

Проектирование активных фильтров в системе WEBENCH Designer Center

Владимир РЕНТЮК
rvk.modul@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы проектирования аналоговых фильтров на операционных усилителях (ОУ) в среде WEBENCH Filter Designer компании Texas Instruments. Эта программа представляет собой интерактивный программный калькулятор для расчета активных фильтров.

В одном из предыдущих номеров журнала «Компоненты и технологии» [1] автор этой статьи представил читателям бета-версию on-line (интерактивного) калькулятора по расчету аналоговых фильтров Analog Filter Wizard 2.0 компании Analog Devices, Inc. Особенность этого программного продукта — в его способности рассчитывать фильтры для инфранизких частот, что, как отмечалось в [1], было не под силу программным продуктам компании Texas Instruments (TI). Однако TI провела работы по устранению этого ограничения и значительно переработала свой on-line калькулятор WEBENCH Filter Designer.

Автор этой статьи принимал непосредственное участие в тестировании продукта и выработывал рекомендации по его доработке. Справедливости ради необходимо отметить, что общие возможности WEBENCH Filter Designer (рассматривается релиз от 22 ноября 2013 г.) превышают бета-версию Analog Filter Wizard 2.0, но разработ-

чики должны иметь информацию обо всех сторонах этого программного инструмента и оставшихся ограничениях. Это позволит оптимизировать работу по разработке фильтров высоких порядков на основе операционных усилителей компании Texas Instruments и избежать потерь времени при проведении опытно-конструкторских работ.

Ранее доступ к WEBENCH Filter Designer был спрятан в глубине сайта и не открывался непосредственно с основного сайта компании TI [2] в системе проектирования WEBENCH Designer. Сейчас доступ к инструменту значительно упрощен. Для полноценной работы с ним необходимо пройти несложную реги-

страцию в системе my.TI. После регистрации и получения логина и пароля вход в программную оболочку WEBENCH Filter Designer можно осуществлять как с англоязычной версии сайта, так и с русскоязычной. Для исключения проблем с переводом остановим свой выбор на основной — англоязычной версии сайта, тем более что русификация этого инструмента пока отсутствует.

Во многом интерфейс WEBENCH Filter Designer и особенности его работы схожи с описанным автором ранее программным продуктом WEBENCH Power Designer [3] из WEBENCH Designer Center. Непосредственно вход в программу откры-

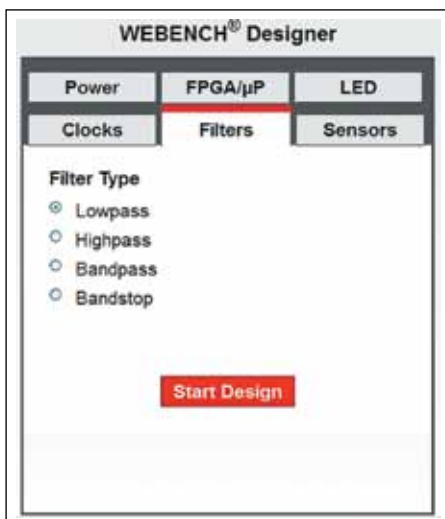


Рис. 1. Вкладка входа в WEBENCH Filter Designer

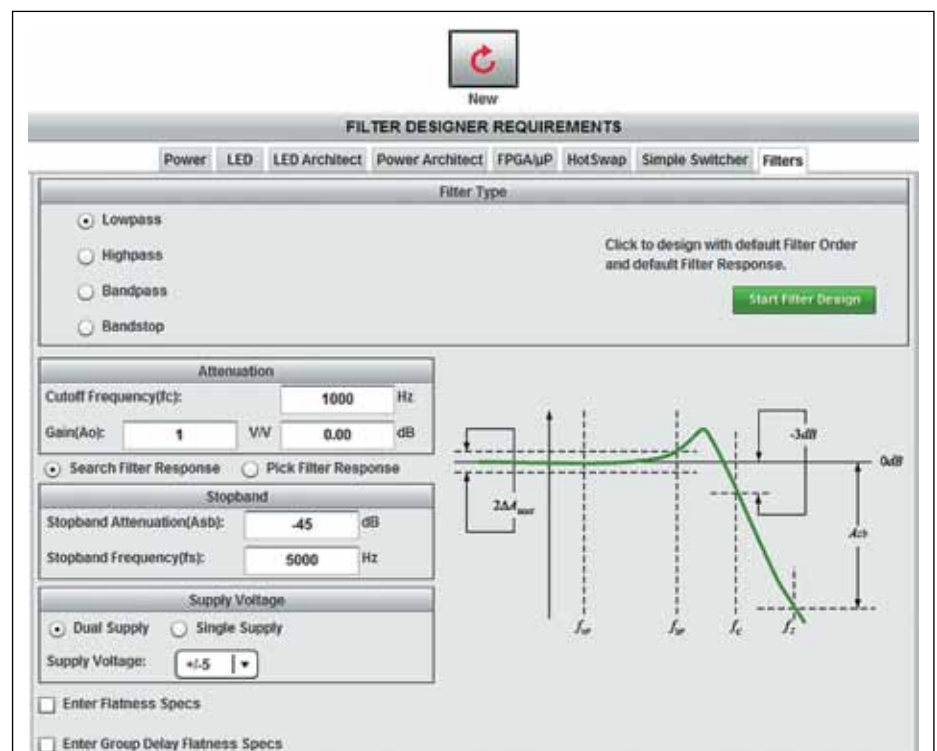


Рис. 2. Окно для установки основных параметров фильтра (установки по умолчанию)

вается через вкладку WEBENCH Designer после активирования опции Filters (рис. 1).

Здесь предлагается выбрать тип проектируемого фильтра. В отличие от Analog Filter Wizard 2.0 предлагается значительно более широкий выбор типов фильтров. Сейчас их доступно четыре:

- Lowpass — фильтр низких частот;
- Highpass — фильтр высоких частот;
- Bandpass — полосовой фильтр;
- Bandstop — заграждающий фильтр.

Остановим свой выбор на проектировании фильтра низких частот (ФНЧ), установив флажок на Lowpass. (Хотя на данном этапе в этом нет особой необходимости, так как выбрать тип фильтра можно будет позже.) Затем необходимо активировать виртуальную кнопку **Start Design**. Через несколько секунд откроется окно для установки основных параметров фильтра (рис. 2)

После того как откроется окно установки основных параметров фильтра, необходимо активировать *my.TI*, введя логин и пароль. После этого можно задать основные параметры фильтра, а именно:

- Частоту среза (Cutoff Frequency): f_c в Гц.
- Усиление в полосе пропускания (Gain): A_0 , которое можно задать как отношение В/В или в дБ.
- Частоту, для которой необходимо осуществить подавление (Stopband Frequency): f_s .
- Глубину подавления на частоте f_s (Stopband Attenuation): A_{sb} .

Зададим: $f_s = 60$ Гц, $A_0 = 0$ дБ (1 В/В), $f_c = 100$ Гц, $A_{sb} = -40$ дБ.

Кроме основных параметров, нужно выбрать вариант подачи напряжения питания — однополярное (Single Supply) или двухполярное (Dual Supply) и задать величину напряжения питания. Для двухполярного напряжения доступны варианты ± 5 , ± 12 и ± 15 В. Для однополярного напряжения: $+3,3$, $+5$ и $+10$ В. Выбор таких значений напряжения питания не совсем очевиден, но его достаточно для большинства применений. Для дальнейшего рассмотрения остановим свой выбор на однополярном питающем напряжении $+5$ В.

В отличие от программы Analog Filter Wizard 2.0 в этом окне можно задать три важных для проектирования фильтра параметра, а именно:

1. Неравномерность АЧХ фильтра в полосе пропускания (ставится флажок на **Enter Flatness Specs**). Здесь задается три уточняющих параметра: собственно величина неравномерности АЧХ (Flatness Specification) — ΔA_{max} ; нижняя частота для задания неравномерности (Magnitude Lower Test Frequency) — f_{1F} ; верхняя частота для задания неравномерности (Magnitude Higher Test Frequency) — f_{2F} .
2. Неравномерность группового времени задержки (ставится флажок на **Enter Group Delay Flatness Specs**). Здесь задаются четыре дополнительных параметра: TGD — групповое время задержки (Group Delay

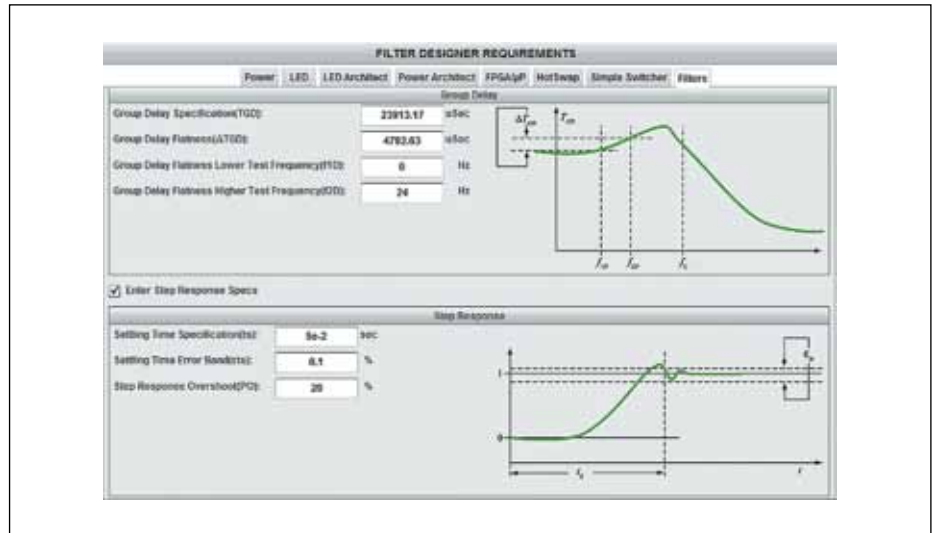


Рис. 3. Вкладки установки требований по групповому времени задержки в заданной полосе частот и отклику

Specification); ΔTGD — собственно неравномерность группового времени задержки (Group Delay Flatness); f_{1D} — нижняя частота для задания неравномерности группового времени задержки (Group Delay Flatness Lower Test Frequency); f_{2D} — верхняя частота для задания неравномерности группового времени задержки (Group Delay Flatness Higher Test Frequency).

3. Переходная характеристика фильтра, или, другими словами, отклик — реакция на воздействие единичного скачка напряжения (ставится флажок на **Enter Step Response Specs**). Здесь задаются три дополнительных параметра: установка времени переходного процесса в мкс (Setting Time Specification) — t_s ; ошибка положения, или, другими словами, установка глубины реакции в % (Setting Time Error Band) — etc; величина перерегулирования в % (Step Response Overshoot) — PO .

Все перечисленные вкладки сопровождаются детальными иллюстрациями, позволя-

ющими понять назначение основных и вспомогательных параметров. Этими опциями можно воспользоваться, если указанные параметры на этапе оценки проекта известны или критичны. Раскрытые опции установки неравномерности группового времени задержки и переходной характеристики фильтра показаны на рис. 3.

Остановим свой выбор на задании требования по неравномерности АЧХ в полосе пропускания: оно наиболее часто встречается на практике. Положим значение неравномерности $\Delta A_{max} = 0,5$ дБ. Можно ожидать, что при дальнейшем моделировании программой будет предложен ФНЧ с передаточной функцией, описываемой полиномом Чебышева с неравномерностью 0,5 дБ. Остальные величины оставим предлагаемыми по умолчанию. Тем более что программа предлагает эти параметры достаточно корректно. Заполненная вкладка имеет вид, представленный на рис. 4.

Для перехода к выбору общего схемотехнического решения для фильтра с заданны-

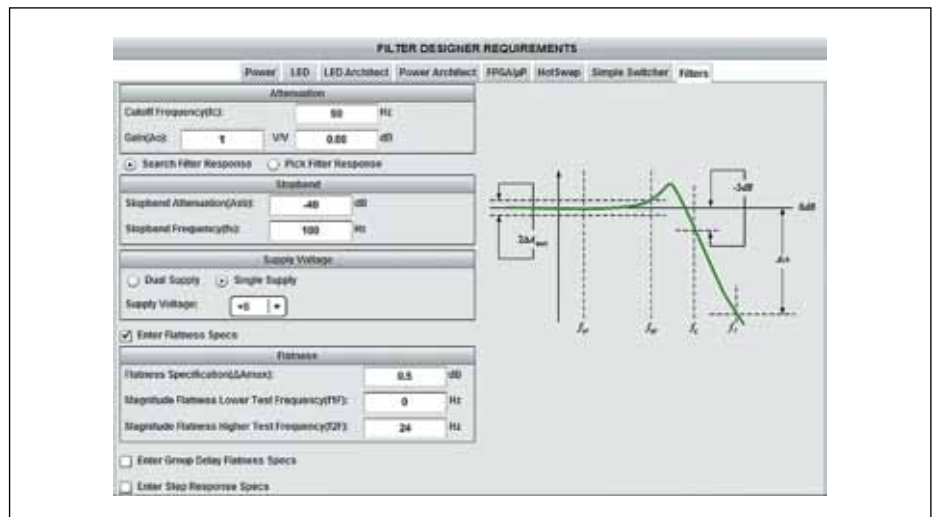


Рис. 4. Заполненная вкладка окна задания основных и выбранных дополнительных параметров фильтра

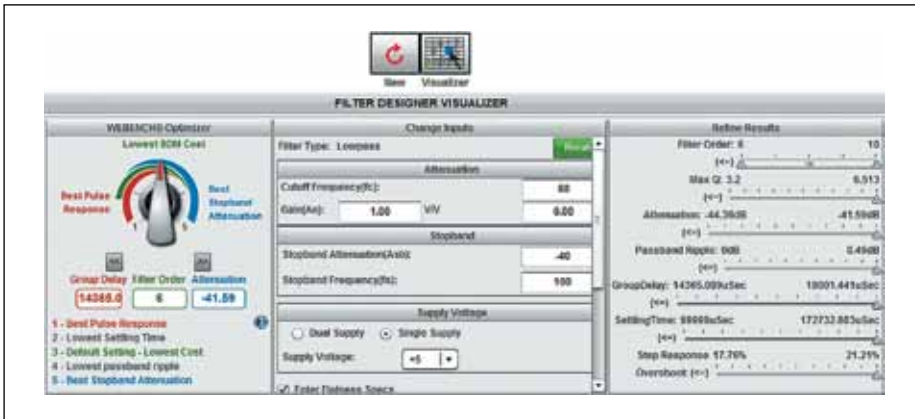


Рис. 5. Вкладка основных параметров фильтра

ми параметрами активируем виртуальную кнопку **Start Filter Design**. Обратите внимание на то, что таких кнопок две. В верхней части окна находится кнопка начала проектирования с дополнительными параметрами фильтра, установленными по умолчанию, а внизу окна — кнопка для проектирования фильтра с дополнительными параметрами, заданными проектировщиком. Поскольку мы поменяли неравномерность АЧХ в полосе пропускания, то активируем нижнюю кнопку **Start Filter Design**. Через несколько секунд открывается новое окно **Filter Designer Visualizer** — визуализатор проектирования фильтра, в котором будет предложен выбор решений для проекта.

Поскольку это окно весьма обширное и не помещается на рабочем столе персональных компьютеров с экраном менее 22", рассмотрим его по частям. В верхней части окна расположены три вкладки (рис. 5), в которых приведены основные параметры фильтра.

С помощью этих вкладок можно скорректировать заданные ранее параметры фильтра (центральная вкладка **Change Inputs**). Причем изменить можно не только ранее введенные значения параметров, но и параметры, оставленные по умолчанию.

(Вкладка раскрывается движком прокрутки в правой части.) Выполнить оптимизацию фильтра можно, используя движок в левой вкладке (**WEBENCH Optimizer**), а уточнить результат начального этапа проектирования — установкой движка в правой вкладке (**Refine Results**). Перерасчет фильтра после изменения входных данных осуществляется активацией кнопки **Recalculation**. (Из-за несоответствия графики и разрешения экрана она может быть частично скрыта.) Затем нужно выбрать оптимальный вариант между двух взаимозависимых параметров — по наилучшей реакции на импульсное воздействие и наибольшей глубине подавления. Среднее положение движка подразумевает оптимизацию по суммарной стоимости комплектующих фильтра. Перемещение движка изменяет порядок фильтра, групповое время задержки и глубину подавления частоты fs.

Внимание! *Заменять порядок фильтра в окошке Filter Order нельзя. Программа сразу переведет вас на общую вкладку WEBENCH Designer, причем в режим проектирования источников питания.*

Во вкладке **Refine Results** можно уточнить порядок фильтра (Filter Order), добротность (Qmax), затухание (Attenuation),

неравномерность в полосе пропускания (Passband Ripple), групповое время задержки (GroupDelay) и переходную характеристику фильтра путем уточнения следующих параметров: времени переходного процесса в мкс (SettingTime) и величины перерегулирования (Step Response Overshot). Уточнение ошибки положения (Setting Time Error Band) не предусмотрено, но это можно выполнить в центральной вкладке или вернуться в начало проекта, активировав виртуальную кнопку **New**. Как видно, все достаточно просто и информативно. Необходимо заметить, что уточнение параметров фильтра через вкладку **Refine Results** не приводит к изменению ранее введенных данных для проектирования, а отбрасывает не вписывающиеся в эти уточнения проекты из вкладки предлагаемых для рассматриваемого проекта решений (Solutions), о которой будет сказано далее (рис. 6).

Слева мы видим традиционную для системы проектирования WEBENCH Designer визуализацию решений для проекта в виде сложного трехмерного графика. Разработчик может выбрать назначение осей абсцисс, ординат и окружностей, чтобы увидеть поля решений. Задать можно все основные параметры фильтра, рассмотренные выше. Результат высвечивается при наведении курсора на окружность. Насколько это удобно и информативно — судить пользователям.

Наиболее точные результаты дает основная таблица решений (Solutions). В ней приведены уже пересчитанные уточненные параметры фильтров, которые соответствуют требованиям, заданным пользователем. Как и ожидалось, первым поставлен фильтр Чебышева шестого порядка с неравномерностью 0,5 дБ. Вторым — фильтр Баттерворта десятого порядка. Проектировщик может выбрать наиболее оптимальный вариант и активировать его виртуальной кнопкой **Select**. Кроме таблицы, предлагаются и графики, которые позволяют визуально оценить характеристики фильтров всех предлагаемых решений. Для удобства они имеют

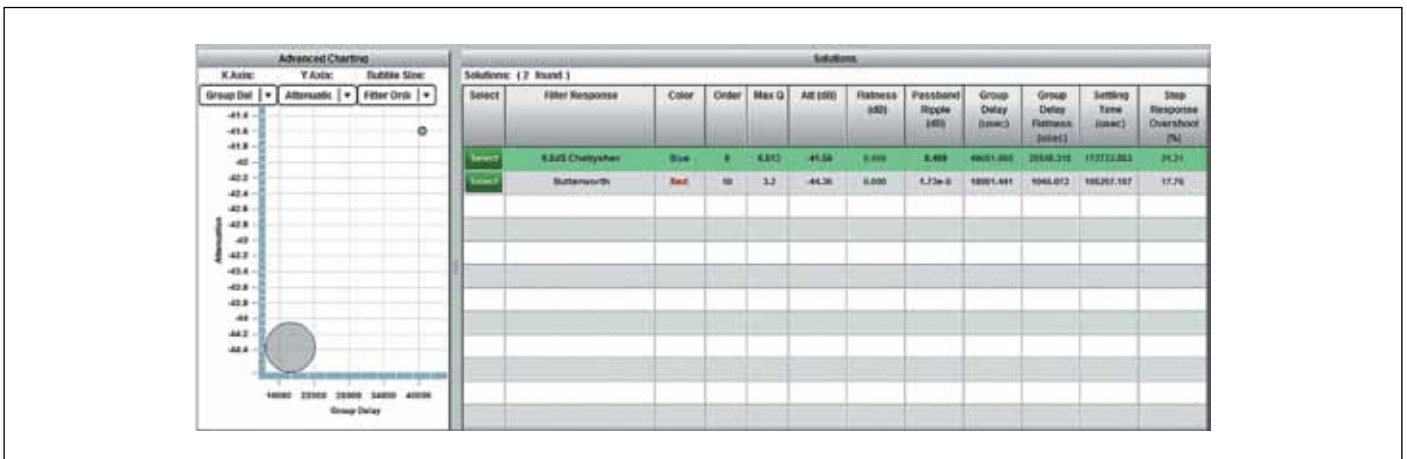


Рис. 6. Вкладка предлагаемых решений

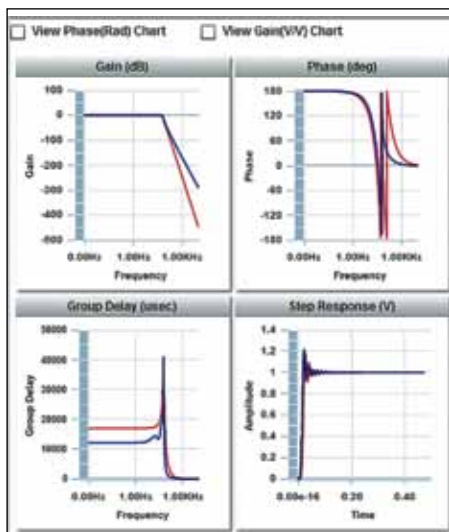


Рис. 7. Графическое представление параметров фильтра

цветную маркировку. Так, для фильтра Чебышева в рассматриваемом примере мы будем иметь синюю трассу, а для фильтра Баттерворта — красную. Графики представлены в отдельной вкладке Charts. Чтобы увидеть все графики на мониторах с малыми размерами экрана, необходимо расширить поля, используя специальные движения — три серые черточки (они не видны). Набор графиков для рассматриваемого проекта представлен на рис. 7.

На рис. 7 видно, что предлагаются все четыре основных графика. Отображение информации по фазо-частотной характеристике можно задать в радианах, установкой флажка на **View Phase(Rad) Chart** (по умолчанию — в градусах), а усиление — в количестве раз, установив флажок на **View Gain (V/V) Chart** (по умолчанию — в децибелах).

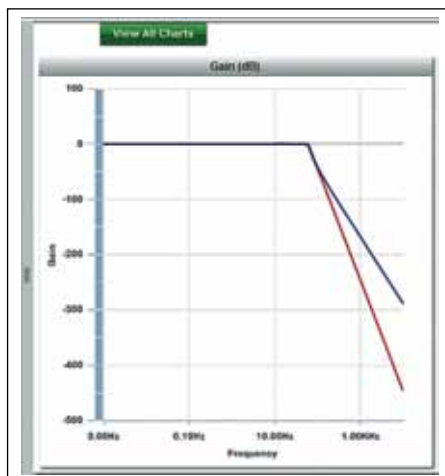


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Для более детального рассмотрения графика его можно активировать, кликнув на его названии. Например, график АЧХ (Gain) примет вид, представленный на рис. 8.

Возврат в прежний режим представления осуществляется активированием виртуальной кнопки **View All Charts** (просмотр всех графиков). Наведя курсор на график, можно увидеть величины в этой точке (в данном случае — ослабление и частоту), а поделив мышкой нужную зону — увеличить ее (рис. 9). Причем это можно делать неоднократно, усиливая увеличение, что весьма удобно. Убирается увеличение активацией виртуальной кнопки **Reset Zoom**.

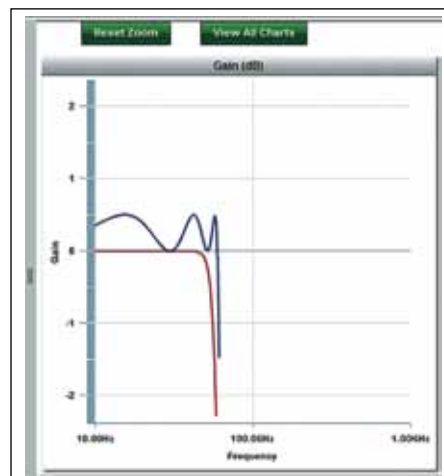


Рис. 9. Увеличенная область амплитудно-частотной характеристики фильтра

Остановим свой выбор на фильтре Чебышева шестого порядка с неравномерностью 0,5 дБ. Согласно таблице возможных решений Solutions его параметры вписываются в требования технического задания, так как затухание на заданной частоте 100 Гц равно $-41,59$ дБ. Активируем виртуальную кнопку **Select**. Открывается окно с предложением схемотехнического решения фильтра (рис. 10).

Как видим, по умолчанию предлагается вариант реализации фильтра на трех звеньях второго порядка с топологией Саллена-Ки (Sallen-Key). Однако, раскрыв меню любого из звеньев, можно заменить его топологию на фильтр Пауха (фильтр с множественной обратной связью Multiple feedback). Других вариантов топологии фильтра в рассматриваемом калькуляторе не предусмотрено.

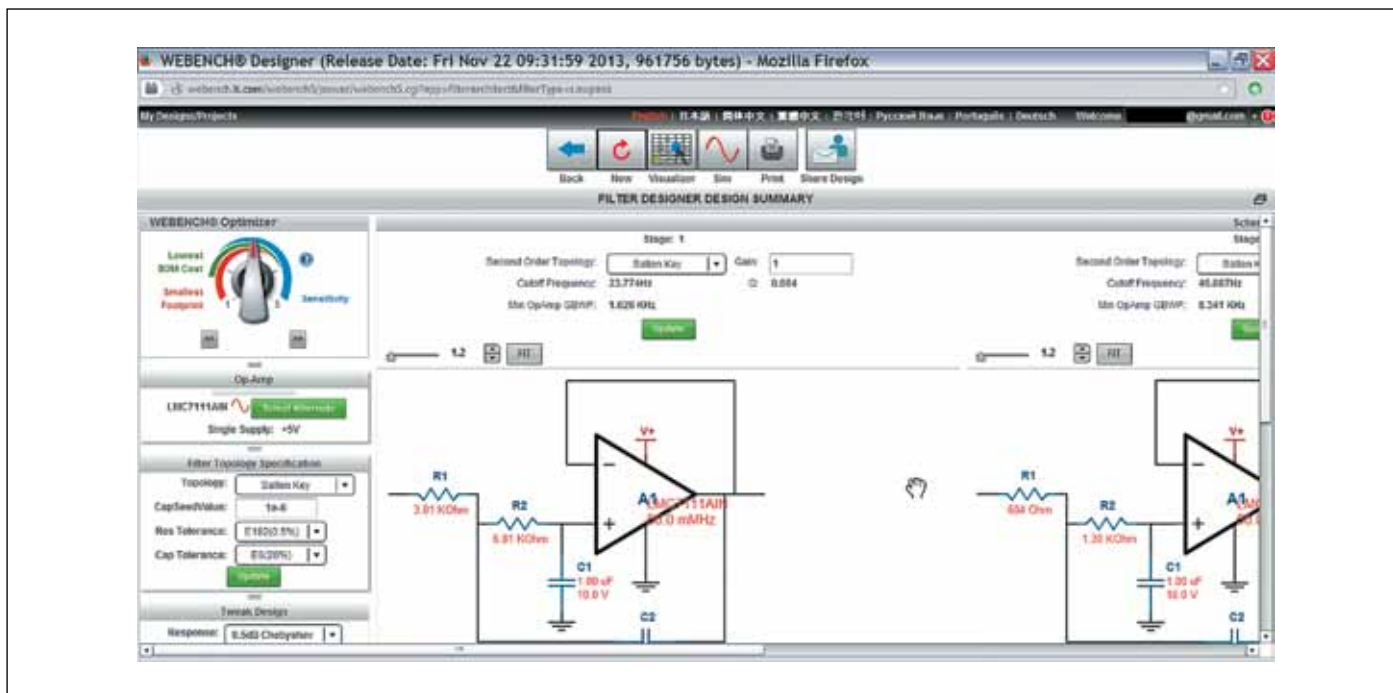


Рис. 10. Окно схемотехнического решения фильтра

Part #	Manufacturer	Part Number	Price	Value	Footprint	Top View	Bill
A1	Texas Instruments	LMC7554B	\$0.30	NA	NA		Select Alternate Part
C1	Multitek	GRB155061A105K215D	\$0.01	1.00uF	3.0		Select Alternate Part
C2	Ramet	C0603C225K0RACTU	\$0.02	2.20uF	4.7176		Select Alternate Part
R1	Valley-Date	CICW00053031K1EA	\$0.01	3.00K	6.75	no	Select Alternate Part
R2	Valley-Date	CICW00053031K1EA	\$0.01	6.80K	6.75	no	Select Alternate Part

Рис. 11. Перечень элементов окна схемотехнического решения фильтра

После замены топологии необходимо активировать изменение через Update. Для каждого звена указаны частота среза (Cutoff Frequency), добротность (Q) и требование к операционному усилителю по минимальной полосе пропускания [1]. Картинку каждого звена можно увеличить или уменьшить, используя движок Fit. Но польза от этой опции весьма сомнительная, так как на формат общей картинки она не оказывает влияния.

Под каждым звеном имеется таблица с перечнем выбранных программой элементов (рис. 11).

В таблице указывается позиционное обозначение элемента (Part), изготовитель (Manufacturer), полное наименование элемента у изготовителя (Part Number), цена элемента (Price) без указания поставщика, размер установки элемента на печатную плату без указания единиц измерения (Footprint) и внешний вид элемента (Top View). Здесь можно выбрать альтернативные варианты, активировав виртуальную кнопку **Select Alternate Part**. Все колонки можно раздвинуть мышкой, как это делается обычно для таблиц в Microsoft Office.

Здесь проектировщика ждет первое разочарование. Если вы активировали **Select Alternate Part**, то, во-первых, в открывшейся таблице не предусмотрена возможность выбора номинала элемента. Можно только лишь выбрать изготовителя и уточнить цену элемента (опять неизвестно, какого поставщика), хотя параметры элемента будут раскрыты полностью. Во-вторых, отсутствует возможность поиска (Search) приемлемого для вас компонента. То есть для выбора необходимо прокруткой вручную перебрать сотни предложенных вариантов. Это касается как операционного усилителя, так и пассивных компонентов фильтра. Какой же предлагается выход? Никакого, разве что установить операционный усилитель как идеальный и потом уже решать эту проблему самостоятельно.

Для оптимизации проекта можно воспользоваться вкладками, имеющимися в правой стороне окна (рис. 10). Здесь опять-таки предлагается использовать WEBENCH Optimizer и оптимизировать проект по наименьшей стоимости (Lowest BOM Cost), наименьшему занимаемому пространству (Smallest Footprint) на печатной плате и почему-то чувствительности (Sensitivity). Скорее всего, имеется в виду оптимизация по наименьшему уровню собственных шумов, хотя это и не очевидно. А вот оптимизация по минимальному потреблению мощности отсутствует, что необходимо, например, для мобильных применений. Эту проблему придется решать разработчику самостоятельно при выборе типа операционного усилителя. Это касается по большому счету и оптимизации по уровню собственных шумов фильтра, так как эта проблема комплексная.

Ниже предлагается более интересная опция — выбор одного общего типа ИМС операционного усилителя сразу для всех звеньев фильтра. При ее активации можно применить более подходящую с точки зрения проектировщика ИМС. При активации этой опции (через Select Alternate) откроется таблица с предложением всех подходящих для данного проекта ИМС, имеющих отношение к компаниям Texas Instruments и National Semiconductor. Для рассматриваемого проекта их 971! Но выбирать опять придется вручную, опция поиска не предусмотрена. Если

для выбранной ИМС доступна симуляция, то возле ее наименования имеется специальная отметка (красная синусоида). Возврат в прежнее окно осуществляется через виртуальную кнопку **Back**.

Ниже имеется вкладка **Filter Topology Specification**, которая позволяет: выбрать схемотехнические решения сразу для всех звеньев фильтра (Topology); задать базовый номинал для основного конденсатора (CapSeedValue); установить допустимые отклонения для резисторов (Res Tolerance) и конденсаторов (Cap Tolerance). Выбор топологии аналогичен рассмотренному выше, установка отклонений также понятна, а вот проблему с выбором базового номинала основного конденсатора рассмотрим более детально.

В программе можно задать только одно значение конденсатора, и на его основе происходит расчет резисторов и вторых конденсаторов звеньев. Это самое слабое звено программы, которое ограничивает ее использование. К глубокому сожалению, автору статьи во время работы над тестированием этого продукта и доводкой рассматриваемой программы не удалось доказать ее создателям неправильность такого подхода, который перечеркивает для ряда применений все положительные стороны этого калькулятора.

Действительно, поставим значение предельных отклонений для резисторов 1%, а для конденсаторов 5%, то есть то, что мы обычно имеем на практике для фильтров такого порядка. Если оставить базовый конденсатор по умолчанию 1 мкФ, то мы будем иметь вторые конденсаторы 2,2, 15 и 180 мкФ. Есть ли в природе такие конденсаторы с отклонением в 5%? Их нет. Ясно, что такой фильтр просто не реализуем. Единственно, что честно стала показывать программа, — это то, что конденсатор на 180 мкФ указан как Custom, то есть проблему с его приобретением решает проектировщик. Теперь заменим базовый конденсатор на 0,01 мкФ. Фильтр получился реализуемым, номиналы элементов вписываются в заданные рамки.

Еще один неприятный момент. Заменяем отклонение для резисторов на 5%, сделаем перерасчет. Мы увидим, что два резистора в схеме не соответствуют ряду E24. Эти моменты необходимо принимать во внимание. По мнению автора статьи, более целесообразно и удобно было бы сделать выбор базового конденсатора для каждого звена фильтра отдельно. При этом можно было бы избежать применения резисторов высоких номиналов в первом звене, что улучшило бы отношение сигнал/шум фильтра. Однако с этим не согласилась руководитель проекта Бонни Бейкер (Bonnie Baker). Возможно, разработчики не смогли или просто не захотели реализовать эту важную опцию, что не делает им чести в любом случае. Обратите внимание, что при использовании электролитических конденсаторов не все они будут иметь напряжение поляризации.

Еще одна неточность имеется во вкладке **Tweak Design**. Здесь можно выбрать иное из предложенных ранее решений. Но, например, изменить порядок фильтра (для рассматриваемого случая это фильтр Чебышева шестого порядка) на седьмой невозможно. Пока программа этого не понимает. Кроме того, и автор статьи неоднократно указывал разработчикам на это несоответствие, программа ставит фильтры первого порядка только активные (на базе обычного повторителя), что не всегда удобно. При этом даже не указывается его топологии. Программа идентифицирует его как топологию Sallen-Key!

Для продолжения работы активируем виртуальную кнопку **Sim** (рис. 10). Откроется новое окно с результатами симуляции (моделирования) спроектированного фильтра (рис. 12).

В этом окне мы видим (по умолчанию) амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики фильтра. Необходимую зону графика можно увеличить, выделив ее мышкой. Возврат в прежнее состояние осуществляется кликом на правую кнопку и активацией **Reset View**. Параметры для графика можно задать через кнопку **Waveform Control**. Выключение этого режима осуществляется через X, для этого, возможно, придется сдвинуть вкладку. Дополнительно можно выполнить моделирование для синусоидального воздействия (для этого открывается **Select Simulation Type** и выбирается **Sine Wave Response**) или на скачок напряжения (для этого открывается **Select Simulation Type** и выбирается **Step Response**).



Рис. 12. Окно электрического моделирования фильтра: красная кривая — усиление; синяя кривая — фазовая характеристика

После этого необходимо активировать виртуальную кнопку **Start New Simulation**. Можно также менять условия симуляции и точки вывода информации, выбирая их на схеме фильтра. Но это требует уже весьма детального описания, что не вписывается в рамки данной статьи. В качестве примера на рис. 13 приведен фрагмент графика, показывающего реакцию спроектированного фильтра на импульсное воздействие.

Если результаты моделирования не удовлетворяют проектировщика, то, активировав Schematic (рис. 12), можно вернуться к окну схемотехнического решения фильтра (рис. 10) и внести необходимые коррективы.

Результаты проектирования можно распечатать, сохранить в системе *mu.PT* или отправить по почте, аналогично тому, как это описано в [3]. Распечатка проекта будет содержать схему фильтра, перечни элементов и описания для каждого из звеньев. Но, опять-таки, к глубокому сожалению автора статьи, в схеме вы не уви-

дите детального описания цепей питания, а в комплекте документации будут отсутствовать графики. Расщепления однополярного источника показано не будет. Подразумевается наличие напряжения смещения во входном сигнале, но для фильтра высоких частот точки подачи напряжения смещения будут выделены. Получив по почте ссылку, вы не сможете распечатать проект, а просто опять войдете в свой проект, который откроется в окне, показанном на рис. 10. Еще одним неприятным нюансом является то, что все графики приводятся для идеального варианта, то есть разброс характеристик фильтра, вызванных заданными отклонениями элементов, вы на графике не увидите. Это, безусловно, еще одно из самых слабых мест этого калькулятора в отличие, например, от Analog Filter Wizard 2.0.

Тем не менее, несмотря на ряд имеющихся и не устраненных на настоящий момент недоработок, рассмотренный в статье интерактивный калькулятор WEBENCH Filter

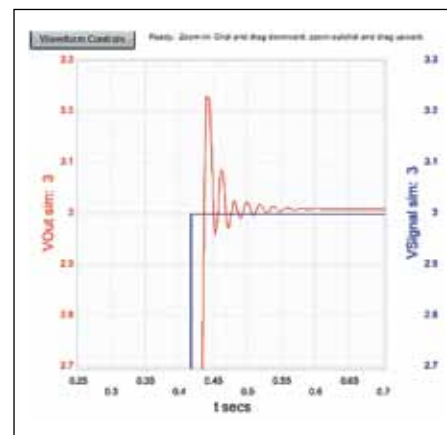


Рис. 13. Реакция спроектированного фильтра на импульсное воздействие: синяя кривая — входной сигнал; красная кривая — выходной сигнал

Designer имеет свои неоспоримые достоинства. В частности, это более полное задание характеристик фильтра, больший выбор типов фильтров и большее предложение полиномов аппроксимирующей функции передаточной характеристики фильтра. Это делает применение интерактивного калькулятора WEBENCH Filter Designer оправданным и целесообразным для многих приложений. ■

Литература

1. Рентюк В. Проектирование активных фильтров в Analog Filter Wizard 2.0 // Компоненты и технологии. 2013. № 6.
2. www.ti.com
3. Рентюк В. Проектирование импульсных DC/DC-преобразователей в системе WEBENCH Design Center // Компоненты и технологии. 2013. № 6.