

# Синтез аналоговых активных и пассивных фильтров в Micro-Cap 8

Иосиф ЗЛАТИН  
zlatin@pochta.ru

Программа Micro-Cap 8 фирмы Spectrum Software очень удобна для первоначального освоения схемотехнического моделирования электронных схем. Наибольшее распространение она может получить при обучении студентов. Но и для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием радиоэлектронной аппаратуры, многие из возможностей этой программы имеют большое практическое значение. В данной статье пойдет речь о функции синтеза схемы фильтров.

Программа Micro-Cap 8 (в дальнейшем — MC8) имеет функцию Filter Design, которая позволяет синтезировать схемы фильтров. По командам меню **Design** синтезируются аналоговые активные и пассивные фильтры. Задание на синтез предусматривает выбор типа фильтра, ввод характерных частот и коэффициента усиления фильтра. В результате синтеза рассчитывается порядок фильтра при аппроксимации его передаточной функции полиномами различного типа и таблица нулей и полюсов отдельных звеньев фильтра. В заключение рассчитываются стандартные реализации схем этих звеньев, которые записываются в отдельные файлы для дальнейшего использования.

Доступны два типа проекта фильтра — проект активного фильтра и проект пассивного фильтра. Оба доступны из меню **Design**. Меню **Design** содержит две команды **Active Filters** и **Passive Filters** для синтеза активных и пассивных аналоговых фильтров. Обе эти команды имеют однотипные диалоговые окна.

Можно синтезировать следующие типы фильтров:

- Low pass — фильтр нижних частот (ФНЧ);
- High pass — фильтр верхних частот (ФВЧ);
- Bandpass — полосовой фильтр (ПФ);
- Notch — режекторный фильтр (РФ);
- Delay — фильтр, обеспечивающий задержку.

Первые четыре типа фильтра характеризуются графиками Бодэ (АЧХ — амплитудно-частотная характеристика, ФЧХ — фазо-частотная характеристика и зависимость группового времени запаздывания от частоты) и могут быть реализованы в виде активных или пассивных фильтров. Фильтры Delay характеризуются временем задержки и могут быть реализованы только в виде активного фильтра.

В зависимости от типа аппроксимирующего полинома передаточной функции доступны следующие типы фильтра:

- Butterworth — фильтры Баттерворта;
- Chebyshev — фильтры Чебышева;

- Bessel — фильтры Бесселя;
- Elliptic — эллиптические фильтры;
- Inverse-Chebyshev — инверсные фильтры Чебышева.

Не все эти аппроксимирующие полиномы доступны для каждого типа фильтра. Аппроксимирующий полином Бесселя, например, доступен только для фильтра Delay.

Схемные реализации для активных фильтров могут быть различны для каждого звена и включают:

- Sallen-Key;
- MFB;
- Tow-Thomas;
- Fleischer-Tow;
- KHN;
- Acker-Mossberg;
- Tow-Thomas 2;
- DABP (Dual Amplifier Band Pass).

## Синтез активных фильтров

Выбор команды **Active Filters** в меню **Design** открывает диалоговое окно, показанное на рис. 1.

Это диалоговое окно имеет три основных вкладки:

Вкладка Design содержит группы:

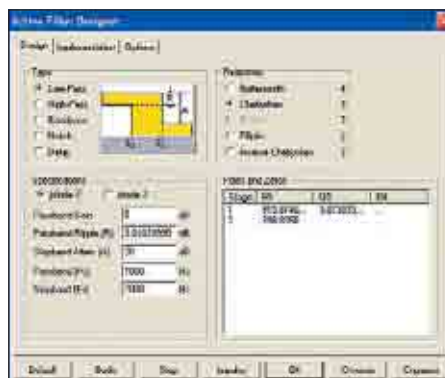


Рис. 1. Диалоговое окно синтеза активных фильтров (вкладка Design)

1. **Type** (тип) — позволяет выбирать один из пяти основных типов фильтров:

- Low pass;
- High pass;
- Bandpass;
- Notch;
- Delay.

2. **Response** (частотная характеристика) — позволяет выбирать математическую аппроксимацию идеального фильтра:

- Butterworth;
- Chebyshev;
- Bessel;
- Elliptic;
- Inverse-Chebyshev.

Различные частотные характеристики обеспечивают различные компромиссные соотношения проекта. Фильтры Баттерворта требуют увеличения числа звеньев для получения заданных технических требований, но имеют постоянную временную задержку в пределах полосы пропускания. Фильтры Чебышева и инверсные фильтры Чебышева требуют меньшего количества звеньев, но имеют более ярко выраженное изменение временной задержки. Эллиптические фильтры требуют наименьшего количества числа звеньев, но имеют самое большое изменение задержки. Фильтры Бесселя являются фильтрами нижних частот с постоянной задержкой и используются в качестве элемента задержки. Число звеньев для реализации текущего проекта показывается в поле **Response** справа от типа аппроксимирующего полинома.

3. **Specifications** (технические требования) — сюда вводят технические требования к фильтру. Есть два способа определить фильтр: Mode 1 (режим 1) и Mode 2 (режим 2). В Mode 1 определяются функциональные характеристики фильтра, подобные Passband Gain, Passband (Fc), Stopband (Fs) и Stopband Atten. (A). Здесь определяется то, что необходимо, и программа вычисляет число звеньев, требуемых для достижения этого, используя указанную

аппроксимацию частотной характеристики. Режим Mode 2 позволяет непосредственно определить основные значения параметров проекта и число звеньев фильтра.

4. Окно **Poles and Zeros** (полюса и нули) — показывает числовые значения полюсов, нулей и Qs полиномиальной частотной характеристики. Здесь, по существу, показывается математический проект фильтра. Когда выполняются изменения в полях **Type**, **Response** или **Specifications**, программа перепроектирует полиномиальные коэффициенты и модифицирует числа в этом окне. Если кнопки **Mode**, **Step** или **Impulse** были нажаты, программа также перерисовывает графики. Какие графики будут показаны, можно выбрать на панели Options.

Графики идеализированы, потому что они основаны на стандартной полиномиальной формуле для выбранной частотной характеристики и вычисленных или отредактированных значениях F0, Q0 и QN. Такие характеристики могут быть достигнуты только с идеальными компонентами. Реальный фильтр, сделанный из реальных компонентов, будет вести себя немного по-другому. В реальности схема может быть создана на основе любого операционного усилителя (идеального или реального) и из резисторов и конденсаторов, которые точно равны расчетным или выбраны из списка стандартных значений. Реальный операционный усилитель и приблизительные значения компонента могут оказывать сильное влияние на графики частотных характеристик.

Обратите внимание, что при редактировании любого параметра в полях **Type**, **Response** или **Specifications** программа повторно вычисляет значения в окне **Poles and Zeros**, изменяя отредактированные значения.

Точная форма аппроксимирующих полиномов для каждого звена фильтра имеет вид: Фильтры нижних частот и задержки (Low Pass и Delay):

- Butterworth  $F(U) = 1/(U^2+U/Q0+1)$ ;
- Chebyshev  $F(U) = 1/(U^2+U \times W0/Q0+W0^2)$ ;
- Elliptic  $F(U) = (U^2+WN^2)/(U^2+U \times W0/Q0+W0^2)$ ;
- Inv. Chebyshev  $F(U) = (U^2+WNI^2)/(U^2+U \times W0I/Q0+W0I^2)$ .

Фильтр верхних частот (High Pass):

- Butterworth  $F(U) = U^2/(U^2+U/Q0+1)$ ;
- Chebyshev  $F(U) = U^2/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Elliptic  $F(U) = (U^2+WN^2)/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Inv. Chebyshev  $F(U) = (U^2+WNI^2)/(U^2+U/(W0I \times Q0)+1/W0I^2)$ .

Полосовой фильтр (Bandpass):

- Butterworth  $F(U) = U/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Chebyshev  $F(U) = U/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Elliptic  $F(U) = (U^2+WN^2)/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Inv. Chebyshev  $F(U) = (U^2+WNI^2)/(U^2+U/(W0I \times Q0)+1/W0I^2)$ .

Режекторный фильтр (Notch):

- Butterworth  $F(U) = (U^2+1)/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Chebyshev  $F(U) = (U^2+1)/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Elliptic  $F(U) = (U^2+WN^2)/(U^2+U/(W0 \times Q0)+1/W0^2)$ ;
- Inv. Chebyshev  $F(U) = (U^2+WNI^2)/(U^2+U/(W0I \times Q0)+1/W0I^2)$ .

Здесь: F — переменная частота; S =  $J \times 2 \times \pi \times F$  — комплексная частота; U =  $S/(2 \times \pi \times FC)$  =  $J \times F/FC$  — нормализованная комплексная частота; F0 — местоположение полюса в Гц; Q0 — значение добротности; FN — местоположение нуля в Гц (только для эллиптических и фильтров Чебышева); FC — частота Stopband для фильтров нижних частот, частота Passband для фильтров верхних частот или средняя (центральная) частота для полосового и режекторного фильтров (указанная средняя частота может быть изменена немного для создания симметричной полосы пропускания/режекции, например, полосового фильтра Баттерворта, используя заданную по умолчанию среднюю частоту 1000 и полосу пропускания 100, в действительности будет спроектирован со средней частотой 998,75 Гц); FCI — частота Passband для фильтров нижних частот, частота Stopband для фильтров верхних частот; для полосового и режекторного фильтров  $FCI = FC$ ;  $W0 = F0/FC$  — нормализованная частота полюса;  $W0I = F0/FCI$  — нормализованная частота полюса для фильтра Inverse Chebyshev;  $WN = FN/FC$  — нормализованная частота нуля;  $WNI = FN/FCI$  — нормализованная частота нуля для фильтра Inverse Chebyshev.

Вкладка Implementation (реализация) позволяет решать, как осуществить проект фильтра (рис. 2). Она имеет несколько полей и окон. 1. Окно **Stage Values** (параметры звена) обозначается в соответствии с выбранным типом фильтра (в примере на рис. 2 это окно обозначено Notch — режекторный) и позволяет определять тип схемы для использования в каждом звене. Это окно также позволяет редактировать полюса, Q и нули звеньев. Вы можете менять установки полюса и добротности для других звеньев, щелкая по заголовкам столбцов F0 и Q0 правой



Рис. 2. Диалоговое окно синтеза активных фильтров (вкладка Implementation)

кнопкой мыши. С помощью команд всплывающего меню Copy и Past можно скопировать установки F0 и Q из одной строки и вставить их в другую строку. Нули фиксированы и не могут быть изменены.

Для изменения параметров звена щелкните левой кнопкой мыши в столбце Circuit в нужной строке, открыв список доступных реализаций схемы для выбранного типа фильтра и типа аппроксимации частотной характеристики (рис. 2). Этот список будет иметь максимум восемь типов схем, но может иметь и меньше, например три типа, так как не все типы схем могут реализовать необходимую функцию аппроксимации.

Когда схема фильтра создана, звенья добавляются и нумеруются от первого слева до N-го справа. Вход фильтра — всегда слева, а выход, или последнее звено — всегда справа.

• **Same Circuit for Each Stage** — установка галочки в это окошко вынуждает все звенья использовать одну и ту же схему. Когда галочка отсутствует, вы можете задавать различные схемы для каждого звена.

• **Impedance Scale Factor** позволяет задать коэффициент масштабирования, применяющийся ко всем значениям пассивных компонентов. На этот коэффициент умножаются величины всех резисторов и делятся величины всех конденсаторов. При этом не изменяется форма графика частотной характеристики, но смещаются величины компонентов к более подходящим для реализации значениям.

• **Opamp Model to Use** позволяет выбрать модель операционного усилителя. По умолчанию модель устанавливается в \$IDEAL. Эта модель представляет источник тока, управляемый напряжением, с маленьким выходным сопротивлением. Модель имеет очень большое усиление, бесконечную полосу пропускания и не имеет утечки. Предназначена для того, чтобы продемонстрировать, как фильтр будет вести себя с почти идеальным устройством. Можно выбрать различные модели операционных усилителей из списка. Этот список содержит сотни популярных моделей операционных усилителей.

• **Odd Low Pass Stage** позволяет выбирать последнее звено для использования в фильтрах ФНЧ. Есть несколько различных видов: — LODD1 — простой фильтр RC; — LODD2 — фильтр RC с неинвертирующим усилителем с единичным усилением; — LODD3 — фильтр RC с инвертируемым усилителем с единичным усилением.

• **Odd High Pass Stage** позволяет выбирать последнее звено для использования в фильтрах ФВЧ. Есть три варианта: — HODD1 — простой фильтр RC; — HODD2 — фильтр RC с неинвертирующим усилителем с единичным усилением; — HODD3 — фильтр RC с инвертирующим усилителем с единичным усилением.

- **Gain Adjust Stage** позволяет выбрать звено, когда требуется установка усиления. Есть два варианта:
    - NULL — не добавляет никакого звена (технические требования к усилению будут игнорироваться);
    - GADJ — простой инвертирующий усилитель.
2. **Resistor Values** определяет, какие значения резисторов выбрать. В течение фазы реализации, когда схема создается, MCS вычисляет точные значения резисторов. Поскольку точные значения с большим числом разрядов неудобны, можно использовать наиболее близкие пригодные значения, выбранные из списков стандартных компонентов. Есть несколько списков стандартных компонентов, и к ним можно добавить любые другие списки. Списки сохраняются в текстовых файлах ASCII с расширением CAP — для конденсаторов, IND — для катушек индуктивности (для пассивных фильтров), и RES — для резисторов. Кнопка Browse позволяет выбирать файл, содержащий значения резисторов, когда галочка в окошке Exact отсутствует.
3. **Capacitor Values** определяет, какие значения конденсаторов выбрать. Она работает аналогично опции **Resistor Values**.

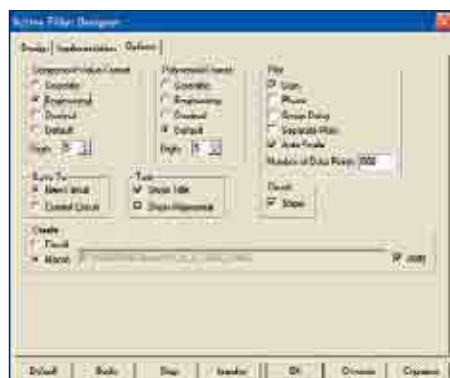


Рис. 3. Диалоговое окно синтеза активных фильтров (вкладка Options)

Вкладка Options (рис. 3) позволяет выбрать формат представления численных значений номиналов компонентов и параметров передаточных функций и имеет несколько групп:

1. **Component Value Format** позволяет выбрать, должны ли значения компонента быть определены в научной, инженерной, или заданной по умолчанию системе обозначений. Можно также установить число разрядов, для использования при определении значения. Для некоторых фильтров высокого порядка, увеличение числа разрядов (значения по умолчанию 5) может быть необходимо для получения правильных графиков Боде.
2. **Polynomial Format** позволяет выбрать должны ли значения полиномиального коэффициента быть определены в научной, инженерной или заданной по умолчанию системе обозначений. Полиномиальные значения

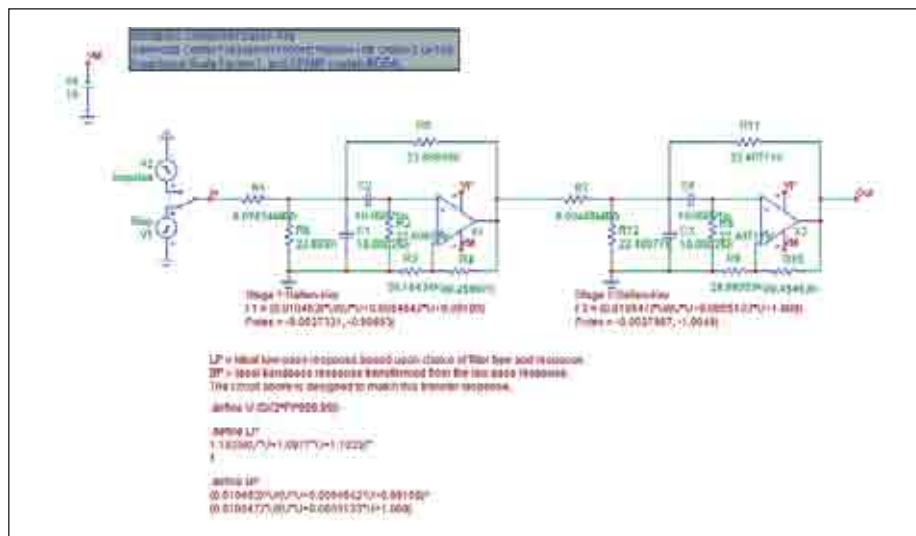


Рис. 4. Результат синтеза принципиальной схемы активного фильтра

используются, для определения типа функции преобразования LP, HP, BP и BR.

3. **Plot** позволяет выбрать, что показать в графиках Боде:
  - **Gain** — АЧХ;
  - **Phase** — ФЧХ;
  - **Group delay** — зависимость групповой задержки от частоты;
  - **Separate plots** — каждый из выше выбранных графиков на отдельных координатных осях;
  - **Auto Scale** — автоматическое масштабирование графиков;
  - **Number of Data Points** — в этом поле устанавливается число точек данных, которые должны быть рассчитаны для графика. Значения 500, установленного по умолчанию, обычно достаточно, но для фильтров очень высокого порядка, возможно, будет необходимо увеличить число точек, чтобы сохранить точность около крутых сторон частотной характеристики.

4. **Save To** позволяет выбирать один из двух вариантов создания схемы реализации фильтра:
  - **New Circuit** — в новой схеме;
  - **Current Circuit** — в текущей схеме.
5. **Text** позволяет решать, включать ли несколько дополнительных кусков текста:
  - **Show Title** — блок самодокументирования текста, оформляемый как заголовок (идентифицирует основные технические требования к фильтру);
  - **Show Polynomials** — полиномиальные функции. Полиномиальная функция — символьная переменная и может быть пред-

Таблица 1. Имена полиномов

Тип	Символьное имя полинома
Low Pass	LP
High Pass	HP
Bandpass	BP
Notch	BR
Delay	LP

ставлена в виде зависимости от частоты как стандарт, с которым сравниваются реальные выходные данные схемы. Имена полиномов приведены в таблице 1.

6. **Circuit**:
  - **Show** показывает схему фильтра на заднем плане, реагируя на пользовательские изменения технических требований.
7. **Create** — позволяет выбирать тип реализации фильтра:
  - **Circuit** — в виде принципиальной схемы (рис. 4);
  - **Macro** — в виде макромодели (рис. 5).

Макрокомпонент вводится в отдельный файл библиотеки компонентов по имени FILTERS.CMP и доступен для использования другими схемами.

- В нижней части диалогового окна имеется несколько кнопок:
- **Default** восстанавливает по умолчанию значения во всех полях данных и опций.
  - **Bode** показывает выбранные в панели Options графики Боде. Диалоговое окно с графиками Боде показано на рис. 6.
  - **Step** показывает переходную характеристику фильтра при изменении входного напряжения от 0 до 1 В. График переходной характеристики показан на рис. 7.

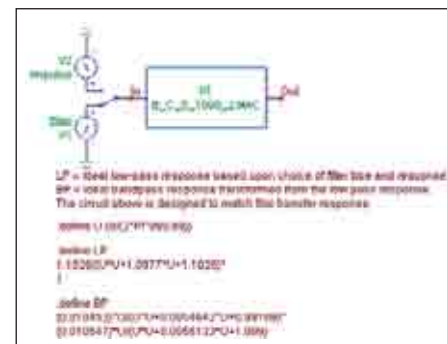


Рис. 5. Результат синтеза активного фильтра в виде макромодели

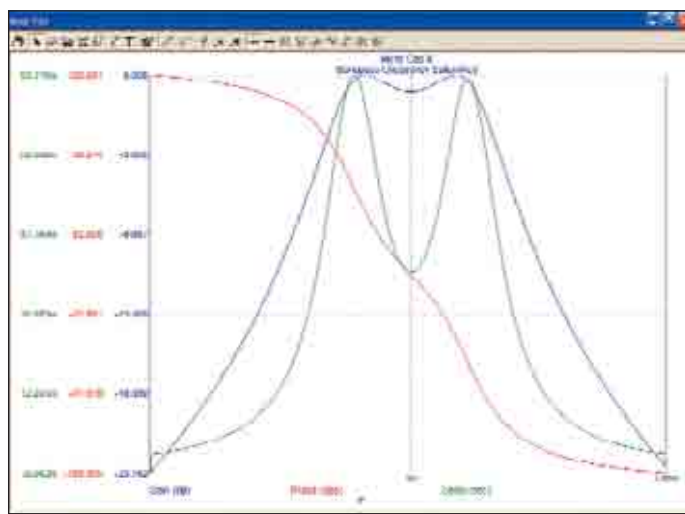


Рис. 6. Графики Бодэ

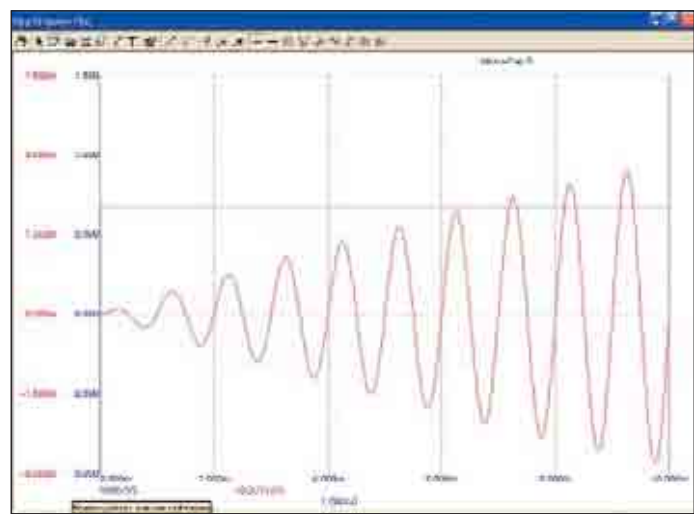


Рис. 7. Переходная характеристика фильтра

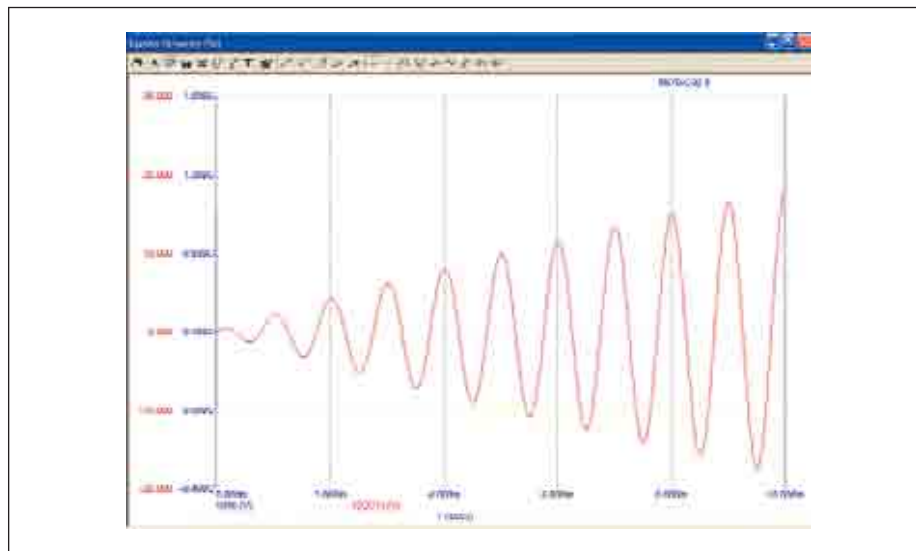


Рис. 8. Импульсная функция

- **Impulse** показывает импульсную характеристику фильтра. Импульс — от 0 до 1E9 В длительностью 1E-9 с. График импульсной характеристики показан на рис. 8.
- **OK** — формирует схему для выполнения выбранного проекта, используя указанные схемы для каждого звена. После создания схемы фильтра диалоговое окно закрывается.
- **Cancel** — закрывает диалоговое окно, не сохраняя изменения.
- **Help** — обращается к системе встроенной помощи.

Программа синтеза фильтров использует файл FILTER.BIN, который находится в том же самом каталоге, что и программный файл MC8.EXE. Его нельзя удалять, поскольку он содержит универсальные звенья схемы для каждой реализации схемы, используемые для построения полной схемы фильтра. Без этого файла программа способна выполнить только математическую часть проекта фильтра. То есть без FILTER.BIN программа не будет способна создать реальные схемы фильтра.

MC8 также сохраняет последние использованные установки в файле ACTIVE.FLT. Кнопка Default в нижней части диалогового окна позволяет восстановить значения по умолчанию для всех установок.

Программа синтеза активного фильтра использует два режима для определения технических требований к фильтру — Mode 1 и Mode 2.

В режиме Mode 1: Технические требования к фильтру Low Pass (ФНЧ) определяются в соответствии с рис. 9.

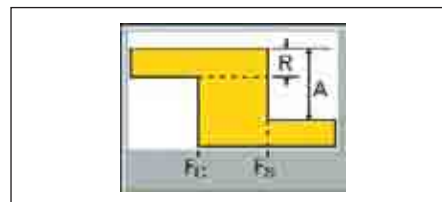


Рис. 9. Технические требования к ФНЧ

- **Passband Gain** — усиление на нижней частоте в дБ.
- **Passband Ripple (R)** — изменение усиления (в дБ) в полосе пропускания.
- **Stopband Attenuation (A)** — максимальное усиление в полосе пропускания минус максимальный коэффициент усиления в полосе задерживания, дБ; A — положительное число.
- **Passband Frequency (Fc)** — частота, ниже которой усиление равно **Passband Gain ± Passband Ripple**.
- **Stopband Frequency (Fs)** — частота, выше которой усиление меньше или равно **Passband Gain ± Passband Ripple**.

Для эллиптических и фильтров Чебышева **Passband Gain** изменяется с порядком фильтра в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2. Изменение Passband Gain в зависимости от порядка фильтра для эллиптических и фильтров Чебышева

Порядок	Усиление на постоянном токе	Усиление на границе полосы пропускания
Even (четный)	Passband Gain	Passband Gain + Ripple
Odd (нечетный)	Passband Gain	Passband Gain - Ripple

Для фильтров Баттерворта и инверсных Чебышева **Passband Gain** изменяется в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3. Изменение Passband Gain для фильтров Баттерворта и инверсных Чебышева

Тип	Усиление на постоянном токе	Усиление на границе полосы пропускания
Butterworth	Passband Gain	Passband Gain - Ripple
Inverse-Chebyshev	Passband Gain	< Passband Gain - Ripple

Инверсные фильтры Чебышева выполняют технические требования к полосе пропускания с запасом и технические требования к полосе задерживания точно, без запаса. Идеальная реализация других фильтров выполняется про-



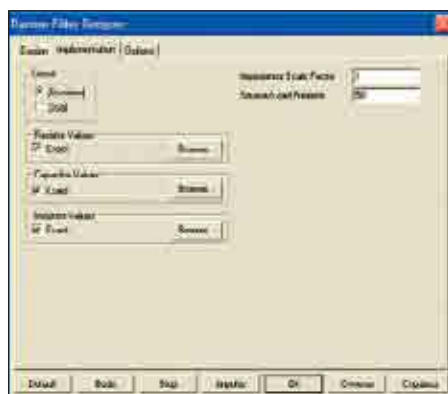


Рис. 14. Диалоговое окно синтеза пассивных фильтров (вкладка Implementation)

ды **Active Filters**, оно позволяет выбирать тип фильтра, технические требования, частотную характеристику и вариант реализации схемы. Затем с его помощью создается требуемая схема фильтра.

Это диалоговое окно имеет три вкладки:

Вкладка **Design** содержит группы:

1. **Type** (тип) позволяет выбирать один из четырех основных типов фильтров:
  - Low pass;
  - High pass;
  - Bandpass;
  - Notch.
2. **Response** (частотная характеристика) позволяет выбирать математическую аппроксимацию идеального фильтра:
  - Butterworth;
  - Chebyshev.

Specification и Poles and Zeros аналогичны соответствующим полю и окну диалогового окна синтеза активных фильтров.

Вкладка **Implementation** (реализация) позволяет решать, как осуществить проект пассивного фильтра (рис. 14). Она имеет несколько групп и полей:

1. **Circuit** — здесь выбирается тип реализации пассивного LC-фильтра (**Standart** или **Dual**).
2. **Resistor Values** позволяет выбрать между использованием точных значений резис-

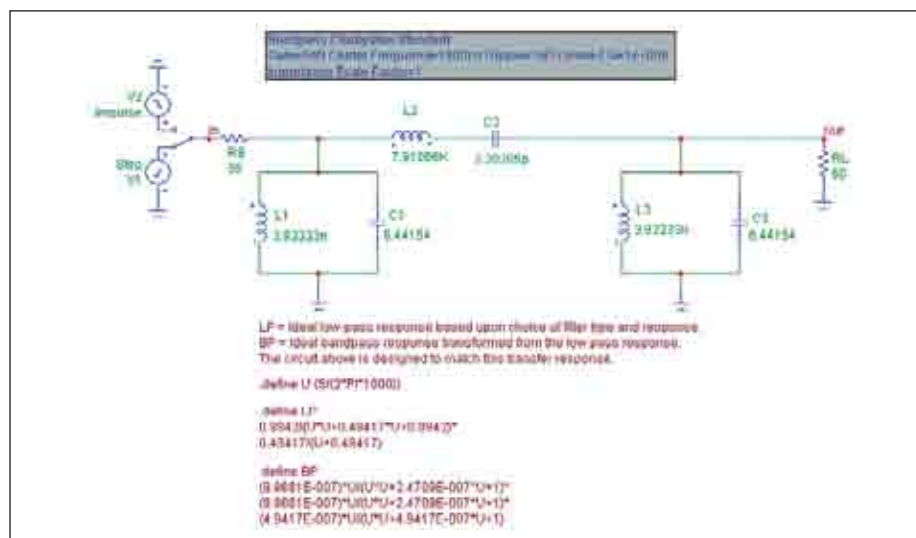


Рис. 15. Результаты синтеза пассивного фильтра в виде принципиальной схемы

торов или фиксированных значений из определенного файла. Эти значения используются только для сопротивлений нагрузки и источника.

3. **Capacitor Values** позволяет выбрать между использованием точных значений конденсаторов или фиксированных значений из определенного файла.
4. **Inductor Values** позволяет выбрать между использованием точных значений индуктивности или фиксированных значений из определенного файла.
5. **Impedance Scale Factor** позволяет определить коэффициент масштабирования для применения ко всем значениям пассивных компонентов. Величины резисторов и индуктивностей умножаются на этот коэффициент, а величины конденсаторов делятся на этот коэффициент. Это не изменяет форму частотной характеристики, но используется для того, чтобы сместить значения компонентов к более подходящим для реализации значениям.
6. **Source/Load Resistor** позволяет определить значение сопротивления источника и нагрузки. Если в группе **Resistor Values** в окош-

ке **Exact** установлена галочка, то это значение после умножения на коэффициент масштабирования будет использоваться для сопротивления источника и нагрузки в конечной схеме. Если в окошке **Exact** галочка отсутствует, то будет использоваться сопротивление источника и нагрузки с величиной из файла (\*.res), которое находится ближе всего к желательному значению взамен указанного в поле **Source/Load Resistor**.

Вкладка **Options** диалогового окна синтеза пассивных фильтров ничем не отличается от вкладки **Options** диалогового окна синтеза активных фильтров.

Результаты синтеза пассивного фильтра в виде принципиальной схемы показаны на рис. 15.

## Литература

1. Раевич В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М.: Горячая линия — Телеком. 2003.
2. Micro-Cap 8. Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual. Sunnyvale: Spectrum Software. 2005.