

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 №6/1**

### **«Проектирование микрополосковых фильтров. Мастер iFilter в AWR MWO»**

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

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

Москва, Зеленоград

2025

## Оглавление

Оглавление.....	2
Введение.....	2
Теоретические сведения .....	2
Методика выполнения работы.....	3
Рекомендации по выбору ВЧ-подложки и топологии фильтра .....	3
Мастер iFilter .....	6
Схемная оптимизация.....	9
ЕМ-анализ средствами и тонкая подстройка.....	12
Экспорт топологии фильтра и результатов .....	21
Задание на выполнение.....	23
Требования к отчёту.....	23
Задание на самостоятельную работу.....	24
Контрольные вопросы .....	24
Литература .....	24

## Введение

**Цель работы:** ознакомиться с инструментом синтеза микрополосковых фильтров в среде AWR Microwave Office (MWO).

**Используемое оборудование или ПО:** материал подготовлен на основании версии AWR Microwave Office 16.1. Однако, в работе не используются никакие специфичные для данной версии инструменты, все используемое и описываемое существует в MWO практически в таком же виде как минимум с версии MWO 2003.

**Продолжительность работы:** 4 часа.

Предполагается, что студент частично знаком с приемами работы в MWO, но не использовал мастер синтеза фильтров и не проводил ЕМ-моделирование.

## Теоретические сведения

//TODO

## **Методика выполнения работы**

При работе с мастером синтеза микрополосковых фильтров iFilter в MWO типовой маршрут работы обычно следующий:

1. Создание исходной структуры фильтра через мастер iFilter.
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.

### **Рекомендации по выбору 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  $90^\circ$  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 технологическому процессу);

- 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 стекол 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) [4];

- 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) [4];

- 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) [5];

- 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) [6].

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. Таблица взаимозаменяемости приведена ниже. 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 [7] и [8].

**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	-

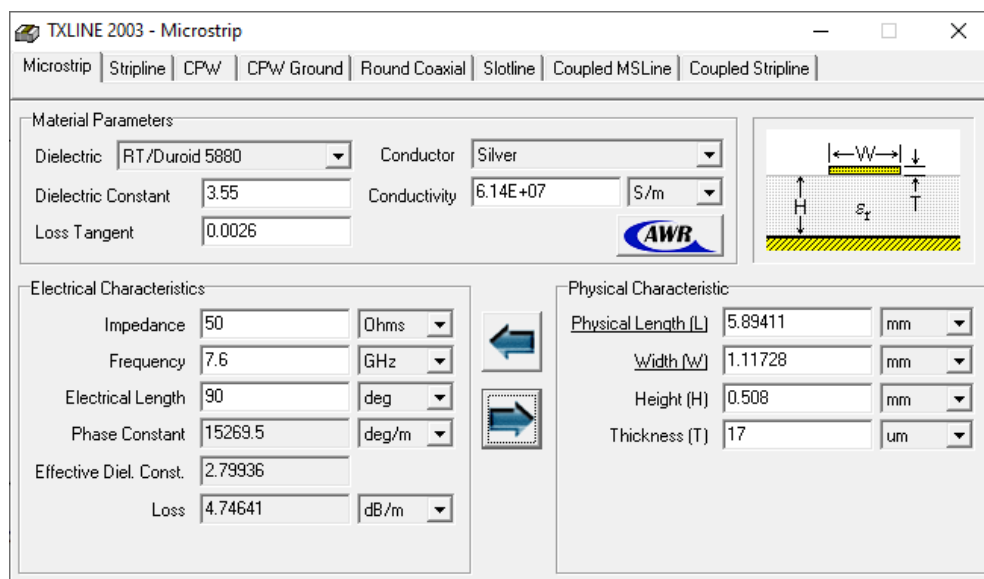
При выборе конкретной топологии фильтра можно остановиться на шпильчатой и вариациях, построенных на связанных линиях. Использовать топологию на встречных штырях в микрополосковой реализации не стоит, т.к. используются земляные отверстия, которые методом моментов (AXIEM в

MWO) считаются довольно долго. Также 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.

Определим требования к фильтру:

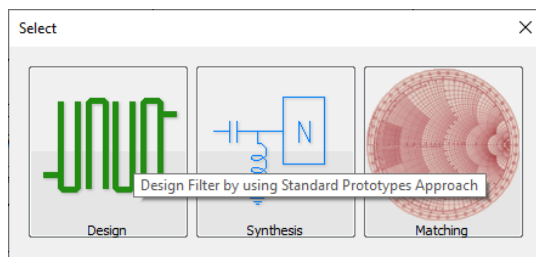
- полосно-пропускающий фильтр;
- центральная частота  $F_c = 7,6$  ГГц;
- ширина полосы пропускания по  $-3\text{дБ}$   $\Delta f_{-3\text{дБ}} = 800$  МГц;
- границы полосы заграждения  $6,0..6,6$  ГГц (нижняя полоса) и  $8,6..9,0$  ГГц (верхняя полоса);
- уровень заграждения  $30$  дБ по отношению к уровню полосы пропускания.

В качестве ВЧ-подложки выберем RO4003C ( $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\tan\delta = 0,0026$ ) толщиной  $0,508$  мм с толщиной металлизации  $\frac{1}{2}$  os (17 мкм). Анализ линии  $50$  Ом,  $90^\circ @ 7,6$  ГГц с помощью TXLINE говорит о ее размерах  $1,1$  мм х  $5,9$  мм. Отношение близко к  $1/5$ .

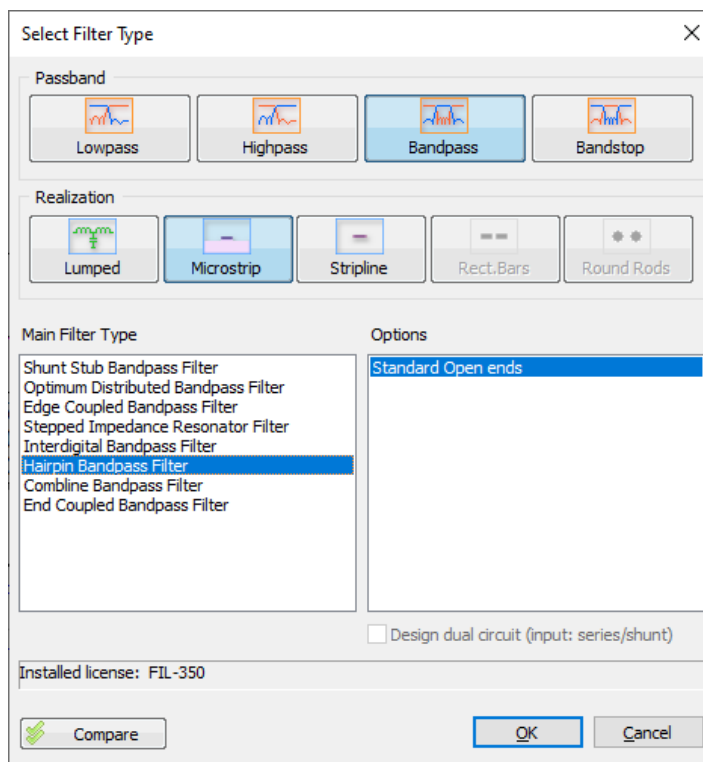


## Мастер iFilter

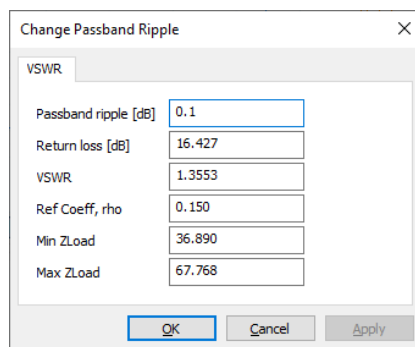
Запуск мастера iFilter делается в дереве проекта в списке Wizards - iFilter Filter Sythesis. В окне Select нужно выбрать режим Design.



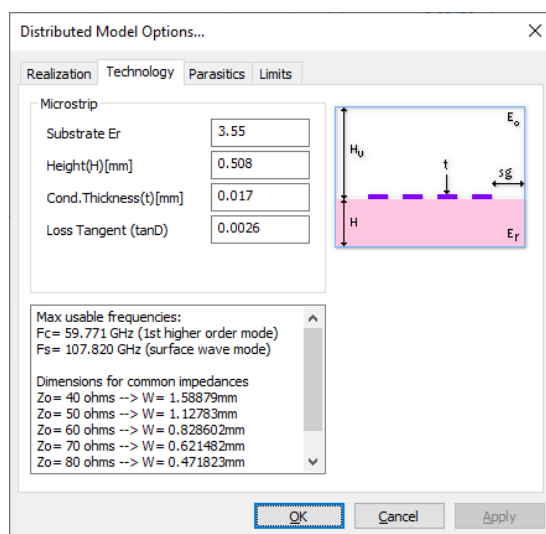
В следующем окне выбирается тип АЧХ фильтра (Bandpass, ППФ), реализация на каких элементах (Microstrip, микрополосковая реализация) и топология фильтра, остановимся на шпильчном фильтре (Hairpin) без дополнительных модификаций.




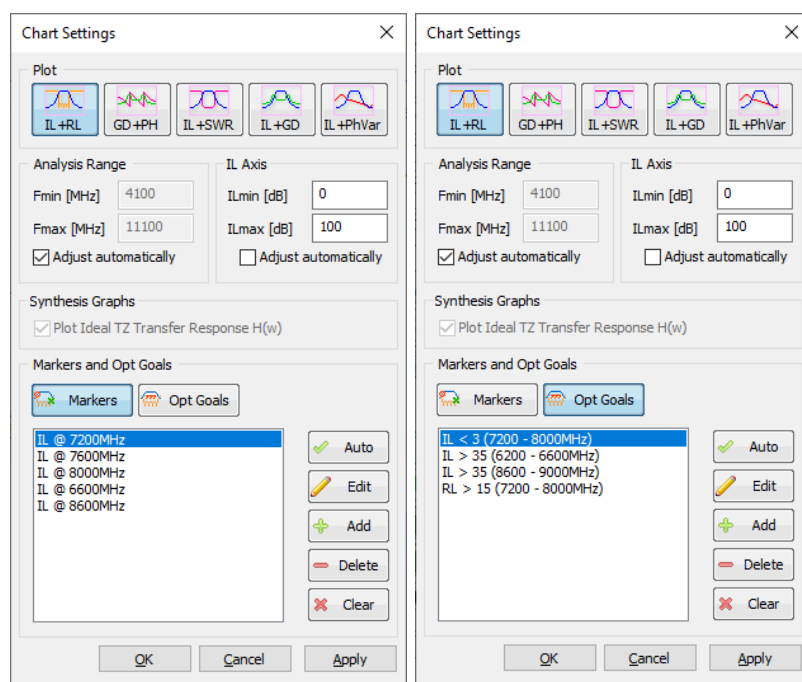
Далее в открывшемся окне нужно настроить желаемые свойства фильтра. По кнопке Ripple [dB] [Ripple[dB]] можно оценить ожидаемые частотные свойства фильтра в полосе пропускания. Текущая неравномерность в полосе пропускания (Passband ripple) 1 дБ нас устраивает.



Далее, по кнопке Design Options  на вкладке Technology нужно задать параметры ВЧ-подложки.





По кнопке Edit Chart Settings  зададим маркеры (Markers) на интересующих нас частотных точках на графике АЧХ (IL). Здесь же можно определить спеки для будущей оптимизации (OptGoals).




В группе Specification указываются параметры фильтра прототипа. Укажем центральную частоту 7,6 ГГц и ширину полосы пропускания  $BW = 800$  МГц. Значение волнового сопротивления резонаторов  $Reson\ Z_0 = 60$  Ом довольно удобная цифра, менять ее не будем. А вот с порядком фильтра (Degree) придется поиграться, пока значения на АЧХ не станут более-менее приличными. Причем, т.к. в дальнейшем результаты анализа заведомо будут хуже, чем на текущем представленном графике АЧХ фильтра-прототипа, то заложимся на уровень запырания в полосе заграждения  $>45$  дБ (вместо нужных по ТЗ 30 дБ). Подобранный пятый порядок выглядит приемлемо.

Specifications	
Degree	5
Fo[MHz]	7600
BW[MHz]	800
Reson Zo	60
RSource	50
RLoad	50

Для того, чтобы получить оценочный вид топологии фильтра в мастере, нужно нажать на кнопки Analyze Real  и View Layout .

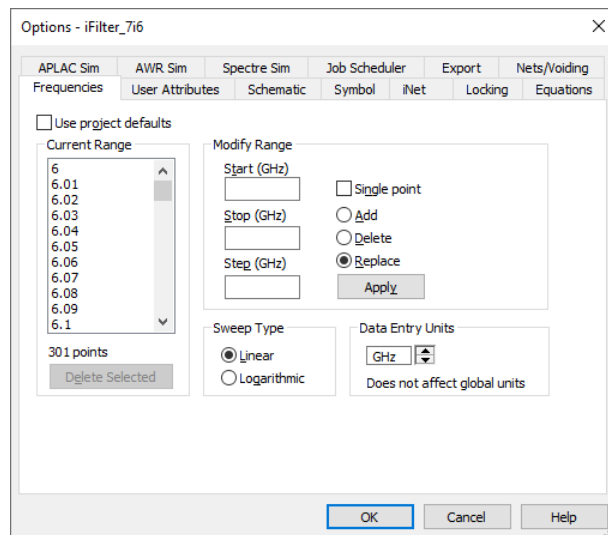
После всех данных манипуляций окно мастера должно выглядеть приблизительно, как показано ниже.



Работа в мастере закончена. По кнопке Generate Design  необходимо создать схему на основании расчетов фильтра. В данном окне можно сразу настроить параметры моделирования схемы, включая частотную сетку, создание подготовленных графиков и рекомендованные к тюну и оптимизации параметры.








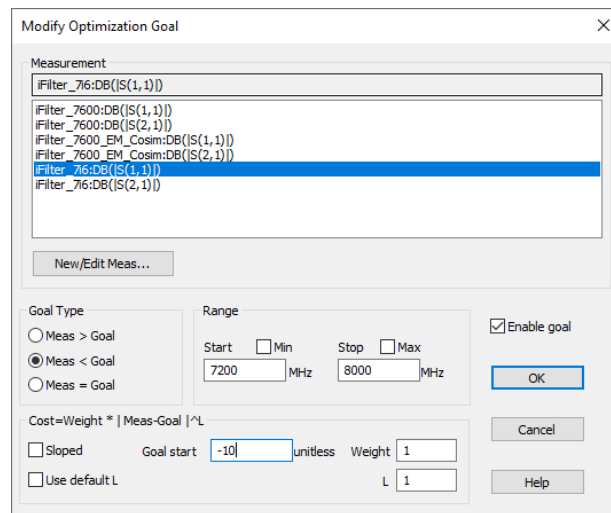
Также разрешим к тюну еще общую длину LTOT.

W1\_v1=0.8286  
S1\_v1=1.6572  
S2\_v1=0.421  
S4\_v1=0.5559  
LTOT=4.5823  
LBot=0.01  
Ltee=0.1127  
LTop=LTOT-LBot-Ltee  
Ltaper=0.1127  
W\_v1=1.1278  
L\_v1=1.015

В редакторе переменных схем View - Variable Browser  (Alt+6) разрешим LTOT к оптимизации и ограничим ей диапазон. Настройки остальных размеров трогать не будем.

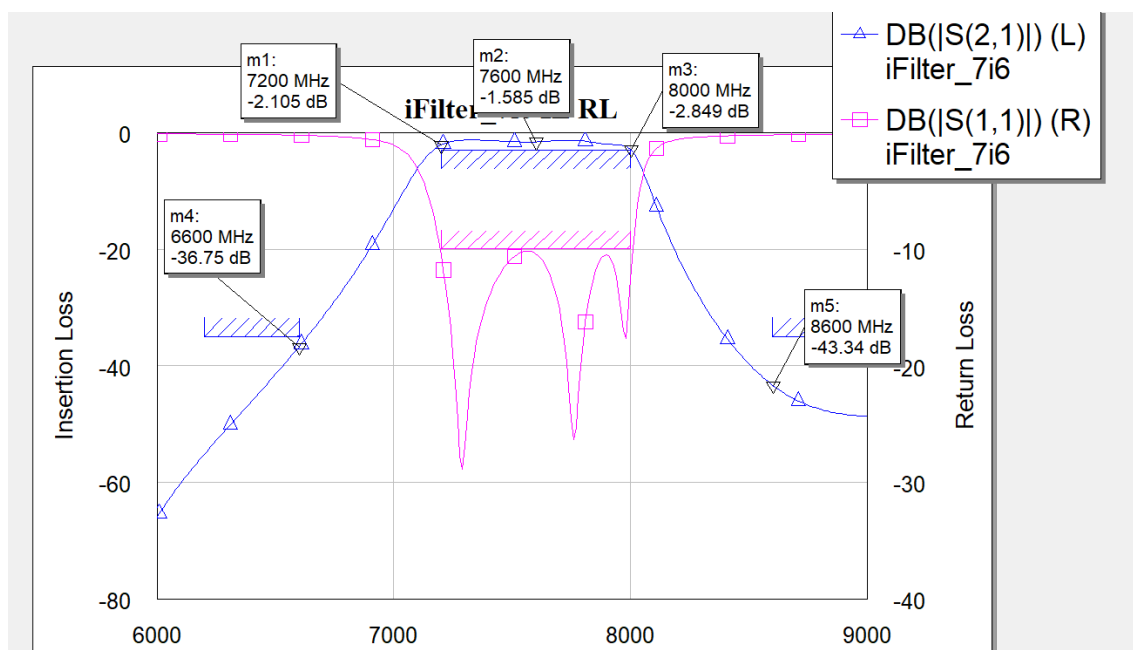
Document	Element	ID	Parameter	Value	✓ Tune	✓ Optimize	✓ Constrain	Lower	Upper	Step Size	Ta
iFilter_7i6	EQN		LTOT	4.5823	✓	✓	✓	4	5		
iFilter_7i6	EQN		S4_v1	0.5559	✓	✓	✓	0.4447	0.6671		
iFilter_7i6	EQN		LBot	0.01	✓	✓	✓	0.008	0.012		
iFilter_7i6	EQN		W1_v1	0.8286	✓	✓	✓	0.6629	0.9943		
iFilter_7i6	EQN		S1_v1	1.6572	✓	✓	✓	1.326	1.989		
iFilter_7i6	EQN		S2_v1	0.421	✓	✓	✓	0.3368	0.5052		

Переходим к настройке целей оптимизатора. Текущие требования на S11 довольно жесткие и их может получиться выполнить не выйдет. Смягчим требования на S11 в полосе пропускания до -10 дБ.





Также нужно проверить требования на уровни запырания. Они по ТЗ определяются относительно уровня пропускания.

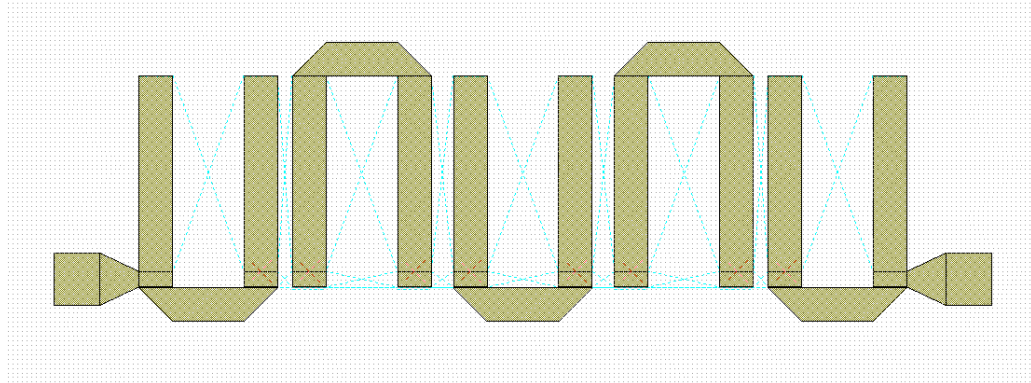
Переходим на окно оптимизатора Simulate – Optimize (F7). Запускаем оптимизацию. Схемная оптимизация пройдет довольно быстро.



При расчете оптимизатора может получиться, что не получается выполнить требования на АЧХ, потери в полосе пропускания оказываются ниже 3 дБ. Но при этом видно, что требования на запырание выполняются с запасом. В этом случае, можно смягчить требования на потери в полосе пропускания, до 4..5 дБ. Но при этом надо не забыть пропорционально ужесточить требования на уровни запырания (т.к. по ТЗ они определяются относительно уровня пропускания).

В конце расчетов надо посмотреть на получившуюся схему и ее топологическое представление View - View Layout . Надо пройти по

полученным значениям переменных и убедиться, что они имеют допустимые значения (нет ли слишком узких или слишком широких зазоров и ширин, нет ли участков, у которых длина меньше чем ширина и пр.). На топологическом уровне выбрав все компоненты и по команде Edit - Snap Objects - Snap Together  все их соединить и также убедиться, что топология выглядит нормально.

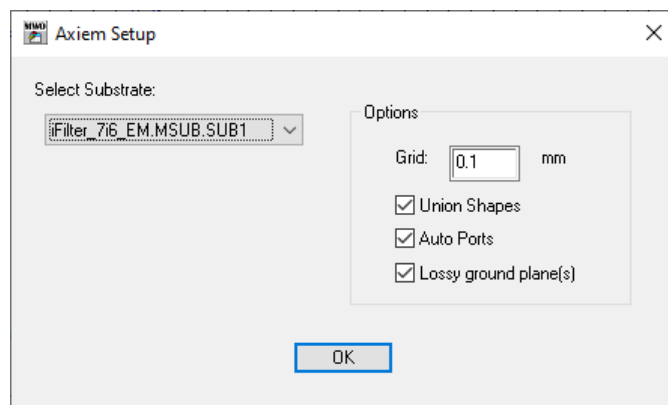


Работа на схемном уровне закончена. Можно перейти к ЕМ-анализу и тонкой финальной подстройке.

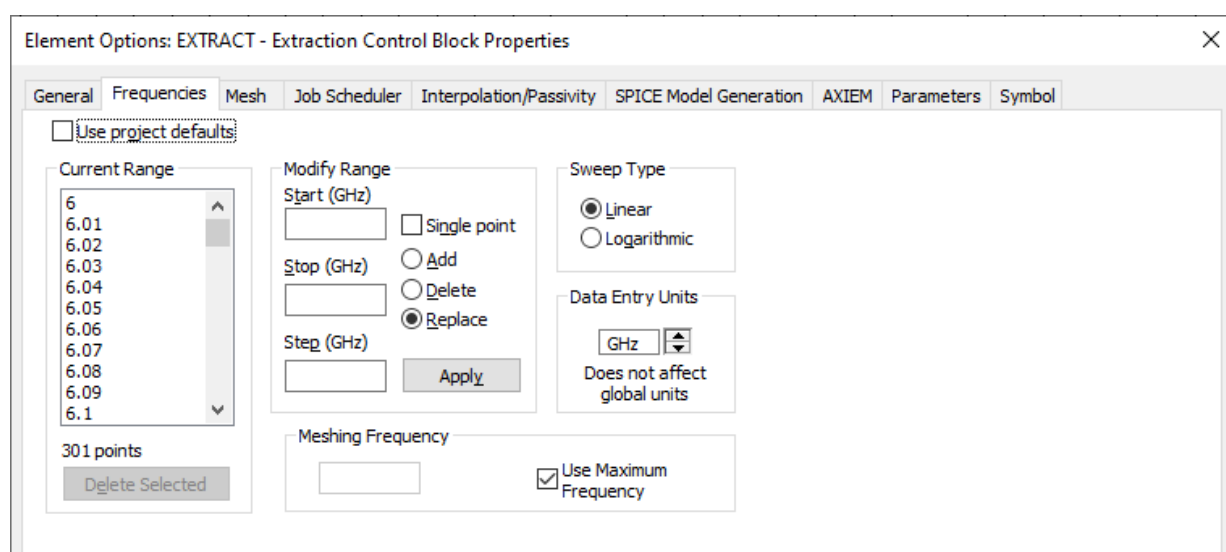
### **ЕМ-анализ средствами и тонкая подстройка**

Подготовим топологию к электромагнитному анализу. Для этого будем использовать инструмент экстракции (косимуляции).

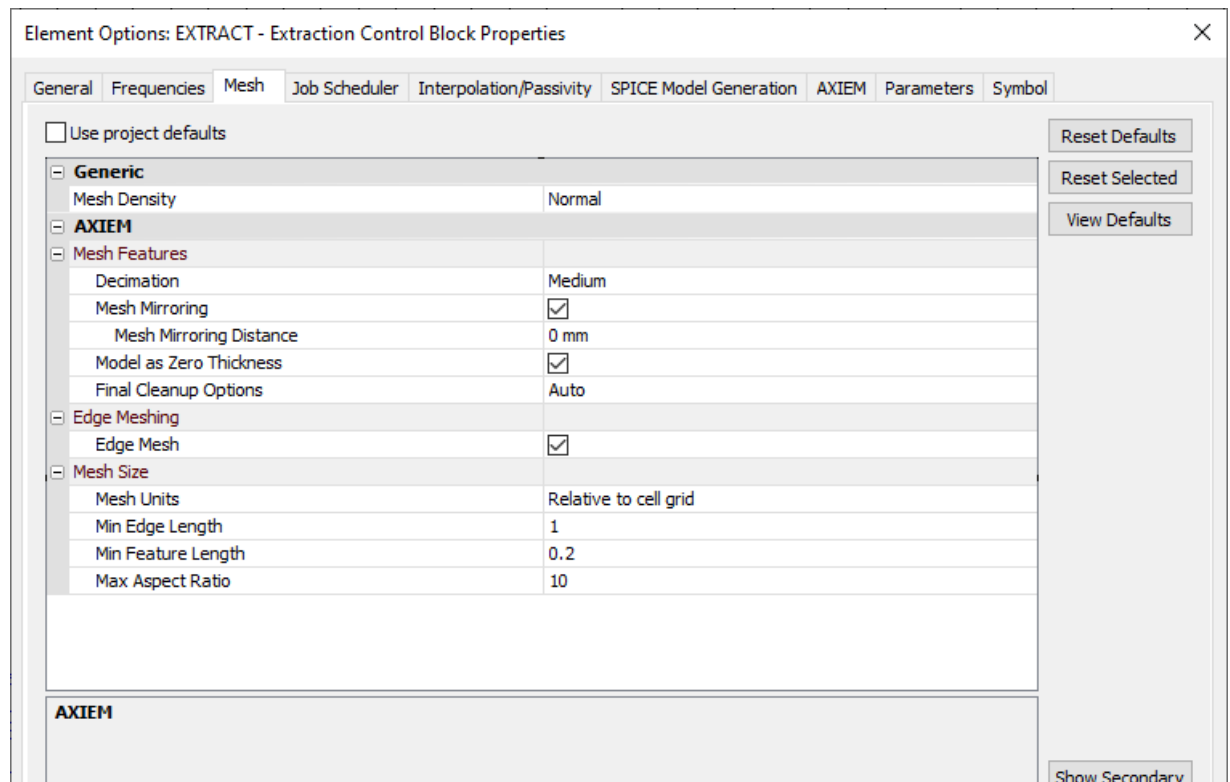
Чтобы не испортить существующую схему, склонируем существующую схему под другим именем ПКМ – Duplicate (iFilter\_7i6\_EM). Экстракция (косимуляция) топологии проводится с помощью блоков EXTRACT и многослойного определения подложки STACKUP. Их можно заполнять вручную. Но существует скрипт, автоматизирующий их создание. Нужно выбрать схемное определение подложки MSUB и запустить скрипт Scripts – EM – Create\_Stackup. В появившемся окошке нужно задать шаг базовой сетки 0,1 мм, что соответствует минимальному зазору/ширине по выбранному техпроцессу. Остальные настройки хорошо подходят для ЕМ-моделирования планарного фильтра методом моментов AXIEM.



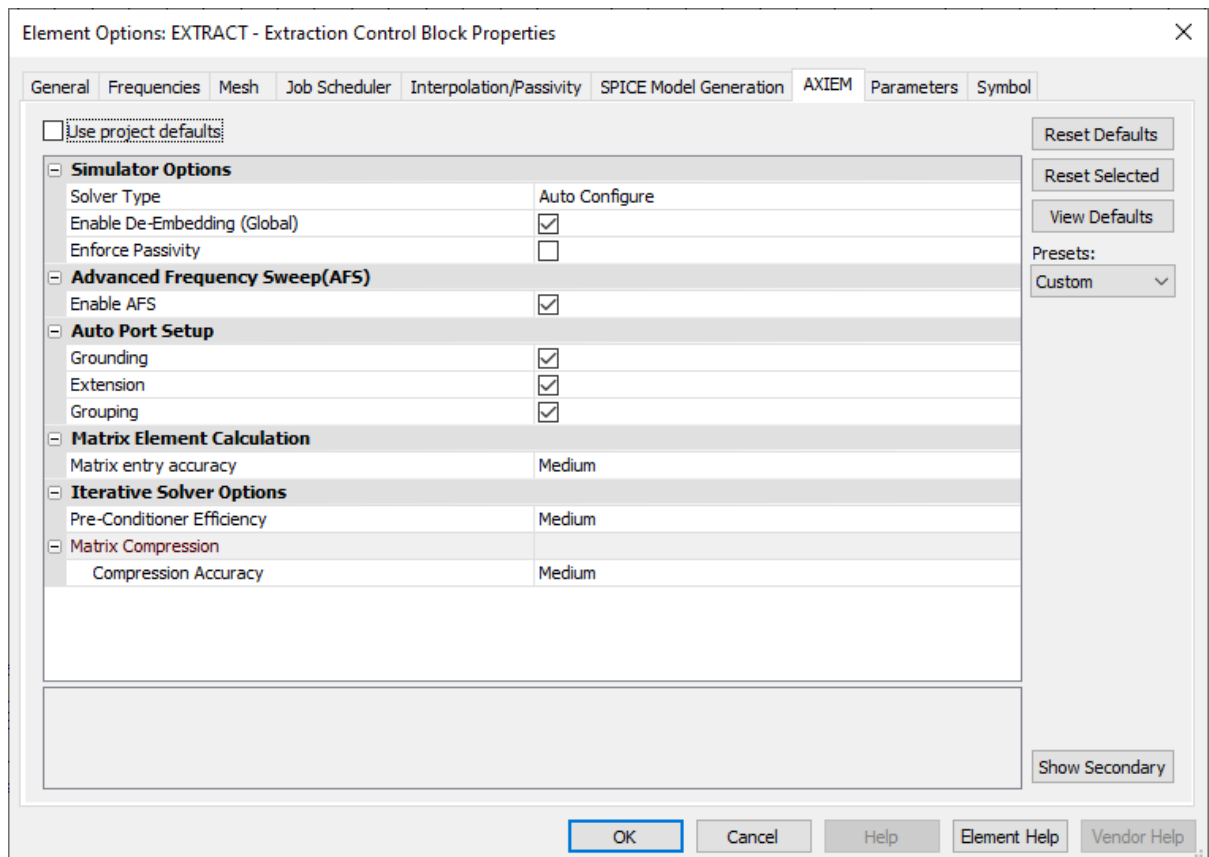
В добавленном в схему блоке EXTRACT нужно пройти по его настройкам. На вкладке Frequencies нужно убедиться, что стоит интересующая нас частотная сетка.



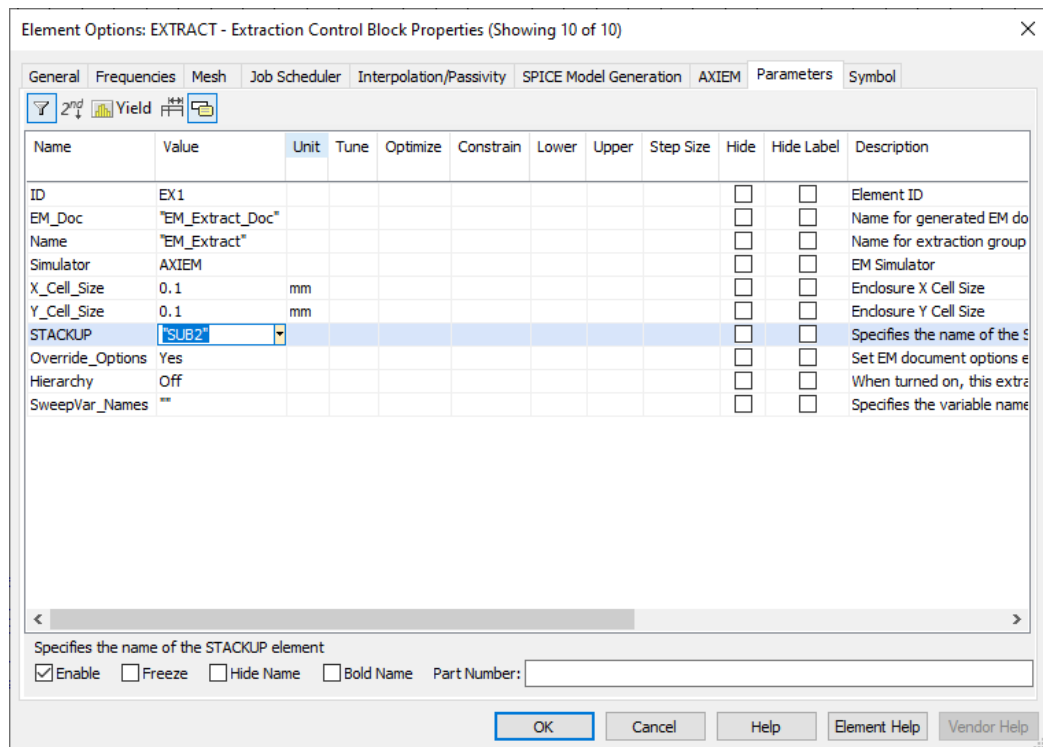
На вкладке Mesh задаются настройки сетки. Значения по умолчанию подходят для нашей задачи.



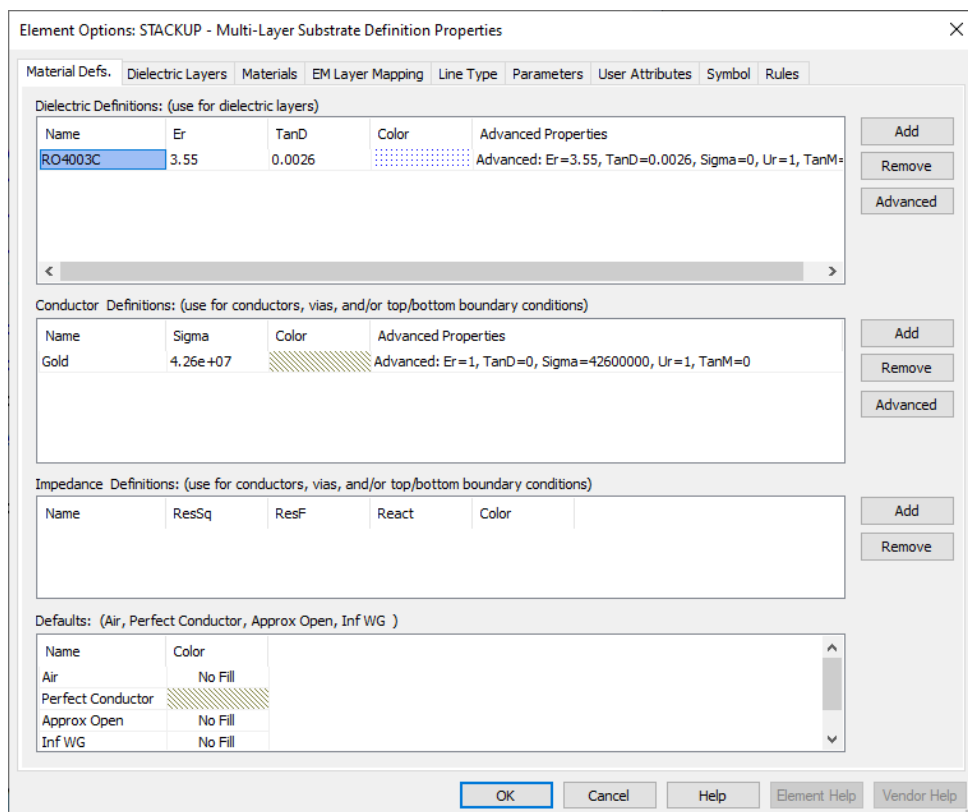
На вкладке AXIEM нужно убедиться, что включен режим Advanced Frequency Sweep.



На вкладке Parameters нужно указать имя ЕМ-стека SUB2.

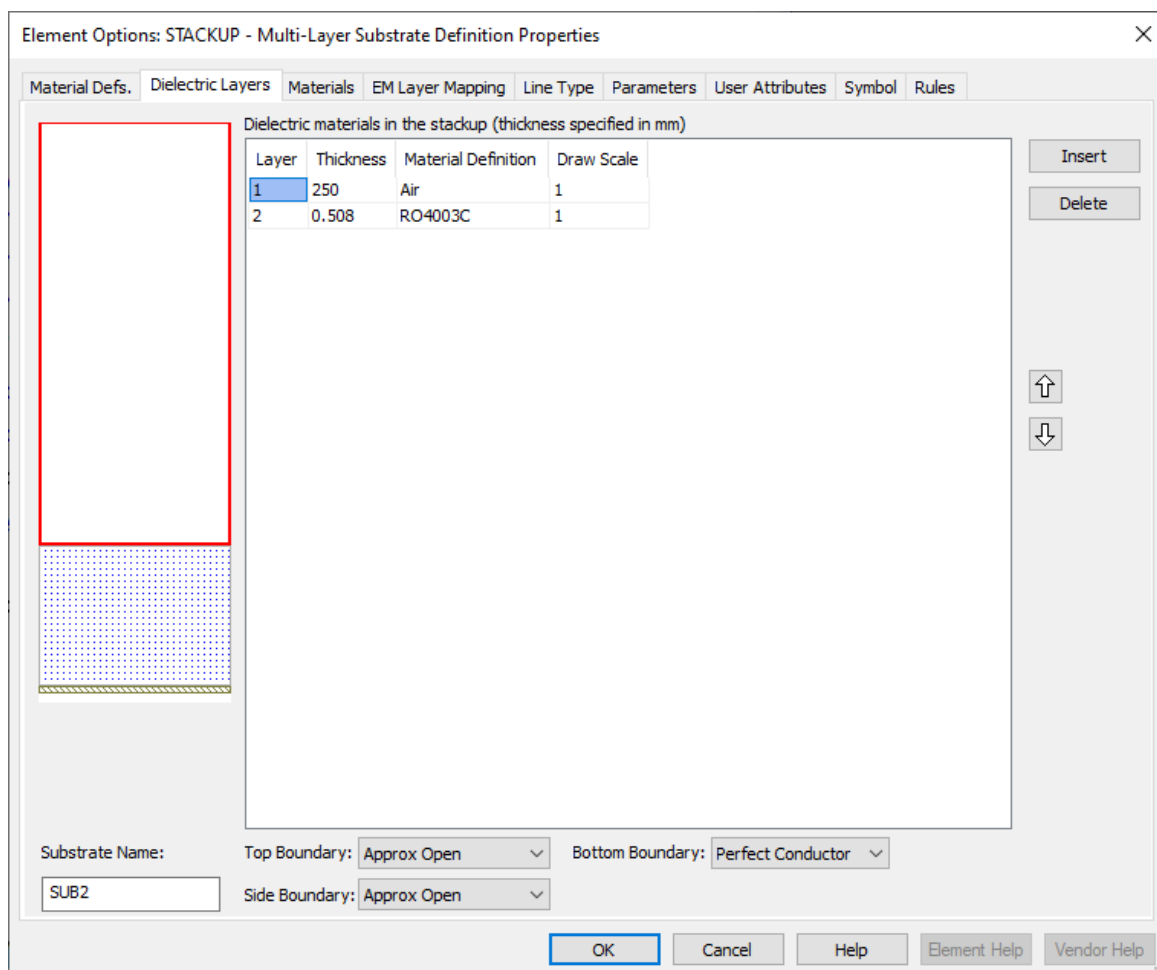


Далее нужно проверить настройки ЕМ-стека SUB2. На вкладке Materials Defs. Определяются используемые материалы диэлектриков. Они импортированы из MSUB. Чтобы не путаться, можно переименовать название диэлектрика на настоящее RO4003C.

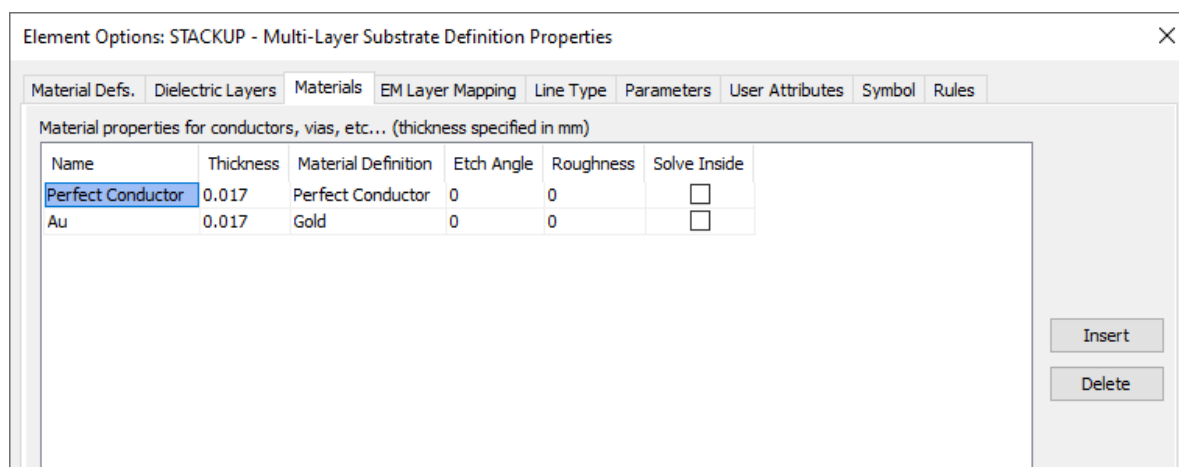


На вкладке Dielectric Layers указывается структура подложки по диэлектрическим слоям. Толщины также импортируются из MSUB. При этом

толщина воздуха достаточно большая (250 мм). Также нужно проследить за граничными условиями – Top Boundary = Approx Open, Bottom Boundary = Perfect Conductor, Side Boundary = Approx Open.

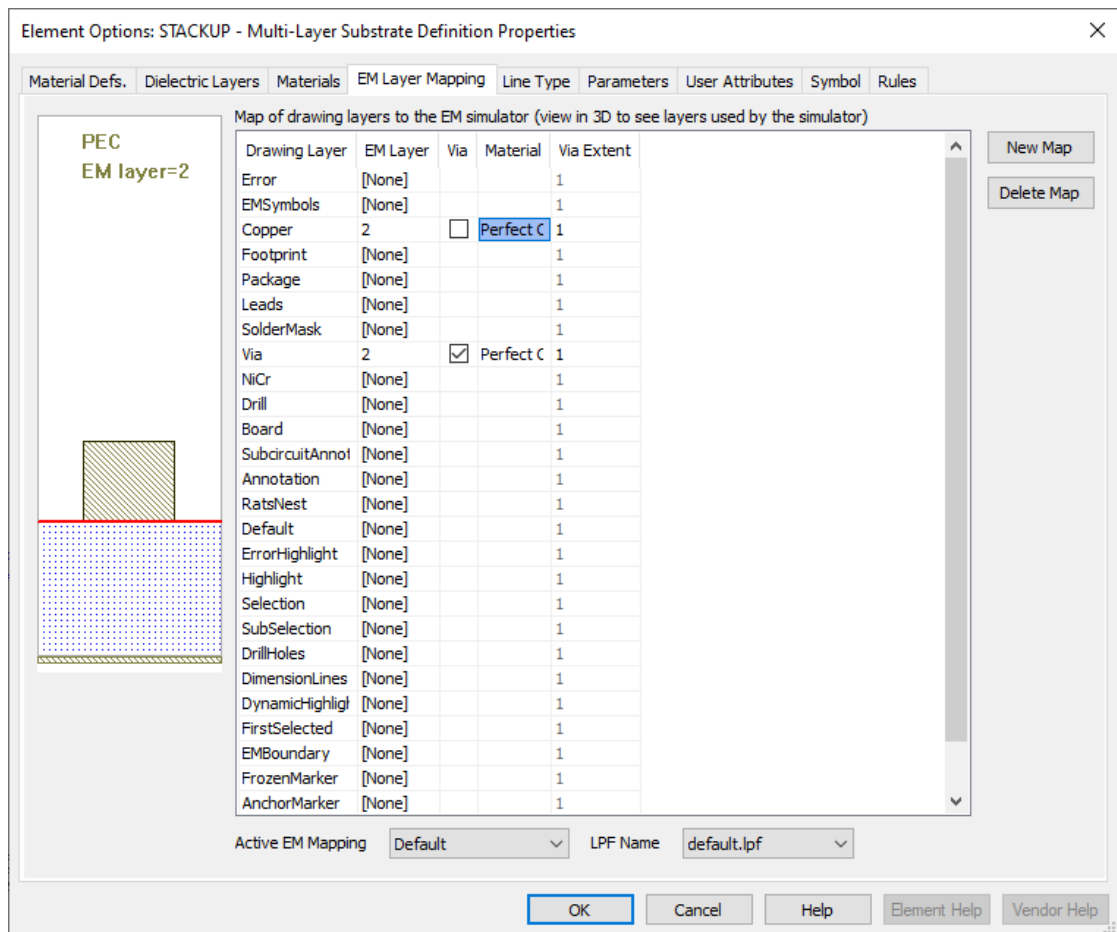


На вкладке Materials задаются материалы проводников. На ней ничего менять не нужно.



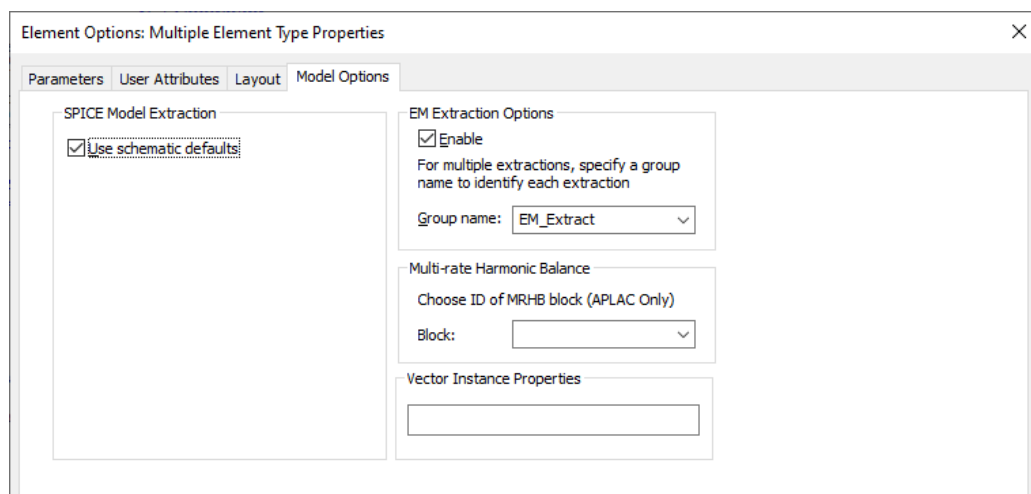
На вкладке EM Layer Mapping указываются металлизированные слои. Здесь нужно у слоя Copper (EM Layer = 2) заменить материал на Perfect Conductor.





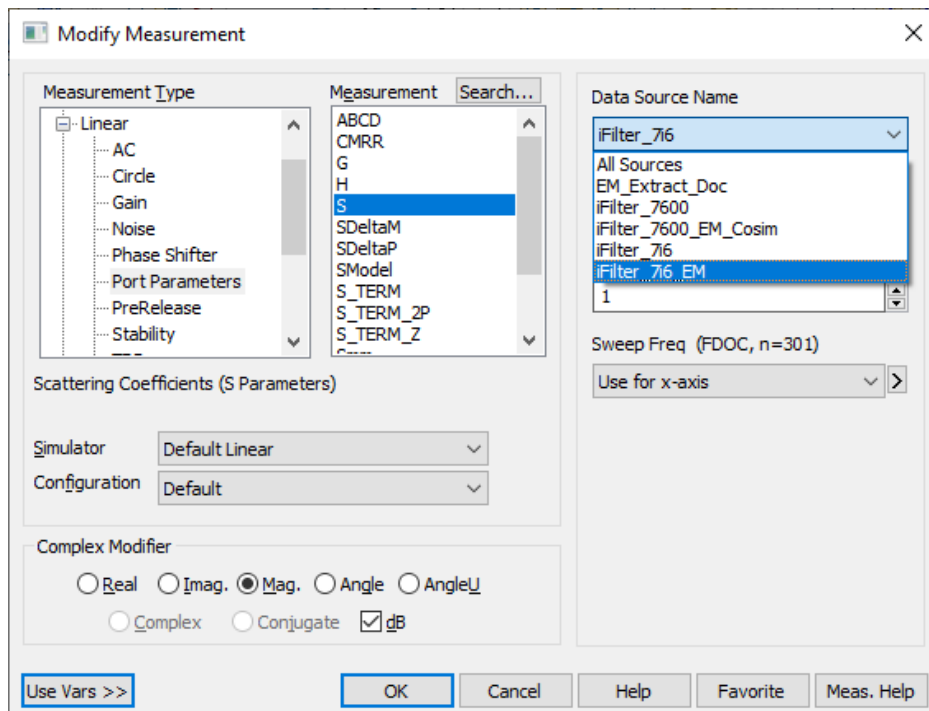
На последующих вкладках ничего настраивать не нужно.

Далее нужно указать, какие части схемы уходят в генерацию топологии (экстракцию). Для этого нужно выбрать все полосковые части схемы и в их параметрах на вкладке Model Options в группе EM Extraction Options включить галку Enable и выбрать имя блока экстракции (EM\_Extract).

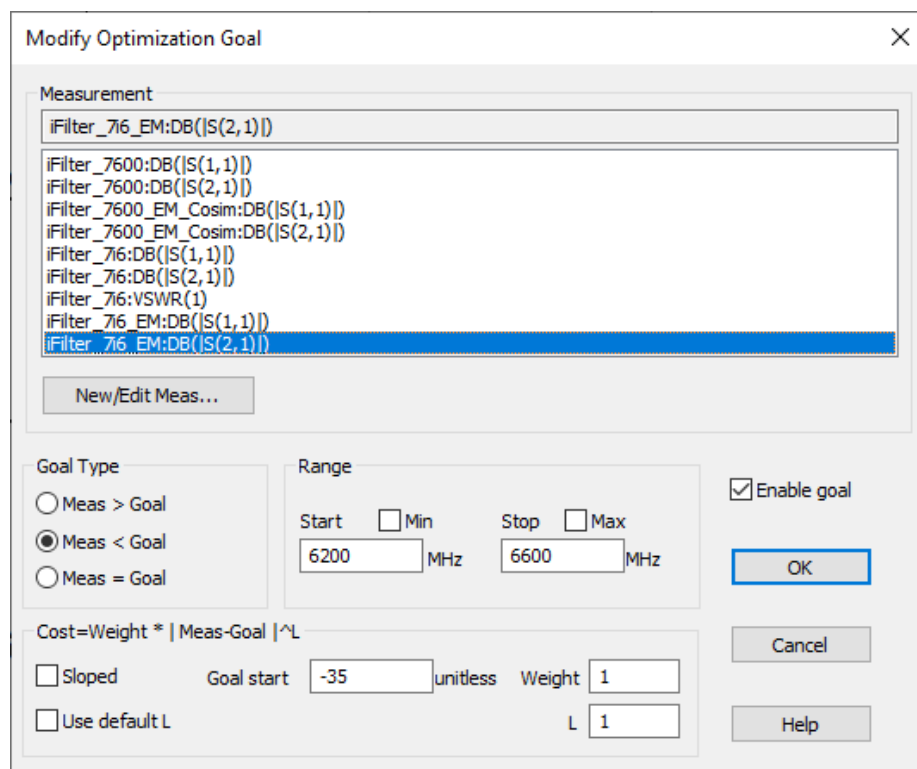


Убедиться, какие части схемы отправлены в экстракцию можно, выбрав блок EXTRACT на схеме. Все части схемы, связанные с ним, будут подсвечены одним с ним цветом.

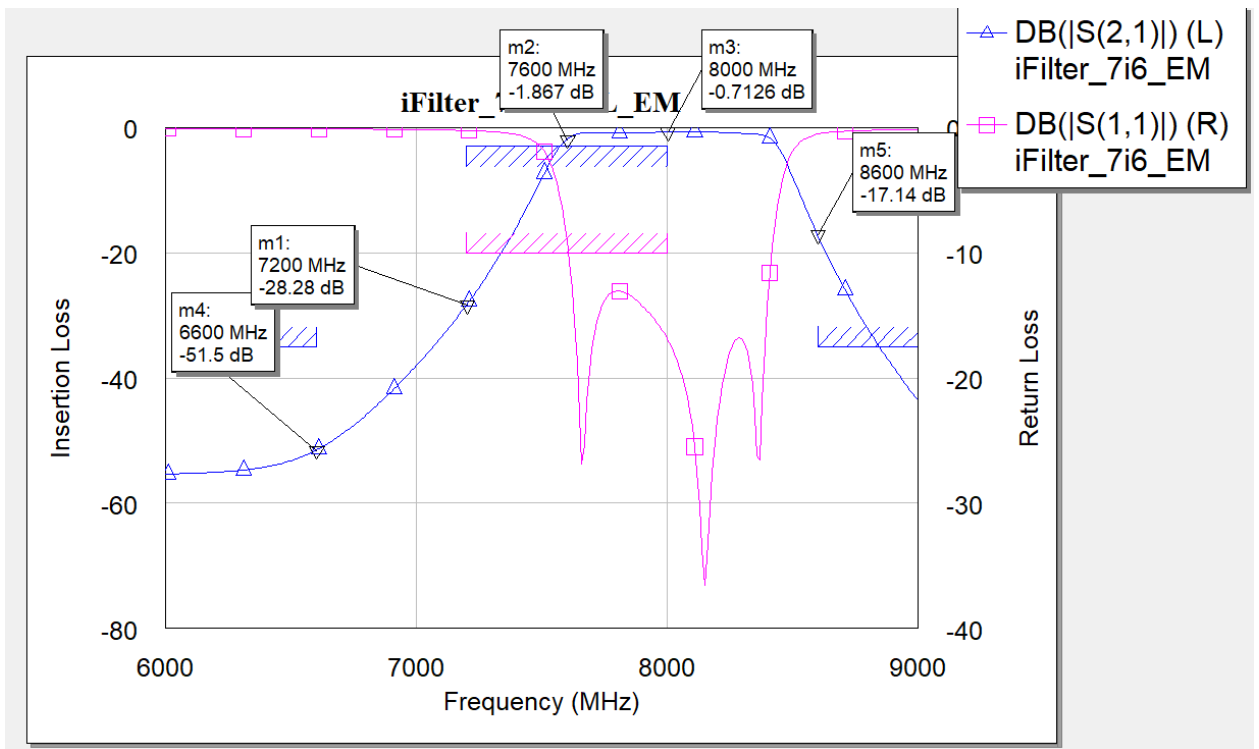




Чтобы на графиках изображались границы с оптимизации, надо аналогично отредактировать существующие цели оптимизатора, изменив им измерительные выражения.



Топология готова к запуску. Результаты моделирования показывают некоторый уход центральной частоты фильтра вверх с сохранением формы АЧХ.

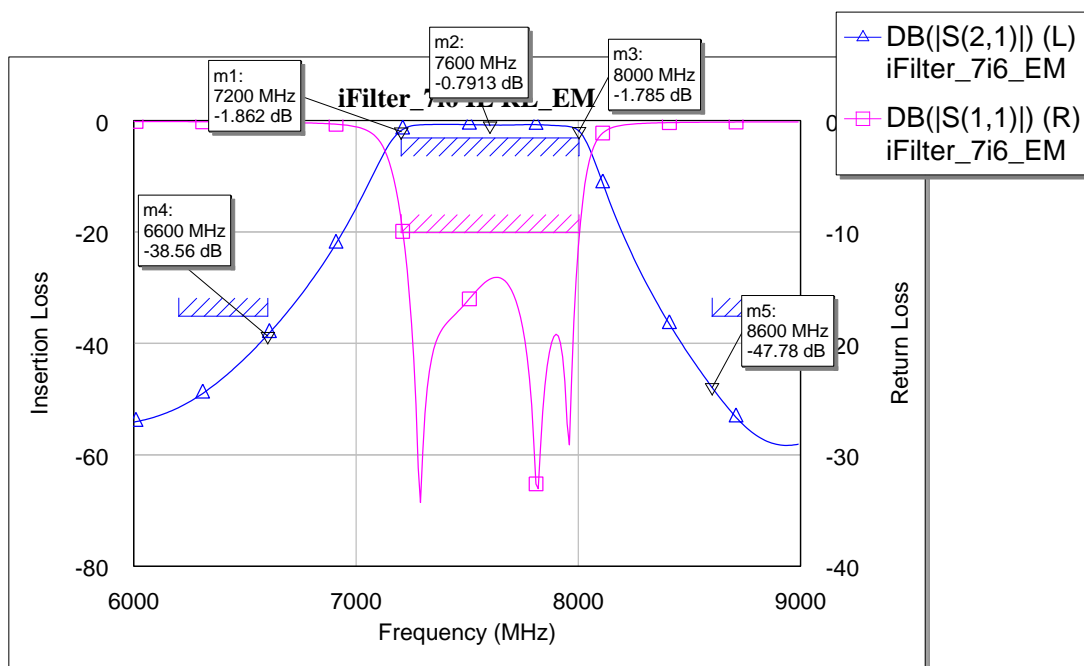


Можно опять заняться оптимизацией. Но, т.к. для расчета используется ЕМ-модель, то оптимизация может занять неоправданно большое время. Вместо этого можно аккуратно поработать с некоторыми параметрами схемы. В данном случае видно, что явно нужно увеличить какую-либо из длин, в первую очередь LTOT. И вручную, за несколько запусков ЕМ-моделирования выйти на нужные характеристики.

```
W1_v1=0.73
S1_v1=1.55
S2_v1=0.31
S4_v1=0.48
LTOT=4.9
LBot=0.015
Ltee=0.33
LTop=LTOT-LBot-Ltee
Ltaper=0.72
W_v1=1.13
L_v1=1
```

Также стоит округлить численные значения до разумных точностей и посмотреть, к чему это приведет. Результаты моделирования по окончании тонкой подстройки приведены ниже.

Видно, что потери в полосе фильтра не больше ~2 дБ, что оказалось лучше изначально требуемого 3 дБ. По графикам также следует, что полученный уровень запираия ~36,5 дБ, что также заведомо лучше требуемого 30 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-либо еще электромагнитном САПР, чтобы убедиться в достоверности результатов.

### Экспорт топологии фильтра и результатов

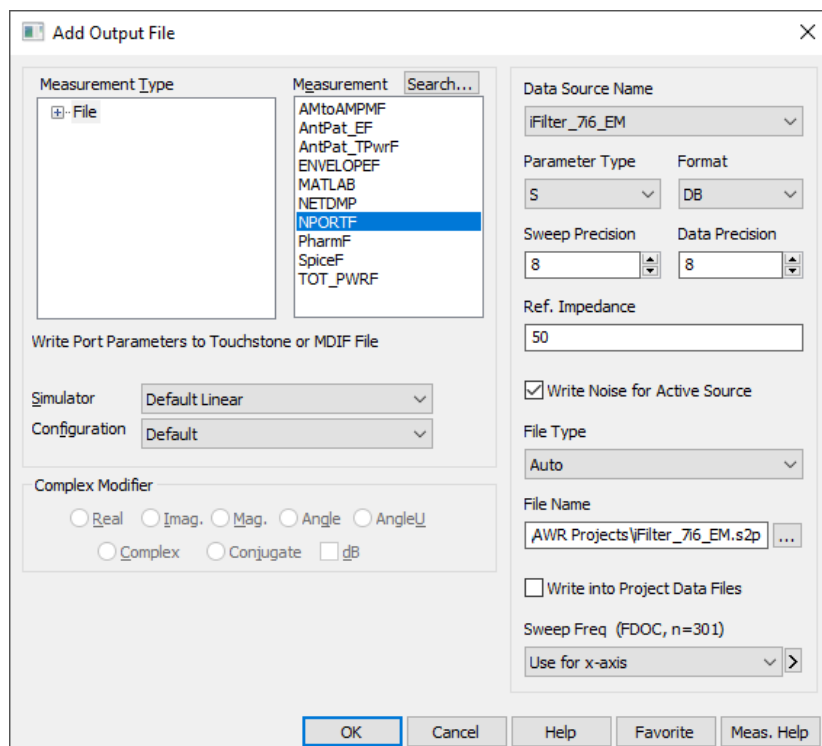
Для дальнейшего использования данного фильтра в других САПР могут понадобиться его топология и результаты моделирования.

Топология переносится из дерева проекта по схеме ПКМ – Export Layout. Доступно несколько нейтральных форматов для переноса – GDSII, DXF и Gerber/NC Drills. Формат Gerber/NC Drills – это файлы для производства, их стоит избегать, после импорта их возможно придется подчищать. GDSII и DXF более подходящие форматы для переноса.

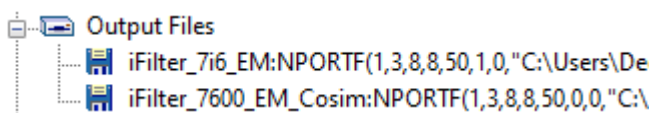
Важно понимать, что ни один из предложенных форматов не перенесет топологию параметризированной. Если планируется работа в следующем САПР с возможной подстройкой размеров, то скорее всего топологию придется в этом следующем САПР собирать заново.

Также данные форматы не 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 переносятся через создание Output Files в дереве проекта. Надо будет указать источник, тип файла, его параметры и имя. Для фильтра результаты являются 2-портовыми S-параметрами, т.е. файл типа s2p (измерение NPORTF).



Запись файла произойдет после запуска моделирования.



### **Задание на выполнение**

В соответствии с необходимыми требованиями спроектировать микрополосковый фильтр с использованием мастера iFilter. 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 запираания (+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 запыливания. Методы МоМ и FEM возвращают результаты изначально в частотной области и лучше подходят для моделирования фильтров.

## **Контрольные вопросы**

//TODO

## **Литература**

1. Бахвалова, С. А. (Автор МИЭТ, Ин-т МПСУ). Основы конструирования РЭС : лабораторный практикум / С. А. Бахвалова ; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ". - Москва : МИЭТ, 2021. - 68 с. - Имеется электронная версия издания. - б.ц., 100 экз. - Текст : непосредственный : электронный.

2. Бахвалова, С. А. (Автор МИЭТ, МРТУС). Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office : учебное пособие / С. А. Бахвалова, В. А. Романюк ; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ". - Москва : СОЛОН-Пресс, 2016. - 152 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/92995> (дата обращения: 09.09.2021). - ISBN 978-5-91359-206-4. - Текст : электронный

3. Бахвалова С.А. (Автор МИЭТ, МРТУС). Основы моделирования устройств в Microwave Office : Лабораторный



практикум / С.А. Бахвалова ; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ". - М. : МИЭТ, 2015. - 180 с. - Имеется электронная версия издания. - б.ц., 100 экз.

***Ссылки на документацию использованных ЭКБ***

4. Документация на ВЧ-подложки RO4003C и RO4350B  
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates>

5. Документация на ВЧ-подложку RO4360  
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4360g2-laminates>

6. Документация на ВЧ-подложку RO3003  
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates>

7. Общий каталог магазина ЭлекТрейд-М <http://www.eltm.ru/>

8. Специальный раздел магазина ЭлекТрейд-М, посвященный базовым материалам печатных плат <https://pcmaterial.ru/>

***Записи Youtube с видеоуроками по AWR MWO***

9. Видеоурок «Feature: iFilter» на канале AWR Design Enviroment  
<https://youtu.be/gZ6-I5KUmq8>

10. Видеоурок «Проектирование и моделирование ВЧ фильтров в AWR Microwave Office. Практический кейс» на канале Softprom - IT Distributor  
<https://youtu.be/RNBBYs1ZICI>

11. Вебинар «Вебинар Знакомство с Cadence AWR Design Environment» на канале PCBSOFT <https://youtu.be/I1-mS8d4hww>

**Разработчик:**

**Ст.преподаватель Института МПСУ**

**Приходько Д.В.**