

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ SFG-МЕТОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

В статье проведено сравнение двух методик проектирования фильтров – на основе SFG-метода и классическим методом. Показано, что применение SFG-метода приводит к чрезмерному усложнению схемы фильтра и не обеспечивает каких-либо преимуществ таких фильтров. Приведены краткие рекомендации о проектировании фильтров нижних частот с малым напряжением смещения. Приведенные в статье модели и результаты моделирования позволяют раскрыть влияние различных параметров операционных усилителей на характеристики активных фильтров.

В. Макаренко

ON THE FEASIBILITY OF APPLYING THE SFG METHOD IN THE DESIGN OF ACTIVE FILTERS

Abstract – The article compares two filter design techniques – based on the SFG method and the classical method. It is shown that the use of the SFG method leads to an excessive complexity of the filter circuit and does not provide any advantages of such filters. Brief recommendations are given on the design of low-pass filters with a low bias voltage. The models and simulation results presented in the article allow revealing the influence of various parameters of operational amplifiers on the characteristics of active filters.

V. Makarenko

В этом номере журнала [1] приведен пример проектирования фильтра нижних частот (ФНЧ) SFG-методом и указано, что основное преимущество SFG-метода при проектировании фильтров заключается в том, что коэффициент затухания Q и частота среза могут настраиваться индивидуально. Этот метод позволяет ослабить шум и улучшить отношение сигнал/шум, но при этом требует использования дополнительных компонентов при проектировании активного ФНЧ, что, в свою очередь, приводит к увеличению размеров печатной платы и энергопотребления. Кроме того, применение SFG-метода может ухудшить температурную погрешность, так как этот метод не учитывает влияние изменение температуры окружающей среды на параметры элементной базы, т.е. на точность проектируемой измерительной системы в целом.

Приведенный пример проектирования фильтра

не позволяет даже оценить его частотную характеристику. Кроме частоты среза задан некий параметр Q – коэффициент затухания. Чтобы оценить характеристики такого фильтра проведем его моделирование в программе NI Multisim.

Отличие модели на рис. 1 от описанного в [1] фильтра только в использовании вместо малозумящих усилителей с нулевым дрейфом ADA4522, близких по параметрам ADA4528. На рис. 2 приведена АЧХ этого фильтра.

Как следует из рис. 2 частота среза ФНЧ равна 0.5 Гц, а на частоте 9 Гц затухание фильтра составляет 50 дБ. Наблюдается выброс 1.26 дБ на частоте близкой к частоте среза. Дрейф напряжения смещения составляет 0.07 мкВ в диапазоне температур от -40 до 130 °С (рис. 3). Температура в таком диапазоне на форму АЧХ не влияет.

Анализируя полученные результаты, можно

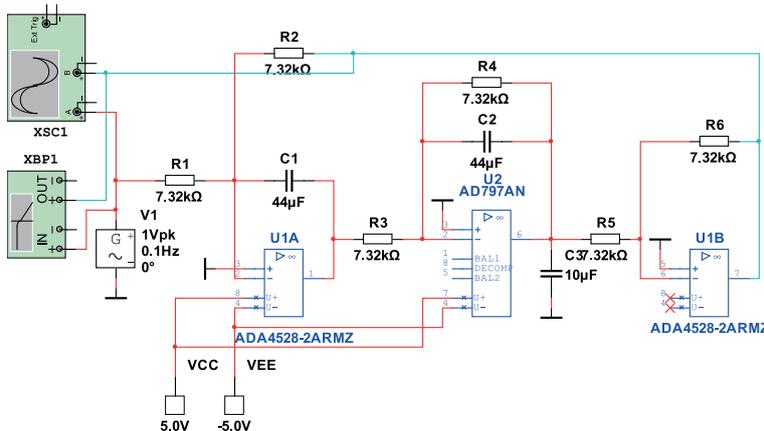


Рис. 1. Модель ФНЧ, спроектированного SFG-методом

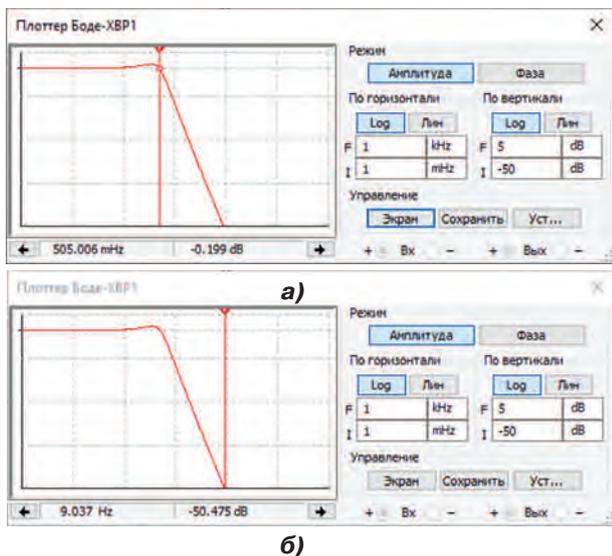


Рис. 2. АЧХ фильтра нижних частот с отмеченным коэффициентом передачи на частоте среза (а) и при затухании 50 дБ (б)

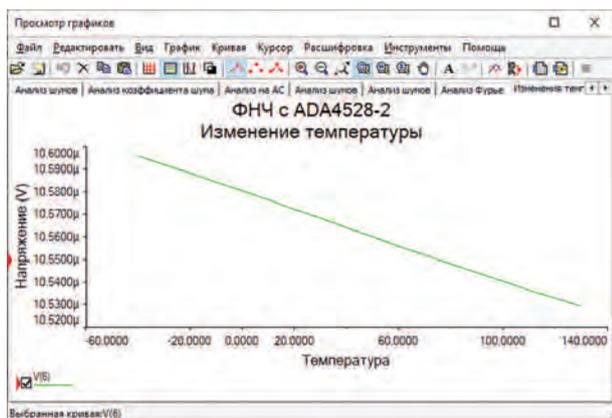


Рис. 2. АЧХ фильтра нижних частот с отмеченным коэффициентом передачи на частоте среза (а) и при затухании 50 дБ (б)

сформировать требования к фильтру, применительно к классической методике проектирования фильтров. Кроме того, следует учесть требования к напряжению смещения и его дрейфу на выходе фильтра.

В [1] фильтр использован для улучшения шумовых характеристик источника опорного напряжения LTC6655 (LTC6655LN), напряжение на выходе которого может быть установлено от 1.25 до 5 В с точностью 0.025%. Температурный коэффициент напряжения $2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, т.е. $2 \cdot 10^{-6} U_{\text{ном}}$.

Для источника напряжение 2.5 В в диапазоне температур $-40 \dots 125 \text{ }^\circ\text{C}$ изменение напряжения не превысит 5 мкВ. Чтобы фильтр не вносил дополнительную погрешность в опорное напряжение смещения, на его выходе не должно превышать с уче-

том дрейфа величины $0.05 \dots 1 \text{ мкВ}$. Т.е. предложенный в [1] фильтр этим условиям удовлетворяет. Еще одним необходимым условием является низкое выходное сопротивление такого фильтра, что требует наличия в выходном звене ФНЧ операционного усилителя.

Однако использование фильтров не ограничивается снижением шумов источников опорного напряжения. На входах АЦП необходимо наличие фильтров для ограничения полосы частот преобразуемого сигнала. Да и во многих других случаях требуется применение активных фильтров с низким дрейфом выходного напряжения.

А как задать параметры такого фильтра, если использовать SFG-метод, совершенно неясно. Нет четких критериев. Для того, чтобы воспользоваться классической инженерной методикой проектирования фильтров, приведем в начале краткие теоретические сведения.

Основа инженерной методики проектирования фильтров заключается в упрощении этого процесса, что предполагает использование унифицированных звеньев второго и первого порядков для реализации фильтров любой сложности [2]. Хотя возможна реализация фильтров по параллельной схеме включения звеньев, на практике используется только последовательная схема.

На первом этапе решается задача аппроксимации – отыскание аналитической аппроксимирующей функции, которая с требуемой точностью воспроизводит заданную по условиям характеристику. Иными словами, на этом этапе заданные обычно в общем виде условия, оговаривающие поведение характеристики фильтра на различных участках частотного диапазона, заменяются эквивалентной аппроксимирующей функцией, приближенно отображающей эти же условия. Это позволяет наложить на элементы фильтра ограничения в соответствии с коэффициентами аппроксимирующей функции и рассчитать их величины. Так как не всякая частотная характеристика может быть получена практической схемой, на аппроксимирующую функцию накладываются ограничения в виде необходимых и достаточных условий физической реализуемости.

На втором этапе решается задача реализации – отыскание совокупности цепей, имеющих характеристики, достаточно близкие к аппроксимирующей функции. В связи с тем, что любой физически осуществимой функции соответствует множество электрических схем, синтез не однозначен. Обычно ищут ограниченное число реализаций, а затем схе-

мы оптимизируют по наиболее подходящему критерию, которым может быть минимальное количество элементов, чувствительность к изменению их величин и другие. В результате выбирается одна из схем, удовлетворяющая условиям поставленной задачи и оптимальная в смысле выбранного критерия.

Так как реализация функций высоких порядков сопряжена со значительными трудностями, функцию раскладывают путем алгебраических преобразований на сомножители, обычно не выше второго порядка, которые и реализуют простейшими развязанными звеньями с активными элементами. При каскадном соединении таких звеньев удастся получить результирующую схему с требуемыми свойствами, так как ее коэффициент передачи равен произведению коэффициентов передачи исходных звеньев. Не всякая функция, удовлетворяющая условиям физической реализуемости, может быть получена при помощи практической схемы звена. Возможности простых звеньев оцениваются, а схемы звеньев классифицируются по величине, реализуемой ими добротности. Раскладывая сложную аппроксимирующую функцию на множители, нетрудно подобрать требуемые звенья и путем каскадного включения их создать фильтр с требуемыми характеристиками.

В общем виде передаточная функция фильтра записывается в виде отношения двух полиномов где p – комплексная частота ($p = c \pm j\omega$); a , b – действительные коэффициенты.

$$H(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}$$

При последовательном соединении звеньев передаточную функцию можно представить в следующем виде

$$H(j\omega) = k \frac{\prod_{j=1}^m (j\omega - z_j)}{\prod_{i=1}^n (j\omega - p_i)} = |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

где k – некоторая константа; z_j – j -тый корень полинома числителя (соответствует нулю передаточной функции); p_i – i -тый корень полинома знаменателя (соответствует полюсу передаточной функции); $|H(j\omega)|$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega)$ – фазовая частотная характеристика (ФЧХ).

Из выражения для передаточной функции видно, что при четном порядке полинома ее можно реализовать, используя звенья второго порядка, а при не-

четном – необходимо использовать еще и звено первого порядка. Порядок звена определяется максимальным показателем степени p его передаточной функции.

Звенья второго порядка имеют сопряженную пару полюсов (рис. 4), которые характеризуются двумя параметрами – собственной частотой полюса

$$\Omega_{\Pi} = 2\pi f_{\Pi} = \sqrt{c^2 + \omega^2},$$

и добротностью

$$Q_{\Pi} = -\frac{\sqrt{c^2 + \omega^2}}{2|c|} = -\frac{\Omega_{\Pi}}{2|c|}.$$

Звенья первого порядка имеют полюс только на действительной оси (полюс p_3 на рис. 4), который характеризуется собственной частотой. Добротность полюса, лежащего на действительной оси, равна 0.5. Аналогичные параметры вводятся и для нулей передаточной функции.

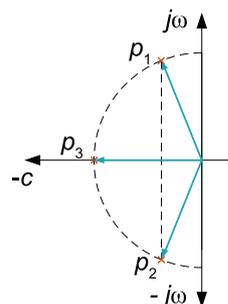


Рис. 4. Карта полюсов передаточной функции фильтра Баттерворта третьего порядка

В [5] предложено использовать звенья третьего порядка для реализации фильтров, но на практике широкого применения фильтры с такими звеньями не находят из-за сложности расчета, малого количества разработанных схем и отсутствия программ для автоматизированного проектирования таких фильтров. Подробно о программах автоматизированного проектирования фильтров можно прочесть в [3...5].

Программы автоматизированного проектирования фильтров содержат ограниченный набор звеньев для реализации фильтров и не позволяют пользователю изменять номиналы резисторов и конденсаторов так, как ему необходимо. В случаях, когда расчет фильтра, проведенный с помощью программы автоматизированного проектирования, не устраивает пользователя, можно воспользоваться рассчитанными программой параметрами звеньев

– частотой полюса и добротностью, а выбор звеньев и расчет номиналов резисторов и конденсаторов произвести вручную, что практически не требует затрат времени.

Конечно, можно самостоятельно рассчитать параметры полюсов и нулей каждого звена для выбранной аппроксимации. Расчетные формулы приведены в [2]. Но этот процесс достаточно трудоемкий. К тому же, программы автоматизированного проектирования позволяют увидеть АЧХ, ФЧХ и ГВЗ (групповое время запаздывания) фильтра. Выбрать схему для реализации звена можно как из набора звеньев программы, так и из различных источников. Большое число звеньев, реализующих различные добротности, предложено в [7]. При выборе звена для реализации фильтра необходимо придерживаться рекомендованных ограничений на реализуемую звеном добротность. Например, если рекомендуется добротность звена не должна превышать 6, а при реализации задать такому звену добротность 9, это приведет к отклонению АЧХ от заданной из-за изменения параметров компонентов от температуры и от времени.

Для проектирования ФНЧ необходимо задать четыре параметра (рис. 5):

- a_c – неравномерность АЧХ в полосе пропускания;
- a_s – гарантированное затухание;
- f_c – частота среза;
- f_s – частота гарантированного затухания.

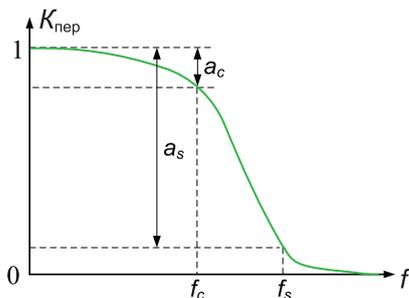


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ и ее основные параметры

После такого краткого теоретического экскурса дальнейшее изложение материала будет более понятно для неспециалистов в области проектирования фильтров.

Рассмотрим пример проектирования фильтра нижних частот высокого порядка с использованием усилителей с нулевым смещением. Зададим следующие параметры фильтра (аналогичные параметрам ФНЧ в [1]): $a_c \leq 1$ дБ, $a_s \geq 50$ дБ, $f_c = 0.5$ Гц,

$f_s = 9$ Гц.

Результаты расчета параметров ФНЧ в программе моделирования Analog Filter Wizard [11] приведены на рис. 6. Для реализации фильтра была выбрана аппроксимация Баттерворта, порядок рассчитанного фильтра равен 2.

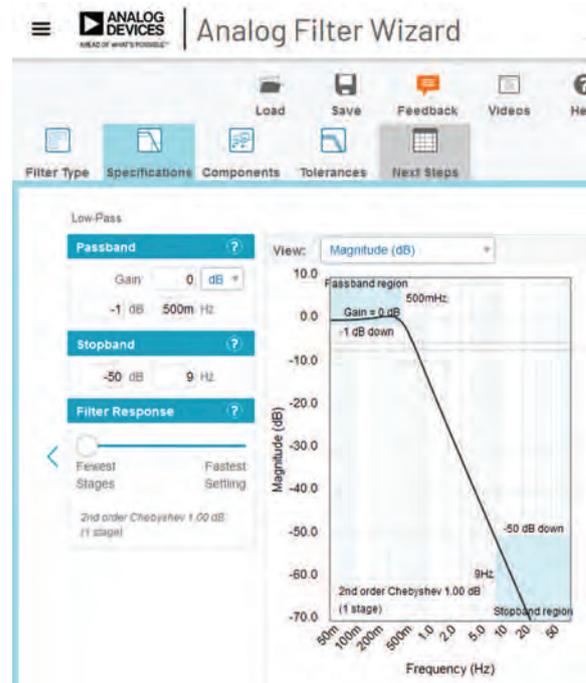


Рис. 6. Результат расчета порядка фильтра в программе Analog Filter Wizard

Для реализации звена предложена схема (рис. 7). Для выбора ОУ необходимо в окне Components отметить пункт I want to choose. Для выбора ОУ необходимо курсор "мыши" установить в окошко Op Amp и нажать левую кнопку "мыши". Откроется окно выбора ОУ (рис. 8). Если этого не сделать программа предложит ОУ автоматически.

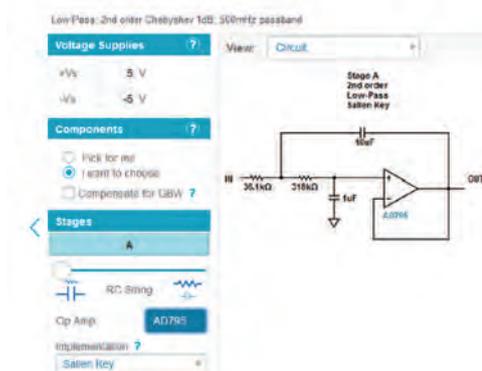


Рис. 7. Схема ФНЧ, сгенерированная программой Analog Filter Wizard



Рис. 8. Окно выбора типа ОУ в программе Analog Filter Wizard

Как следует из рис. 7 в схеме заданы все компоненты и каковы параметры каждого звена на этом рисунке не показано. Чтобы их увидеть, необходимо в окне View выбрать пункт Stages (рис. 9). В открывшемся окне (рис. 10) можно увидеть, что частота полюса первого пассивного звена и второго активного звена равна 626 МГц, добротность первого звена не указана (хотя она по умолчанию равна 0.5), а добротность второго звена 1.

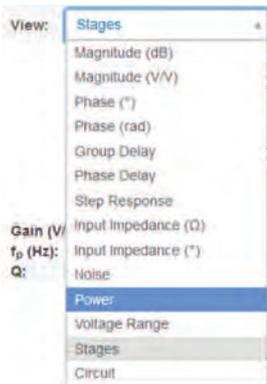


Рис. 9. Окно выбора просматриваемых результатов

Гораздо удобнее при расчетах пользоваться свободно распространяемой программой Filter Wiz Lite [9]. Она предоставляет пользователю менять конфигурацию фильтра, используя доступные в ней схемы звеньев активных и пассивных звеньев. Установленная программа занимает всего 10 Мбайт дискового пространства.

Проведем моделирование спроектированного фильтра в Multisim. Модель фильтра приведена на рис. 11. Номиналы резисторов выбраны из базы Multisim и незначительно отличаются от приведенных на рис. 7. Для проектируемого фильтра это несущественно из-за очень низкой добротности звеньев.

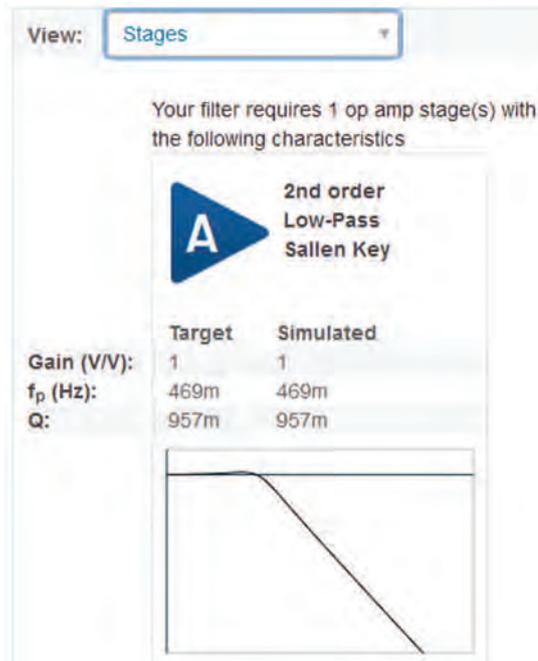


Рис. 10. Параметры звеньев проектируемого ФНЧ

АЧХ спроектированного фильтра, измеренная с помощью Бode-плоттера, приведена на рис. 12. На частоте 9 Гц фильтр обеспечивает затухание 51 дБ. Выброс АЧХ в полосе пропускания не превышает 1 дБ.

Проверим напряжение смещение на выходе фильтра и его дрейф в диапазоне температур от -40 до 130 °С. Для сопоставления полученных результатов используем в модели (рис. 11) ОУ ADA4528.

Как следует из приведенных на рис. 13 результатов изменение напряжения смещения не превышает 0.04 мкВ, а абсолютная величина смещения составляет 1.7 мкВ, что значительно меньше чем в фильтре, приведенном на рис. 1.

Смещение на выходе фильтра объясняется падением напряжения на резисторах R1 и R2, вызванное протеканием через них входных токов. Это напряжение прикладывается к неинвертирующему входу усилителя. А инвертирующий вход соединен с выходом ОУ. Если включить резистор в цепь ООС между выходом и инвертирующим входом усилителя, можно компенсировать это смещение.

Рассчитаем значение сопротивления такого резистора. Входной ток ADA4528-1 составляет 200 пА, а разность входных токов 400 пА. Следовательно сопротивление резистора, включенного в цепь ООС, должно быть в 2 раза меньше суммы сопротивлений резисторов R1 и R2, т.е. составлять примерно 180 кОм. Модифицированная модель фильтра приведена на рис. 14,

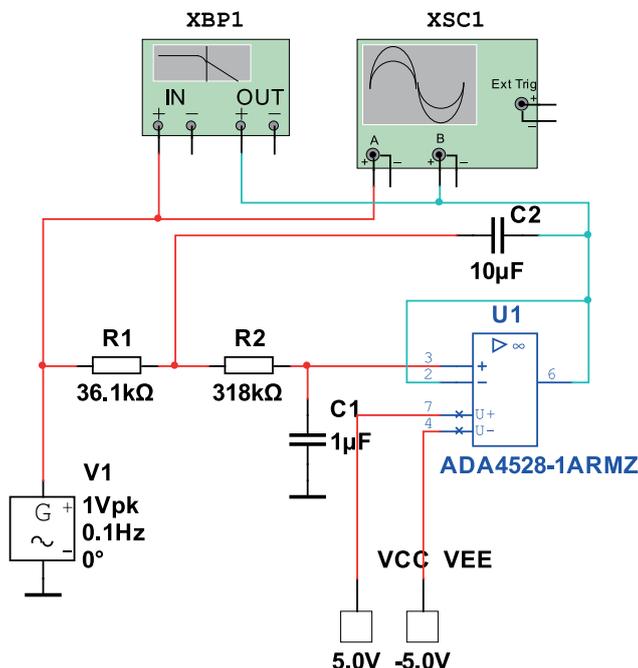


Рис. 11. Модель для анализа спроектированного ФНЧ

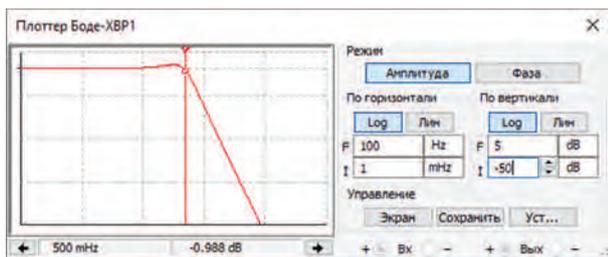


Рис. 12. АЧХ спроектированного ФНЧ

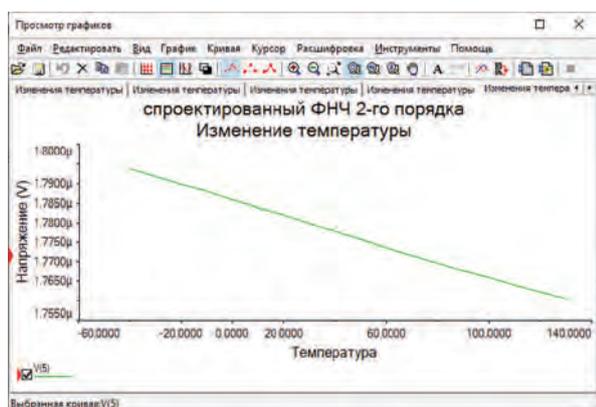


Рис. 13. Зависимость напряжения смещения на выходе спроектированного ФНЧ от температуры

а результаты температурного анализа – на рис. 15.

Как следует из рис. 15 этот прием привел к положительному результату. Напряжение смещения на выходе фильтра не превышает 40 нВ, а дрейф напряже-

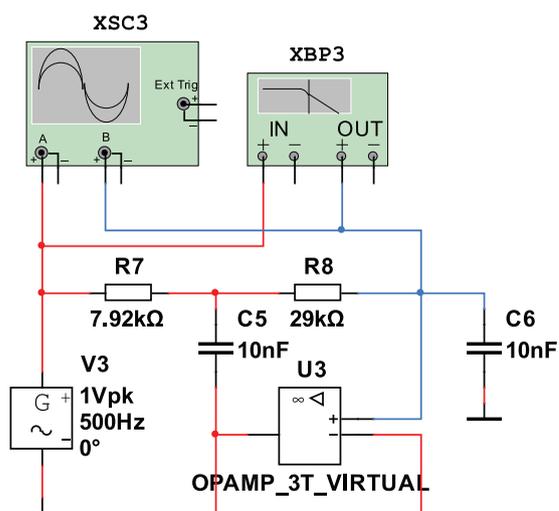


Рис. 14. Модифицированная модель для анализа спроектированного ФНЧ

ния смещения не превышает 33 нВ.

После проведенного моделирования можно провести сравнение фильтров, спроектированных по классическому и SFG методам. Число операционных усилителей в 3 раза меньше в фильтре, спроектированном классическим методом, напряжение смещения классического фильтра меньше в 250 раз, а дрейф напряжения смещения меньше в 2 раза чем у фильтра, спроектированного SFG-методом. Полученные результаты говорят о том, что использовать SFG-метод при проектировании фильт-

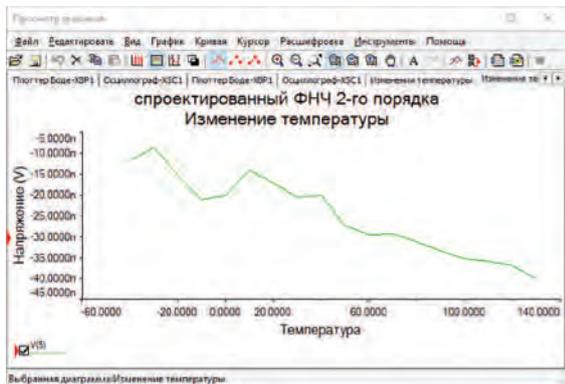


Рис. 15. Зависимость напряжения смещения на выходе спроектированного ФНЧ от температуры при введении резистора в цепь отрицательной обратной связи

ров нецелесообразно.

Рассмотренный пример проектирования фильтра очень простой и не раскрывает многих вопросов, возникающих при разработке сложных фильтров высокого порядка. Например, как обеспечить независимую регулировку частоты полюса и его добротности. Это важный вопрос, без решения которого процесс настройки фильтра может стать недопустимо сложным и трудоемким.

Рассмотрим пример проектирования фильтра нижних частот высокого порядка с использованием усилителей с нулевым смещением. Зададим следующие параметры фильтра: $a_c \leq 1$ дБ, $a_s \geq 50$ дБ, $f_c = 10$ кГц, $f_s = 16$ кГц.

Результаты расчета параметров ФНЧ в программе моделирования [10] приведены в табл. 1. Для реализации фильтра была выбрана аппроксимация Чебышева, порядок рассчитанного фильтра равен 7.

Таблица 1. Параметры звеньев ФНЧ

№ звена	f_n , кГц	Q_n	f_1 (GBW), МГц
1	2,054	0,5	0,103
2	4,8	1,3	0,63
3	8,083	3,156	2,6
4	9,963	10,9	11

Частота единичного усиления f_1 (GBW – Gain Band Width) определяет требования к ОУ, используемому для реализации звена. Как следует из таблицы, первое звено фильтра первого порядка, которое реализуется простой RC-цепью, поскольку его добротность равна 0,5. Методика проектирования фильтров на основе ИНУН предполагает равенство выходного сопротивления предыдущего каскада близким к нулю, и

поэтому на выходе пассивного звена включают повторитель напряжения. Значения частоты единичного усиления, которое сформировала программа расчета фильтров Filter-design-tool [10] отличается от аналогичных параметров, сформированных программой Filter Wiz Lite. В программе Filter Wiz Lite рекомендованные значения частоты единичного усиления не превышают 1 МГц.

Различные программы проектирования фильтров предлагают различный порядок расположения звеньев. В случае использования программ [9, 10] в схеме фильтра звенья располагаются в порядке возрастания добротности.

Для реализации всех звеньев второго порядка программа предлагает использовать звенья Саллена-Ки с единичным коэффициентом усиления. Однако гораздо удобнее использовать звенья, в которых частота полюса и добротность устанавливаются различными элементами, что упрощает как расчет, так и настройку таких звеньев. Кроме того, такой подход позволяет использовать унифицированные элементы, например, все конденсаторы фильтра могут иметь одинаковое номинальное значение.

На рис. 16 приведена схема звена Саллена-Ки,

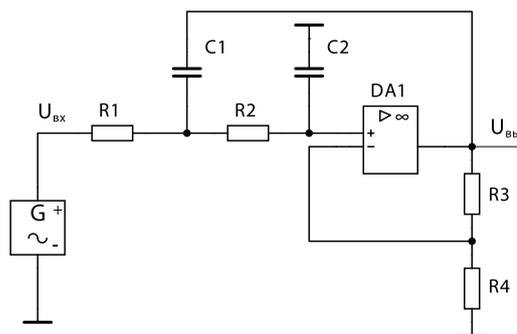


Рис. 16. Принципиальная схема звена Саллена-Ки с независимой регулировкой частоты полюса и добротности

реализующая такую возможность.

Передаточная функция такого звена описывается

$$H(p) = K \frac{1/R_1 R_2 C_1 C_2}{p^2 + p[(R_1 + R_2)C_2 + R_1 C_1(1-K)] / R_1 R_2 C_1 C_2 + 1/R_1 R_2 C_1 C_2},$$

ся выражением

где $K = R_3/R_4$ – коэффициент усиления усилителя.

Если принять $R_1 = R_2 = R$, а $C_1 = C_2 = C$, то переда-

$$H(p) = K \frac{1/R^2 C^2}{p^2 + p[3-K]/RC + R^2 C^2}.$$

точная функция примет вид

Тогда частоту полюса можно рассчитать по формуле $f_n = 1/(2\pi RC)$, а добротность – $Q_n = 1/(3-K)$. Задавшись значением емкости C , рассчитывают сопротивление резисторов.

При выборе ОУ для реализации фильтра с нулевым смещением воспользуемся таблицей параметров усилителей, представленной на сайте компании Analog Devices [12].

В табл. 2 приведены параметры некоторых ОУ с наименьшим напряжением смещения, которые есть в базе компонентов NI Multisim 14.2.

Для моделирования фильтра был выбран сдвоенный ОУ ADA4528-2. Модель для исследования ФНЧ Чебышева 7-го порядка приведена на рис. 17, а реализуемая им АЧХ – на рис. 18.

Коэффициент усиления спроектированного фильтра равен 24,6 дБ (17 раз).

Таблица 2. Параметры усилителей с нулевым дрейфом компании Analog Devices

Наименование	Напряжение смещения (Vos max), мкВ	Дрейф напряжения смещения (Vos TC max), нВ/°С	Спектральная плотность шума, нВ/√Гц	Частота единичного усиления (GBP typ), МГц	Напряжение питания, В
LTC2050HV	3	30	–	3	2,7...11
ADA4528-2	2.5	15	5.9	3.4	2,2...5,5
ADA4638-1	4.5	800	66	1.5	4,5...30
ADA4528-1	2.5	15	5.9	3.4	2,2...5,5
ADA4051-1	17	100	95	0,125	1,8...5,5
ADA4051-2	15	100	95	0,125	1,8...5,5
AD8639	9	60	60	1.5	4,5...16
AD8638	9	60	60	1.5	4,5...16
AD8539	15	100	52	0,43	2,7...5
AD8538	13	100	50	0,43	2,7...5
AD8630	5	20	22	2.5	2,7...5,5
LTC2055	3	30	–	0,5	2,7...6
LTC2054	3	30	–	0,5	2,7...6
LTC2050	3	30	–	3	2,7...6
LTC2052	3	30	–	3	2,7...6
LTC2051	3	30	–	3	2,7...6
AD8551	5	40	42	1.5	2,7...5
AD8552	5	40	42	1.5	2,7...5
AD8554	5	40	42	1.5	2,7...5
AD8571	5	40	51	1.5	2,7...5,5
AD8572	5	40	51	1.5	2,7...5,5
AD8574	5	40	51	1.5	2,7...5,5
LTC1152	10	100	100	0,7	3...14
LTC1250	10	50	15	1.5	4,75...18
LTC1047	10	50	–	0,2	4,75...16
LTC1151	5	50	–	2	4,75...36
LTC1049	10	100	80	0,8	4,75...18
LTC1150	10	50	–	2.5	4,75...32
LTC1051	5	50	70	2.5	4,75...16,5
LTC1053	5	50	70	2.5	4,75...16,5
LTC1050	5	50	90	2.5	4,75...18
LTC1052	5	50	30	1.2	4,75...18

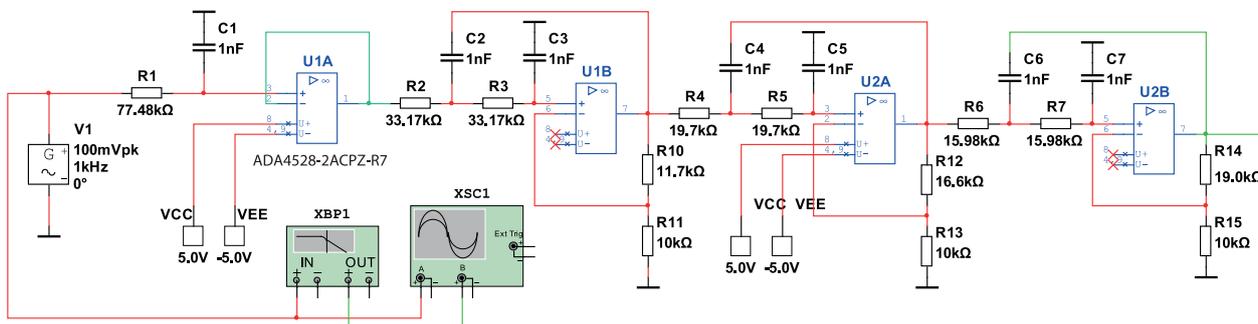


Рис. 17. Модель для исследования ФНЧ Чебышева 7-го порядка

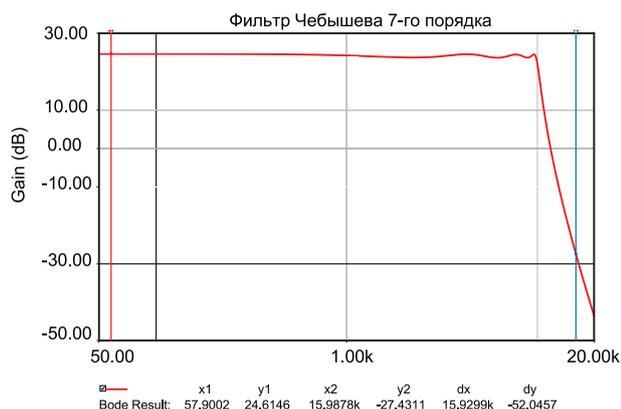


Рис. 18. АЧХ ФНЧ Чебышева 7-го порядка

Проверка спроектированного фильтра показала, что его коэффициент усиления 24,8 дБ, напряжение смещения изменяется в диапазоне температур -40...90 °С от 205.6 до 204.4 мкВ при использовании ОУ ADA4528-2 (рис. 19), а при использовании AD8630 – от -30.2 мВ до -29.4 мкВ (рис. 20), т.е. дрейф напряжения смещения составил всего 0,8 мкВ.

Хотя по данным табл. 2 оба усилителя имеют напряжение смещения не более 5 мкВ. Увеличение напряжения смещения на выходе ФНЧ объясняется наличием последовательно соединенных трех ОУ с коэффициентом усиления больше 1. Причиной такого расхождения значений напряжения смещения является различие входных токов этих ОУ. Входной ток смещения ADA4528-2 не более 0.8 мкА, а у AD8630 – 0.3 мкА.

А вот на дрейф напряжения смещения в основном влияет изменение входных токов ОУ при изменении температуры. Еще одним фактором, который влияет на этот параметр, является то, что ИМС AD8630, используемая для моделирования, содержит четыре ОУ в одном корпусе, а ADA4528-2 со-

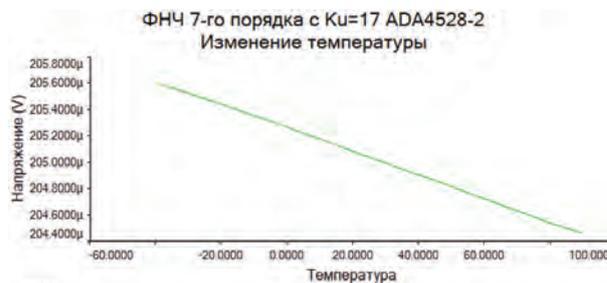


Рис. 19. Зависимость напряжения смещения на выходе ФНЧ с использованием ОУ ADA4528-2

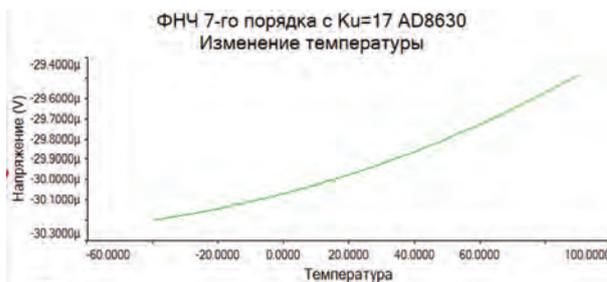


Рис. 20. Зависимость напряжения смещения на выходе ФНЧ с использованием ОУ AD8630

держит два ОУ и в ФНЧ используется две ИМС.

Если спроектировать ФНЧ на усилителях с единственным коэффициентом усиления, то получим схему, приведенную на рис. 21. Зависимость напряжения смещения на выходе фильтра с единственным коэффициентом усиления приведена на рис. 22.

Как следует из рис. 22 напряжение смещения меняется от 20,26 до 20,16 мкВ, т.е. на 0.1 мкВ. Казалось бы, что фильтр с единственным коэффициентом усиления предпочтительней, так как напряжение смещения в широком диапазоне температур не превышает 0,1 мкВ, в то время как в ФНЧ с коэффициентом усиления 24,8 дБ примерно 1 мкВ. Однако следует обратить внимание на АЧХ такого фильтра (рис. 23).

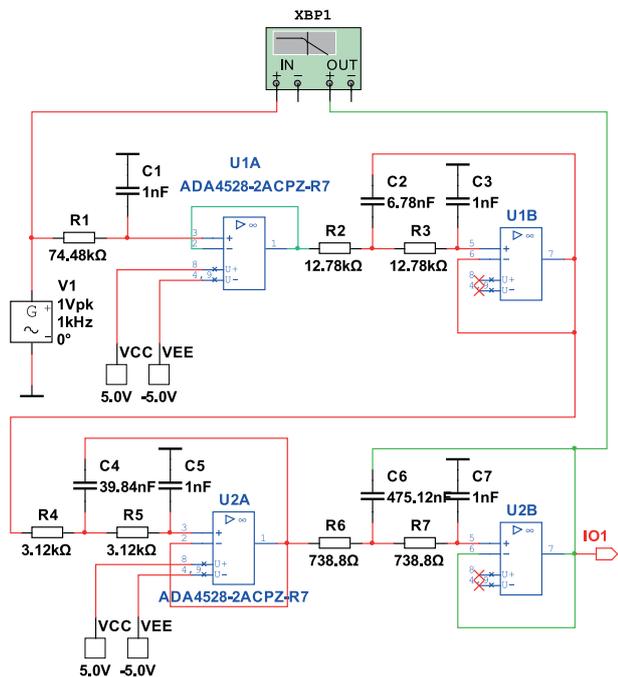


Рис. 21. Модель для исследования ФНЧ Чебышева 7-го порядка с единичным коэффициентом усиления

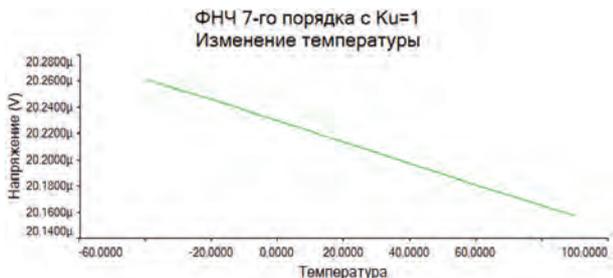


Рис. 22. Зависимость напряжения смещения на выходе ФНЧ с единичным коэффициентом усиления и использованием ОУ ADA4528-2

При установке компонентов с номиналами, полученными при расчете, неравномерность АЧХ составляет около 3 дБ. Это значит, что добротность

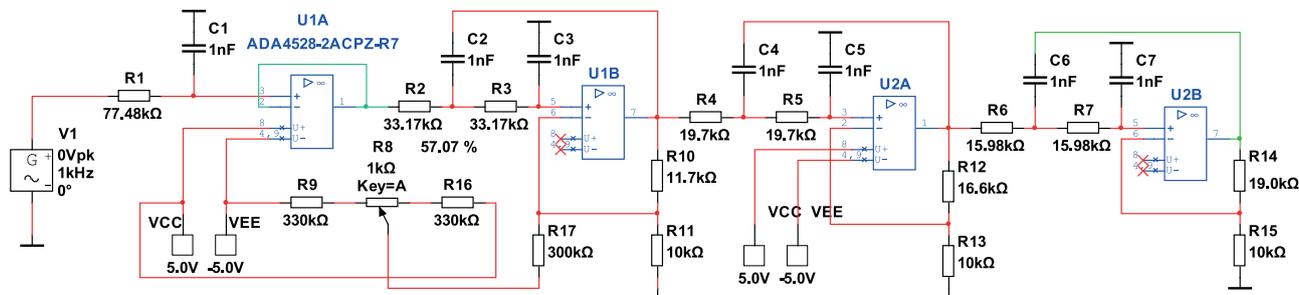


Рис. 24. Модель для исследования ФНЧ Чебышева 7-го порядка с компенсацией напряжения смещения

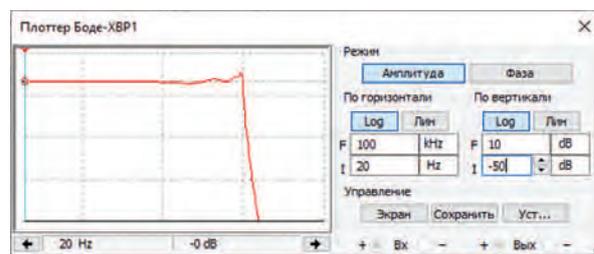


Рис. 23. АЧХ ФНЧ 7-го порядка с единичным коэффициентом усиления

последнего звена с самой высокой добротностью превышает требуемое значение. А так как в такой схеме и добротность и частота полюса связаны между собой согласно (2), то придется сделать несколько итераций для получения требуемой добротности при сохранении частоты полюса неизменной. Эта процедура достаточно трудоемка.

Для схемы, представленной на рис. 17, эта задача решается достаточно просто – увеличением сопротивления резистора R14. А чтобы уменьшить напряжение смещения, достаточно ввести во втором звене дополнительно напряжение компенсации, как показано на рис. 24. Подстройка напряжения смещения осуществляется потенциометром R8. Подключение источника напряжения компенсации через резистор R17 с большим сопротивлением к инвертирующему входу ОУ U1B позволяет установить напряжение смещения на выходе, близкое к нулю и такая цепь не оказывает влияния на добротность второго звена.

На рис. 25 приведена зависимость напряжения смещения от температуры для модели на рис. 24. В диапазоне изменения температуры от -40 до 90 °С напряжение смещения на выходе меняется от 0 до 1.2 мкВ. При использовании ОУ AD8630 изменение напряжения смещения (рис. 26) составило 0.65 мкВ в этом же диапазоне температур.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что наиболее существенным фактором, влияющим на изменение напряжения смещения, является изменение входного тока при изменении температуры. К сожалению, не для всех ОУ в технической документации приводятся графики зависимости входного тока от температуры и поэтому достаточно сложно выбрать ИМС для реализации фильтров нижних частот. Поэтому при выбо-

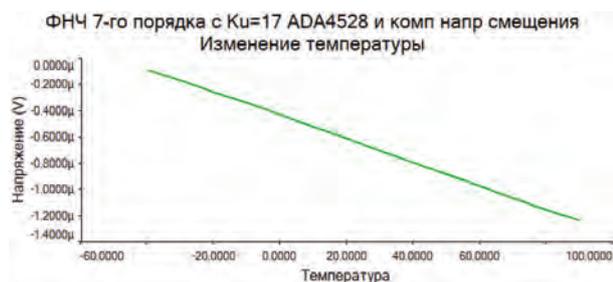


Рис. 25. Зависимость напряжения смещения на выходе ФНЧ с использованием ОУ ADA4528-2 и компенсацией напряжения смещения

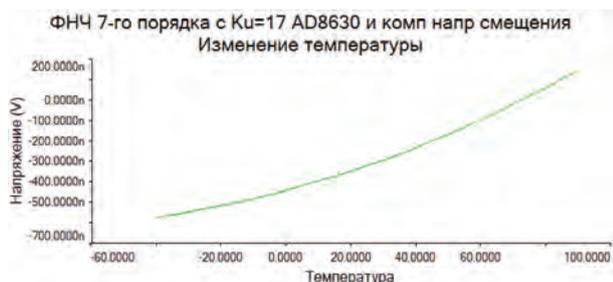


Рис. 26. Зависимость напряжения смещения на выходе ФНЧ с использованием ОУ AD8630 и компенсацией напряжения смещения

ре ОУ следует в первую очередь оценивать дрейф напряжения смещения на входе усилителя. Так для ОУ AD8630 дрейф напряжения смещения составляет $0.002 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$, а для ADA4528-2 – $0.015 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ и, как следствие, значительно большее изменение напряжения смещения на выходе фильтра в широком диапазоне изменения температуры.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. При проектировании активных RC-фильтров с низким (нулевым) смещением целесообразно использовать классический подход, т.е. использовать звенья второго и первого порядков на основе источников напряжения, управляемых напряжением.
2. При использовании программ автоматическо-

го проектирования фильтров следует ограничиться определением порядка фильтра и нахождения параметров звеньев фильтра – частот полюсов и их добротностей, а выбор звеньев и расчет номиналов элементов выполнить в ручном режиме.

3. При выборе звеньев второго порядка предпочтительно выбирать звенья с независимой регулировкой частоты полюса и добротности. Это значительно облегчает процесс настройки фильтров и позволяет выбирать для реализации звена одинаковые емкости конденсаторов.

4. При выборе операционных усилителей для реализации фильтров следует учитывать не только напряжение смещения и его дрейф от температуры, а и изменение входного тока от температуры. При отсутствии данных о зависимости входного тока от температуры целесообразно провести моделирование фильтра или провести натурный эксперимент.

5. При выборе звеньев фильтров второго порядка следует учитывать рекомендуемую для них максимальную добротность. Звенья с добротностью до 10 могут быть реализованы в схеме с одним операционным усилителем. Для звеньев с требуемой добротностью более 10 следует использовать схемы с двумя или тремя ОУ.

6. Звено первого порядка может располагаться как на входе, так и на выходе фильтра, но обязательно должно подключаться к последующему каскаду через повторитель или усилитель напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Шах Почему шум опорного источника напряжения имеет значение при разработке прецизионных измерительных систем? / Электронные компоненты и системы, №2, 2020. с. 39-47.
2. Мигулин И.Н. Усилительные устройства на транзисторах (проектирование) / Мигулин И.Н., Чаповский М.З. – Изд. 2-е, исправленное и дополненное. “Техніка”, 1974. – 428 с.
3. Змий Б. Построение фильтровых устройств на ARC-звеньях третьего порядка / Борис Змий, Роман Антипенский, Александр Ананьев // Компоненты и технологии, 2009, №10. с. 115-118.
4. В. Макаренко О выборе аппроксимации и расчете параметров активных фильтров, часть 1 // Электронные компоненты и системы, №1, 2013. с. 50-59. url: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/V.Makarenko_Active%20Filters,%20part%201_EKIS_1_2013-3.pdf.

5. В. Макаренко О выборе аппроксимации и расчете параметров активных фильтров, часть 2 // Электронные компоненты и системы, №2, 2013. с. 49-53. url: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/V.Makarenko_Active%20Filters_part2_EKIS_2_2013-2.pdf.
6. В. Макаренко О выборе аппроксимации и расчете параметров активных фильтров, часть 3 // Электронные компоненты и системы, №3, 2013. с. 46-50. url: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/V.Makarenko_Active%20Filters,%20part%203_EKIS_3_2013-3.pdf.
7. Мошиц Г. Проектирование активных фильтров /

- Мошиц Г., Хорн П.; [перевод с английского М. Н. Микшиса и И. Н. Теплюка]. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
8. Справочник по расчету и проектированию АРС-схем / [Букашкин С. А., Власов В. П., Змий Б.Ф. и др.]; под ред. А. А. Ланнэ. – М.: Радио и связь, 1984. – 368 с., ил.
9. <http://www.tucows.com/thankyou.html?swid=1170907>
10. <http://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/filter-designer.html>.
11. <https://www.analog.com/designtools/en/filterwizard/>
12. <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11096>

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ЗВУКОВЫХ ФАЙЛОВ В ПРОГРАММЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ LTSPICE

В статье риведена краткая информация о возможностях программы LTSpice по обработке и формированию звуковых файлов. Приведены примеры формирования, сохранения и чтения многоканальных звуковых файлов.

В. Макаренко

GENERATION AND PROCESSING OF SOUND FILES IN THE LTSPICE SIMULATION PROGRAM

Abstract – The article provides brief information about the capabilities of the LTSpice program for processing and generating sound files. Examples of the formation, storage and reading of multi-channel audio files are given.

V. Makarenko

Программа моделирования LTSpice от компании Analog Devices позволяет не только осуществлять моделирование различных устройств, но и предоставляет пользователю возможность создавать и сохранять на диске многоканальные звуковые файлы, а также осуществлять обработку звуковых файлов, считанных с диска. Единственным ограничением является формат звуковых файлов. Файлы должны быть записаны в формате wav.

Напомним некоторые моменты по работе со звуковыми файлами, приведенными в [1]. В качестве источника звуковых файлов для записи на диск может служить как источник тока, так и источник напряжения. Для того, чтобы прочитать wav-файл, с дивка следует воспользоваться командой `lxxx n1 n2 wavefile=<имя файла> [chan=<nnn>]`.

В этом режиме LTSpice позволяет использовать wav-файл (файл с расширением wav) как источник входного сигнала. Если wav-файл находится в директории LTSpice, то достаточно указать только его имя. Если файл находится в другом месте, то требуется указать полное имя, содержащее абсолютный путь к файлу. Имя файла следует заключить в двой-

ные кавычки, если в нем или в его пути присутствуют пробелы. Файл может содержать от 0 до 65 536 каналов. В параметре `chan` необходимо задать используемый канал. По умолчанию используется первый (левый) канал, имеющий номер 0. Канал номер 1 соответствует правому каналу на выходе звуковой карты ПК. Полный размах токового сигнала, записанного в wav-файл, лежит в диапазоне от -1 до 1 А.

Для иллюстрации этого режима создадим звуковой сигнал с помощью источника тока и запишем его в файл. Для этого используем модель, показанную на рис. 1. Для записи сформируем ЧМ-сигнал с несущей частотой 3 кГц и частотой модулирующего сигнала 200 Гц. Командная строка для создания звукового файла будет выглядеть следующим образом

.WAVE n:\output1.wav 16 44.1K V(1).

В этой строке:

- `.WAVE` – команда для создания файла с расширением wav
- `n:\output1.wav` – путь и имя сохраняемого файла
- `16` – число разрядов квантования при аналого-

цифровом преобразовании

- 44.1K – частота дискретизации
- V(1) – точка (узел) схемы с которой снимается звуковой сигнал (рис. 1).

.WAVE n:\output1.wav 16 44.1K V(1)

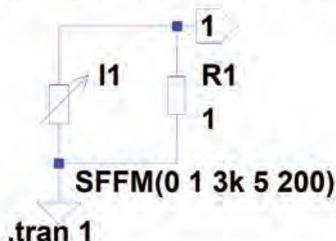


Рис. 1. Модель для формирования и записи звукового файла с помощью источника тока

Для создания этой команды необходимо нажать на пиктограмму Text на панели управления программы и в открывшемся окне Edit Text on the Schematic (рис. 2) ввести необходимые записи. Следует отметить этот текст как Spice directive, иначе он будет восприниматься программой как комментарий и не вызовет никаких действий. Аналогичную процедуру можно проделать, нажав самую кнопку на панели управления SPICE Directive, которая находится правее кнопки Text.

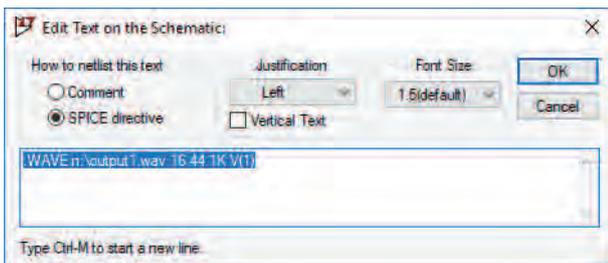


Рис. 2. Окно Edit Text on the Schematic

Записанный файл output1.wav для контроля был воспроизведен и прослушан музыкальным проигрывателем Windows.

Для записи звукового файла допускается задавать число разрядов квантования в диапазоне от 1 до 32. Частота дискретизации может задаваться в диапазоне от 1 Гц до 4 294 967 295 Гц. Число узлов схемы (число каналов) может быть задано равным от 1 до 65 535. При этом для каждого узла схемы создается независимый канал в wav-файле.

Следует помнить, что диапазон преобразуемых в цифровой код значений тока сигнала лежит в диапазоне ±1 А или ±1 В в зависимости от того, какой

параметр преобразуется.

Для прослушивания записанных файлов с помощью звуковой карты ПК необходимо, чтобы частота дискретизации была равна одному из указанных значений 11.025, 22.05 или 44.1 кГц. Эти частоты поддерживаются любыми звуковыми картами. Если звуковая карта вашего ПК поддерживает частоты 48, 96 и 192 кГц, то их тоже можно задавать. А число каналов для прослушивания следует задавать не более двух.

Чтобы воспроизвести wav-файл, необходимо в источнике тока выбрать режим PWL FILE, после чего станет активной кнопка BROVSE (рис. 3). После нажатия на нее откроется окно с директорией, где находится файл модели LTspice.

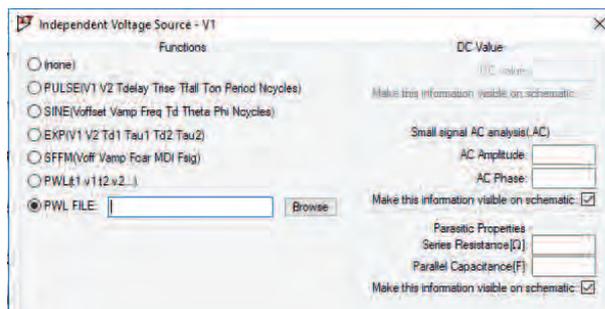


Рис. 3. Окно выбора режима работы с wav-файлом

Чтобы найти wav-файл необходимо открыть директорию, в которой записан звуковой файл, и в нижней правой части окна выбрать режим All Files (*.*) . По умолчанию установлен режим ASCII Files (*.txt), как показано на рис. 4. После выбора файла на рабочем листе схемы появится командная строка PWL file="Звук 1.wav", где Звук 1 – имя звукового файла, выбранного для проверки работы в этом режиме. В качестве звукового файла выбран музыкальный файл одного из эстрадных исполнителей.



Рис. 4. Фрагмент окна поиска wav-файла

Для того, чтобы программа смогла воспроизвести форму сигнала этого файла и не появилось сообщение об ошибке, необходимо отредактировать командную строку и заменить текст PWL file на wavefile (рис. 5). Номер канала можно не указывать. По умолчанию будет воспроизводиться левый канал. Форма напряжения на выходе генератора V1 пока-