

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 №6/2

«Проектирование микрополосковых фильтров. Мастер MFilter в Keysight Genesys»

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

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

Москва, Зеленоград

2025

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 2 |
| Теоретические сведения | 2 |
| Методика выполнения работы..... | 2 |
| Рекомендации по выбору ВЧ-подложки и топологии фильтра | 3 |
| Создание и настройка мастера MFilter..... | 6 |
| Схемная оптимизация | 12 |
| ЕМ-анализ средствами Genesys и оптимизация | 16 |
| Способы экспорта фильтра | 26 |
| Задание на выполнение..... | 28 |
| Требования к отчёту..... | 29 |
| Задание на самостоятельную работу | 29 |
| Контрольные вопросы | 30 |
| Литература | 30 |

Введение

Цель работы: ознакомиться с порядком проектирования микрополосковых фильтров в среде Keysight Genesys.

Используемое оборудование или ПО: материал подготовлен на основании версии Keysight Genesys 2023. Однако, в работе не используются никакие специфичные для данной версии инструменты, все используемое и описываемое существует в Keysight Genesys довольно давно.

Продолжительность работы: 4 часа.

Теоретические сведения


//TODO


Методика выполнения работы


При работе с мастером синтеза микрополосковых фильтров MFilter в Genesys типовой маршрут работы обычно следующий:


1. Создание исходной структуры фильтра через мастер MFilter.
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.

В GENESYS присутствует несколько мастеров синтеза фильтров:

 **Passive Filter.** Простой базовый инструмент синтеза фильтров на дискретных компонентах (индуктивностях и емкостях). Построен на основании метода фильтра-прототипа.

 **Active Filter.** Усложнённая версия Passive Filter, предназначенная для синтеза активных фильтров на операционных усилителях.

 **S/Filter.** Наиболее полная версия синтезатора фильтров, позволяющая провести весь список этапов, от выбора аппроксимирующей функции и задания дополнительных нулей и полюсов, до ручного преобразования компонентов.

 **Microwave Filter.** Специализированный на полосковое представление мастер синтеза ВЧ-фильтров. Автоматически генерирует топологию и создает оптимизацию для подбора размеров компонентов.

Для быстрого проектирования микрополосковых фильтров наиболее удобен мастер MFilter.

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° 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) [1];

- 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) [1];

- 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) [2];

- 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) [3].

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 [4] и [5].

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 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.

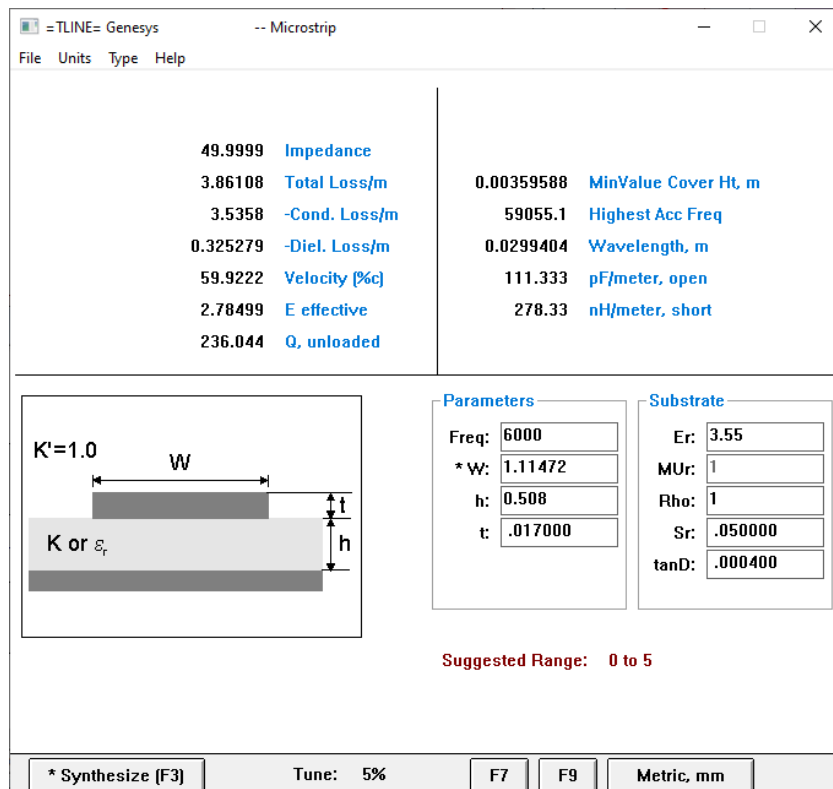
Определим требования к фильтру:

- полосно-пропускающий фильтр;
- центральная частота 6 ГГц;
- полоса пропускания по -3 дБ ± 250 МГц;
- уровень запырания по 30 дБ ± 800 МГц.

В качестве подложки выберем RO4003 ($\epsilon_r = 3,55$, $\tan D = 0,0026$) толщиной 0,508 мм (20 mils) с толщиной металлизации 17 мкм ($\frac{1}{2}$ os). Проведем анализ с помощью утилиты TLINE.

В конечной папке проекта по ПКМ – Add – Syntheses – Run TLine.. запустится утилита TLine. В открывшемся окне в меню Units – Metric (mm) и в меню Type – Rectangular – Microstrip подготовим настройки расчета.

После этого в группе Substrate введем параметры материала подложки $\epsilon_r = 3.55$, $\tan D = 0.0026$, а в группе Parameters свойства линии (Freq = 6000, h = 0.508, t = 0.017). После этого нажимаем на кнопку Synthesize. Расчет будем вести для волнового сопротивления $Z_0 = 50$ Ом.

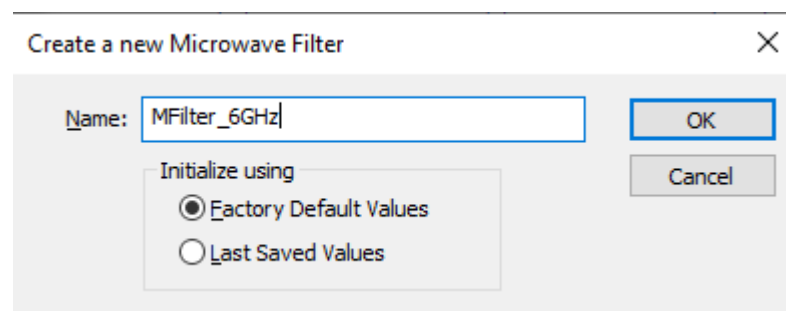


Интересующие нас результаты это $W=1,1$ мм и $Wavelength=0,03$ м. Пересчитаем это в отношение $(50 \text{ Ом}/\text{длина } 90^\circ) = 1,1/(30/4) = 0,145$, что близко к $1/6,8$ и попадает в рекомендованный выше диапазон.

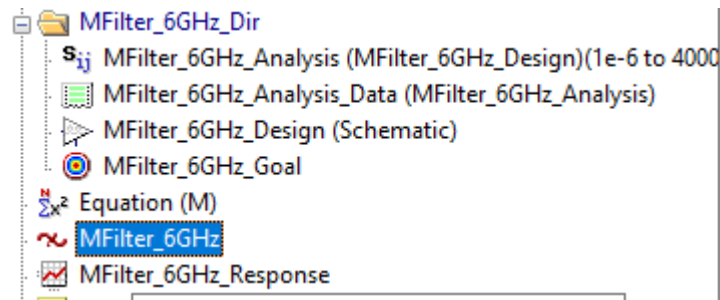
Создание и настройка мастера MFilter

Как и все синтезаторы, MFilter создается через Add – Syntheses – Microwave Filter в дереве проекта.

Назовем MFilter_6GHz.

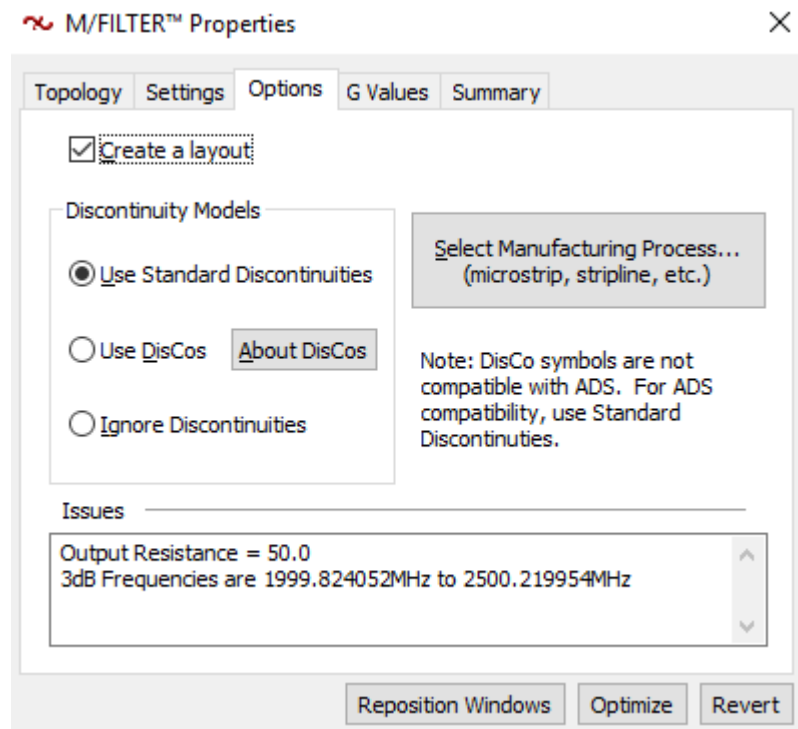


Сразу откроется основное окно мастера MFilter. Также создастся папка MFilter_6GHz_Dir, в которой будет располагаться схематик MFilter_6GHz_Design, линейный анализатор MFilter_6GHz_Analysis, датасет с результатами MFilter_6GHz_Analysis_Data и оптимизатор MFilter_6GHz_Goal. Снаружи этой папки хранится сам мастер MFilter_6GHz и прямоугольный график MFilter_6GHz_Response с S21 и S11.



В окне мастера MFilter_6GHz нужно выбрать первоначальные настройки проектируемого фильтра.

На вкладке Options выберем, что фильтр мы моделируем на микрополосковых структурах. Для этого включим галку Create a layout, для совместимости с ADS в списке Discontinuity Models выберем использование стандартных моделей неоднородностей (Use Standard Discontinuities).



По кнопке Select Manufacturer Process выберем тип линии передачи Process = Microstrip (Standard), установим частоту конвертирования 6000 МГц и размер отверстия по умолчанию 0,4 мм.

Convert Using Advanced TLINE

Process

- ☐ Coax
- ☐ Square Coax (Square Conductor)
- ☐ Square Coax (Round Conductor)
- ☐ Coplanar
- ☐ Coplanar With Ground
- ☐ Ideal (Zo & Degrees)
- ☐ Ideal (Zo & Physical Length)
- ☒ Microstrip (Standard)
- ☐ Microstrip (Inverted)
- ☐ Microstrip (Suspended)
- ☐ Stripline (Round Rod)
- ☐ Stripline (Standard)
- ☐ Stripline (Offset)

Substrate:

Unused: mm

Via Hole Radius: mm

Conversion Frequency: MHz

☒ Automatically add DisCos

☒ Use chamfered corners

☒ Use symmetric steps

☒ Absorb DisCos, preserving circuit response when possible

OK Cancel Help About DisCos

Advanced TLINE will convert the selected schematic elements to the process chosen above.

If "Automatically add DisCos" is selected, then discontinuities (e.g., tee, step, bend) will be added to the schematic. If "Absorb DisCos" is checked, TLINE will adjust line lengths to compensate for the addition or removal of DisCos.

Т.к. в проекте еще нет подгруженных подложек (чтобы выбрать из списка Substrate), то после нажатия на ОК откроется окно выбора подгрузки из библиотеки или создания подложки. Выберем Load From Library.

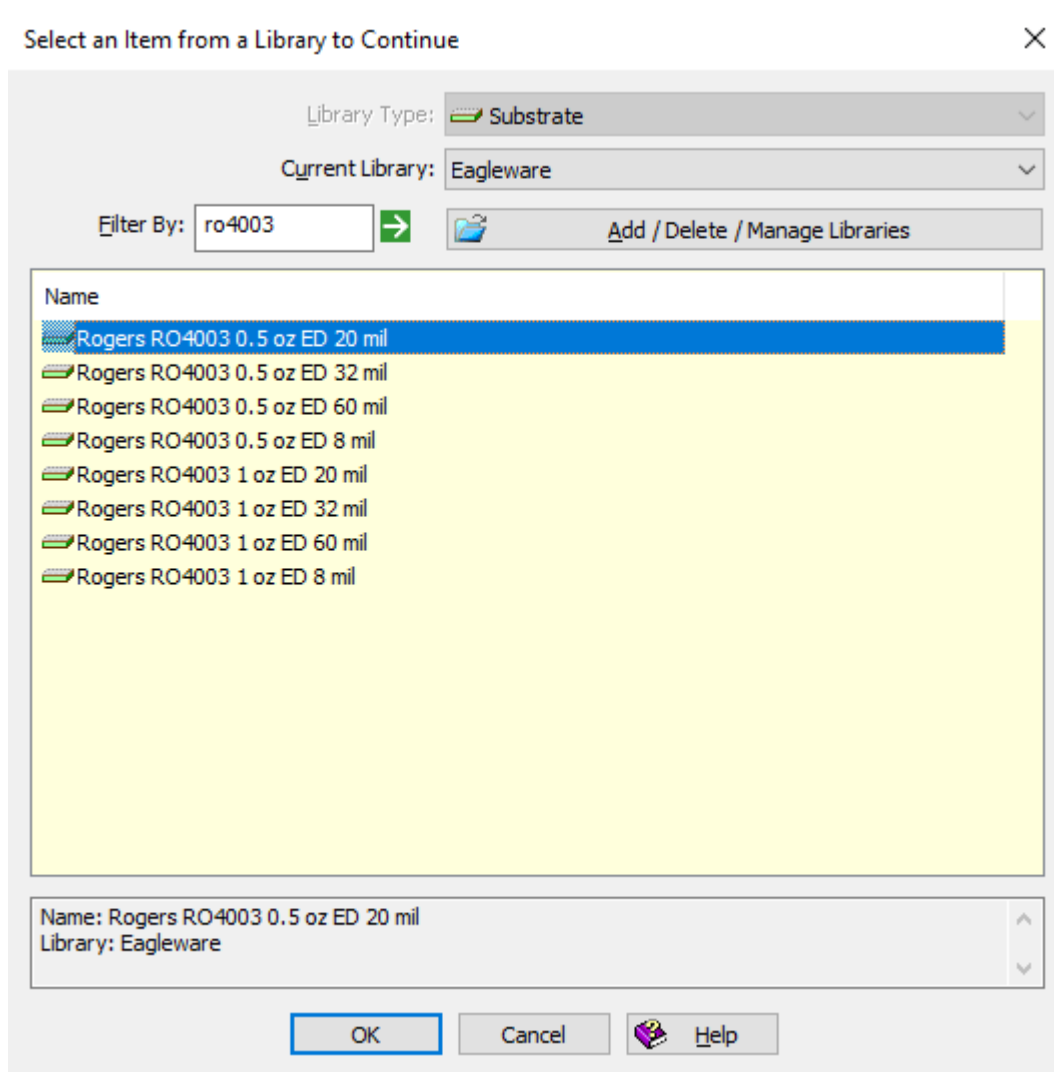
Substrate Needed

You have used a component or feature that requires a substrate. Genesys will now allow you to add a substrate.

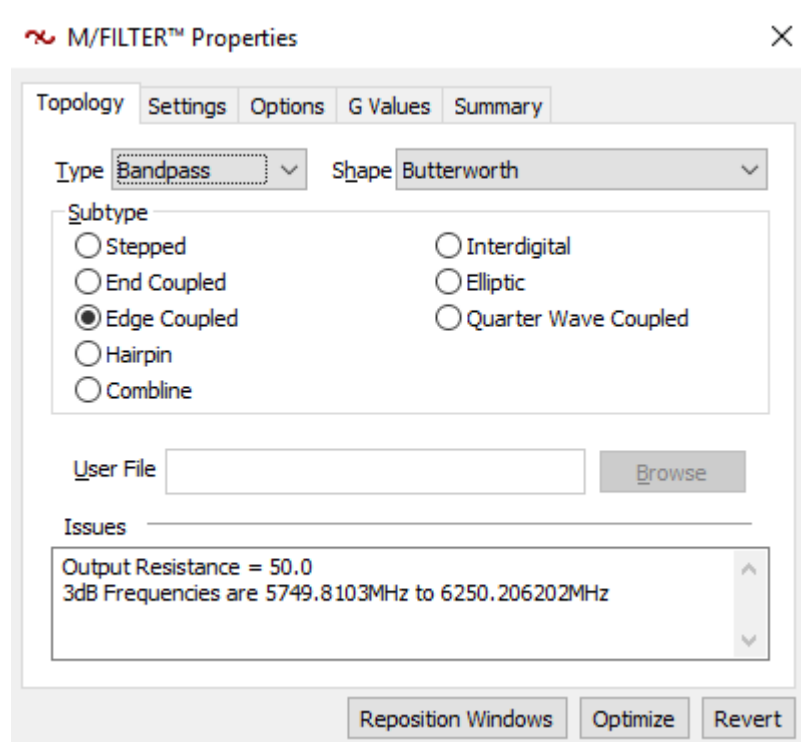
Please load an existing substrate from a library or create your own.

Note: If you do not want this substrate, you can later remove any elements using it and delete the substrate.

При установке по умолчанию доступна только одна библиотека материалов Eagleware. В ней найдем подложку «Rogers RO4003 0.5 oz ED 20 mil». Это есть искомая подложка RO4003C толщиной 0,508 мм с толщиной металлизации 17 мкм.



На вкладке Topology выбирается тип фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ППФ или ПЗФ), вид аппроксимирующей функции (Батерворта, Чебышева и пр.) и базовая топология (поле Subtype). Для текущего фильтра остановимся на ППФ, с аппроксимацией Батерворта, топологией на связанных линиях (Edge Coupled).



Далее на вкладке Settings настроим желаемые электрические параметры и внесем некоторые ограничения.

Установим нижнюю и верхнюю частоты среза Low и High Freq Cutoff как 5750 МГц и 6250 МГц. Уровень среза Attenuation at Cutoff установим как 2,7 дБ. Типовую ширину резонатора Desired Resonator Z (60 Ом), коэффициент сдвига Slide Factor (0) и способ соединения с первым резонатором (Tapped=True) оставим по умолчанию. Эти параметры по умолчанию подобраны неплохо, с ними надо работать только если первая прикидочная топология не получается (слишком большие или маленькие ширины и зазоры, не проходит по ТЗ на АЧХ и пр.).

Осталось выбрать порядок фильтра Order. По кнопке Estimate Order в новом окне вводятся желаемые точки на АЧХ фильтра, и для выбранной аппроксимации рассчитывается минимальный допустимый порядок. Дополнительно к параметрам частоты среза введем желаемые ослабления на границе полосы запираания. Расчет выдает, что необходимый порядок 3,7, округляем до 4.

Estimate Order

Enter passband and attenuation requirements below. The filter order will be estimated based on the requirements entered and displayed in the Output window below.

Type: Bandpass OK

Shape: Butterworth all pole Help Cancel

| Variable | Value |
|-------------------------|-------|
| Cutoff Attenuation (dB) | 2.7 |
| Lower Cutoff Freq (MHz) | 5750 |
| Upper Cutoff Freq (MHz) | 6250 |

| | Frequency | Attenuation |
|---|-----------|-------------|
| 1 | 5200 | 35 |
| 2 | 6800 | 35 |
| 3 | | |
| 4 | | |

Output

Required Order = 3.696458
 3dB Lower Frequency = 5745.516108
 3dB Upper Frequency = 6254.877599

Вводим рассчитанный порядок в поле Order.

M/FILTER™ Properties

Topology Settings Options G Values Summary

| | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Input Resistance | 50 |
| Attenuation at Cutoff (dB) | 2.7 |
| Order | 4 |
| Low Freq Cutoff (MHz) | 5750 |
| High Freq Cutoff (MHz) | 6250 |
| Desired resonator Z | 60 |
| Slide factor | 0 |
| Tapped | <input checked="" type="checkbox"/> |

☒ Auto Adjust Frequency Range Estimate Order...

Issues

Output Resistance = 50.0
 3dB Frequencies are 5745.516108MHz to 6254.877599MHz

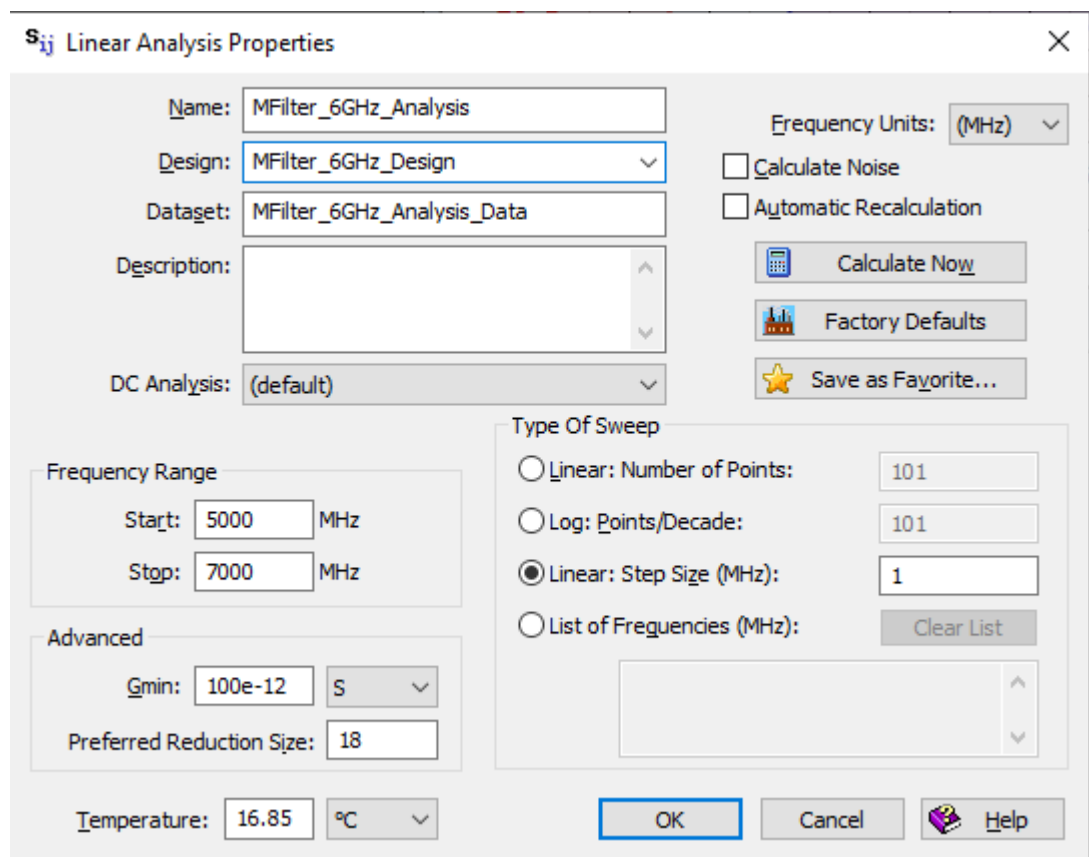
Reposition Windows Optimize Revert

Далее в принципе можно нажимать на кнопку Optimize, и тогда запустится оптимизация по заданным параметрам. Однако мастер создает

цели на оптимизацию несколько странно и избыточно, их надо немного подправить.

Схемная оптимизация

Закрываем мастер MFilter и открываем настройки анализатора MFilter_6GHz_Analysis. В нем изменяем диапазон частот на от 5000 МГц до 7000 МГц с шагом 1 МГц. Нам это нужно, чтобы в расчет попадали границы полосы запираания 5200 МГц и 6800 МГц. Также отключаем расчет шума (Calculate Noise), он в текущей симуляции не нужен.



Затем переходим к настройкам оптимизации MFilter_6GHz_Goal.

На вкладке Goals подправим цели:

- S11 в полосе пропускания пусть будет не более -14 дБ (КСВН = 1,5). Исходное требование на -30 дБ очень сильное и не будет выполнено точно.

- S21 в полосе пропускания установим не менее -2,7 дБ. Исходное -1 дБ сложновато для такой комбинации подложки, выбранной топологии и частот, а нас устроит и 3 дБ.

- установим желаемые границы полосы запираания для S21 вместо автоматически сгенерированных из аппроксимации. Нижняя от 5000 МГц до 5200 МГц, верхняя от 6800 МГц до 7000 МГц.

The image shows the 'Optimization Properties' dialog box with the 'Goals' tab selected. The 'Default Dataset or Equations' is set to 'MFilter_6GHz_Analysis_Data'. A table lists five goals, all with a weight of 1. The first four goals are for S11 and S21 with targets of -14 dB, -2.7 dB, -30 dB, and -30 dB respectively, with frequency ranges from 5750 to 6250 MHz, 5000 to 5200 MHz, and 6800 to 7000 MHz. The fifth goal is a blank row with a target of 'None' and no units. Below the table are buttons for 'Add', 'Remove', 'Use All', 'Use None', 'Measurement Wizard...', and 'Add Filter Goals...'. The 'Stopping Condition' section shows a 'Current Error' of 43.8626 and a target error of 0. A note at the bottom states that units and current error cannot be calculated without corresponding dataset(s) and goal variable(s).

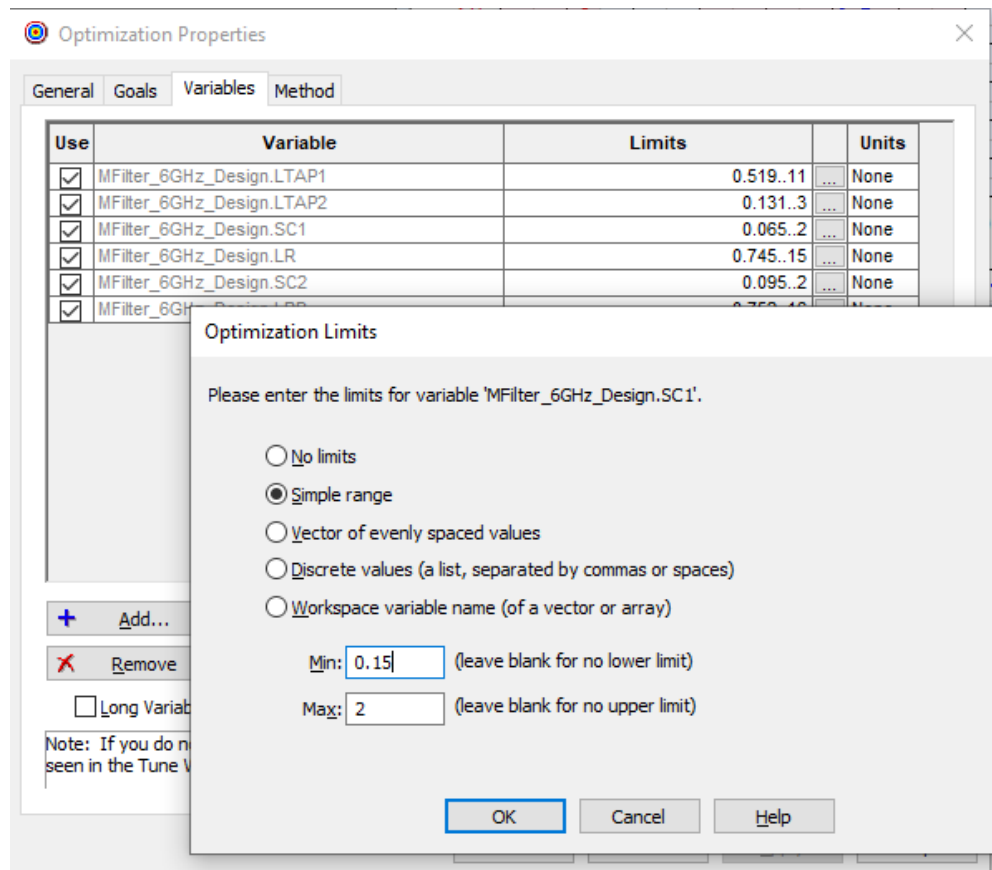
| Use | Measurement | Op | Target | Target Units | Weight | Min | Max | Units |
|-------------------------------------|-------------|----|--------|--------------|--------|------|------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | S11 | < | -14 | dB | 1 | 5750 | 6250 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | S21 | > | -2.7 | dB | 1 | 5750 | 6250 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | S21 | < | -30 | dB | 1 | 5000 | 5200 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | S21 | < | -30 | dB | 1 | 6800 | 7000 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | < | | None | | | | None |

Current Error is: 43.8626

Stop if the Total Error is less than: 0

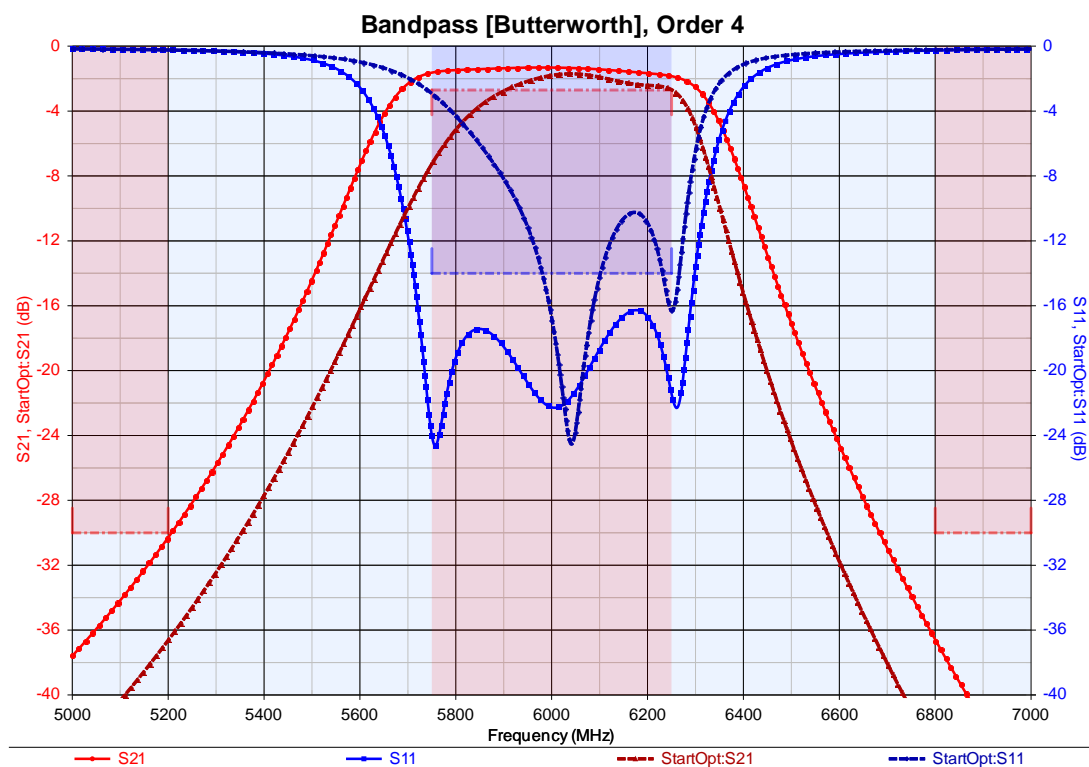
Note: Units and Current Error cannot be calculated without corresponding dataset(s) and goal variable(s). Please see Help for more info.

Также стоит проверить, какие ограничения наложены на сгенерированные переменные (вкладка Variables). Видно, что нижняя граница переменных зазоров SC1 и SC2 маловаты, меньше допустимых технологически значений. Как какая переменная используется можно узнать, открыв топологический вид схемы MFilter_6GHz_Design. Увеличим эту границу до 0,15, тип диапазона оставим Simple. Остальные диапазоны переменных выглядят нормально. Однако, если при оптимизации не получается выполнить ТЗ, то возможно придётся править и диапазоны переменных.



Далее надо один раз запустить расчет MFilter_6GHz_Analysis (ПКМ - Run), чтобы на графике обновились диапазоны по частоте. Далее можно запускать оптимизатор MFilter_6GHz_Goal (ПКМ - Run).

Схемная оптимизация пройдет довольно быстро.

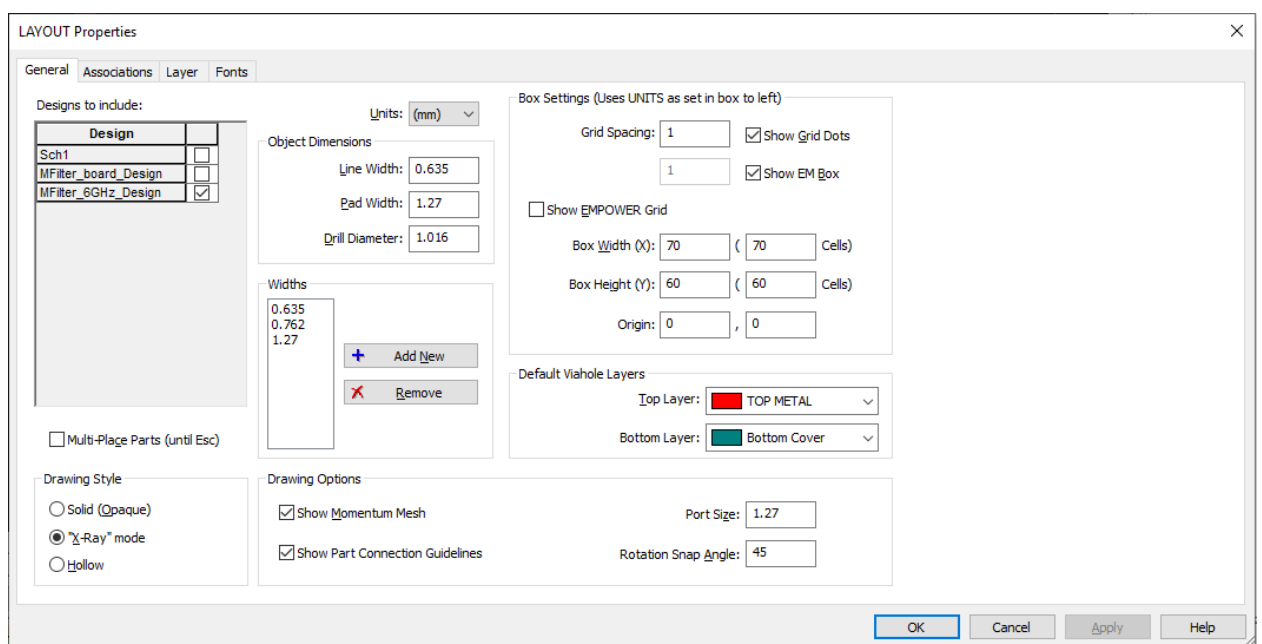


остались только финальные найденные значения переменных и удалились исходные.

Работа на схемном уровне закончена. Можно перейти к ЕМ-анализу и оптимизации.

ЕМ-анализ средствами Genesys и оптимизация

Подготовим топологию к электромагнитному анализу. В топологическом представлении по команде Layout – Layout Properties (или ДЛКМ в пустом месте в топологии) перейдем к настройкам топологии. На вкладке General установим единицы mm, и шаг сетки в 1 мм.



На вкладке Layer включим галку Show All и настроим стек для ЕМ-моделирования:

- у слоя Top Cover надо выставить тип Type = Open (свободное пространство);

- слою Air Above надо оставить электрические параметры воздуха ($\epsilon_r = 1$, $\tan\delta/\sigma = 0$, $\mu_r = 0$) и установить достаточно большую толщину, чтобы слой Top Cover не влиял на расчеты. Установим толщину Height = 250 мм. Также этот слой должен быть включен (галка Use установлена, далее будем обозначать такое как Use = true);

- слой TOP METAL должен быть включен (Use = true), параметры разбиения и модели пусть будут глобальными (Use Layer Mesh = false, Use Layer TL = false, Edge Mesh = Default, Strip Model = Default, Thick Metal = Thin). Также, чтобы не задавать материал металла и его толщину, сошлемся на уже

существующее в проекте определение подложки (Type = Sub: Rogers RO4003 0.5 oz ED 20 mil);

- слой SUBSTRATE должен быть включен (Use = true), чтобы не задавать параметры диэлектрика, опять сошлемся на определение подложки (Type = Sub: Rogers RO4003 0.5 oz ED 20 mil). Тип моделирования отверстий (Via Model = 2D) в текущей топологии значения не имеет, т.к. отверстий нет;

- слой BOT METAL должен быть выключен (Use = false), тогда никакие другие параметры задавать нельзя (они погашены);

- слой Air Below выключен (Use = false), оставить электрические параметры воздуха ($\epsilon_r = 1$, $T_{\text{and}}/\sigma = 0$, $U_r = 0$) и установить нулевую или достаточно малую (в примерах используют 1мкм или 0) толщину (Height = 0).

- Слой Bottom Cover надо выставить тип Type = Lossless, так мы задаём сплошную землю снизу как крышку.

Остальные слои (маска и шелкография) можно не трогать, они не участвуют в расчете (Use=false).

LAYOUT Properties

General Associations Layer Fonts

Show Columns: ☐ Metal ☐ Substrate ☒ General ☒ Layer Number and Color

☒ Show All ☐ EM ☐ EMPOWER ☐ Momentum

| Name | # | Color | Layer Type | Hide | On Bottom (Mirrored) | Plot | Etch Factor | Use | Use Layer Mesh | Mesh Density | Precedence | Use Layer TL | TL Mesh | Edge Mesh | Edge Mesh | Via Model |
|--------------|---|-------|------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------|-------------------------------------|---------|-----------|-----------|------------|
| Top Cover | | | Cover | | | | | | | | | | | | | |
| Air Above | | | Air | | | | | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | |
| TOP MASK | 1 | | Mask | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | | | |
| TOP SILK | 2 | | Silk | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | | | |
| TOP METAL | 3 | | Metal | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 30 0 | | <input type="checkbox"/> | 1 | Default | 0 | |
| SUBSTRATE | 4 | | Substrate | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | 2D(planar) |
| BOT METAL | 5 | | Metal | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 30 0 | | <input checked="" type="checkbox"/> | 1 | Default | 0 | |
| BOT SILK | 6 | | Silk | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | | | |
| BOT MASK | 7 | | Mask | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | | | |
| Air Below | | | Air | | | | | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | |
| Bottom Cover | | | Cover | | | | | | | | | | | | | |

<

Frequency Units: (MHz)

Length Units: (mm)

X

umber and Color
Momentum Slot-Type: Strip ▼

| Strip Model | Physical Slot Layer | 1/2 Height | Type | Metal Thickness | Rho | Height | Er | Tand/ Sigma | Ur | Rough | Surface Imp. Value or File | Current Direction | Thick Metal | Element Z-Ports |
|-------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|-----|--------|------|-------------|----|----------|----------------------------|-------------------|-------------|-----------------|
| | | | Open | | | | | | | | | | | |
| | | | Air | | | 250 | 1 | 0 | 1 | | | | | |
| Sheet | <input type="checkbox"/> | | Sub: Rogers RO4003 | 0.018 | 1 | | | | | 1.905e-3 | | Normal | Thin | Down |
| | | <input type="checkbox"/> | Sub: Rogers RO4003 | | | 0.508 | 3.38 | 0.0027 | 1 | | | | | |
| Sheet | <input checked="" type="checkbox"/> | | Sub: Rogers RO4003 | 0.018 | 1 | | | | | 1.905e-3 | | Normal | Thin | Down |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Air | | | 0 | 1 | 0 | 1 | | | | | |
| | | | Lossless | | | | | | | | | | | |

>

MHz)

mm)

Load From Layer File...

Save to Layer File...

OK

Cancel

Apply

Help

В папке со схемой создадим ЕМ-анализ (Add – Analysis – Momentum Analysis). Назовем его MFliter_6GHz_Mom. Установим ему диапазон частот от 100 МГц до 7000 МГц с адаптивным подбором шага на макс 25 точек. Также включим автоматическое пересобираение топологии при изменении размеров компонентов (Select all and connect layout before simulation).

Momentum Options

Preprocessor - Heal and Merge Preprocessor - Simplify Layout Far Field Options

General Simulation Options Mesh

Name: MFilter_6GHz_Mom ☐ Automatic Recalculation

Design (Layout): MFilter_6GHz_Design ☒ Automatically save workspace after calculate

Dataset: ☒ Select all and connect layout before simulating

Description: ☒ Center in the box before simulation

☒ Include Footprint Components

Simulation Frequencies

Frequency Range

☒ Start/Stop Start: 100 MHz

☐ Center/Span Stop: 7000 MHz

Type Of Sweep

☐ Linear: Number of Points: 11

☐ Log: Points/Decade: 2

☐ Linear: Step Size (MHz): 100

☒ Adaptive (AFS): Max Points: 25

☒ Output Interpolated data (more points)

☐ List of Frequencies (MHz):

Frequency Units: MHz

Default Port Impedance: 50.0 Ohms

☐ Use Single Threaded Momentum GX engine

Co-simulation sweep

DC Analysis: (default)

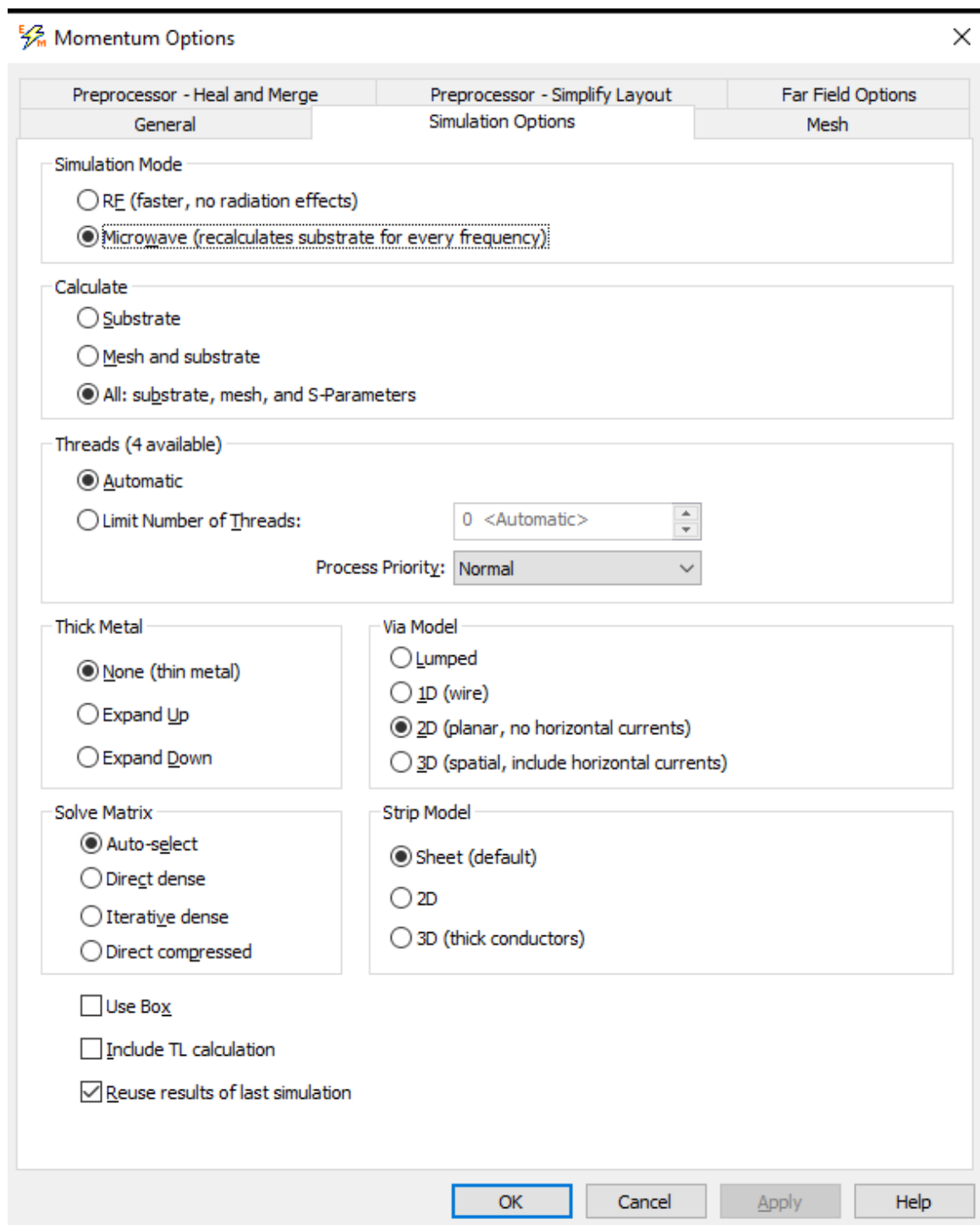
☒ Use EM simulation frequencies

Start frequency: 1000 MHz

Stop frequency: 3000 MHz

Number of points: 11

На вкладке Simulation Options должен быть выставлен симулятор Microwave и остальные настройки согласно рисунку.



На вкладке Mesh установим генерацию краевых разбиений автоматического размера (Edge Mesh = Automatic).

The screenshot shows the 'Momentum Options' dialog box with the 'Simulation Options' tab selected. The 'Mesh Frequency' section has 'Use Analysis Frequencies' selected. The 'Mesh Density' is set to 30 cells/wavelength, 'Arc Resolution (45° max)' is 15 deg, and 'Layout Mesh Resolution' is 0.001 mm. The 'Transmission Line Mesh' section has 'None' selected. The 'Edge Mesh' section has 'Automatic' selected. At the bottom, there are checkboxes for 'Convert circular vias to squares' (unchecked), 'Include thin layer overlap' (checked), 'Refacet Arcs' (checked), and 'Reduce Mesh' (checked). The 'OK' button is highlighted with a blue border.

| Preprocessor - Heal and Merge | Preprocessor - Simplify Layout | Far Field Options |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| General | Simulation Options | Mesh |

Mesh Frequency

☒ Use Analysis Frequencies

☐ Manual: GHz

Mesh Density: cells/wavelength

Arc Resolution (45° max): deg

Layout Mesh Resolution: mm

Transmission Line Mesh

☒ None

☐ Manual: cells/width

☐ Automatic

Edge Mesh

☐ None

☐ Manual: mm

☒ Automatic

☐ Convert circular vias to squares

☒ Include thin layer overlap

☒ Refacet Arcs

☒ Reduce Mesh

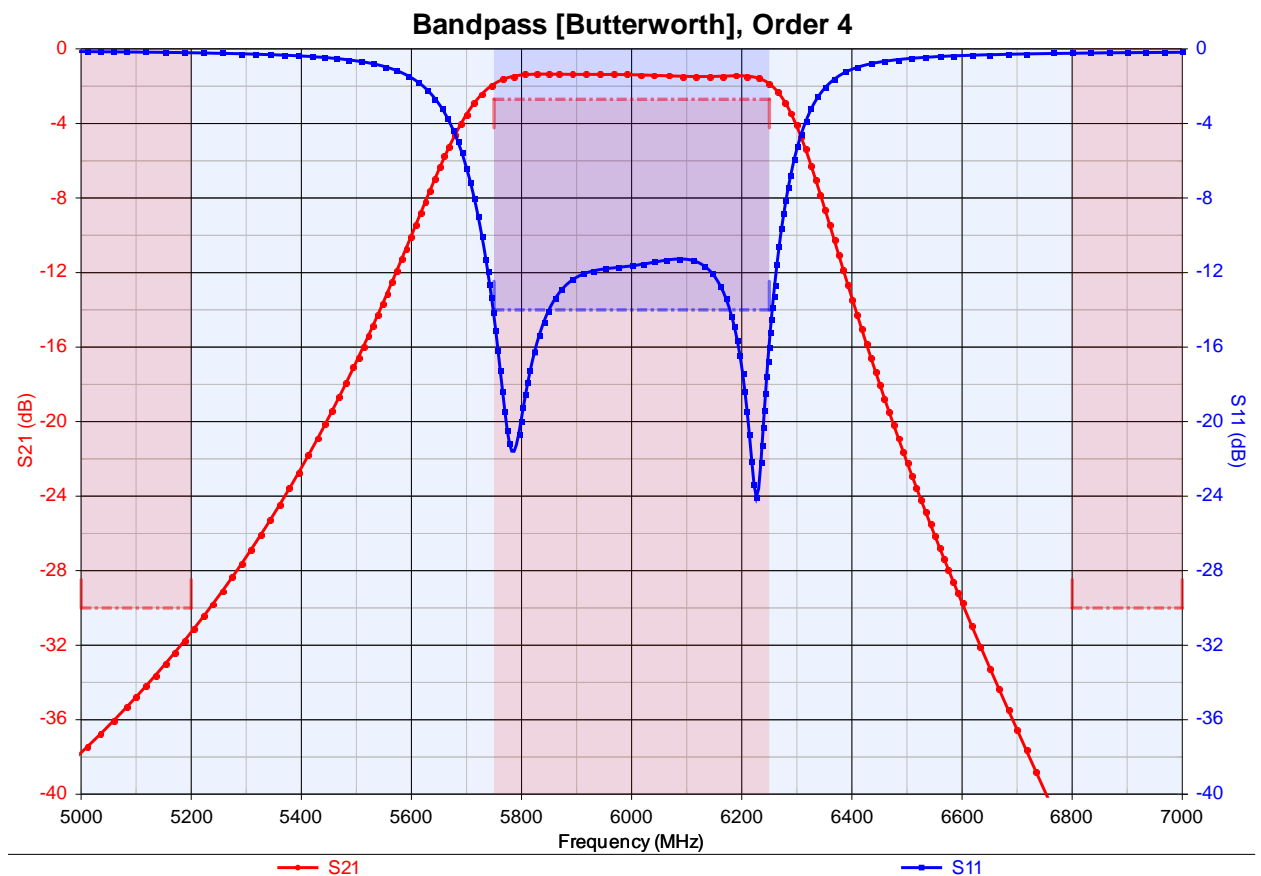
OK Cancel Apply Help

Остальные настройки оставим по умолчанию. Запустим расчет ЕМ-анализа.

Создадим отдельный график для результатов ЕМ-анализа. Чтобы в него загружались еще цели из оптимизатора, надо в оптимизаторе MFilter_6GHz_Goal на вкладке Goals в списке Default Dataset or Equations заменить результат из линейного анализа на результат из ЕМ-моделирования.



Видно, что результаты уплыли относительно линейного анализа. S21 еще выполняется, а вот S11 в полосе пропускания поднялся до -11 дБ.



Перенастроим оптимизатор MFilter_6GHz_Goal так, чтобы он работал с ЕМ-анализом.

На вкладке General нужно оставить галку напротив нужного ЕМ_анализа в списке Analyses to calculate.

Optimization Properties

General Goals Variables Method

Name: MFilter_6GHz_Goal

Description:

Optimization Method: Automatic

Cost Function: Least Squares (L2 Norm)

☐ Allow Initial Random Search

☐ Use Adaptive Stepping For Linear Analyses

Minimum Frequency Points: 11

Frequency Points Factor: 2

Calculate Now

Factory Defaults

Analyses to calculate:

| Analysis | Path |
|---|---------------------------|
| <input type="checkbox"/> S _{ij} MFilter_board_Analysis | Designs\MFilter_board_Dir |
| <input type="checkbox"/> E _m MFilter_boardMom | Designs\MFilter_board_Dir |
| <input type="checkbox"/> S _{ij} MFilter_6GHz_Analysis | MFilter_6GHz_Dir |
| <input checked="" type="checkbox"/> E _m MFilter_6GHz_Mom | MFilter_6GHz_Dir |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

OK Cancel Apply Help

На вкладке Goals в списке Default Dataset or Equations заменить результат из линейного анализа на результат из ЕМ-моделирования (если не сделано ранее). Также в зависимости от того, как выглядит текущий результат, то стоит изменить вес отдельных целей. В текущем состоянии видно, что S₂₁ в полосе запираания выполняется легко, а вот S₁₁ и S₂₁ в полосе пропускания или не выполняются, или выполняются с трудом. Увеличим вес этим целям до 50 (поле Weight), чтобы оптимизатор пробовал в первую очередь выполнить их, а затем обращал внимание на полосы запираания.

Optimization Properties

General Goals Variables Method

Default Dataset or Equations: MFilter_6GHz_Mom_MFilter_6GHz_Design_Data

| Use | Measurement | Op | Target | Target Units | Weight | Min | Max | Units |
|-------------------------------------|-------------|----|--------|--------------|--------|------|------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | S11 | < | -14 | dB | 50 | 5750 | 6250 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | S21 | > | -2.7 | dB | 50 | 5750 | 6250 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | S21 | < | -30 | dB | 1 | 5000 | 5200 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | S21 | < | -30 | dB | 1 | 6800 | 7000 | (MHz) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | < | | None | | | | None |

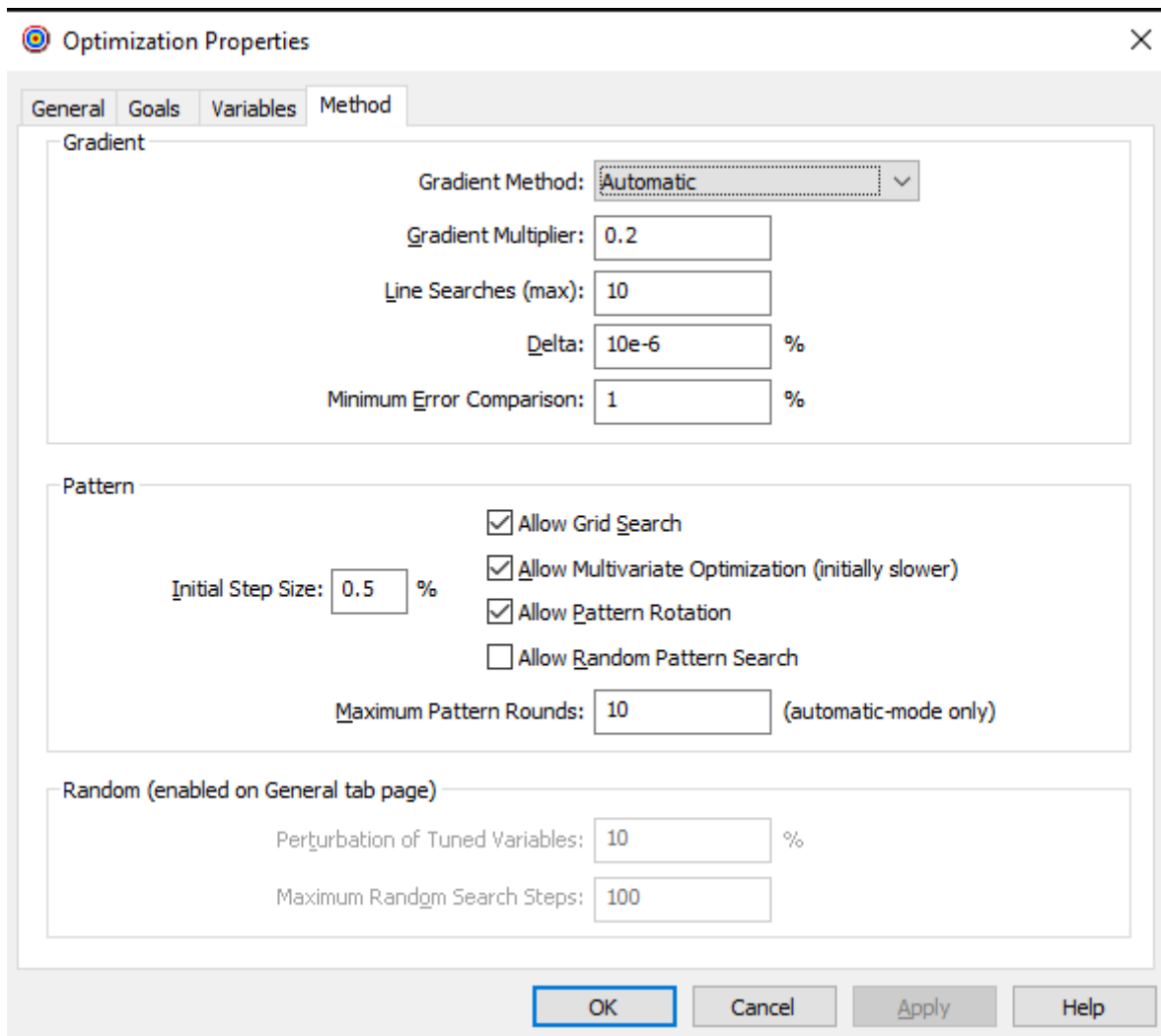
Stopping Condition

Current Error is: 879.291

Stop if the Total Error is less than: 0

Note: Units and Current Error cannot be calculated without corresponding dataset(s) and goal variable(s). Please see Help for more info.

Также на вкладке Method включим поиск по сетке и мультивариативную оптимизацию (Allow Grid Search и Allow Multivariate Optimization). Для оптимизации по ЕМ-анализу, где расчет каждой точки идет довольно долго, это позволяет оптимизатору сначала набирать достаточно предварительных данных перед принятием решения, куда идти дальше. И несмотря, что первоначальный анализ выполняется довольно долго, это позволяет оптимизатору не бродить бездумно по целевой функции, особенно если доступно много переменных для оптимизации.



The image shows the 'Optimization Properties' dialog box with the 'Method' tab selected. It contains three main sections: Gradient, Pattern, and Random (enabled on General tab page).

Gradient

- Gradient Method: Automatic
- Gradient Multiplier: 0.2
- Line Searches (max): 10
- Delta: 10e-6 %
- Minimum Error Comparison: 1 %

Pattern

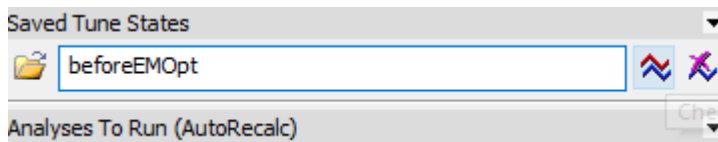
- Initial Step Size: 0.5 %
- ☒ Allow Grid Search
- ☒ Allow Multivariate Optimization (initially slower)
- ☒ Allow Pattern Rotation
- ☐ Allow Random Pattern Search
- Maximum Pattern Rounds: 10 (automatic-mode only)

Random (enabled on General tab page)

- Perturbation of Tuned Variables: 10 %
- Maximum Random Search Steps: 100

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Apply, Help.

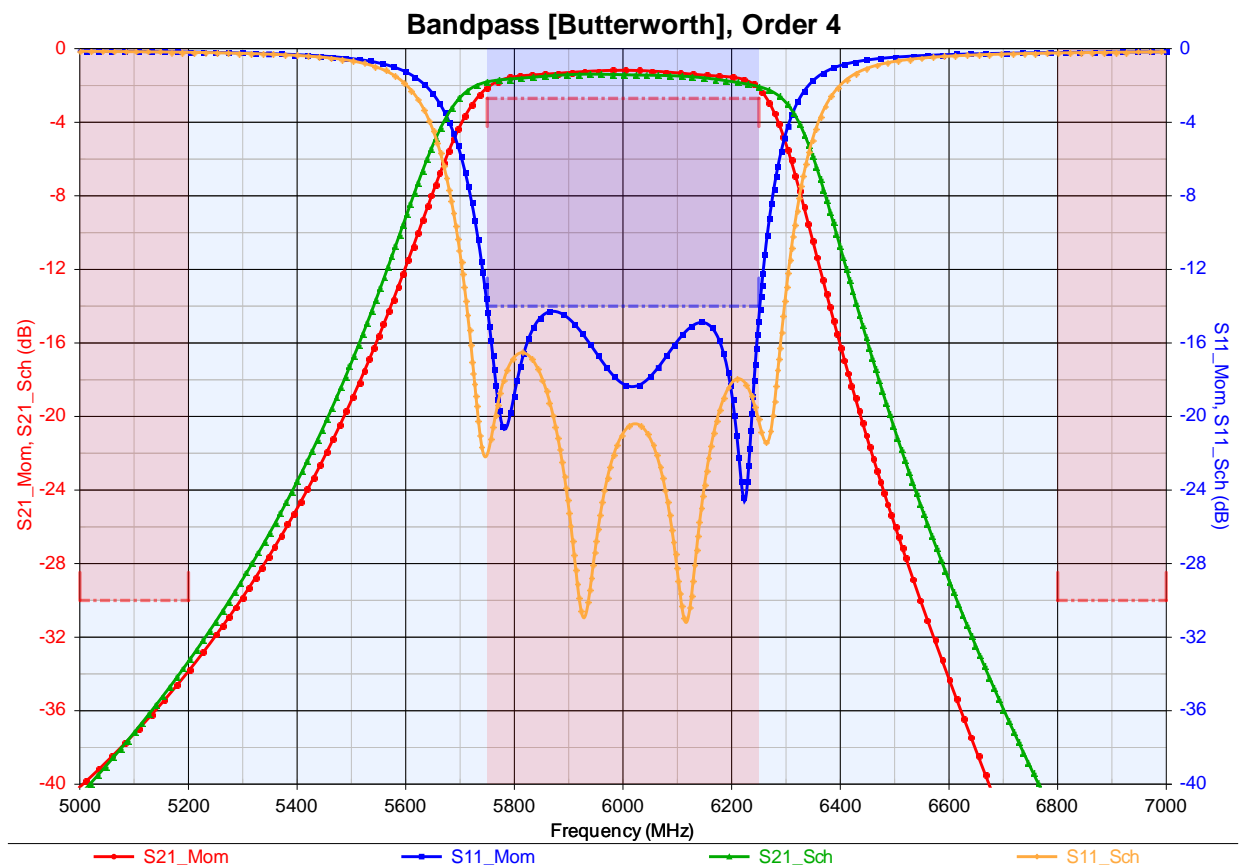
Также перед запуском оптимизации на всякий случай сохраним текущее состояние переменных в панели Saved Tune States.



The image shows the 'Saved Tune States' panel. It has a dropdown menu with 'beforeEMOpt' selected. Below it is a section 'Analyses To Run (AutoRecalc)' with a 'Check' button.

Запускаем оптимизатор (ПКМ - Run).

Когда он успешно закончит работать, выведем на один график результаты как со схемного уровня, так и ЕМ (со значениями переменных, оптимизированных для топологии).



В нашем случае получилось, что результаты хоть и различаются, но не так значительно, как могли бы. Нет сдвига по частоте и S21 ведет себя схоже. Т.е. можно ожидать, что изготовленный фильтр будет иметь схожие характеристики и результаты нашего проектирования можно считать достоверными.

Способы экспорта фильтра

Доступно несколько вариантов, как спроектированный фильтр можно перенести в другие САПРы для дальнейшей работы (в том числе в Keysight ADS). В зависимости от того, что в дальнейшем планируется делать в большом проекте, возможны следующие варианты:

- В большом проекте фильтр будет выступать как подсхема, меняться больше не будет. При общем моделировании фильтр будет учитываться только как схемная модель, т.е. будут использоваться рассчитанные S-параметры. В этом случае, проще всего перенести фильтр отдельно как файл S-параметров. И отдельно еще может понадобится топология фильтра для оценки общей топологии всего проекта.

- В большом проекте фильтр меняться больше не будет, но будет моделироваться на топологическом уровне как часть большей топологии.

Переносить нужно через различные промежуточные топологические форматы.

- В большом проекте фильтр будет полностью встроен и промоделирован, как на схемном, так и на топологическом уровне. В этом случае, возможно понадобится пересобрать фильтр в САПР большого проекта как параметризованную схему и топологию.

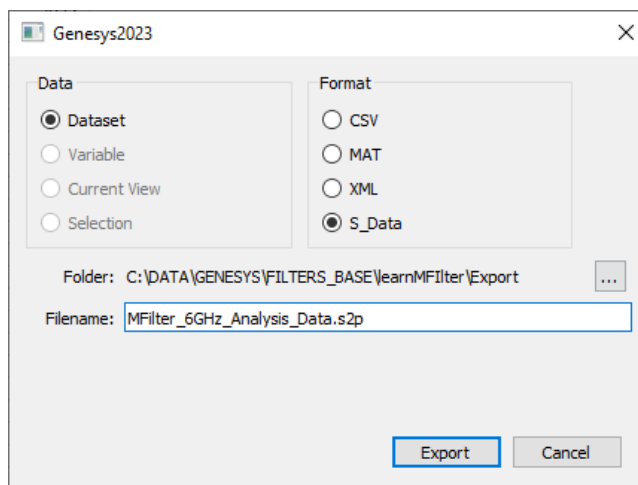
В пуле САПРов от Keysight поддерживаются дополнительные методы переноса схем и топологий между ними. В том числе:

- при переносе в Keysight ADS доступен автоматический перенос схем с преобразованием моделей.

- можно также организовать двухэтапный перенос с помощью EMPro для уточнения частотной характеристики фильтра на полноценном 3D-EM-солвере и импорта в ADS как emModel или empro.

Экспорт результатов как матрицы S-параметров можно провести, сделав дереве проекта по датасету PKM – Export. Также эту команду можно запустить по меню File – Export – S-parameters, если в дереве проекта выбран датасет.

В открывшемся окне выбрать тип файла S_Data, указать место и имя файла и нажать кнопку Export.

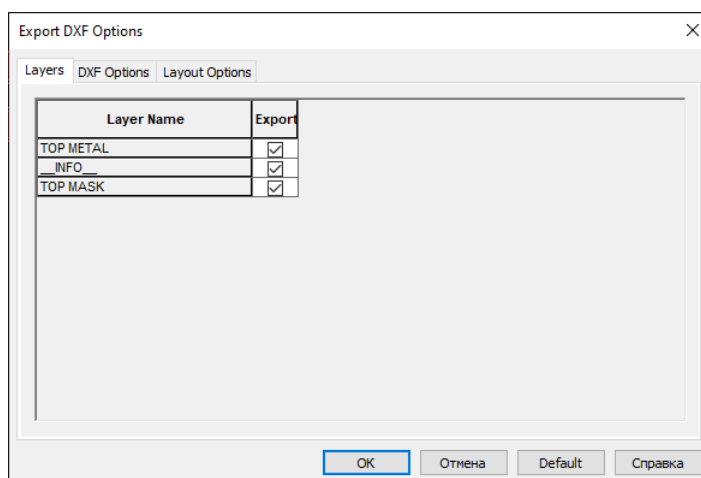


Сформированный файл S-параметров будет иметь размерность 2x2 (как у фильтра) и частотную сетку, соответствующую частотной сетке датасета.

Для экспорта топологии нужно открыть топологию сформированного фильтра и выбрать в какой из нейтральных форматов пойдет экспорт. В том числе по командам меню File – Export – DXF/DWG File или File – Export -

GDSII File. Также доступен экспорт в Geber, но файлы для производства, их стоит избегать, после импорта их возможно придется подчищать.

На картинке ниже показан экспорт в DXF.



При этом важно понимать, что форматы DXF и GDSII не перенесут топологию параметризированной.

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 и учесть при будущем импорте.

Задание на выполнение

В соответствии с необходимыми требованиями спроектировать микрополосковый фильтр с использованием мастера MFilter. 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.

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 запырания. Методы МоМ и FEM возвращают результаты изначально в частотной области и лучше подходят для моделирования фильтров.

Контрольные вопросы

//TODO

Литература

Ссылки на документацию использованных ЭКБ

1. Документация на ВЧ-подложки RO4003C и RO4350B
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates>
2. Документация на ВЧ-подложку RO4360
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4360g2-laminates>
3. Документация на ВЧ-подложку RO3003
<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates>
4. Общий каталог магазина ЭлекТрейд-М <http://www.eltm.ru/>
5. Специальный раздел магазина ЭлекТрейд-М, посвященный базовым материалам печатных плат <https://pcmaterial.ru/>

Записи Youtube с видеоуроками по Keysight Genesys

6. Плейлист Genesys Video Library на канале центра знаний Keysight
https://www.youtube.com/watch?v=mi_AMjlRgZM&list=PLtq84kH8xZ9E8S_y5dmCXtJFPo14NsCtt

Разработчик:

Ст.преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.