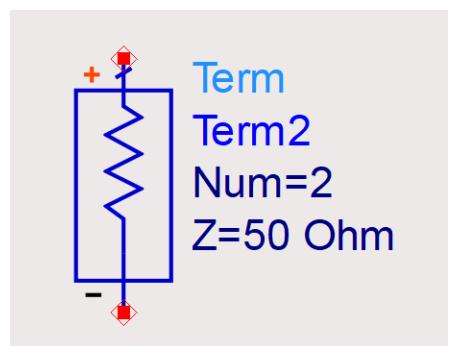
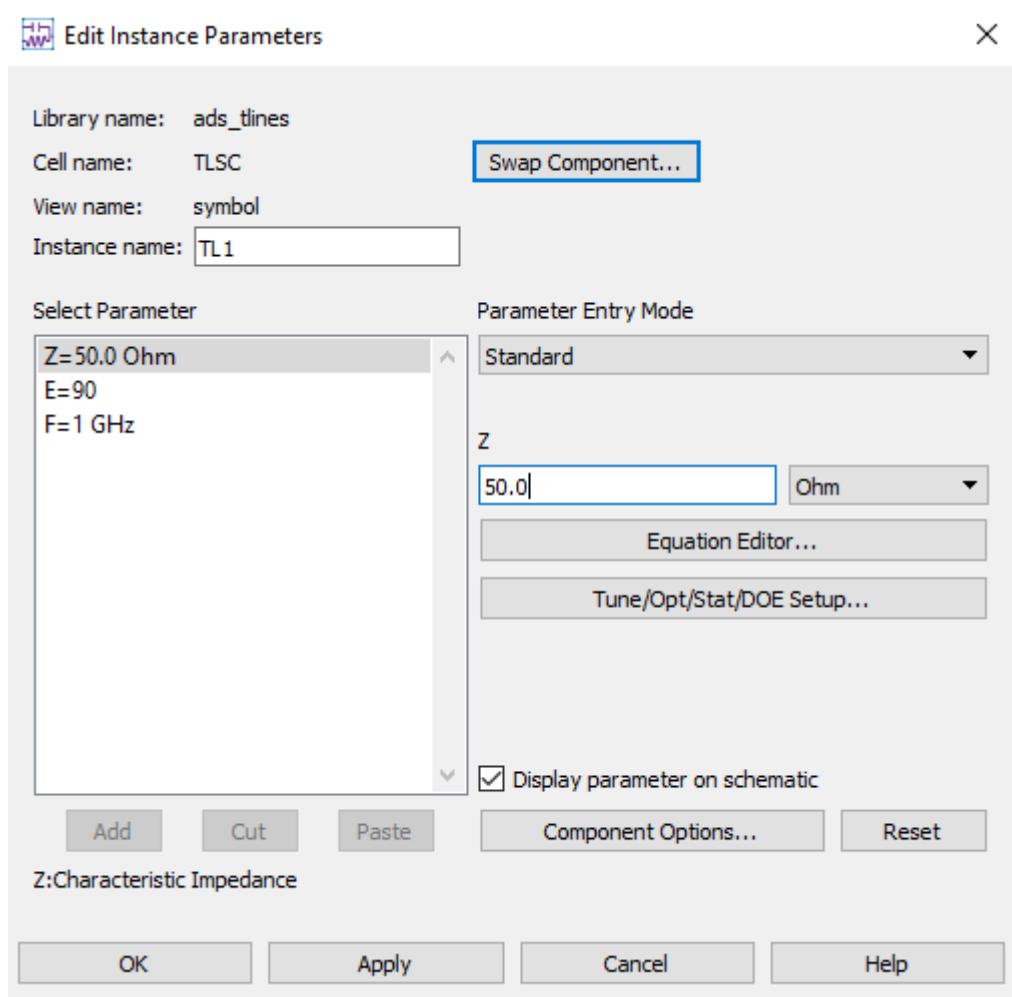
- Светло-голубая «Term» строка (при настройках цветов по умолчанию) – это краткое имя компонента (аналогично поиску в панели Part).

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

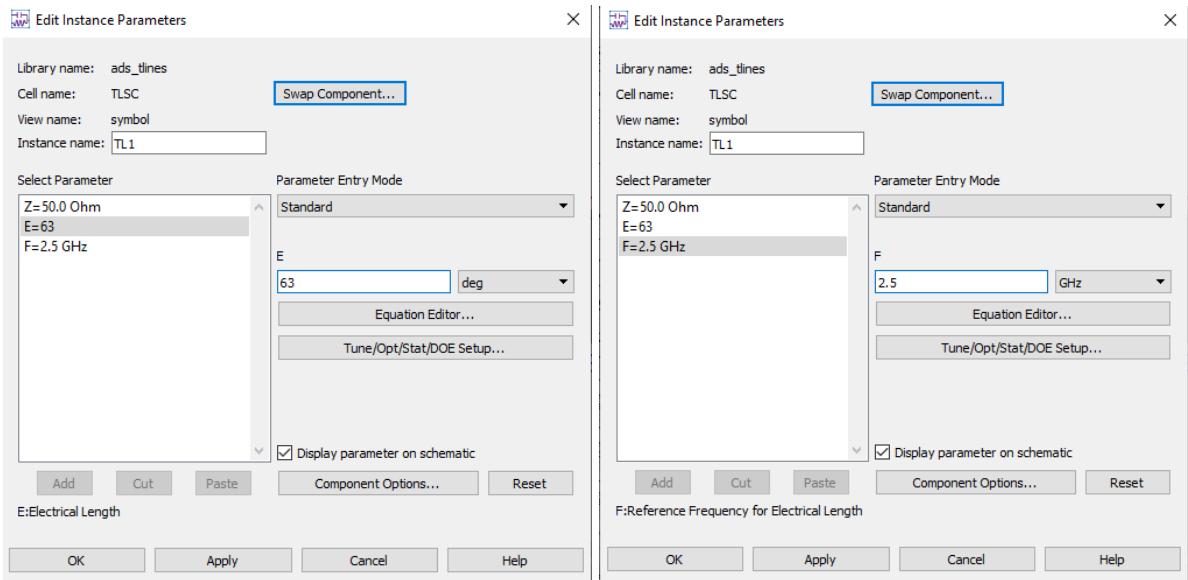
- Одна или несколько темно-синих строк («Num=2» и «Z=50 Ohm») – это вынесенные для отображения в схеме параметры компонента.

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.

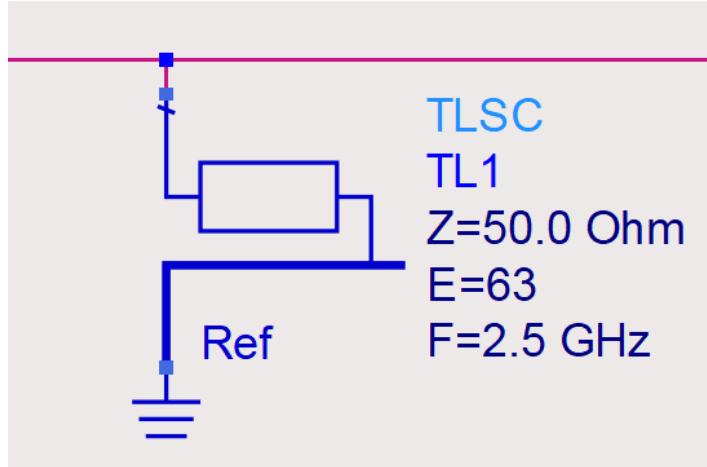


При выборе параметра в нижней части появляется строка-подсказка, что это за параметр; в поле справа от значения можно выбрать единицу; галочка «Display parameter on schematic» управляет отображением параметра под символом компонента в схеме; по кнопке «Equation Editor» параметру можно присвоить специальное 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.

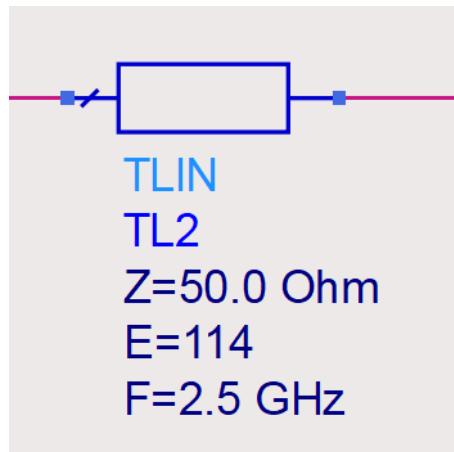


При заполнении параметров надо внимательно следить, чтобы был использован правильный десятичный разделитель (точка, а не запятая), не было никаких лишних или неанглийских символов, были использованы правильные скобки и пр.

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

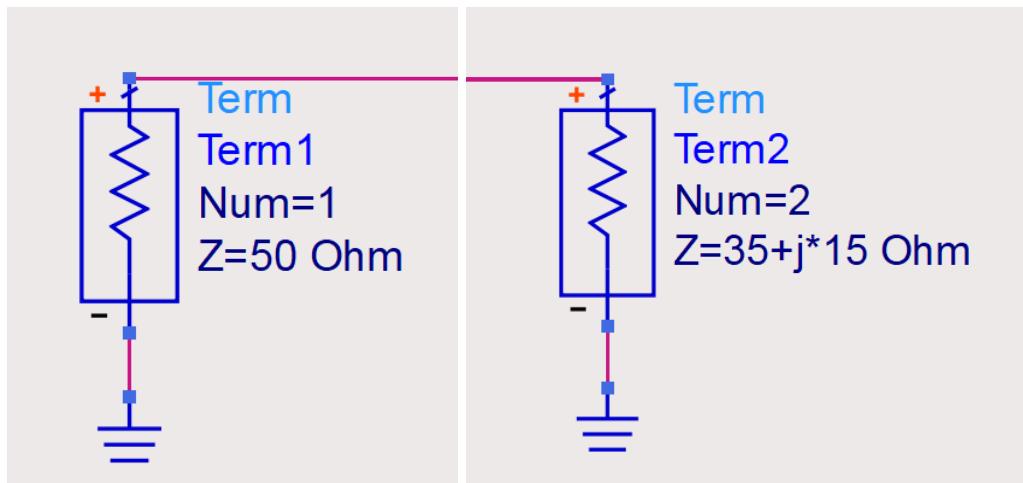


Линии передачи TL2 установим волновое сопротивление $Z = 50 \text{ Ohm}$, электрическую длину ($E = 114$), референсную частоту ($F = 2.5 \text{ GHz}$).



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

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

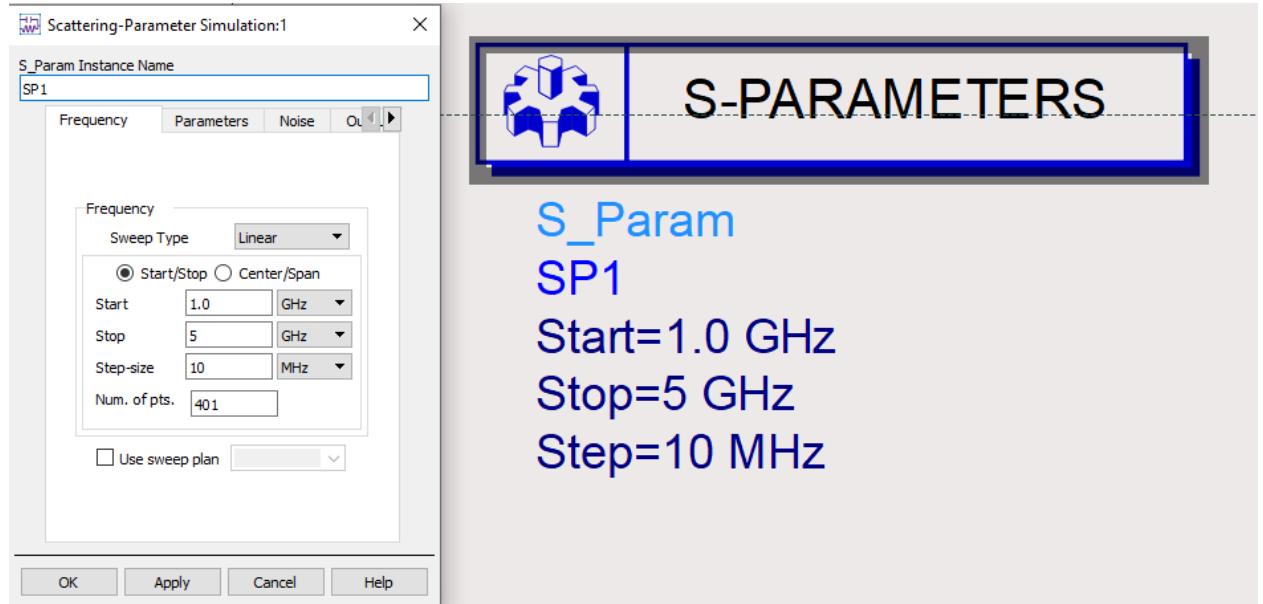
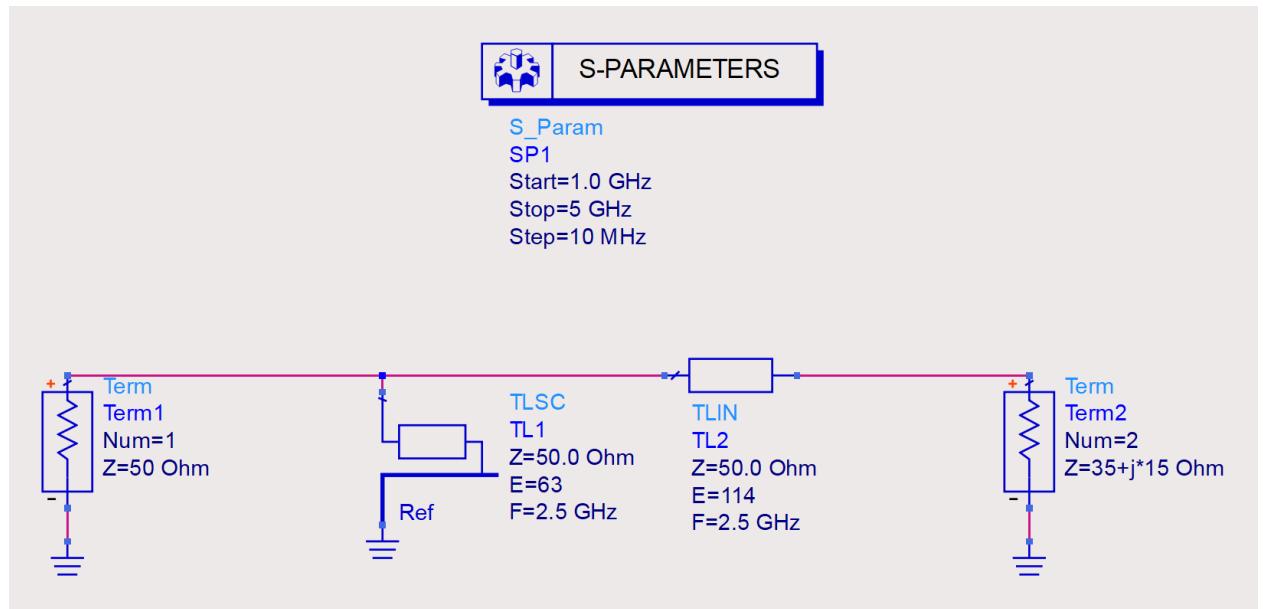
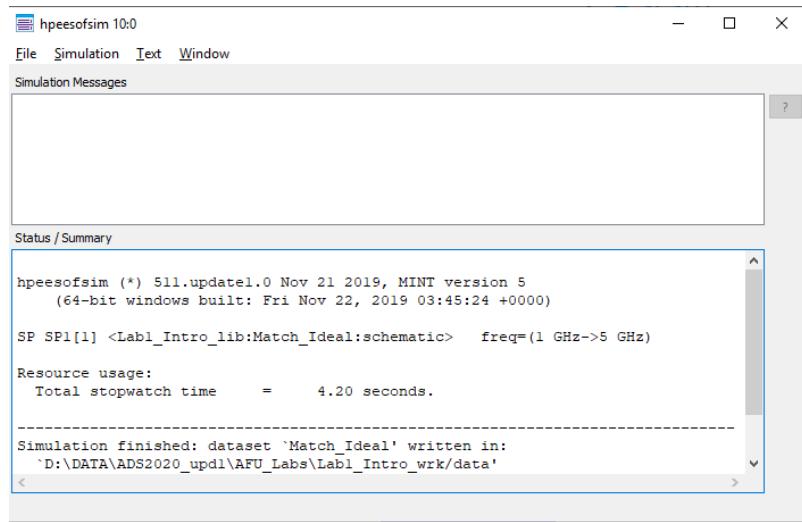


Схема для моделирования собрана. В общем виде она должна выглядеть следующим образом.



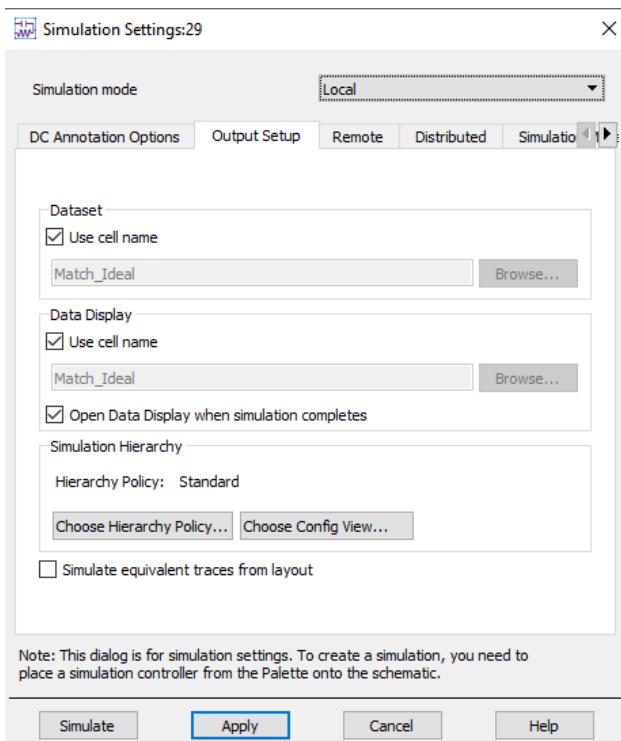
Запуск моделирования из схемы осуществляется по команде Simulate – (клавиша «F7»).

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



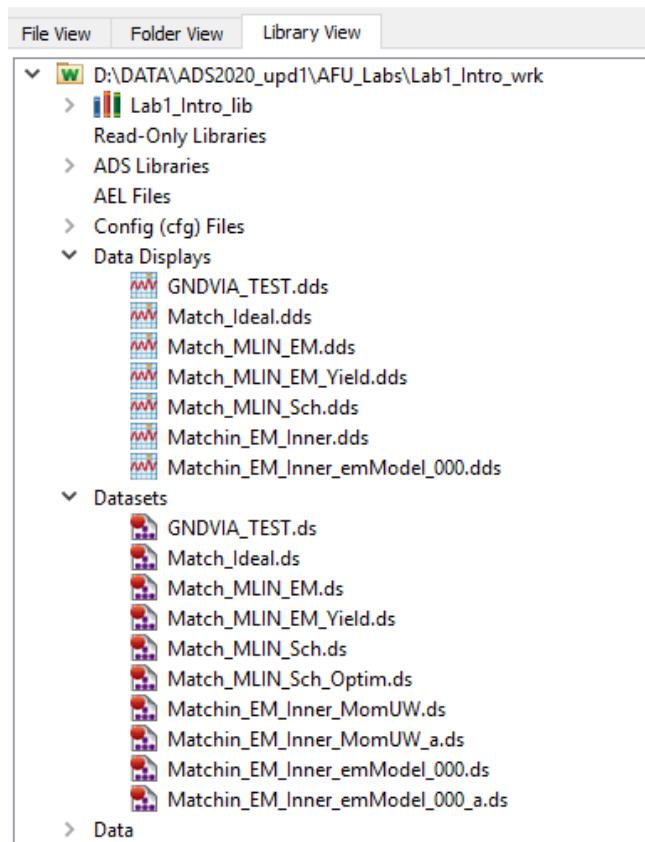
В ADS при настройках симуляции умолчанию контроллер симуляции после расчета создает результат расчета (датасет, файл с расширением *.ds) и автоматически открывается окно графиков (файл с расширением *.dds) с привязанным базовым датасетом. Все они имеют одинаковое имя, по имени ячейки.

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.

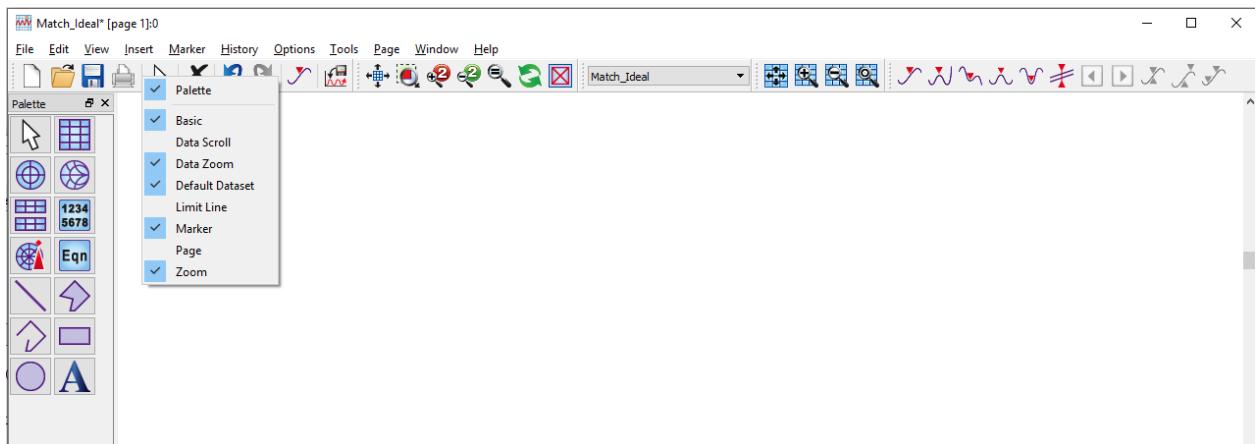


Все созданные в текущем проекте датасеты и окна графиков можно увидеть в основном окне ADS в режиме отображения Library View в списках

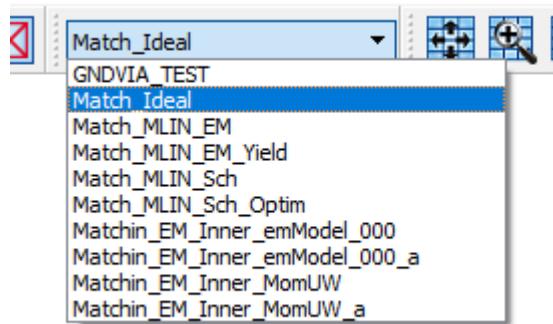
Datasets и Data Displays. Физически файлы датасеты хранятся в подпапке \data. Файлы окон графиков в корневой папке проекта _wrk.



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 выбирается в выпадающем списке в тулбаре Default Dataset.

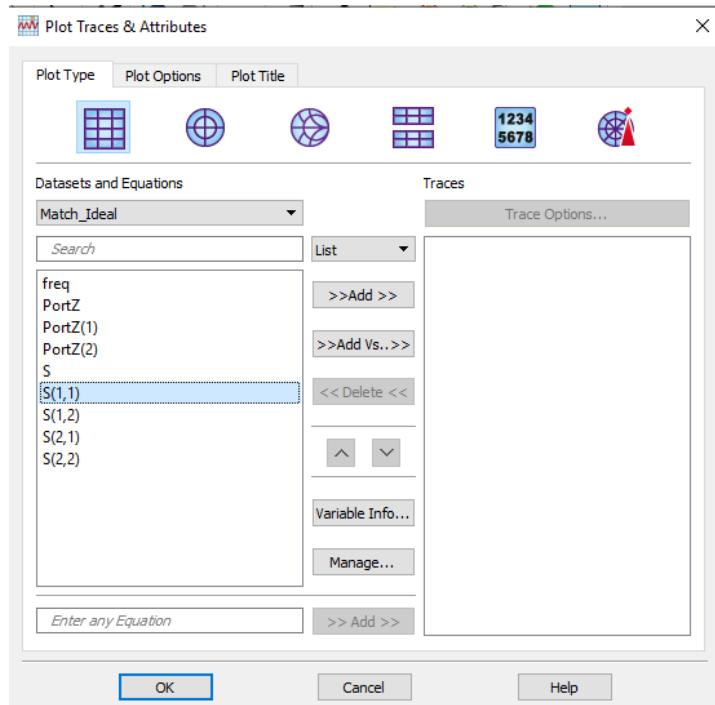


Создадим прямоугольное полотно для графиков, где будут показаны амплитуды коэффициента отражения по входу и коэффициента передачи (в дБ) в зависимости от частоты. Полотно графика создаются из боковой панели



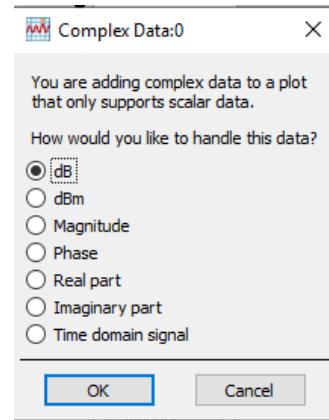
Palette. Для прямоугольного полотна это

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.

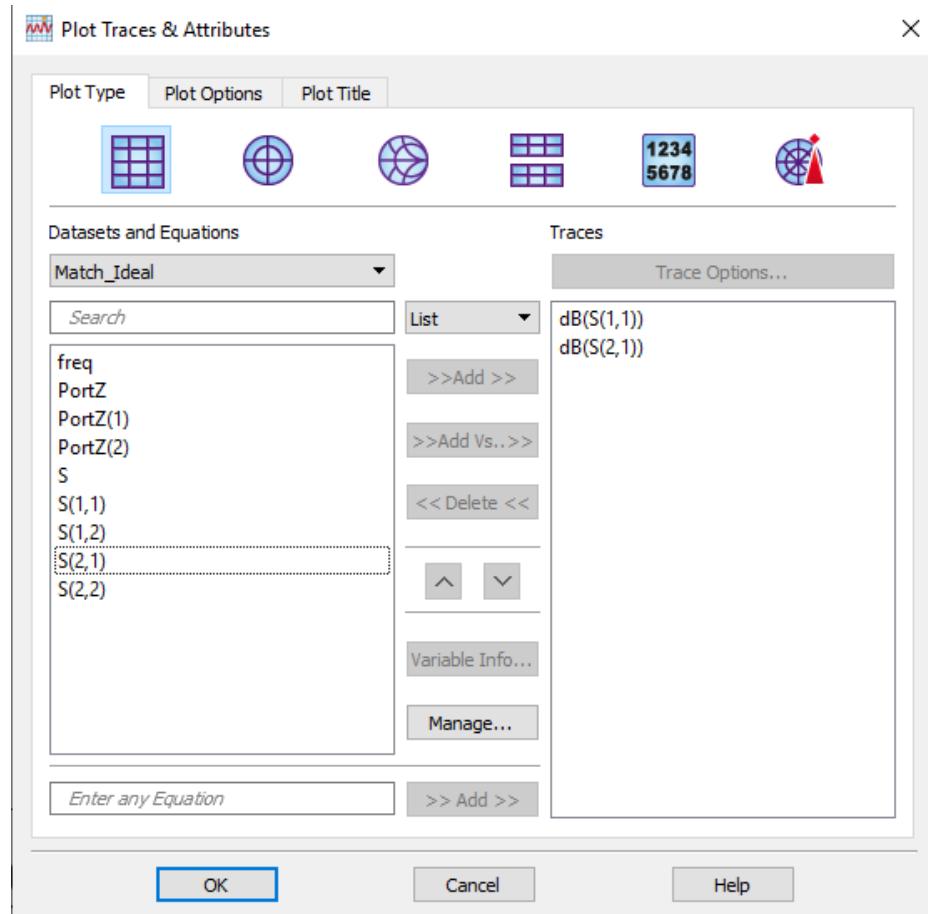


Для входного коэффициента отражения нужно выбрать результат «S(1,1)» нажать кнопку «>>Add>>» (или ДЛКМ по результату). Т.к. S(1,1) – это комплексные данные, то будет предложено несколько вариантов

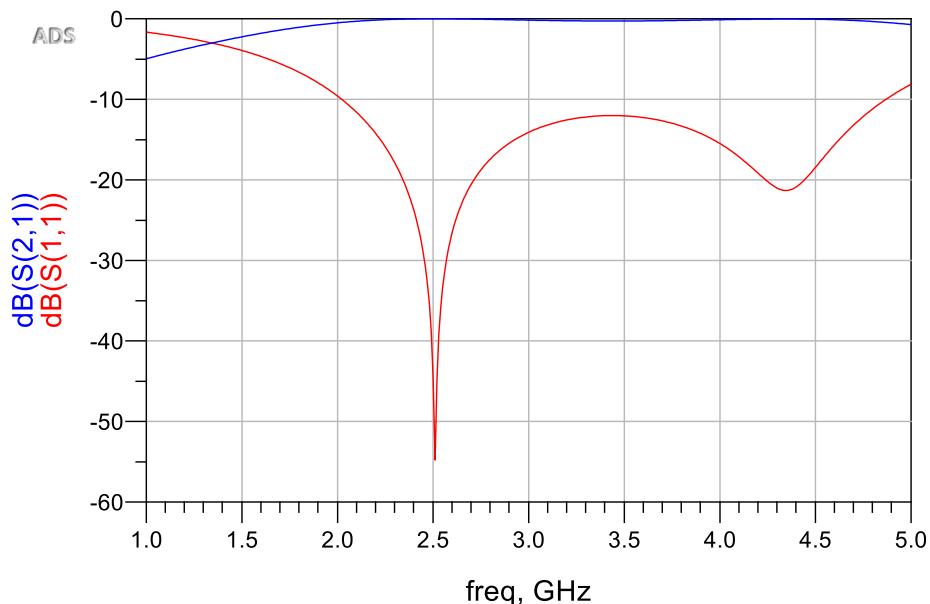
преобразования для отображения на прямоугольном полотне. Нас интересует амплитуда в логарифмическом масштабе, выбираем преобразование «dB».



В правой части в списке «Traces» появится выражение «dB(S(1,1))». Аналогично сделаем для «S(2,1)».

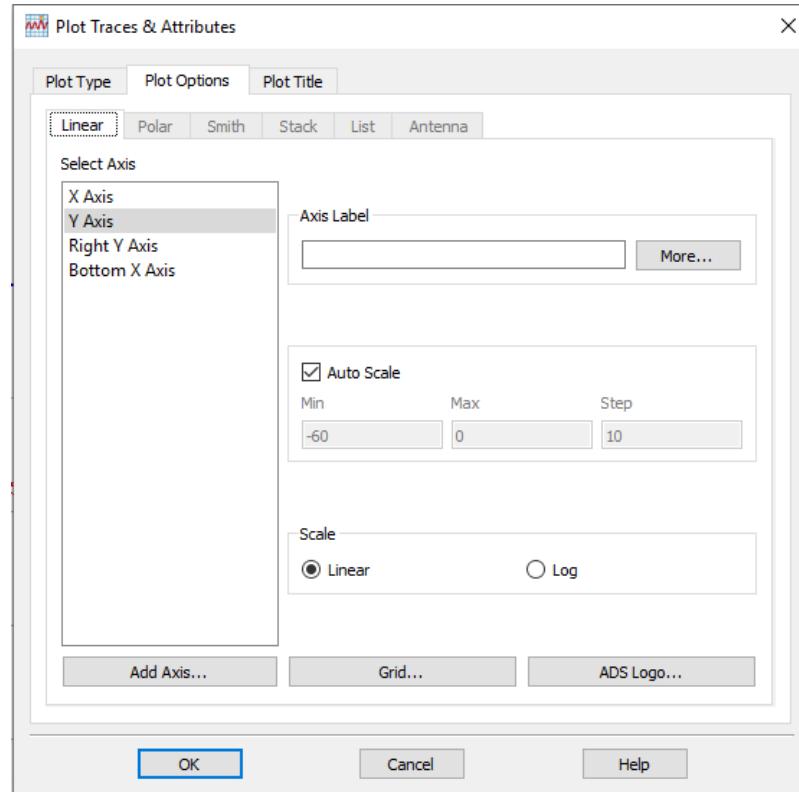


После нажатия на «OK» появился прямоугольное полотно графиков.



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.).



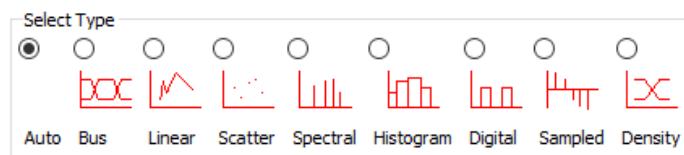
На вкладке Plot Title можно задать подпись всему графику.

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

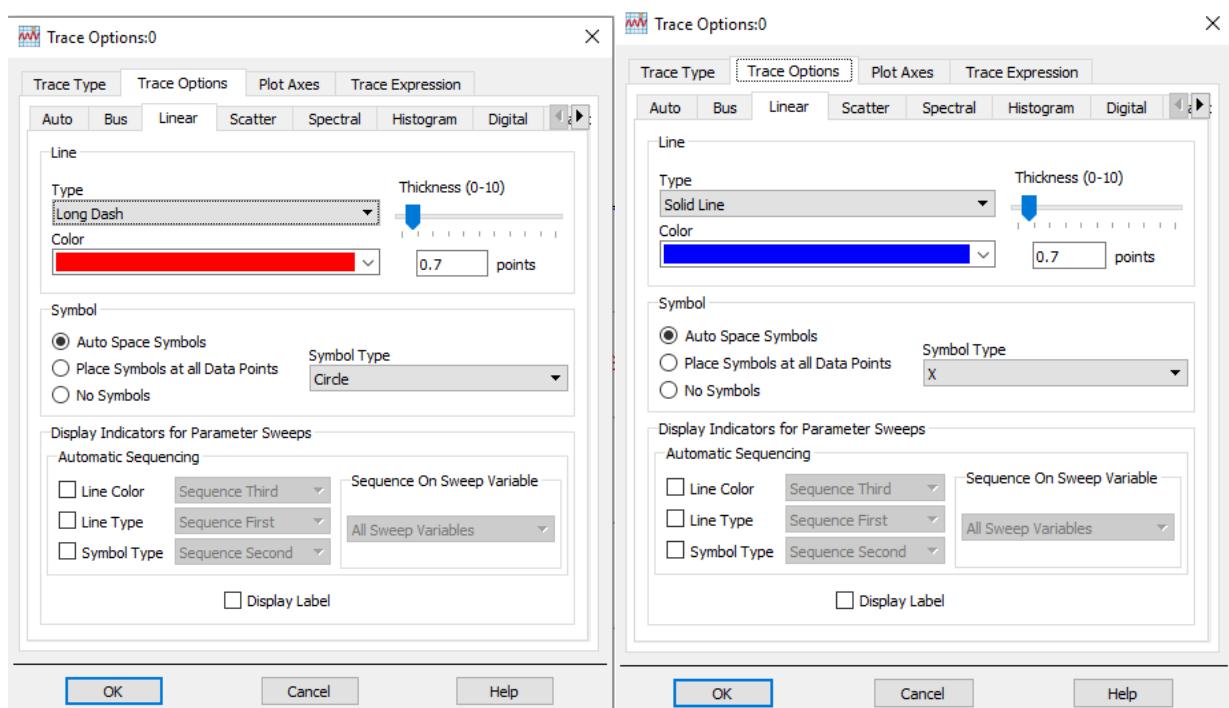


Настройки отдельных графиков осуществляются по кнопке Trace Options при выбранном графике в списке Traces (или ДЛКМ по выражению в или ДЛКМ точно по линии или заголовку графика в полотне графиков).

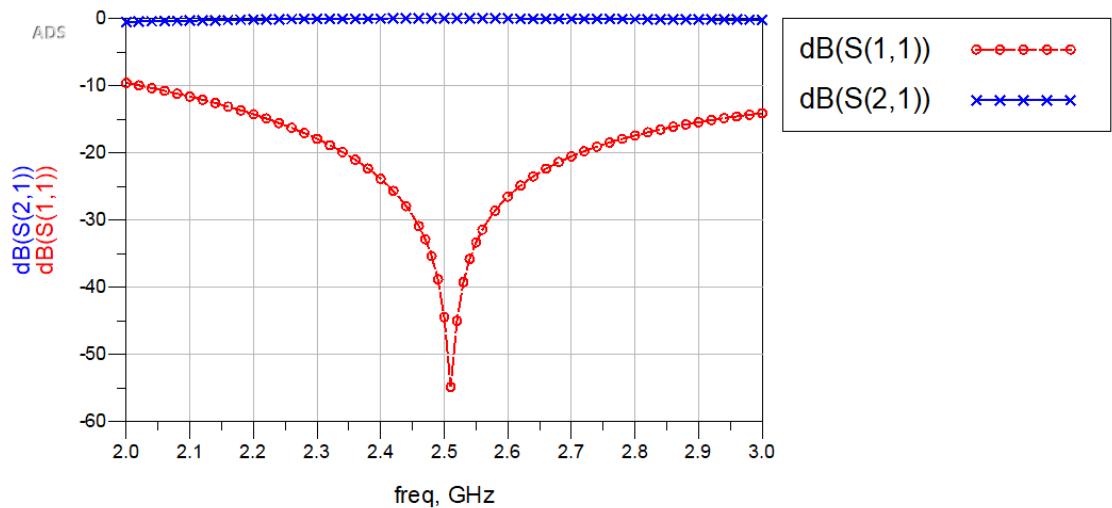
Графикам в зависимости от стиля полотна можно назначать допустимые виды (линии, точки, спектральный, гистограмма и пр.). Определяется на вкладке Trace Type.



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.

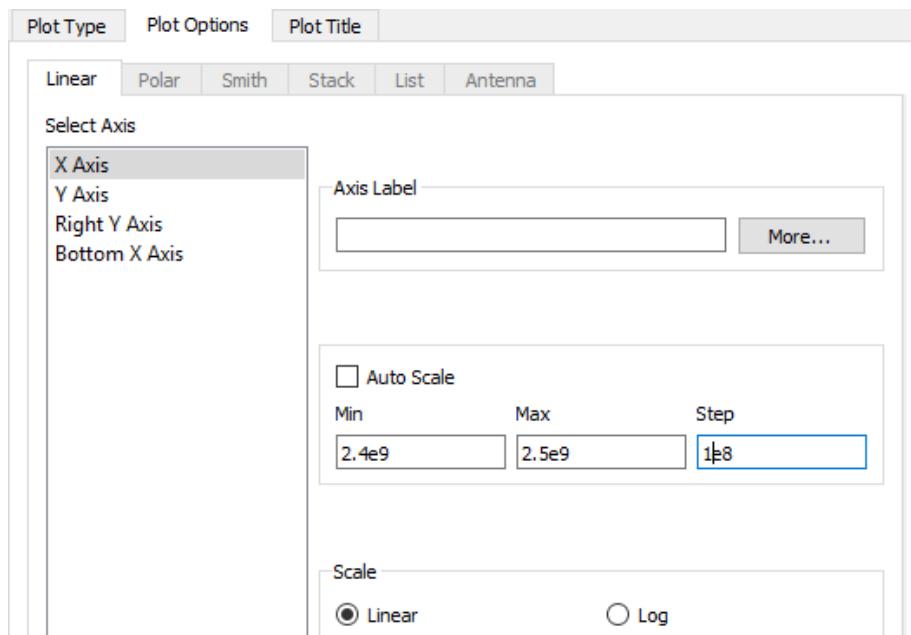


Для отображения легенды в отдельном окне нужно в свободном месте полотна ПКМ – Insert Legend.

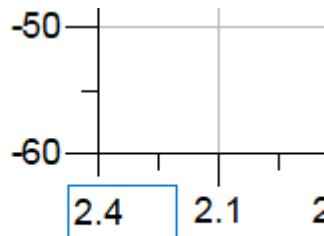


Управлять диапазонами осей можно несколькими путями:

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).

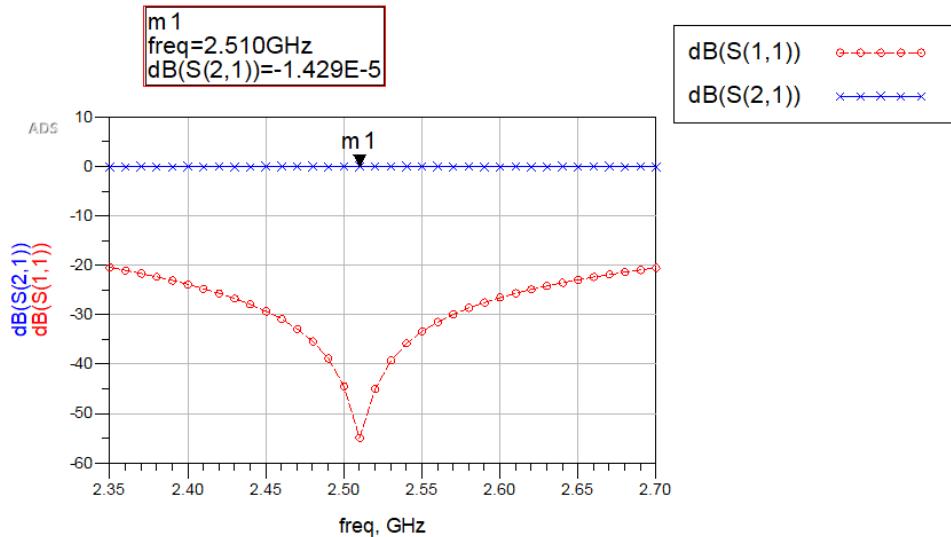


3. С помощью команд меню View – Zoom Data. Они же расположены в тулбаре Data Zoom.



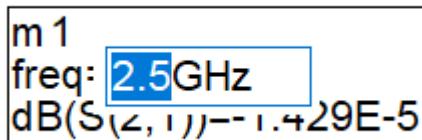
Для чтения данных с графика используются маркеры. Маркеры ставятся по команде Marker – New (Ctrl+M) или по команде Insert A New Marker  из тулбара Marker.

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

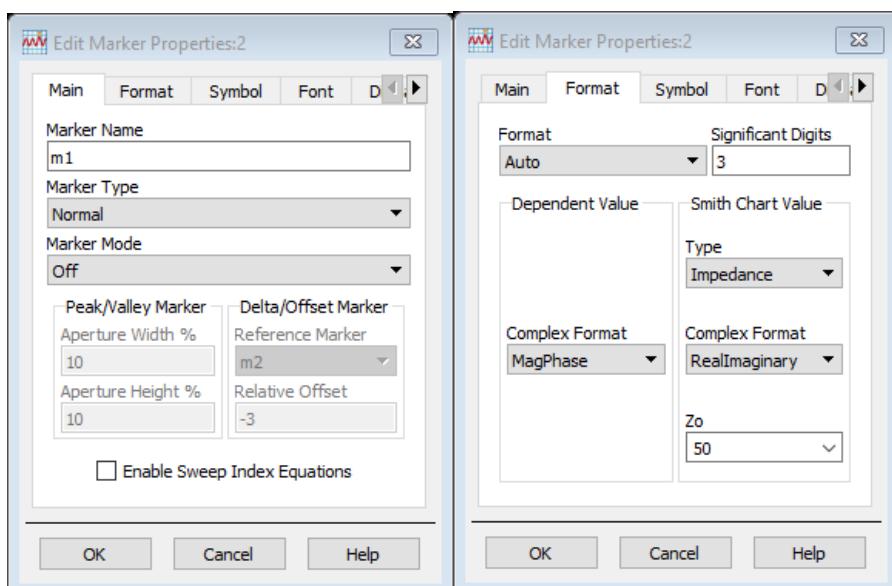


Маркер можно двигать как мышкой, так и по клавишам «Влево/Вправо», а также по командам  из тулбара Marker. Маркер двигается только по точкам, существующим в датасете (пропуская промежуточные интерполированные для непрерывного отображения участки).

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



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.).

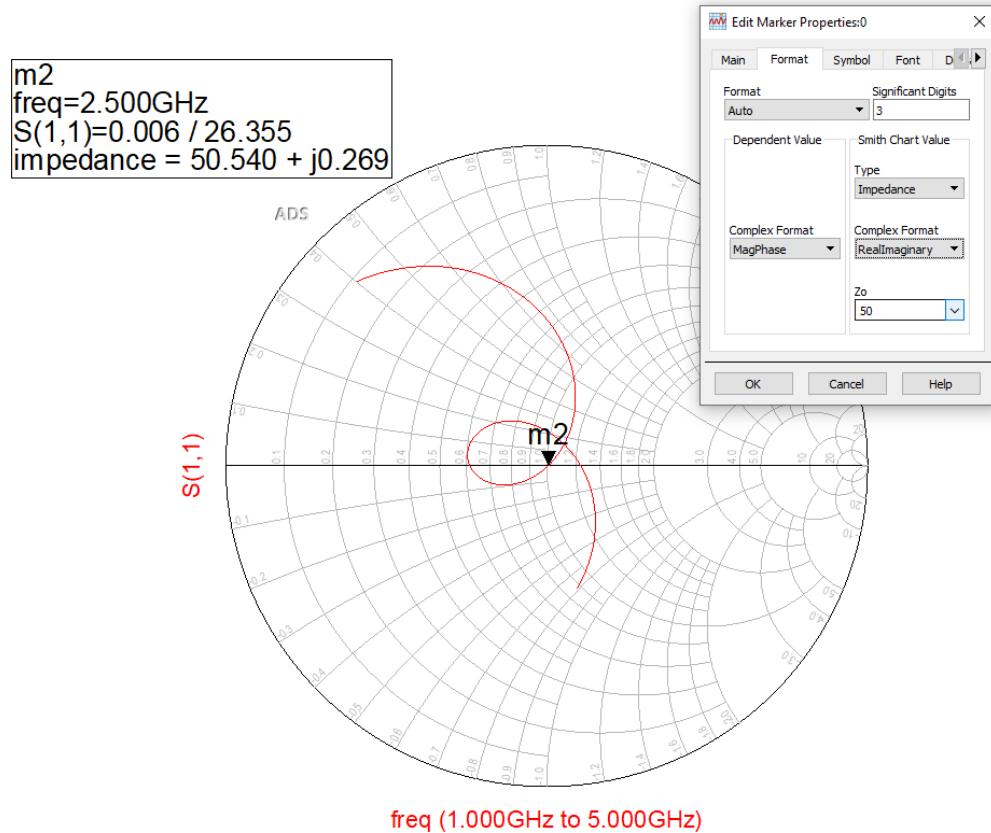


На вкладке Format определяется формат отображения чисел (число знаков после запятой, стиль отображения мантиссы и пр.), в том числе комплексных чисел (амплитуда/фаза в градусах, амплитуда/фаза в радианах, действительная/мнимая часть и пр.) и связанных данных на диаграмме Смита.



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.

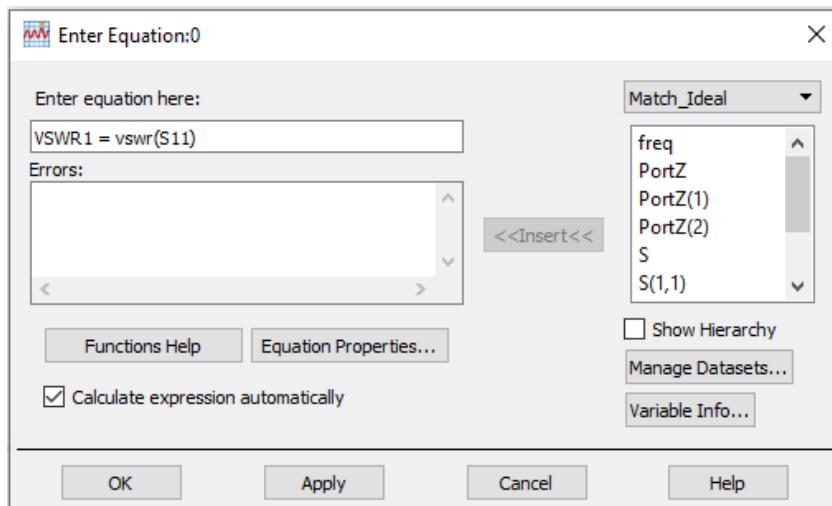
Поставим маркер на частоту 2,5ГГц и настроим его так, чтобы отображался ненормированный импеданс относительно 50Ом.



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 $S(1,1)$):

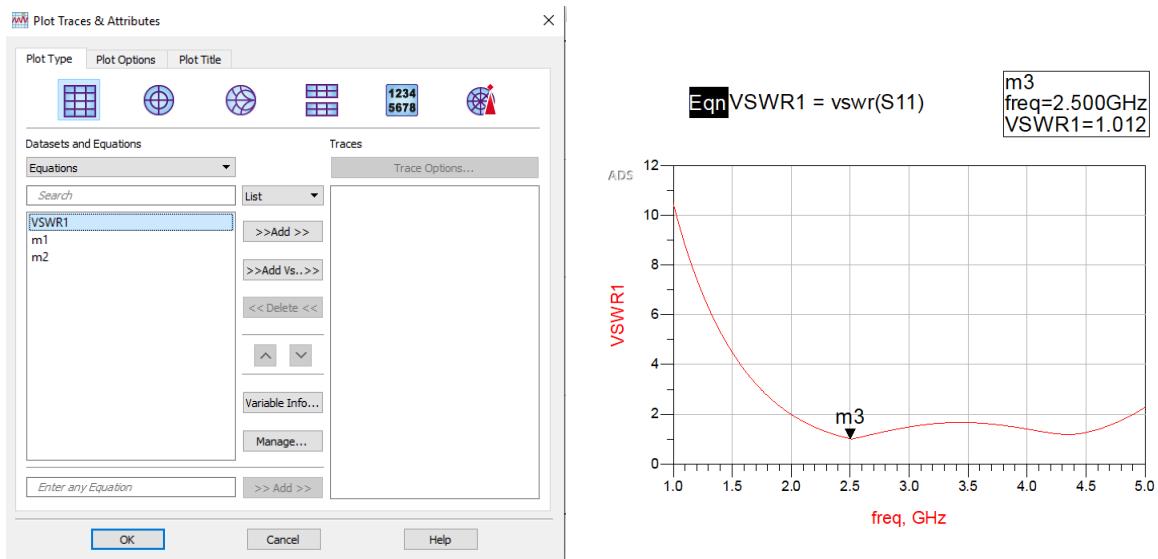


В данном окне показываются найденные ошибки при наборе выражений, а также информации о доступных существующих переменных и

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.

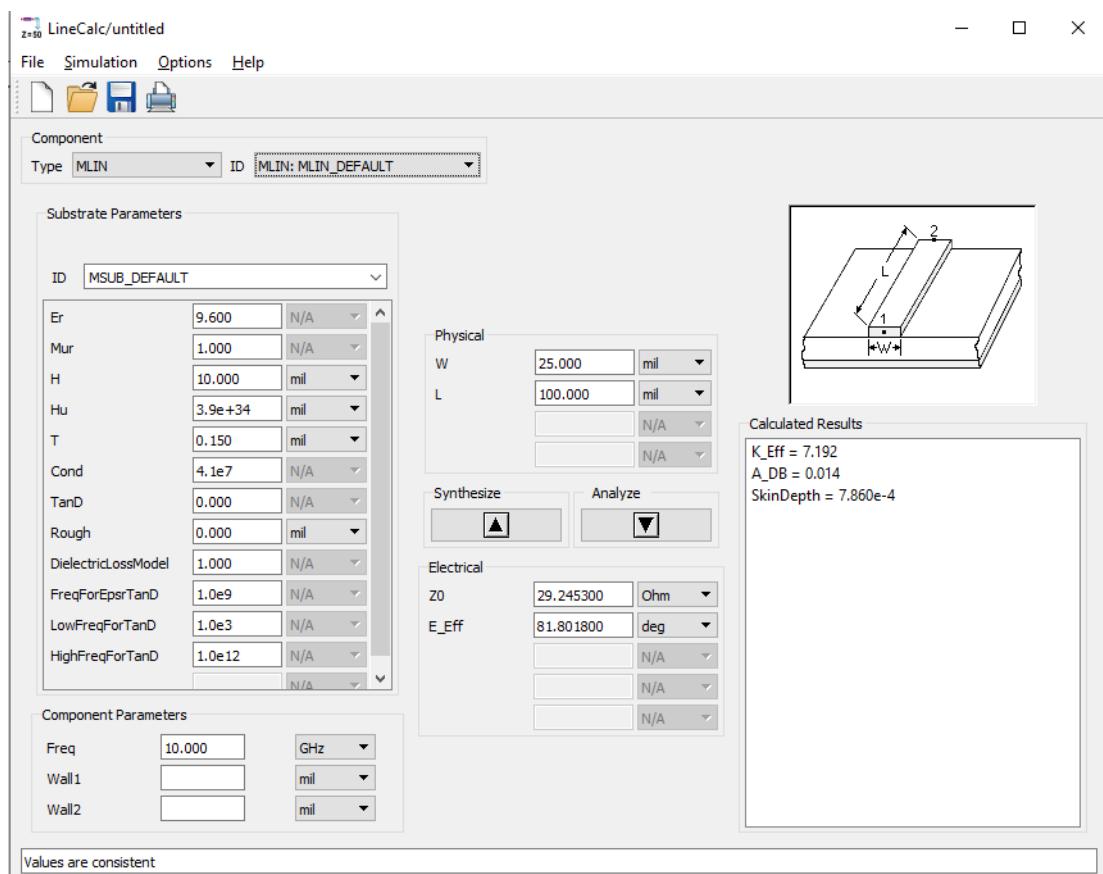
Модель на схемном уровне в микрополосковом исполнении

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

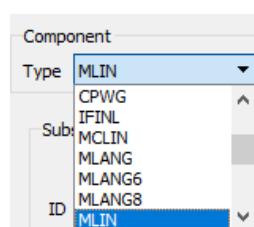
Создаем новую ячейку Match_MLIN_Sch со схемой.

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 .

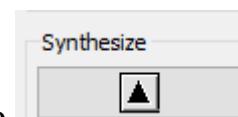


В открывшемся окне нужно сначала выбрать тип линии передачи. Микрополосковая линия имеет обозначение MLIN (выбор в списке Component - Type).

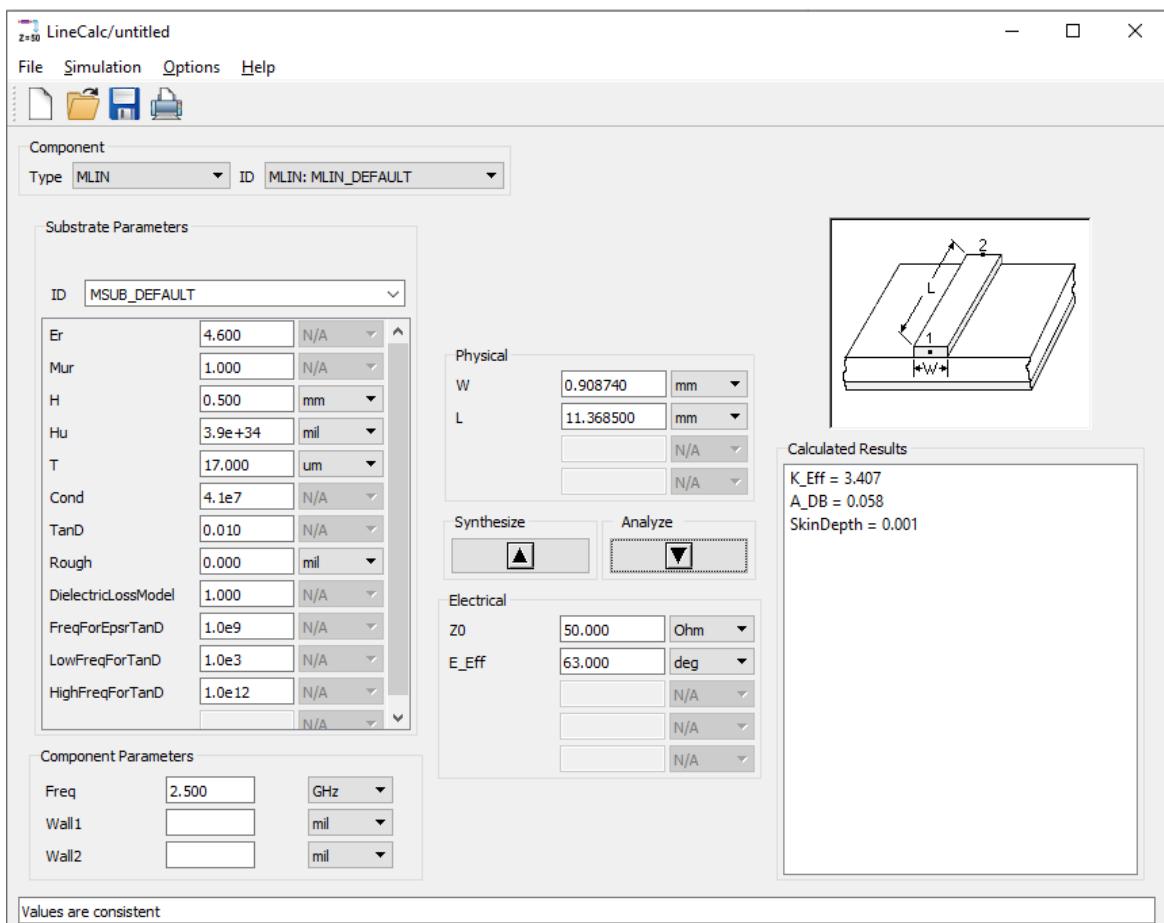


Затем нужно внести геометрические размеры и электрические параметры (показаны измененные относительно по умолчанию):

- 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 $W = 0,9\text{мм}$, $L = 11,4\text{мм}$. Для последовательного участка $W = 0,9\text{мм}$, $L = 20,6\text{мм}$.



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° 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

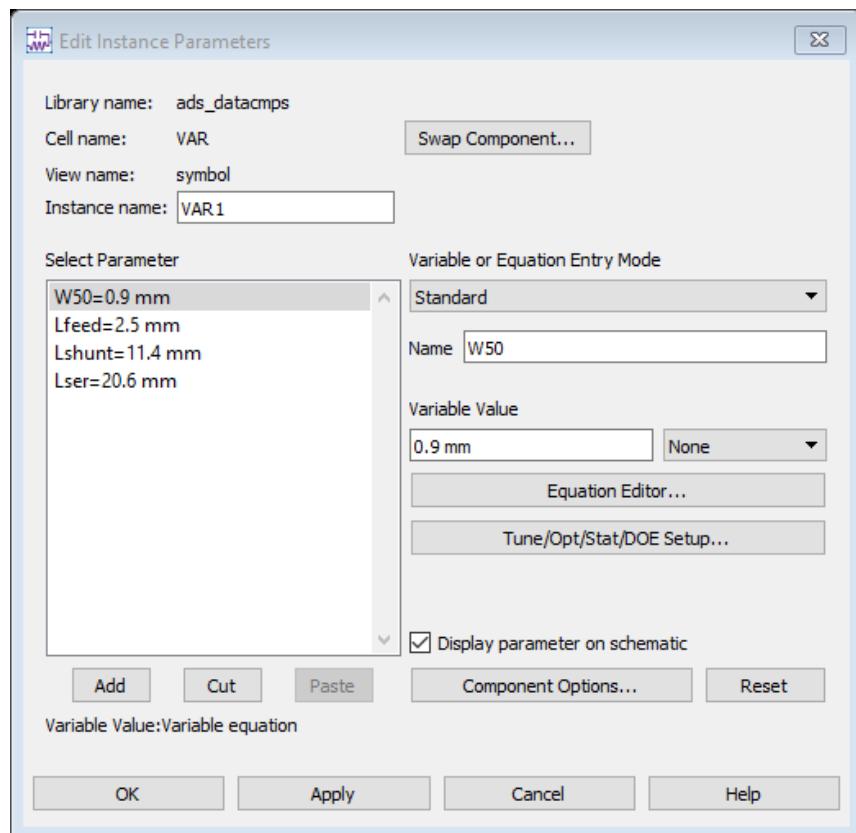
схему ставятся по команде Insert – VAR

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

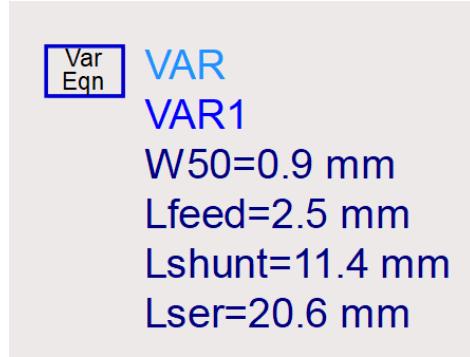
Находясь внутри блока переменных, переменные можно добавлять, заполнив поля Name и Value, и нажав Add.



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

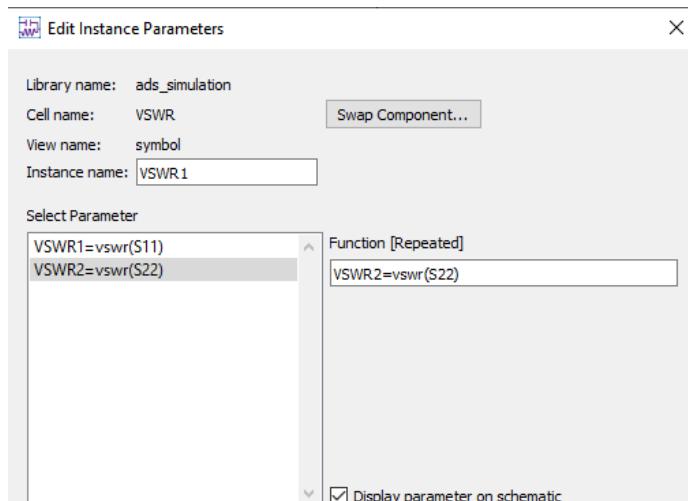
этой переменной в блоках нужно удалять множители единиц. При задании использования переменных в блоках ADS воспринимает единицы как множители относительно СИ (при настройках по умолчанию, за исключением базовой единицы длины, которая определяется настройками библиотеки). Т.е. если есть переменная «Lser = 5.5 mm», и она использована в каком-то блоке как «L = Lser mm», то присвоенная длина будет иметь значение $5,5 \times 10^{-6} = 5,5$ мкм.

Заполненный блок VAR со стороны схемы выглядит так



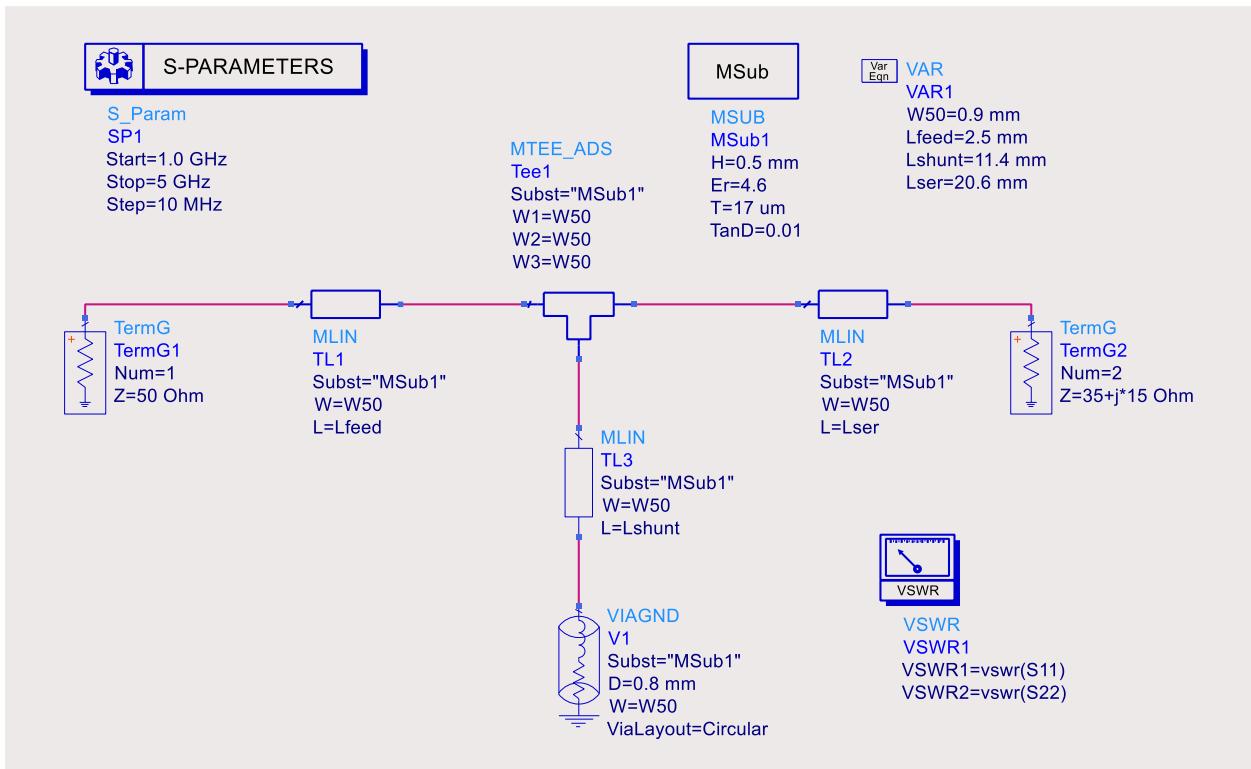
Заполним остальную часть схемы с использованием перечисленных выше компонентов.

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).

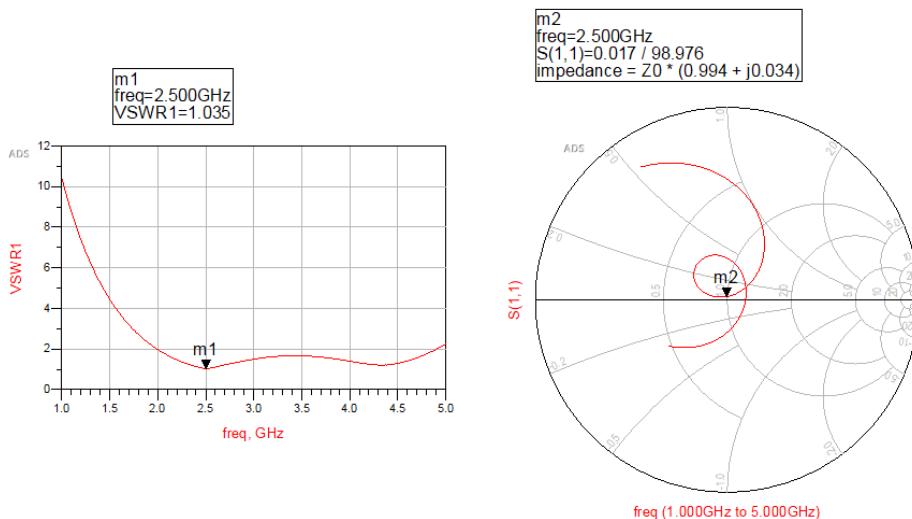


Модель отверстия возьмем VIAGND, с заполнением металлом столбика (параметр ViaLayout = Circular) и диаметром отверстия (параметр D) ~50..80% от W50 (в примере 0,8 мм).

Общая схема будет выглядеть, как показано ниже.



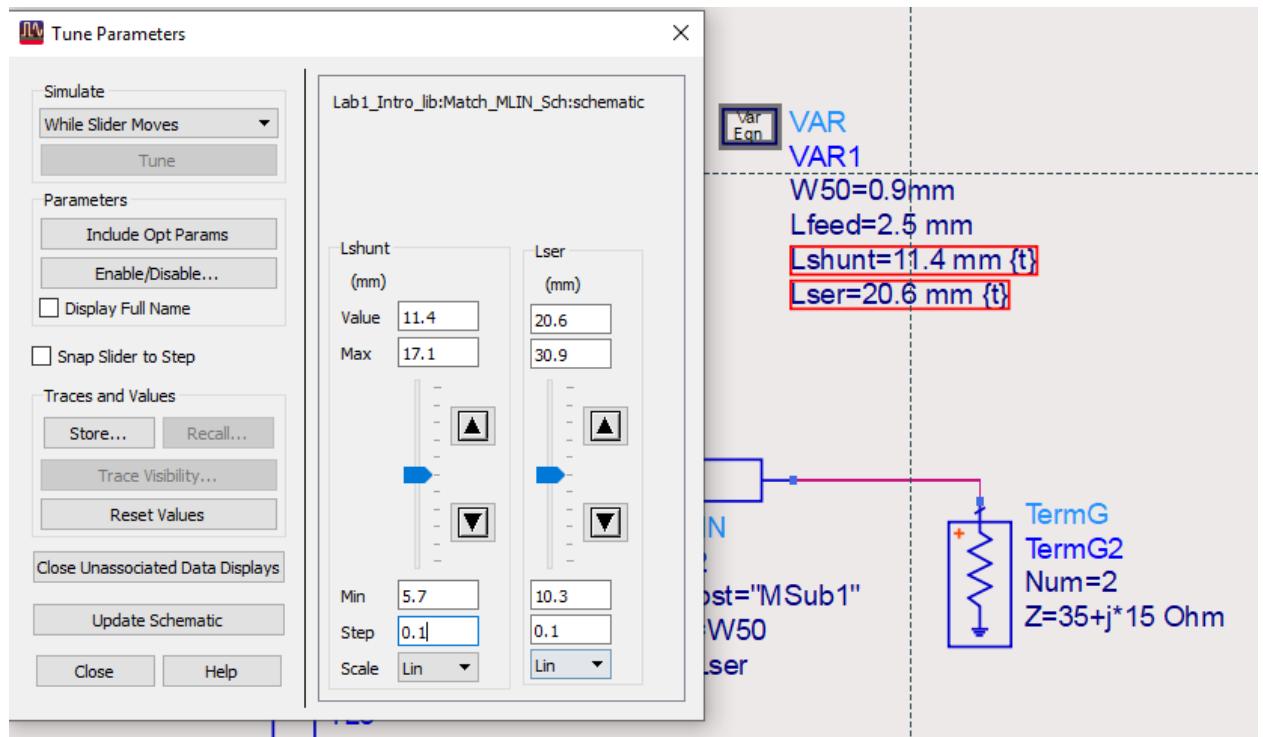
Запускаем расчет и строим графики.



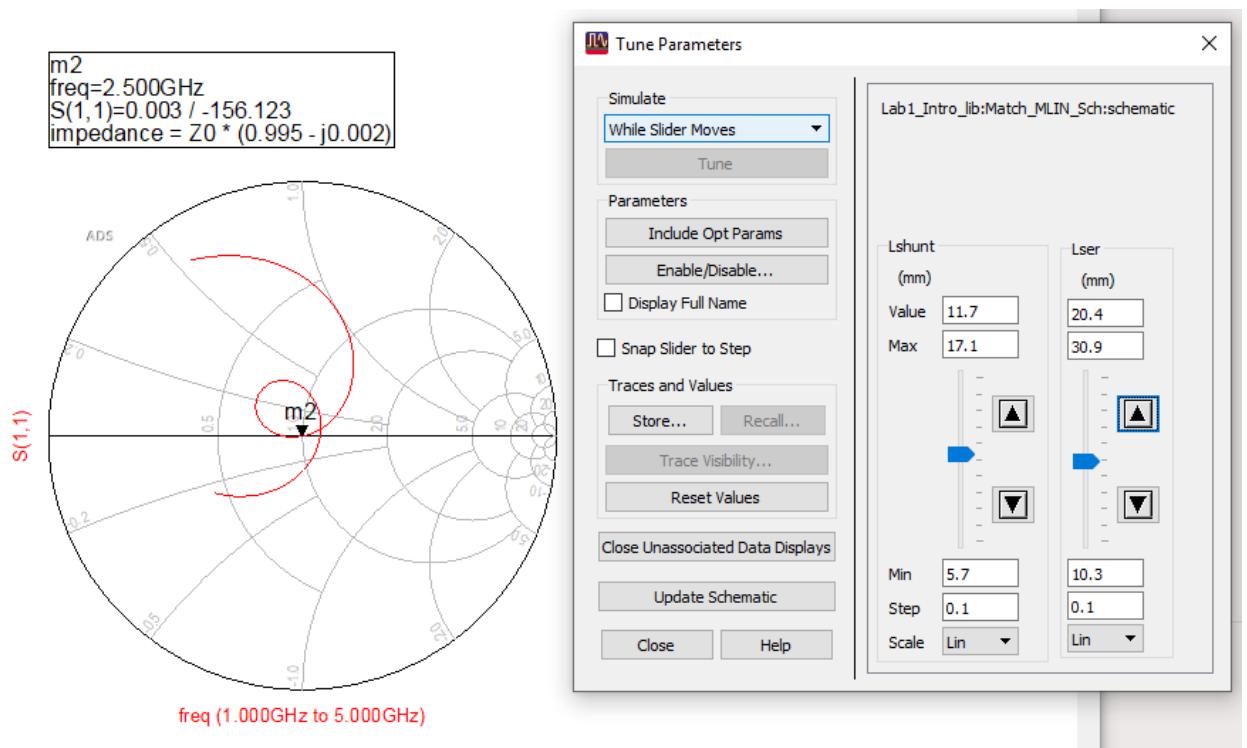
Видно, что на заданной частоте КСВН близко к 1 и S11 практически в центре. Для того, чтобы окончательно довести согласование на частоте 2,5ГГц до идеала, воспользуемся инструментом Tune (Simulate – Tuning). Откроется окно управления Tune.

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}.



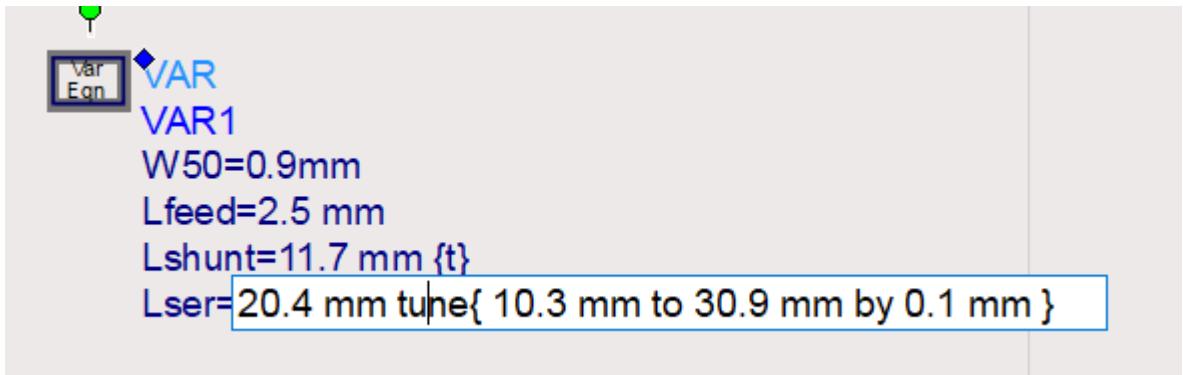
Выставим им шаг на изменение 0,1мм, и двигая по слайдеру (или щелкая по и), подберем такие значения Lshunt и Lser, чтобы согласование стало идеальным.



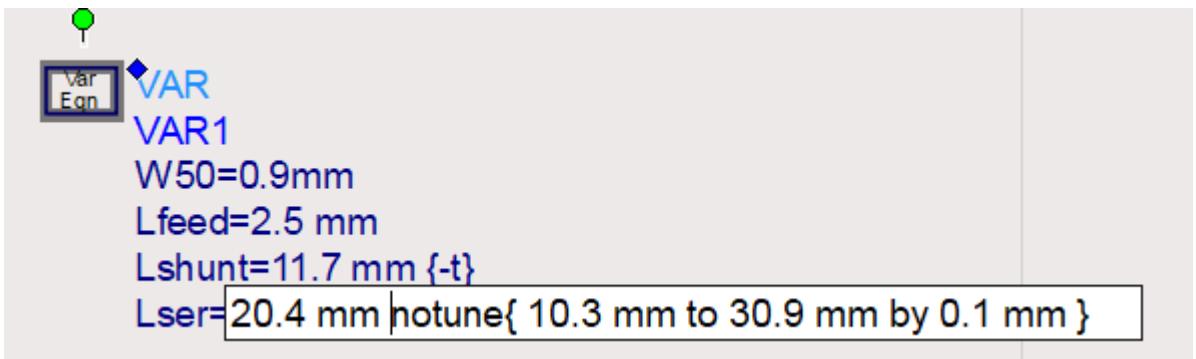
По окончании тюна, нужно обязательно нажать на кнопку Update Schematic, чтобы подобранные значения сохранились в схеме.

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 своем значении суффикс {t}. При щелчке по значению переменной суффикс {t} раскроется в полную строку tune{10.3 mm to 30.9 mm by 0.1 mm}. Это обозначение того, что переменная 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.

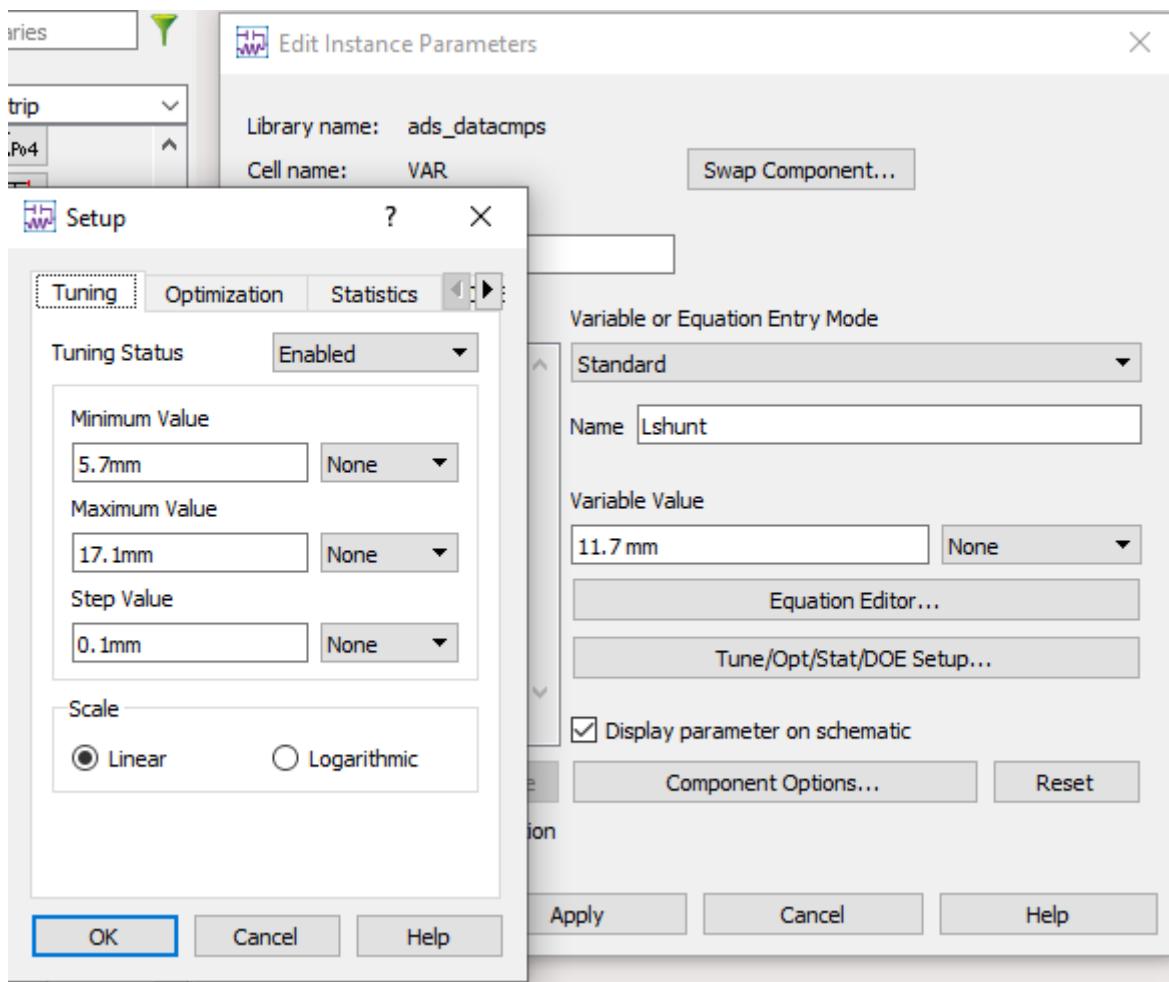


Если настройки диапазона тюна для переменной желательно сохранить, но следующий тюн ее использовать не должен, то в строке достаточно заменить tune на notune. В кратком отображении это выглядит как {-t}.



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



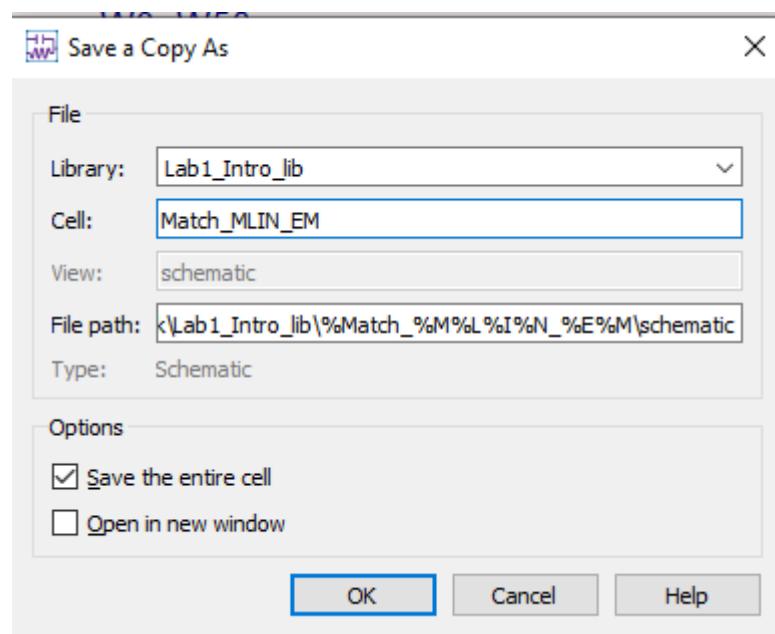
Также есть отдельное окно (Simulate – Simulation Variables Setup), где можно централизовано управлять переменными всей схемы (включая подсхемы).

Simulation Variables Setup [Lab1_Intro.Lib:Match_MLIN_Sch:schematic]												
Name	Tune	Value	Unit	Format	Min/+/-/+	Unit	Max	Unit	Step	Unit		
Wall2	<input type="checkbox"/>	2.5e+28	mm	linear								
V1												
D	<input type="checkbox"/>	0.8	mm	linear								
T	<input type="checkbox"/>	0.00375	mm	linear								
Rho	<input type="checkbox"/>	1.0		linear								
MSub1												
H	<input type="checkbox"/>	0.5	mm	linear								
Er	<input type="checkbox"/>	4.6		linear								
Mur	<input type="checkbox"/>	1		linear								
Cond	<input type="checkbox"/>	1.0E+50		linear								
Hu	<input type="checkbox"/>	1e+33	mm	linear								
T	<input type="checkbox"/>	17	um	linear								
TanD	<input type="checkbox"/>	0.01		linear								
Rough	<input type="checkbox"/>	0	mm	linear								
FreqForEpsrTanD	<input type="checkbox"/>	1.0	GHz	linear								
LowFreqForTanD	<input type="checkbox"/>	1.0	kHz	linear								
HighFreqForTanD	<input type="checkbox"/>	1.0	THz	linear								
VAR1												
W50	<input type="checkbox"/>	0.9mm		linear								
Lfeed	<input type="checkbox"/>	2.5 mm		linear								
Lshunt	<input checked="" type="checkbox"/>	11.7 mm		linear	5.7mm		17.1mm		0.1mm			
Lser	<input type="checkbox"/>	20.4 mm		linear	10.3 mm		30.9 mm		0.1 mm			
TermG1												
Z	<input type="checkbox"/>	50	Ohm	linear								

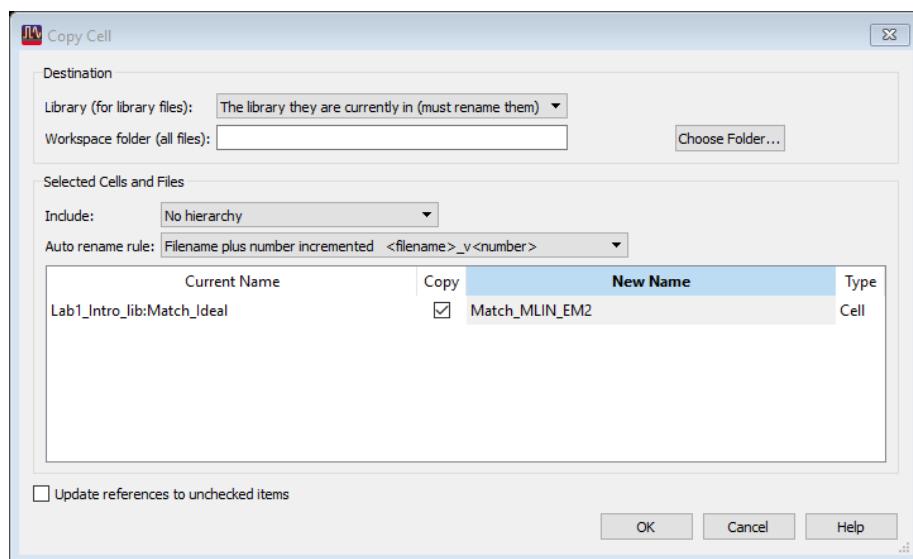
At the bottom, there are checkboxes for 'Show only selected instances' and 'Show variables only', and buttons for 'Unchecked All', 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Модель на топологическом уровне

Следующий этап – сгенерировать топологию на основе схемного представления. Чтобы не испортить существующую схему, скопируем ячейку Match_MLIN_Sch как Match_MLIN_EM (можно по File – Save A Copy As из окна схемы).



Также копии ячеек можно создавать из основного окна ADS по ПКМ - Copy Cell

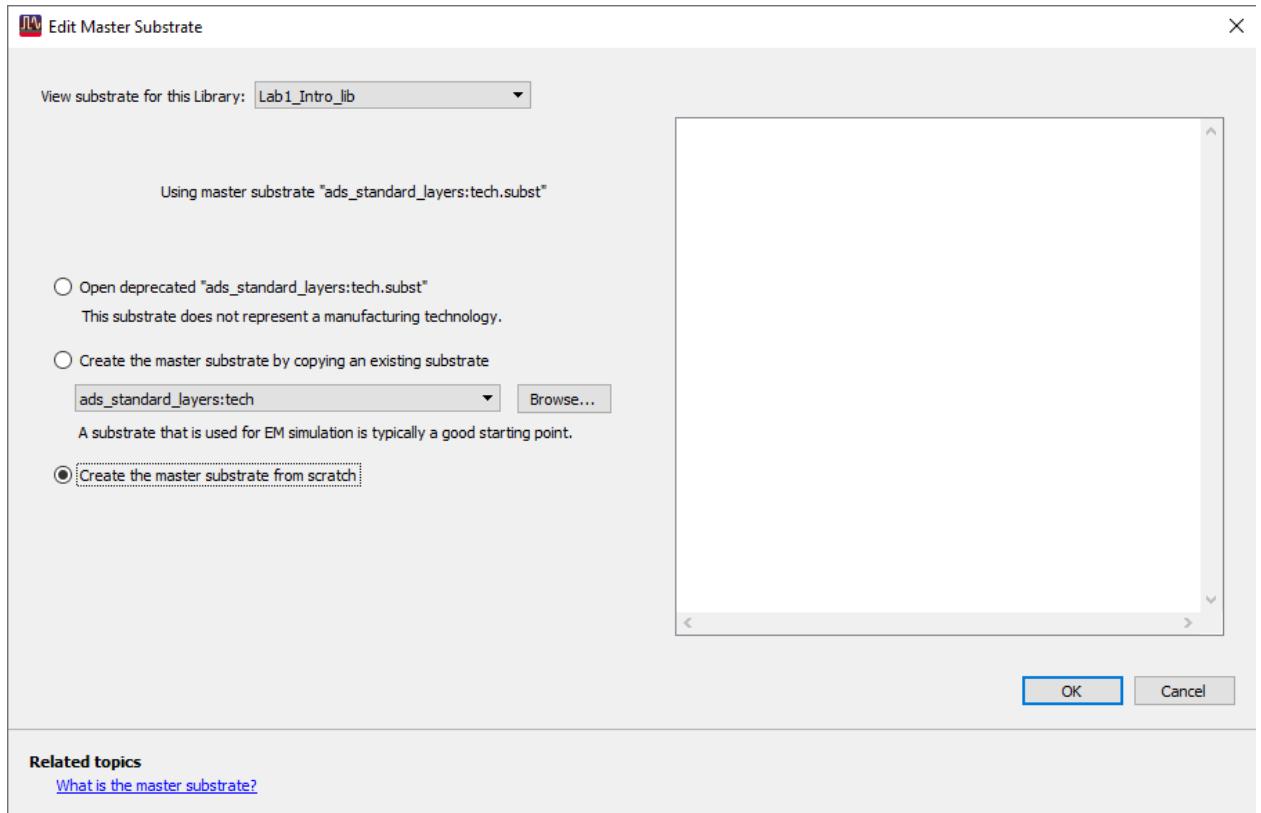


Перед генерацией топологии надо провести несколько дополнительных настроек.

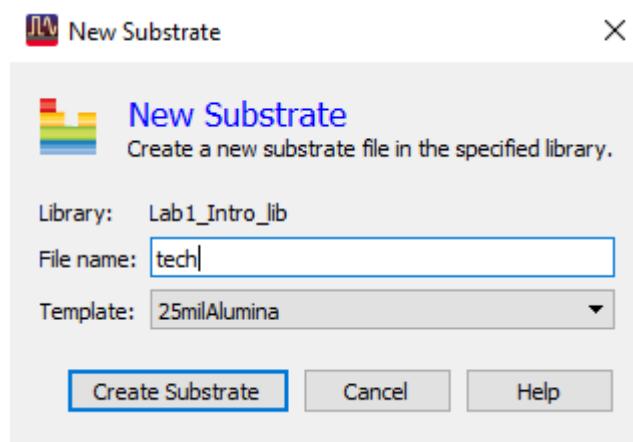
В основном окне нужно создать определение подложки .subst. Создадим технологическое определение подложки tech.subst. Эта подложка

будет использоваться как для EM-моделирования, так и для 3D-визуализации и некоторых продвинутых инструментов.

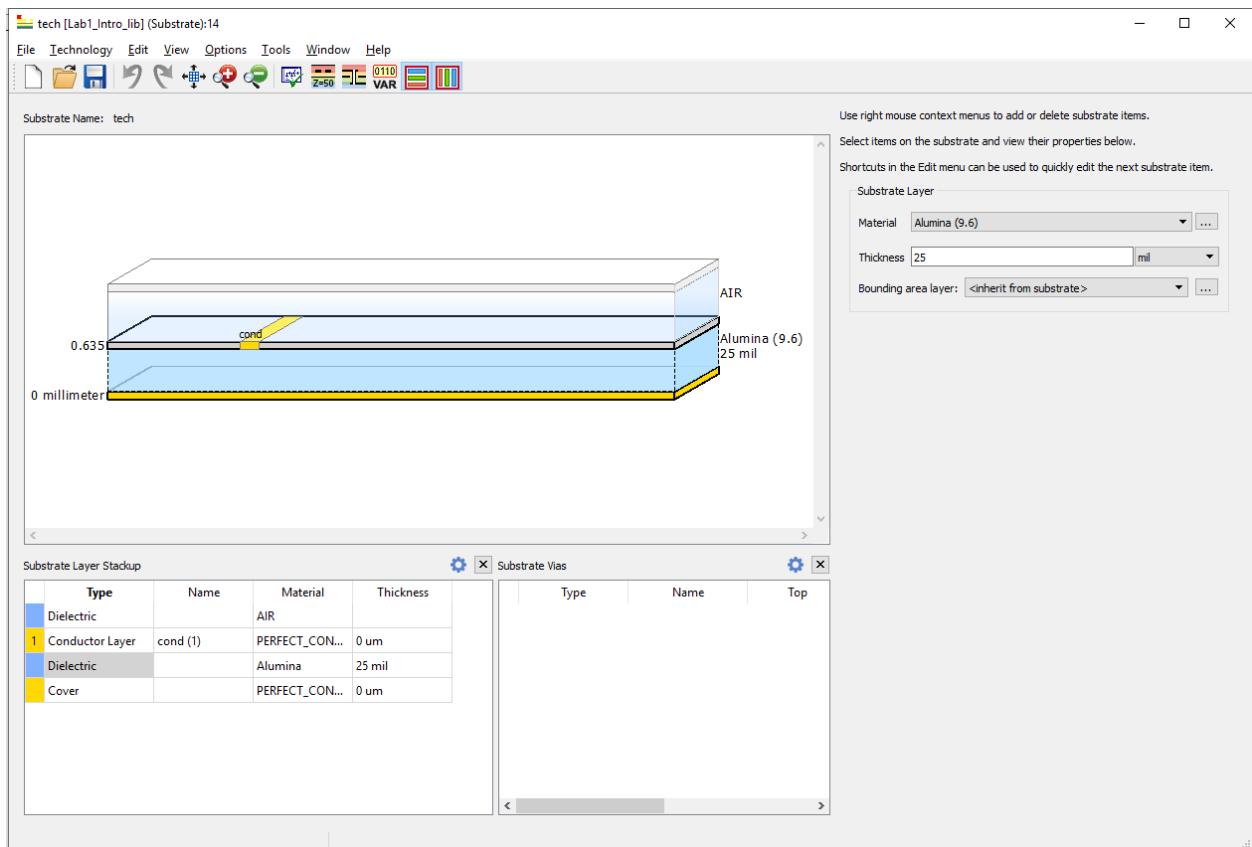
Для этого в основном окне ADS по Options – Technology – Edit Stackup (tech.subst) запускаем мастер создания 3D-подложки.



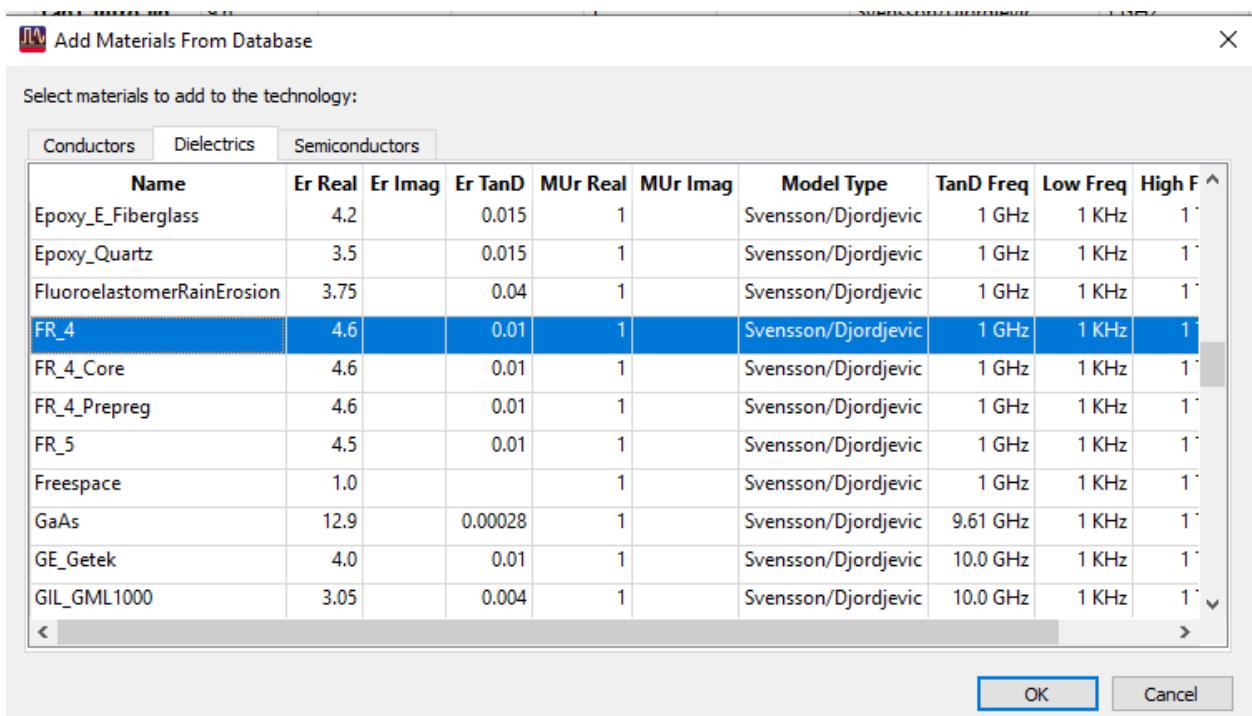
Выбираем Create the master substrate from scratch. В окне New Substrate оставляем имя подложки tech, в качестве шаблона используем 25milAlumina.



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



В основном окне выбираем диэлектрик. В правой части появляется окно его настройки. В списке материалов (Material) по умолчанию 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

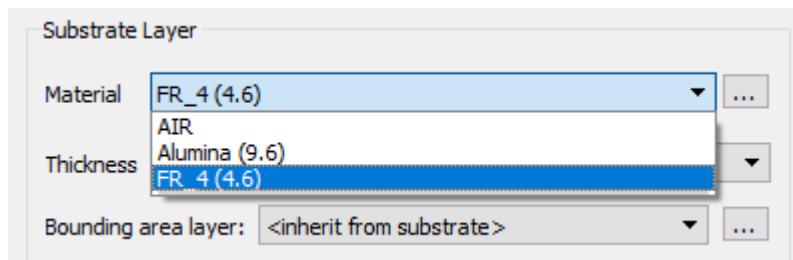
View Technology for this Library: Lab1_Intro.lib

Conductors		Dielectrics		Semiconductors		Surface Roughness							
Material		Permittivity (Er)			Permeability (MuR)			Djordjevic					
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary	Type	TanD Freq	Low Freq	Hi			
Alumina	Lab1_Intro.lib	9.6		1			Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH			
FR_4	Lab1_Intro.lib	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH			

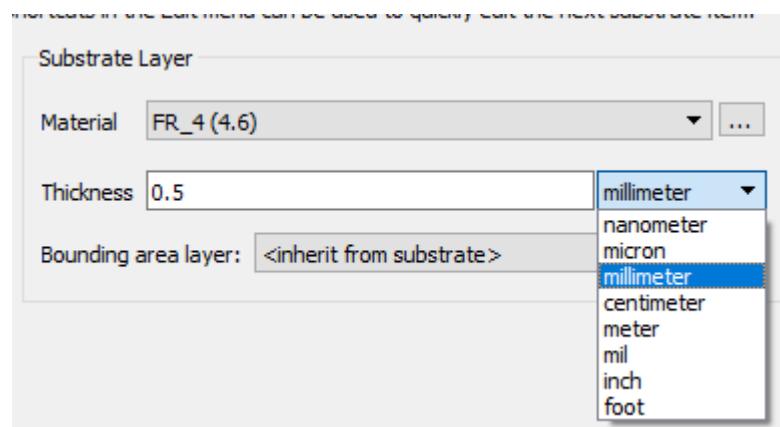
Add Dielectric Add From Database... Remove Dielectric

OK Cancel Apply Help

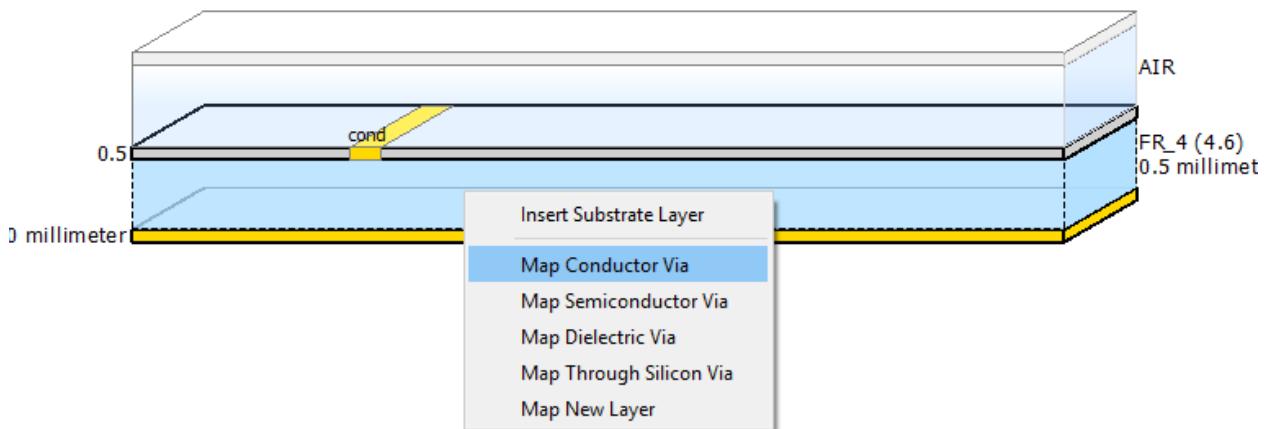
После этого, диэлектрику можно присвоить материал FR-4.



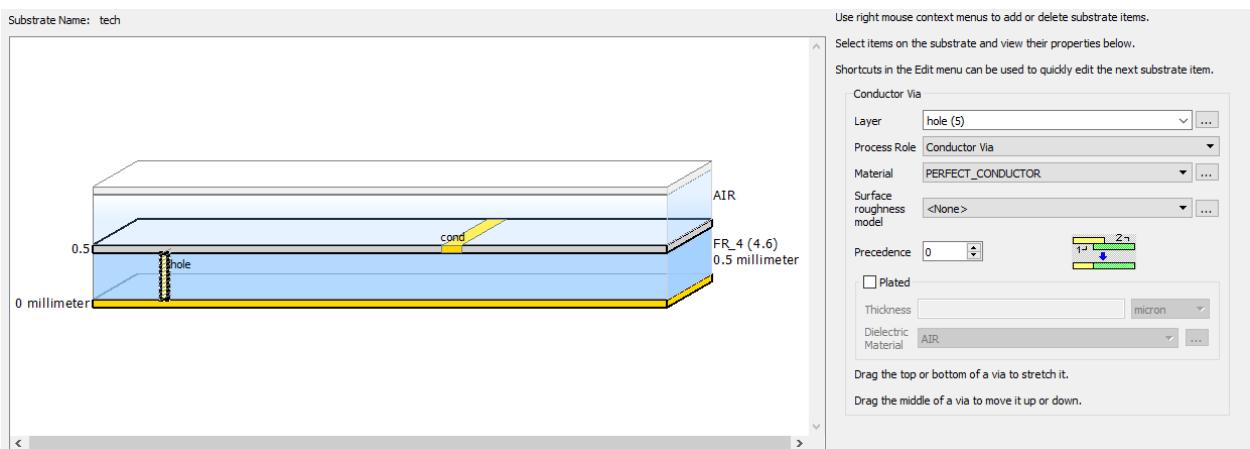
Также, устанавливаем диэлектрику толщину 0,5мм.



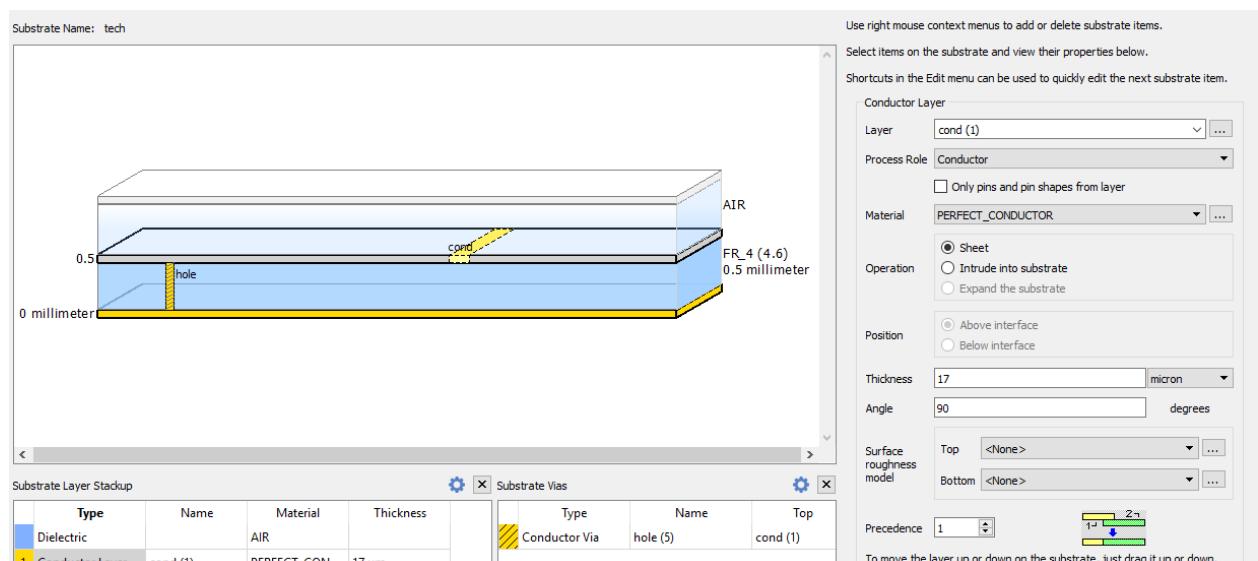
Далее, нужно создать переходное отверстие и привязать к нему слой. Для этого, в основном окне по диэлектрику ПКМ – Map Conductor Via.



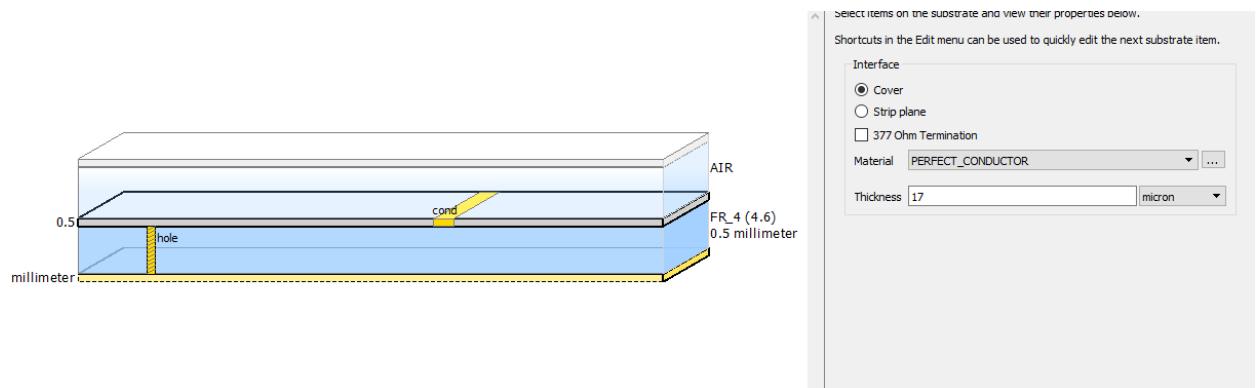
Созданный слой для отверстий должен соответствовать слою hole (5) из стандартной библиотеки слоев ads_standard_layers, иметь роль Conductor Via и материал PERFECT_CONDUCTOR.



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.

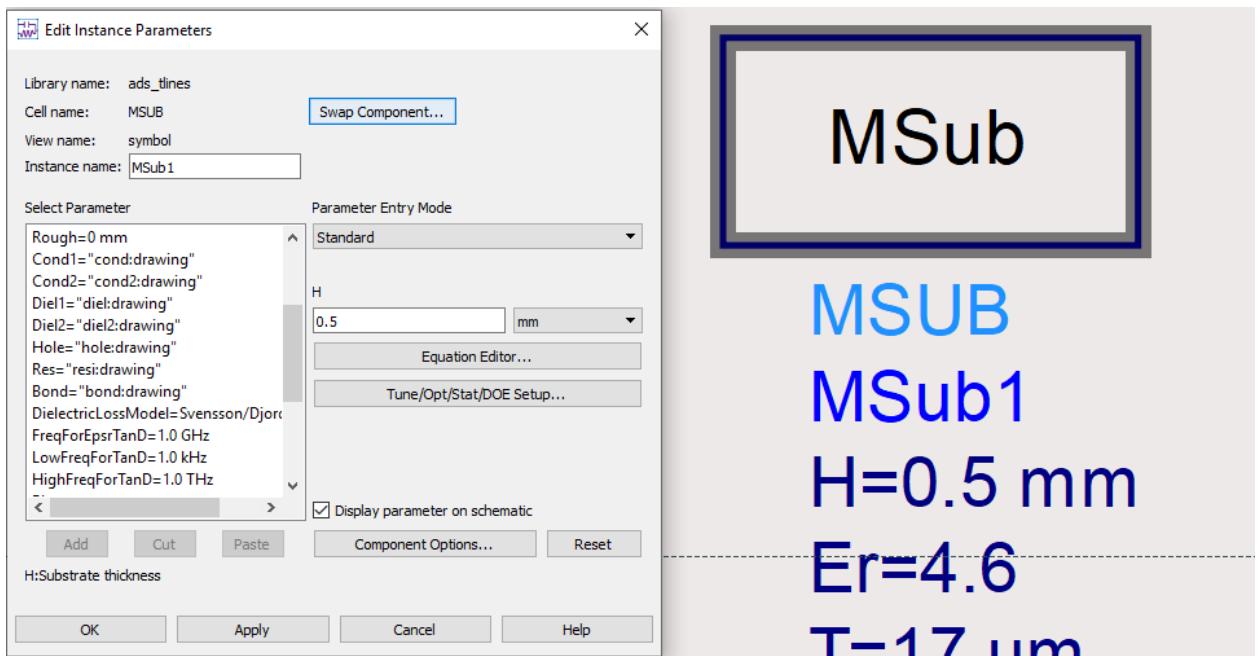


Окончательно, нижний слой земли будет моделироваться бесконечным (Interface = Cover), с толщиной 17 мкм, материал PERFECT_CONDUCTOR.

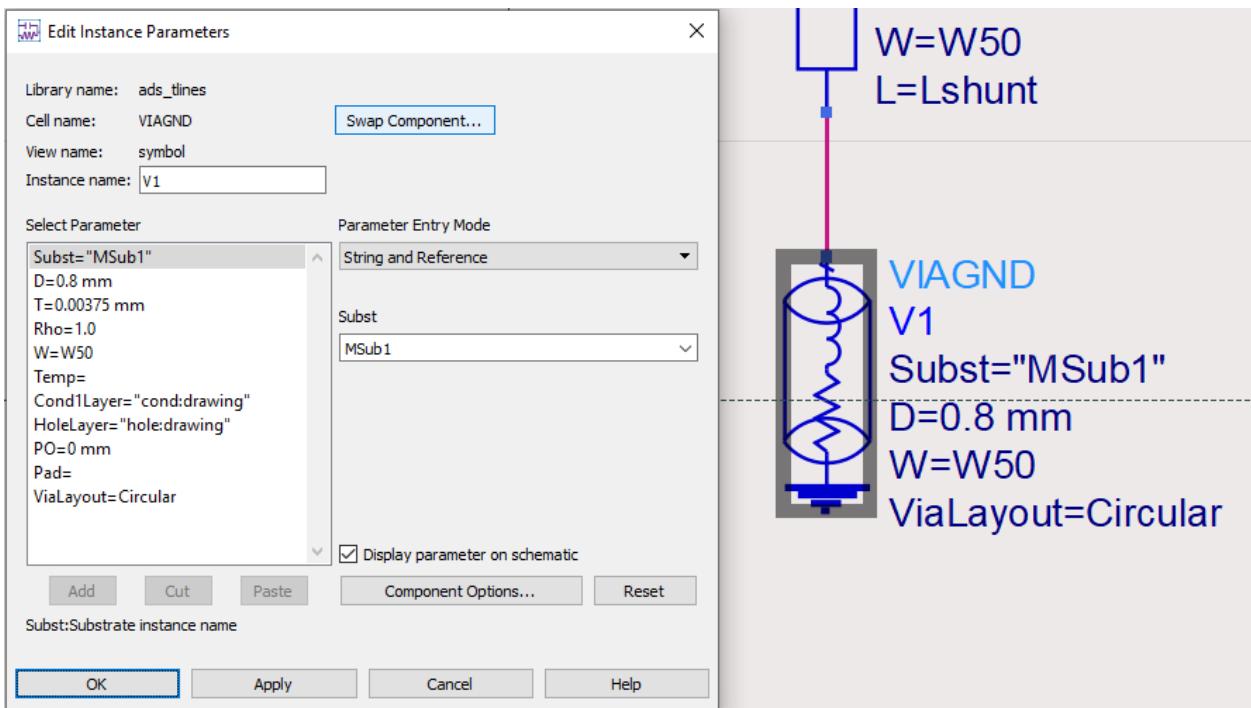


Создание базовой 3D-подложки закончено. Данная подложка применима для ЕМ-моделирования микрополосковых устройств и является одной из самых простых.

Следующая часть – проверить, что в схемном представлении микрополосковых устройств правильно назначено соответствие слоев. Нужно зайти в определение подложки MSUB и проверить, что слои назначены, как показано на рисунке



Также бывает, что некоторые микрополосковые устройства отдельно переопределяют назначение слоев, особенно модели отверстий. Проверим тоже.



При переносе в топологическое представление не переносятся блоки VAR, определения подложек, контроллер симуляции, терминалы и измерительные выражения. Для нормальной дальнейшей работы надо будет создать двухуровневую схему. Выберем только полосковые устройства и отверстие и по команде Edit – Component – Create Hierarchy создадим подсхему Matchin_EM_Inner

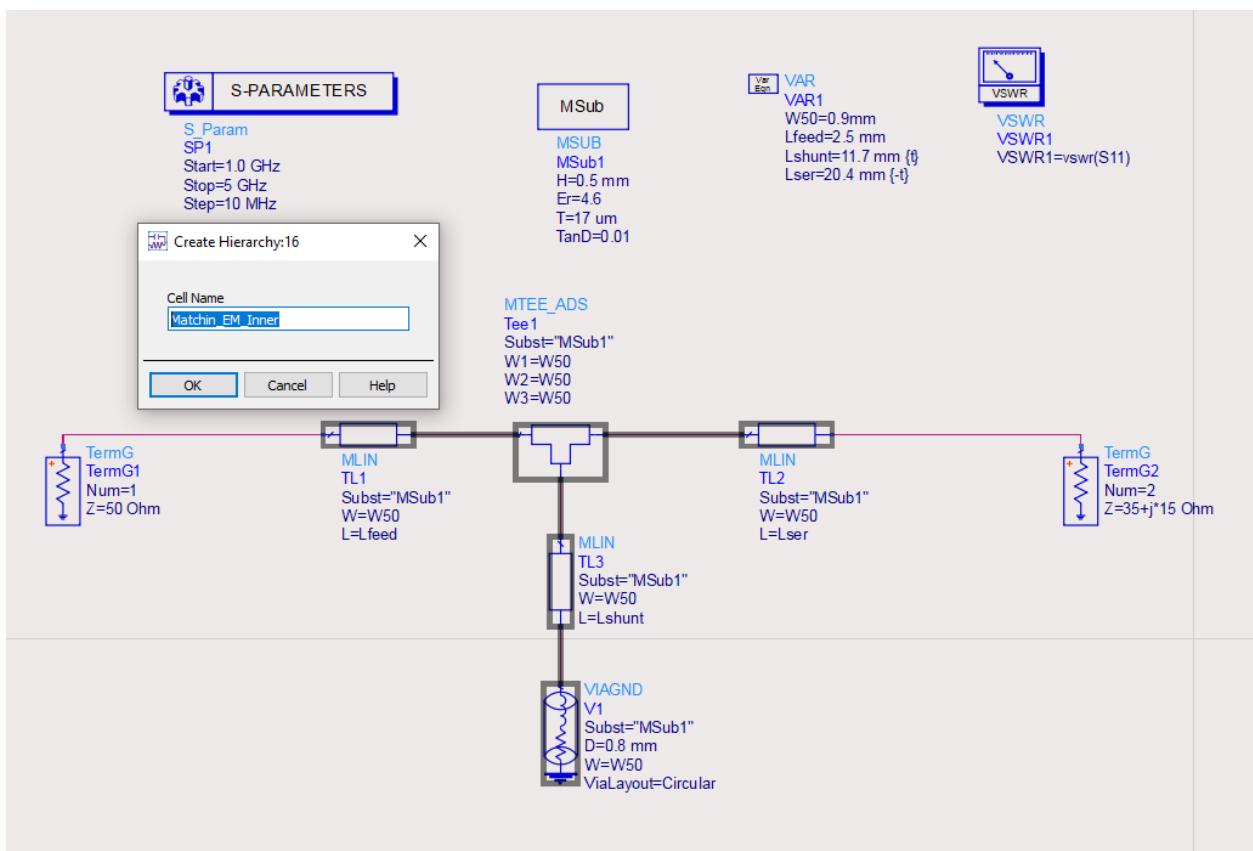
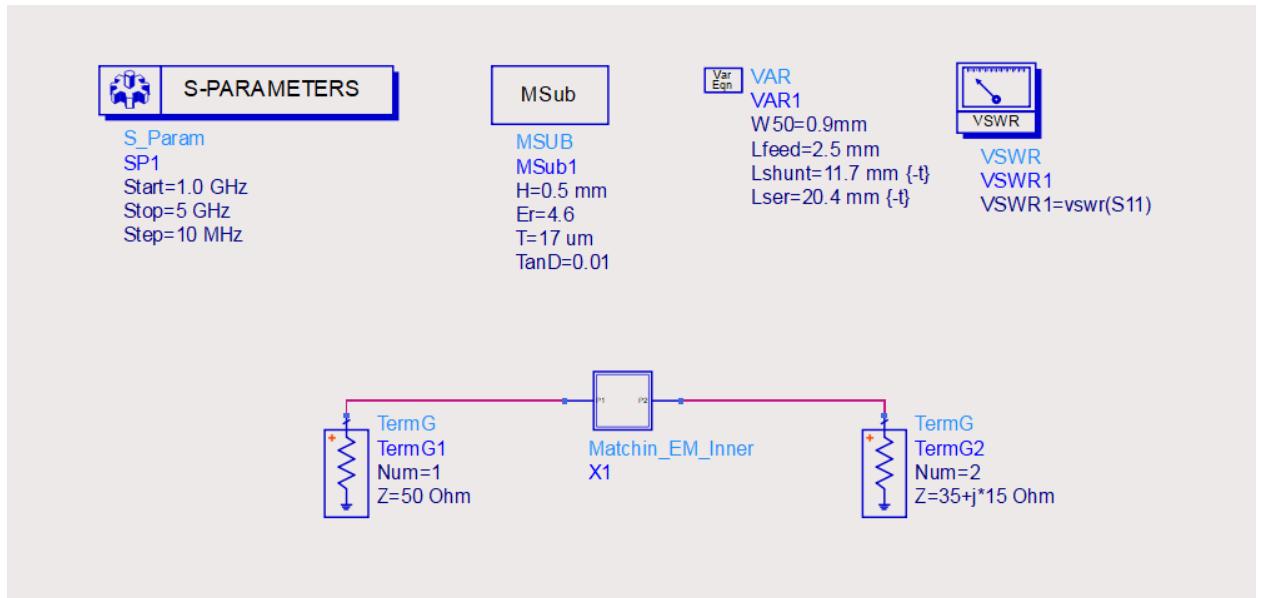
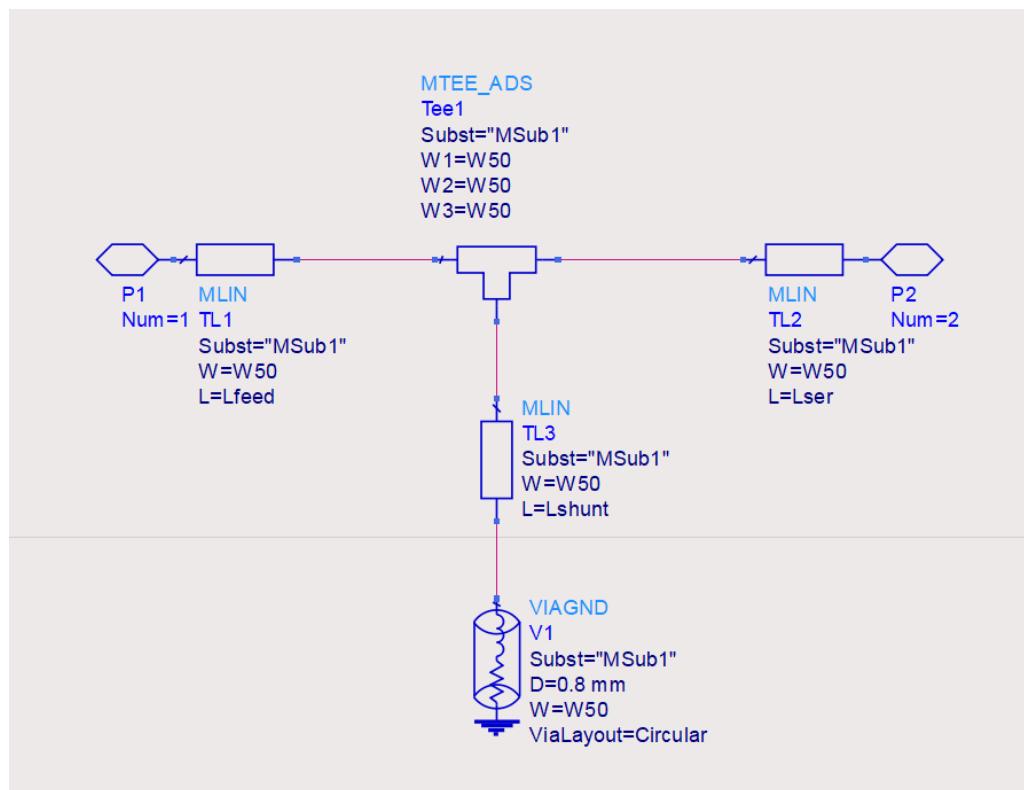


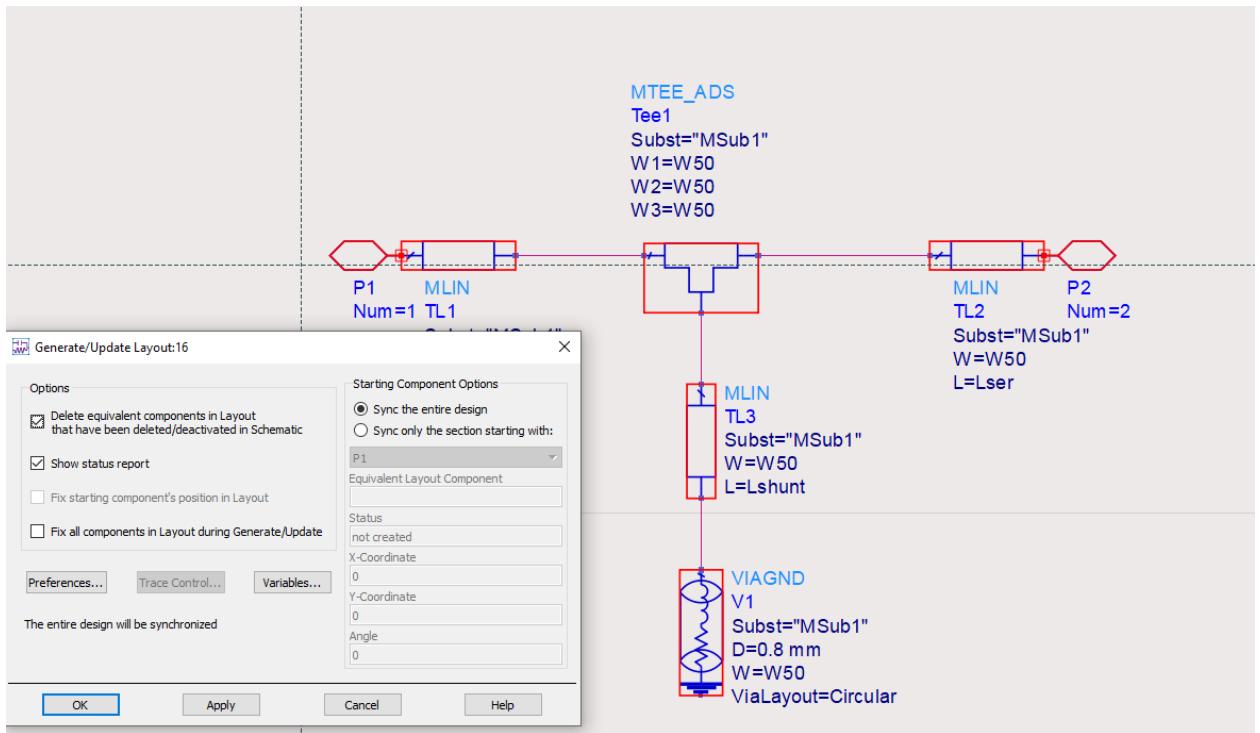
Схема верхнего уровня Match_MLIN_EM теперь выглядит следующим образом:



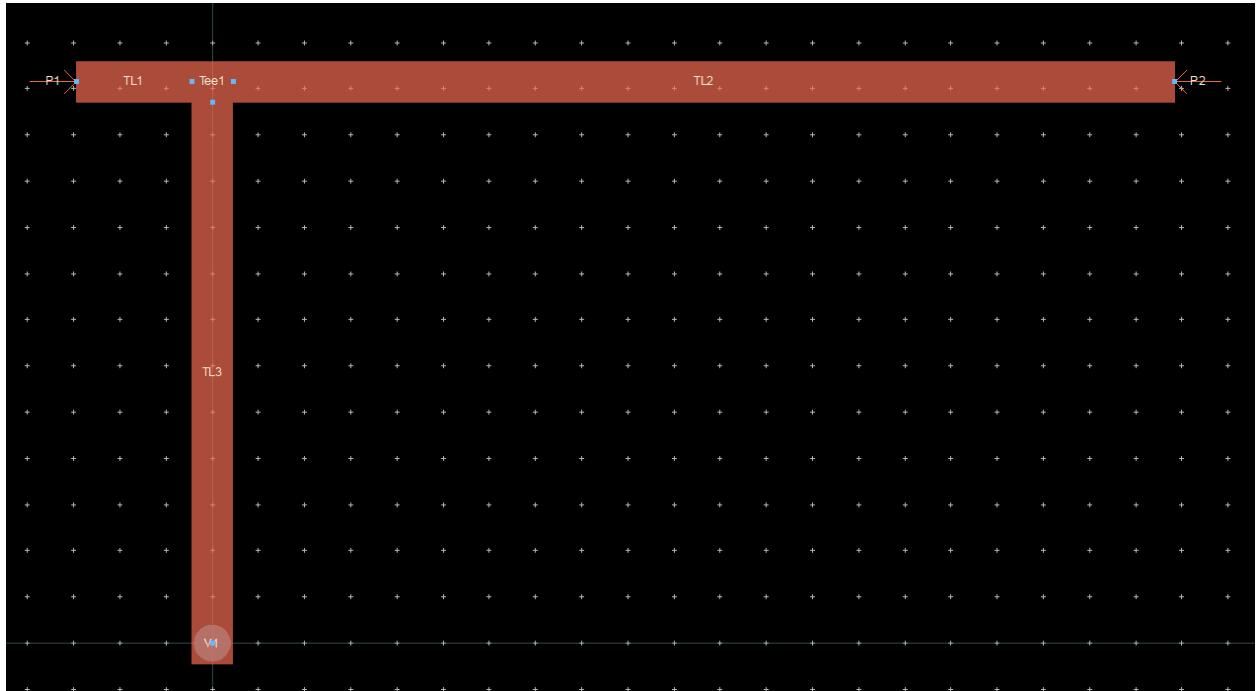
Войти в подсхему Matchin_EM_Inner можно по команде ПКМ – Push Into Hierarchy (Shift+E).



Теперь, находясь в подсхеме Matchin_EM_Inner, по команде Layout – Generate/Update Layout создадим топологическое представление.



Топология Matchin_EM_Inner создана .

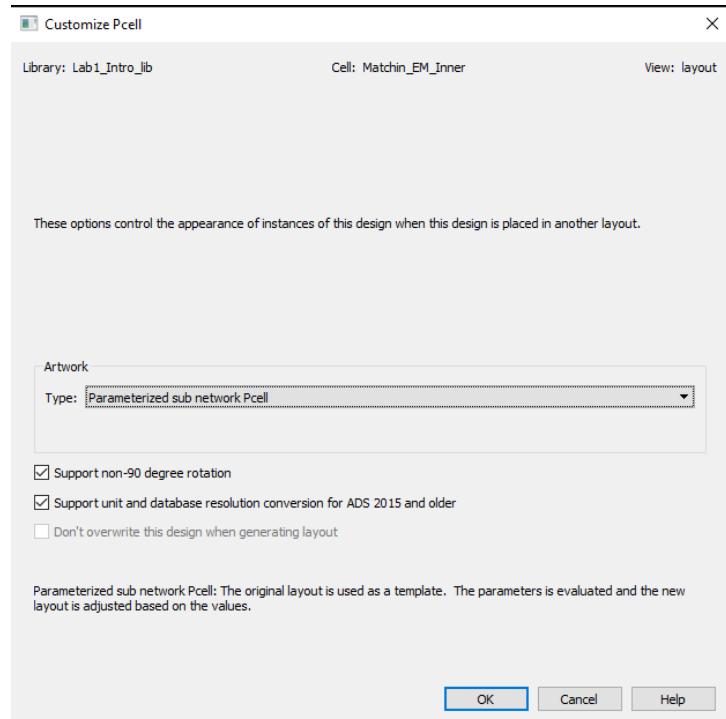


Теперь сделаем внутреннюю ячейку Matchin_EM_Inner и ее топологию параметризируемой.

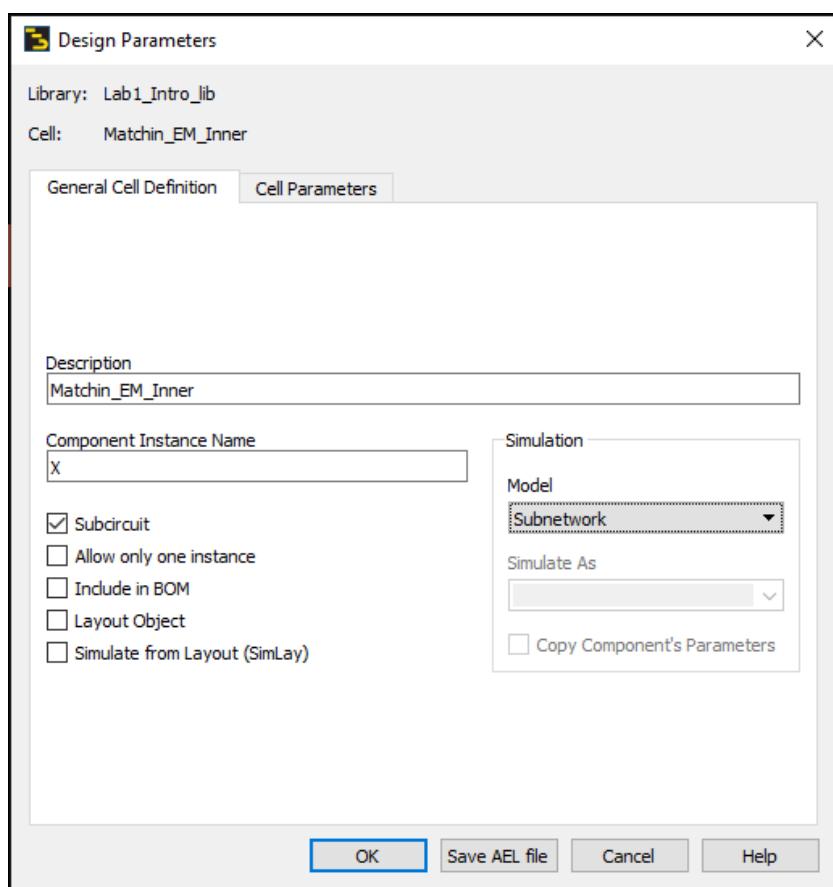
Для этого нужно сделать два преобразования.

1. Находясь в топологии, по команде File – Customize PCell в списке Artwork Type выбрать Parameterized sub network Pcell. Таким образом, при

установке данной подсхемы как топологии в другую топологию ее можно сделать параметрической.



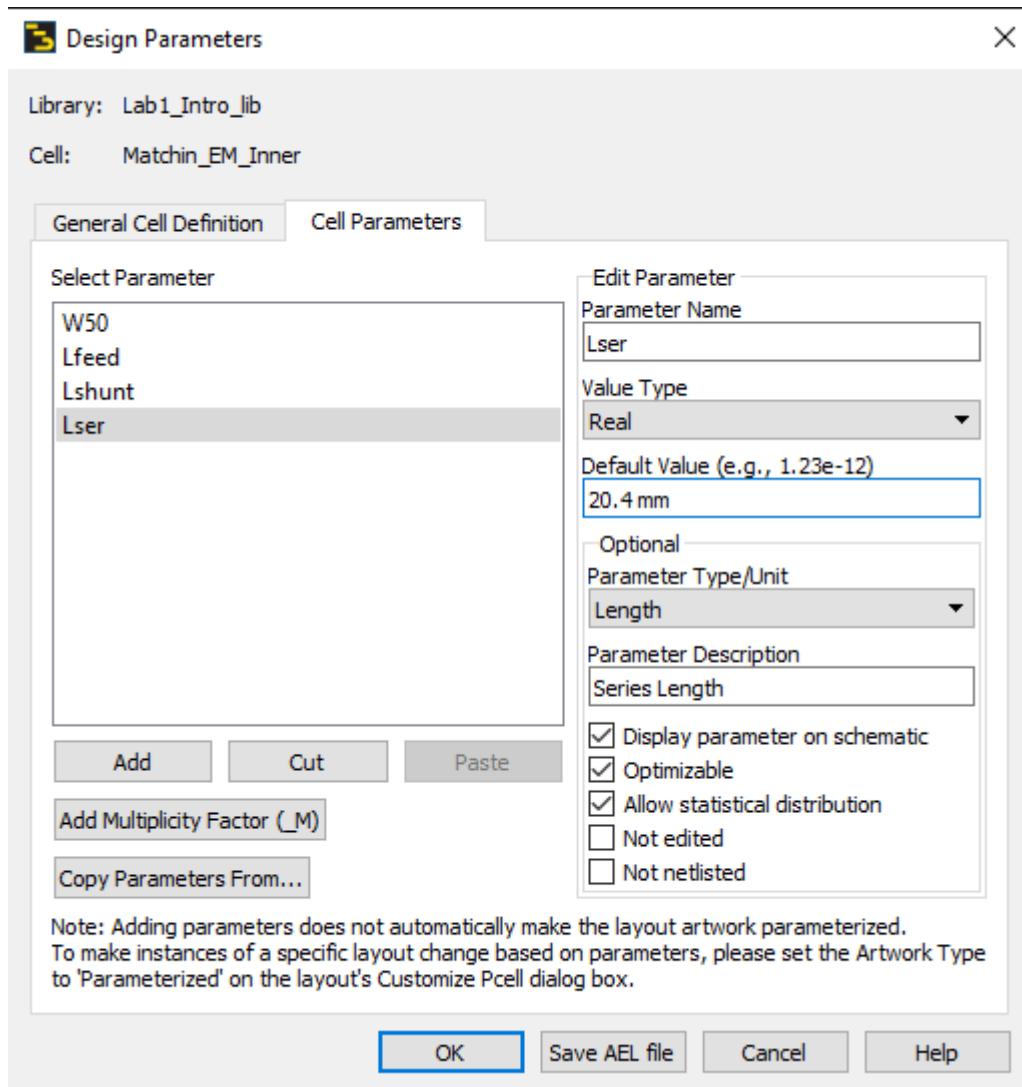
2. Вынести параметры на уровень ячейки. По команде File – Design Parameters на вкладке General Cell Definition должен стоять тип ячейки Model = Subnetwork.



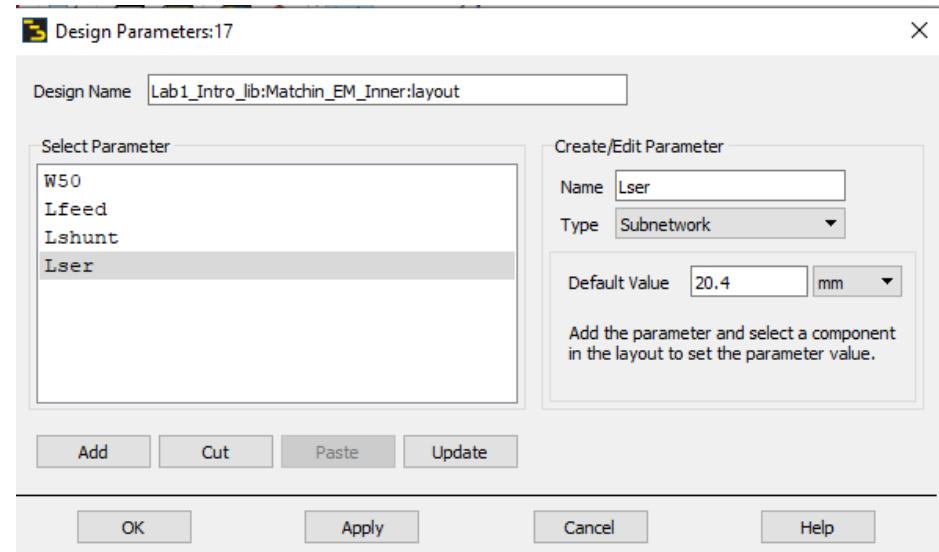
На вкладке Cell Parameters нужно определить параметры. Параметр должен иметь имя, тип значения (действительное, целое, комплексное, строка), значение по умолчанию. Можно для контроля и удобства назначить тип (длина, угол, сопротивление и пр.) и добавить описание. С учетом выполненного на схемном уровне тюна, у нас это следующие переменные ячейки (таблица 2).

Таблица 2. Параметры ячейки MLIN_EN_Inner

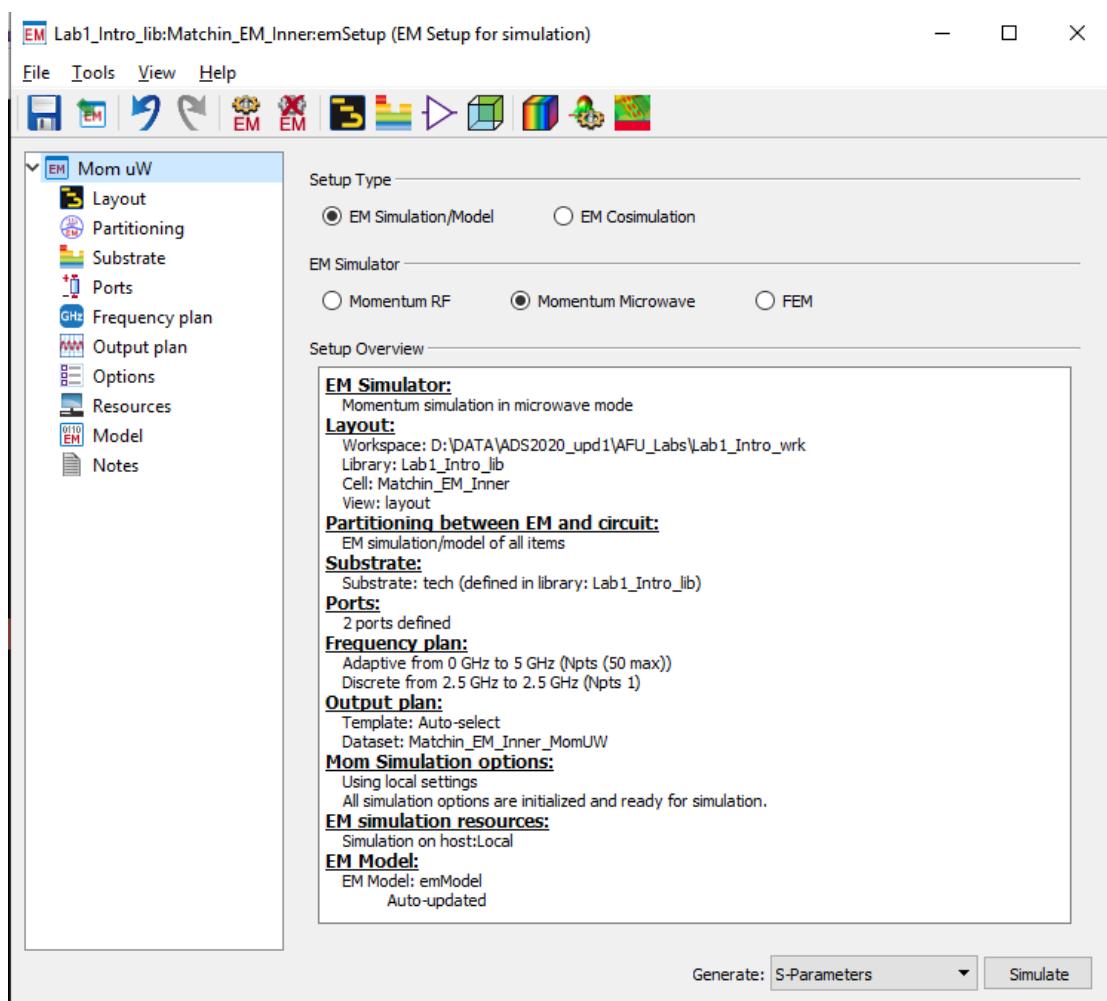
Имя переменной	Тип значения	Значение	Тип переменной	Смысл переменной
W50	Real	0.9 mm	Length	Width 50 Ohm
Lfeed	Real	2.5 mm	Length	Feed Length
Lshunt	Real	11.7 mm	Length	Shunt Length
Lser	Real	20.4 mm	Length	Series Length



Также параметры ячейки (только геометрические, длину и углы) можно определять в другом меню по команде EM – Component – Parameters из топологии.

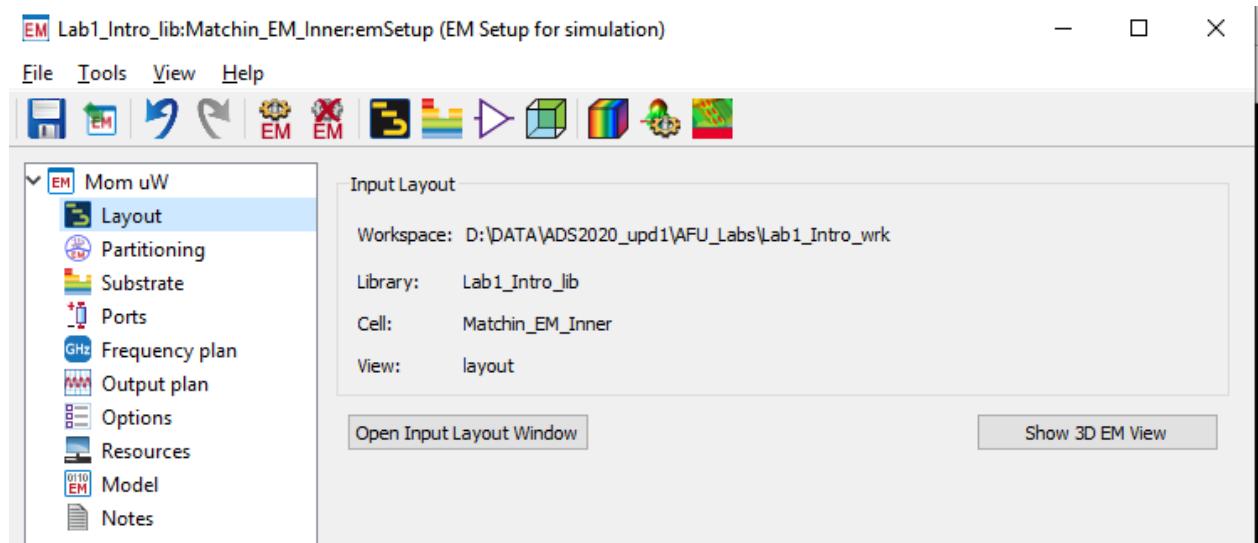


Далее, для EM-моделирования нужно создать сущность emSetup по команде EM – Simulation Setting (F6).

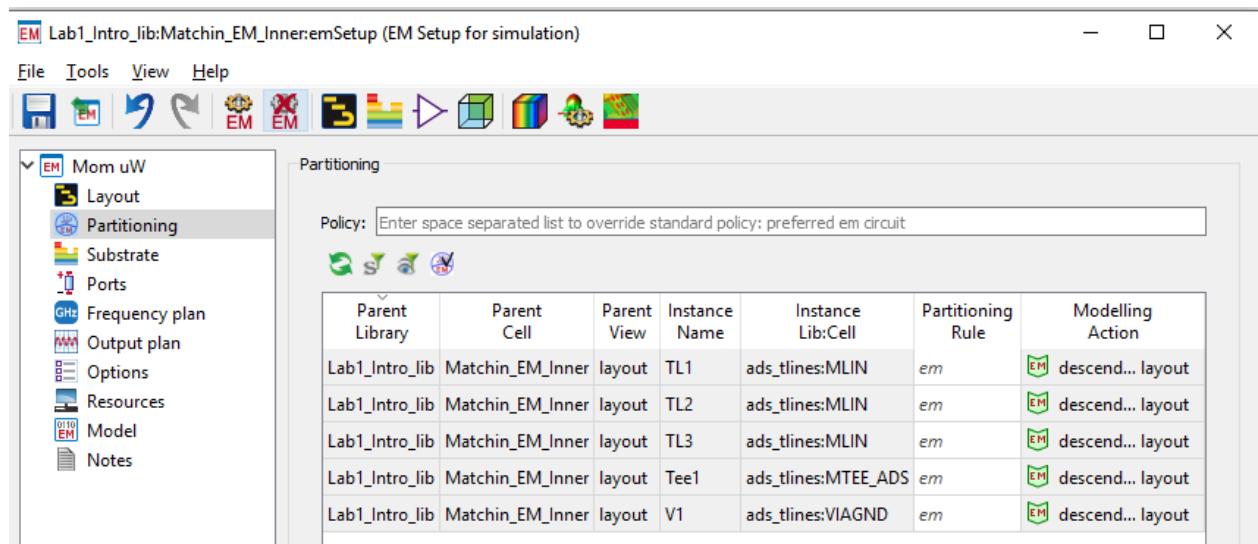


На основной вкладке определяется EM-симулятор и настройки косимуляции. В текущей схеме косимуляции нет, выбираем Setup Type = EM Simulation/Model и симулятор Momentum Microwave (сокращенно Mom uW).

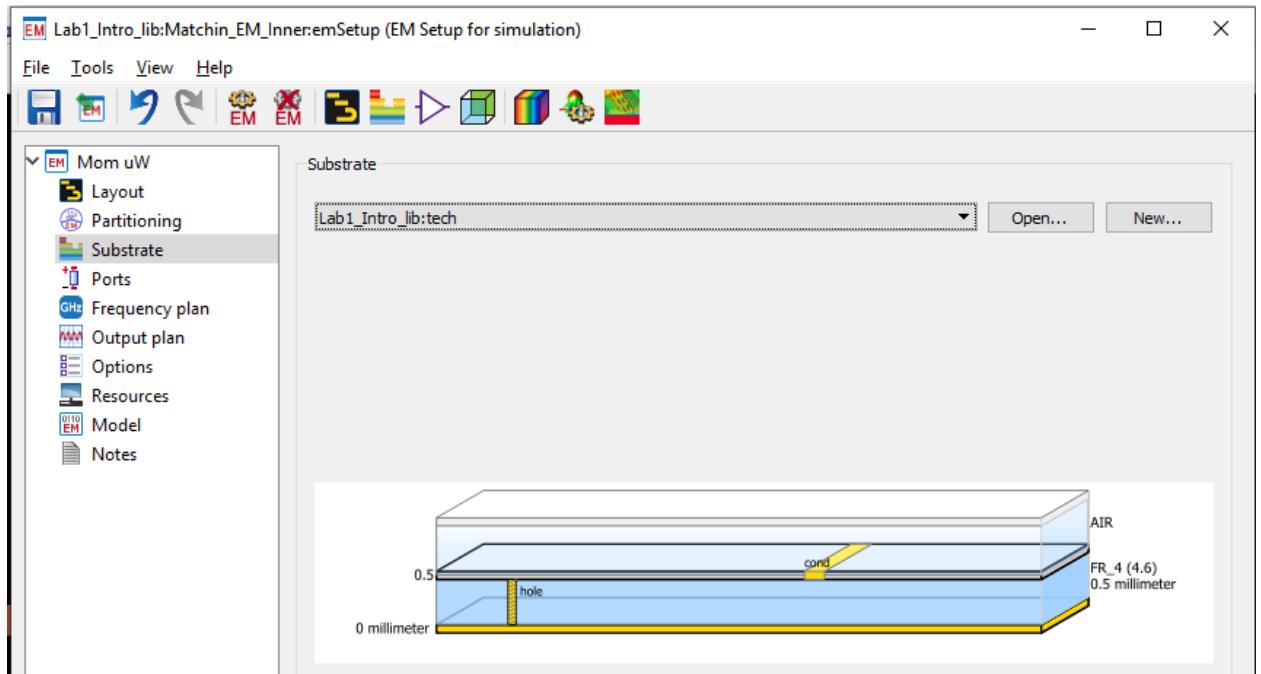
На вкладке Layout определяется, какая топология будет считаться (если их несколько в ячейке, например). В данном случае ячейка Matching_EM_Inner.



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



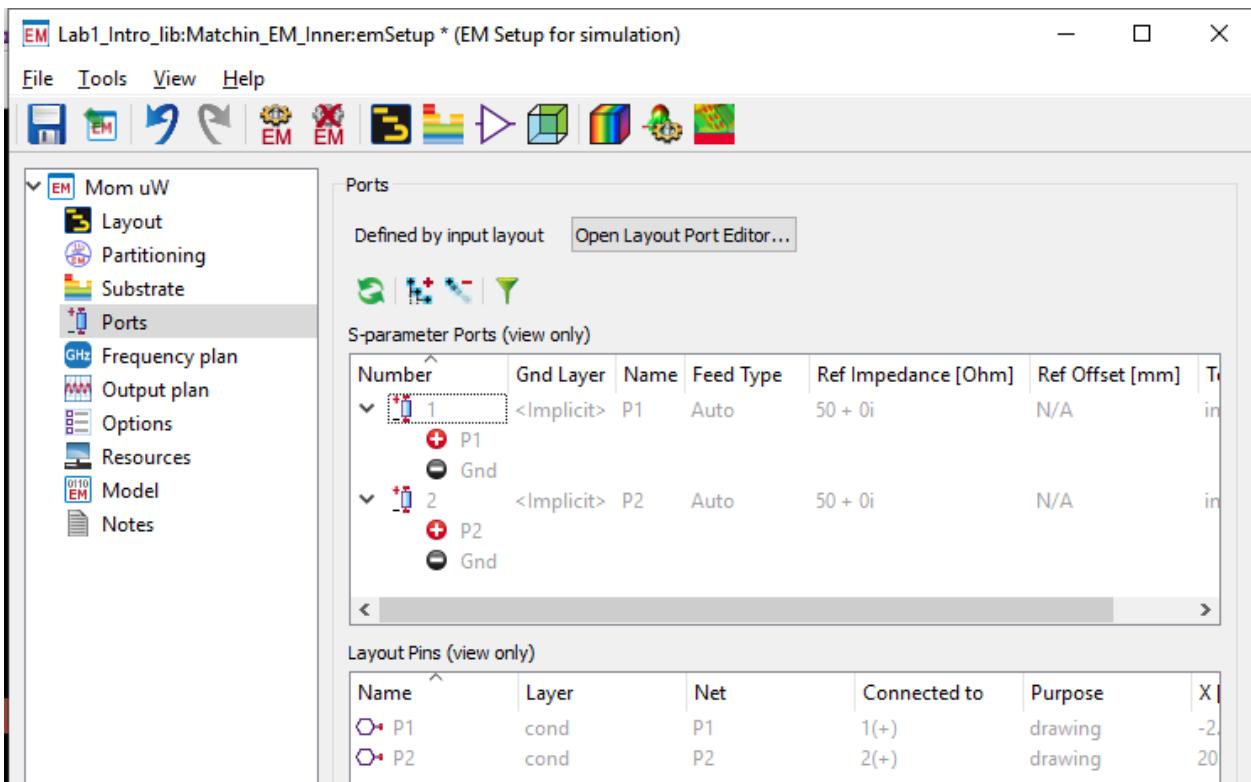
На вкладке Substrate можно выбрать определение подложки, если их в проекте или подключенных библиотеках несколько. В нашей схеме она одна.



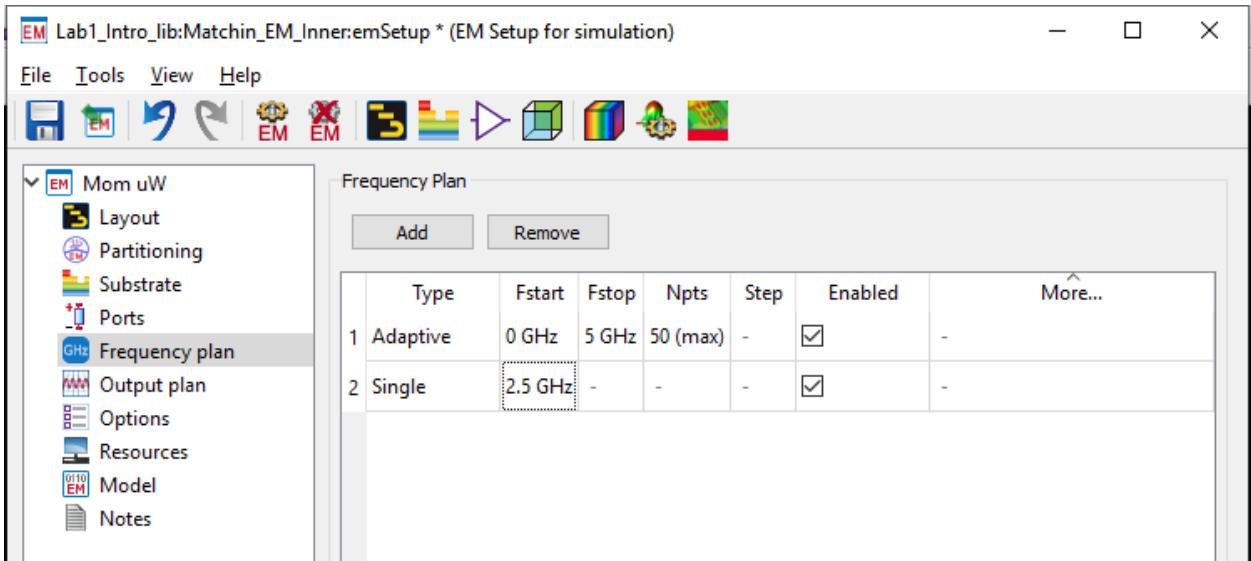
На вкладке Ports настраиваются порты. Автоматически созданные порты подходят для моделирования подключенных микрополосковых устройств в другим устройствам в большинстве случаев. Если нужно изменить настройки портов, то по кнопке Open Layout Port Editor их можно настроить отдельно.

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.

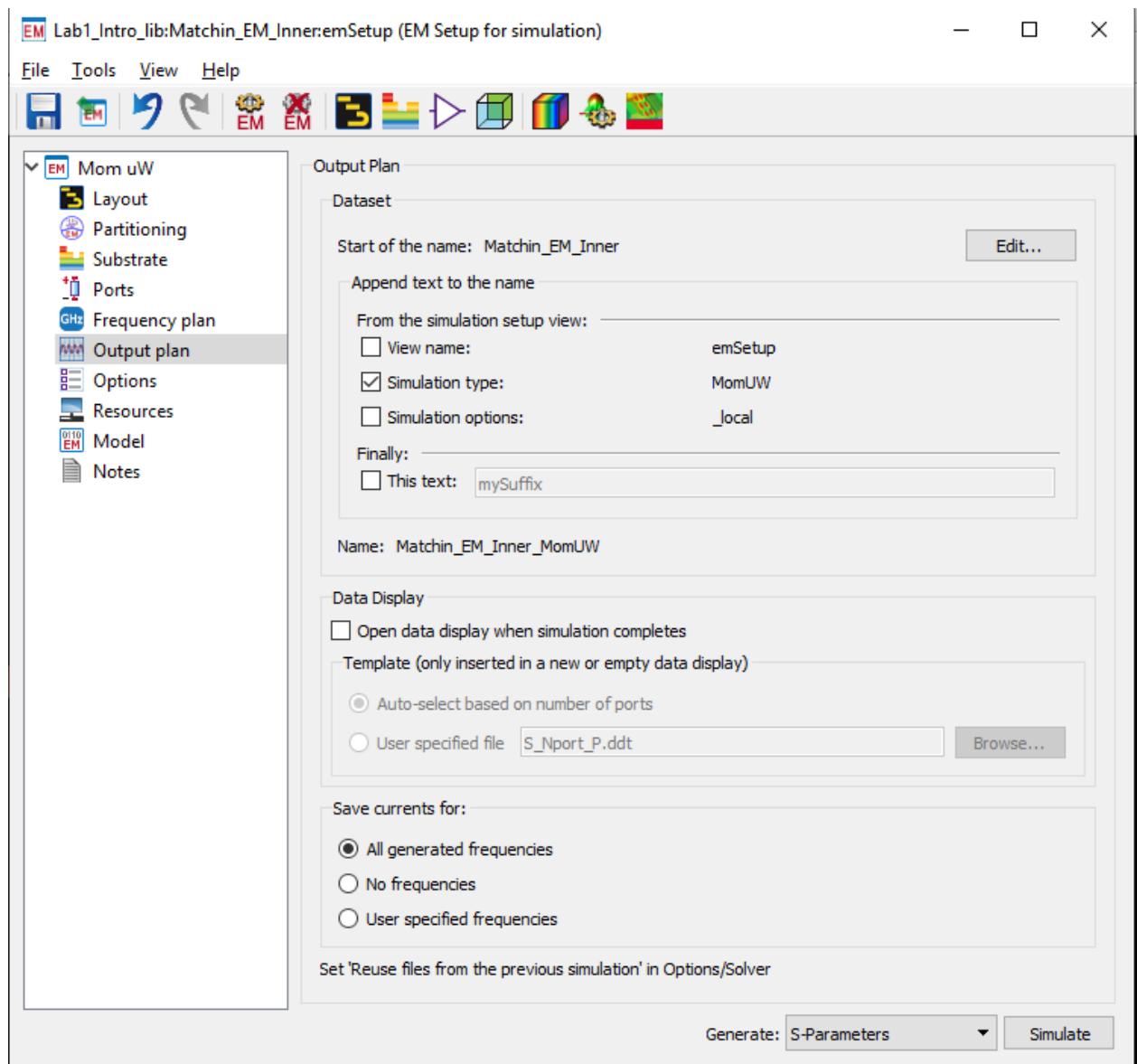
Таким образом, получается два порта, каждый собран из соответствующего пина (P1 и P2, +) и земли (-), имеют калибровку TML (устанавливается автоматически для имитации подключения к длинной линии) и волновое сопротивление 50 Ом.



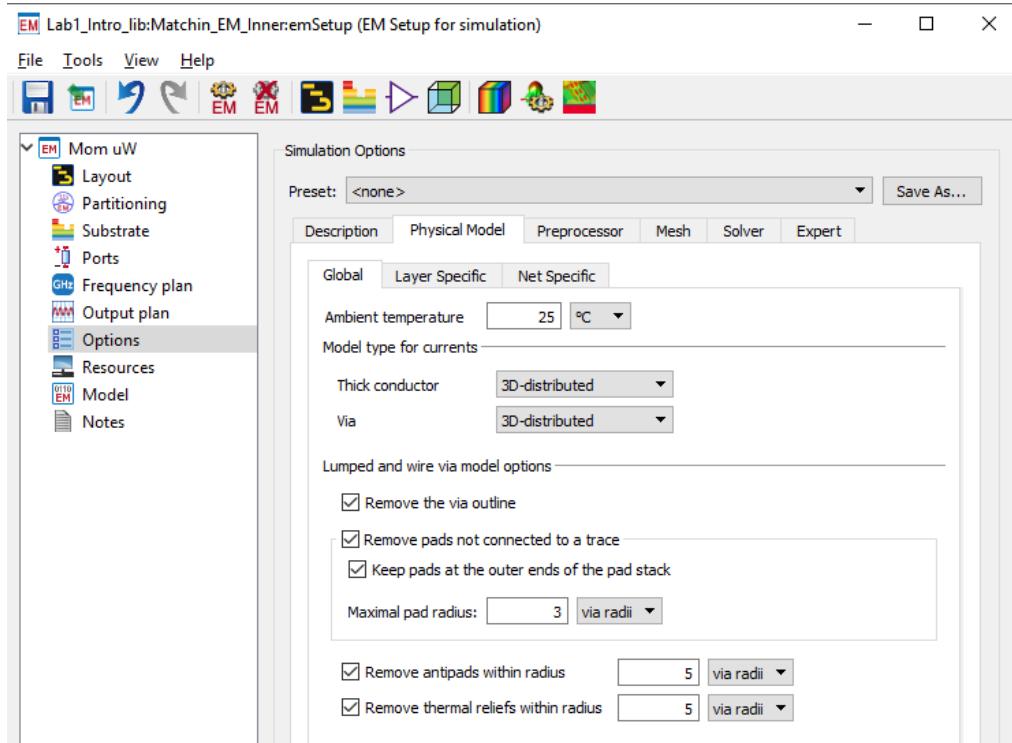
На вкладке Frequency plan задается частотный план расчета. Установим два, адаптивный подбор частотного шага (Adaptive), от 0 ГГц до 5 ГГц (макс 50 точек) и дополнительно точно на 2,5 ГГц (Single). В адаптивном частотном плане невозможно предварительно узнать, на каких частотах будет вестись расчет, они подбираются автоматически. Данные на промежуточных 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 возможно, например), то эти частоты нужно добавлять принудительно.



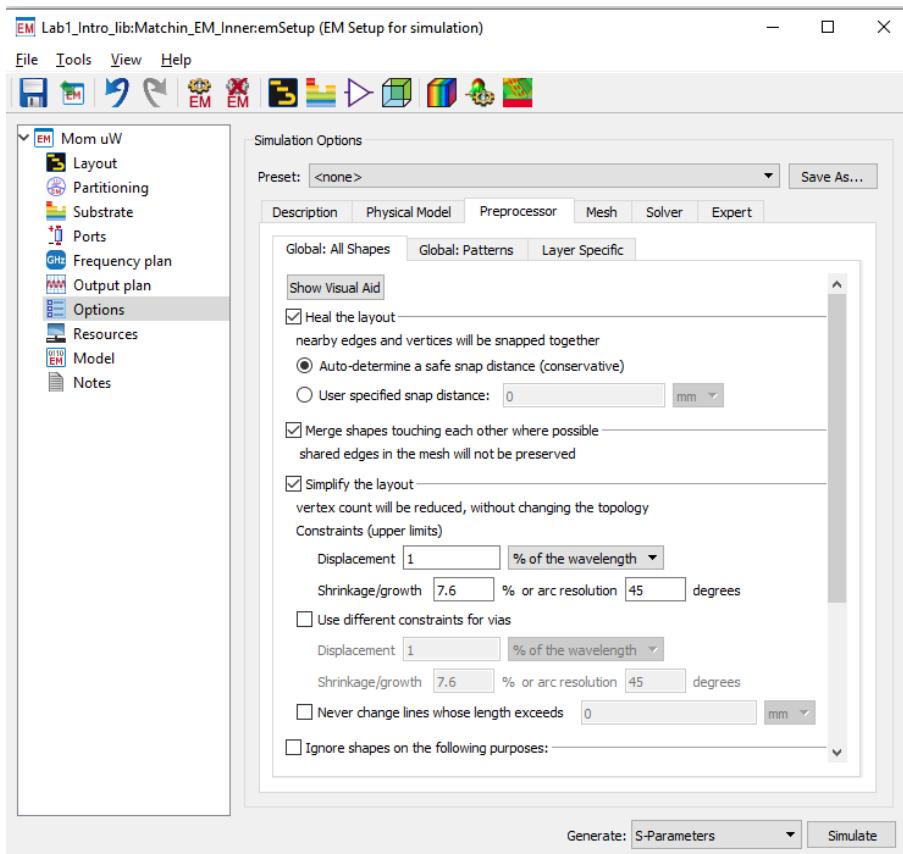
На вкладке Output plan задается имя датасета, в который идет запись результатов (группа Dataset). Кроме того, можно настроить автоматическое создание графика по шаблону (группа Data Display) и выбрать, сохранять ли токи (группа Save currents for). Пусть данные сохраняются в предложенный датасет, график автоматически не открывается и сохраняются токи для всех частот расчета (как заданных пользователем, так и из адаптивного подбора частотного шага).



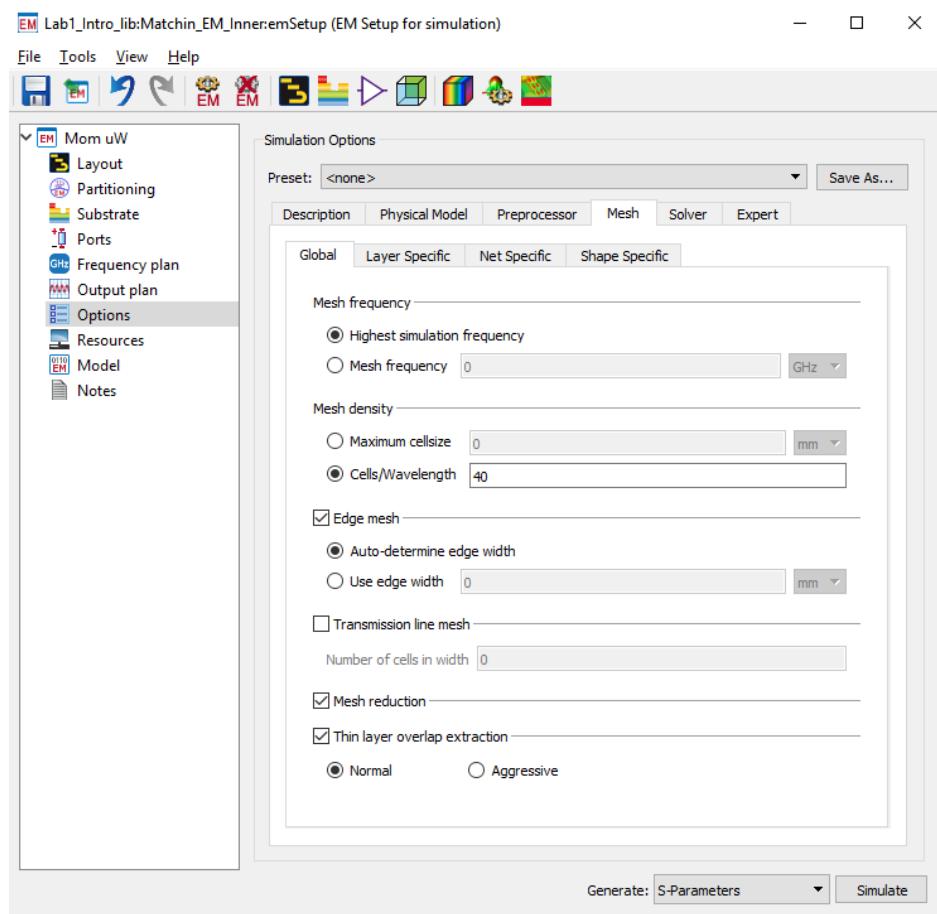
На вкладке Option определяется, как будет построена сетка и упрощена модель. На подвкладке Physical Model установим, что отверстия моделируются как полноценные 3D (Via = 3D-distributed).



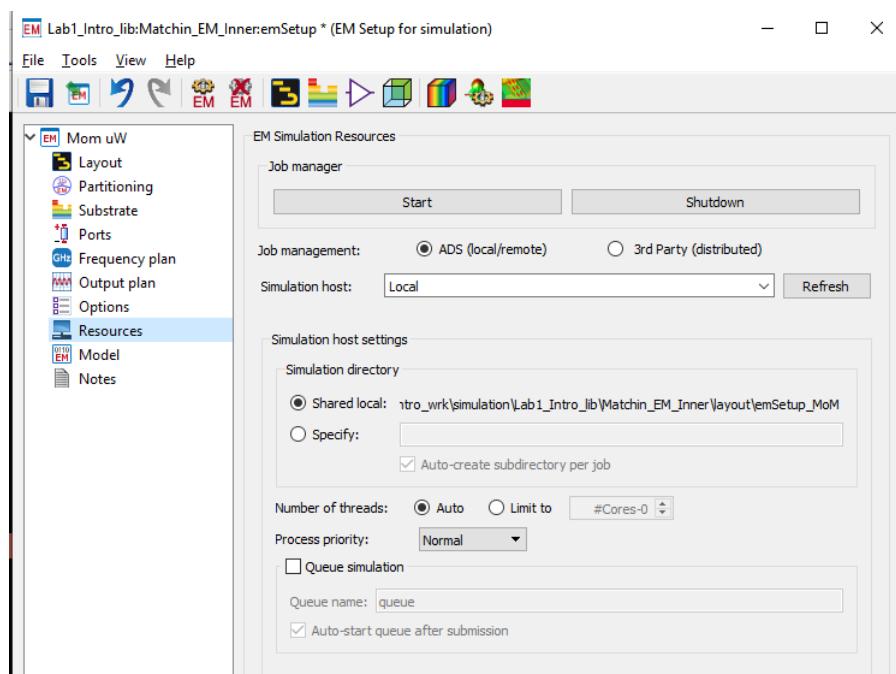
На подвкладке Preprocessor определяется, как будет упрощена топология. Оставим по умолчанию.



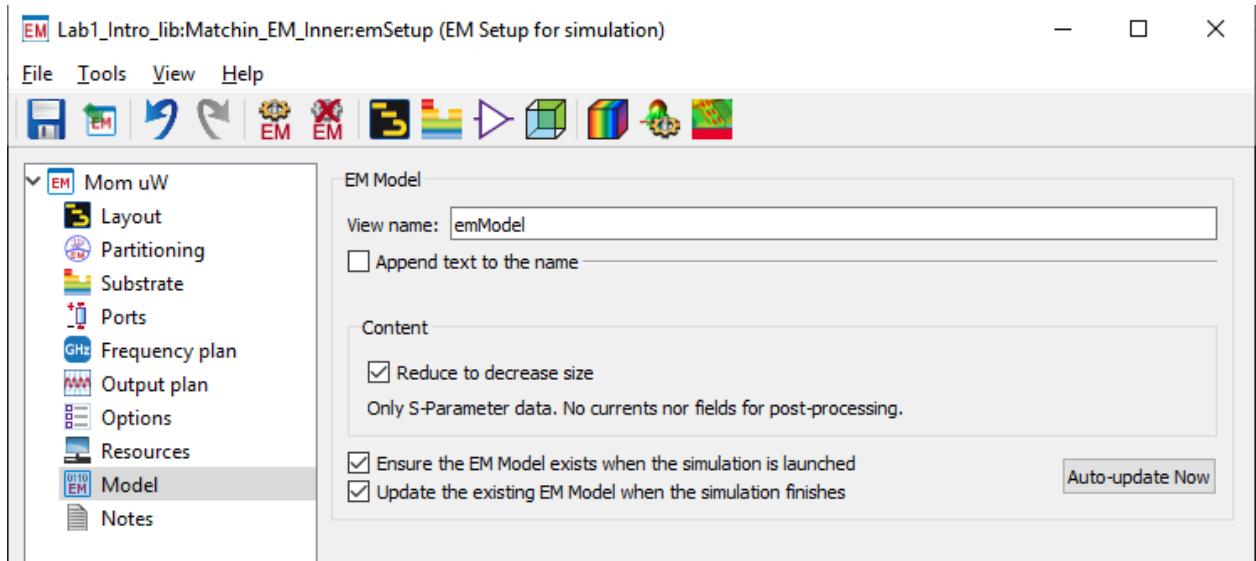
На подкладке Mesh настроим качество сетки. Пусть плотность сетки будет 40 ячеек на длину волны (Mesh Density = 40 Cells/Wavelength), а также автоматическое построение сетки вдоль краев (Edge Mesh, Auto-determine edge width).



На вкладке Resources можно отправить расчет на удаленный кластер.

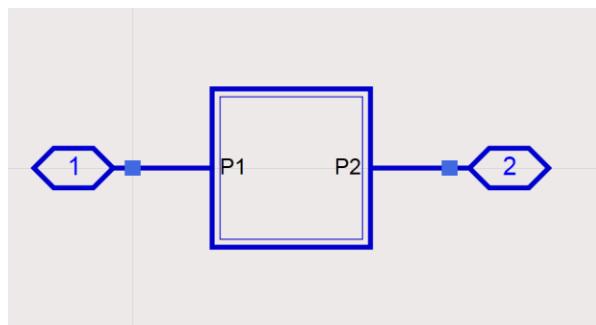


На вкладке Model настраивается, как будут сохранены данные в emModel. Установим все нужные галки и дополнительно нажмем кнопку Auto-create Now.

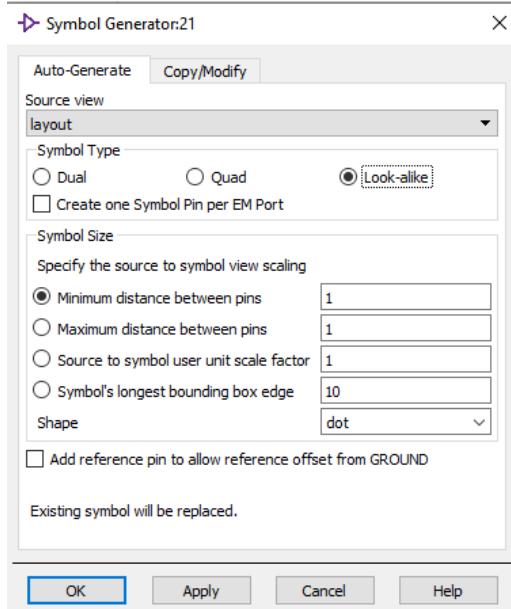


На вкладке Notes можно добавить какие-нибудь записи о расчете.

Также из этого окна можно сразу перейти к редактору символа ячейки Matching_EM_Inner по команде Tools – Open Symbol Editor . Откроется окно с автоматически сгенерированным двухпортовым символом.



Заменим его на символ, похожий на топологическое представление. По команде Insert – Generate Symbol выберем режим Auto-Generate, источник графики топология (Source view = layout), походим на топологию (Symbol Type = Look-alike). Для получения нормального вида символа еще возможно надо будет поиграться с группой параметров Symbol Size.

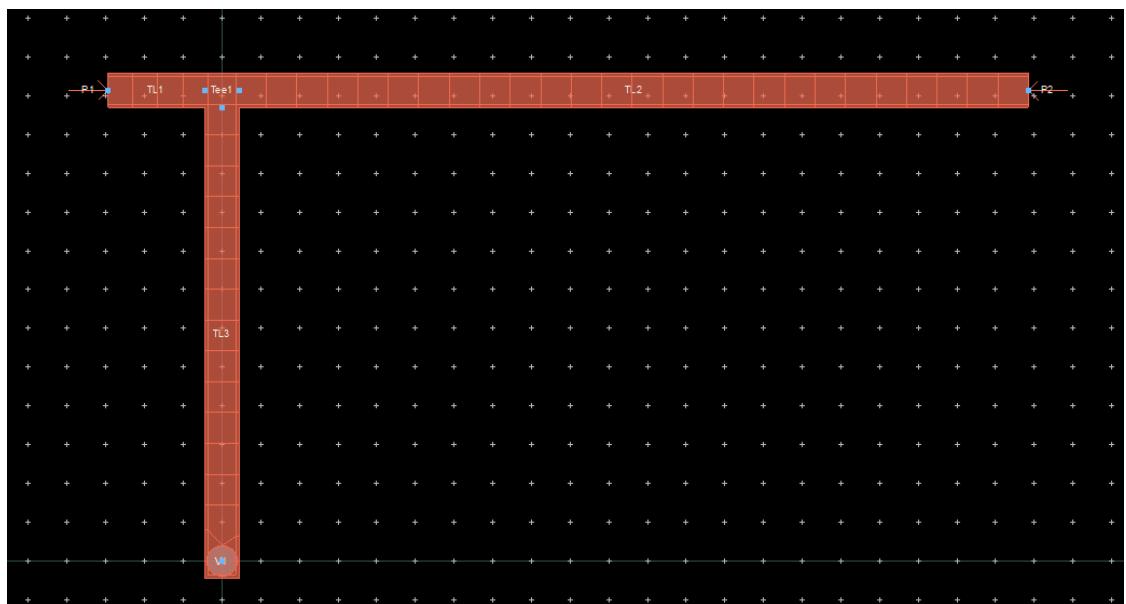


Графика в редакторе символа изменится.



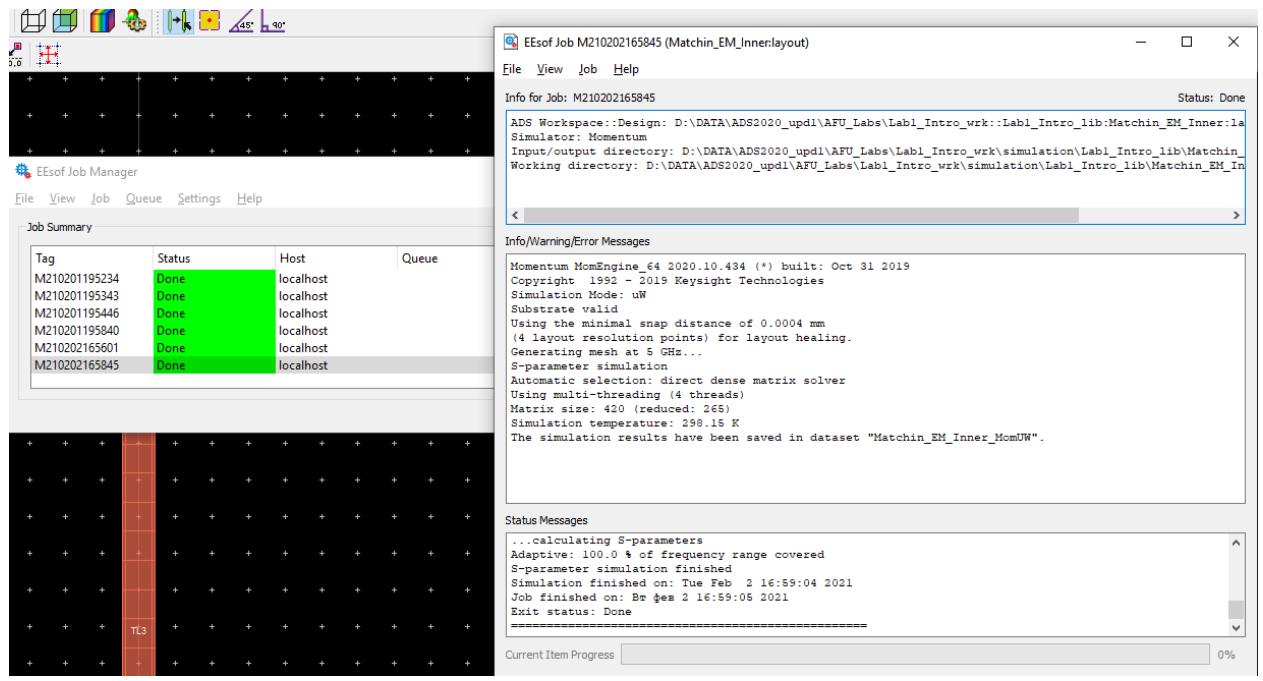
Возвращаемся в emSetup.

По окончанию, надо в списке Generate выбрать Mesh и нажать Go. На окно с топологией будет выведена сетка расчета и можно оценить, насколько она получилась приемлемой.

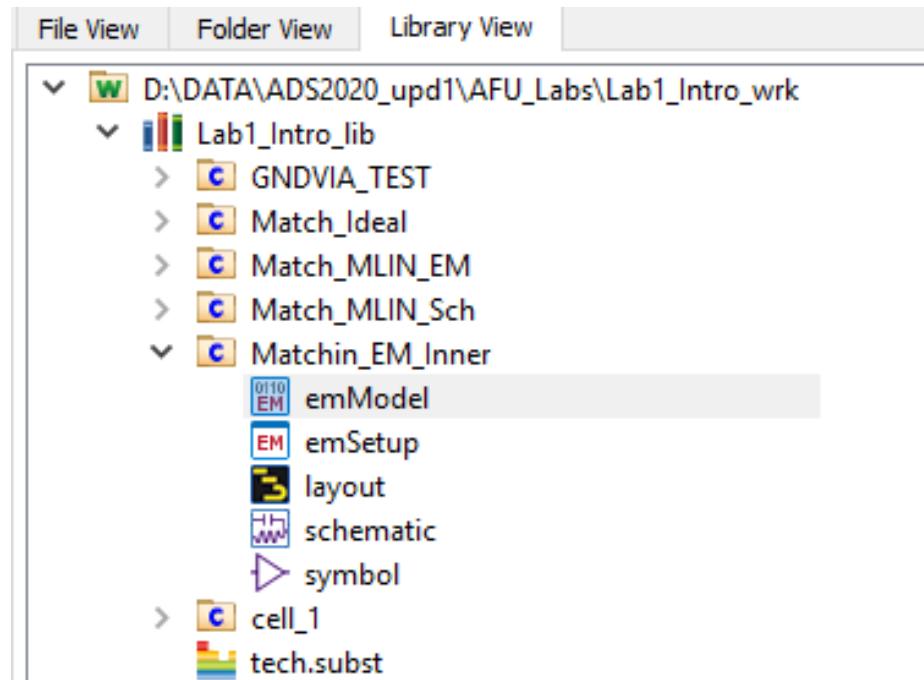


Для того, чтобы запустить расчет, нужно в списке Generate выбрать S-Parameters и нажать Simulate.

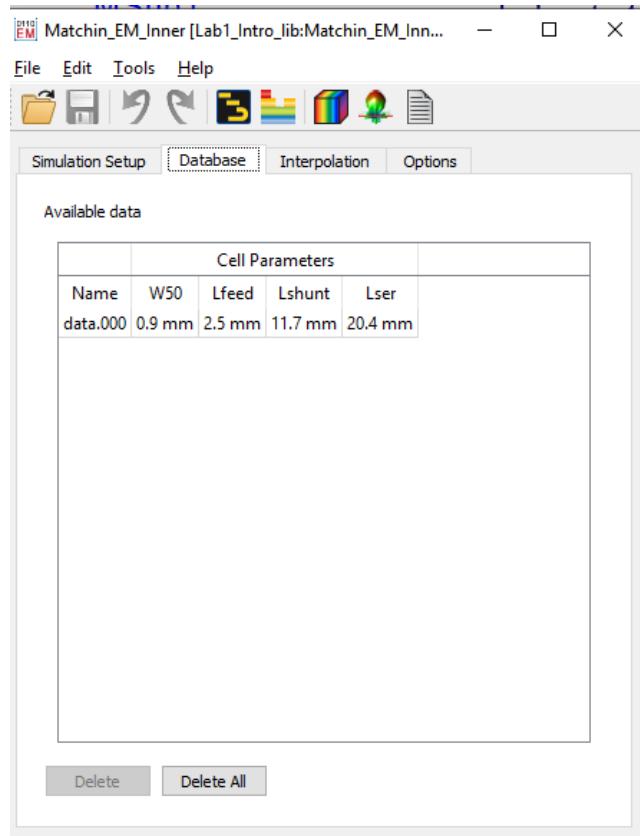
Откроется окно Job Manager и логгер текущего расчета EESof Job. По нему можно узнать, как идет расчет. При необходимости, идущий расчет можно остановить.



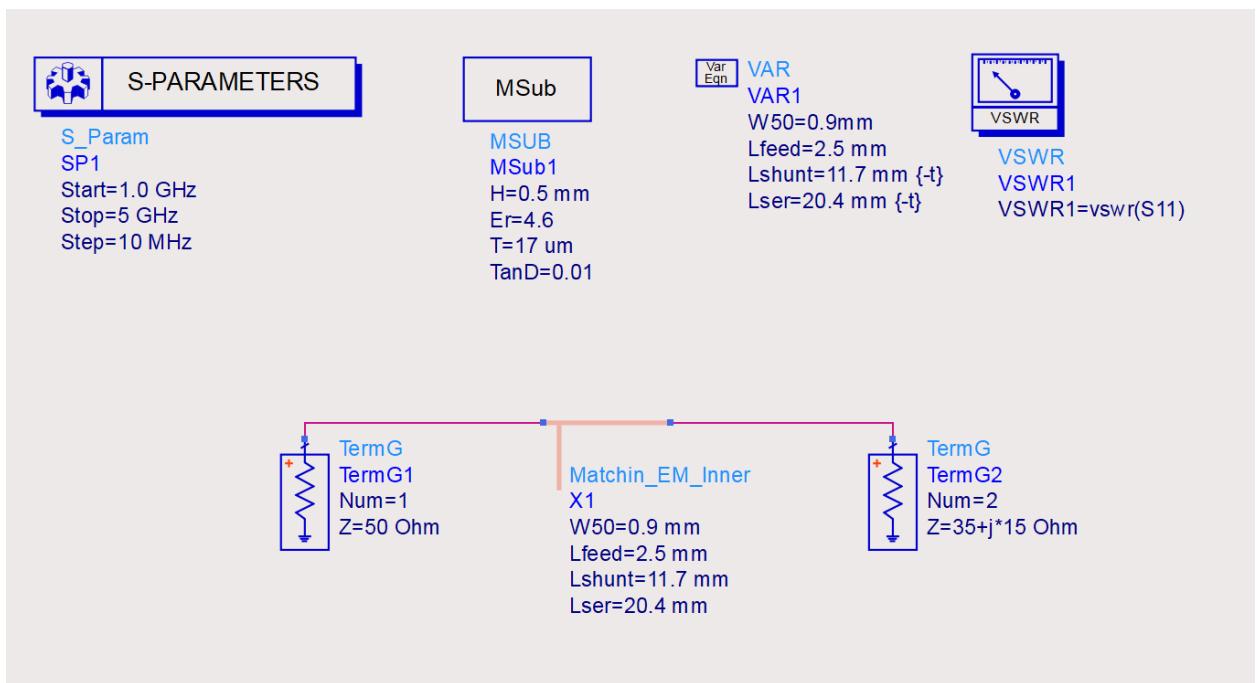
Полученные данные сохранены в emModel в составе ячейки Matching_EM_Inner. Можно из основного окна ADS развернуть состав ячейки и открыть emModel.



В ней, на вкладке Database будет перечислены значения параметров, на которых велся расчет и сохранены результаты.



Вернемся в схему верхнего уровня Matching_MLIN_EM.



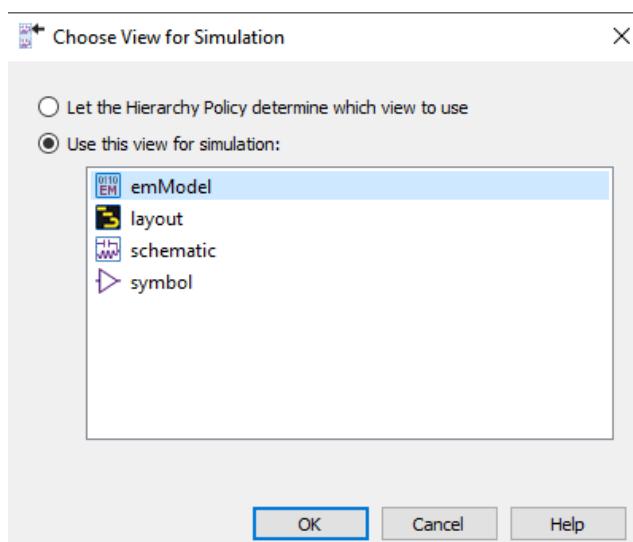
Приведем ее к следующему виду:

- отключим (удалим) MSub1, т.к. в ЕМ-анализе подложка берется из файла tech.subst.

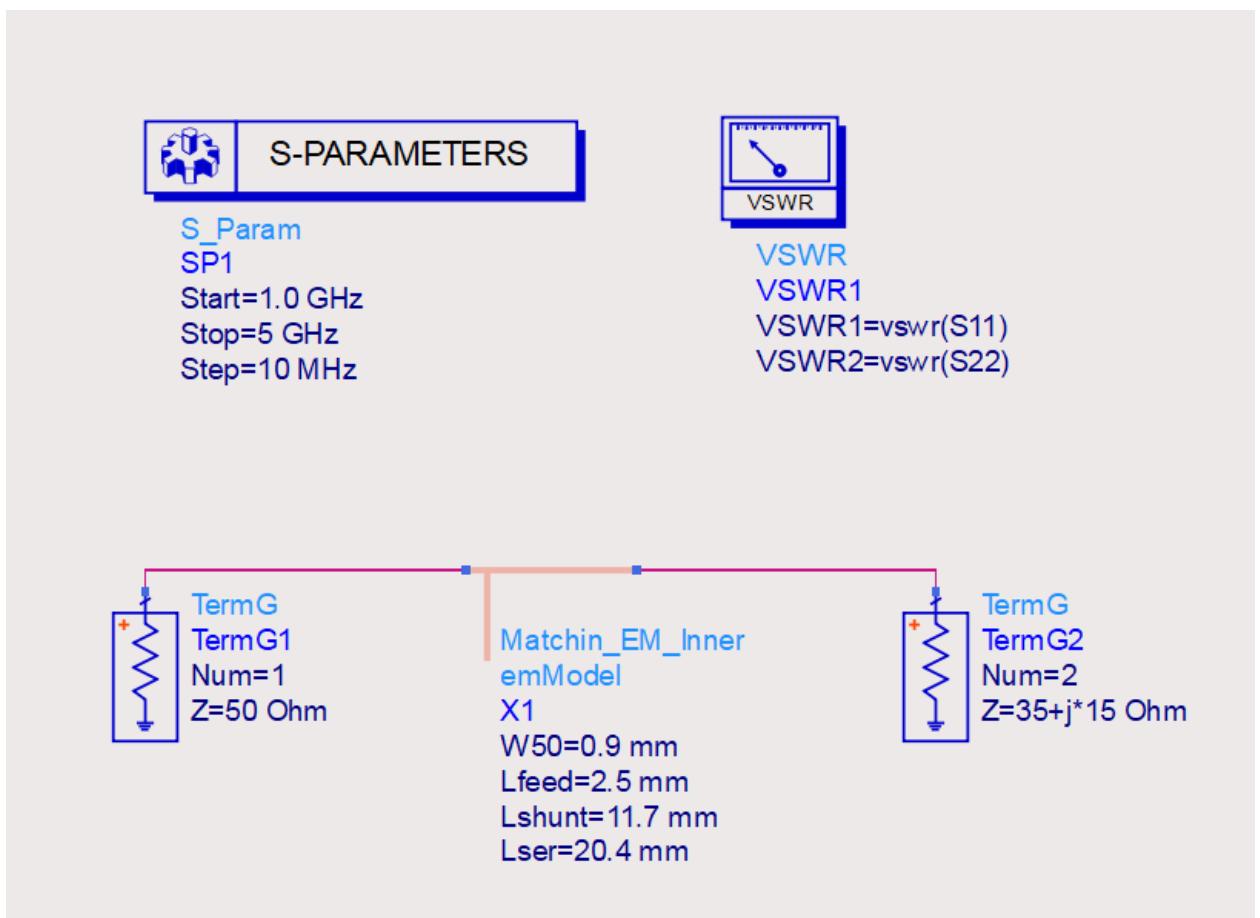
- отключим (удалим) блок переменных VAR, т.к. переменные в топологии передаются через переменные ячейки Matching_EM_Inner.

- у подсхемы топологии Matching_EM_Inner по ПКМ – Component –

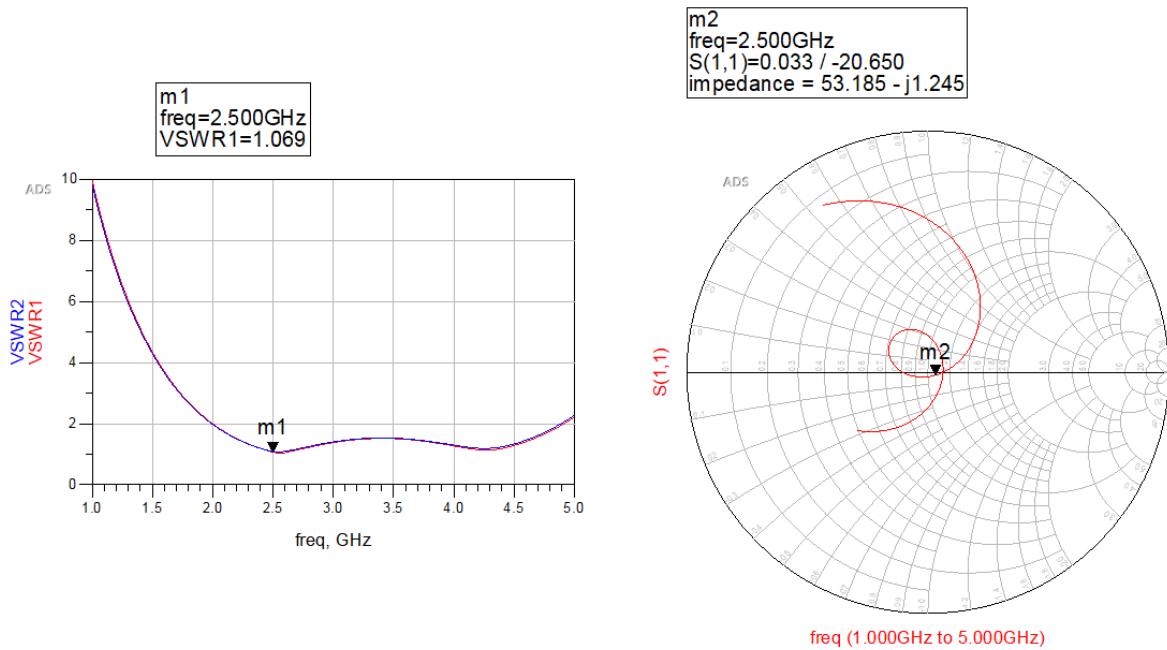
Choose View for Simulation  установим, что результаты надо брать из emModel.



Общий вид схемы Match_MLIN_EM получится следующий



Запускаем расчет на уровне верхней ячейки.



Согласование на центральной частоте чуть-чуть ушло, но практически незначимо.

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:

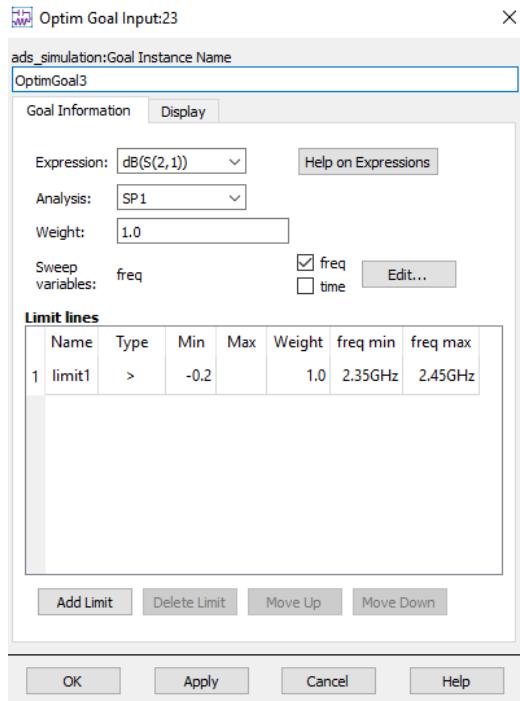
- VSWR1 и VSWR2 меньше 1,1 в частотном диапазоне 2,35-2,45ГГц.
Целям также нужно указывать, из какого контроллера симуляции они берут результаты (SP1)

The image displays two identical 'Optim Goal Input' dialog boxes side-by-side. Both dialogs have the following settings:

- ads_simulation:Goal Instance Name:** OptimGoal1 (left) and OptimGoal2 (right).
- Goal Information:** Expression: VSWR1 (left) or VSWR2 (right); Analysis: SP1; Weight: 1.0.
- Sweep variables:** freq (checkbox checked for both).
- Limit lines:** A table showing a single limit line for each goal.

Name	Type	Min	Max	Weight	freq min	freq max
1 limit1	<		1.1	1.0	2.35GHz	2.45GHz

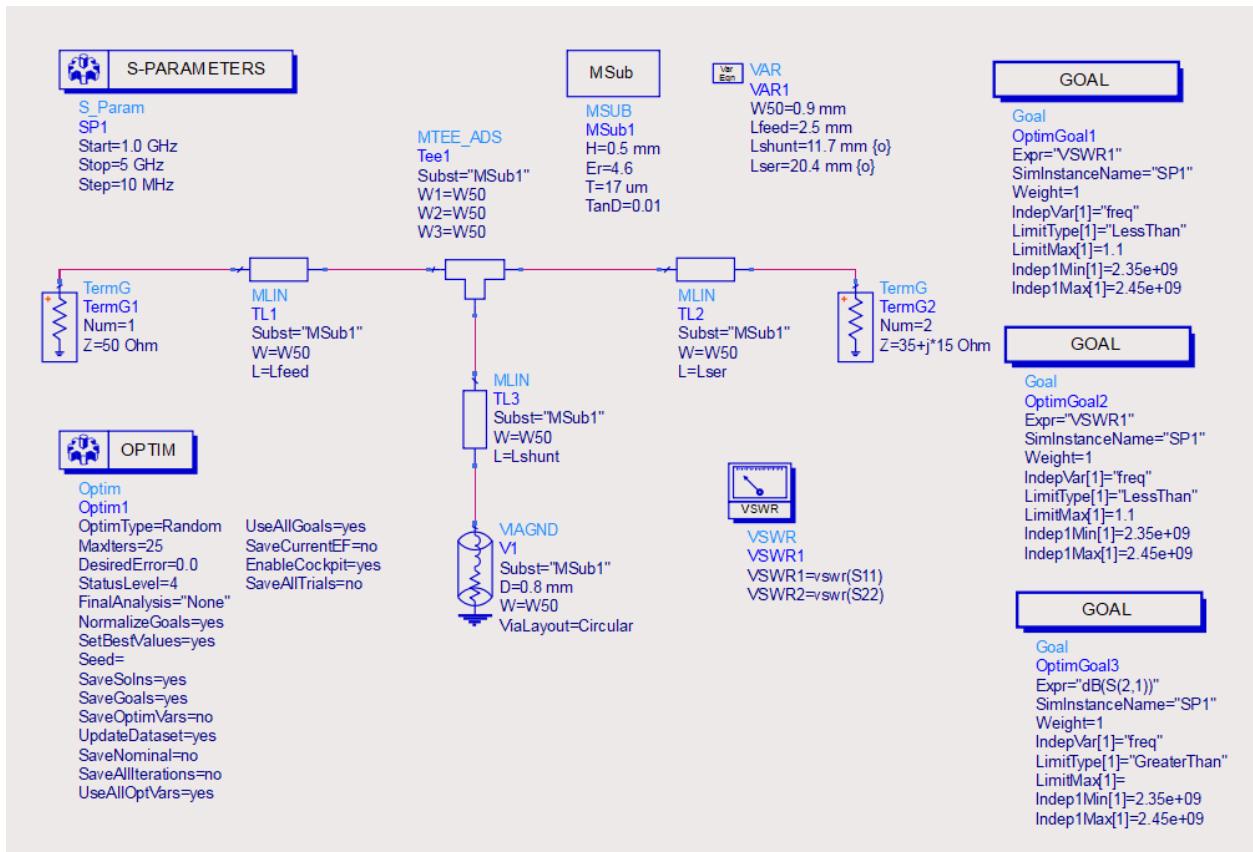
- dB(S(2,1)) >-0.2 в частотном диапазоне 2,35-2,45ГГц, контроллер симуляции SP1. Выражения «dB(S(2,1))» среди определенных на схеме нет, его нужно вписать самостоятельно.



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)

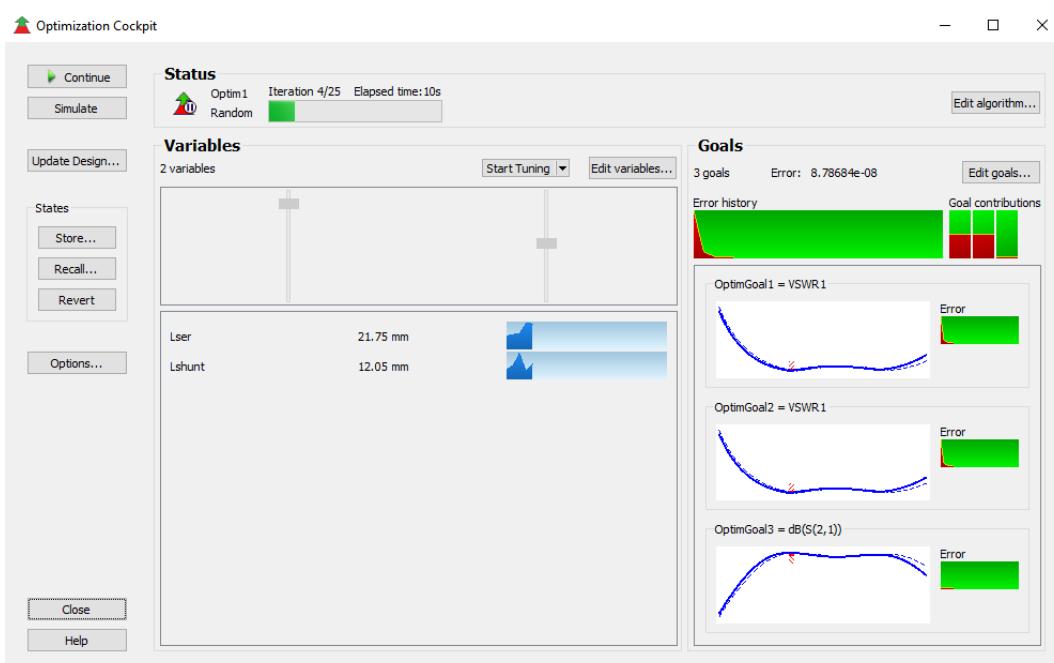
Simulation Variables Setup [Lab1_Intro.lib:Match_MLN_Sch_Optim:schematic]											
Name	Optimize	Value	Unit	Format	Min/+/-/+/-	Unit	Max	Unit	Step	Unit	
Lab1_Intro.lib:Match_MLN_Sch_Optim:schematic											
VAR1											
W50	<input type="checkbox"/>	0.9 mm		min/max							
Lfeed	<input type="checkbox"/>	2.5 mm		min/max							
Lshunt	<input checked="" type="checkbox"/>	11.7 mm		max/min/step	11 mm		13 mm		0.05 mm		
User	<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.

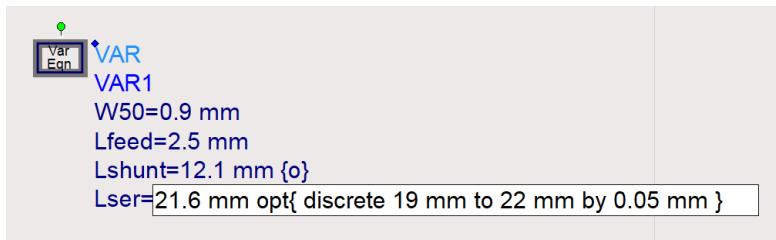


По кнопкам Start Tuning и Edit Variables можно вручную изменять значения переменных, в том числе допустимый диапазон. По кнопке Edit Goals можно подправить цели. По кнопке Edit algorithm можно сменить алгоритм оптимизации. Также доступно сохранение состояний (группа States).

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.

Статистический анализ выхода годных

Проведем статистический анализ выхода годных (Yield). Данный анализ позволяет понять, как ведет себя интересующий результат при случайному изменении параметров.

Оценим, как будет меняться КСВН и коэффициент передачи согласующей цепи и останутся ли они в допустимых пределах, если численные значения подобранных ранее длин и ширин линий могут случайно изменяться в некоторых пределах (пусть это будет нормальное распределение в пределах $\pm 0,05$ мм).

Как и при оптимизации, задается анализ выхода годных через три составляющие:



- Yield - контроллер анализа выхода годных (палитра Optim/Stat/DOE). Он контролирует сбор промежуточной информации и рассчитывает процент выхода годных.

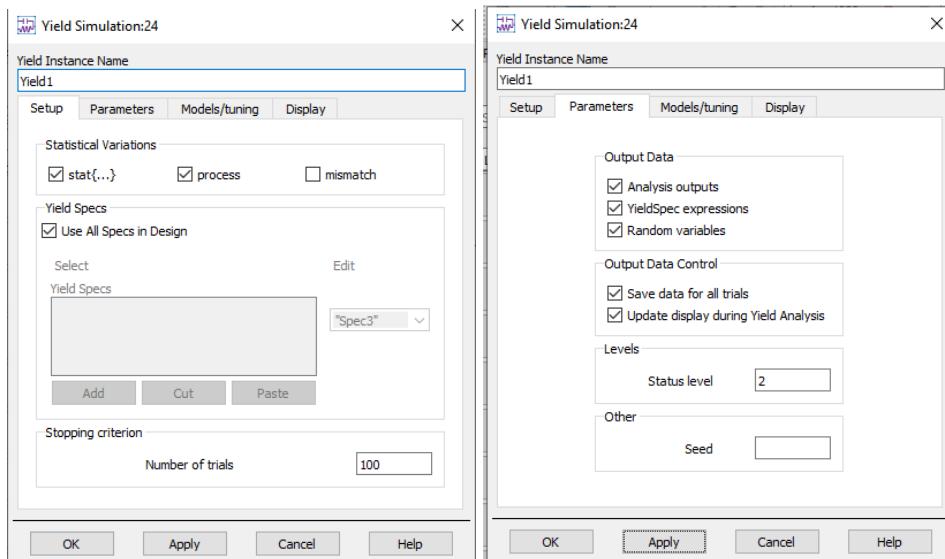


- YieldSpec - одно или несколько измерительных выражений и границы, в которых считается, что выражение выполняется (палитра Optim/Stat/DOE).

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

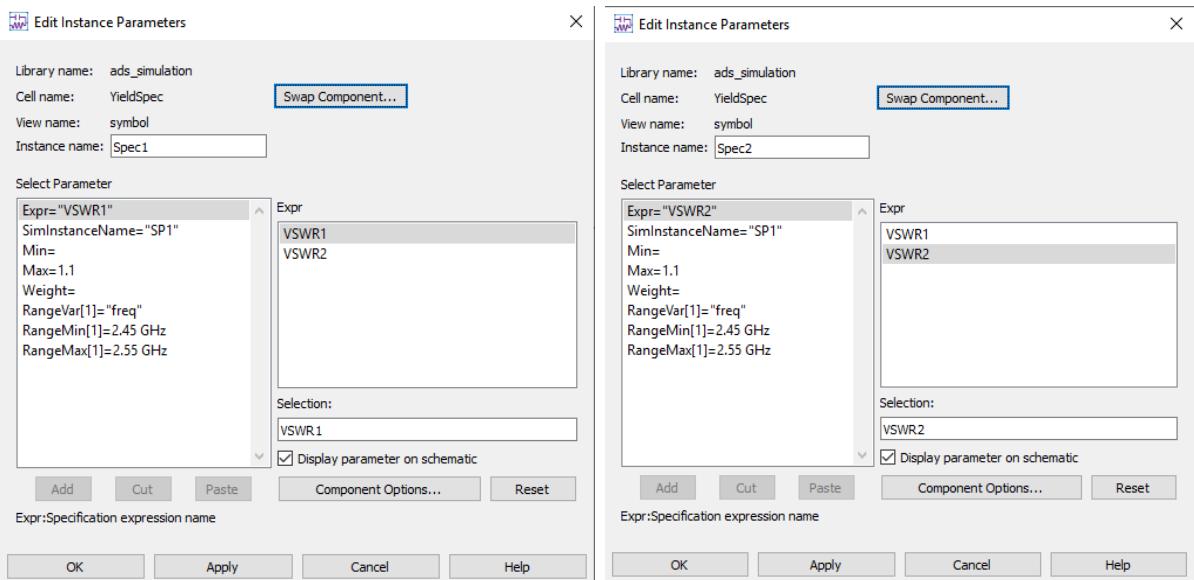
Создадим копию схемы Matching_MLIN_EM под названием Matching_MLIN_EM_Yield.

Настроим контроллер Yield. Количество попыток пусть будет 100. Дополнительно укажем, пусть для каждой попытки сохраняется результат.

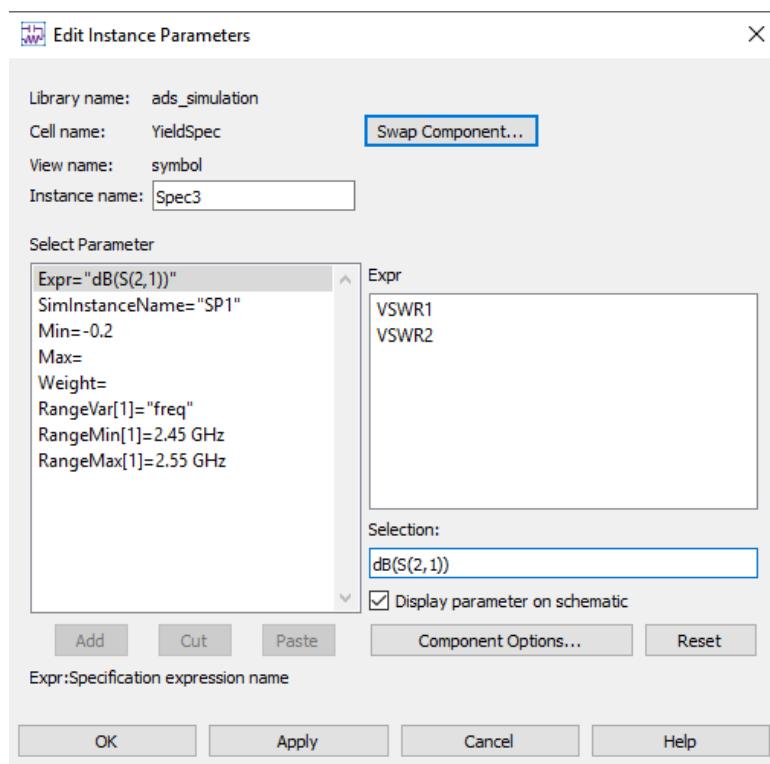


Спецификации YieldSpec укажем такие же, как и при оптимизации ранее.

VSWR1 и VSWR2, не более 1,1 в частотном диапазоне 2,45..2,55ГГц, данные берутся из симуляции SP1.



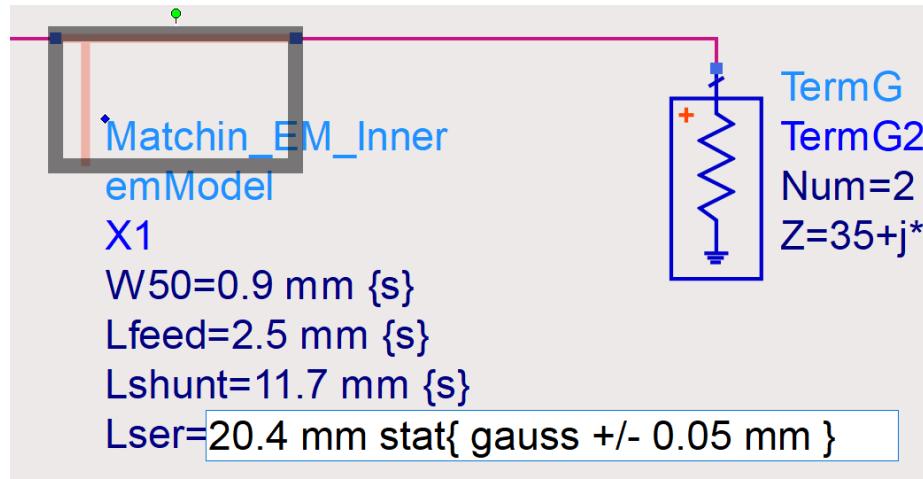
$\text{dB}(\text{S}(2,1)) >-0.2$ в частотном диапазоне 2,45..2,55 ГГц, контроллер симуляции SP1. Выражения « $\text{dB}(\text{S}(2,1))$ » среди определенных на схеме нет, его нужно вписать самостоятельно в поле Selection.



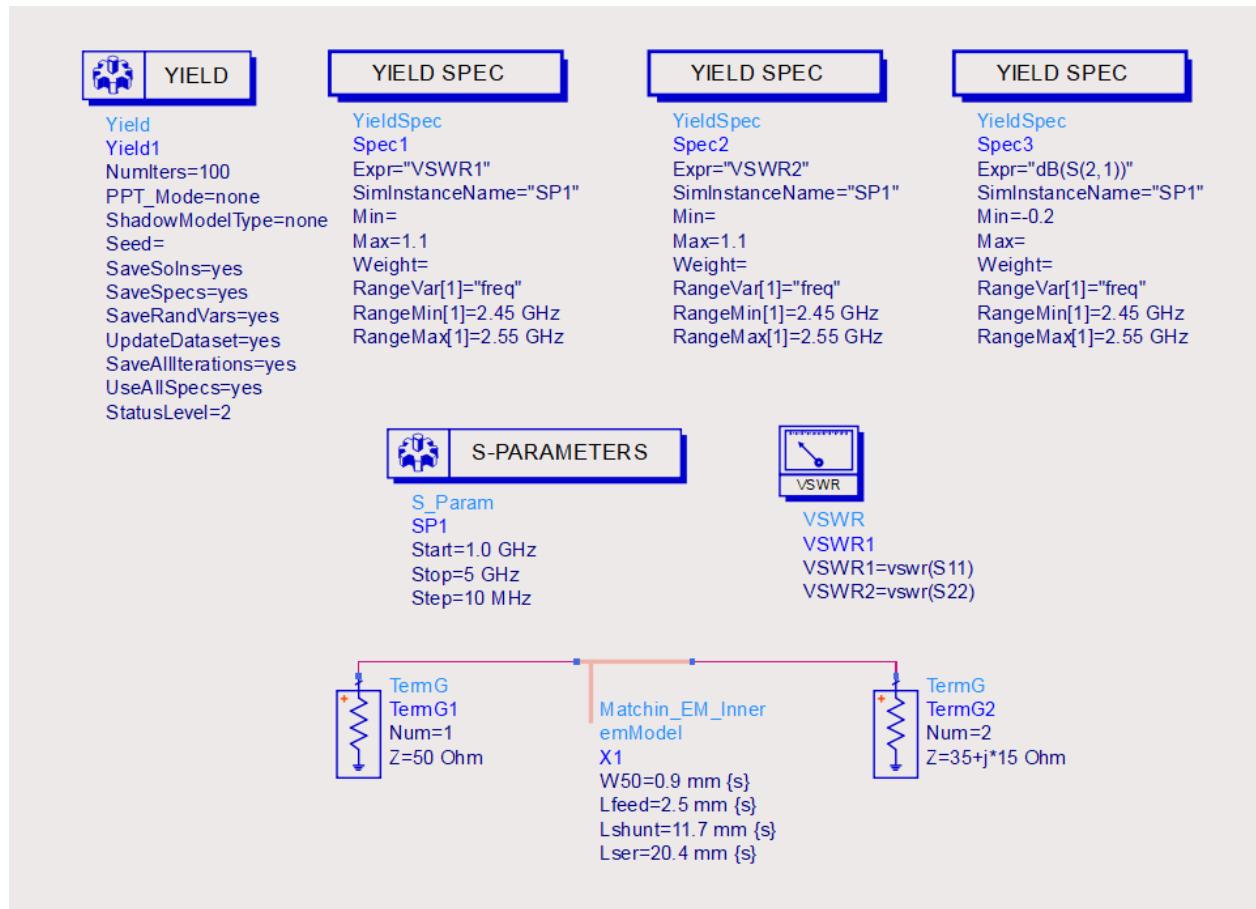
Разрешим переменным ячейки изменяться по нормальному распределению в пределах $\pm 0,05$ мм (показано в окне Simulation Variables Setup, вкладка Statistics)

Simulation Variables Setup [Lab1_Intro.lib:Match_MLN_EM_Yield:schematic]											
Tuning	Optimization	Statistics	DOE	Name	Stat	Value	Unit	Type	Format	Min/+/-/+	Unit
				Lab1_Intro.lib:Match_MLN_EM_Yield:schematic							
				X1	<input checked="" type="checkbox"/>	0.9	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm
				W50	<input checked="" type="checkbox"/>	2.5	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm
				Lfeed	<input checked="" type="checkbox"/>	11.7	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm
				Lshunt	<input checked="" type="checkbox"/>	20.4	mm	Gaussian	+/- stddev	0.05	mm
				Lser	<input checked="" type="checkbox"/>						
				TermG1	<input type="checkbox"/>	50	Ohm	Gaussian	+/- stddev		
				Z	<input type="checkbox"/>						

Также, как и при тюне или оптимизации, переменные разрешенные на статистическое изменение, получат в отображении на схеме суффикс {s}.



Общий вид схемы перед запуском следующий:



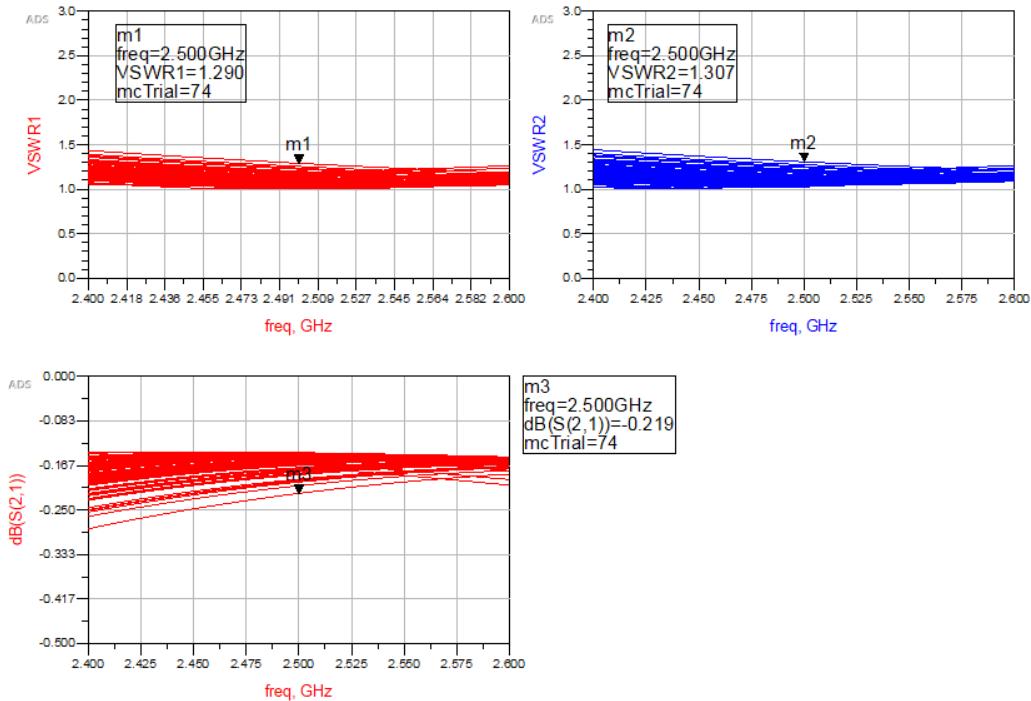
Запускаем расчет. Т.к. при данном расчете при каждом запуске расчета S-параметров будет запускаться подчиненный ЕМ-анализ, весь расчет будет идти довольно долго.

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

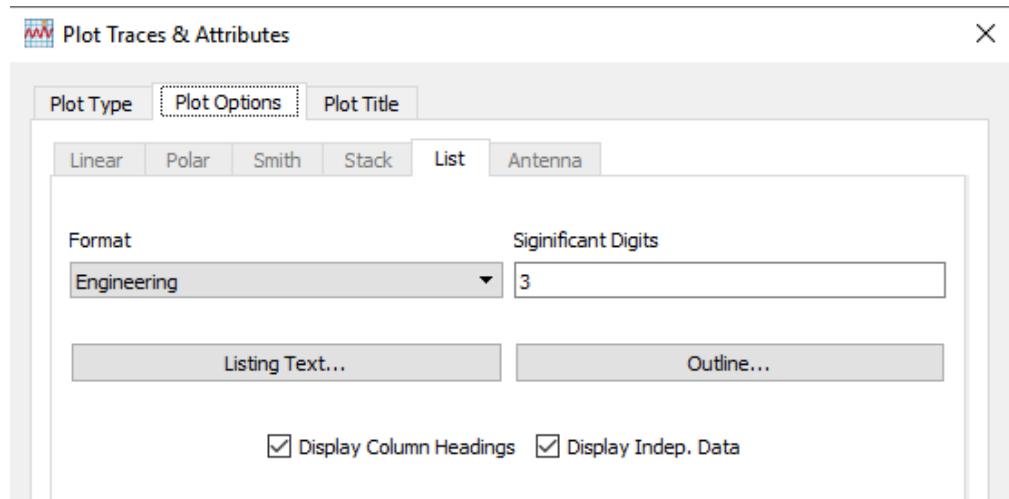
Yield	NumPass	NumFail
24.000	24.000	76.000

Получается успех всего в 24%. Это плохо, схема очень чувствительна к точности параметров. Надо проанализировать результаты, чтобы понять, в чем может быть причина проблемы.

Выведем значения VSWR1, VSWR2 и dB(S(2,1)). Они были сохранены для каждой из попыток. Поставим маркеры на самых плохих результатах.



По графикам видно, что это попытка №74 (значение mcTrial). Выведем таблицу со значениями параметров Lfeed, Lser, Lshunt и W50. Они будут выведены относительно номера попытки mcTrial. Численные значения выведем в инженерном формате (вкладка Plot Options, Format = Engineering).



Чтобы пролистать до нужной строки в таблице, можно по ПКМ – Scroll Data вызвать окно листания данных. Эти же команды расположены в тулбаре Data Scroll.



Пролистаем до mcTrial = 74.

mcTrial	Lfeed	Lser	Lshunt	W50
74	2.424 м	20.38 м	11.65 м	772.2 μ
75	2.537 м	20.41 м	11.77 м	953.1 μ
76	2.470 м	20.40 м	11.64 м	854.0 μ
77	2.470 м	20.34 м	11.64 м	951.8 μ
78	2.502 м	20.42 м	11.73 м	850.4 μ
79	2.605 м	20.40 м	11.69 м	797.1 μ
80	2.557 м	20.41 м	11.67 м	849.7 μ
81	2.553 м	20.41 м	11.66 м	876.8 μ
82	2.471 м	20.39 м	11.74 м	895.7 μ
83	2.473 м	20.30 м	11.73 м	937.8 μ
84	2.478 м	20.40 м	11.68 м	990.7 μ
85	2.512 м	20.43 м	11.72 м	848.3 μ
86	2.491 м	20.44 м	11.65 м	819.8 μ
87	2.508 м	20.30 м	11.63 м	930.7 μ
88	2.563 м	20.45 м	11.66 м	954.3 μ

Видно, что по отношению к номинальным размерам в самой плохой попытке №74 сильнее всего изменилось значение W50 (772 мкм вместо номинального 900 мкм). Можно сделать осторожный вывод, что результаты сильнее всего зависят от точности установки W50. Проверим это предположение.

Для этого используем функцию гистограммы чувствительности `histogram_sens()`. Она формирует подготовленные для отображения в виде гистограммы данные. Имеет следующий синтаксис:

```
y = histogram_sens(data, sensitivityVar, goalMin, goalMax, innermostIndepLow,  
innermostIndepHigh, numBins)
```

где `data` – результат для анализа (действительного типа);

`sensitivityVar` – переменная, зависимость по которой надо посчитать;

`goalMin` – минимальное значение результата, при котором он считается подходящим;

`goalMax` – максимальное значение результата, при котором он считается подходящим;

`innermostIndepLow` – нижняя граница независимой переменной результата, позволяет, например, выбрать частотный поддиапазон;

`innermostIndepHigh` – аналогично, верхняя граница независимой переменной результата;

`numBins` – число столбиков (бинов) гистограммы.

Т.к. надо поисследовать поведение трех результатов (VSWR1, VSWR2 и dB(S(2,1))) по четырем переменным (Lfeed, Lser, Lshunt и W50), то чтобы не писать 12 больших выражений и делать 12 графиков, определим запрос через дополнительные переменные.

Первый результат для отображения путь будет VSWR1. Он приемлемый, если попадает в диапазон 1..1,1. Частотный поддиапазон у всех результатов интересует одинаковый – 2,45..2,55 ГГц. Число бинов гистограммы пусть будет 10.

`Eqn SensData=VSWR1`

`Eqn SensYieldMin=1`

`Eqn SensYieldMax=1.1`

`Eqn NumBins=10`

`Eqn freqMin=2.45GHz`

`Eqn freqMax=2.55GHz`

Пишем четыре выражения для зависимости от каждой из переменных:

```
Eqn SensDataverLfeed=histogram_sens(SensData,Lfeed,SensYieldMin,SensYieldMax,freqMin,freqMax, NumBins)
```

```
Eqn SensDataverLser = histogram_sens(SensData,Lser,SensYieldMin,SensYieldMax,freqMin,freqMax, NumBins)
```

```
Eqn SensDataverLshunt=histogram_sens(SensData,Lshunt,SensYieldMin,SensYieldMax,freqMin,freqMax, NumBins)
```

```
Eqn SensDataverW50=histogram_sens(SensData,W50,SensYieldMin,SensYieldMax,freqMin,freqMax, NumBins)
```

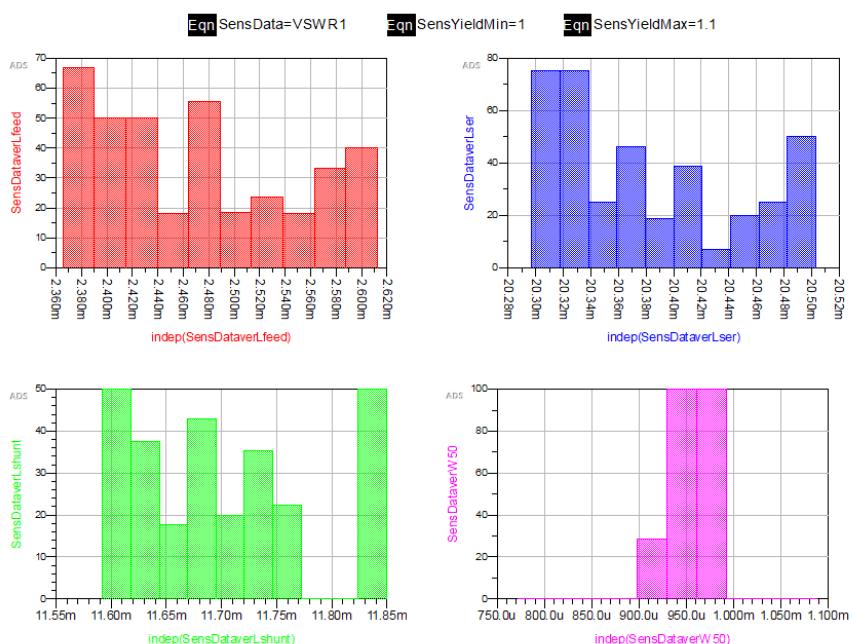
И строим четыре прямоугольных графика в формате гистограмм.

Как читать данные с гистограмм чувствительности:

- В случае, если значение гистограммы чувствительности практически одинаково для всех значений переменной - это как правило означает, что приемлем или не приемлем результат, практически не зависит от этого значения переменной, а определяется комбинацией других переменных.

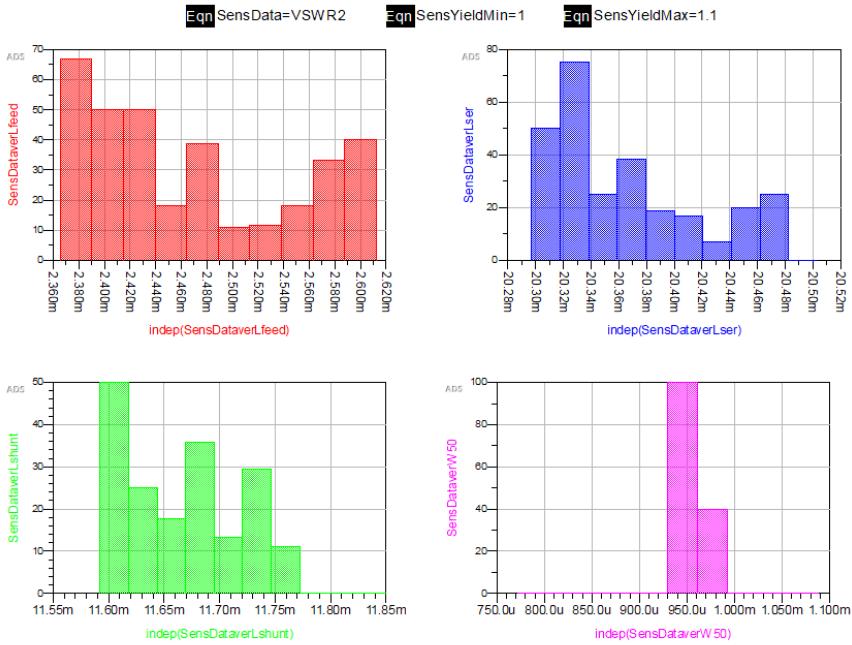
- Там, где значение гистограммы близко к 0% или к 100% это значит есть чувствительность по данной переменной. Особенно это хорошо видно, если гистограмма собирается в горб или провал.

- Надо учитывать, у нас всего было 100 попыток, это вообще-то маловато для построения приличной статистической модели, поэтому возможны локальные отклонения и перекосы.



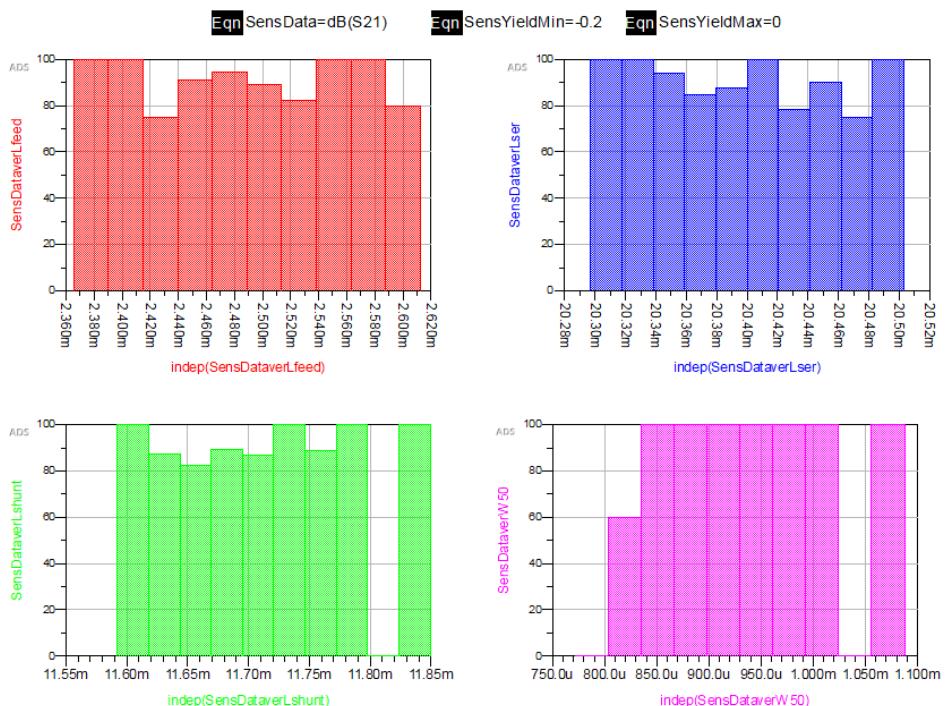
Видно, что попадание VSWR1 в диапазон 1..1,1 практически не зависит от Lfeed (что логично) и слабо зависит от Lser и Lshunt. Сильнее и очевиднее всего зависит от W50, при этом 100% результат собирается вокруг значения W50 = 0,95 мм (т.е. значения остальных параметров в их допустимых пределах становятся не важны). Ранее выбранное значение W50 = 0,9 мм оказалось не самым правильным (по крайней мере для VSWR1).

Повторим для VSWR2. Оно также может быть в диапазоне от 1 до 1,1.



Видно, что зависимость от Lfeed отсутствует. Зависимость от Lser слабая, центр гистограммы смещается в сторону 2,35 мм. Зависимость от Lshunt непоказательна, т.к. успех 50% или менее; скорее всего не хватает числа попыток. И опять, очень сильная зависимость от W50, при значении W50 = 0,95 мм 100% результат собирается вокруг него.

Окончательно, посмотрим на гистограммы чувствительности dB(S21), диапазон приемлемости –0,2..0 дБ.



Здесь сразу видно, что dB(S21) почти всегда попадает в заданный диапазон, успех близок к 100% при любых вариациях Lfeed, Lser, Lshunt и почти любых W50. Можно сказать, что выбранные значения Lfeed, Lser, Lshunt и W50 с выбранной точностью выполняют требования по dB(S21).

Исходя из полученных выводов, получается, что надо изменить W50 на 0,95 мм. И еще раз провести анализ чувствительности, но теперь с учетом нового номинального W50.

Применение различного вида статистических анализов (мы выполнили анализ выхода годных и еще провели анализ чувствительности) позволяет оценить устойчивость решения, найденного до этого оптимизацией или тюном. В большинстве задач проектирования как правило нет одного точного абсолютного решения, при проектировании находится какое-то одно из миллионов возможных, и далеко не факт, что самое удачное. И всегда после проектирования нужно оценивать, насколько устойчиво найденное решение к разным нестабильностям и неточностям.

Использование инструмента SmithChart

Дополнительно покажем, как пользоваться инструментом SmithChart для проектирования согласующих цепей на идеальных компонентах.

Запускается данный инструмент по команде Tools – Smith Chart.

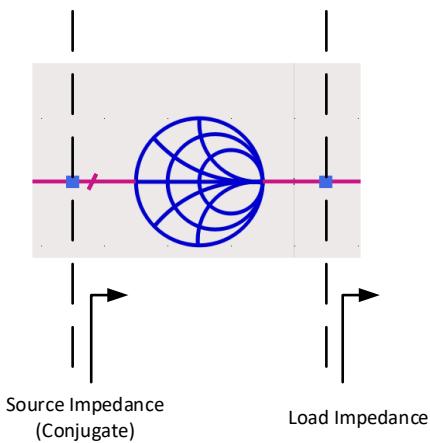
В открывшемся окне изначально надо задать следующие настройки:

- 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, ZS* - это входной импеданс согласующей цепи, а ZL – импеданс нагрузки, на которую подключают согласующую цепь. Если даны импеданс источника или желаемый выходной импеданс согласующей цепи, то эти данные надо комплексно-сопрягать.



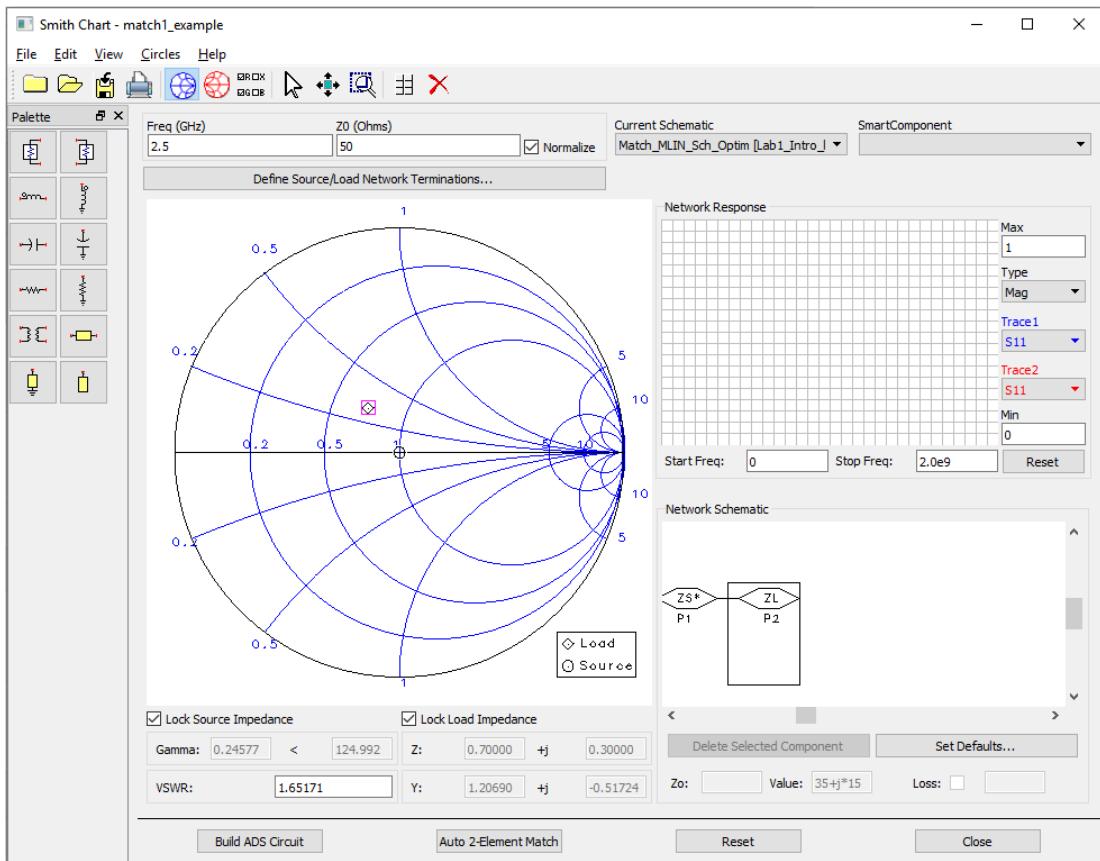
Известно, что любой точке на диаграмме Смита соответствуют несколько взаимно однозначных значений – коэффициент отражения (поле Gamma в виде амплитуда/фаза в градусах), нормированные относительно заданного в поле Z0 импеданса и проводимости (поля Z и Y в форме Re/Im). Для любой точки также показывается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

Для текущей задачи:

ZS^* - $Z_0=50$, центр диаграммы Смита (или эквивалентно $\Gamma = 0$, $Z=1+j0$ или $Z=1+j0$).

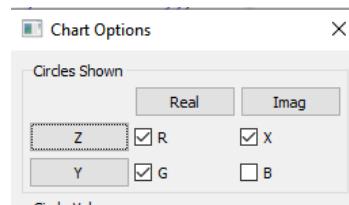
ZL соответствует сопротивлению нагрузки, в поле Value введём $35+j*15$.

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

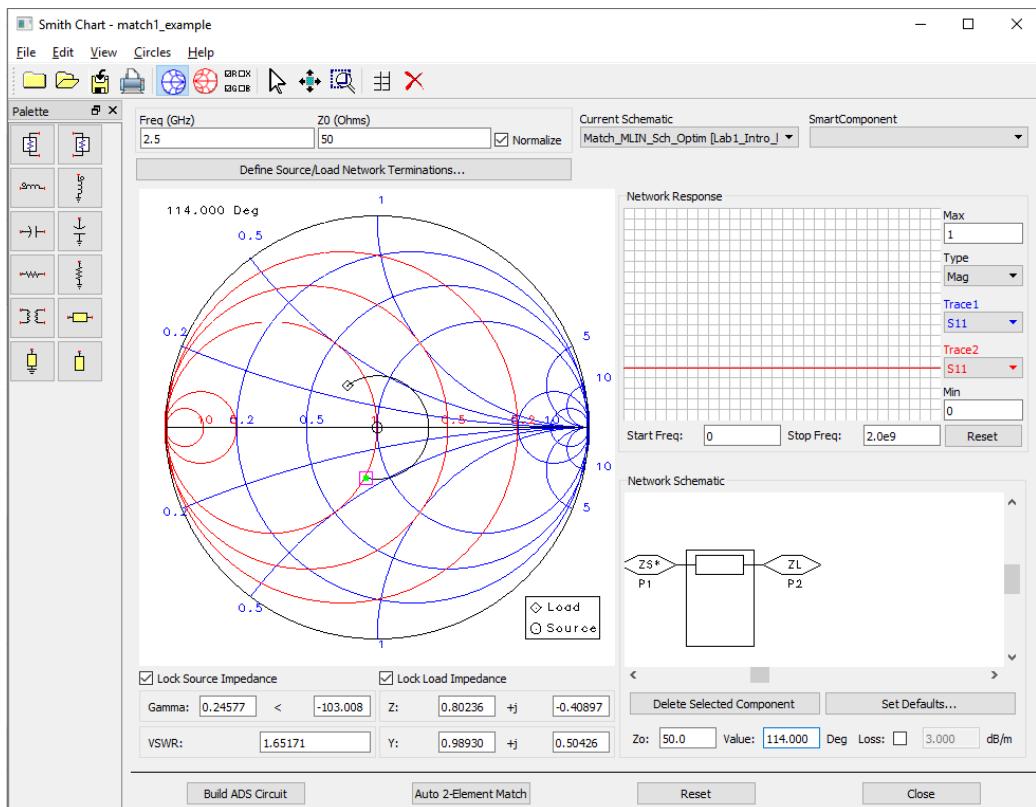


Идеальные компоненты добавляются из палиты. При их добавлении графика рисуется в сторону генератора от нагрузки. Шлейфы по умолчанию добавляются с волновым сопротивлением нормировки схемы (50 Ом в примере).

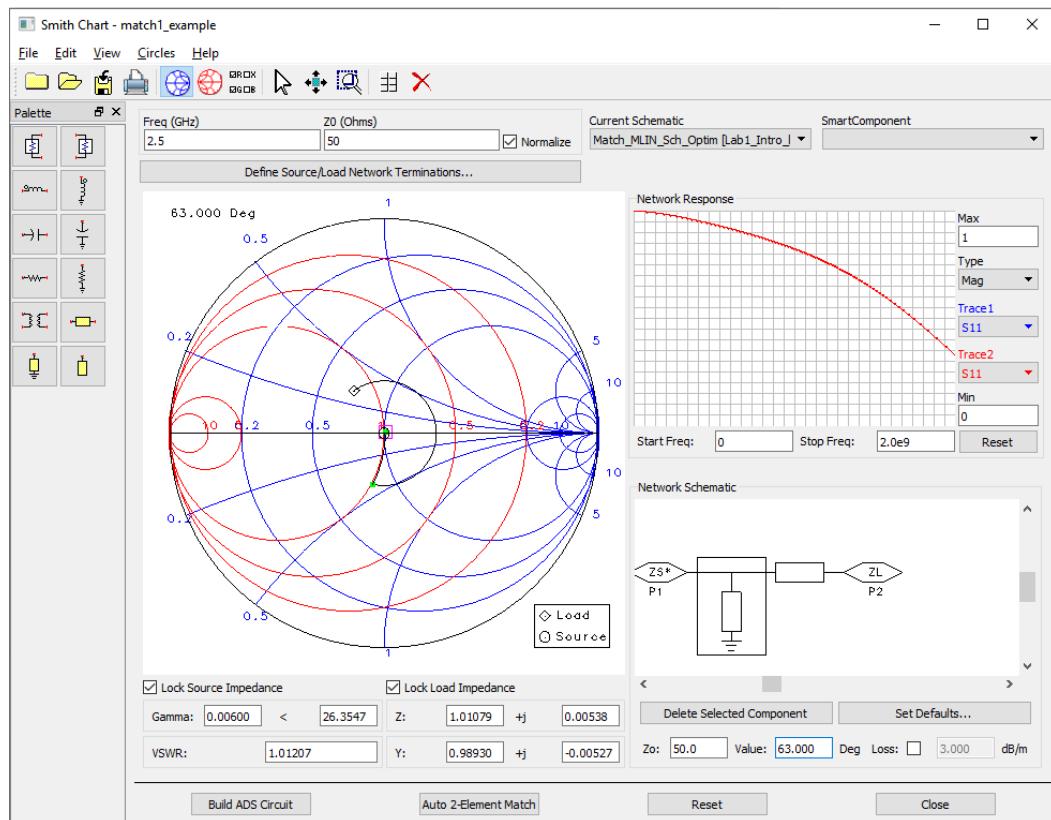
Сначала добавим последовательную линий передачи . После добавления появится дуга вокруг центра (т.е. ее волновое сопротивление 50 Ом). Точку поставим приблизительно на линии постоянного $y=1$ (т.к. короткозамкнутый шлейф при подключении на 50 Ом-ную линию движется по линии $y=1$). Для отображения линии $y=1$ 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).

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

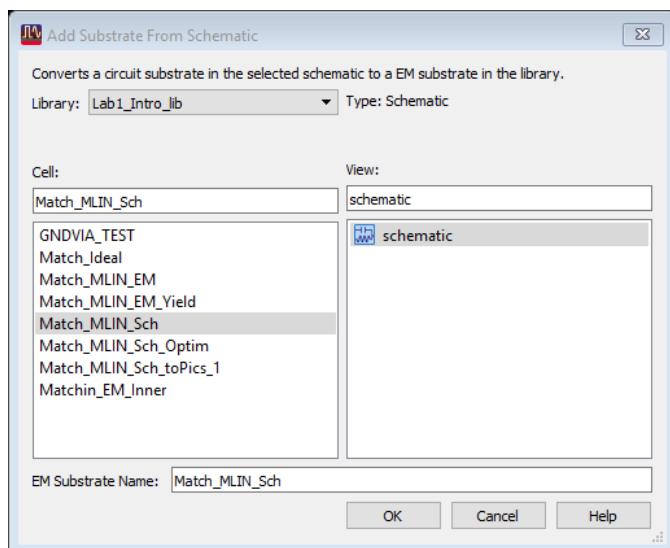
Сеанс в SmithChart можно сохранить на будущее.

Также, 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.

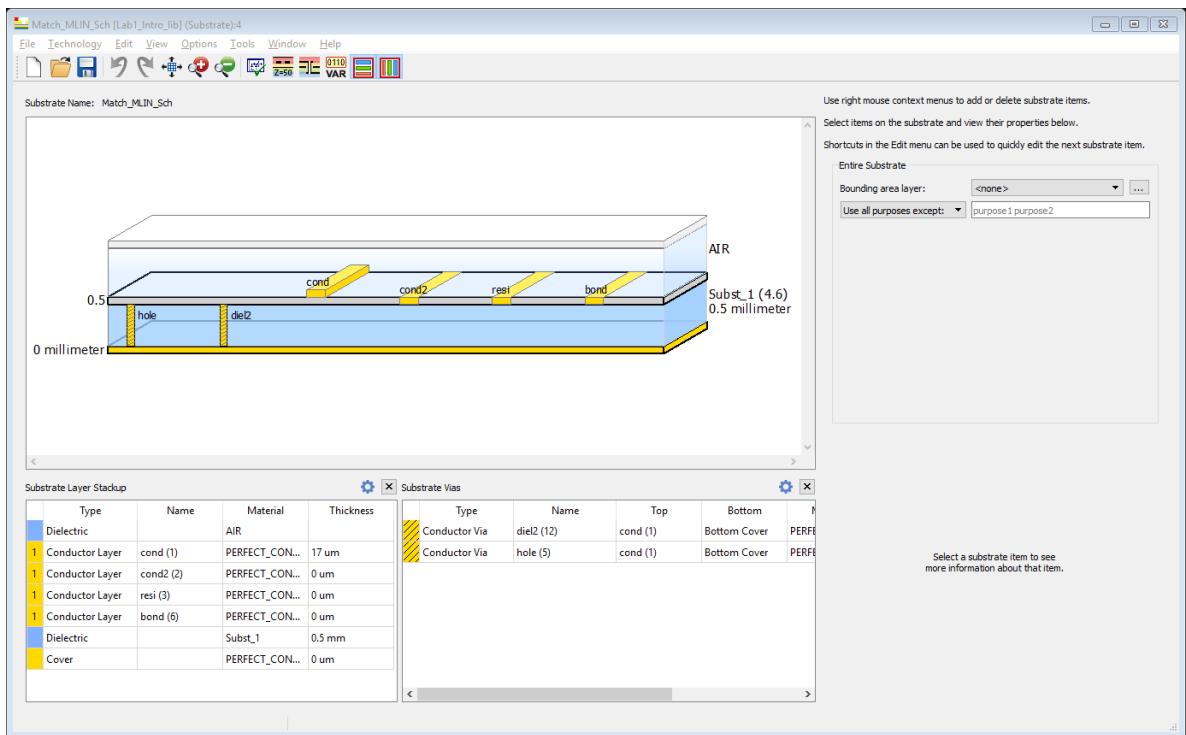
Быстрое создание определения подложки из MSUB

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

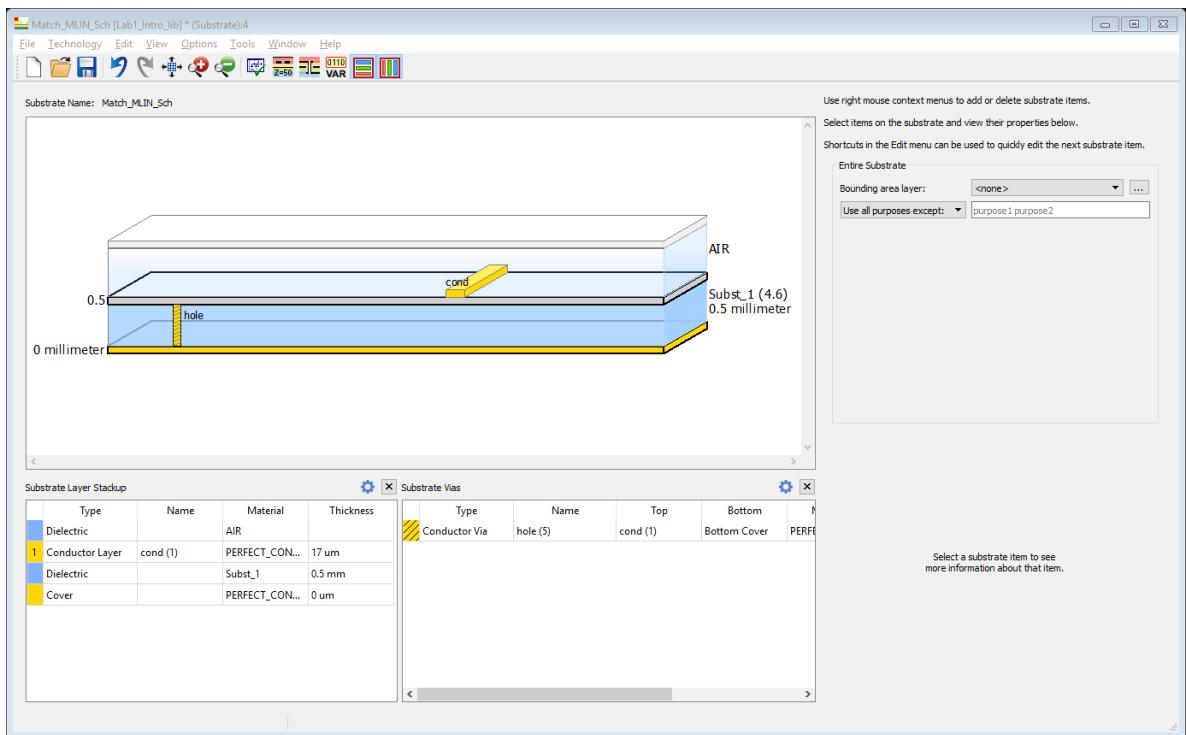
В основном окне ADS команда File – Import – Substrate From Schematic. Откроется окно всех ячеек текущего проекта (и других подключенных библиотек). В этом окне выбираем ячейку, в которой находится MSUB.



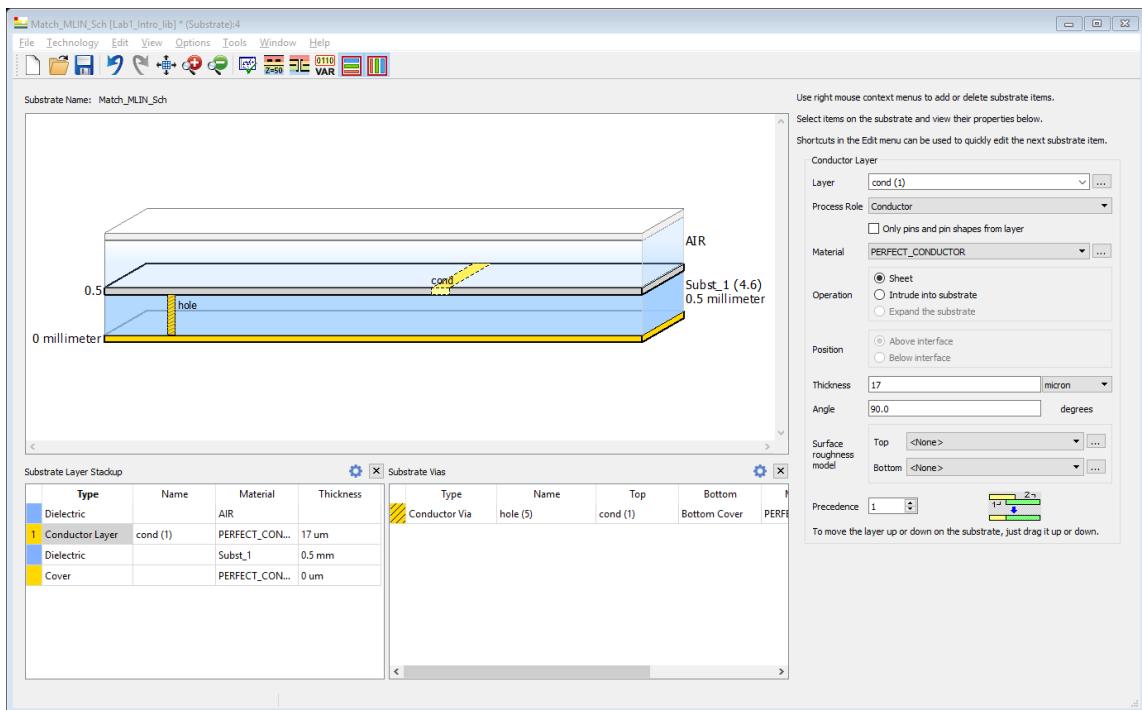
Откроется окно редактора определения подложки. Немного подчистим полученное определение.



Удалим слои cond2, resi, bond и отверстие die12.



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



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_Intro.lib										
Conductors			Dielectrics			Semiconductors			Surface Roughness	
Material			Permittivity (Er)			Permeability (MuR)			Djordjevic	
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary	Type	TanD Freq	Low Freq	Hi
Air	Lab1_Intro.lib	1.0			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
Alumina	Lab1_Intro.lib	9.6			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
FR_4	Lab1_Intro.lib	4.6		0.01	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 TH
FR_4 Imported	Lab1_Intro.lib	4.6		0.01	1	0	Frequency Independent			

Данная подложка сохраняется как обычное определение ЕМ-подложки (только для ЕМ-моделирования), которых в пределах проекта может быть несколько. Чтобы использовать ее как технологическую подложку (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.

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.

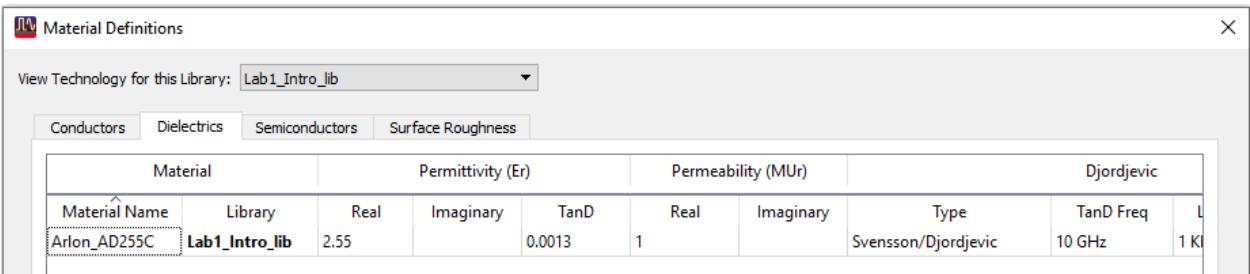
Таблица 3. Варианты заданий

№ Варианта	1	2	3	4	5
Центральная частота F_c , ГГц	9,5	6,5	5	6	4,7
Импеданс источника Z_S , Ом	50	$35-j10$	50	$65+j18$	50
Импеданс нагрузки Z_L , Ом	$25+j10$	50	$75-j25$	50	$30-j15$
Параметры подложки	Именование материала	RO3006	RO3006	RO4003C	RO4003C
	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , ед.	6,15	6,15	3,55	3,55
	Тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta$, ед.	0,0025	0,0025	0,0026	0,004
	Толщина диэлектрика h , мм	0,25	0,64	0,813	0,508
	Толщина металлизации t , мкм	17	35	35	17

Таблица 3. Продолжение

№ Варианта	6	7	8	9	10
Центральная частота Fс, ГГц	4,9	6,2	4,1	2,5	4,4
Импеданс источника ZS, Ом	18-j7	50	80-j25	50	65-j15
Импеданс нагрузки ZL, Ом	50	70+j30	50	35+j7	50
Параметры подложки	Именование материала	RO4350B	RO3003	RO3003	RO3010
	Относительная диэлектрическая проницаемость Er, ед.	3,66	3,0	3,0	10,2
	Тангенс угла диэлектрических потерь TanD, ед.	0,004	0,0013	0,0013	0,0025
	Толщина диэлектрика h, мм	0,508	0,76	1,52	1,28
	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. Согласующая цепь на идеальных линиях передачи (ячейка Matchin_Ideal).

1.1. 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.

1.2. 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.

1.3. 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 1,1, а коэффициент передачи dB(S21) не менее $-0,2$ дБ.

2. Согласующая цепь в микрополосковом исполнении на схемном уровне (ячейка Matching_MLIN_Sch).

2.1. Создать схему согласующей цепи в микрополосковом исполнении на основании результатов, полученных в п.1.

- Для расчета геометрических размеров микрополосков использовать инструмент LineCalc.

- Компоненты брать из палитры TLines-Microstrip.

- Параметры подложки брать из таблицы 3.

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

- 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).

2.2. Провести моделирование в режиме S-параметров.

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

- 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 1,1, а коэффициент передачи dB(S21) не менее $-0,2$ дБ.

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

3. Согласующая цепь в микрополосковом исполнении на топологическом уровне (ячейка верхнего уровня Matching_MLIN_EM и подсхема Matching_EM_Inner).

3.1. Создать параметризованную топологию согласующей цепи в микрополосковом исполнению с использованием результатов п.2.

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

3.2. Провести ЕМ-моделирование топологии.

- Метод моделирования брать Momentum Microwave.
- Результаты хранить с использованием emModel.
- Если расчет идет долго, то верхнюю границу диапазона частот моделирования можно сократить $F_c + 20\%$.
- Сравнить результаты с результатами п.2.
- Результаты контролировать в диапазоне частот $F_c \pm 2\%$.
- Считать, что согласующая цепь выполняет свою задачу, если КСВН по входу и по выходу не более 1,1, 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. Анализ выхода годных (ячейка верхнего уровня Matching_MLIN_EM_Yeld, использует созданную ранее подсхему Matching_EM_Inner).

4.1. Подготовить схему для исследования топологии статистическим анализом выхода годных.

- Считать, что линейные размеры могут иметь погрешность $\pm 0,05$ мм, распределенную нормально.

- Модель для исследования брать в топологическом представлении.

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

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

4.2. По результатам статистического моделирования провести анализ результатов.

- Если топология имеет процент выхода годных (Yield) меньше 100%, то провести анализ гистограммой чувствительности по параметрам и выработать рекомендации для получения более устойчивого решения.

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

Требования к отчёту

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

- Титульный лист, с наименованием работы, указанием исполнителя и даты выполнения.

- Цель (-и) работы.

- Список использованных инструментов в лабораторной работе.

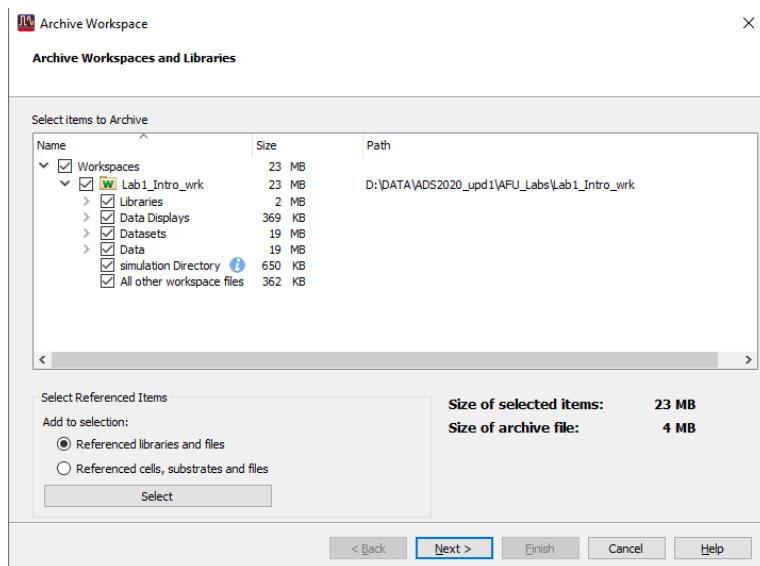
- Разделы работы, которые рекомендовано формировать в соответствии с этапами выполнения (аналогично методике и заданию на выполнение).

- Для каждого этапа необходимо привести все выполненные расчеты, подготовленные модели, результаты и анализ результатов.

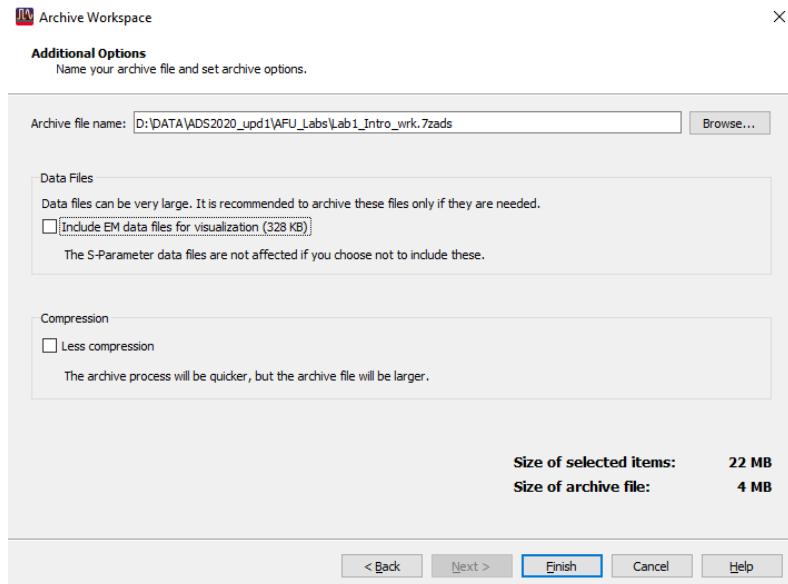
Подробность описания этапов выполненной работе студент определяет самостоятельно. Самое простое правило, которому надо следовать – человек, незнакомый с выполненной работой (но знакомый с использованным инструментом) должен быть в состоянии по отчету повторить данную работу и понять, что в ней происходит.

Готовый отчет необходимо 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_Lab_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 БДЗ.

Контрольные вопросы

//TODO

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. Курушин, А. А. Моделирование цифровых потоков радиосвязи в среде ADS/Ptolemy / А. А. Курушин, А. О. Мельников. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. — 184 с. — ISBN 5-98003-204-5 . — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/13705> (дата обращения: 02.02.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Перечень ресурсов сети «Интернет»

3. Сборник примеров работы в ADS «ADS Example Book: Focused on RF and Microwave Design», доступен после свободной регистрации <https://www.keysight.com/main/editorial.jspx?cc=RU&lc=rus&ckey=2704333&id=2704333&cmpid=zzfindeesof-ads-rfmw-examples>

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

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

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

Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

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

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

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

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.