

Белик Владимир Андреевич

**АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ С ОДНОПОЛЯРНЫМ
ПИТАНИЕМ ДЛЯ БЛОКА ВВОДА-ВЫВОДА АНАЛОГОВЫХ
СИГНАЛОВ**

Доклад посвящен разработке активного фильтра нижних частот для блока ввода-вывода аналоговых сигналов. Рассмотрены вопросы проектирования и изготовления фильтров 2-го, 4-го и 8-го порядка, а также результаты измерения их характеристики.

Фильтр нижних частот, нелинейные искажения, амплитудно-частотная характеристика.

Belik Vladimir Andreevich

ACTIVE LOW-PASS FILTER WITH UNIPOLAR POWER SUPPLY FOR THE ANALOG SIGNALS I/O UNIT

The report is devoted to the development of an active low-pass filter for the analog signal input/output unit. The issues of designing and manufacturing filters of the 2nd, 4th and 8th order, as well as the results of measuring their characteristics, are considered.

Low-pass filter, nonlinear distortion, amplitude-frequency response.

Введение

В рамках проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB», выполняемого при поддержке Передовой Инженерной школы (ПИШ) ЮФУ, одной из центральных задач является проектирование активных фильтров нижних частот (ФНЧ) для аналого-цифрового (АЦП) и цифроаналогового (ЦАП) преобразователей.

ФНЧ — это устройство, которое эффективно пропускает спектральные составляющие сигнала ниже некоторой частоты (частоты среза) и подавляет более высокочастотные составляющие. Степень подавления зависит от порядка фильтра [1].

Основная часть

При работе блока ввода-вывода максимальная частота дискретизации сигнала равна 384 кГц, так как блок работает со стандартным драйвером устройств USB Audio Class 2 [2]. В этой связи частота среза фильтра выбрана в соответствии с теоремой Котельникова [3]: 192 кГц. Для снижения требований к прямоуглольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) частота дискретизации АЦП и ЦАП повышена до 500 кГц (тракт цифровой обработки сигналов содержит преобразователь частоты дискретизации).

В соответствии с рекомендациями из работы [4] по полупроводниковой схемотехнике была выбрана оптимальная схема активного звена 2-го порядка – схема с многопетлевой отрицательной обратной связью, приведенная на рис. 1.

Передаточная функция активного ФНЧ 2-го порядка с многопетлевой обратной связью определяется выражением:

$$A(s_n) = \frac{R_2/R_1}{1 + w_0^2 + C_1 \cdot (R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}) \cdot s_n + w_0^2 + C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot s_n^2} \quad (1)$$

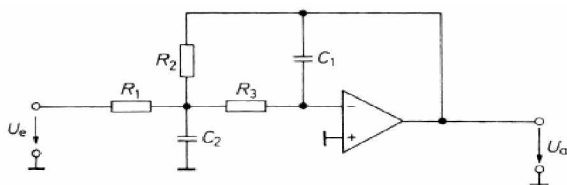


Рис. 1. Схема активного ФНЧ 2-го порядка с многотермальной обратной связью

Ряды номиналов E24 и E96 для резисторов более доступны, чем для других радиоэлементов, поэтому при расчете фильтра сначала выбирают номиналы конденсаторов и затем рассчитывают сопротивления резисторов. Для этого решим уравнения относительно сопротивлений и получим:

$$R_2 = \frac{a_1 C_2 \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4 + C_1 + C_2 + b_1 + (1 - A_0)}}{4 + \pi^2 + f_g^2 + C_1 + C_2} \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{-b_1}{A_0} \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{b_1}{4 + \pi^2 + f_g^2 + C_1 + C_2 + R_2} \quad (4)$$

Чтобы операционный усилитель мог считаться идеальным, на частоте среза фильтра он должен иметь высокий коэффициент петлевого усиления. По этой причине даже при низких частотах среза требуются быстродействующие операционные усилители. Для частоты среза 192 кГц этому требованию удовлетворяют такие распространенные модели операционных усилителей, как LM358[5] и NE5532[6].

Выбрав из таблицы, в которой рассчитаны коэффициенты передаточной функции а и b, можно синтезировать фильтры различного порядка и типа (Чебышева с разной неравномерностью АЧХ в полосе пропускания, Баттерворта, Бесселя и др.).

На начальном этапе работы был выполнен синтез ФНЧ 2-го порядка и его моделирование в среде Multisim. Был получен ФНЧ 2 порядка с частотой среза, близкой к заданным 192 кГц. Для блока ввода-вывода желательно обеспечить возможность работы с постоянными напряжениями и токами, но однополярное питание ОУ не позволяет фильтру пропускать постоянный ток, так как требует включения разделительных конденсаторов на входе и выходе каждого каскада. Двуполярное питание организуется при помощи микросхемы ICL7660 [7], принципиальная схема конвертора постоянного напряжения показана на рис. 2.

Путем каскадного соединения двух ФНЧ 2-го порядка можно получить ФНЧ 4-го порядка. При исследовании формы сигнала на выходе собранного фильтра 4-го порядка было обнаружено, что при двуполярном питании сигнал на выходе фильтра имеет существенные нелинейные искажения [8] (рисунок 3, А).

Добавление подтягивающих (pull-down) резисторов номиналом 500 Ом между выходом каждого каскада и минусом питания решило данную проблему [9] (рис. 3, б).

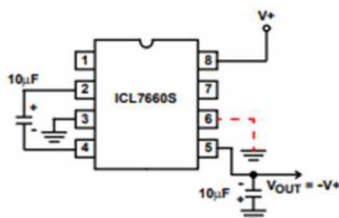


Рис. 2. Типовая схема конвертора постоянного напряжения на микросхеме ICL7660S

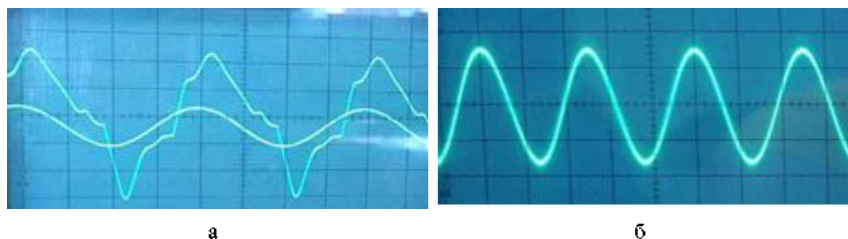


Рис. 3. Устранение переходных искажений. Сигналы на входе (синусоида) и выходе (искаженное колебание) фильтра без подтягивающих резисторов (а). Сигнал на выходе фильтра после подключения подтягивающих резисторов (нет видимых нелинейных искажений)

Отсутствие нелинейных искажений позволяет измерить амплитудно-частотную характеристику. АЧХ, полученная с помощью Multisim, и АЧХ, измеренная экспериментально, представлены на рис. 4.

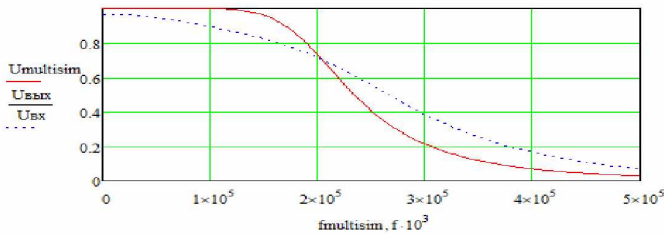


Рис. 4. АЧХ фильтра 4-го порядка: модель, созданная в пакете Multisim (пунктир) и результат измерений (сплошная линия)

Конечной задачей было синтезировать фильтр 8-го порядка. его можно получить путём каскадного соединения четырех фильтров 2-го порядка, которые могут быть реализованы на одной микросхеме LM324 Сравнение АЧХ, полученных по коэффициентам передаточной функции, в среде разработки Multisim и экспериментально, приведено на рис. 5.

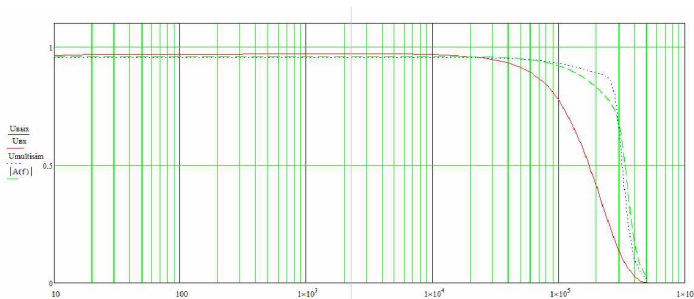


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ 8 порядка: измеренная экспериментально, полученная в программе Multisim и полученная из передаточной функции

Частота среза, определенная по экспериментальной АЧХ, примерно равна 100 кГц, отличия от теоретической частоты среза объясняются отклонениями параметров элементов фильтра от номиналов. Расчет фильтра был повторен для завышенной частоты среза, чтобы экспериментальная частота среза получилась нужной (ближе к требуемым 192 кГц).

Было установлено, что в собранном фильтре микросхема инвертора напряжения работает в режиме, близком к перегрузке, что не позволит в дальнейшем от одного инвертора питать сразу несколько фильтров. Было

принято решение перейти к схеме с однополярным питанием и смещением по постоянному току, представленной на рис. 6. АЧХ фильтров, собранных на беслаечной макетной плате и на печатной плате представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

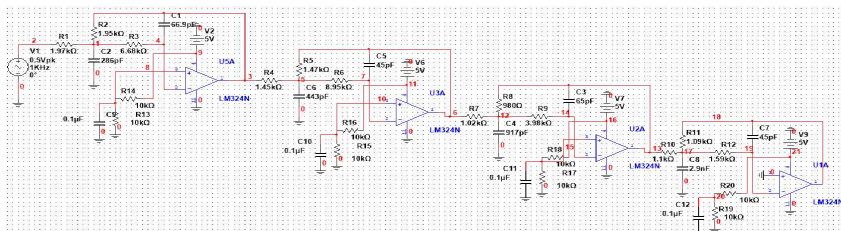


Рис. 6. Принципиальная схема ФНЧ 8 порядка с однополярным питанием

Трассировка платы была выполнена с помощью программного обеспечения Sprint layout [10], рисунок дорожек представлен на рис. 9. Плата была изготовлена с применением термотереноса тонера.

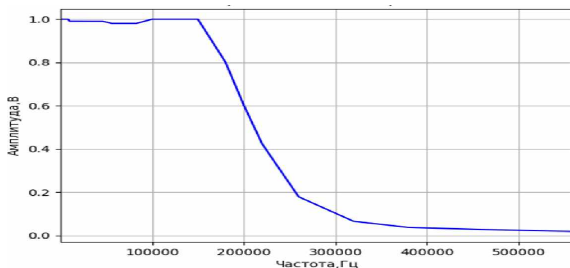


Рис. 7. АЧХ ФНЧ 8 порядка, собранного на макетной плате

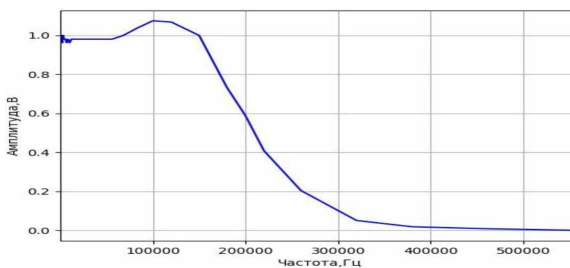


Рис. 8. АЧХ ФНЧ 8 порядка, собранного на печатной плате

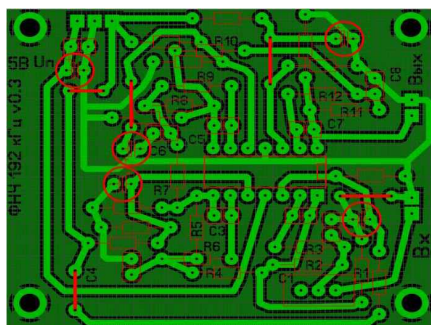


Рис. 9. Разработанная печатная плата ФНЧ 8 порядка

Выводы

В рамках проекта «Блока-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB» был разработан аналоговый активный ФНЧ 8-го порядка для применения в составе АЦП и ЦАП. На практике были закреплены навыки работы с операционными усилителями, освоены методы проектирования активных фильтров от 2-го до 8-го порядка, а также приемы изготовления печатных плат. В дальнейшем планируется доработка фильтра и создание двух его специализированных версий: для работы с АЦП и с ЦАП.

Работа выполнена при материальной поддержке Переловой инженерной школы ЮФУ, грант 4L/22-04-ПИШ СТУД-04.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фолкенберри Л.М.* Применения Операционных Усилителей И Липейных Ис. Автор: Луис М. Фолкенберри Перевод С Английского Л.М. Наймарка, МОСКВА: ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»: 1985
2. Audio Devices Rev. 2.0 and Adopters Agreement Режим доступа: <https://www.usb.org/document-library/audio-devices-rev-2.0-and-adopters-agreement> (дата обращения: 24.05.2024)
3. *Гоноровский П.С.* Радиотехнические цепи и сигналы 4 изд., Москва: Радио и связь, 1986 г.
4. *Титце К., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника Том 1-12 изд., Москва: ДМК-828 с. 2007 г.

5. Single Supply Dual Operational Amplifiers LM258, LM358, LM358A, LM358E, LM2904, LM2904A, LM2904E, LM2904V, NCV2904, © Semiconductor Components Industries, LLC, 2019 www.onsemi.com
6. Single Supply Quad Operational Amplifiers LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902, © Semiconductor Components Industries, LLC, 2019 www.onsemi.com
7. ICL7660S, ICL7660A, Copyright Intersil Americas LLC 1999, 2004, 2005, 2008, 2011, 2013.
8. *Брюс Картер и Рон Манчини*, Операционные усилители для всех, перевод с английского к.т.н. А.Н.Работзея, Москва издательский дом Додэка-XXI, 2011.
9. Power Amplifier Seminar, John Brown, Month, 200x, Texas Instruments
10. Проектирование печатных плат в программе Sprint Layout 6, М.Г. Царёв, Ульяновск, 2016. – 97 с.: ил.

Белик Владимир Андреевич – студент кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления ЮФУ, техник-проектировщик Передовой инженерной школы Адрес: Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефоны: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 доб. 30109; +7 (8634) 68-08-90 доб. 30109 email: vbeli@sfedu.ru

Belik Vladimir Andreevich – student, Department of antennae and radio transmitting devices, development engineer of Leading engineer school, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: vbeli@sfedu.ru.