Э.В. Семенов

Основы компьютерного проектирования РЭС

Раздел 4. Синтез и оптимизация электрических цепей и структур

Разновидности синтеза цепей

- Синтез цепей подразделяется на:
  - **структурный синтез**, т.е. автоматизированный или автоматический синтез структурной или принципиальной схемы цепи или устройства. Встречает на своем пути чрезвычайно большие затруднения и в настоящее время автоматически можно синтезировать лишь схемы в целом уже предопределенного вида (например, LC-фильтр конкретного порядка при заранее выбранном типе топологии, например лестничного вида).
  - **параметрический синтез**, т.е. автоматизированный или автоматический выбор параметров цепи, обеспечивающих выполнение технических требований к ней.

Автоматизированный параметрический синтез цепей

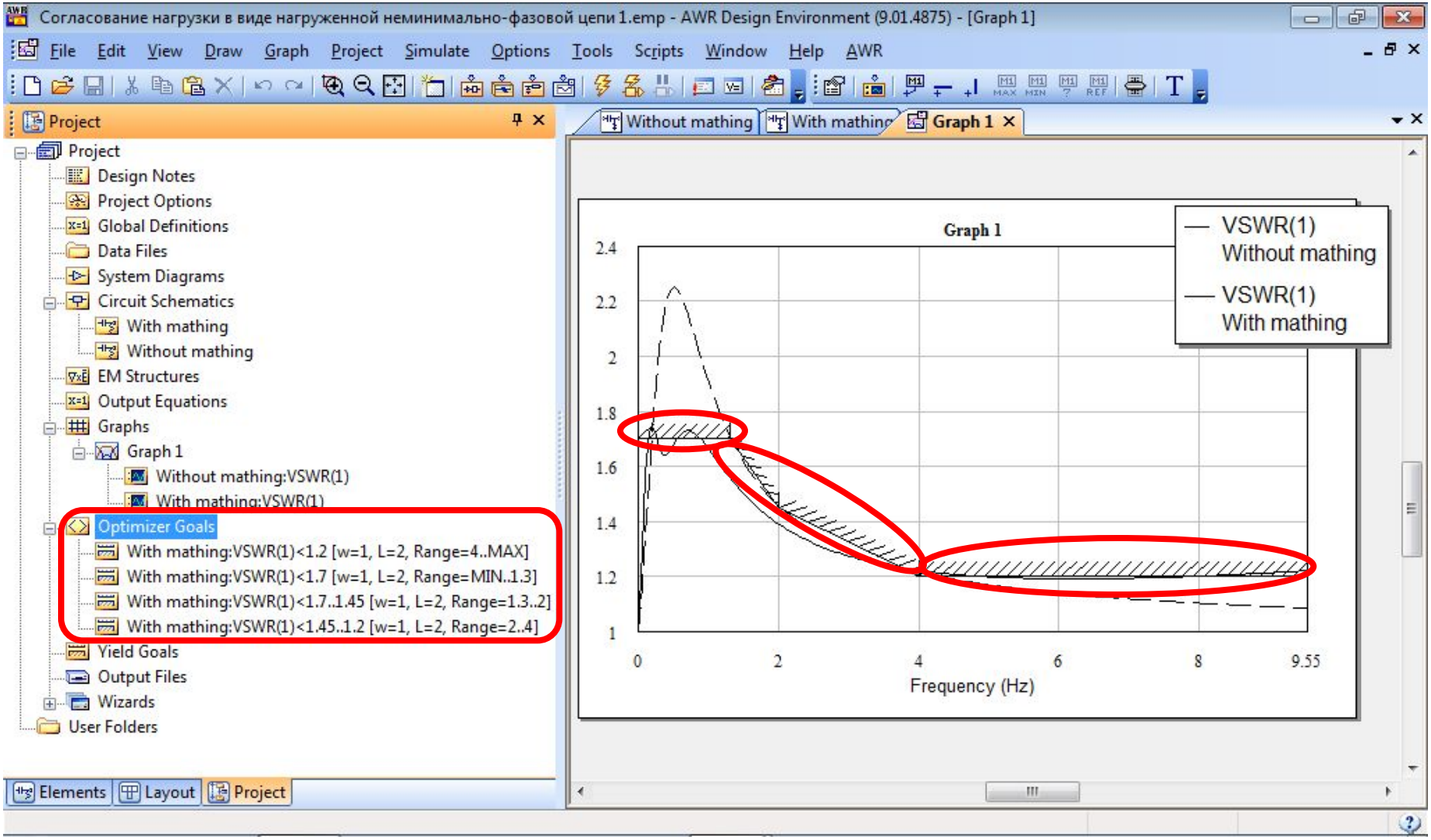
- В современных САПР (в том числе в AWR DE) выполняется в основном методами оптимизации.
- Для того, чтобы полностью поставить задачу оптимизации, необходимо определиться со следующим:
  - целевые параметры и характеристики цепи. Это те требования к цепи, которые определены в ТЗ; мы должны обеспечить их выполнение в результате оптимизации.
  - варьируемые параметры – параметры отдельных элементов или узлов РЭС, доступные для непосредственного изменения разработчиком (сопротивления, емкости, длины линий и т.д.).
  - граничные условия – диапазоны значений варьируемых параметров, выход за которые в процессе оптимизации запрещается.

Формирование целей оптимизации

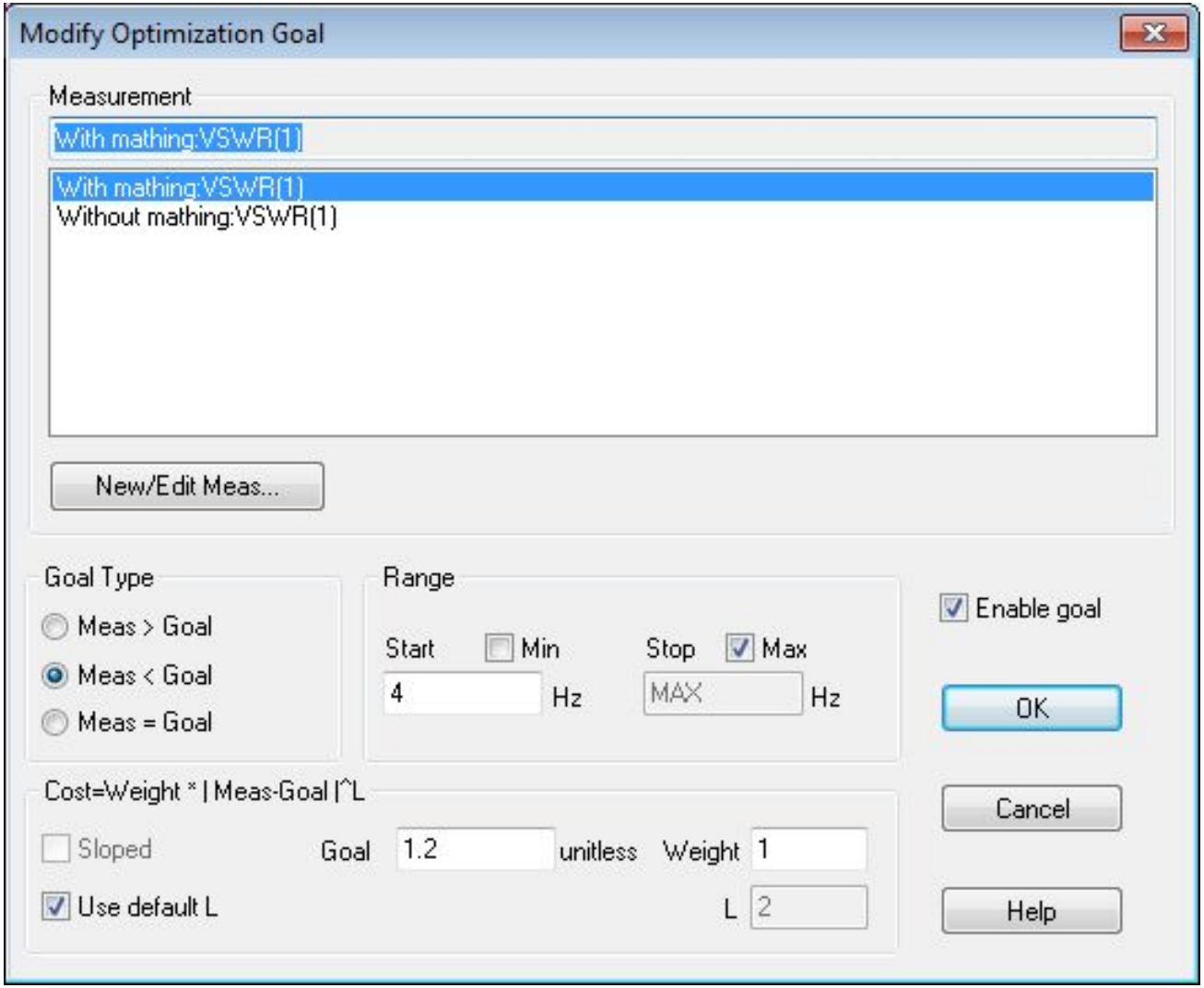
- Оптимизация бывает:
  - однокритериальная;
  - многокритериальная.
- Формирование и достижение цели при однокритериальной оптимизации обычно выглядит достаточно просто: нужно максимально приблизить критерий оптимизации к заданному значению. Решение однозначно.
- При наличии нескольких критериев классическая постановка задачи оптимизации в принципе некорректна. Паллиативных подходов при этом два:
  - формирование одного суперкритерия (метакритерия);
  - формирование множества **недоминируемых** альтернатив (множества Парето).
- В AWR DE используется формирование суперкритерия:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^{N} \sum_{q=1}^{Q_n} \frac{W_n}{Q_n} \left| G_n(f_q) - M_n(f_q) \right|^{L_n}$$

Формирование целей оптимизации в AWR DE



Формирование целей оптимизации в AWR DE



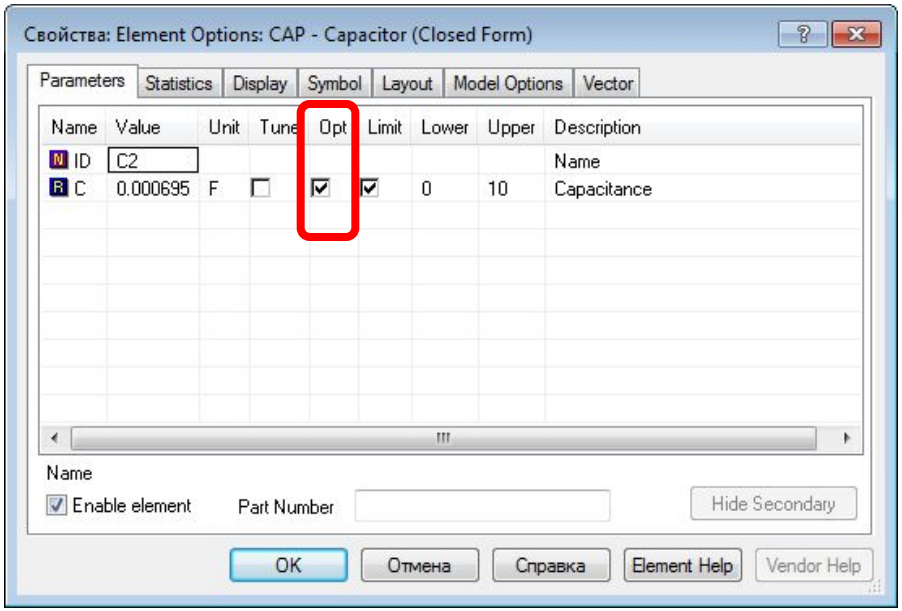
Варьируемые параметры

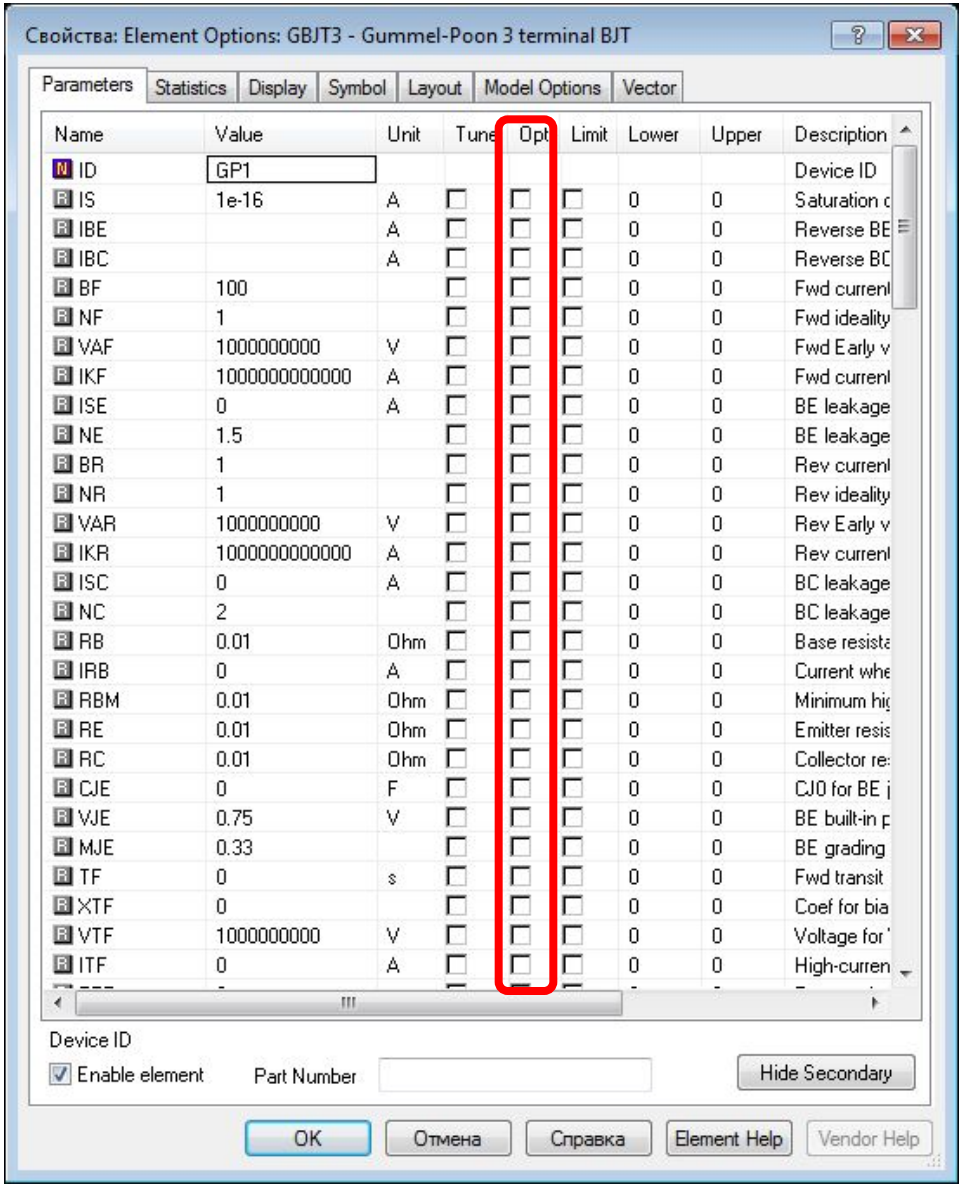
- В принципе варьируемым может быть любой параметр элемента или узла на структурной или принципиальной схеме. Однако чем больше варьируемых параметров, тем более сложным и длительным становится решение задачи оптимизации.
- Поэтому включать в оптимизационную процедуру следует только необходимый минимум параметров – те которые оказывают существенное влияние на значение целевой функции. Установить это можно либо из физических соображений, либо используя так называемую теорию чувствительности.

О варьировании параметров многопараметрических элементов

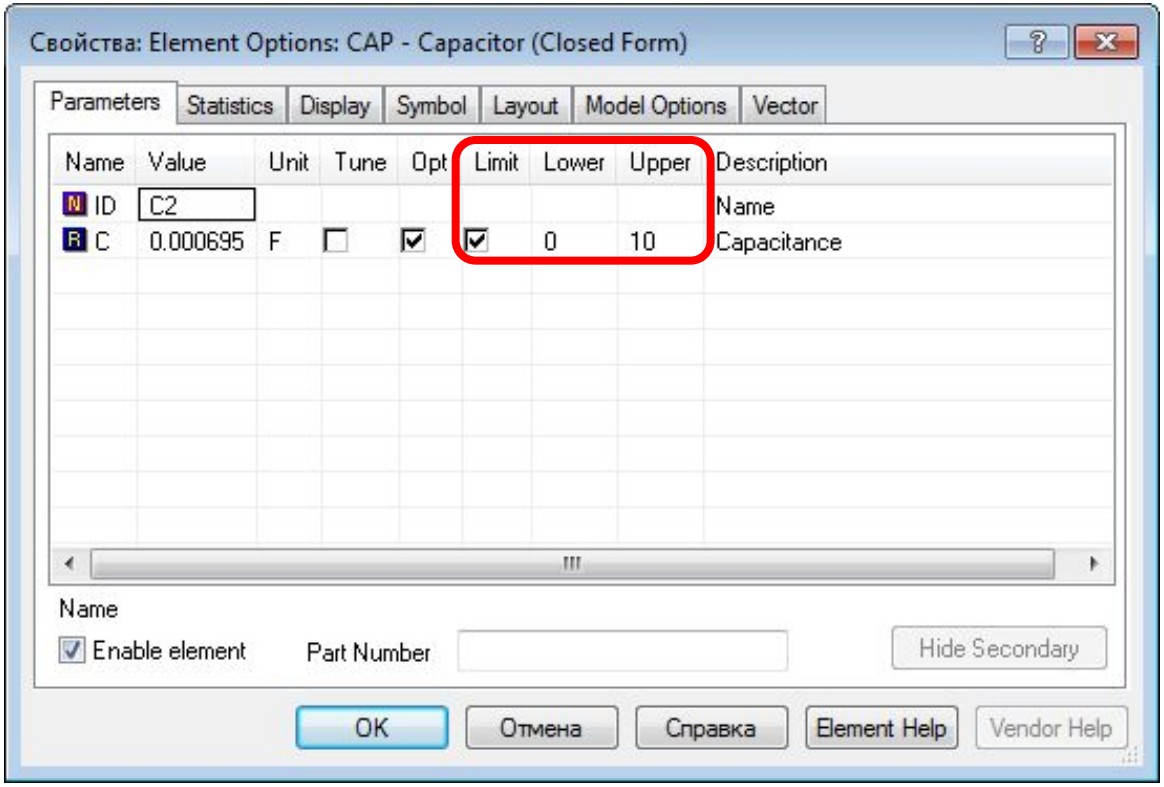
- Далее нужно учитывать, что не всякий параметр, доступный для формального варьирования, можно изменить в рамках принятой технологии проектирования РЭС. Например, вполне можно включить в число варьируемых параметров ток насыщения IS биполярного транзистора. Однако при проектировании схем на дискретных элементах можно лишь выбрать другой экземпляр транзистора, у которого отличается не только IS, но и вся совокупность других параметров.
- Эти сложности приводят к тому, что наиболее эффективен параметрический синтез тех схем, где технологически можно поменять все параметры. Например:
  - пассивные схемы фильтров и согласующих цепей;
  - различные устройства на полосковых линиях;
  - твердотельные полупроводниковые схемы.
- Параметрический синтез схем с такими элементами как, например, дискретные транзисторы, выглядит как формирование требований по выбору новых элементов, выбор подходящих элементов из производящихся на текущий момент и повторная оптимизация с новыми элементами.

Выбор варьируемых параметров в AWR DE





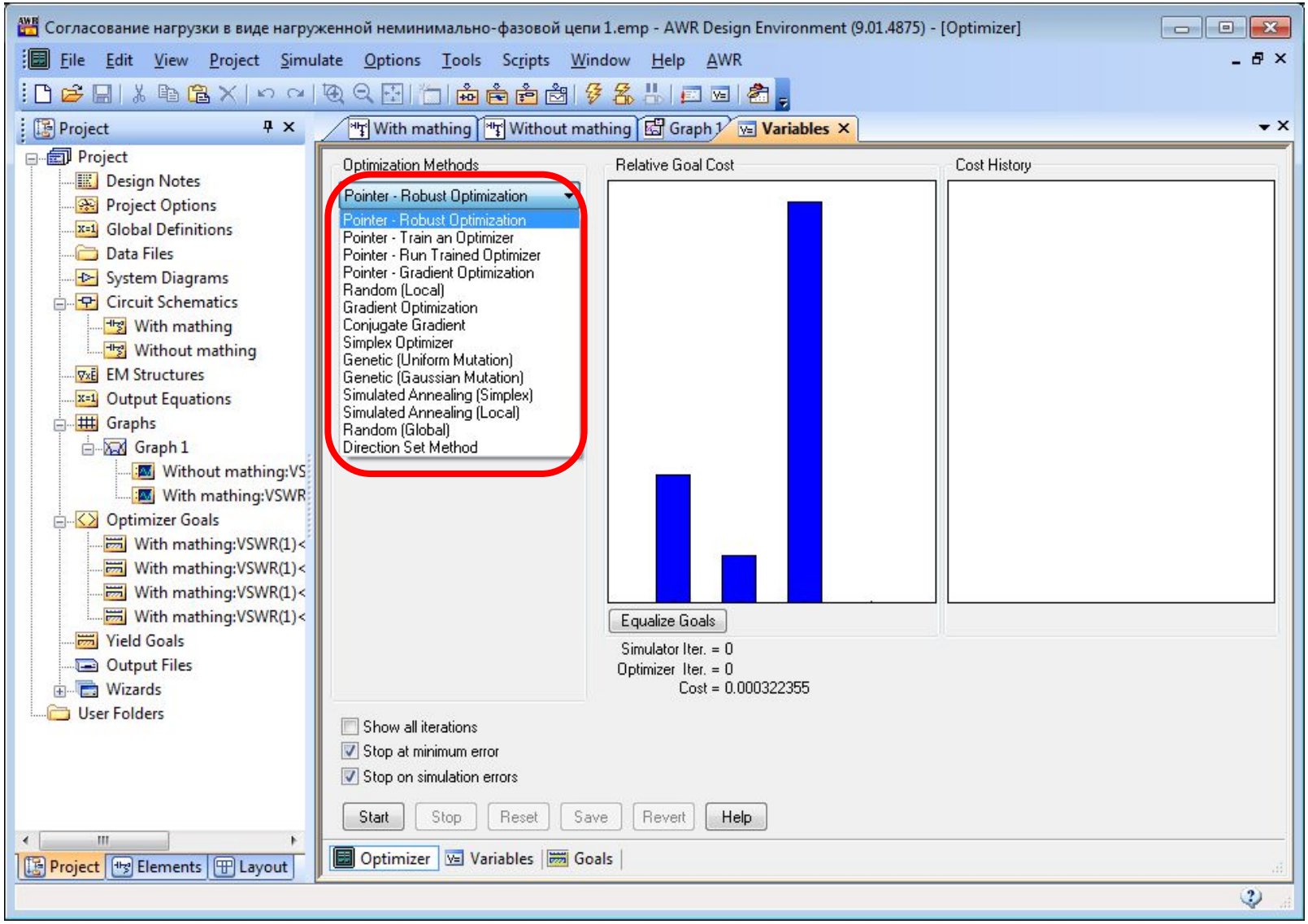
Выбор граничных условий оптимизации в AWR DE



- Полезно иметь в виду недокументированную возможность AWR DE – эта САПР одинаково хорошо работает с физически нереальными значениями элементов (например, отрицательными емкостями и индуктивностями).

Основные оптимизационные алгоритмы

- Simulate/Optimize (F7)



Основные оптимизационные алгоритмы AWR DE

- Существует большое число различных алгоритмов поиска решения оптимизационным способом.
- Одна из основных альтернатив при их разработке:
  - следует ли на каждой итерации делать хороший прогноз направления поиска затрачивая на это много времени;
  - или следует упрощать и ускорять итерации достигая хорошего решения за счет большого количества итераций.
- Другое различие оптимизационных алгоритмов:
  - алгоритмы глобального поиска (отделения корня);
  - алгоритмы уточнения решения в окрестности локального экстремума целевой функции.
- На какие методы следует обратить внимание в AWR DE:
  - Robust Optimization
  - Gradient Optimization
  - Random
  - Simplex Optimizer
  - Genetic
  - Direction Set Method

Оптимизатор Random

- Выполняет случайные шаги от начального приближения в пространстве поиска.
- Предпочтителен при большом количестве варьируемых переменных, поскольку вычислительные затраты при увеличении числа переменных возрастают не так сильно, как у других оптимизаторов.
- Количество симуляций схемы за одну итерацию минимально. Это простейший оптимизатор, но он работает в целом хорошо.

Gradient Optimization

- Ньютоновский градиентный метод.
- Хорошо предсказывает направление на оптимум и требует поэтому меньшего числа итераций, но сами итерации медленные – требуют много раз симулировать схему.
- Позволяет быстро получить решение хорошего качества, однако в непосредственной близи оптимума сходится крайне медленно.
- Хорошо подходит для простых схем и простых целевых функций. При большом количестве переменных работает медленно.
- Принято считать, что для симуляции пассивных цепей предпочтительней Simplex Optimizer, чем градиентный.

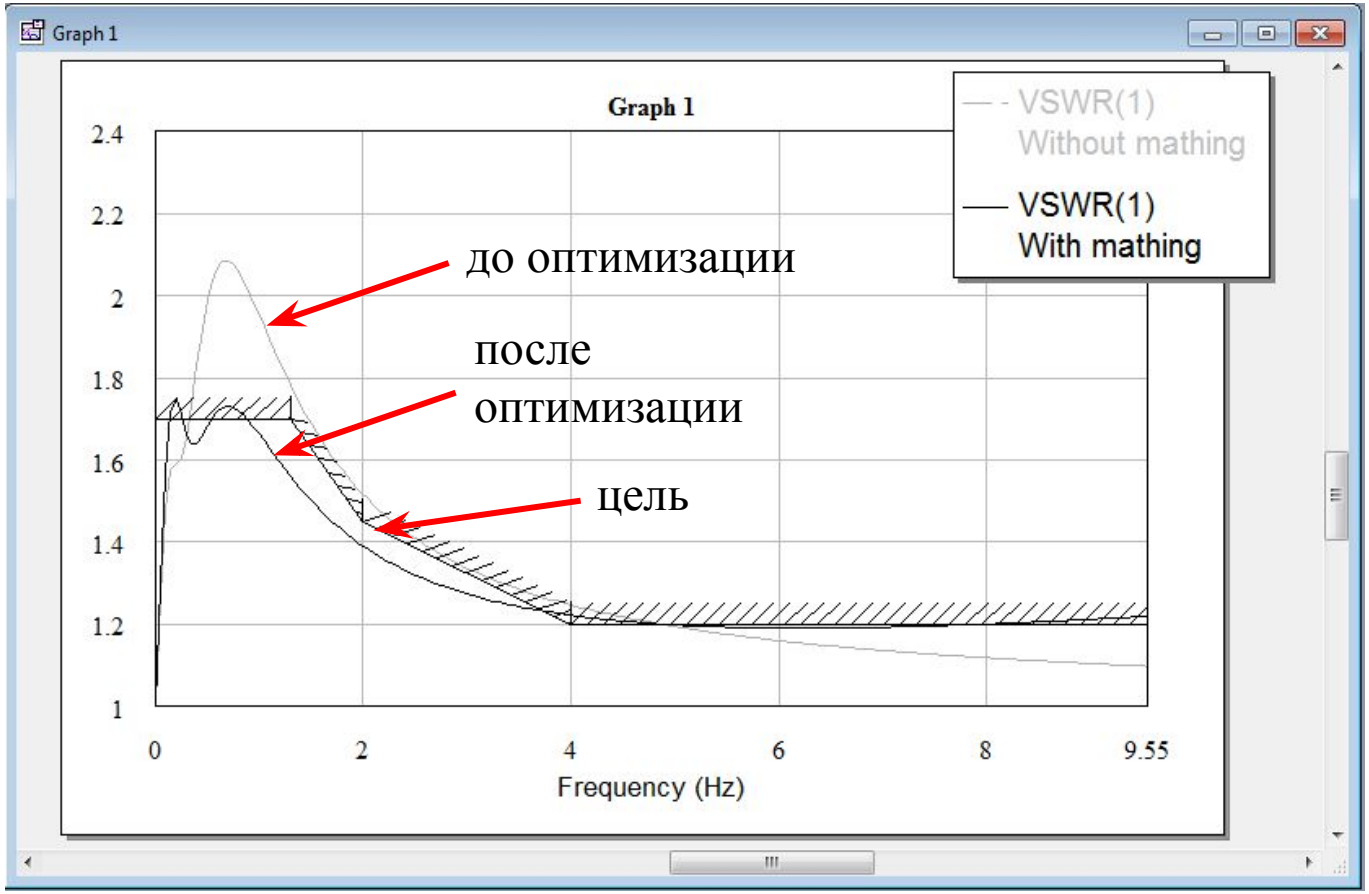
Simplex Optimization

- Первоначально создает созвездие из $N + 1$ точек на поверхности ошибок (N – число варьируемых переменных). Эти точки определяют «симплекс».
- Отыскивает лучшее, чем градиентный метод локальное решение. Поэтому может использоваться для «доводки» предварительно найденного решения.

Genetic

- Генетические алгоритмы. Разработчиков воодушевила скорость и эффективность приспособления свойств живых организмов под условия окружающей среды.
- Идея состоит в том, чтобы от двух точек в пространстве поиска (родителей) получить по определенному правилу новую точку (потомка). Потомок получается при помощи операций скрещивания и мутации (как в живой природе).
- Скрещиваются и мутируют так называемые хромосомы (фактически векторы значений признаков). Первоначально генетические алгоритмы использовались для решения комбинаторных задач, когда каждый элемент (ген) хромосомы бинарно определяет наличие или отсутствие какого либо признака.
- Генетические алгоритмы, используемые в AWRDE, отличаются от стандартных генетических алгоритмов – модифицированы для решения для задач оптимизации с непрерывным изменением значений переменных.
- Модификация состоит в способе генерирования числа (ген потомка) от двух других чисел (гены родителей) с добавлением элемента случайности. Здесь есть разные варианты; например гауссовская мутация и т.д.
- Качество работы генетических алгоритмов сильно зависит от их многочисленных настроек.

Пример результатов оптимизации согласующей цепи



Автоматизированный структурный синтез цепей

- Структурный синтез цепи – синтез схемы (структурной или принципиальной).
- Основные подходы к структурному синтезу цепей:
  - синтез цепей заранее преопределенного класса и структуры;
  - полностью автоматический синтез структурной или принципиальной схемы (в научных разработках).
- Успешность решения задачи структурного синтеза зависит от степени формализованности соответствующей задачи. Лучше всего в настоящее время формализованы две задачи синтеза:
  - синтез линейных частотных фильтров;
  - синтез согласующих цепей.

Автоматизированный структурный синтез цепей заранее предопределенного класса

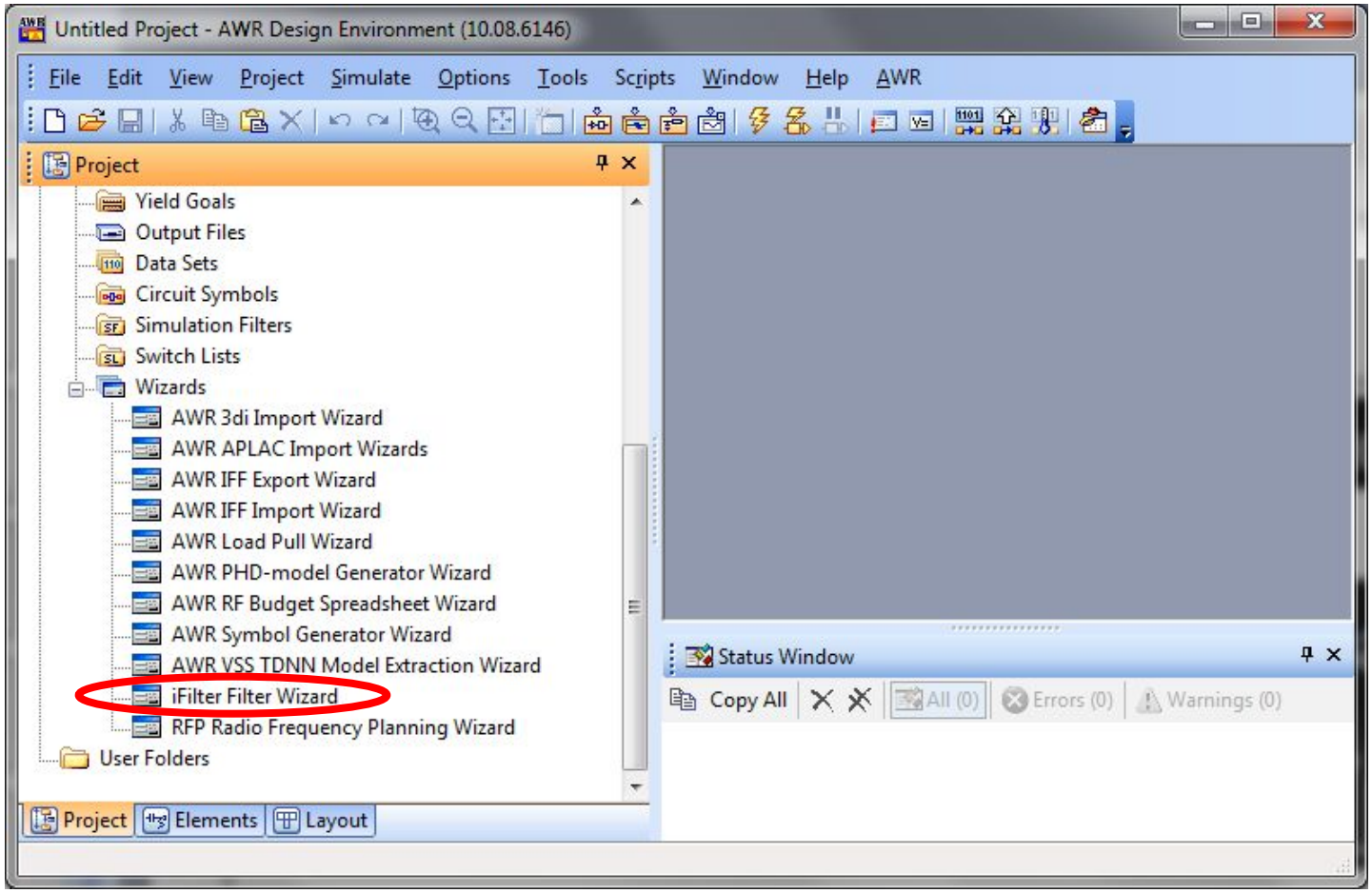
- Данный вариант уже реализован в коммерческих САПР и, в частности, в AWR DE.
- В AWR DE данный вид синтеза реализуется в «мастерах» (Wizards).
- Алгоритм структурного синтеза цепей при использовании мастеров пошаговый:
  - выбор мастера, соответствующего нужному классу цепи (например, фильтрам);
  - выбор общего вида используемой схемы цепи (например, лестничная) и используемых элементов (например, LC-элементы);
  - определение технических требований к цепи (например, частоты среза и т.д.).
- Собственно процесс синтеза обычно состоит в следующем:
  - определение «размерности» прототипа цепи (например, количества ступеней в лестничной схеме);
  - расчет параметров элементов схемы (параметрический синтез; по расчетным соотношениям или оптимизационными методами).
- При указании всех требуемых мастером параметров схема синтезируется быстро и однозначно.

Имеющиеся в AWR DE мастеры для автоматизированного синтеза

- iFilter – синтез линейных частотных фильтров;
- iMatch – синтез линейных согласующих цепей;
- PHD (Poly-Harmonic Distortion) Model Generator Wizard – генератор нелинейных моделей на основе X-параметров.

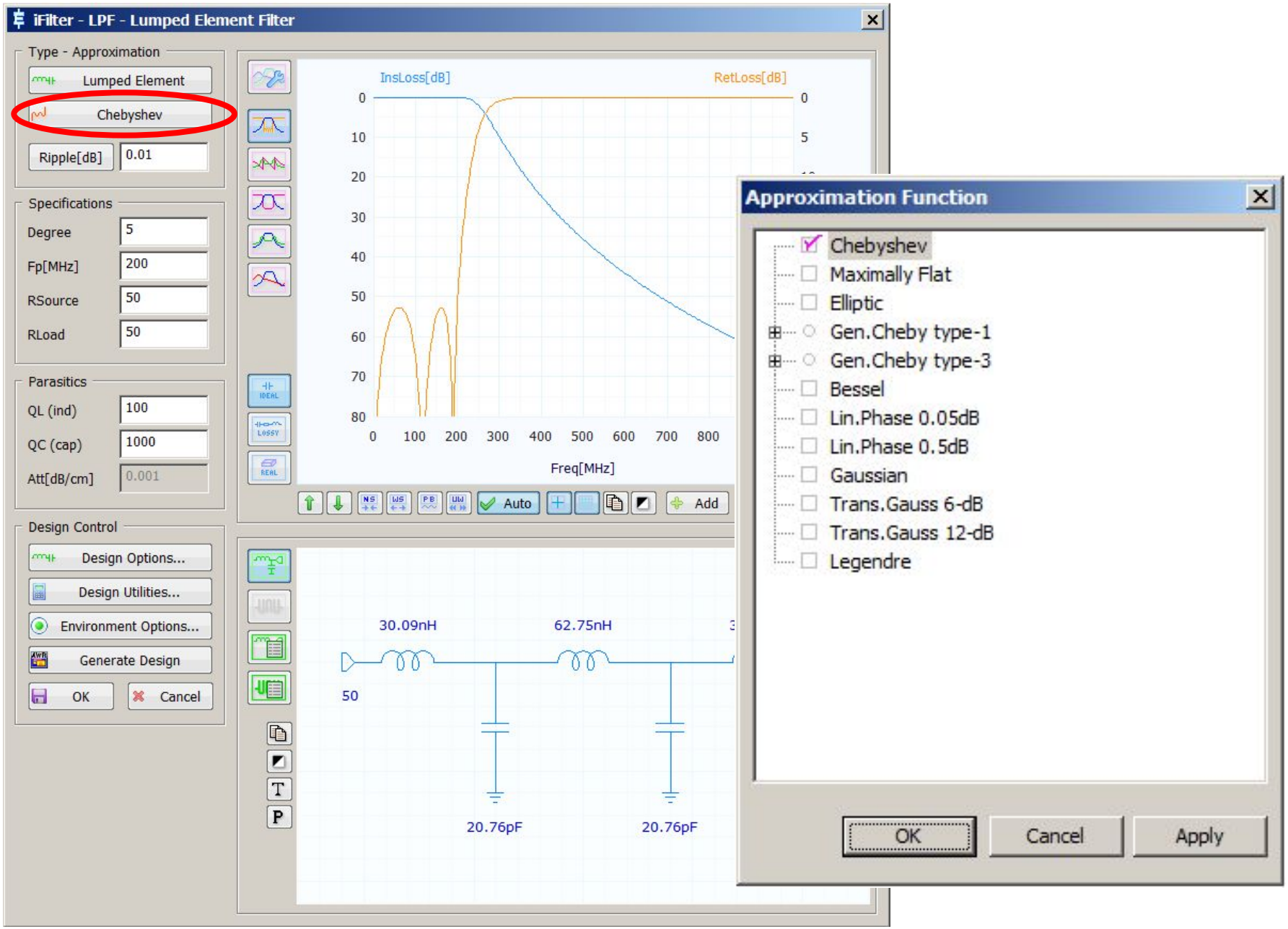
Структурный синтез линейных частотных фильтров в iFilter

- Для всех типов фильтров используется единый интерфейс.
- Мастер можно использовать либо для синтеза новых фильтров, либо для модификации существующих.



Доступные для синтеза в iFilter разновидности фильтров

- С «монотонными» (без нулей коэффициента пропускания) передаточными функциями:
  - Chebyshev (Чебышева);
  - Maximally Flat (с максимально плоской АЧХ);
  - Bessel (Бесселя);
  - Linear Phase (с линейной ФЧХ);
  - Gaussian (Гаусса);
  - Transitional Gaussian (фильтр Гаусса с задаваемой точкой перехода от гауссовской частотной характеристики к линейному в логарифмической шкале спаду);
  - Legendre (Лежандра; фильтр с большей прямоугольностью АЧХ, чем у Баттерворта, но без осцилляций передаточной функции).
- С нулями коэффициента пропускания в области задерживания:
  - Elliptic (эллиптические);
  - Generalized Chebyshev (обобщенные Чебышева).


iFilter - LPF - Lumped Element Filter
Type - Approximation
Lumped Element
Chebyshev
Ripple[dB]
0.01
Specifications
Degree
5
Fp[MHz]
200
RSource
50
RLoad
50
Parasitics
QL (ind)
100
QC (cap)
1000
Att[dB/cm]
0.001
Design Control
Design Options...
Design Utilities...
Environment Options...
Generate Design
OK
Cancel
InsLoss[dB]
RetLoss[dB]
Freq[MHz]
Auto
Add
30.09nH
62.75nH
50
20.76pF
20.76pF
Approximation Function
Chebyshev
Maximally Flat
Elliptic
Gen.Cheby type-1
Gen.Cheby type-3
Bessel
Lin.Phase 0.05dB
Lin.Phase 0.5dB
Gaussian
Trans.Gauss 6-dB
Trans.Gauss 12-dB
Legendre
OK
Cancel
Apply

Алгоритм синтеза фильтра

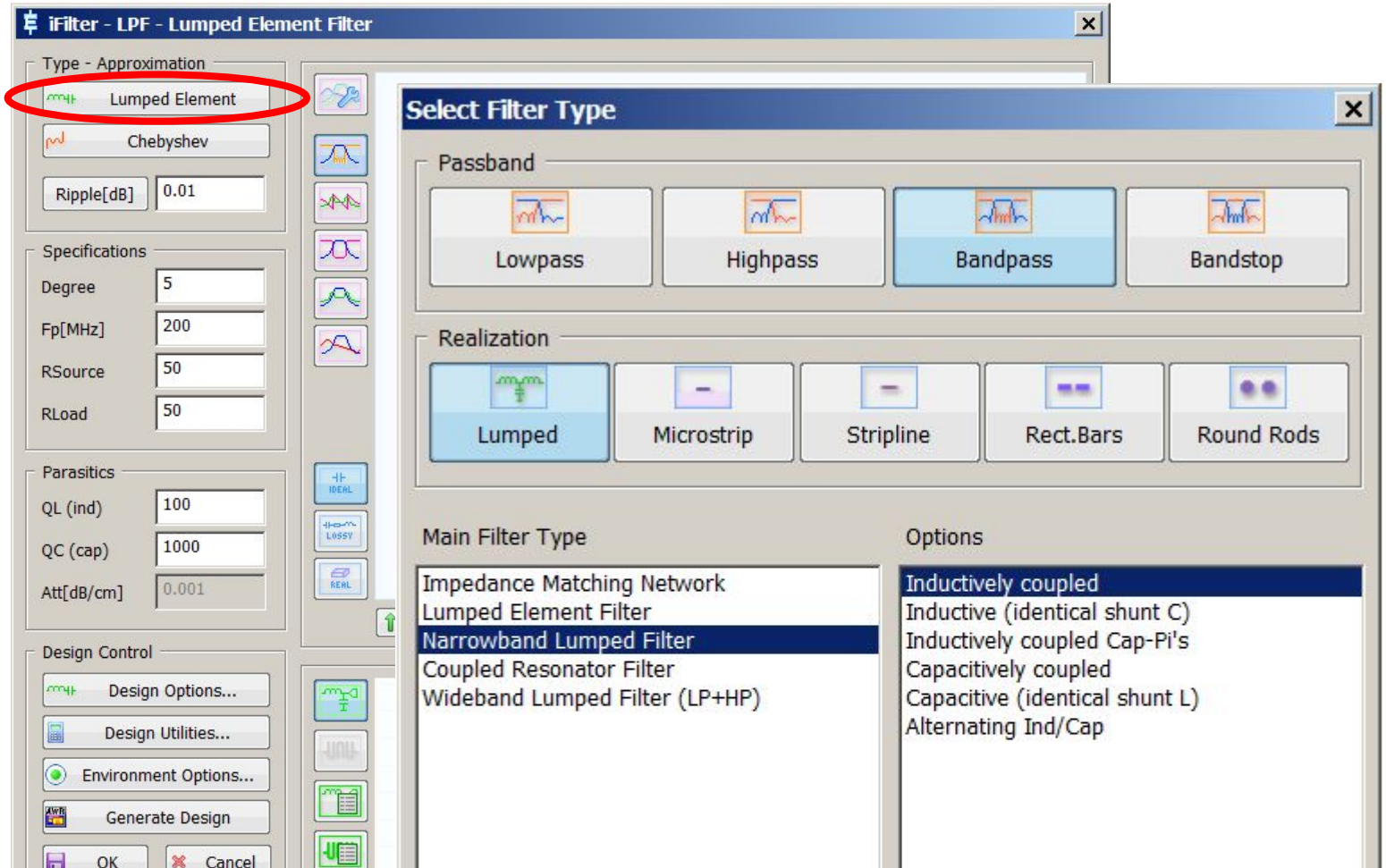
- Алгоритм синтеза фильтра обычный:
  - составление аппроксимации передаточной функции;
  - переход к функции импеданса портов;
  - определение номиналов элементов из функции импеданса.
- Синтез осуществляется по НЧ-прототипу. Используется два типа прототипов:
  - прототип на основе лестничного соединения последовательных индуктивностей и параллельных емкостей;
  - СВЧ-прототип. Содержит также инверторы импеданса/адмитанса и используется, в основном, для синтеза узкополосных полосовых фильтров.

Алгоритм синтеза фильтра

- Далее используется так называемое преобразование частоты. При этом индуктивность заменяется на:
  - индуктивность для ФНЧ;
  - емкость для ФВЧ;
  - последовательный LC-контур для полосовых фильтров;
  - параллельный LC-контур для режекторных фильтров.
- Емкость соответственно заменяется на:
  - емкость для ФНЧ;
  - индуктивность для ФВЧ;
  - параллельный LC-контур для полосовых фильтров;
  - последовательный LC-контур для режекторных фильтров.
- Инверторы заменяются на П-образные или Т-образные звенья для полосовых фильтров.
- Заключительный этап синтеза: ренормировка. Индуктивности умножаются, а емкости делятся на действительное волновое сопротивление источника и нагрузки.

Выбор элементной базы синтезируемого фильтра

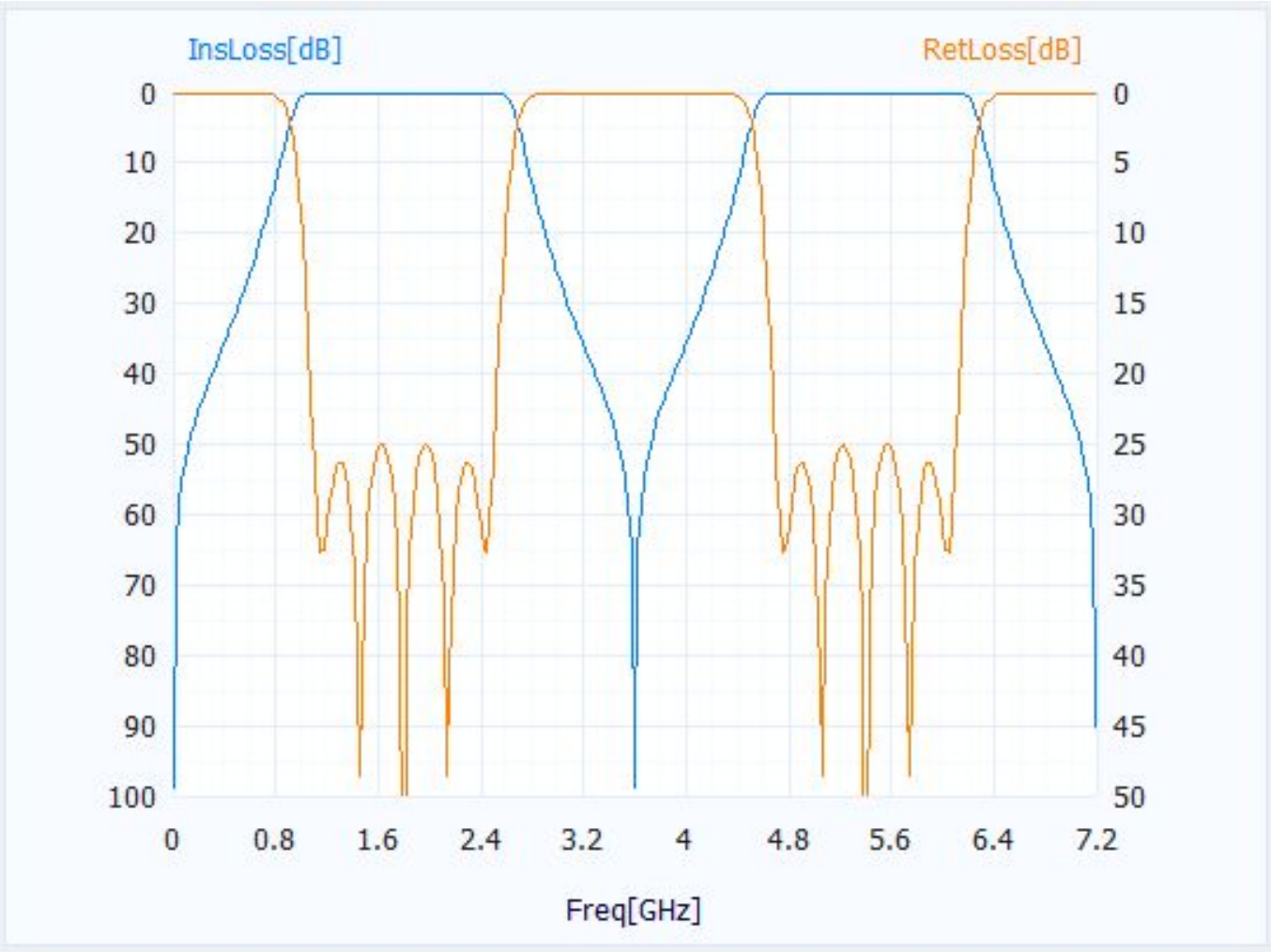
- Мастером iFilter могут быть синтезированы фильтры либо на сосредоточенных элементах, либо на распределенных структурах.



Синтез фильтров на распределенных элементах

- Фильтры на распределенных элементах получаются при каскадном соединении отрезков линии передачи, связанных линий.
- Используется два характерных элемента (шлейфа):
  - короткозамкнутая линия передачи как аналог индуктивности;
  - линия передачи на холостом ходу как аналог емкости.

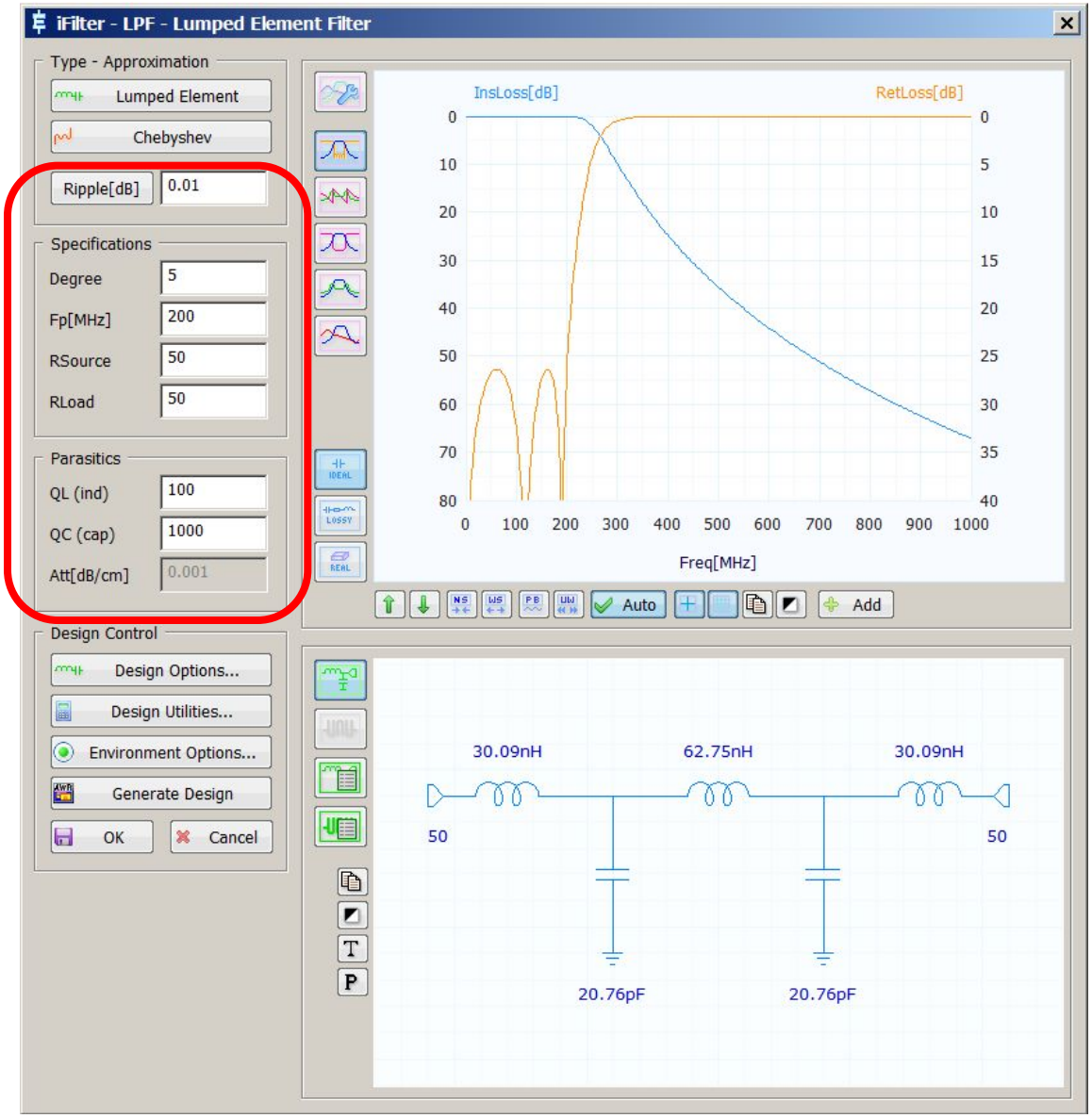
Периодичность передаточных характеристик распределенных фильтров



Три подхода к структурному синтезу распределенных фильтров

- Синтез LC-прототипа и замена индуктивностей и емкостей эквивалентными шлейфами.
- Замена индуктивностей высокоомными, а емкостей низкоомными линиями передачи.
- Использование связанных линий в сочетании с отрезками линий передачи или использование метода коэффициентов связи. Этот метод дает наиболее компактные схемы с наилучшими характеристиками.

Определение требований к фильтру

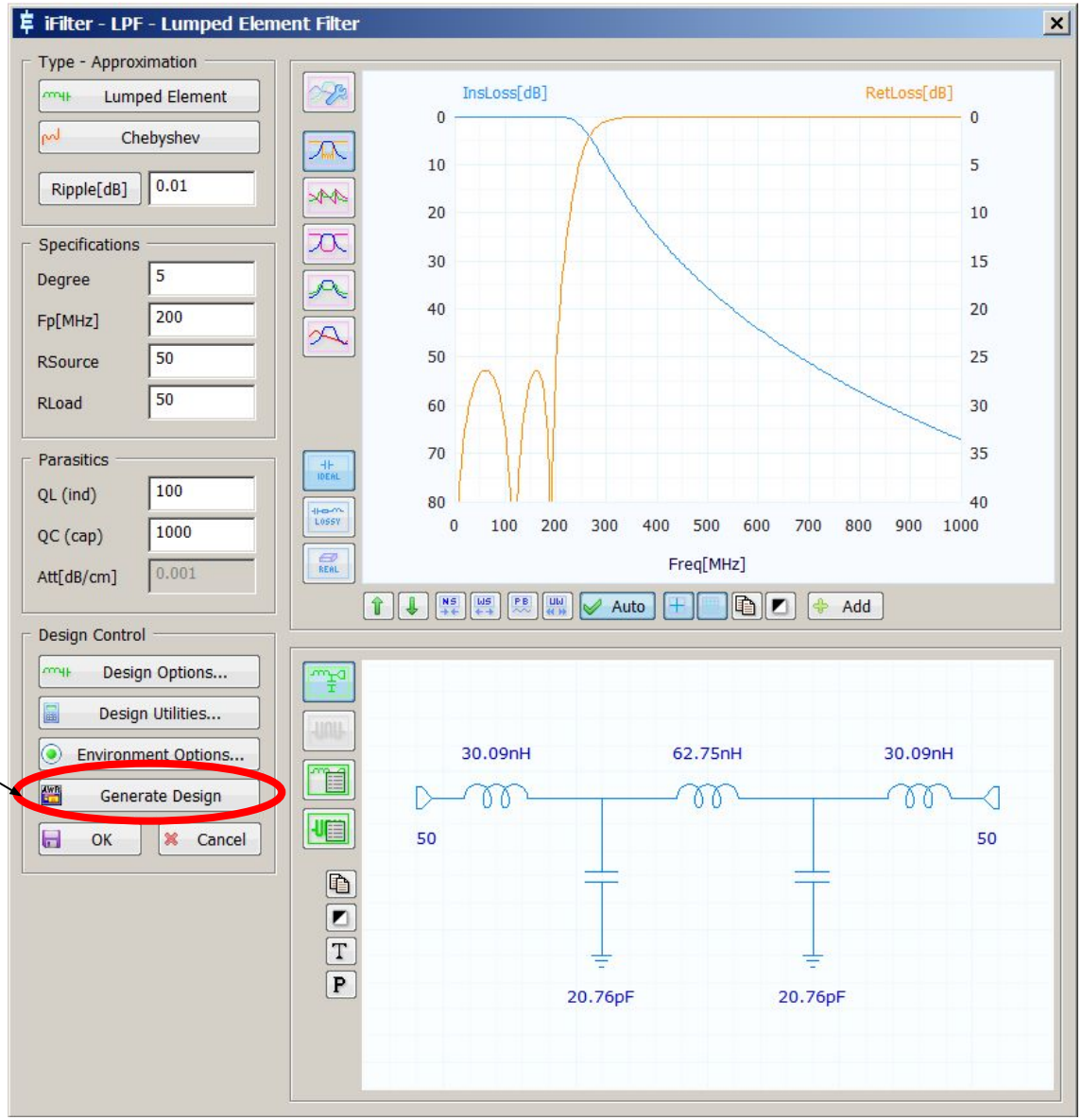


Основные исходные параметры для расчета фильтра

- Degree – порядок фильтра.
- Fp – частота среза по уровню Ripple для чебышевских и эллиптических фильтров и по уровню 3.011 дБ для остальных.
- Fo – центральная частота полосовых и режекторных фильтров.
- BW – ширина полосы пропускания или заграждения для полосовых или режекторных фильтров.
- Stopband IL – пиковый уровень коэффициента пропускания в области задерживания для эллиптических фильтров.
- Low Zo, High Zo – наименьшее и наибольшее допустимые значения импеданса для распределенных фильтров.
- Reson Zo, Line Zo – импеданс на резонансной частоте для СВЧ-фильтров.
- RSource – волновое сопротивление источника.
- RLoad – волновое сопротивление нагрузки.
- QL, QC, TLatt – паразитные параметры, определяющие потери.

Запуск генерации схемы

По нажатию кнопки автоматически создается проект с данной схемой и графиками S_{21} и S_{11}.

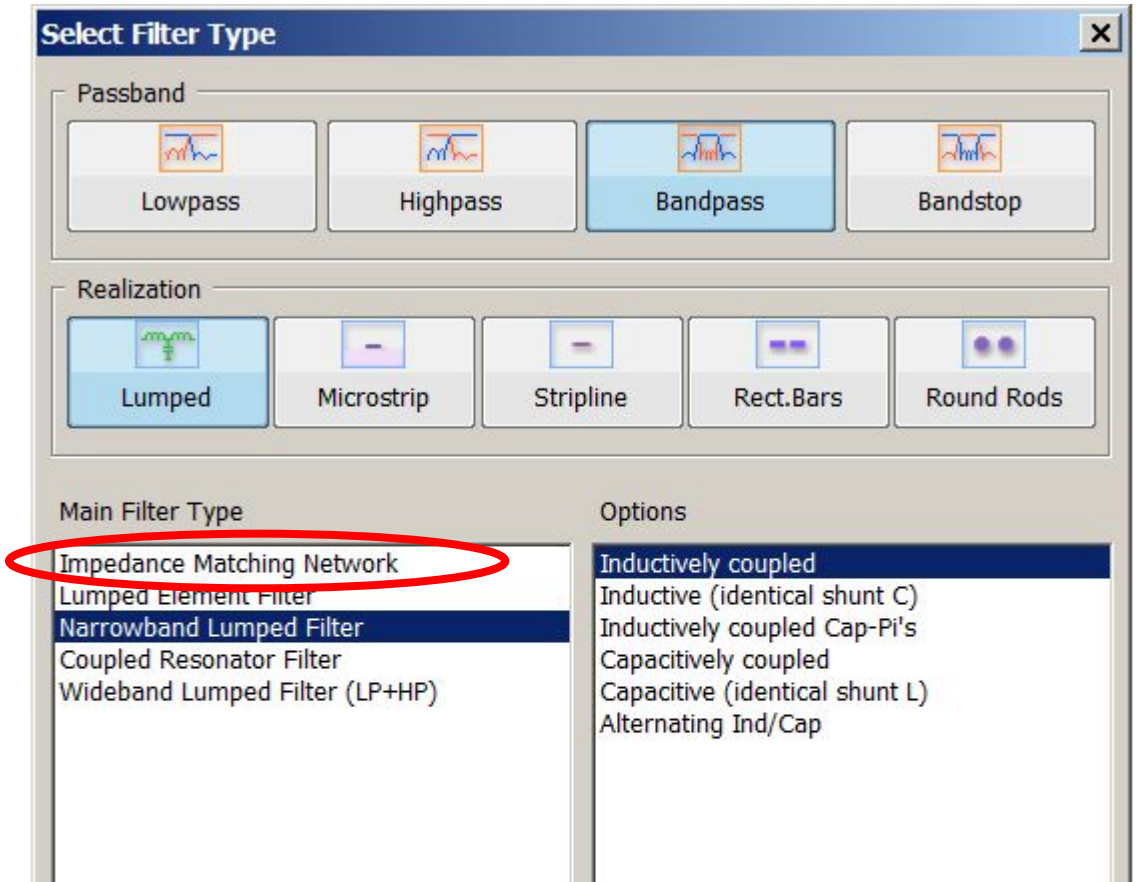


Примеры топологий распределенных ФНЧ, синтезированных в iFilter

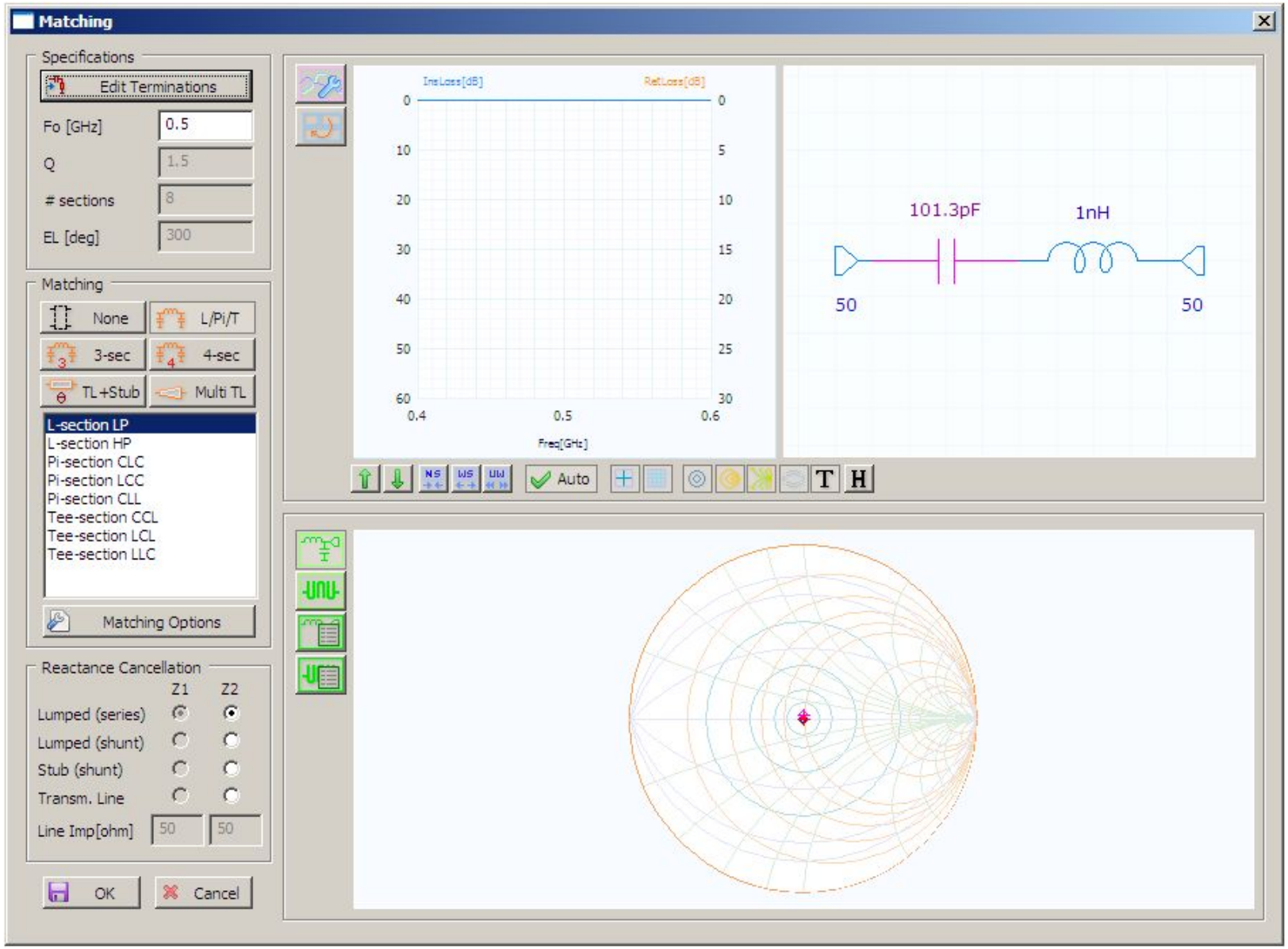
Примеры топологий полосовых распределенных фильтров, синтезированных в iFilter

Мастер синтеза согласующих цепей iMatch

- Данный мастер отображается, только если приобретена соответствующая опция FIL-300 или FIL-200 + FIL-050.
- Может работать либо как автономный мастер, либо в рамках iFilter, рассматривая согласующую цепь как особый тип фильтра:



Основное окно мастера iMatch

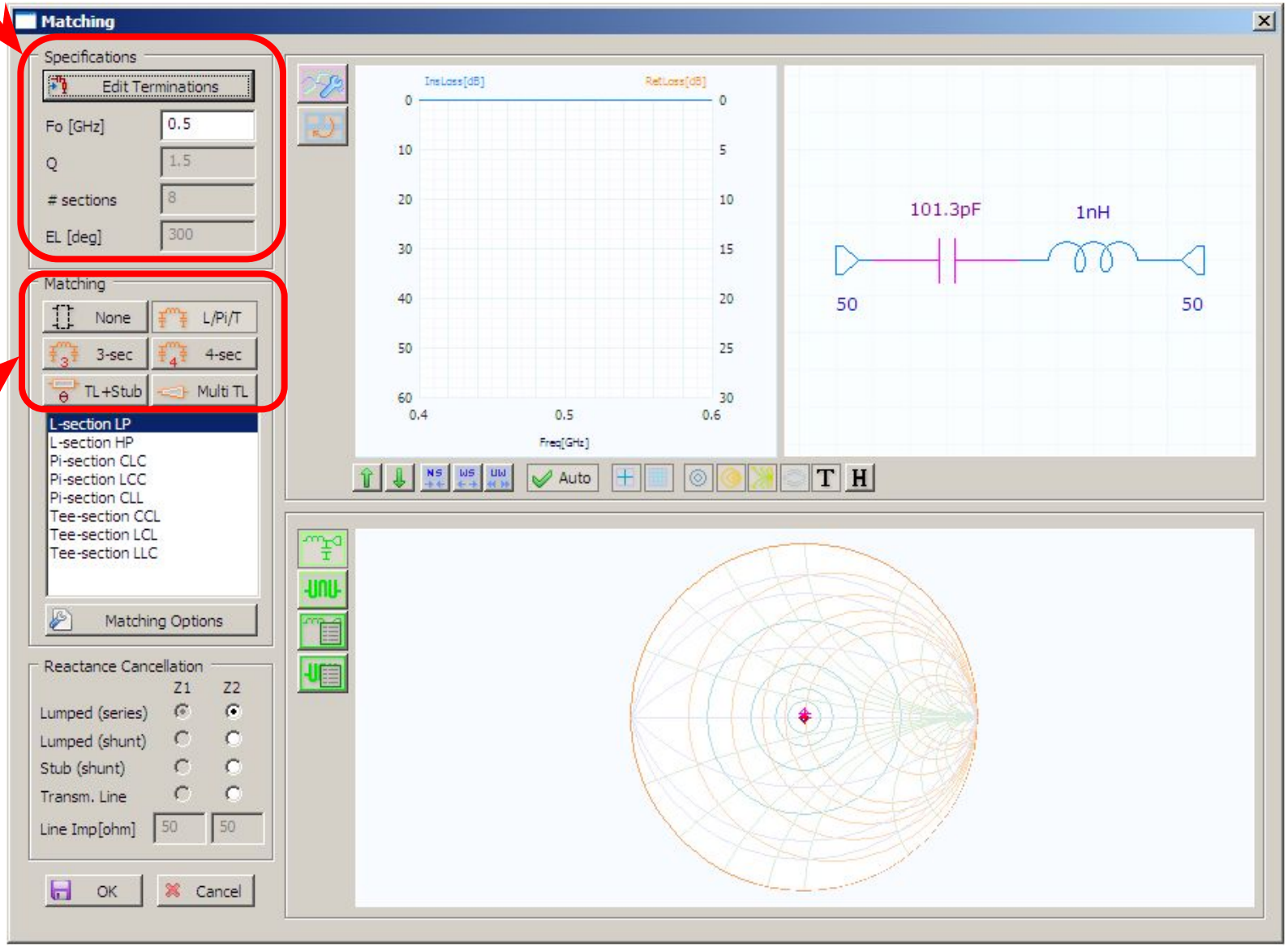


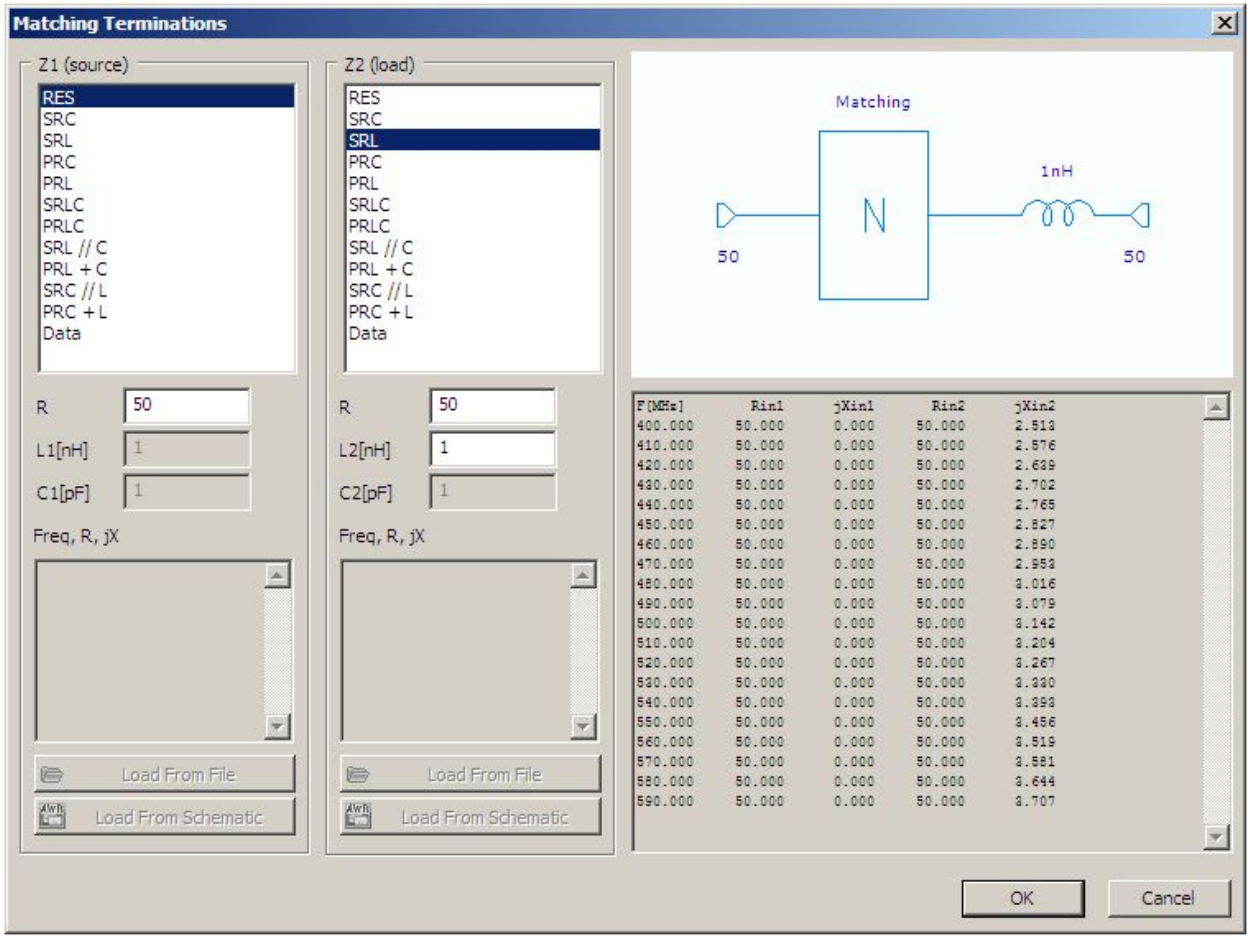
Определение необходимых параметров и характеристик для синтеза согласующей цепи

- Для синтеза согласующей цепи нужно определить:
  - импеданс нагрузки и источника сигнала;
  - тип секций согласующей лестничной цепи (Г-образная, П-образная, Т-образная или отрезки линий передачи с постоянным или переменным волновым сопротивлением);
  - количество секций.

определение импедансов нагрузки и источника

определение вида и количества звеньев



Определение импедансов источника и нагрузки

- Терминальные импедансы задаются либо в виде небольшой реактивной схемы, либо в виде считываемой из файла таблицы.