

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 №6/3

«Проектирование микрополосковых фильтров. Умные компоненты типа DG в ADS»

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

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

Москва, Зеленоград

2025

Оглавление

Оглавление.....	2
Введение.....	2
Теоретические сведения	3
Методика выполнения работы.....	4
Создание проекта	4
Выбор ВЧ-подложки и топологии фильтра.....	4
Создание предварительной схемы с помощью умного компонента Passive Circuit DesignGuide...7	
Топологический компонент Filter_RTaper.....	13
Схемная оптимизация.....	23
ЕМ-анализ средствами и тонкая подстройка.....	26
Экспорт фильтра и результатов	31
Задание на выполнение.....	34
Требования к отчёту.....	34
Задание на самостоятельную работу.....	35
Контрольные вопросы	35
Литература	35



Введение

Цель работы: ознакомиться с маршрутом проектирования микрополосковых фильтров в среде Keysight Advanced Design System.

Используемое оборудование или ПО: материал подготовлен на основании версии Keysight ADS 2024. Однако, в работе не используются никакие специфичные для данной версии инструменты.

Продолжительность работы: 4 часа.

В разделе «Методика выполнения» приведены только необходимые действия по выполнению лабораторной работы. Подробно описываются только новые приемы работы в ADS. Предполагается, что студент выполнил предыдущие лабораторные работы.

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

Теоретические сведения

//TODO

Методика выполнения работы

Один из возможных маршрутов проектирования микрополосковых фильтров в ADS предполагает использование умных компонентов Passive Circuit DesignGuide. Однако, данный маршрут в ADS не доведен до логического конца и понадобится провести некоторый объем ручной работы. В общем виде типовой маршрут работы проектирования микрополосковых фильтров обычно следующий:

1. Создание исходной структуры фильтра, можно с использованием умных компонентов типа Passive Circuit DesignGuide.
2. Оптимизация на схемотехническом уровне.
3. Тонкая подстройка на топологическом уровне (ЕМ-анализ).
4. Экспорт результатов (топологии и S-параметров) для последующего использования в основном проекте.

Создание проекта

Lab1

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

- В качестве библиотеки слоев необходимо дополнительно к библиотеке назначения слоев схемы «ads_schematic_layer» выбрать «ads_standard_layers» (назначение топологических слоев).

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

Определение подложки будем вносить позднее, после ее выбора.

Выбор ВЧ-подложки и топологии фильтра

ВЧ-подложки рекомендовано выбирать массово распространенные. Нужно помнить, что часто ВЧ-подложку нужно выбирать не только для синтеза микрополосковых фильтров, но и для проектирования ячеек целиком. Также перед тем, как остановиться на конкретной подложке, стоит оценить ее применимость для текущего частотного диапазона, в том числе:

- рекомендовано отношение ширины 50 Ом/длине 90° порядка $1/5..1/20$, что даст возможность поиграться с размерами и схемотехническое моделирование будет близко к ЕМ-анализу;

- уменьшение толщины приводит к уменьшению ширины 50 Ом, что упрощает согласование компонентов, но при этом приводит к увеличению

погонных потерь. Также это может приводить к невозможности проектирования некоторых полосковых устройств, т.к. большие волновые сопротивления становятся нереализуемыми по ширине (меньше допустимого по техпроцессу);

- стоит учитывать доступные на текущий момент технологические нормы, в том числе минимальный зазор/минимальная ширина полоска 0,1 мм/0,1 мм;

- не стоит брать подложки типа керамики, поликора, сапфировых стекл и их аналогов, т.к. данные подложки плохо (или даже вообще невозможно) поддаются сверлению и полноценные печатные платы для ячейки целиком на них сделать не получится.

Доступные к покупке массово распространенные ВЧ-подложки на текущий момент это:

- RO4003C ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan \delta = 0,0026$), доступные толщины 0,203 мм (8 mil), 0,305 мм (12 mil), 0,406 мм (16 mil), 0,508 мм (20 mil), 0,813 мм (32 mil) и 1,524 мм (60 mil) [3];

- RO4350B ($\epsilon_r = 3,66$, $\tan \delta = 0,004$), доступные толщины 0,101 мм (4 mil), 0,168 мм (6,6 mil), 0,254 мм (10 mil), 0,338 мм (13,3 mil), 0,422 мм (16,6 mil), 0,508 мм (20 mil), 0,762 мм (30 mil) и 1,524 мм (60 mil) [3];

- RO4360 ($\epsilon_r = 6,15$, $\tan \delta = 0,0038$), доступные толщины 0,203 мм (8 mil), 0,406 мм (16 mil), 0,508 мм (20 mil), 0,61 мм (24 mil), 0,813 мм (32 mil) и 1,524 мм (60 mil) [4];

- RO3003 ($\epsilon_r = 3$, $\tan \delta = 0,0013$), доступные толщины 0,13 мм (5 mil), 0,25 мм (10 mil), 0,5 мм (20 mil), 0,75 мм (30 mil) и 1,52 мм (60 mil) [5].

Стандартные толщины металлизаций - 17 мкм (0,5 os) и 35 мкм (1 os).

Для других подложек могут быть иные доступные толщины.

Для указанных подложек есть аналоги от других производителей (табл. 1). Но надо учитывать, что взаимозаменяемость идет только по относительной диэлектрической проницаемости на определенной частоте ($\epsilon_r/Dk@10$ ГГц). По доступным толщинам диэлектрика и металлизации, тангенсу угла диэлектрических потерь и другим физическим свойствам материалы могут отличаться, иногда значительно. Точные значения нужно

проверять по документации на выбранную подложку. Хорошие каталоги с указанием взаимозаменяемости можно найти на ресурсах [6] и [7].

Таблица 1.

Rogers corp	TACONIC	WANGLING	FSD	Jio Yao
RO4003C	HF-330F	WL-CT338	FSD883T	HJY340B-M
RO4350B	HF-350	WLCT350	FSD888T	HJY350A или HJY350B-M
RO3003 или RO3003G2	TLC-30	TFA300	FSD300GR	FJY300C-M
RO4360G2	-	WL-CT615	FSD615T	-

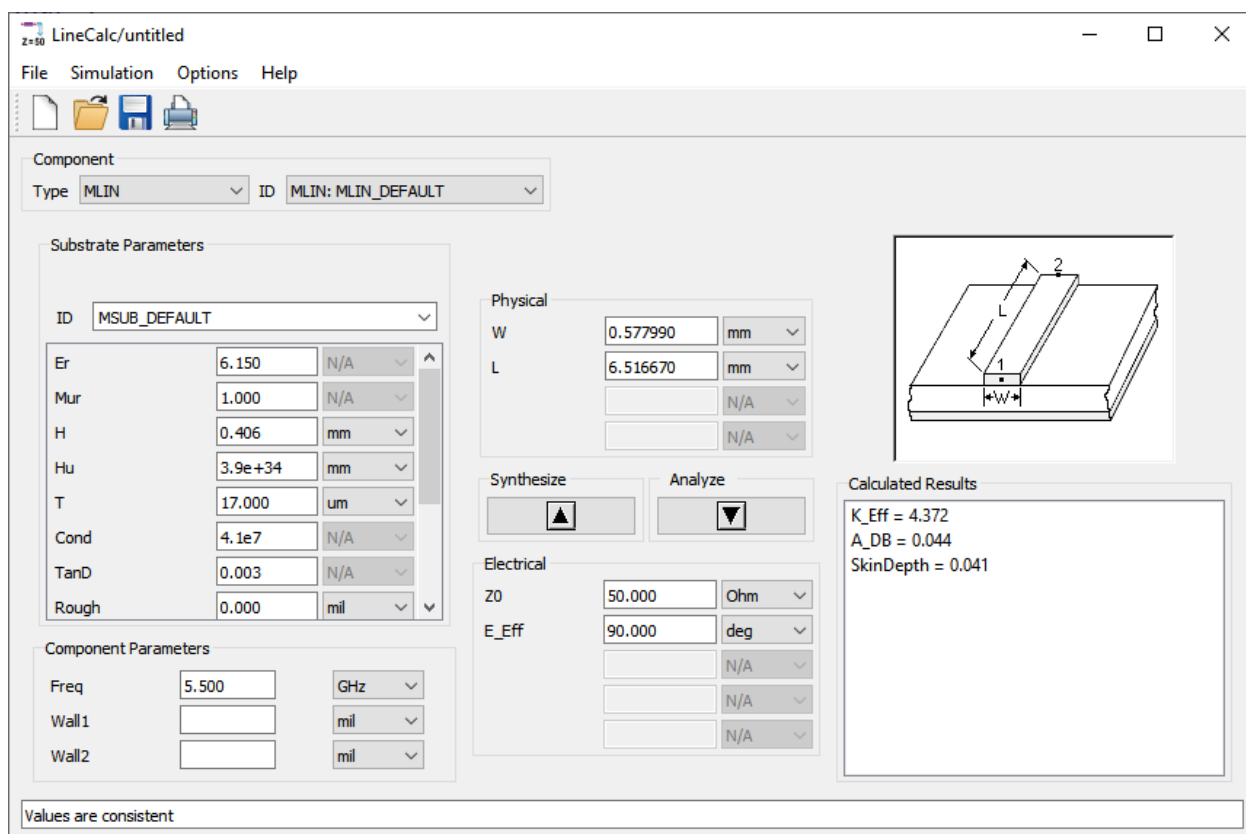
При выборе конкретной топологии фильтра можно остановиться на шпилечной и вариациях, построенных на связанных линиях. Использовать топологию на встречных штырях в микрополосковой реализации не стоит, т.к. используются земляные отверстия, которые методом моментов считаются довольно долго. Также по возможности стоит избегать комбинированных с дискретными компонентами вариантов, т.к. придется проводить настройку и моделирование с использованием моделей существующих обмеренных дискретных компонентов. В пределе можно задуматься об использовании продвинутых топологий (например, построенных на связанных резонаторах сложной формы), но для них как правило нет адекватной схемотехнической модели, нужно сразу строить топологическую ЕМ-модель и аккуратно ее настраивать.

При проектировании остановимся на топологии типа зиг-заг, которая представляет собой промежуточную по виду структуру между фильтром на связанных линиях и шпилечном фильтре.

Определим требования к фильтру:

- полосно-пропускающий фильтр;
- центральная частота $F_c = 5,5$ ГГц;
- ширина полосы пропускания по -3дБ $\Delta f_{-3дБ} = 400$ МГц;
- границы полосы запираания 4,5..4,9 ГГц (нижняя полоса) и 6,1..6,5 ГГц (верхняя полоса);
- уровень запираания 32 дБ по отношению к уровню полосы пропускания.

С учетом центральной частоты 5,5 ГГц можно выбрать ВЧ-диэлектрик с большим ϵ_r так, чтобы иметь значимый коэффициент укорочения. Остановимся на ВЧ-подложке RO4360G2 ($\epsilon_r = 6,15$, $\tan\delta = 0,0038$) толщиной 0,406 мм с толщиной металлизации $\frac{1}{2}$ os (17 мкм). Анализ линии 50 Ом, 90° @ 5,5 ГГц с помощью LineCalc говорит о размерах такой линии 0,58 мм x 6,15 мм. Отношение близко к 1/10, что дает относительно большую свободу.



Создание предварительной схемы с помощью умного компонента Passive Circuit DesignGuide

Для определения порядка фильтра и создания предварительной топологии можно воспользоваться инструментом умных компонентов Passive Circuit DesignGuide. Создадим для этого схему Filter_DG.

В эту схему нужно установить умный компонент ZZFltr (Microstrip Zig-

Zag Filter Smart Component)



Умные компоненты, к которым относится и ZZFltr, являются по сути скриптами, которые создают подсхемы, с которыми потом работают. По этой причине, умные компоненты не ищутся в поиске PartSearch и их надо ставить из своей палитры.

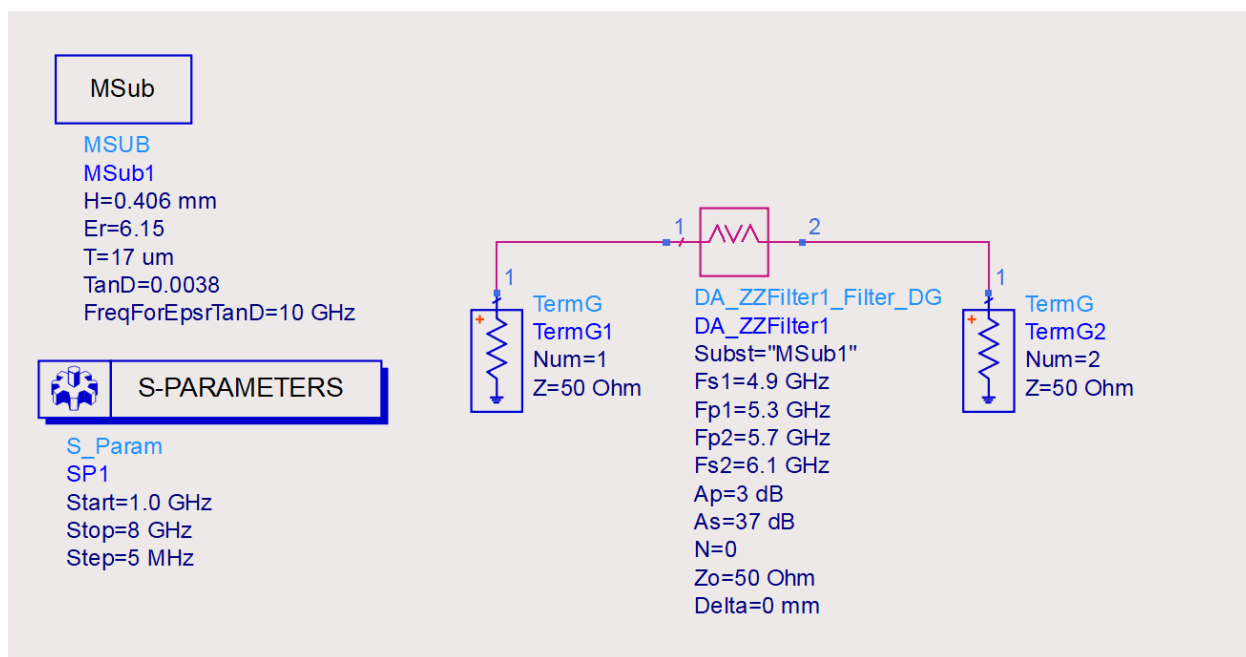
Умные компоненты создания микрополосковых фильтров находятся в палитре Passive Circuit DG - Microstrip Circuits.

В схему будет добавлен блок DA_ZZFilter_Filter_DG, являющийся сгенерированной подсхемой. Она на данный момент пустая, необходимо указать желаемые характеристики и затем синтезировать подсхему.

Исходя из технического задания введем желаемые характеристики. Тип аппроксимации выберем Чебышева, чтобы иметь меньший порядок фильтра.

Учтите, уровень запырания A_s задается относительно 0 дБ, а у нас в ТЗ уровень запырания определен относительно уровня полосы пропускания. С учетом того, что для первой прикидки приемлимым уровнем полосы пропускания будет -4 дБ, то для уровня запырания заложимся с некоторым запасом на 37 дБ. Параметр N позволяет принудительно указать порядок фильтра, а не рассчитывать автоматически.

Предварительно схема будет выглядеть как показано ниже.

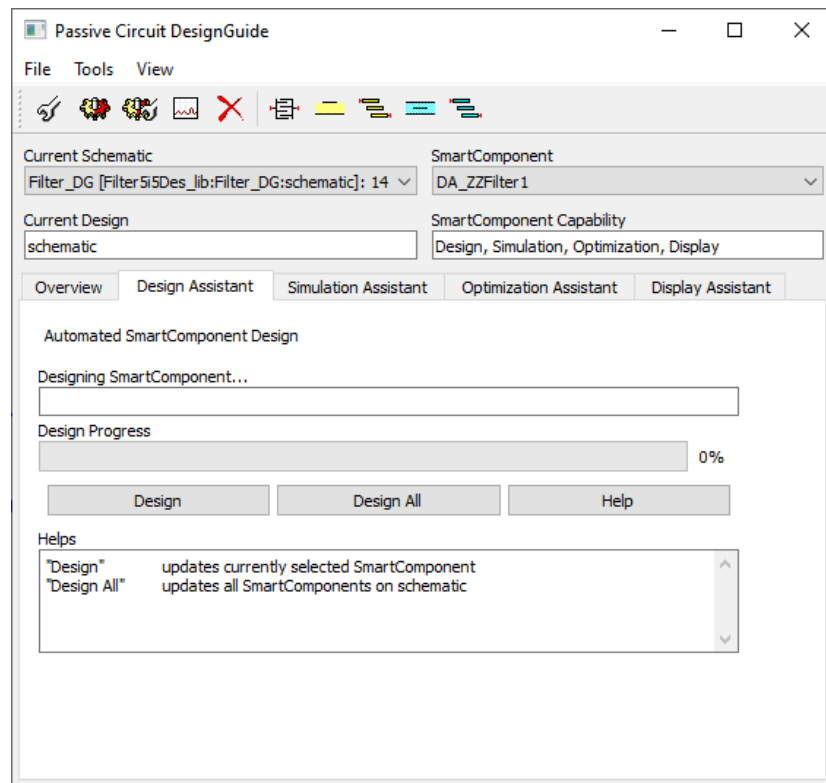


Далее нужно запустить мастер расчета микрополосковых структур по команде DesignGuide – Passive Circuit – Passive Circuit Control Window.

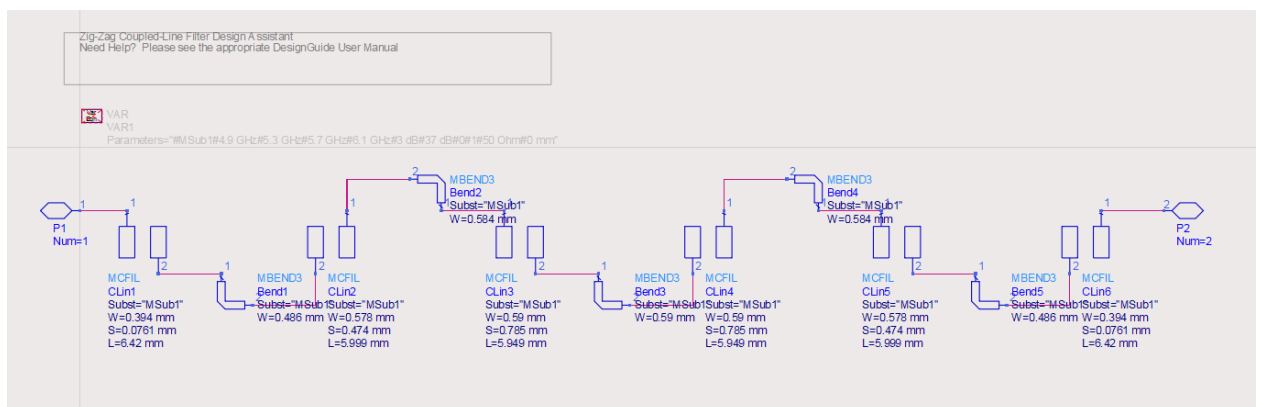
В выпадающих списках Current Schematic и SmartComponent настраивается привязка сеанса к умному компоненту.

На вкладке Design Assistant по кнопке Design запускается расчет текущего умного компонента. Вкладки Simulation Assistant, Optimization

Assistant и Display Assistant несколько автоматизируют расчет, оптимизацию и показ результатов соответственно. Но мы ими пользоваться не будем.



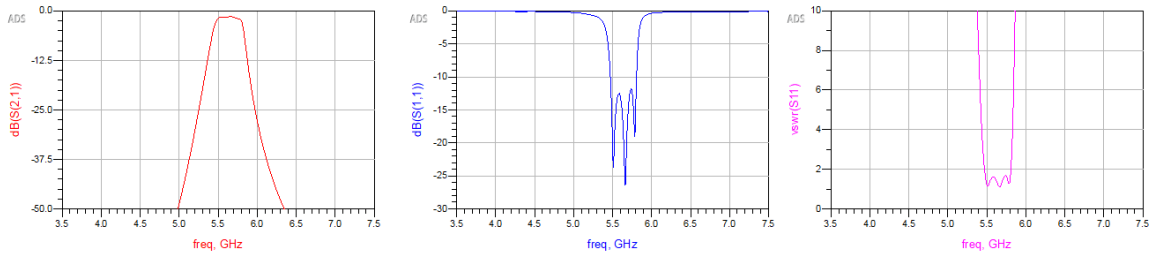
По окончании синтеза в подсхеме DA_ZZFilter1_Filter_DG будет синтезирована схема фильтра.



Промоделируем ее со схемы верхнего уровня Filter_DG. В текущей работе мы будем постоянно контролировать, насколько получаемая АЧХ фильтра выполняет ТЗ. Поэтому удобно с помощью граничных линий (LimitLines) создать автоматическую проверку выполнения. И оформить данную область графиков как шаблон (template).

Сначала, в области графиков создаем три прямоугольных графика, на первый вынесем dB(S21), на второй dB(S11), на третий vswr(S11). Также каждому из графиков сразу установим разумные диапазоны осей.

Т.к. фильтр – устройство пассивно и взаимное, то пара S21 и S11 полностью описывают его поведение. КСВН выводится из S11 и служит для удобства контроля.



Для автоматизации использования граничных линий зададим их положения точки через переменные. В формулах IL (Insertion Loss) будет означать данные снимаемые с графика dB(S21), а RL (Return Loss) – с dB(S11). Также настроим автоматический расчет уровня КСВН. Границы полос пропускания и запираения возьмем из ТЗ.

$$\text{EqnILPassLevel} = -4$$

$$\text{EqnRelativeILStop} = 32$$


$$\text{EqnILStopLevel} = \text{ILPassLevel} - \text{RelativeILStop}$$

$$\text{EqnRLPassLevel} = -13$$

$$\text{EqnVSWRPassLevel} = \text{vswr}(\text{pow}(10, \text{RLPassLevel}/20))$$

$$\text{EqnFp1} = 5.3 \text{ GHz} \quad \text{EqnFs1} = 4.9 \text{ GHz} \quad \text{EqnFsl1} = 4.5 \text{ GHz}$$

$$\text{EqnFp2} = 5.7 \text{ GHz} \quad \text{EqnFs2} = 6.1 \text{ GHz} \quad \text{EqnFsl2} = 6.5 \text{ GHz}$$

На график dB(S21) добавим граничную линию типа GreaterThan (больше чем)  по команде Insert – Limit Line – Greater Than. Также кнопки создания граничных линий расположены в тулбаре Limit Line.



После установки по ДЛКМ перейдем в его настройки. На вкладке Options в поле Limit Line Expression Name определяется имя граничной линии и в поле Limit Line Pass or Fall Expression Name имя булева выражения, в

которое передается, удовлетворяет ли график граничной линии. Это позволяет строить условные выражения, срабатывающие по состоянию граничной линии. В группах Pass и Fail определяется внешний вид граничной линии в соответствующих состояниях.

На вкладке Data Points определяются координаты концов граничной линии. Сошлемся на соответствующие переменные.

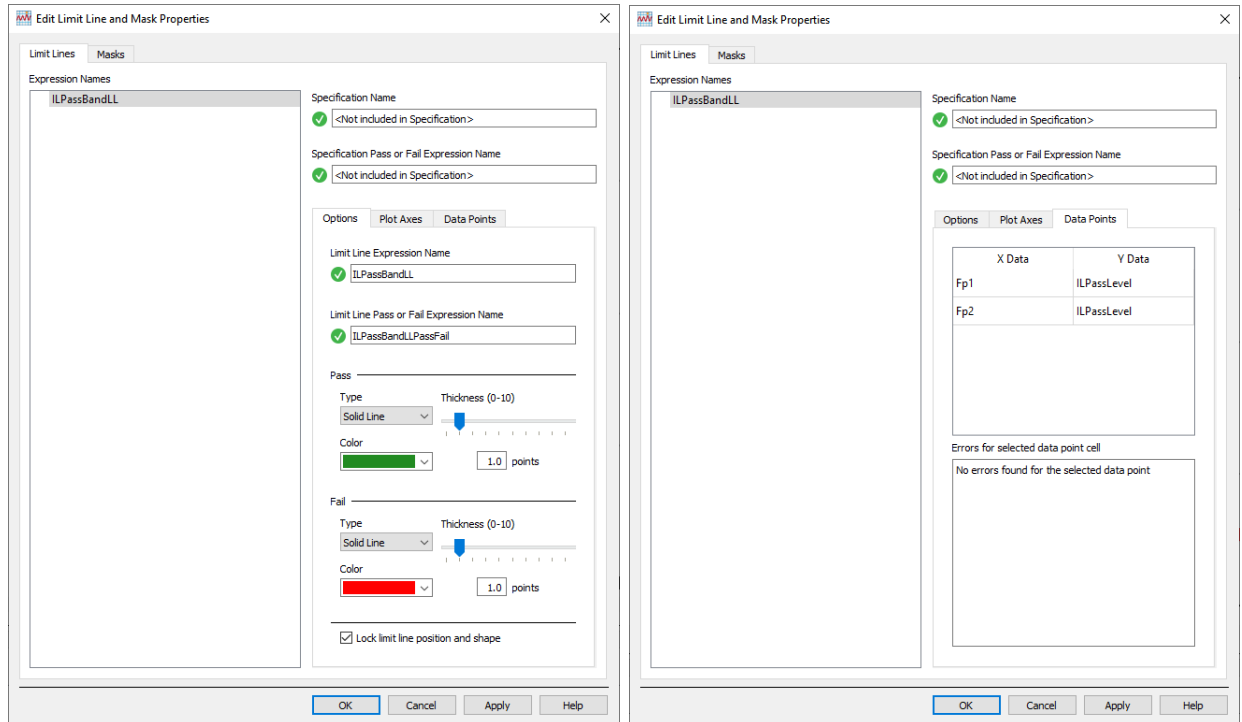
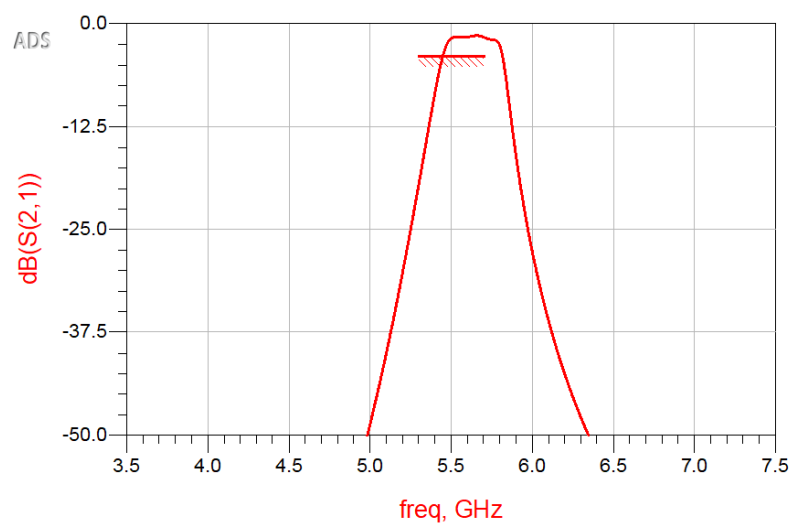

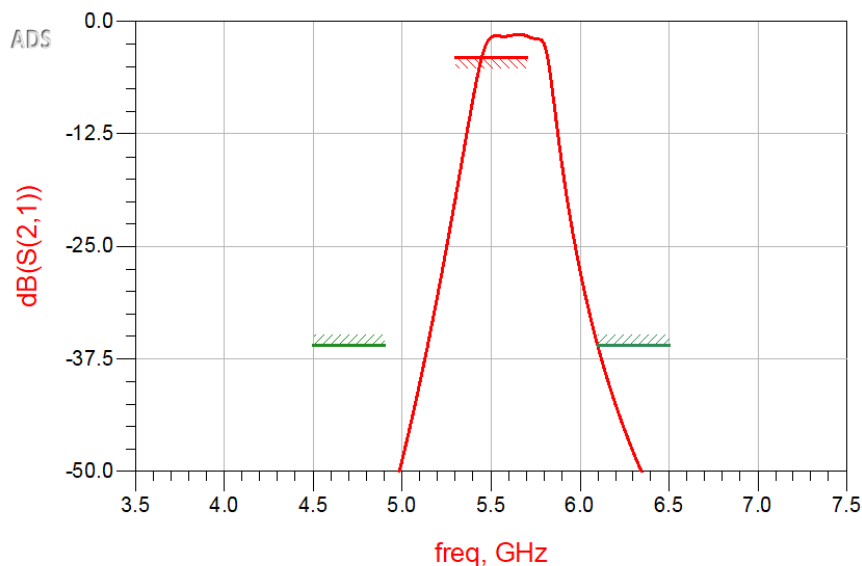


График dB(S21) после установки граничной линии должен выглядеть приблизительно следующим образом.



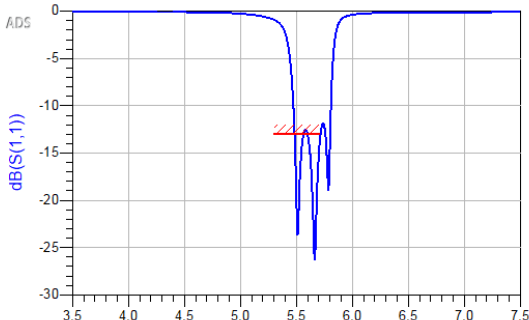
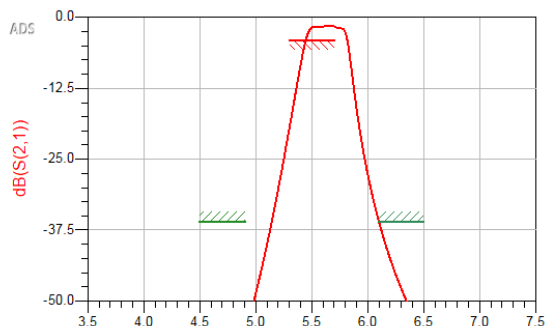
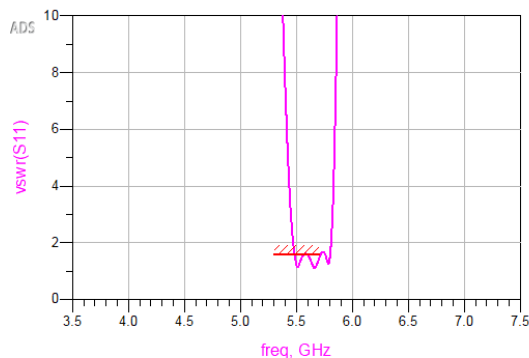
Добавим в него еще две граничных линии типа LessThan , задающие полосы запираания. Их назовем ILStopLeftLL и ILStopRightLL и сошлемся на соответствующие переменные.



На графике граничная линия полосы пропускания ILPassBandLL имеет красный цвет, т.к. требования по полосе пропускания не выполняются. А граничные линии полос запираания ILStopLeftLL и ILStopRightLL зеленого цвета, как проходящие по требованиям.

Также дополним графики dB(S11) и vswr(S11) своими граничными линиями в полосе пропускания.

```
Eqn ILPassLevel = -4
Eqn RelativeILStop = 32
Eqn ILStopLevel = ILPassLevel - RelativeILStop
Eqn RLPassLevel = -13
Eqn VSWRPassLevel = vswr(pow(10, RLPassLevel/20))
Eqn Fp1 = 5.3 GHz   Eqn Fs1 = 4.9 GHz   Eqn Fsl1 = 4.5 GHz
Eqn Fp2 = 5.7 GHz   Eqn Fs2 = 6.1 GHz   Eqn Fsl2 = 6.5 GHz
```

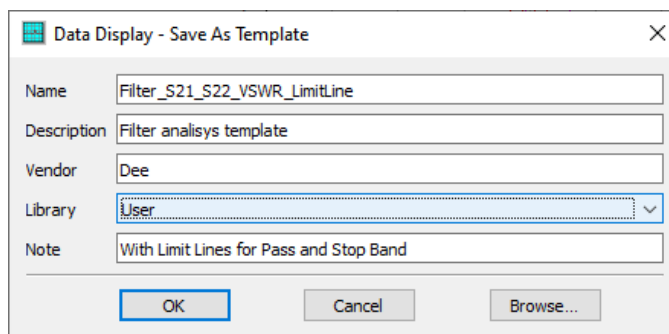




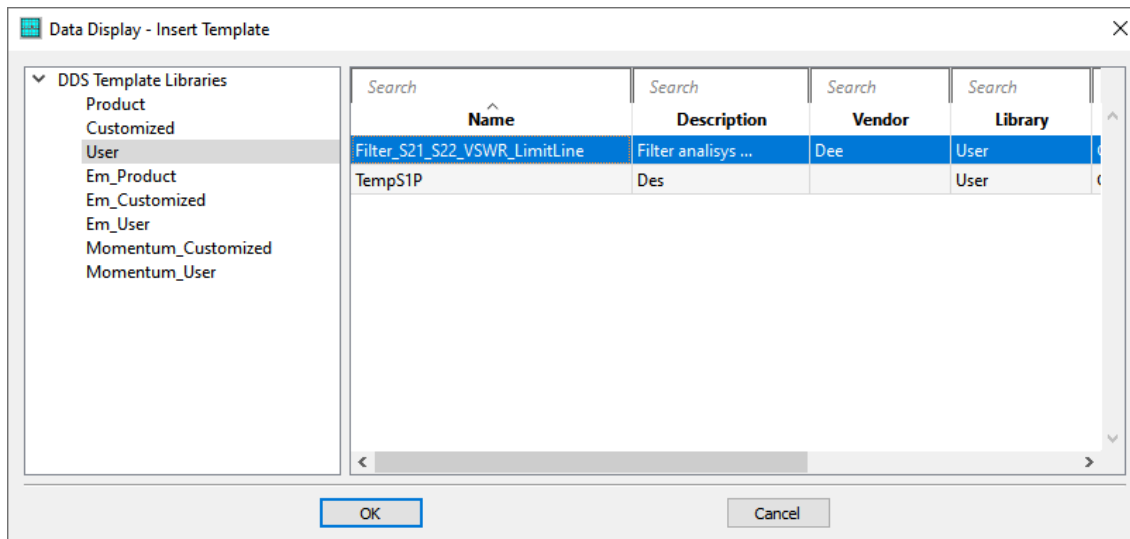
Граничные линии действуют на все кривые на графике. Поэтому графики необходимо разделять по полотнам по типу граничных линий и масштабу осей.



Данный набор графиков мы будем использовать для анализа практически всех результатов, поэтому сохраним его как шаблон. Для этого, запустим команду File – Save As Template. В открывшемся окне необходимо дать название шаблону (поле Name), описание (поле Description), указать разработчика (поле Vendor), выбрать библиотеку для хранения (выпадающий список Library) и еще можно дать примечание в поле Notes. Пользовательские шаблоны для графиков принято хранить в библиотеке User.



Установка шаблонов в область графиков по команде Insert – Template.



Name	Description	Vendor	Library
Filter_S21_S22_VSWR_LimitLine	Filter analysys ...	Dee	User
TempS1P	Des		User

Результаты говорят, что у нас не получается выполнить ТЗ на фильтр. Необходима настройка. Синтезированная схема не параметризирована, это придется делать руками. Но перед этим подготовим пользовательский компонент плавного поворота.

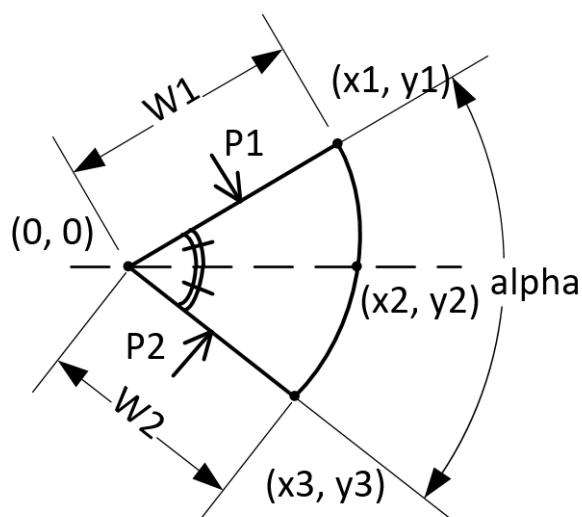
Топологический компонент Filter_RTaper

Если сгенерировать топологию исходно синтезированного фильтра, то можно увидеть, что для поворота между секциями использован поворот под

90° со срезом. Но, ширины связанных участков различные, и по-хорошему, модель поворота нужно заменить на ту, у которой различные ширины подводящих линий.



Создадим для этого свой топологический компонент `Filter_RTaper` в виде сглаженного поворота. Также заложимся на возможность поворачивать не только на 90°, а на произвольный угол. Предложенный вариант топологии пользовательского компонента представлен ниже. Чтобы внешняя дуга была гладкой, проведем ее через три точки (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) . Точку (x_2, y_2) разместим на биссектрисе угла α на расстоянии $\sqrt{w_1 w_2}$ от угла. Таким образом можно воспользоваться функцией построения дуги по трем точкам.

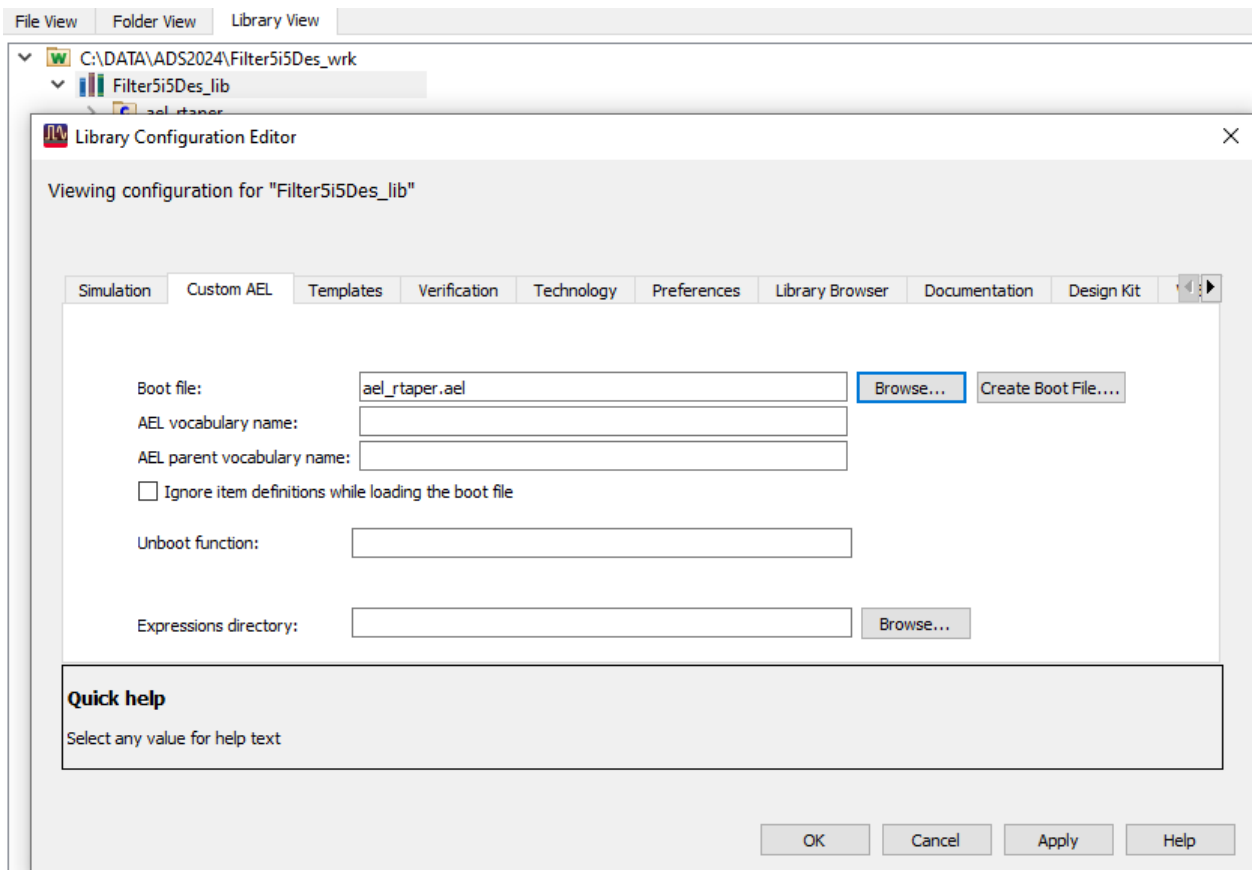


Lab1 Для его создания воспользуемся инструментом генерации топологии с помощью AEL-языка. Подробно, как создавать топологию с помощью языка AEL, приведено в лабораторной работе «Генерация топологии с помощью языка AEL».

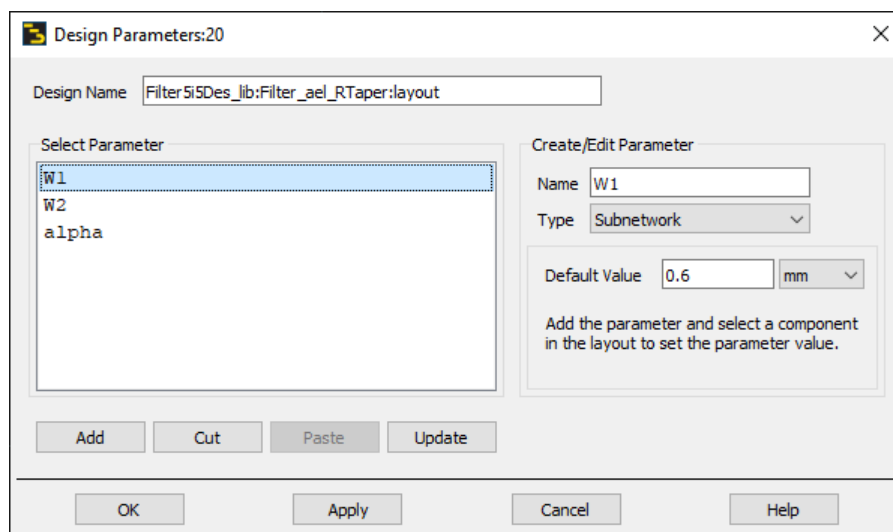
Код, создающий необходимую топологию и соответствующий рекомендациям, приведен ниже. Код подготовлен с помощью IDE VSCode [1] с установленным расширением Keysight AEL [2].

```
defun ael_rtaper(w1, w2, alpha)
{
    //definitions
    decl designContext = de_get_current_design_context();
    decl cond_layerID = db_get_layerid(designContext, "cond", "drawing");
    decl mks2uu = db_get_mks_to_uu_factor(designContext);
    // unit conversion
    w1 = w1 * mks2uu;
    w2 = w2 * mks2uu;
    // alpha in degrees, convert to rad for trigonometric
    alpha = rad(alpha);
    // points calculation
    decl x1 = w1*cos(alpha/2);
    decl y1 = w1*sin(alpha/2);
    decl x2 = sqrt(w1*w2);
    decl y2 = 0;
    decl x3 = w2*cos(-alpha/2);
    decl y3 = w2*sin(-alpha/2);
    // add in and out edges as polyline
    de_add_polyline();
    de_add_point(x3, y3);
    de_add_point(0, 0);
    de_add_point(x1, y1);
    de_end();
    // add outer arc and join all to polygon
    de_add_arc1(x1, y1, x2, y2, x3, y3);
    de_select_all();
    de_modify_join();
    // add pins
    db_create_pin(designContext, x1/2, y1/2);
    db_create_pin(designContext, x3/2, y3/2);
}
```

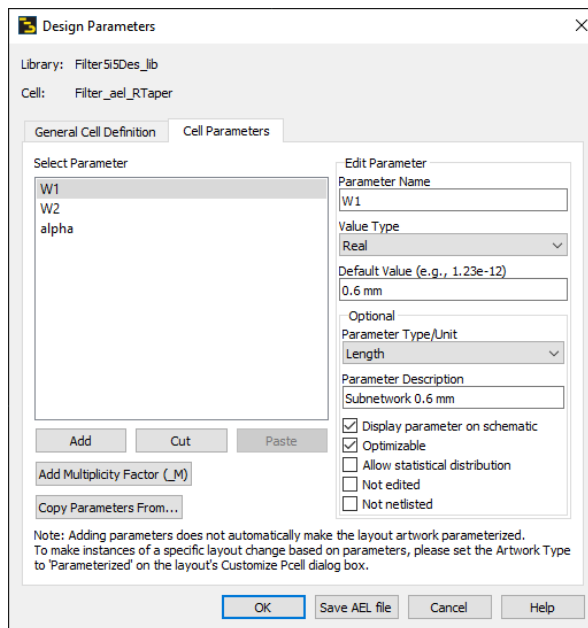
Подгружаем файл с кодом в проект.



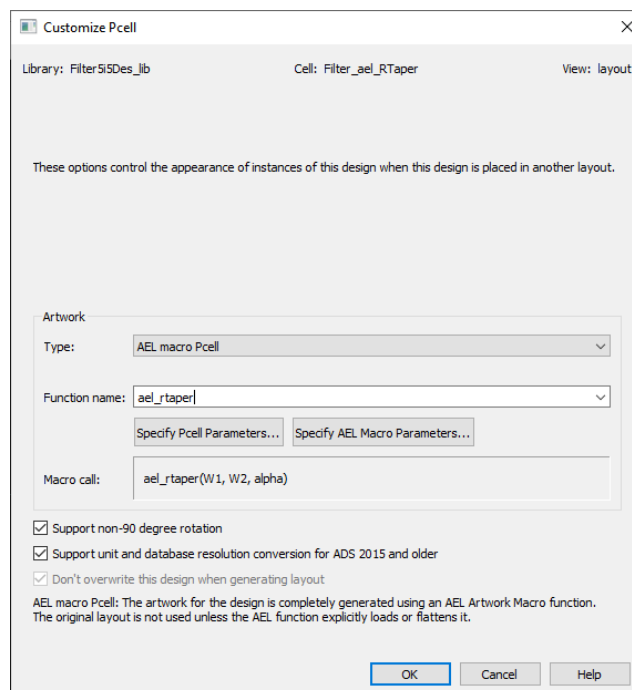
Ячейку-шаблон для загрузки кода назовем Filter_ael_RTaper. Она будет иметь только топологию. В топологии запустим команду EM – Component – Parameters для задания параметров топологическому компоненту. Параметры должны быть типа Subnetwork. W1 и W2 сделаем со значениями по умолчанию 0,6 mm и 0,5 mm, а угол поворота alpha 90 deg. При прописывании единиц, параметрам ячейки сразу присваивается соответствующий тип.



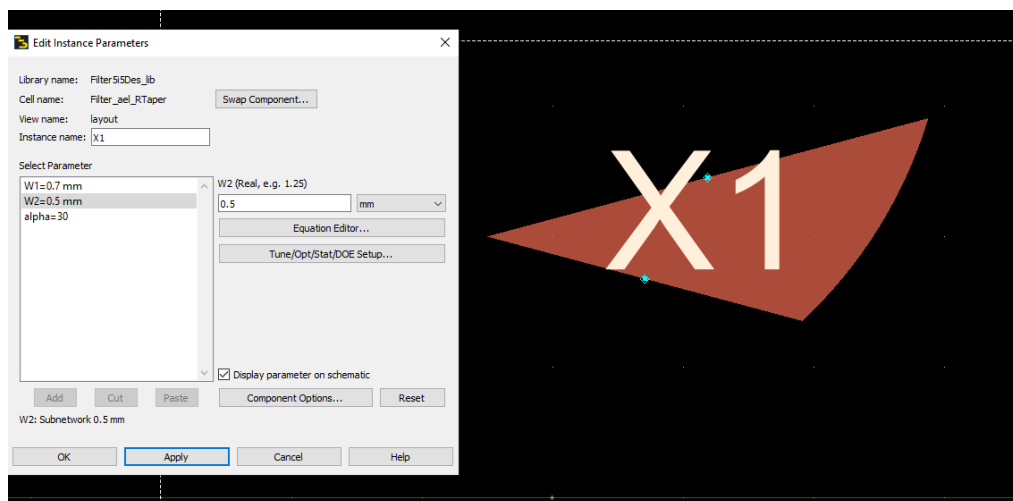
Lab1 Аналогичного можно достичь через параметры ячейки File – Design Parameters.



Далее по команде File – Customize Pcell указываем тип ячейки AEL макро Pcell и в поле Function Name вносим имя функции ael_rtaper. Также нужно сразу установить разрешение на произвольные углы поворота по галке Support non-90 degree rotation

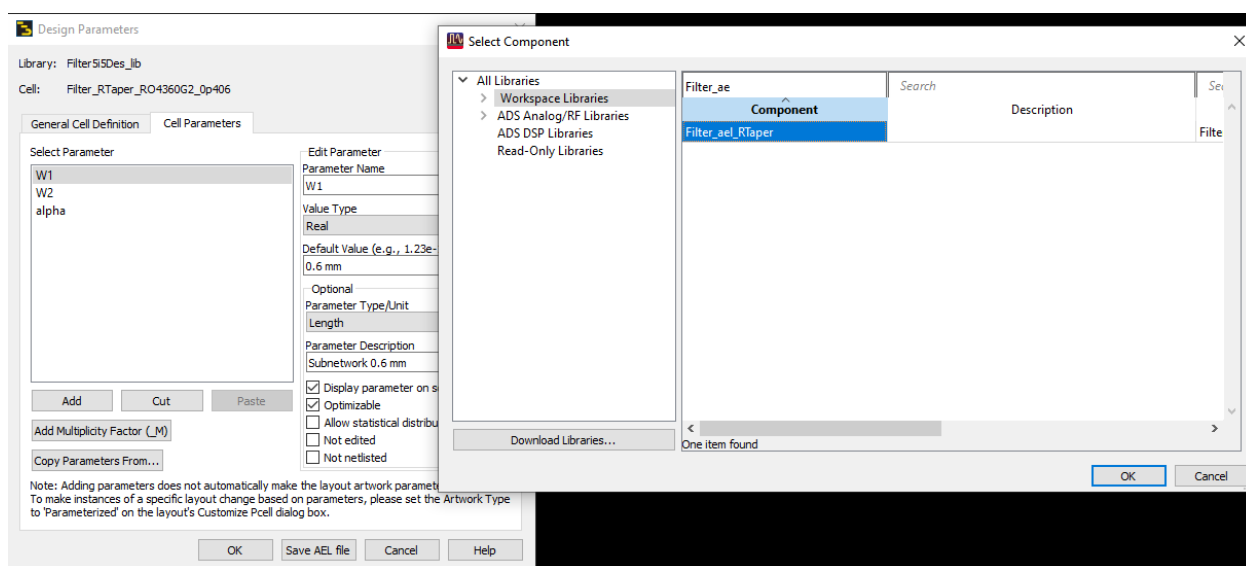


Ячейка-шаблон Filer_ael_RTaper готова. Ее можно вставить в тестовую топологию и убедиться, что она перестраивается в соответствии с задаваемыми размерами.

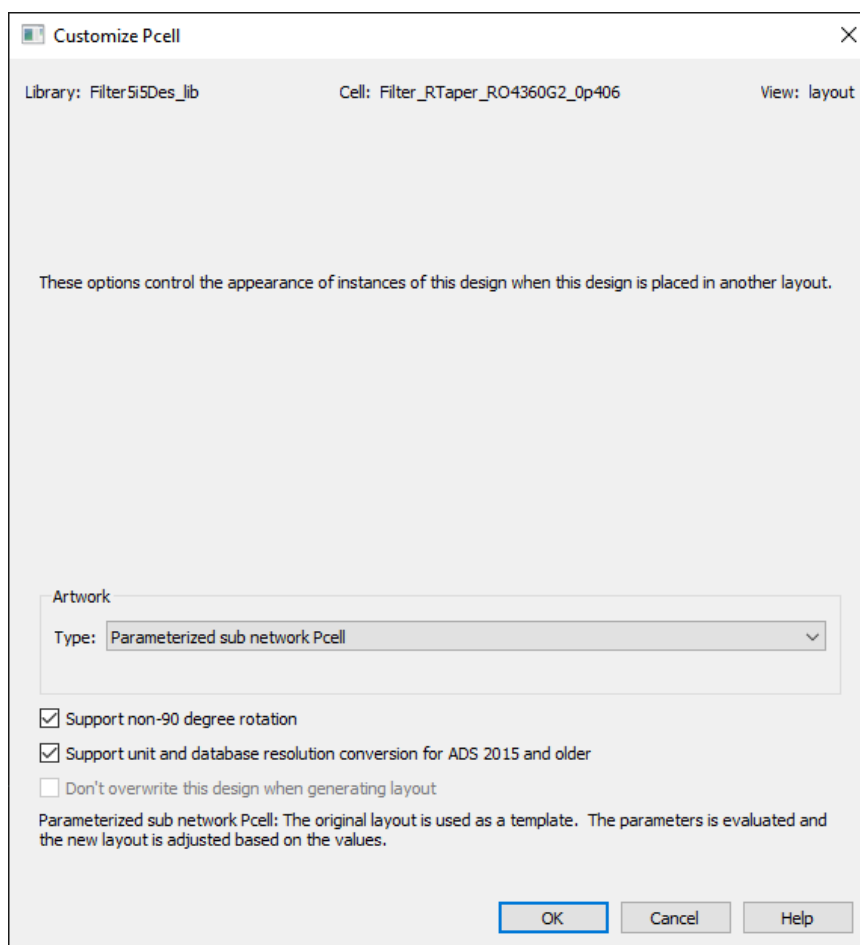


Теперь с использованием ячейки Filer_ael_RTaper создадим полноценный топологический компонент Filter_RTaper_RO4360G2_0p406. В него внесем топологический компонент-шаблон Filer_ael_RTaper. Данная двухуровневая схема нужна, т.к. для схемной оптимизации необходима ячейка с результатами ЕМ-анализа (emSetup и emModel), а в топологическом компоненте с AEL-кодом данное поведение без использования сложных скриптов управления проектом невозможно. В имени топологического компонента присутствует суффикс «_RO4360G2_0p406», т.к. его данные будут валидны только для указанной подложки соответствующей толщины.

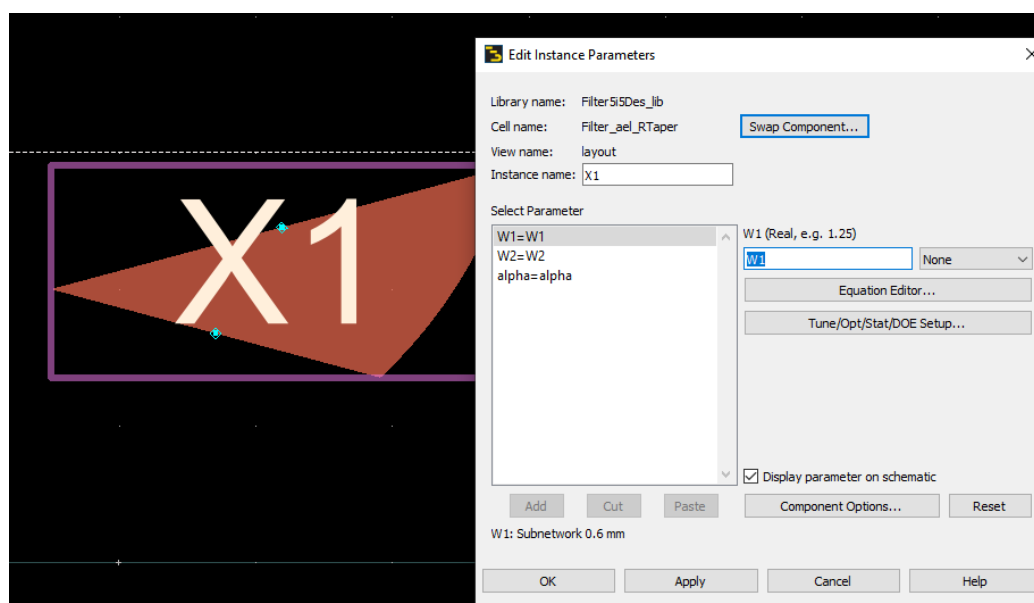
Компонент Filter_RTaper_RO4360G2_0p406 также будет параметризованным с теми же параметрами, что и ячейка Filer_ael_RTaper. Чтобы не перезабивать эти параметры заново, можно при определении параметров ячейки из окна Design Parameters использовать кнопку Copy Parameters From



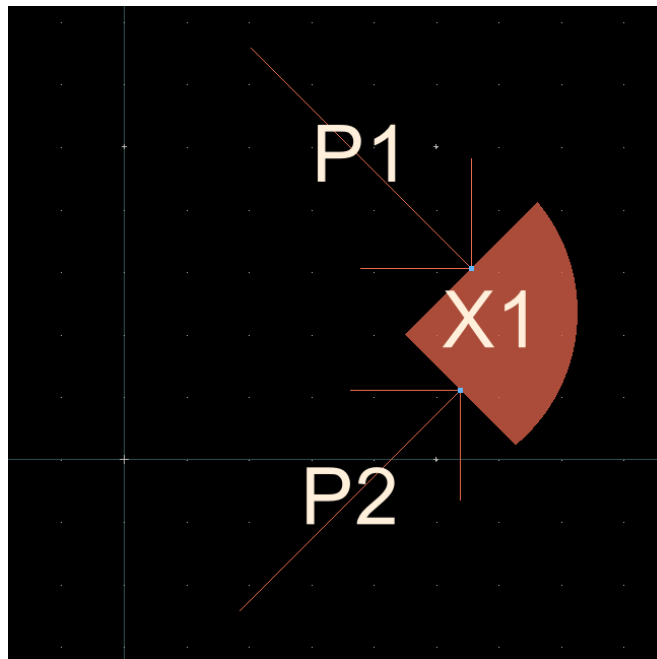
Также нужно указать, что данная ячейка является параметризированной по команде File – Customize Pcell указываем тип Parametric sub network Pcell.



Во вставленном AEL-компоненте переменным присваиваем значения верхнего уровня.

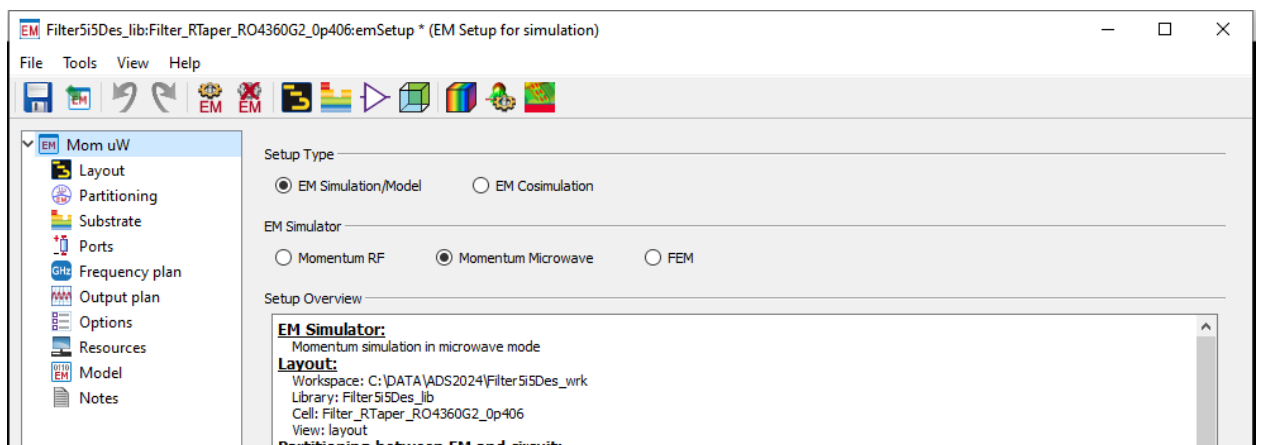


И расставляем пины с привязкой к точкам подключения. P1 должен быть сверху, P2 снизу.

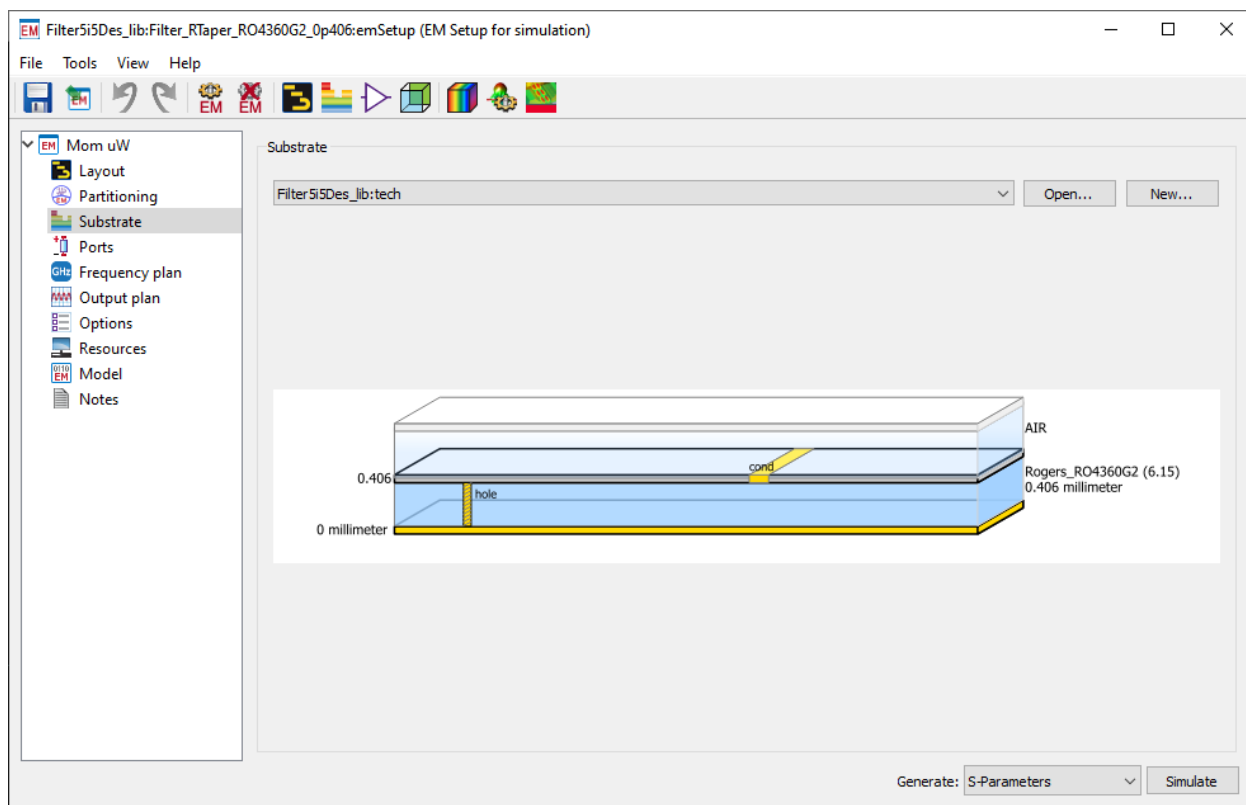



Lab1

Далее переходим к настройкам ЕМ-моделирования. Создаем emSetup. Т.к. этот компонент маленький и планарный, то выбираем режим симуляции Momentum Microwave.

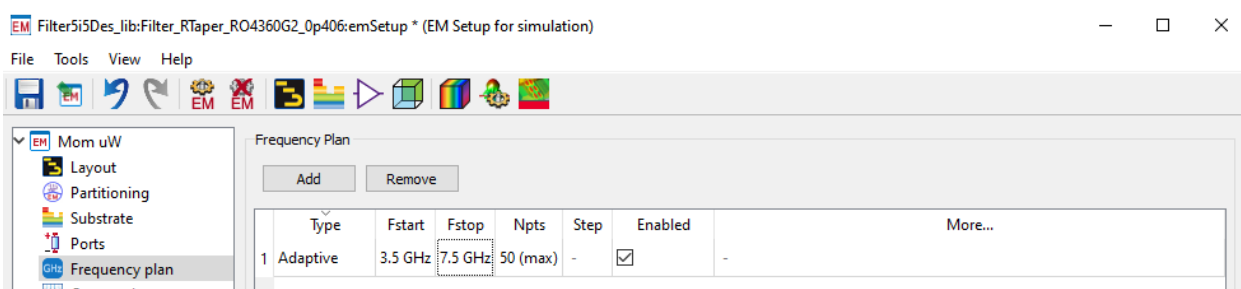


На вкладке Substrate привязываем подложку. Если ее еще в проекте нет — то создаем как технологическую.

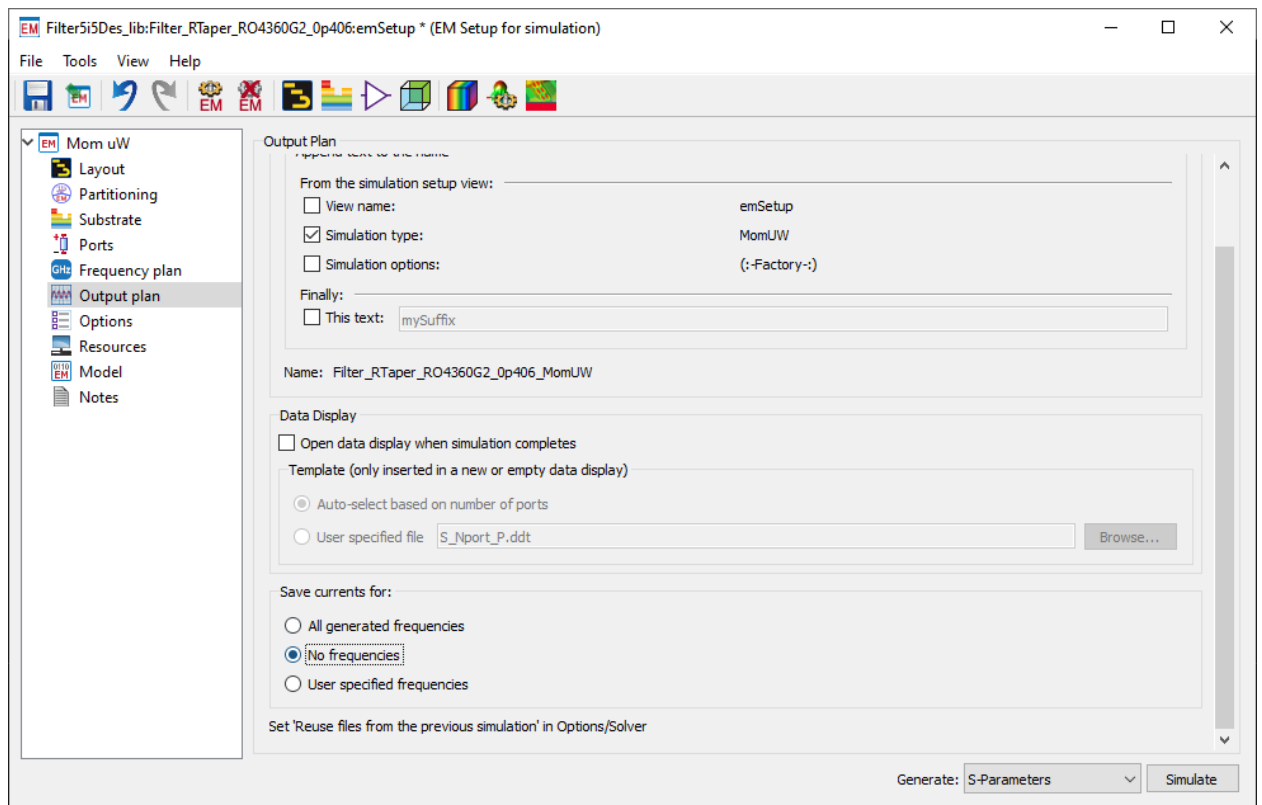


На вкладке Ports проверяем, что порты обновлены .

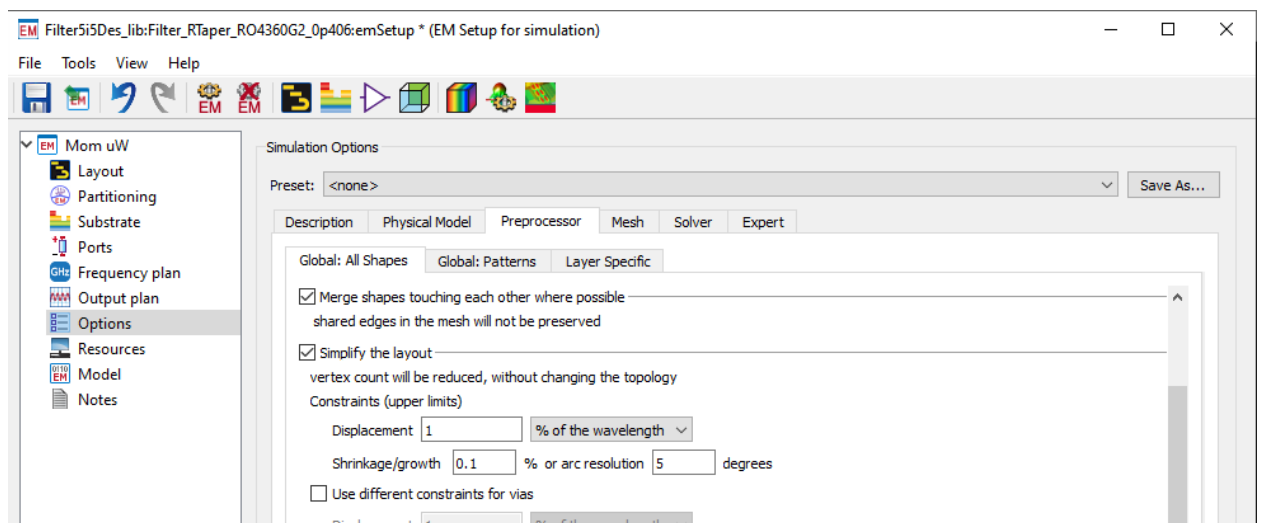
На вкладке Frequency plan указываем частотный план расчета. Инструмент AMC поддерживает только адаптивный частотный план. Нас интересует поведение в диапазоне порядка 3,5 ..7,5 ГГц, введем эти частоты как граничные для адаптивного частотного плана.



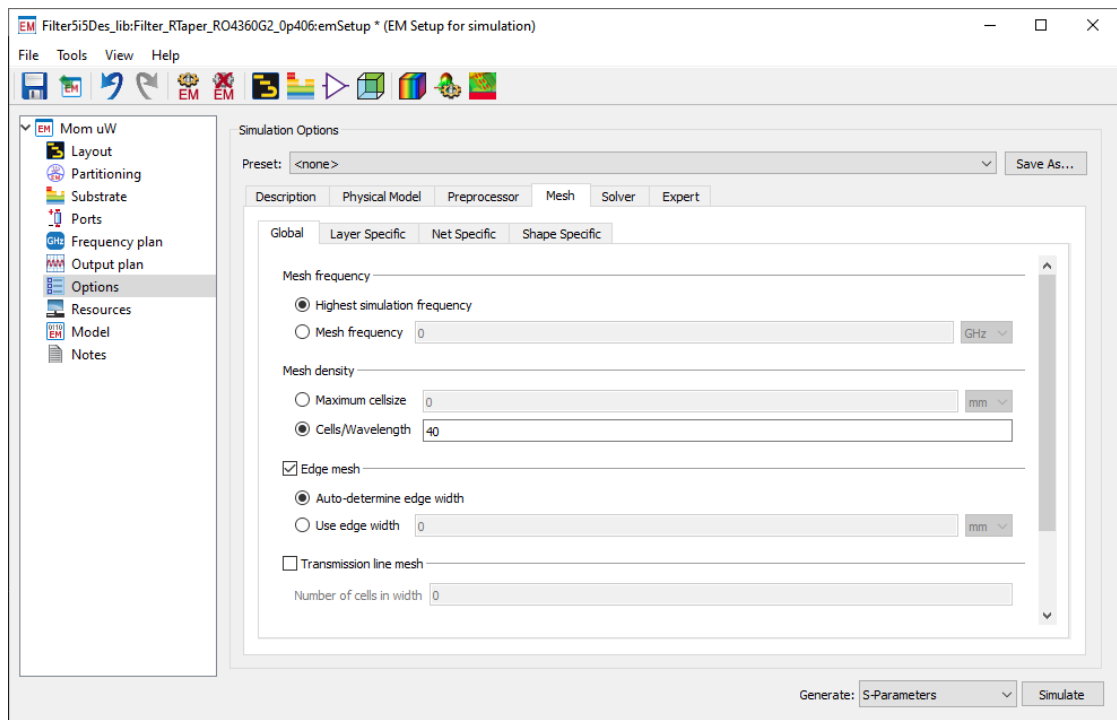
На вкладке Output plan отключаем автооткрытие графиков и сохранение ТОКОВ.



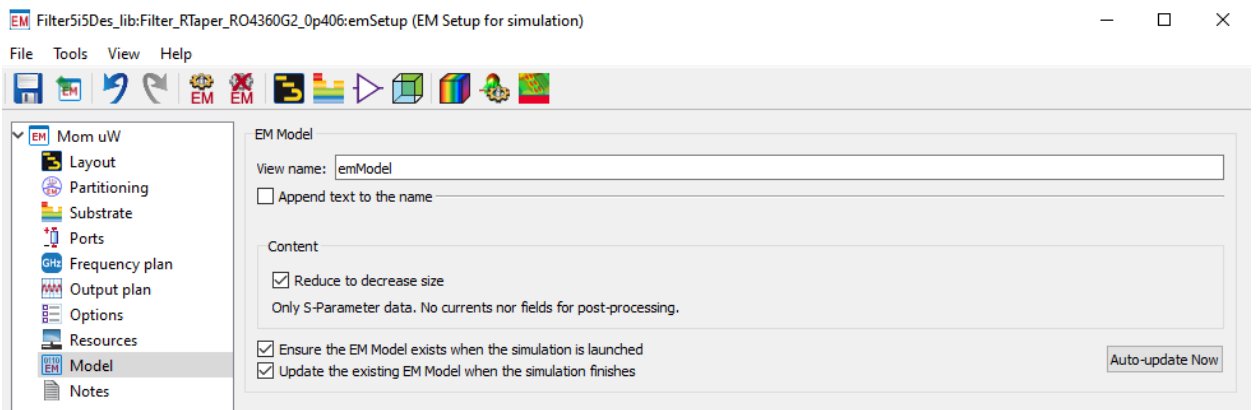
На вкладке Options на подвкладке Preпроцессор устанавливаем аппроксимацию дуг по 5°.



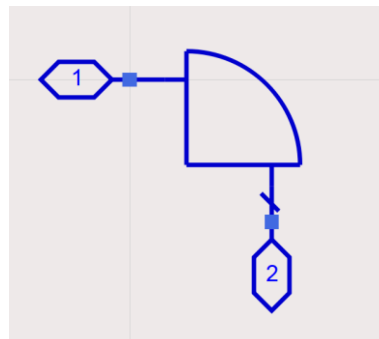
На вкладке Options на подвкладке Mesh устанавливаем плотность сетки 40 ячеек/длина волны и краевую сетку.



На вкладке включаем создание emModel.



Окончательно осталось добавить символ в ячейку Filter_RTaper_RO4360G2_0p406. Нарисуем его условно.



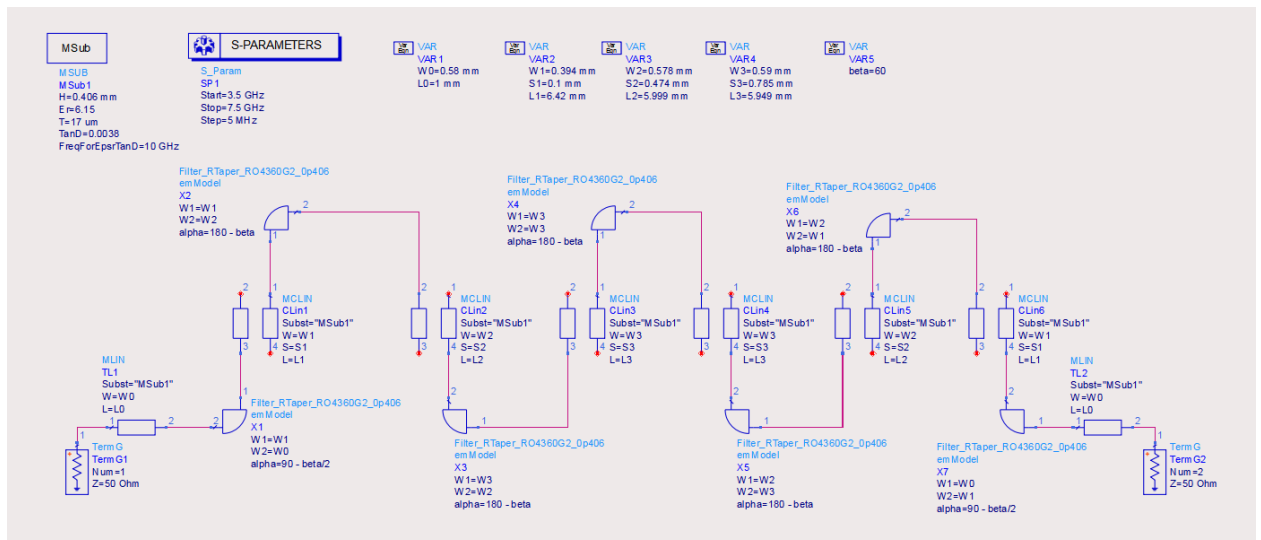
Компонент плавного перехода готов.

Схемная оптимизация

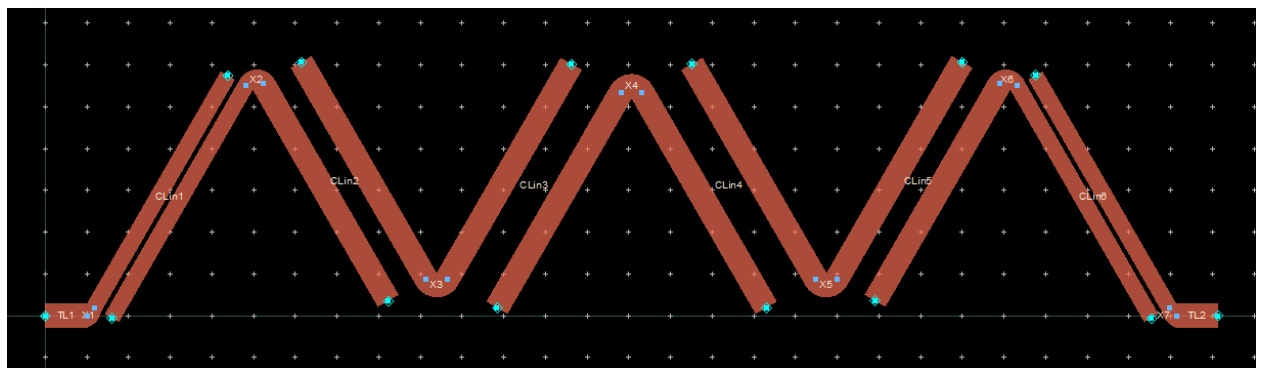
На основании подсхемы DA_ZZFilter1_Filter_DG создадим схему Filter_Sch для схемной оптимизации. Фильтр является симметричным относительно своего центра, поэтому для связанных участков будем применять переменные вида W_x , S_x и L_x . Для поворотов будем использовать созданный ранее компонент Filter_RTaper_RO4360G2_0p406 (через представление emModel), который будем поворачивать не на 90° , а на некоторый угол, так, чтобы секции были под меньшим углом β , для которого 60° выглядит разумным для значения по умолчанию. Добавим вводные участки шириной $W_0 = 0,58$ мм и длиной $L_0 = 1$ мм.



При заполнении параметров ширин и зазоров (W_x и S_x), нужно следить, чтобы соблюдать допустимые технормы. Для осени 2024 можно считать, что для минимальных ширин/зазоров доступны минимальные значения 0,1 мм/0,1 мм.



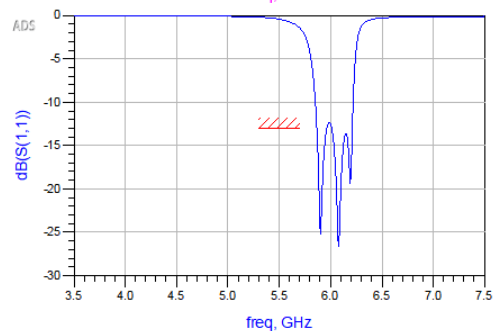
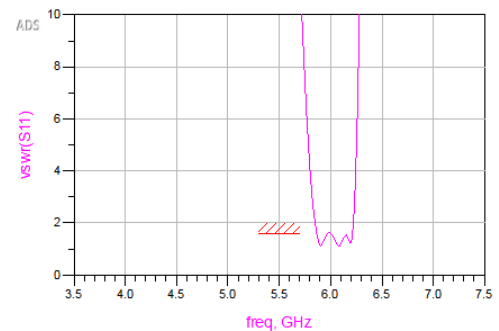
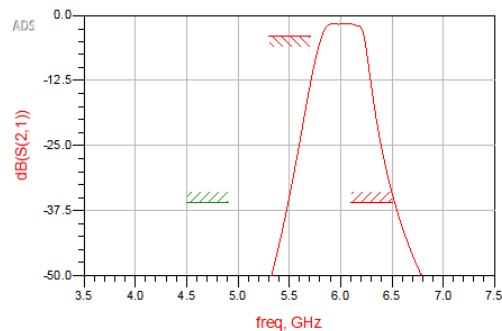
Общая схема выйдет довольно большой, поэтому обязательно контролируем топологию.



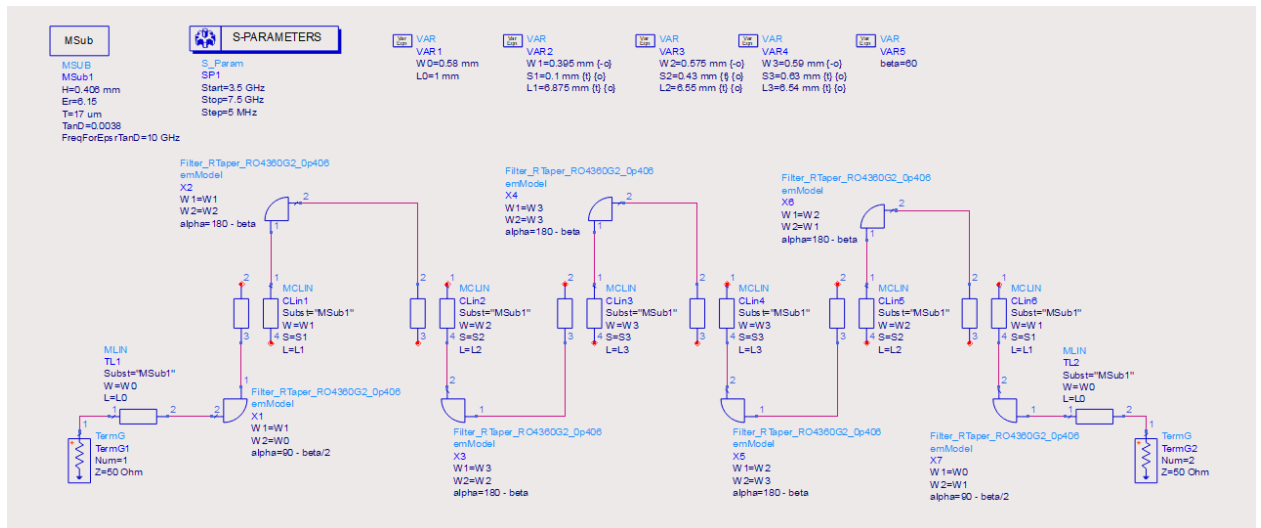
Топология вышла ожидаемой, направлена в нужном направлении, имеет повороты между секциями по 60° в правильном направлении.

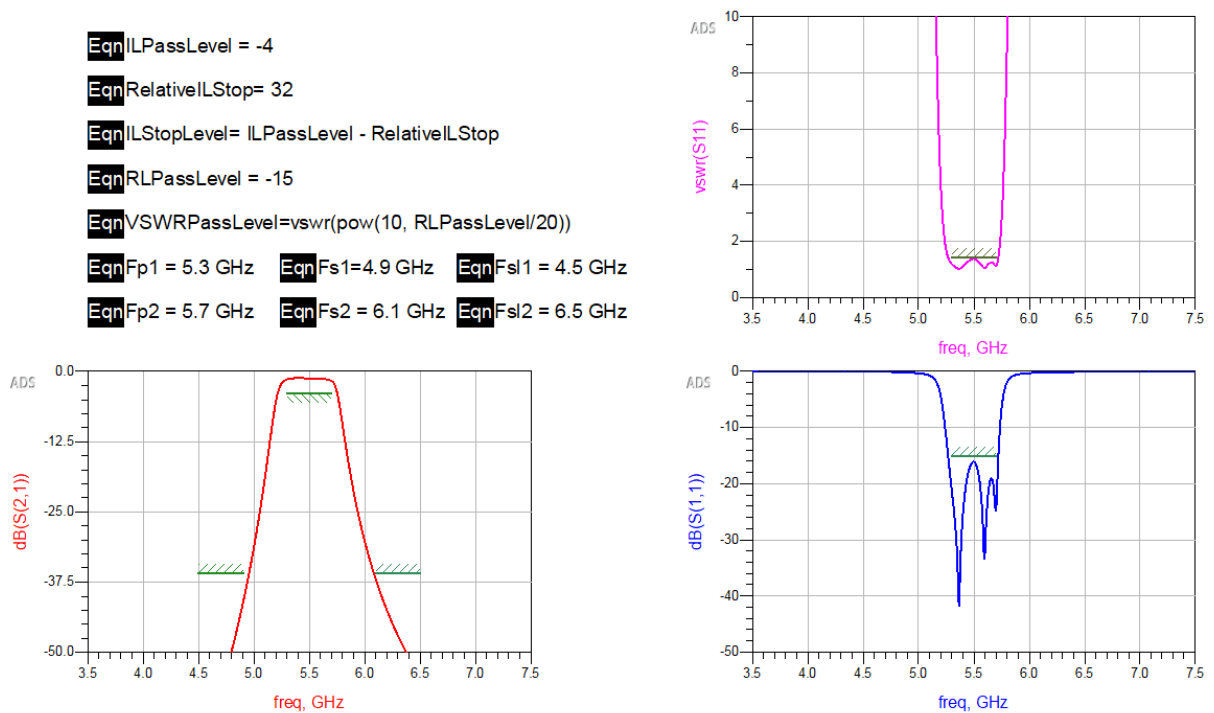
Промоделируем схему. В области результатов по команде Insert – Template разместим созданный ранее шаблон графиков Filter_S21_S22_VSWR_LimitLine.

```
Eqn ILPassLevel = -4
Eqn RelativeILStop = 32
Eqn ILStopLevel = ILPassLevel - RelativeILStop
Eqn RLPassLevel = -13
Eqn VSWRPassLevel = vswr(pow(10, RLPassLevel/20))
Eqn Fp1 = 5.3 GHz   Eqn Fs1 = 4.9 GHz   Eqn Fsl1 = 4.5 GHz
Eqn Fp2 = 5.7 GHz   Eqn Fs2 = 6.1 GHz   Eqn Fsl2 = 6.5 GHz
```



По результатам видно, что характер кривых близок к желаемым, но уплыла центральная частота. С помощью тюна или оптимизации настроим схему. Итоговые результаты схемной оптимизации показаны ниже.





ЕМ-анализ средствами и тонкая подстройка

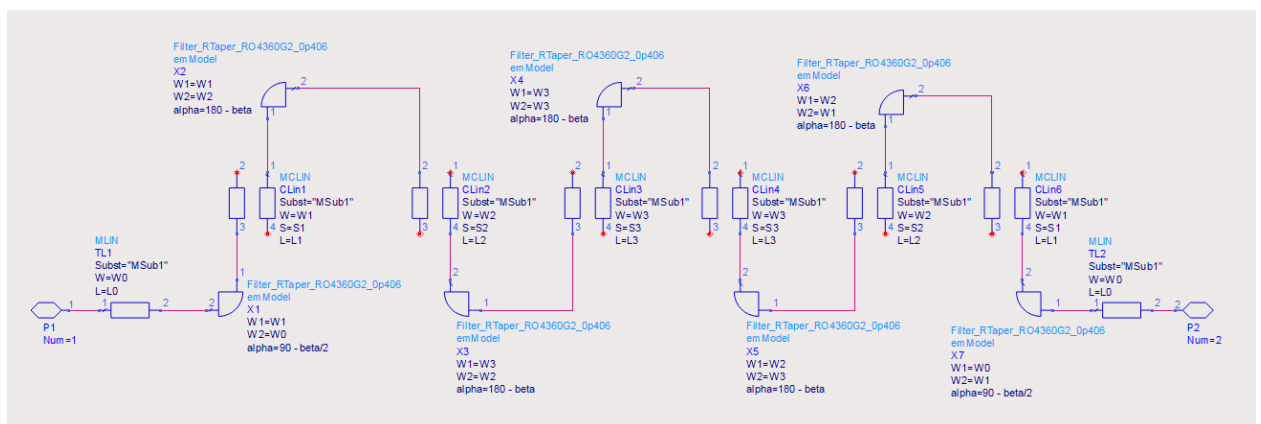
Lab1

Подготовим проект для оптимизации с помощью ЕМ-анализа. Понадобится две ячейки: внутренняя параметризованная ячейка Filter_EM_Inner с топологией, привязанными параметрами (размерами), настройками моделирования emSetup и хранилищем emModel; и внешняя Filter_EM_Top с контроллером симуляции, терминаторами и измерительными выражениями.

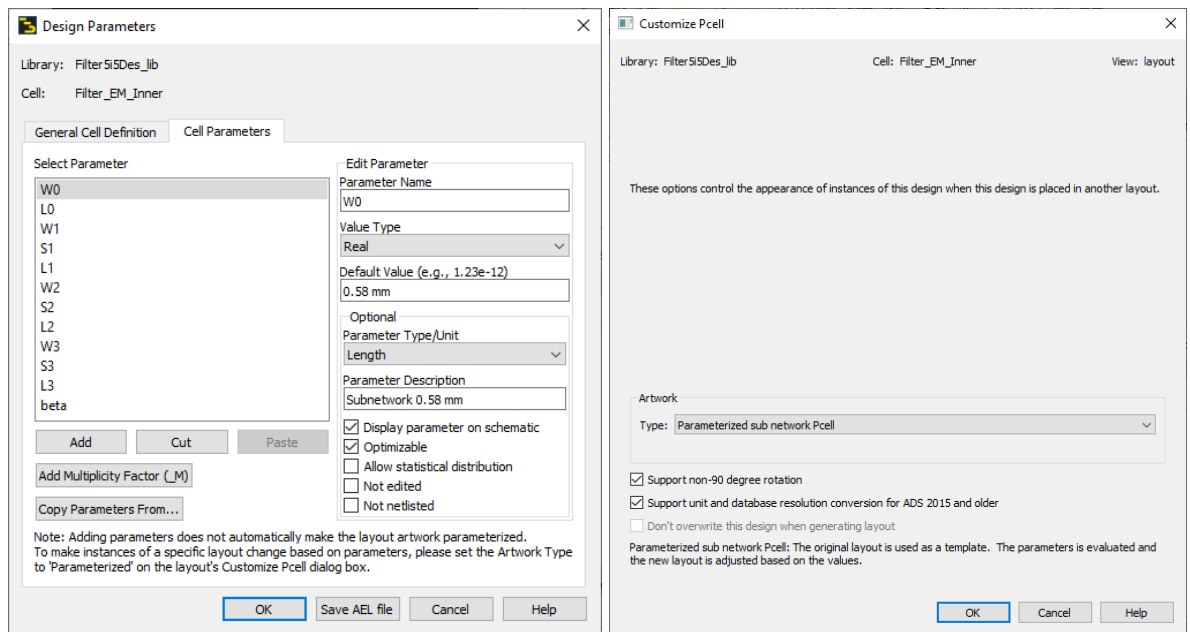
В качестве метода моделирования выберем метод моментов МоМ, с разбиением 40 ячеек/длина волны.

Далее кратко, с минимальными пояснениями:

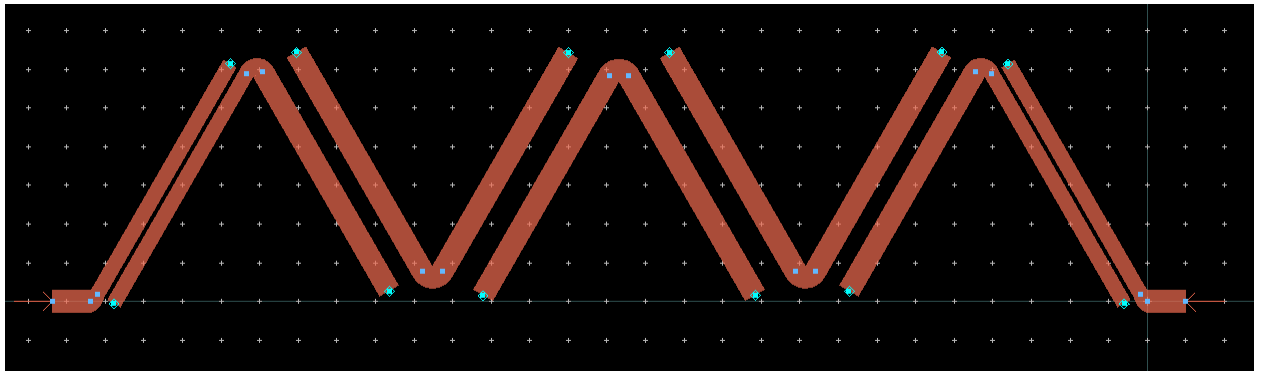
- содержание ячейки Filter_EM_Inner на схемном уровне:



- параметризация ячейки Filter_EM_Inner



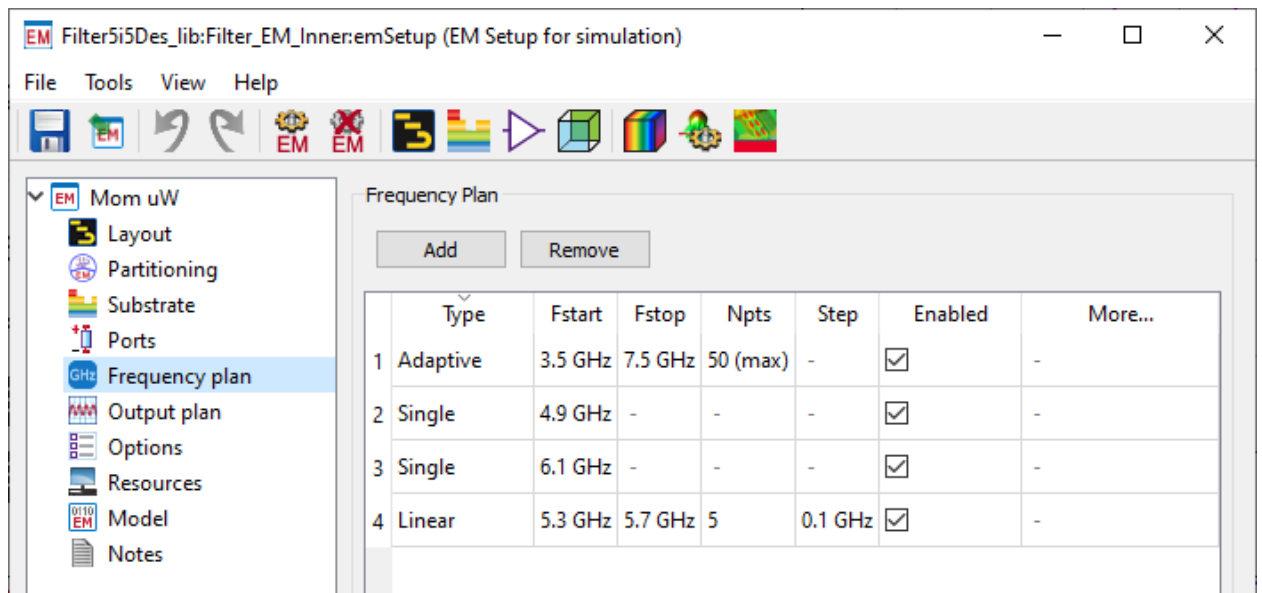
- генерация топологии ячейки Filter_EM_Inner:



- создание символа внутренней ячейки Filter_EM_Inner

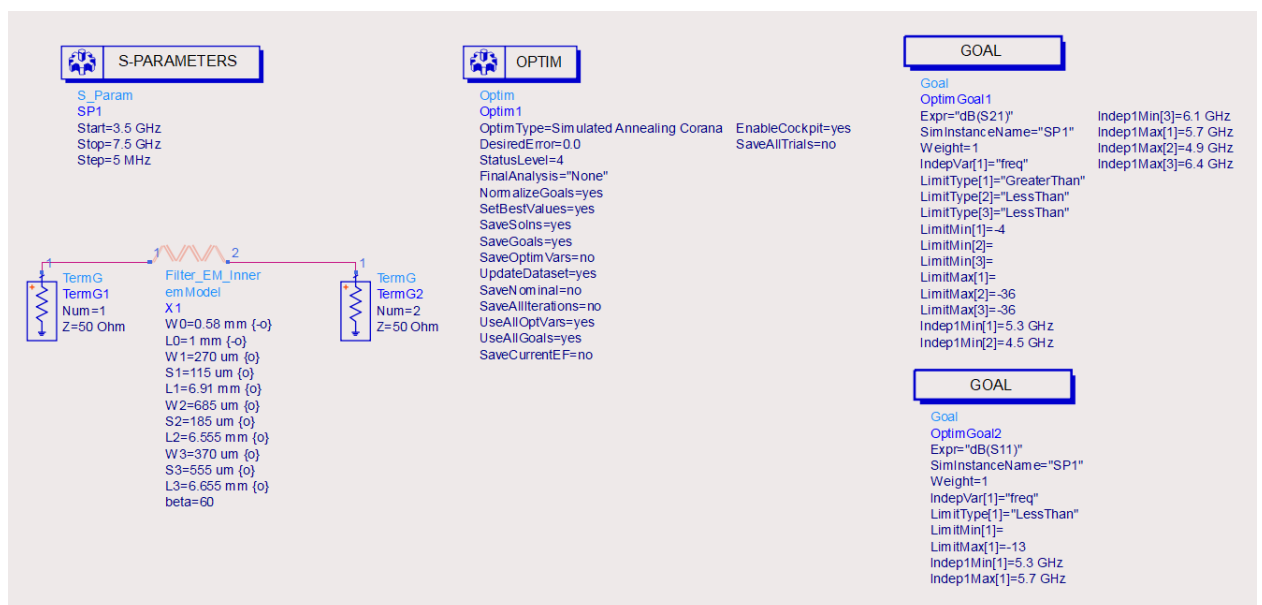


- настройка emSetup во внутренней ячейке Filter_EM_Inner (аналогично ячейке перехода Filter_RTaper_RO4360G2_0p406), за исключением более подробного частотного диапазона в полосе пропускания 5,3..5,7 ГГц.



- ячейка верхнего уровня Filter_EM_Top. В ней для переменных укажем дискретный шаг 5 мкм. Переменные W0 и L0 не будем отправлять в оптимизацию, т.к. от них не должно ничего зависеть. Также на первом этапе зафиксируем угол поворота $\beta = 60^\circ$.

Выберем один из типов оптимизации, поддерживающий дискретные переменные - Random, Random Minimax, Random Max, Discrete, Genetic, Simulated Annealing или Simulated Annealing Corana.

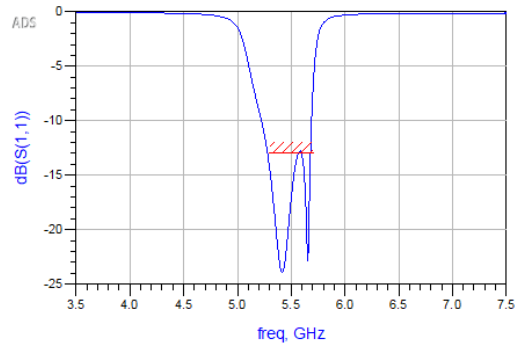
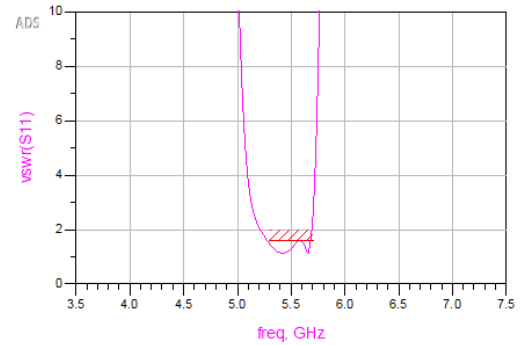
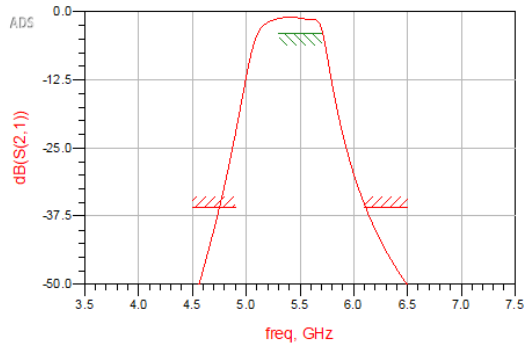


В результатах используем шаблон Filter_S21_S22_VSWR_LimitLine.

```

EqnILPassLevel = -4
EqnRelativeLStop= 32
EqnILStopLevel= ILPassLevel - RelativeLStop
EqnRLPassLevel = -13
EqnVSWRPassLevel=vswr(pow(10, RLPassLevel/20))
EqnFp1 = 5.3 GHz   EqnFs1=4.9 GHz   EqnFsl1 = 4.5 GHz
EqnFp2 = 5.7 GHz   EqnFs2 = 6.1 GHz   EqnFsl2 = 6.5 GHz

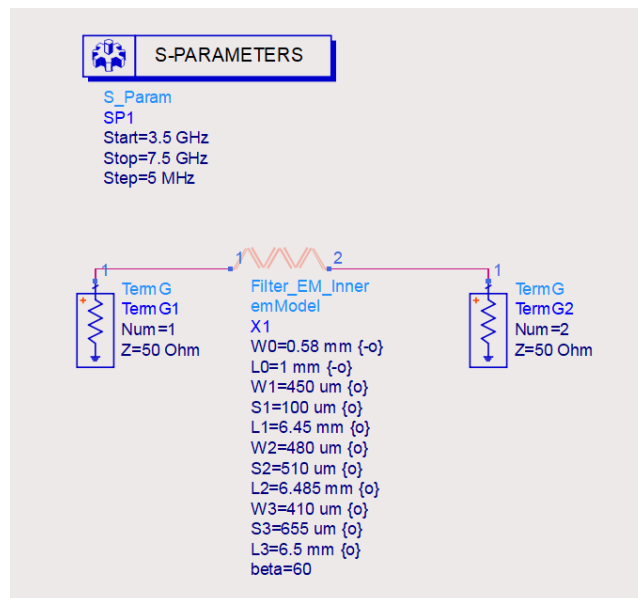
```



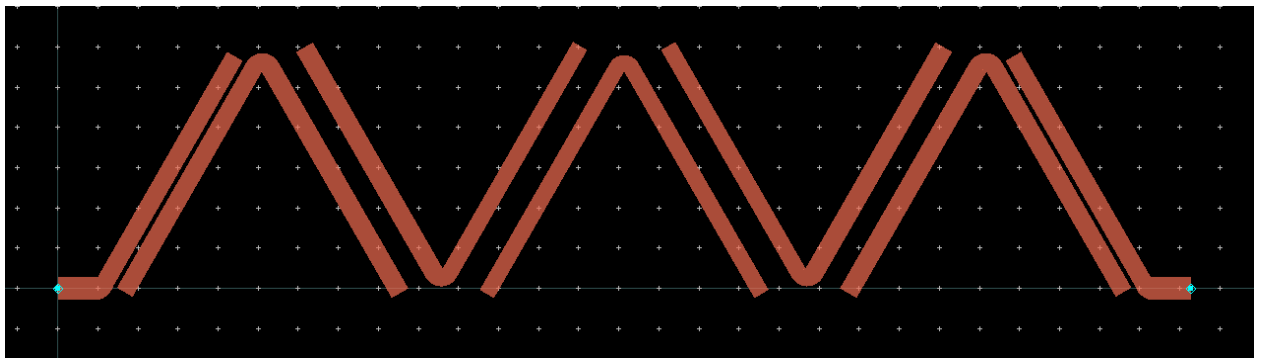
При работе с оптимизацией может получиться, что не выходит выполнить все требования на АЧХ. Например, не выполняются условия на максимальные потери в полосе пропускания. Но при этом видно, что требования на запираение выполняются с запасом. В этом случае, можно смягчить требования на потери в полосе пропускания. Но при этом надо не забыть пропорционально ужесточить требования на уровни запираения, т.к. по ТЗ они определяются относительно уровня пропускания. Так сделано в нашем шаблоне для области графиков.

Иногда бывает полезно поработать с приоритетом целей оптимизации. Приоритет целей задается параметром Weight (вес). По умолчанию у всех целей он равен 1 и они одинаково учитываются при составлении целевой функции (Error Function). Но можно увеличить вес определенной цели и заставить оптимизатор в первую очередь пытаться выполнить ее.

После оптимизации получим следующее решение.

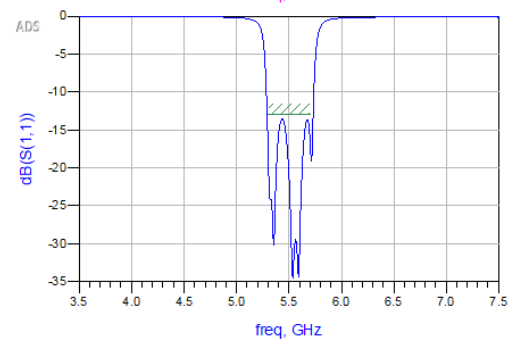
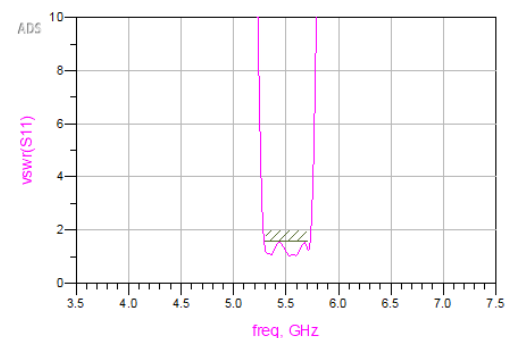
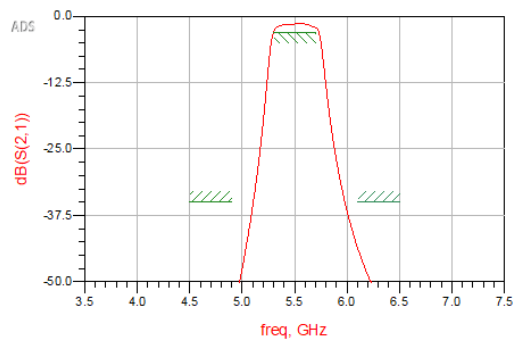


Сгенерируем по полученным размерам топологию, чтобы убедиться в ее адекватности.



Проанализируем результаты.

$\text{EqnILPassLevel} = -3$
 $\text{EqnRelativeLStop} = 32$
 $\text{EqnILStopLevel} = \text{ILPassLevel} - \text{RelativeLStop}$
 $\text{EqnRLPassLevel} = -13$
 $\text{EqnVSWRPassLevel} = \text{vswr}(\text{pow}(10, \text{RLPassLevel}/20))$
 $\text{EqnFp1} = 5.3 \text{ GHz}$ $\text{EqnFs1} = 4.9 \text{ GHz}$ $\text{EqnFsl1} = 4.5 \text{ GHz}$
 $\text{EqnFp2} = 5.7 \text{ GHz}$ $\text{EqnFs2} = 6.1 \text{ GHz}$ $\text{EqnFsl2} = 6.5 \text{ GHz}$



Видно, что потери в полосе фильтра не больше ~3 дБ, что оказалось лучше изначально требуемого 4 дБ. По графикам также следует, что полученный уровень запираения ~40 дБ, что также заведомо лучше требуемого 32 дБ. Данные цифры говорят о том, что есть некоторый запас на неточность производства и можно рассчитывать, что характеристики изготовленного фильтра будут не хуже требуемых.

Расчеты окончены. В идеале данную топологию также стоит проверить в каком-нибудь другом электромагнитном САПР, чтобы убедиться в достоверности результатов.

Экспорт фильтра и результатов

Для дальнейшего использования данного фильтра в других проектах, в том числе в других САПР, могут понадобиться его модель или по отдельности топология/результаты моделирования.

Если планируется использовать фильтр как модель, то можно подключить текущий проект как источник для другого проекта.

Также ячейку с фильтром можно просто перенести в другой проект. Но не забудьте, что для этого нужно кроме ячейки с фильтром перенести и остальные связанные сущности, в том числе компонент плавного перехода (в примере Filter_RTaper_RO4360G2_0p406 + шаблон Filter_ael_RTaper), файл с ael-кодом с привязкой к проекту, определение подложки. И первоначальные настройки проекта должны совпадать – единицы длин, их разрешение, топологические слои.

При переносе топологии в другие САПР, нужно из топологии ячейки верхнего уровня выполнить команду File – Export с выбором формата. Доступно несколько нейтральных форматов для переноса – DXF/DWG, EGS, GDSII, Gerber/NC Drills, ODB++ и IGES. Формат Gerber/NC Drills – это файлы для производства, их стоит избегать, после импорта их возможно придется подчищать.



При экспорте топологии в промежуточный формат, экспортировать нужно топологию ячейки верхнего уровня, а не ячейку собственно фильтра. Связано это с тем, что ячейка фильтра является параметризированной ячейкой-шаблоном и при экспорте использует значения переменных по умолчанию, а не подобранные значения после оптимизации.

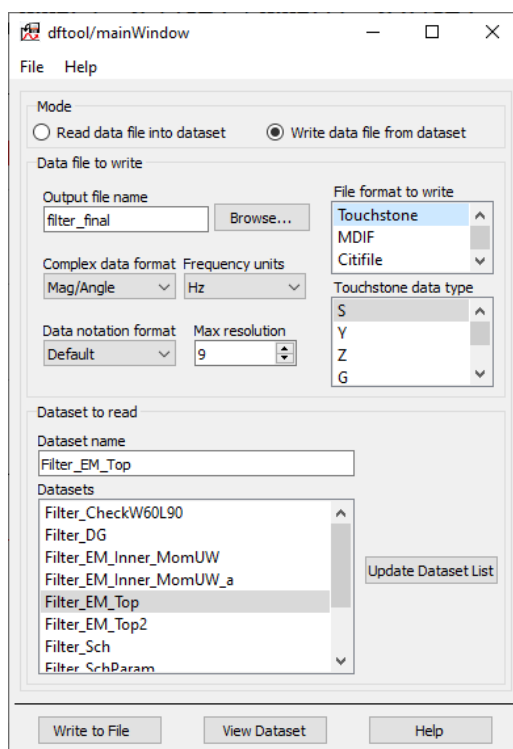
Важно понимать, что ни один из предложенных форматов не перенесет топологию параметризированной. Если планируется работа в следующем

САПР с возможной подстройкой размеров, то скорее всего топологию придется в этом следующем САПР собирать заново.

Также не все данные форматы переносят информацию о подложке и иногда не содержат в себе указание на размерность единиц длин (мм, дюйм и пр.), в которых спроектирована топология. Данную информацию необходимо где-нибудь записать отдельно.



Результаты моделирования можно экспортировать из окна результатов по команде Tools – Data File Tool в режиме Write data file from dataset.



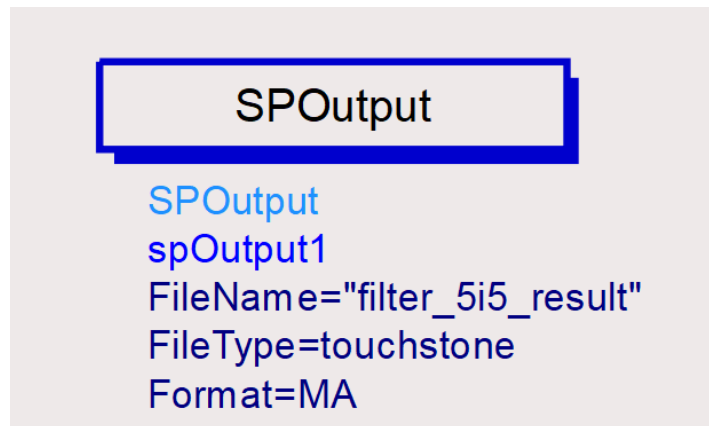
После нажатия на кнопку Write to File в подпапке «data» появится указанный файл. Для фильтра результаты являются 2-портовыми S-параметрами, т.е. файл типа s2p. Частотная сетка определяется диапазоном моделирования.



Также в области графиков можно воспользоваться функцией write_snp(). В отличие от утилиты Data File Tool, она пишет файлы в корневую папку проекта «_wrk». Но при этом позволяет чуть больше контролировать формат экспортированных файлов s-параметров, в том числе можно добавить комментарии в заголовок файла или переопределить символ разделителя. Данная функция автоматически перезаписывает файл и возвращает True или False, в зависимости от успеха записи файла.

Eqn S2P_suc=write_snp("filter_export.s2p", S, "My filter results", "MHz", "DB")

! Также в схеме доступен управляющий блок SPOutput, который при каждом запуске моделирования сохраняет результаты в файл s-параметров. Файл по умолчанию пишется в подпапку «data».



Задание на выполнение

В соответствии с необходимыми требованиями спроектировать микрополосковый фильтр. Провести его настройку на схемном и топологическом уровнях. Экспортировать полученные результаты (топологию и s-параметры) для использования в курсовом проекте.

Требования на АЧХ фильтра брать из требований на АЧХ канала в курсовом проекте, желательно с некоторым запасом по уровню запырания (+1..2 дБ). Требования на S11 приемлемо брать в диапазоне –10..–15 дБ.

Список рекомендованных ВЧ-подложек и рекомендации по их выбору приведены в соответствующем разделе методики выполнения.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

Требования к отчёту

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

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

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

Готовый отчет необходимо экспортировать в pdf.

Архив проекта MWO лучше всего делать встроенным инструментом File – Archive Project. Архивированный проект имеет расширение *.emz.

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) Верификация результатов моделирования.

Провести анализ спроектированного фильтра в другом доступном САПР. Учесть, что т.к. фильтр является высокочастотным микрополосковым планарным устройством, то для ЕМ-моделирования эффективнее использовать виды моделирования, основанные на методе моментов (МоМ) или методе конечных элементов (FEM). Нужно избегать видов моделирования, основанных на методе конечных разностей во временной области (FDTD), т.к. они требуют повышенных требований на временной шаг для получения достоверных результатов в зонах записи. Методы МоМ и FEM возвращают результаты изначально в частотной области и лучше подходят для моделирования фильтров.

Контрольные вопросы

//TODO

Литература

1. Страница IDE VSCode <https://code.visualstudio.com/>
2. Расширение AEL для VSCode <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=key-sight-technologies.ael>

Ссылки на документацию использованных ЭКБ

3. Документация на ВЧ-подложки RO4003C и RO4350B <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates>
4. Документация на ВЧ-подложку RO4360 <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4360g2-laminates>
5. Документация на ВЧ-подложку RO3003 <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates>

6. Общий каталог магазина ЭлекТрейд-М <http://www.eltm.ru/>
7. Специальный раздел магазина ЭлекТрейд-М, посвященный базовым материалам печатных плат <https://pcmaterial.ru/>

Записи Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

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

Разработчик:

Ст.преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.