

**Курсовая работа по ММЭЦ**  
**(3 семестр)**  
**Методические рекомендации**  
**по выполнению**

**2019 г.**

Задание на КР.....	3
Порядок выполнения работы .....	4
Примерное содержание РПЗ .....	7
Задание параметров для синтеза (заграждающий фильтр) .....	8
Задание параметров для синтеза (заграждающий фильтр) .....	9
Задание параметров для синтеза (заграждающий фильтр) .....	10
Результат синтеза фильтра.....	11
Амплитудно-частотная характеристика фильтра .....	12
Амплитудно-частотная характеристика фильтра .....	13
Амплитудно-частотная характеристика фильтра .....	14
Анализ параметров фильтра.....	15
Зависимость входного сопротивления фильтра от частоты .....	16
Переходная характеристика синтезированного фильтра.....	17
Реакция фильтра на прямоугольный импульс .....	18
Реакция фильтра на входной сигнала сложной формы .....	19
Реакция фильтра на входной сигнала сложной формы .....	20
Реакция фильтра на входной сигнала сложной формы .....	21
Спектральные диаграммы входного и выходного напряжения .....	22
Спектральные диаграммы входного и выходного напряжения .....	23
Спектральные диаграммы входного и выходного напряжения .....	24
Синтез фильтра из компонентов ряда E24 .....	25
Синтез фильтра из компонентов ряда E24 .....	26
Синтез фильтра из компонентов ряда E24 .....	27

Синтез фильтра из компонентов ряда E24 .....	28
АЧХ фильтра из компонентов ряда E24 .....	29
Анализ Монте-Карло для фильтра из компонентов ряда E24 .....	30
Анализ Монте-Карло для фильтра из компонентов ряда E24 .....	31
Анализ Монте-Карло для фильтра из компонентов ряда E24 .....	32
Синтез фильтра из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов .....	33
Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов .....	34
Параллельно-последовательное соединение компонентов .....	35
Вывод способа соединения компонентов на схему .....	36
Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов .....	37
АЧХ фильтра из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов .....	38
Анализ Монте-Карло.....	39
Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов .....	40
Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов .....	41
АЧХ фильтра из компонентов ряда E24 с упрощенным параллельно-последовательным соединением .....	42

## Задание на КР

Даны основные параметры фильтра. Пример:

Для фильтров нижних и верхних частот (ФНЧ и ФВЧ):

Тип фильтра	
Тип характеристики	
Подавление в полосе задержания $A$ , дБ	
Граница полосы пропускания $F_C$ , кГц	
Граница полосы задержания $F_S$ , кГц	
Неравномерность в полосе пропускания $R$ , дБ	
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	

Для полосового и заграждающего фильтров:

Тип фильтра	Заграждающий (режекторный)
Тип характеристики	Чебышева
Подавление в полосе задержания $A$ , дБ	40 дБ (не менее)
Центральная частота $F_C$ , кГц	2 кГц
Ширина полосы пропускания $PB$ , кГц	200 Гц
Ширина полосы задержания $SB$ , кГц	400 Гц
Неравномерность в полосе пропускания $R$ , дБ	3 дБ (не более)
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	100

Необходимо синтезировать пассивный фильтр с использованием средств программы Micro-Cap, исследовать его основные параметры, в том числе с учетом наличия разброса номинальных значений компонентов.

## Порядок выполнения работы

1. Изучить основные типы электрических фильтров, их параметры и характеристики.
2. Изучить порядок синтеза пассивных фильтров в программе *Micro-Cap*.
3. Средствами программы *Micro-Cap* синтезировать фильтр с параметрами, соответствующими требованию технического задания (ТЗ).
4. Провести исследование основных свойств синтезированного электрического фильтра:
  - 4.1 Построить амплитудно-частотную характеристику фильтра и показать её соответствие требованиям ТЗ (указать на графике основные параметры получившегося фильтра и сделать обоснованный вывод о соответствии).
  - 4.2 Построить зависимость входного сопротивления  $R_{IN}$  фильтра от частоты. Определить, какое сопротивление  $R_G$  должен иметь источник сигнала, для того, чтобы в полосе пропускания в нагрузку передавалась максимальная мощность.
  - 4.3 Построить переходную характеристику синтезированного фильтра.
  - 4.4 Построить реакцию фильтра при подаче на вход прямоугольного импульса. Амплитуда импульса 1 В, длительность 50 мкс, период 1 с.
  - 4.5 Построить реакцию фильтра на входной сигнала сложной формы, представляющий собой сумму двух синусоидальных сигналов с амплитудой каждого сигнала 1 В и со следующими частотами:
    - для фильтров нижних и верхних частот:  $f_1$  – в 10 раз меньше границы полосы пропускания и  $f_2$  – в 10 раз больше границы полосы пропускания;
    - для полосового и режекторного (заграждающего) фильтров:
      - а)  $f_1$  – в 10 раз меньше центральной частоты,  $f_2$  – равной центральной частоте,
      - б)  $f_1$  – в 10 раз больше центральной частоты,  $f_2$  – равной центральной частоте.

4.6 Построить реакцию фильтра и спектральную диаграмму входного и выходного напряжения при подаче на вход сигнала сложной формы, представляющий собой сумму пяти синусоидальных сигналов с амплитудой каждого сигнала 1 В и со следующими частотами:

- для фильтра нижних частот и фильтра верхних частот :  $f_1$  – в 100 раз меньше границы полосы пропускания,  $f_2$  – в 10 раз меньше границы полосы пропускания,  $f_3$  – равной границе полосы пропускания,  $f_4$  – в 10 раз больше границы полосы пропускания и  $f_5$  – в 100 раз больше границы полосы пропускания
- для полосового и режекторного (заграждающего) фильтров:  $f_1$  – в 100 раз меньше центральной частоты,  $f_2$  – в 10 раз меньше центральной частоты,  $f_3$  – равной центральной частоте,  $f_4$  – в 10 раз больше центральной частоты и  $f_5$  – в 100 раз больше центральной частоты.

5. Установить значения резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности согласно ряда номинальных знамений E24 (точность 5%).
6. Построить амплитудно-частотную характеристику фильтра и показать, как изменились параметры фильтра по сравнению с использованием точных расчетных значений.
7. Провести анализ Монте-Карло на наихудший случай. Определить диапазон возможных изменений параметров фильтра при использовании реальных компонентов.
8. Провести повторный синтез фильтра с использованием средств программы *Micro-Cap*, указав точность компонентов 5% и возможность использования параллельного и последовательного соединения компонентов для достижения точности 1%.
9. Построить амплитудно-частотную характеристику фильтра и сравнить её с результатами выполнения п. 4.1 и п.6. Показать, как в этом случае изменились параметры фильтра по сравнению с использованием точных расчетных значений.

10. Провести анализ Монте-Карло на наихудший случай. Определить диапазон возможных изменений параметров фильтра и сравнить их с результатами п. 7.
11. Для последней из синтезированных схем выбрать по справочникам типы компонентов для поверхностного монтажа (SMD, резисторы и конденсаторы 0805 или 1206), подходящие для построения фильтра с заданными параметрами.
12. Построить электрическую принципиальную схему разработанного фильтра в соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД).
13. Составить перечень элементов для разработанного фильтра.
14. Оформить расчетно-пояснительную записку.
15. Подготовить слайды презентации к защите работы.

## Примерное содержание РПЗ

АННОТАЦИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

### 1. ПАССИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ, ИХ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ В ПРОГРАММЕ MICRO-CAP

- 1.1 Основные виды фильтров и система их параметров
- 1.2 Синтез пассивных электрических фильтров в программе Micro-Cap
- 1.3 Основные характеристики электрических фильтров и методы их построения в программе Micro-Cap
- 1.4 Разброс параметров компонентов и его учет средствами программы Micro-Cap
- 1.5 Спектральный анализ в программе Micro-Cap
- 1.6 Анализ Монте-Карло в программе Micro-Cap
- 1.7 Выводы

### 2. ФИЛЬТР НА ИДЕАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТАХ

- 2.1 Синтез фильтра
- 2.2 Параметры синтезированного фильтра
- 2.3 Исследование синтезированного фильтра
- 2.4 Выводы

### 3. ФИЛЬТР НА КОМПОНЕНТАХ С ЗАДАННЫМ РАЗБРОСОМ

- 3.1 Синтез фильтра на компонентах с заданным разбросом
- 3.2 Параметры синтезированного фильтра
- 3.3 Исследование синтезированного фильтра
- 3.4 Синтез фильтра с последовательно-параллельным соединением компонентов
- 3.5 Параметры синтезированного фильтра
- 3.6 Исследование синтезированного фильтра
- 3.7 Выводы

### 4. ВЫБОР КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ СИНТЕЗИРОВАННОГО ФИЛЬТРА

ЛИТЕРАТУРА

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Электрическая принципиальная схема синтезированного фильтра

Приложение Б. Перечень элементов синтезированного фильтра

## Задание параметров для синтеза (заграждающий фильтр)

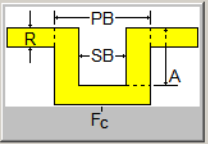
Основные параметры фильтра:

**Passive Filter Designer**

Design | Implementation | Options

**Type**

☐ Low-Pass  
☐ High-Pass  
☐ Bandpass  
☒ Notch



**Response**

☐ Butterworth 8  
☒ Chebyshev 5  
☐ Elliptic 5

**Specifications**

☒ Mode 1    ☐ Mode 2

Passband Gain: 0 dB  
 Passband Ripple (R): 3.01029995663 dB  
 Stopband Atten. (A): 40 dB  
 Center Freq. (Fc): 2000 Hz  
 Passband (PB): 400 Hz  
 Stopband (SB): 200 Hz

**Poles and Zeros**

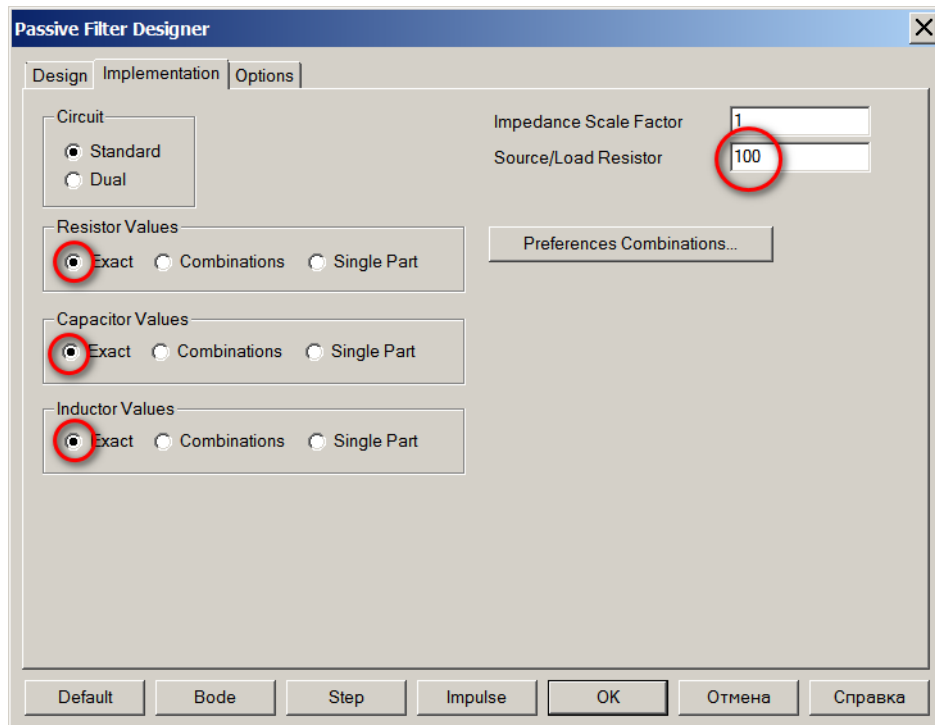
Stage	F0	Q0	FN
1	2207.058132...	85.49163866...	1989.974874...
2	1794.243631...	85.49163866...	1989.974874...
3	2332.065615...	13.24483013...	1989.974874...
4	1698.065429...	13.24483013...	1989.974874...
5	1989.974874...	0.881504282...	.

Default    Bode    Step    Impulse    OK    Отмена    Справка



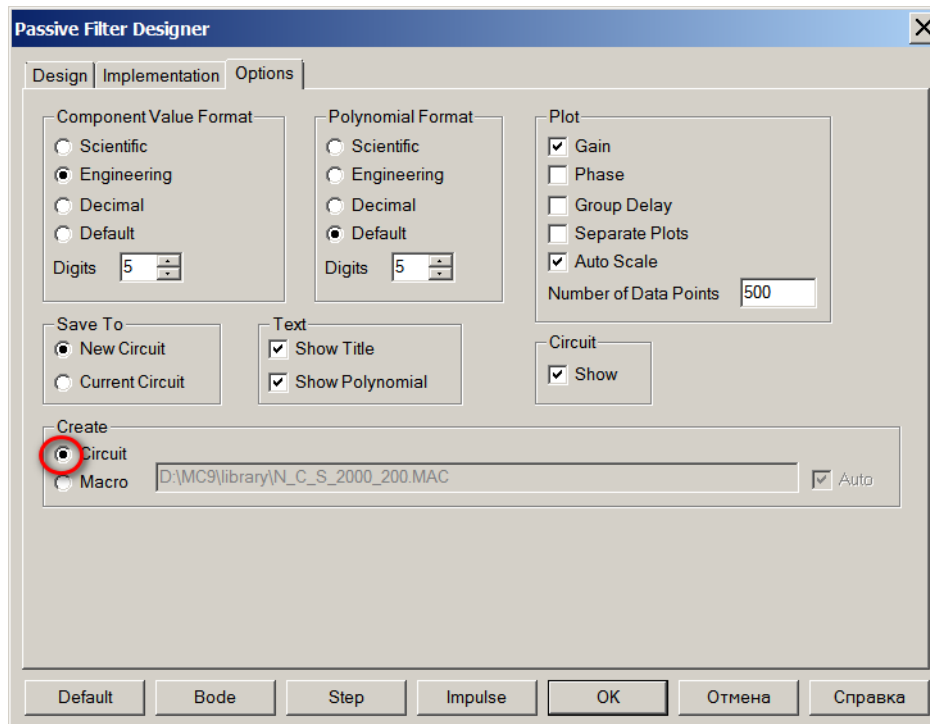
## Задание параметров для синтеза (заграждающий фильтр)

Использование идеальных (точных) компонентов и сопротивление фильтра

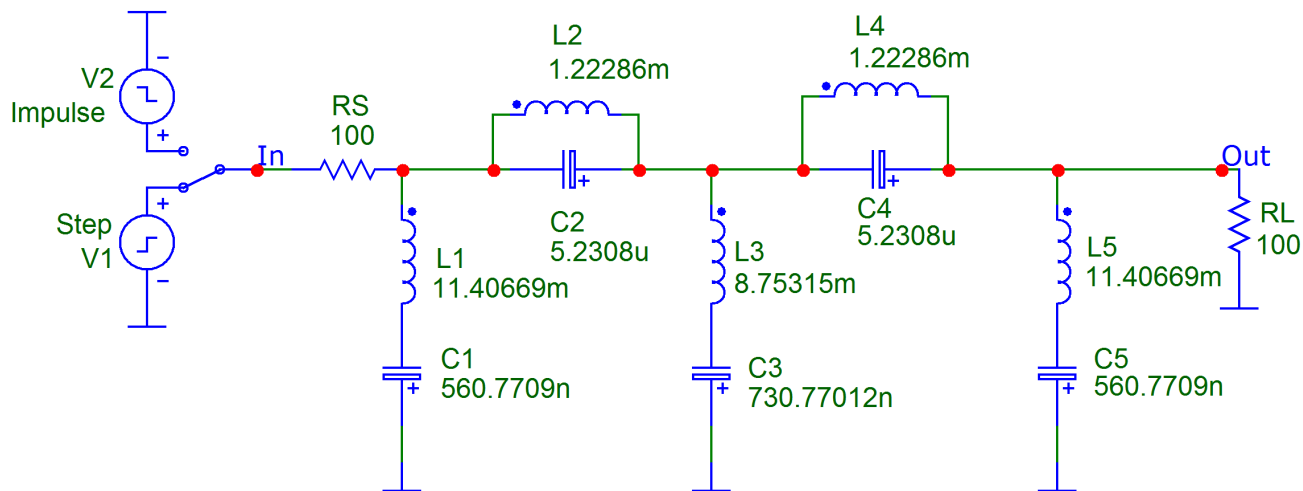


## Задание параметров для синтеза (заграждающий фильтр)

Синтез в виде схемы



## Результат синтеза фильтра

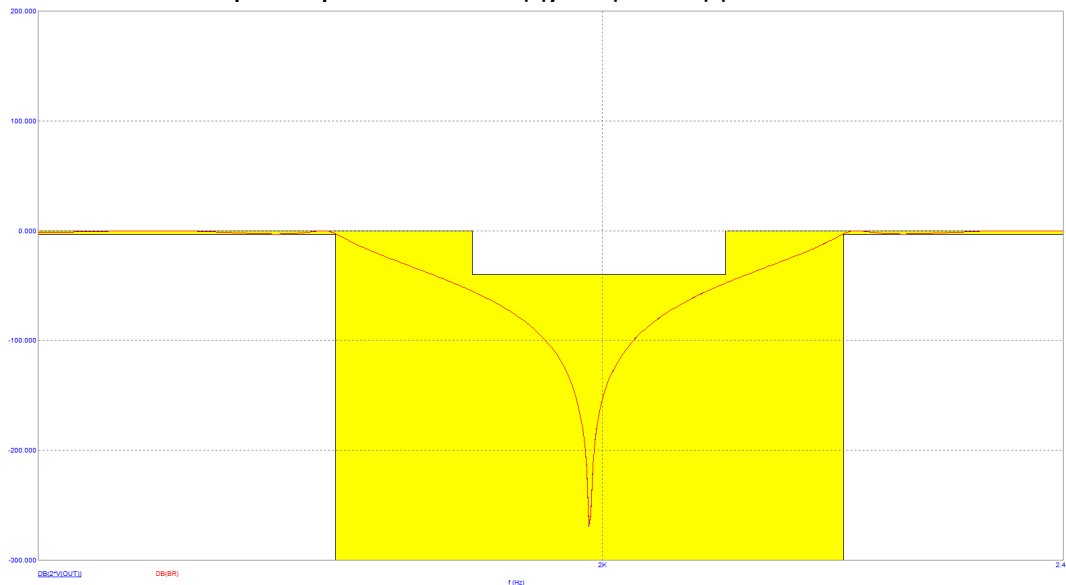


Сразу после синтеза схема занимает много места на поле схемы, её нужно перерисовать более компактно.

Дополнительных текстовых надписей на схеме в пояснительной записке быть не должно.

## Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Сразу после синтеза АЧХ фильтра имеет следующий вид:

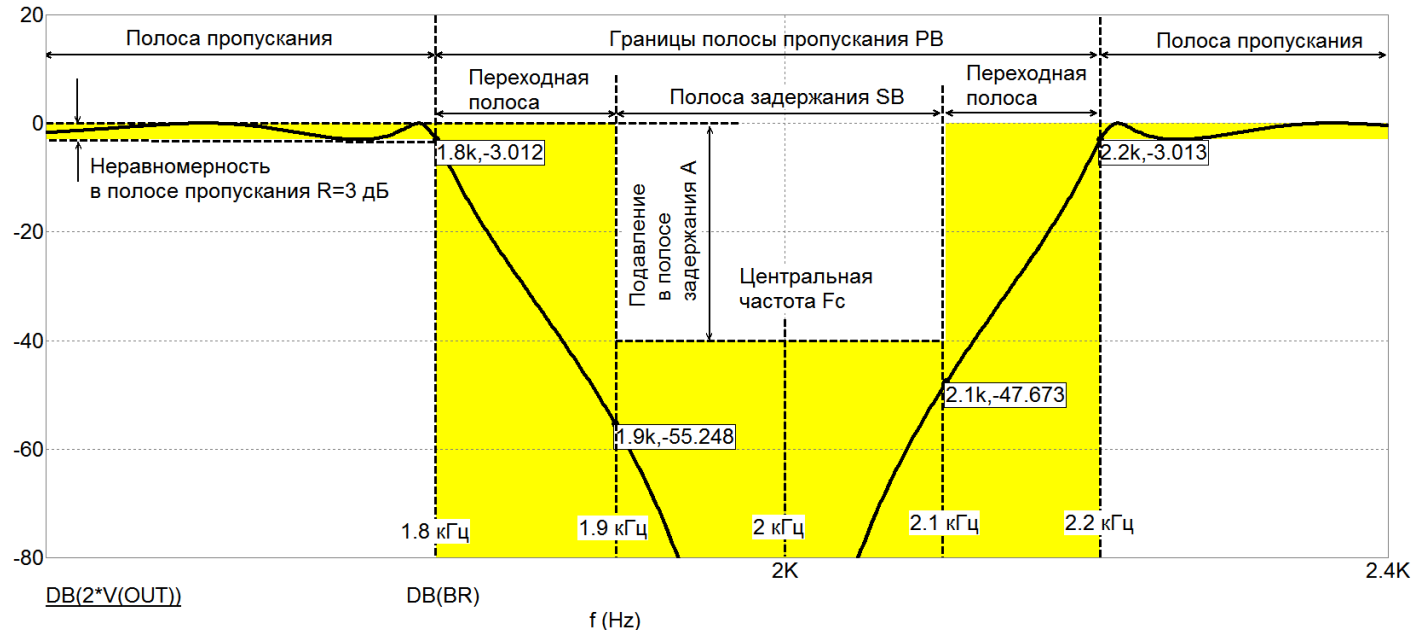


Её необходимо доработать:

1. Установить для основного графика тип линии «сплошная», а для теоретического «пунктирная», увеличить толщину линий до 4.
2. Увеличить размер надписей по осям.
3. Установить по оси Y диапазон от 20 до -80 дБ с шагом сетки 20 дБ.
4. Указать на графике основные параметры фильтра и граничные частоты.
5. Установить для всех графиков и надписей черный цвет (для беспроблемной печати на принтере).

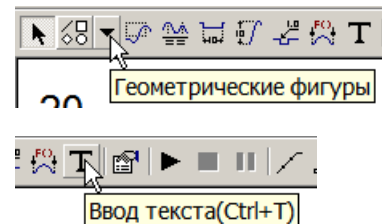
## Амплитудно-частотная характеристика фильтра

### Доработанная АЧХ фильтра



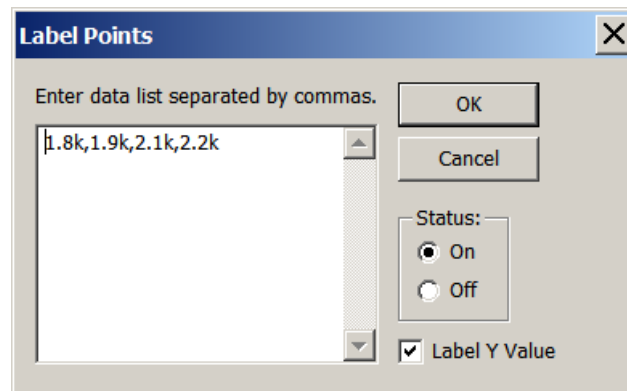
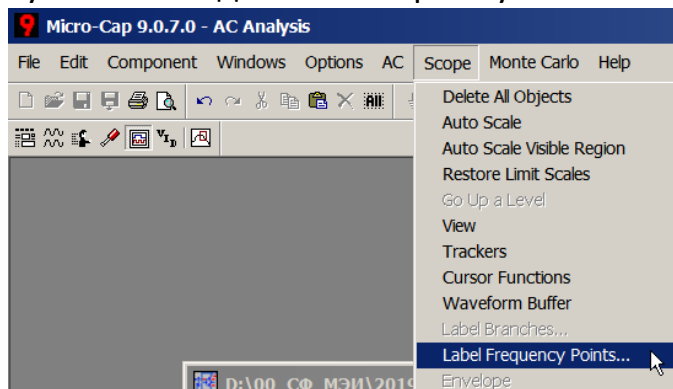
Рисование линий выполняется через меню «Геометрические фигуры». В параметрах линии можно указать тип линии, её толщину и наличие стрелок на концах.

Текстовые надписи выполняют через «Ввод текста»

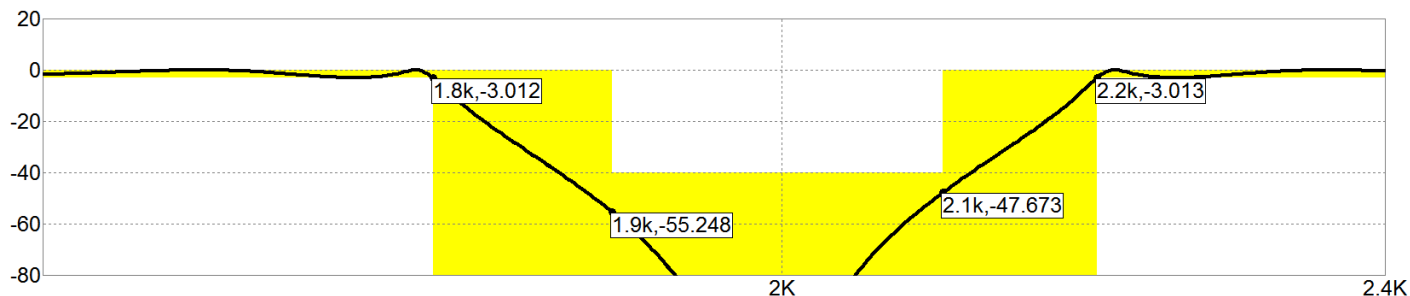


## Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Для получения точных значений коэффициента передачи на граничных частотах используется команда Label Frequency Points



При этом выводятся метки точек, где первое число – частота, а второе – коэффициент передачи.



Значение на частоте 2 кГц не попало на поле графика. Это означает, что в этой точке  $K_u < -80$  дБ (или коэффициент подавления  $A > 80$  дБ)

## Анализ параметров фильтра

По АЧХ синтезированного фильтра нужно определить его основные параметры и проверить на соответствие требованиям ТЗ:

Нижняя граница полосы пропускания  $F_{\text{пн}}=1.8$  кГц, коэффициент передачи на этой частоте  $K_{\text{упн}}=-3$  дБ

Верхняя граница полосы пропускания  $F_{\text{пв}}=2.2$  кГц, коэффициент передачи на этой частоте  $K_{\text{упв}}=-3$  дБ

Нижняя граница полосы задержания  $F_{\text{зн}}=1.9$  кГц, коэффициент передачи на этой частоте  $K_{\text{узн}}=-55.2$  дБ

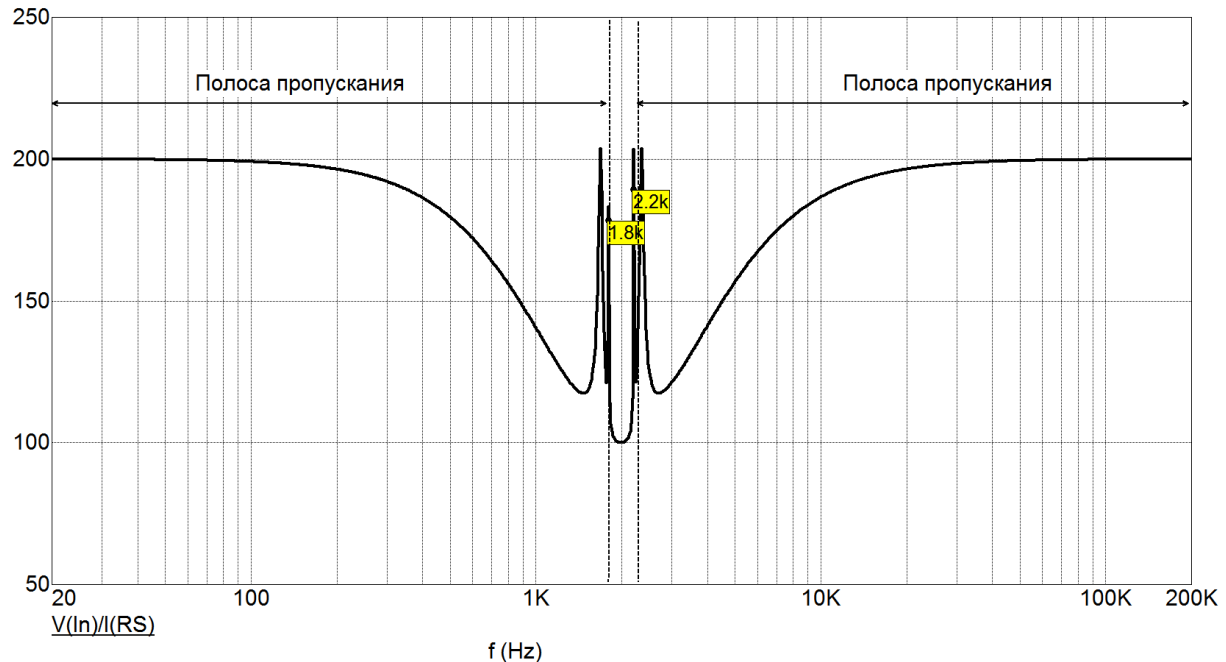
Верхняя граница полосы задержания  $F_{\text{зв}}=2.1$  кГц, коэффициент передачи на этой частоте  $K_{\text{узв}}=-47.7$  дБ

Центральная частота  $F_{\text{с}}=2$  кГц, коэффициент передачи на этой частоте  $K_{\text{уфс}}<-80$  дБ

Таким образом, фильтр удовлетворяет требованию технического задания: подавление в полосе задержания составляет не менее 47.7 дБ (по заданию не менее 40 дБ), неравномерность в полосе пропускания 3 дБ (по заданию не более 3дБ).

## Зависимость входного сопротивления фильтра от частоты

Входное сопротивление это отношение входного напряжения к входному току. Входное напряжение это  $V(\text{In})$ , входной ток – ток через резистор  $R_S$ , т.е.  $I(R_S)$



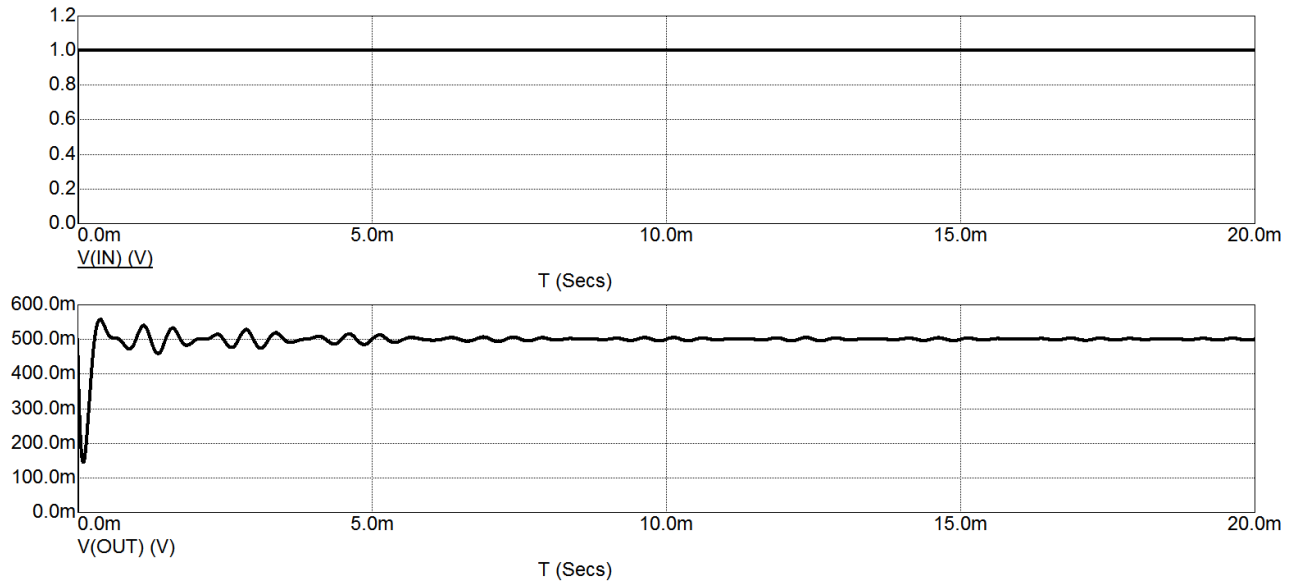
Необходимо определить, какое сопротивление  $R_G$  должен иметь источник сигнала, для того, чтобы в полосе пропускания в нагрузку передавалась максимальная мощность.



## Переходная характеристика синтезированного фильтра

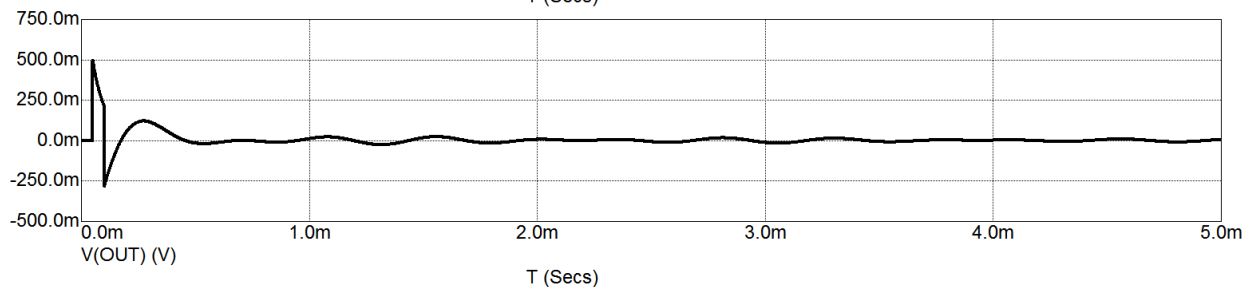
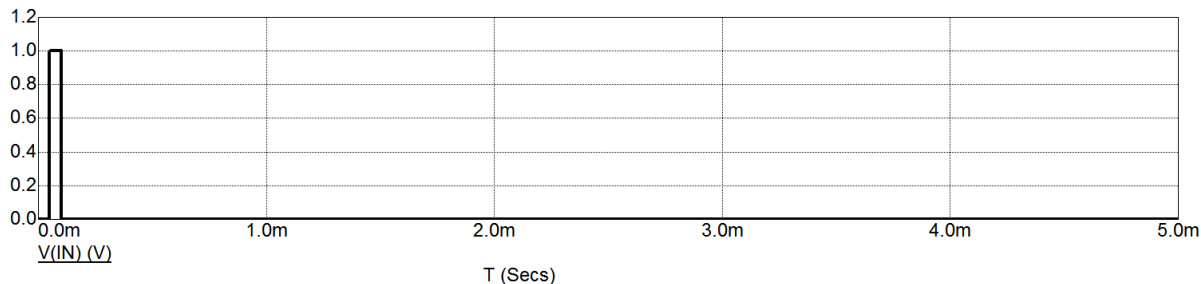
Переходная характеристика – это реакция на единичный скачок входного сигнала.

Выполняется при помощи анализа Transient. Время расчета нужно установить так, чтобы к концу расчета переходный процесс полностью завершился.



## Реакция фильтра на прямоугольный импульс

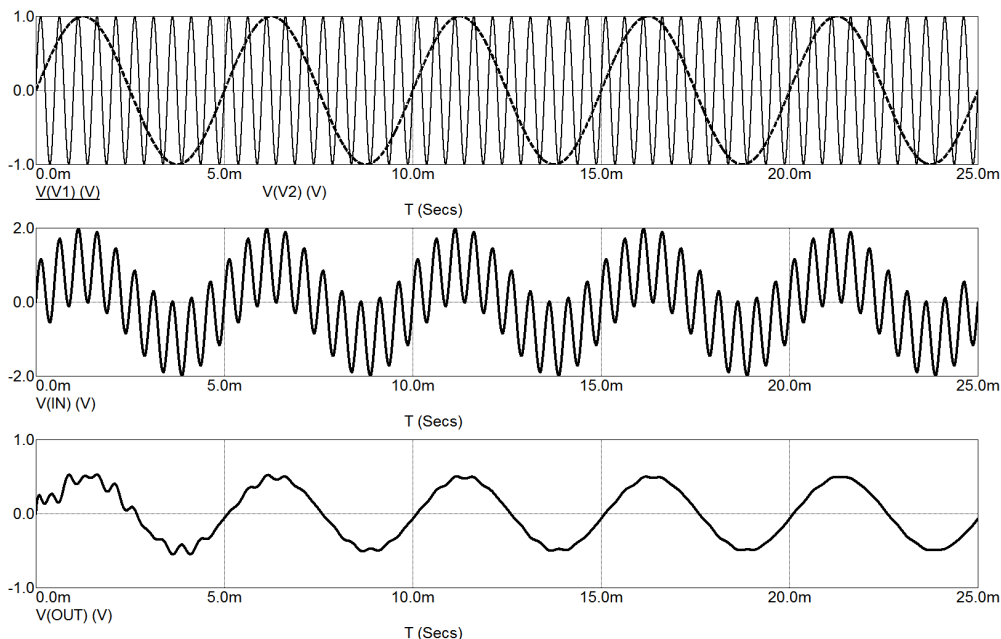
Время расчета нужно установить так, чтобы к концу расчета переходный процесс полностью завершился.



## Реакция фильтра на входной сигнала сложной формы

На вход фильтра подается сигнал в виде суммы двух синусоид. Получить такой сигнал можно используя два последовательно включенных источника синусоидального сигнала с заданными частотами (Voltage Source, вкладка Sin).

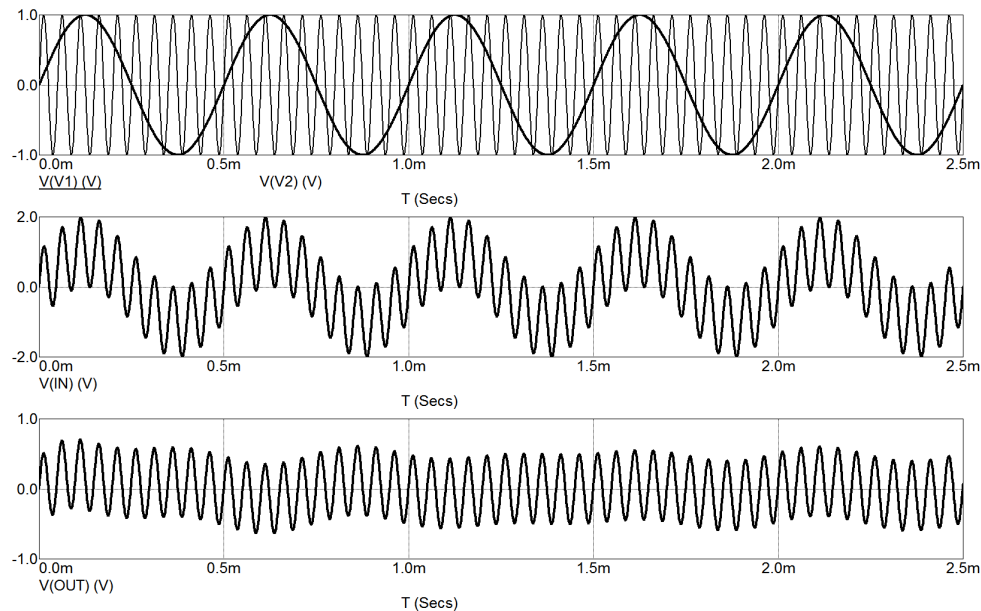
Частота F1 в 10 раз меньше центральной частоты (на график вывести 5 периодов), частота F2 равна центральной частоте.



Центральная частота полностью подавляется, на выходе остается только частота F1, которая в 10 раз меньше центральной частоты. В течение первого периода наблюдается переходный процесс, который завершается к моменту времени 25 мс.

## Реакция фильтра на входной сигнала сложной формы

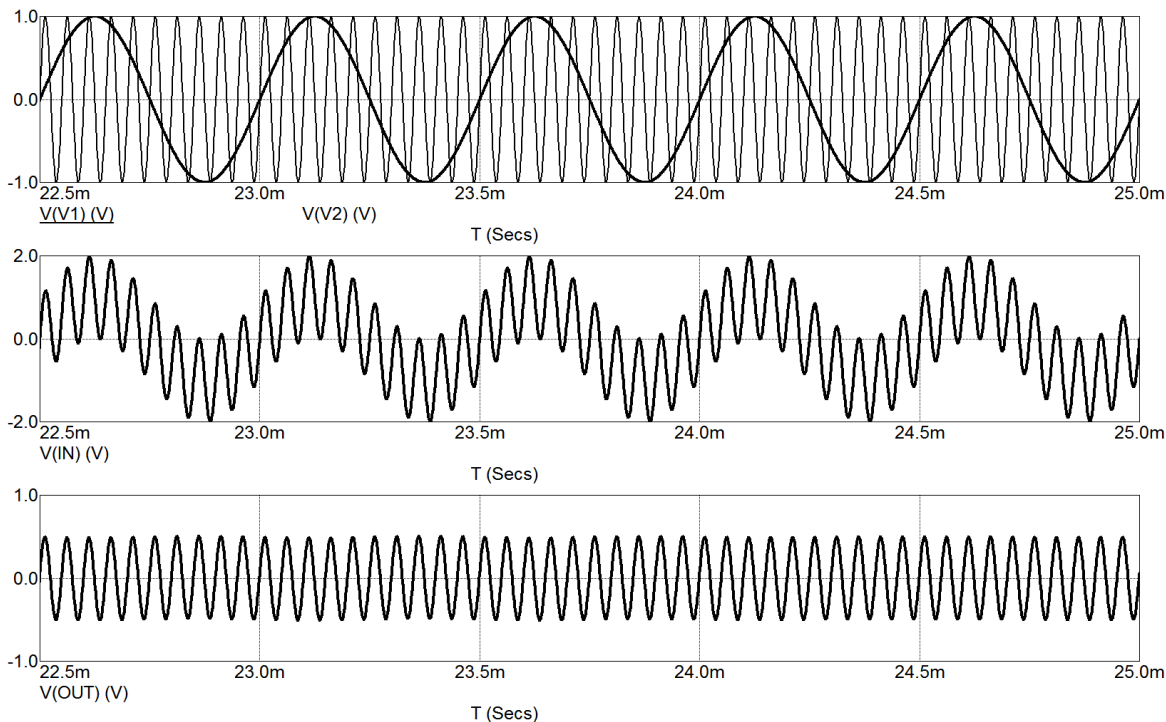
Частота F1 в 10 больше центральной частоты, частота F2 равна центральной частоте (на график вывести 5 периодов)



Центральная частота подавляется, на выходе остается только частота F1, которая в 10 раз больше центральной частоты. Однако амплитуда частоты F1 нестабильна из-за переходного процесса (переходный процесс завершается за 25 мс, а время расчета 2.5 мс). Такой график не позволяет оценить качество работы фильтра.

## Реакция фильтра на входной сигнала сложной формы

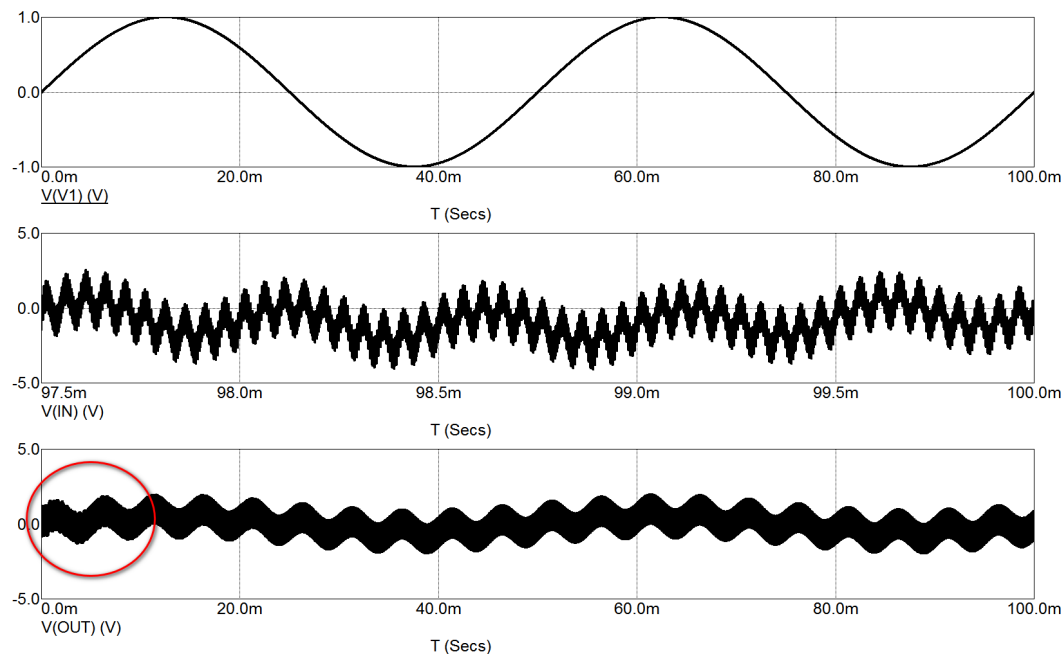
Для устранения влияния переходных процессов необходимо время расчета установить 25 мс, а на график выводить только последние пять периодов (2.5 мс). Для вывода последних пяти периодов необходимо по оси X установить масштаб (TMAX,TMAX-2.5m)



Теперь видно, что центральная частота полностью подавляется, на выходе остается только частота F1, которая в 10 раз больше центральной частоты

## Спектральные диаграммы входного и выходного напряжения

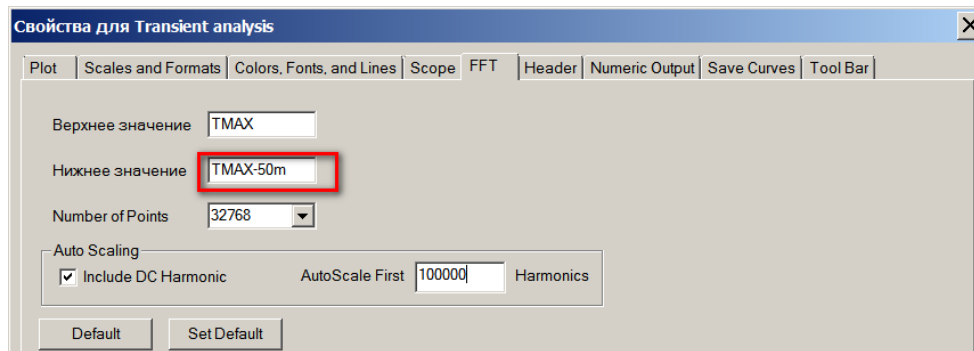
Для построения амплитудно-частотной спектральной диаграммы (зависимости амплитуды гармонических составляющих сигнала от частоты) необходимо сначала получить реакцию фильтра на этот сигнал (сумму пяти синусоидальных составляющих). Время расчета – два периода самой низкочастотной составляющей.



В течение первого периода есть переходный процесс. Для получения правильной спектральной диаграммы необходимо использовать только установившийся режим (второй период).



## Спектральные диаграммы входного и выходного напряжения

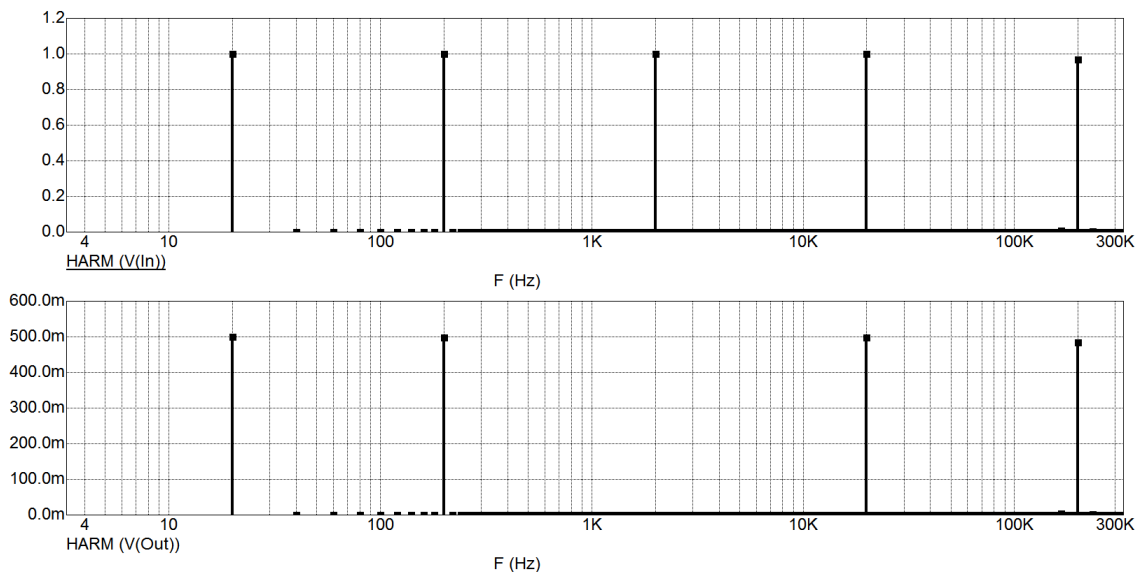
**Важно!** Для получения спектральной диаграммы необходимо анализировать ровно один период сигнала (в рассматриваемом случае – второй период). В нашем случае этот период равен периоду самой низкочастотной составляющей  $T_{F1} = 50\text{мс}$  (частота 20 Гц). Для этого необходимо скорректировать параметры быстрого преобразования Фурье (FFT). Нижнее значение времени расчета должно быть  $T_{MAX} \cdot T_{F1}$ . Для точного построения графиков необходимо также увеличить число расчетных точек до 32768 и число выводимых на график гармоник до 100 000, а также включить вывод постоянной составляющей



## Спектральные диаграммы входного и выходного напряжения

Чтобы иметь возможность вывести такой большой диапазон частот (минимальная частота от максимальной отличается в 10 000 раз), необходимо использовать логарифмический масштаб по оси частот.

	Page	P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range	>
		1	F	HARM (V(In))	AutoAlways	1.2,0,0.2	
		2	F	HARM (V(Out))	AutoAlways	0.6,0,0.1	



Как видно из графика, в спектральной диаграмме выходного напряжения отсутствует гармоника на частоте 2 кГц – фильтр полностью подавил её.



## Синтез фильтра из компонентов ряда E24

При реализации фильтра придется использовать не расчетные значения параметров компонентов (например  $C_1 = 560,7709$  нФ), а номинальные значения, выпускаемые серийно. Набор возможных значений ограничен и сведен в так называемые ряды номинальных значений. Такие ряды есть для емкостей, резисторов и конденсаторов. Наиболее широко распространенные компоненты соответствуют ряду E24 (точность 5%).

**Ряд E24:** 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.

Если расчётах получено сопротивление, например, 103 Ом, то нужно выбрать ближайший стандартный резистор сопротивлением  $R = [\text{число из ряда}] * 10^n$ .

### Примеры

Для резисторов ряда E24: 103 Ом — ближайший это  $1,0 * 10^2 = 100$  Ом, 20,2 Ом — ближайший это  $2,0 * 10^1 = 20$  Ом; 77,3 кОм  $\rightarrow$  75 кОм; 890 кОм  $\rightarrow$  910 кОм; 7 Ом  $\rightarrow$  6,8 Ом.

Соответственно, при реализации фильтра вместо конденсатора  $C_1 = 560,7709$  нФ придется взять конденсатор из ряда:  $C_1 = 560$  нФ. С остальными компонентами — аналогично. Это приводит к изменению параметров фильтра по сравнению с расчетными. Поэтому необходимо синтезировать фильтр компонентами, соответствующими ряду E24, и проверить соответствие получившийся параметров фильтра требованиям ТЗ.

## Синтез фильтра из компонентов ряда E24

Для автоматического синтеза фильтра из компонентов, соответствующих ряду E24, необходимо настроить Micro-Cap. По умолчанию в этой программе заданы не все диапазоны ряда E24. Поэтому необходимо открыть любым текстовым редактором (например, блокнотом Windows) файлы CAP\_E24.cap и ind\_E24.ind в каталоге LIBRARY. В этих файлах необходимо добавить значения множителей:

### Multipliers

1

1E-1

1E-2

1E-3

1E-4

1E-5

1E-6

1E-7

1E-8

1E-9

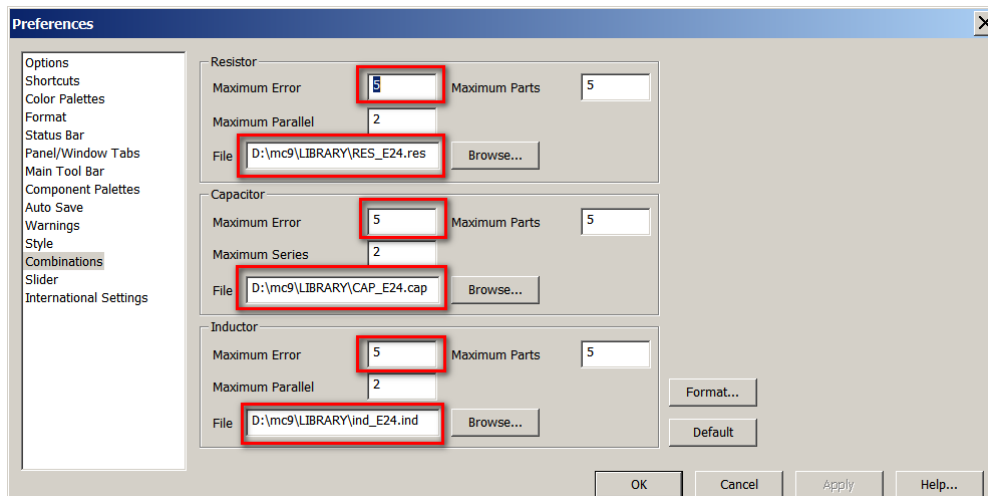
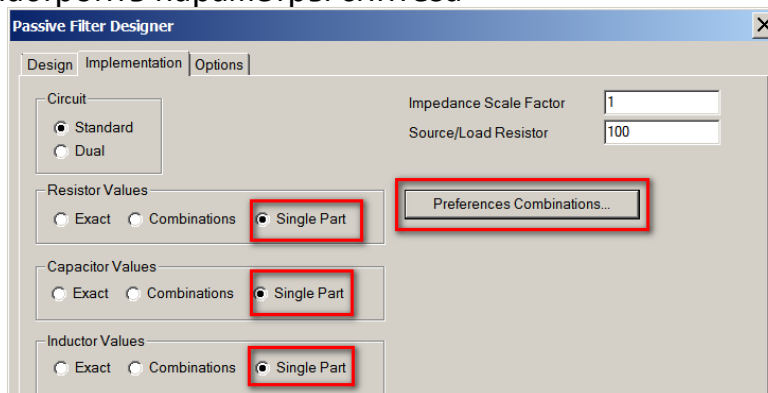
1E-10

1E-11

1E-12

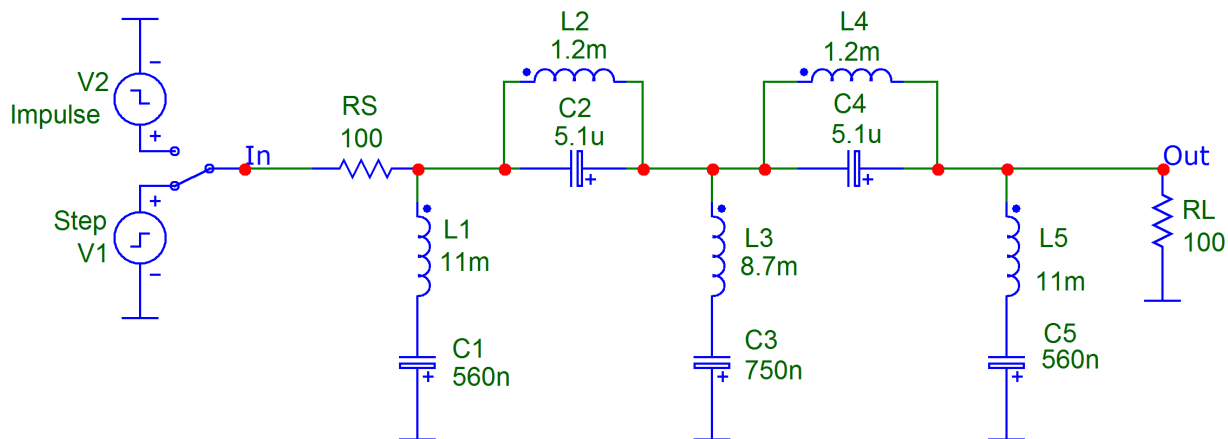
## Синтез фильтра из компонентов ряда E24

Затем необходимо настроить параметры синтеза



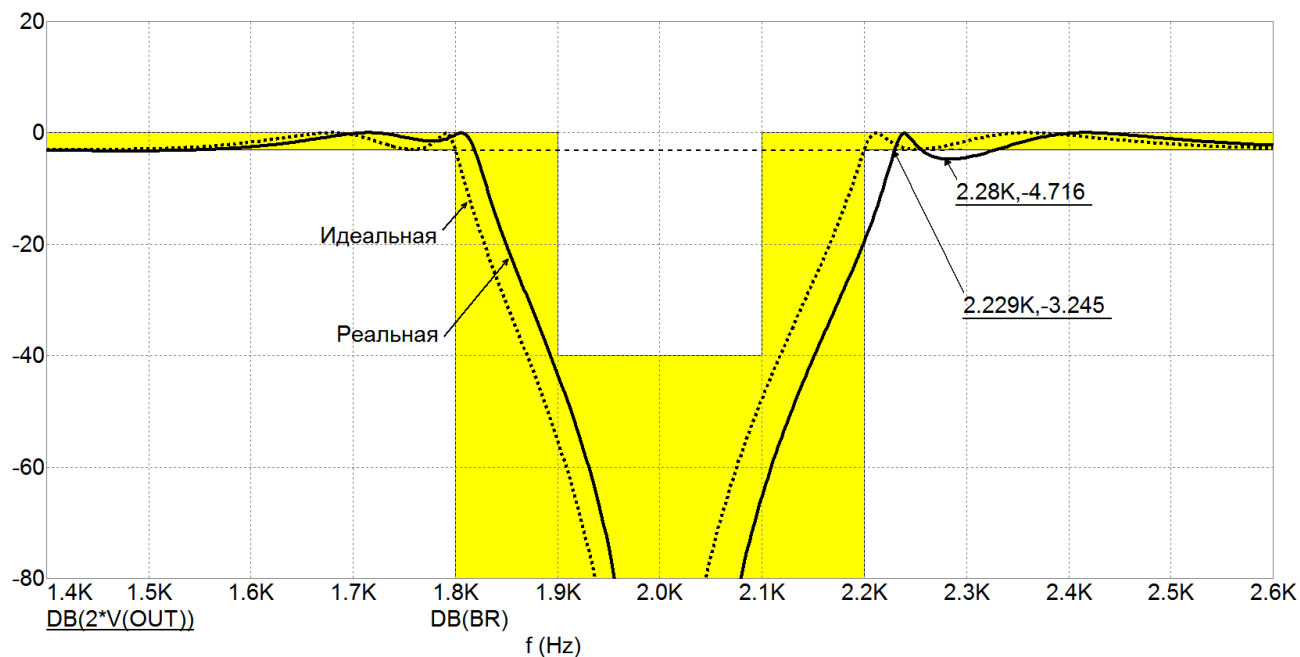
## Синтез фильтра из компонентов ряда E24

С приведенными выше установками автоматически синтезируется фильтр, с параметрами компонентов, округлённых в соответствии с рядом E24



## АЧХ фильтра из компонентов ряда E24

Построенную автоматически АЧХ фильтра необходимо доработать (также, как для фильтра на идеальных компонентах):



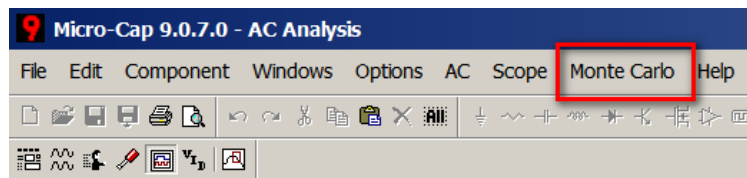
Центральная частота сместилась в область высоких частот, два параметра фильтра вышли за пределы ТЗ:

- верхняя граница полосы пропускания стала 2,229кГц вместо 2 кГц;
- неравномерность в полосе пропускания стала 4,716 дБ вместо 3 дБ

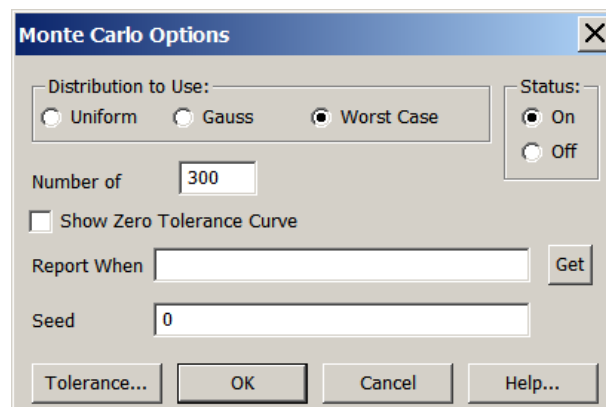
## Анализ Монте-Карло для фильтра из компонентов ряда E24

Анализ Монте-Карло показывает, как будут меняться параметры фильтра при изменении параметров компонентов. Анализ на наихудший случай – это когда компоненты принимают крайние из возможных допустимых значений. Например, для резистора сопротивлением 1кОм и точностью 5% (ряд E24) это будут значения 950 Ом и 1.05 кОм. В ходе анализа проводится серия расчетов с перебором возможных вариантов параметров компонентов. При достаточно большом числе расчетов можно увидеть диапазон возможных изменений параметров фильтра.

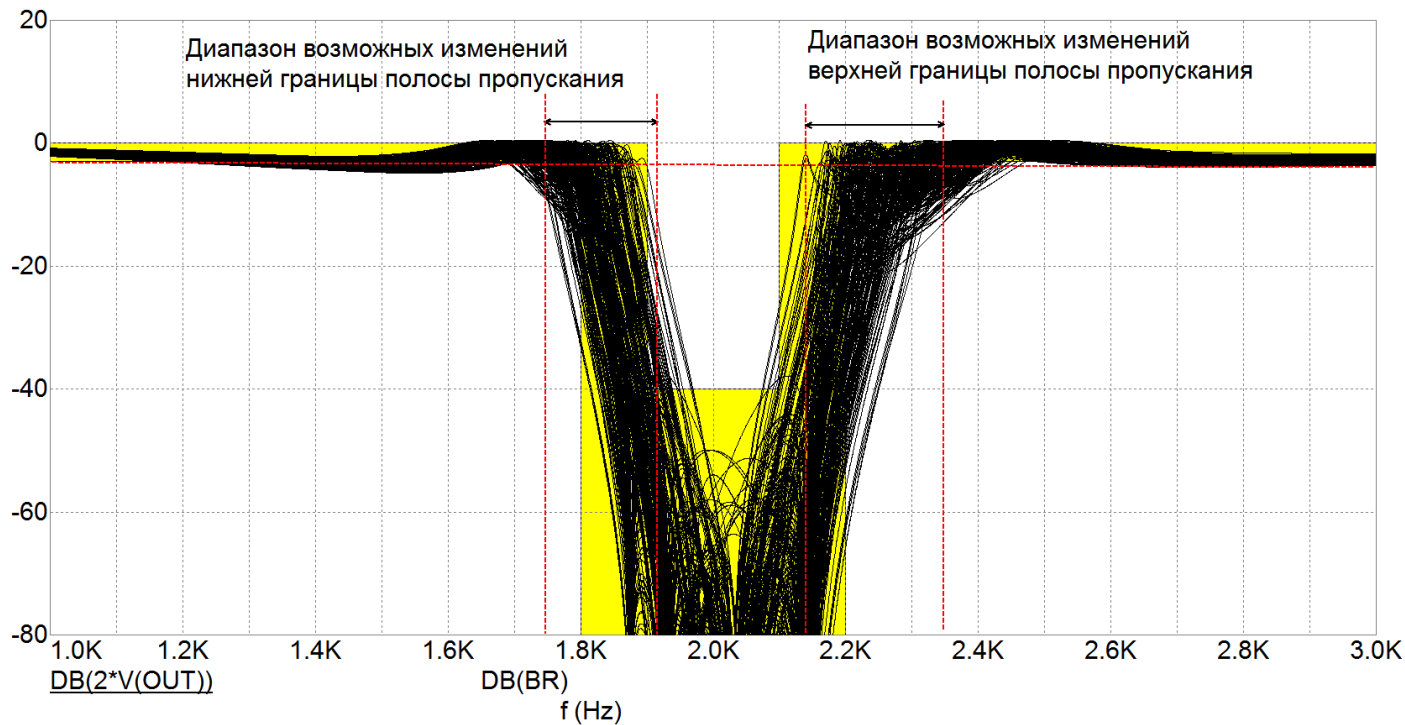
Для получения АЧХ фильтра с изменяющимися параметрами нужно из анализа АС запустить Монте-Карло.



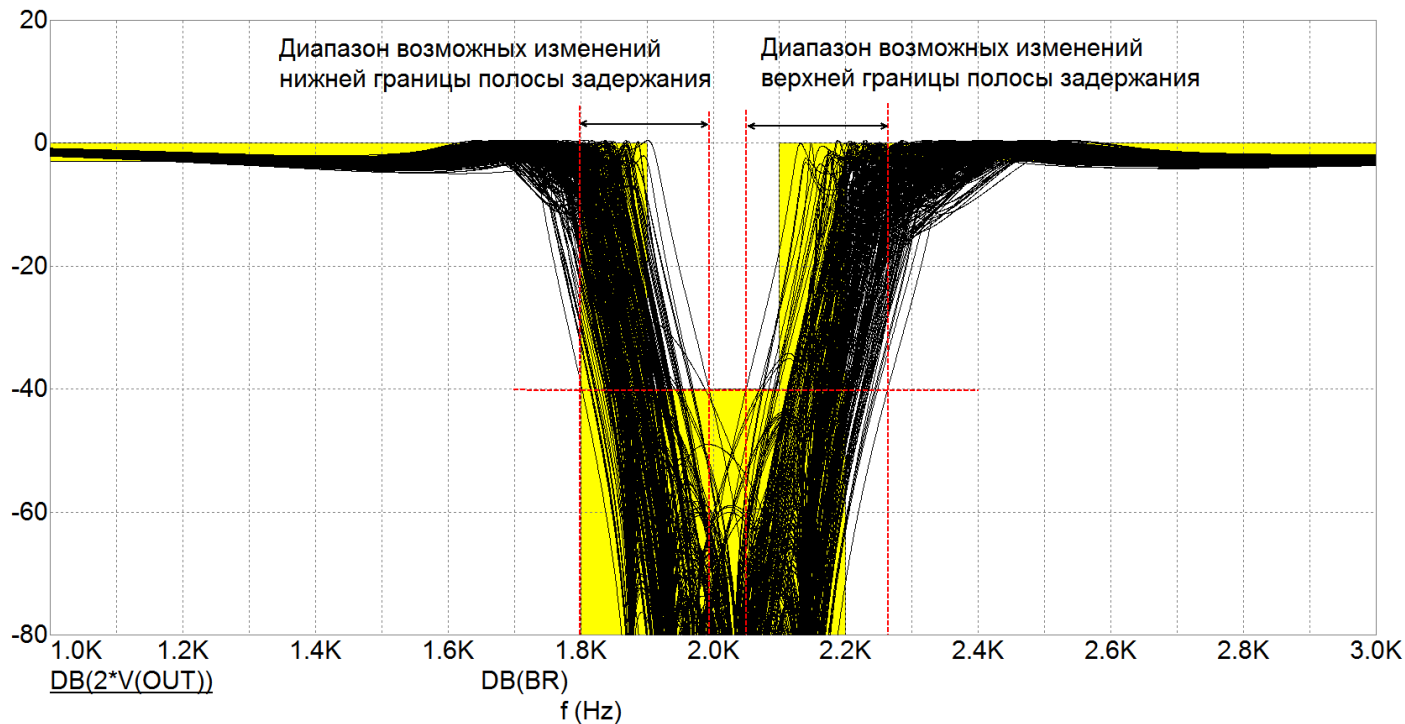
При выполнении анализа число вариантов задать 300.



## Анализ Монте-Карло для фильтра из компонентов ряда E24



## Анализ Монте-Карло для фильтра из компонентов ряда E24



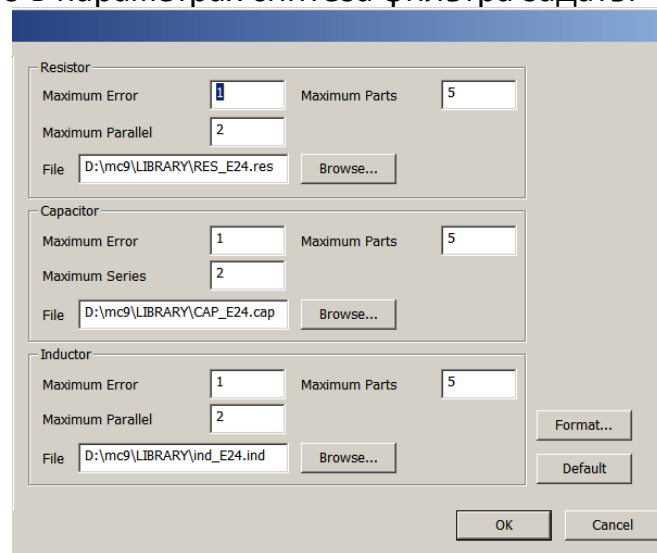
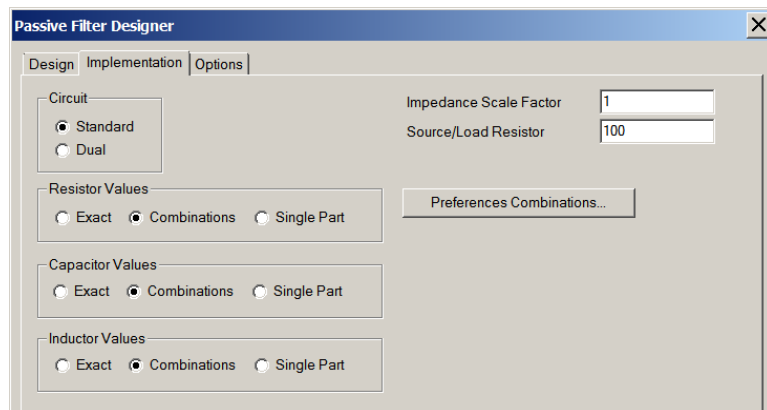
Результаты анализа показывают, что разброс параметров в первую очередь влияет на центральную частоту и границы полос пропускания и задержания фильтра. На центральной частоте коэффициент подавления всегда превышает 40 дБ. Неравномерность частотной характеристики в полосе пропускания заметно возрастает.



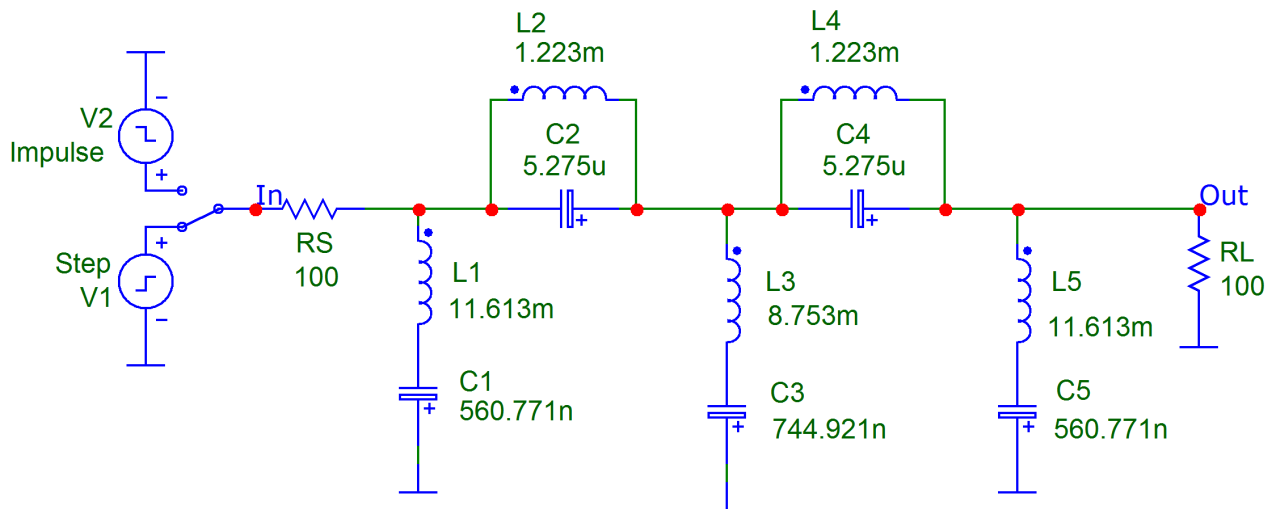
## Синтез фильтра из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов

При синтезе фильтра возможно повысить точность, используя параллельно-последовательное соединение. Так, например, резистор 1.4 кОм, которого нет в ряду E24 можно получить последовательным соединением резисторов 1.3 кОм и 100 Ом, которые есть в ряду E24. Micro-Cap позволяет это делать автоматически.

Для подбора последовательно-параллельных соединений компонентов с конечной точностью 1% из компонентов ряда E24 необходимо в параметрах синтеза фильтра задать:



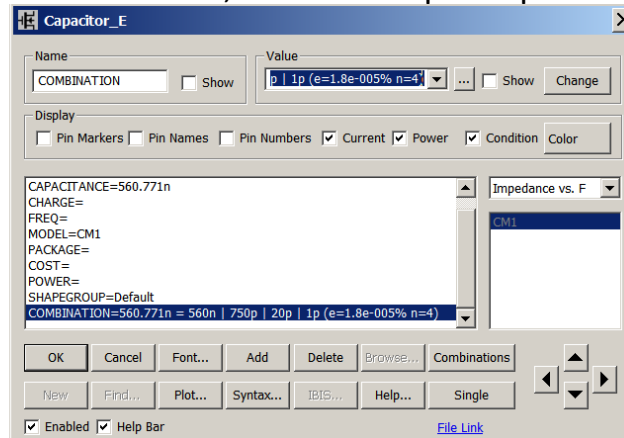
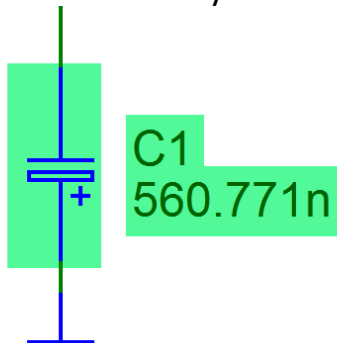
## Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов



Как видно из схемы, параметры компонентов приобрели более точные значения. Однако по умолчанию, параллельно-последовательное соединение компонентов для получения точных значений на схеме не отображаются.

## Параллельно-последовательное соединение компонентов

Посмотреть, как именно получено точное значение, можно в параметрах компонента



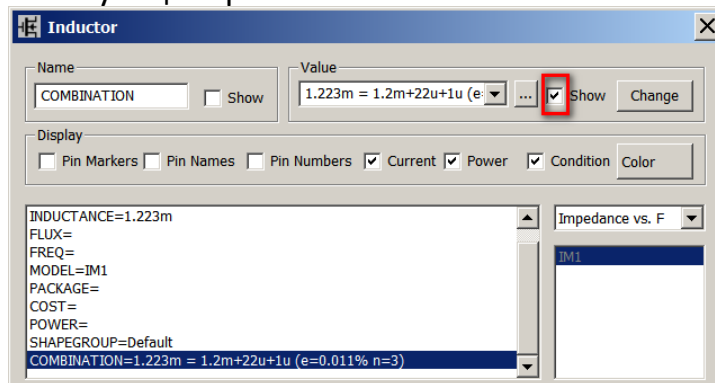
Запись  $560.771n = 560n \mid 750p \mid 20p \mid 1p$  означает, что точное значение получено параллельным включением четырех конденсаторов: 560 нФ, 750 пФ, 20 пФ и 1 пФ.

Для обозначения последовательного соединения используется «+»:

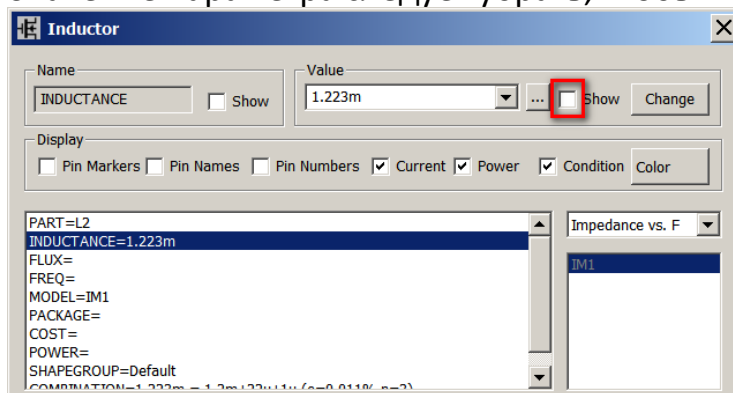
$$1.223m = 1.2m + 22u + 1u$$

## Вывод способа соединения компонентов на схему

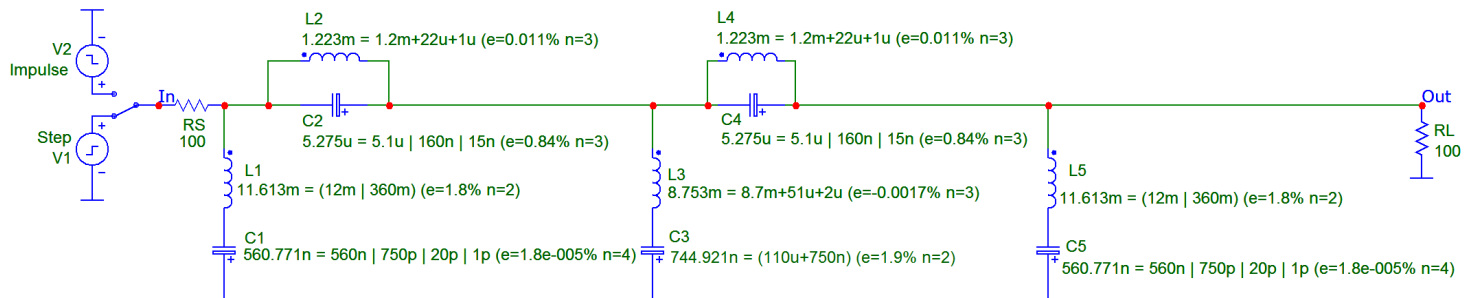
Способ соединения компонентов для получения точного значения можно вывести на схему, установив соответствующий флажок:



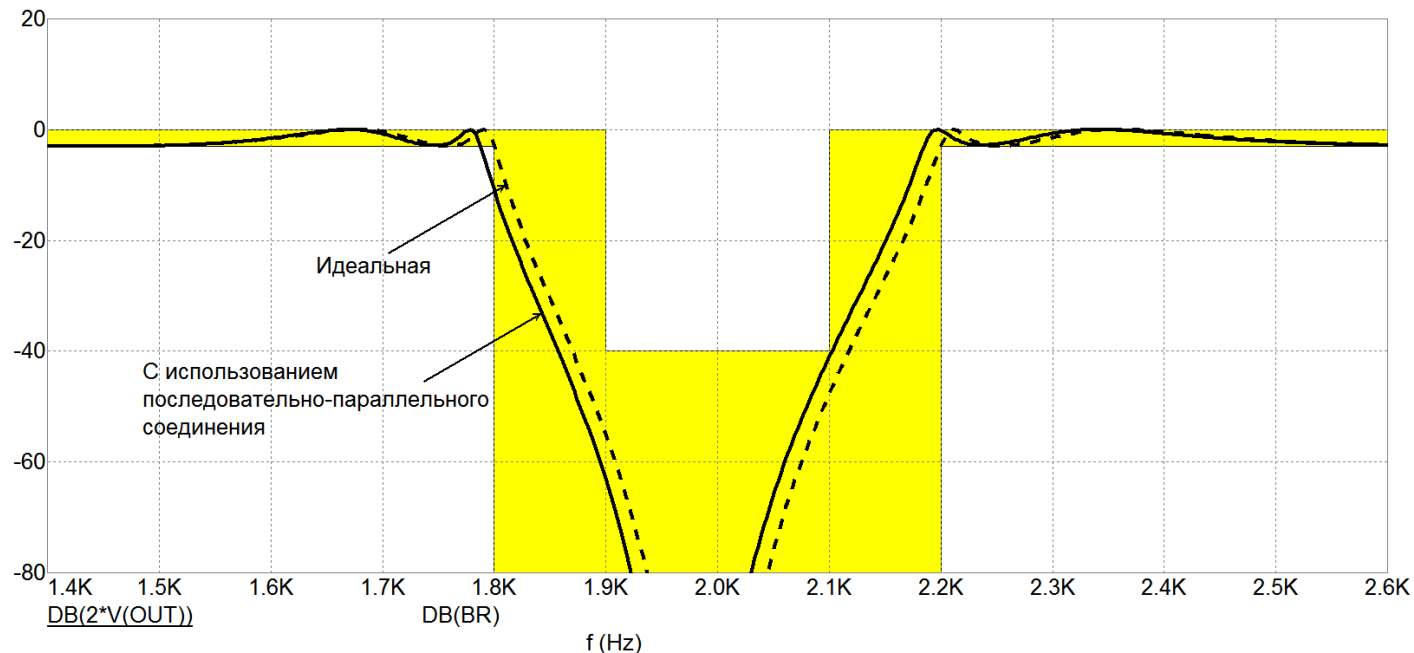
При этом собственно значение параметра следует убрать, чтобы не было дублирования:



## Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов

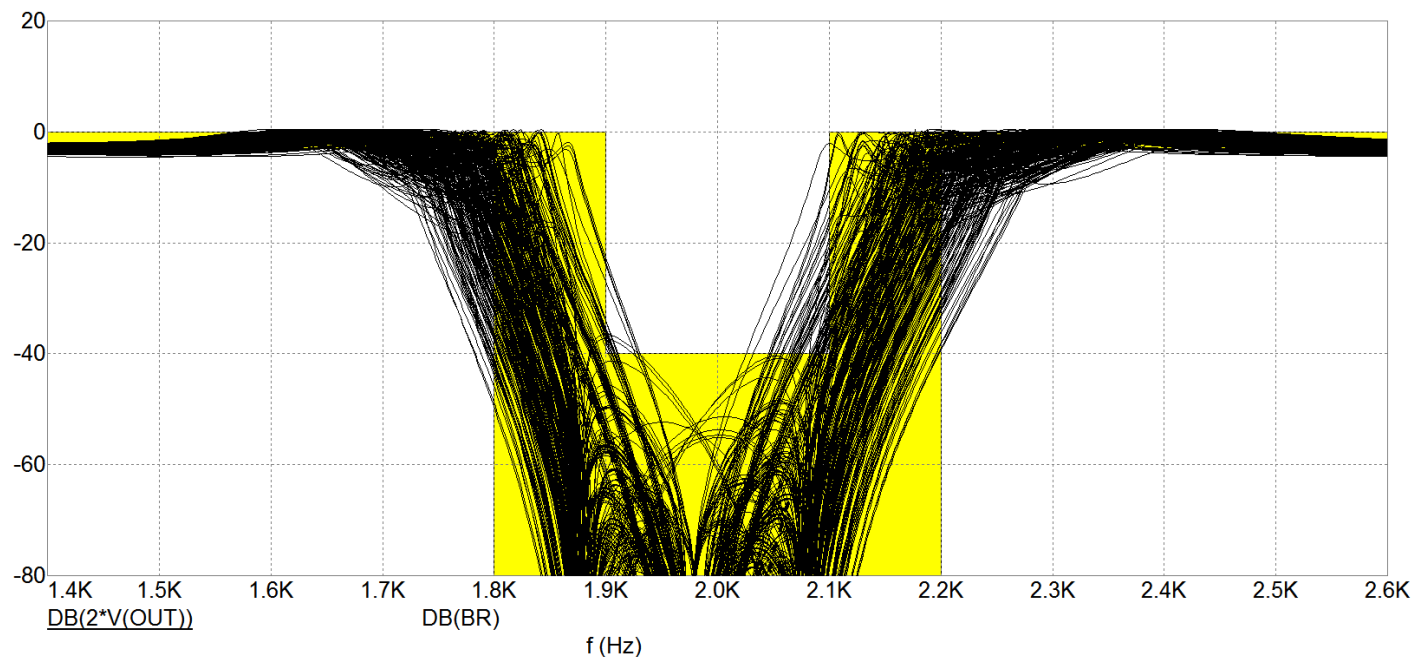


## АЧХ фильтра из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов



АЧХ фильтра смещена в область низких частот, но это смещение много меньше, чем у фильтра на компонентах ряда E24 без последовательно-параллельного соединения. Неравномерность в полосе пропускания и подавление в полосе подавления соответствует требованиям ТЗ.

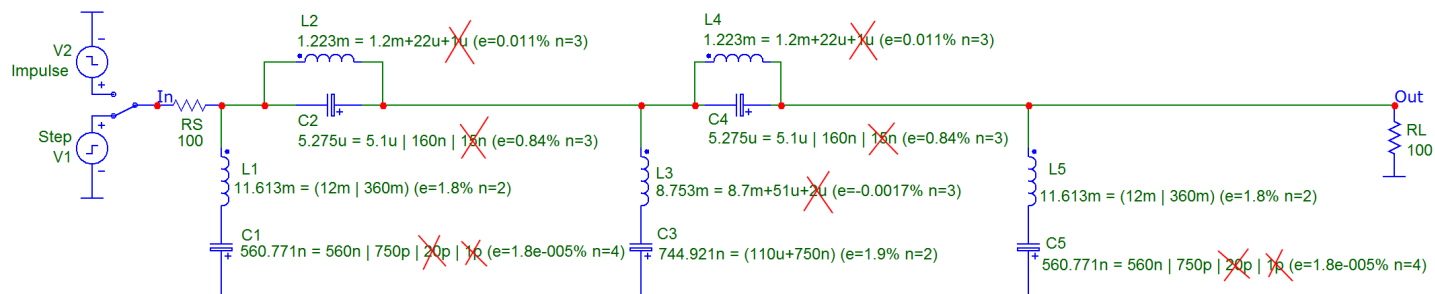
## Анализ Монте-Карло



Анализ показывает, что при наличии последовательно-параллельного соединения при разбросе параметров АЧХ фильтра ближе к требованиям ТЗ, нежели без последовательно-параллельного соединения. Именно такой вариант предпочтителен для практической реализации фильтра на компонентах с номиналами из ряда E24.

## Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов

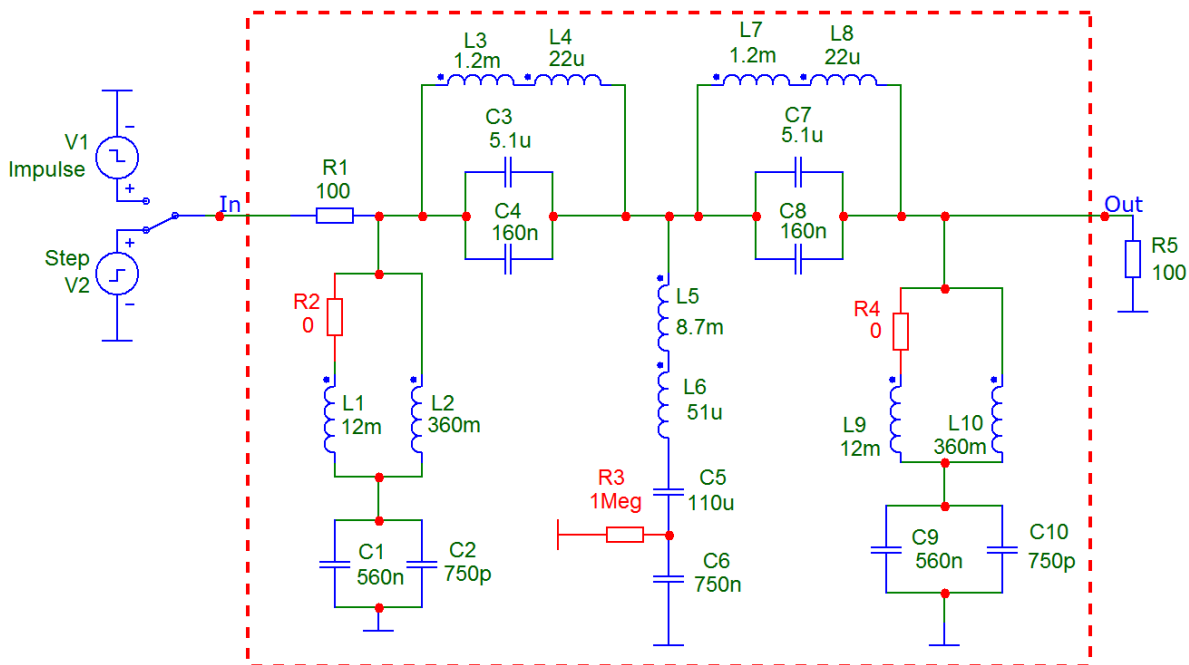
Автоматически сформированный фильтр с последовательно-параллельным соединением имеет избыточность по числу используемых компонентов. Для практических целей достаточно оставить в каждом соединении по два компонента. Остальные можно удалить.



После этого можно построить схему для последующего практического использования, используя вместо символической записи реальные последовательные и параллельные соединения компонентов.

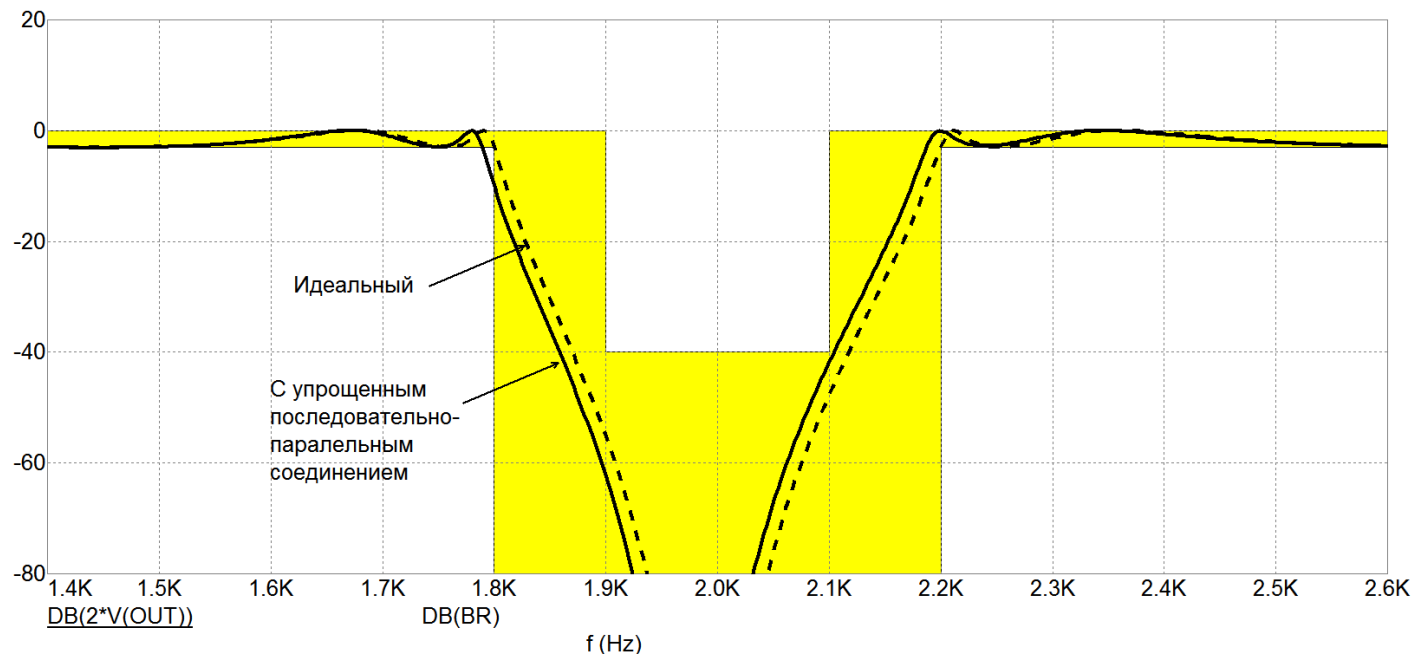


## Фильтр из компонентов ряда E24 с параллельно-последовательным соединением компонентов



В схему добавлены резисторы R2, R3 и R4. Они нужны исключительно для моделирования: Micro-Cap не допускает параллельного соединения индуктивностей и последовательного соединения конденсаторов. Приходится подключать дополнительные элементы. В окончательной схеме их быть не должно.

## АЧХ фильтра из компонентов ряда E24 с упрощенным параллельно-последовательным соединением



АЧХ фильтра не изменилась. Именно такую схему можно использовать для практической реализации фильтра.