

Жебрун Евгений Андреевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: JackJK@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79614038879; кафедра систем автоматического управления; магистрант.

Zhebrun Eugeny Andreevich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: JackJK@mail.ru; 44 Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone. +79614038879; the department of automatic control systems; magister.

УДК 621.372.51

А.В. Золотарев

БЕЗДРЕЙФОВЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ СПЕКТРА С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТ

Рассмотрены принципы построения бездрейфового ограничителя спектра с расширенным диапазоном рабочих частот на базе суперемкости. Показана эффективность использования мультиференциальных операционных усилителей в структуре суперемкости для организации цепей собственной компенсации и минимизации параметрической чувствительности лестничных фильтров. Показано, что использование цепей собственной и взаимной компенсации позволяет получить высокие частотные свойства D-элементов. Для технологического процесса SGB25VD в КМОП-базисе разработана принципиальная схема лестничного фильтра третьего порядка, приведены результаты моделирования в среде Cadence Virtuoso.

Ограничитель спектра; фильтр нижних частот (ФНЧ); суперемкость; мультиференциальный операционный усилитель.

A.V. Zolotarev

DRIFT FREE SPECTRUM LIMITERS WITH WIDENED OPERATING FREQUENCY RANGE

The principles of constructing Drift free limiter range with extension-cussed a range of operating frequencies on the basis of superemkosti. The efficiency of using multiferentialnyh operational amplifiers in the structure for the organization of chains superemkosti own compensation and minimize the parametric sensitivity of the ladder filter. It is shown that the use of chains and their own mutual compensation allows high frequency properties of D-elements. To process in a CMOS SGB25VD basis developed a schematic diagram of a ladder filter of third order, the results of modeling in Cadence Virtuoso.

Spectrum limiter; low pass filter (LPF); supercapacitance; multidifferential operational amplifier.

Создание современных смешанных систем на кристалле (СнК), ориентированных на системы технической диагностики, предполагает разработку входных сложнофункциональных блоков (СФ блоков), обеспечивающих взаимодействие с внешними источниками первичной информации. Одна из наиболее передовых технологий, позволяющих не только значительно улучшить характеристики этих блоков, но и создавать устройства для решения задач в совершенно разных областях – микроэлектронные электромеханические системы (MEMS). Современные MEMS устройства фактически представляют собой результат трехмерной системной интеграции на одном общем носителе микроэлектронных схем и неэлектронных структурных элементов микроустройств, выполняющих сенсорные (измери-

тельные),信号обработывающие, актуаторные (исполнительные), дисплейные и управляющие функции. Таким образом, технология MEMS позволяет дополнять традиционную электронную схему датчиками и исполнительными механизмами, достигая тем самым интегрированности изготовления законченной системы. Важными областями применения MEMS являются техническая диагностика и автоматическое управление, на которые и ориентирована разработка СФ-блоков. Одним из базовых устройств таких блоков являются прецизионные ограничители спектра. Для обеспечения предельно низкой погрешности реализации в диапазоне рабочих частот используются лестничные фильтры нижних частот (ФНЧ) [1].

Основные параметры фильтров нижних частот. Особенность функций параметрических чувствительностей лестничных структур в широком диапазоне частот показывает, что влияние пассивных (частотоподающих) элементов приводит в основном только к смещению граничной частоты полосы пропускания, а доминирующими факторами, определяющими точность преобразования сигнала в полосе пропускания, являются активные элементы, в частности, операционные усилители (ОУ). Для существующих технологий эта проблема является доминирующей и определяет конечную эффективность лестничных ФНЧ в соответствующих СФ-блоках. В качестве базовых функциональных элементов активных лестничных ФНЧ используются нормальные D-элементы (суперемкости) [1], имеющие входную проводимость

$$Y_{ex_i} = p^2 C_1 C_2 R_2 k / R_i \tag{1}$$

где R_i – сопротивление источника сигнала; k – коэффициент пропорциональности.

Базовая схемотехника низкочувствительных D-элементов. Можно строго показать, что для минимизации параметрической чувствительности лестничных фильтров необходимо использовать суперемкости, реализованные на базе двух ОУ. В результате исследований было выяснено, что звено Антонио с емкостной нагрузкой (рис. 1) обладает потенциально более высокими частотными свойствами и низкой параметрической чувствительностью в сравнении с другими вариантами реализации D-элемента и позволяет исключить влияние ЭДС-смещения ОУ на дрейф нуля ФНЧ.

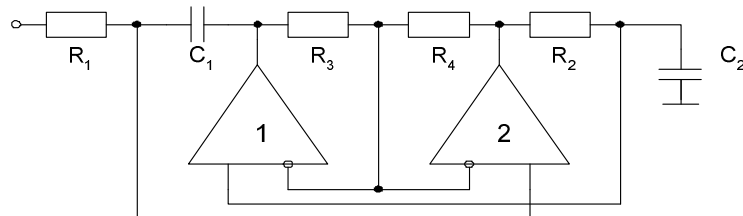


Рис. 1. Звено Антонио с емкостной нагрузкой

Верхний уровень динамического диапазона определится выражением

$$\frac{U_{ВЫХ\ MAX}}{\lambda}, (\lambda > 1) \text{ или } U_{ВЫХ\ MAX}, (\lambda \leq 1), \tag{2}$$

где $\forall j \lambda = \max \{ |F_j(j\omega)|_{MAX} / \eta \}, (\omega \in \Omega); |F_j(j\omega)|_{MAX}$ – максимальный коэффициент усиления схемы на выходе j-го ОУ.

Основное влияние на динамический диапазон схемы оказывают собственные шумы, которые обусловлены шумовыми свойствами резисторов и активных элементов. При параметрической оптимизации вклад резистивных элементов можно существенно уменьшить выбором их номиналов и типов. В этой связи при проектировании высококачественных схем необходимо сконцентрировать усилия на минимизации

вклада активных элементов в собственный шум схемы. Вклад j -го ОУ в собственный шум схемы определяется модулем локальной передаточной функции $H_j(p)$ с его входа к нагрузке. Локальные передаточные функции D-элемента $F_j(p)$ и $H_j(p)$ имеют вид

$$F_1(p) = \frac{p \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} - 1}{p^2 \tau_1 \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} + 1}, F_2(p) = - \frac{p \tau_2 + 1}{p^2 \tau_1 \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} + 1}; \quad (3)$$

$$H_1(p) = \frac{1-\beta}{\beta} \frac{p \tau_2 - 1}{p^2 \tau_1 \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} + 1}, H_2(p) = \frac{p \tau_1 \frac{1-\beta}{\beta} - 1}{p^2 \tau_1 \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} + 1}. \quad (4)$$

Анализ (3) показывает, что в общем случае, согласно (2), выходное напряжение одного из ОУ превосходит выходное напряжение фильтра в два раза, что и уменьшает верхнюю границу динамического диапазона схемы. В реальном ФНЧ высокого порядка его максимальное выходное напряжение многократно меньше выходного напряжения на выходах ОУ.

Структура цепей взаимной компенсации. Рассмотренная схема устойчивого D-элемента характеризуются невысокими частотными свойствами, сужающими область его практического использования. В соответствии с методикой построения цепей собственной и взаимной компенсации, описанной в [2], этот недостаток устраняется введением компенсирующего контура обратной связи. Для этого целесообразно использовать емкость C_1 , в этом случае дополнительные передаточные функции будут иметь следующий вид:

$$w_k(p) = F_{1C} = - \frac{1-\beta}{\beta} \frac{p^2 \tau_1 \tau_2 + p \tau_2}{p^2 \tau_1 \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} + 1}, \quad (5)$$

$$w_k(p) = F_{2C} = \frac{p^2 \tau_1 \tau_2 + p \left(\tau_2 - \frac{\tau_1}{\beta} \right)}{p^2 \tau_1 \tau_2 \frac{1-\beta}{\beta} + 1}, \quad (6)$$

и при выполнении условия $\beta = 0,5 (R_3 = R_4)$ вблизи частоты среза наблюдается собственная компенсация влияния площадей усиления ОУ на затухание, а относительное изменение частоты полюса примет вид

$$\delta \omega_p = \frac{\Delta \omega_p}{\omega_p} = - \frac{\omega_p}{2} \left(\frac{1}{\Pi_1} + \frac{1}{\Pi_2} \right) \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2} + \frac{\tau_2}{\tau_1}}, \quad (7)$$

где $\Pi_i = 2\pi f_i$. Таким образом, если при реализации дополнительного контура компенсирующей обратной связи выполнить условие

$$F_{qC} = F_{1C} + F_{2C} = \frac{-2 p \tau_1}{p^2 \tau_1 \tau_2 + 1}, \quad (8)$$

то действие контура будет направлено на взаимную компенсацию относительного изменения частоты полюса. На рис. 2 приведена принципиальная схема бездрейфового ФНЧ на базе звена Антонио с емкостной нагрузкой. В этой схеме дрейф нуля определяется входным током ($I_{ex_2}^+$) ОУ 2

$$U_{op} = I_{ex_2}^+ R_1 + I_{ex_4}^+ (R_1 + R_5) \quad (9)$$

и легко минимизируется схемотехникой его входного каскада.

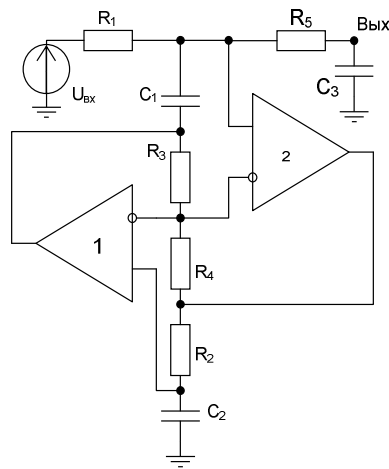


Рис. 2. Бездрейфовый ФНЧ без цепей взаимной компенсации

Можно показать, что условие компенсации влияния Π_1 и Π_2 при $\beta = 0,5$ имеет вид

$$\frac{\Delta B(p)}{B(p)} = \left[\frac{p^3 \tau_1 \tau_2}{\Pi_1} (1 - K_2) + \frac{p^3 \tau_1 \tau_2}{\Pi_2} (1 - K_1) + \frac{p^2}{\Pi_1} (\tau_1 (1 - K_2) + \tau_2 (1 + K_2)) + \frac{p^2}{\Pi_2} (\tau_1 (1 + K_2) + \tau_2 (1 - K_2)) + \frac{p}{\Pi_1} (1 + K_2) + \frac{p}{\Pi_2} (1 + K_1) \right], \quad (10)$$

где $B(p)$ – характеристический полином D-элемента, $\Delta B(p)$ – его приращение.

Использование МОУ в схемотехнике широкополосных D-элементов представляет возможность обеспечения высокого уровня собственной компенсации влияния Π_1 и Π_2 на «старшие» коэффициенты результирующей передаточной функции, которые в конечном итоге и определяют искажения АЧХ- и ФЧХ-фильтра в полосе пропускания, за счет выбора коэффициентов усиления K_1 и K_2 дополнительных дифференциальных входов введенных МОУ.

На рис.3 приведена принципиальная схема ФНЧ третьего порядка, в рамках которой D-элементы реализованы парой МОУ.

Здесь, при $K_0=1$, K_1 и K_2 определяют отношение коэффициента передачи МОУ по компенсирующим каналам к аналогичному коэффициенту основного канала. Как видно из (10), повышение уровня собственной компенсации влияния Π_1 и Π_2 возможно выполнением условия $K_1=K_2=1$, при этом в ФНЧ третьего порядка запас устойчивости обеспечивается влиянием R_5 , C_3 (τ_n непосредственно влияет на запас устойчивости).

Результаты моделирования. Для построения и исследования спроектированного ФНЧ в соответствии с методикой проектирования МОУ, предложенной в [3], а также с использованием принципов собственной и взаимной компенсации параметров ОУ, описанных в [4], на КМОП-транзисторах техпроцесса SGB25VD разработан мультидифференциальный ОУ с параметрами, приведёнными в табл. 1.

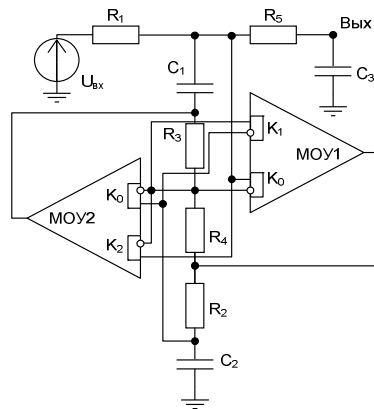


Рис. 3. Бездрейфовый ФНЧ на базе МОУ

Таблица 1

Характеристики спроектированного ОУ

K_D дБ	f_1 , МГц	$v_{\text{фронта}}^+$ В/мкс	$K_{\text{осси}}$ дБ	$f_{\text{гр_осси}}$ кГц	$E_{\text{см}}$, мкВ
140	260	340	150	14	3,5

Здесь: K_D – дифференциальный коэффициент усиления, f_1 – частота единичного усиления, $v_{\text{фронта}}^+$ – скорость нарастания напряжения, $K_{\text{осси}}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала, $f_{\text{гр_осси}}$ – граничная частота ослабления синфазного сигнала, $E_{\text{см}}$ – ЭДС смещения на выходе усилителя, $U_{\text{вых.мах}}^+$ – максимальное выходное напряжение.

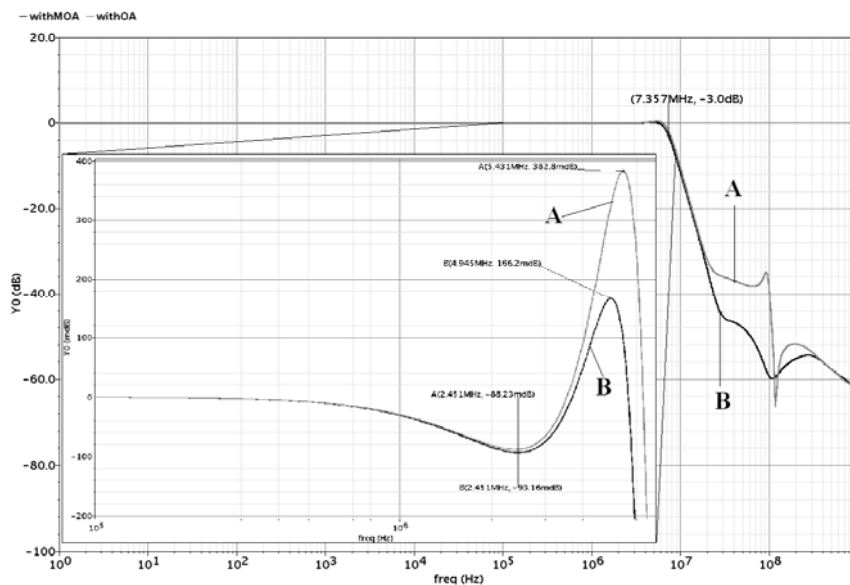


Рис. 4. АЧХ спроектированного ограничителя спектра: А – без компенсации; В – с цепями собственной компенсации

Применение этих МОУ в структуре рис. 3 позволило реализовать ФНЧ, амплитудно-частотная характеристика которого показана на (см. рис. 4) (кривые В). Здесь же показана АЧХ ФНЧ в полосе пропускания в сравнении с соответствующей характеристикой фильтра рис. 2 (кривые А). Отметим, что идеальный фильтр характеризуется равномерностью АЧХ в 0,1дБ. Как видно из графиков, неравномерность АЧХ с применением МОУ уменьшилась почти в 2 раза, а также усилилось подавление сигнала за полосой пропускания фильтра. Следует отметить, что эффективность компенсирующих обратных связей напрямую зависит от ширины полосы пропускания фильтра. Так, для полосы пропускания в 40 МГц неравномерность АЧХ за счет цепей компенсации уменьшится в 10 раз.

Таким образом, совокупность схемотехнических решений новых типов активных элементов и свойств структуры лестничных ФНЧ обеспечивает создание прецизионных ограничителей спектра с расширенным диапазоном частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коротков А.С.* Микроэлектронные аналоговые фильтры на преобразователях импеданса. – СПб.: Наука, 1999. – 416 с.
2. *Крутчинский С.Г.* Основы схемотехнического проектирования активных фильтров ВЧ- и СВЧ-диапазонов // Сборник трудов ВНТК «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». – 2008. – С. 348-353.
3. *Крутчинский С.Г. Старченко Е.И.* Мультидифференциальные операционные усилители и прецизионная микросхемотехника // Сборник трудов МНПС «Проблемы современной аналоговой микросистемотехники». – 2003. – С. 125-137.
4. *Krutchinskiy S.G., Tsibin M.S., Titov A.E.* Common-mode signal minimization in differential stage. EWDTS-2010, St.Petersburg, Russia, 2006. – P. 242-245.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Золотарев Антон Владимирович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: lined@mail.ru; 347900, г. Таганрог, 3-я линия, 91; тел.: 88634371773; магистрант.

Zolotarev Anton Vladimirovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: lined@mail.ru; 91, 3rd line, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371773; magister.

УДК 621.372

Г.А. Свизев

ЭКОНОМИЧНЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СМЕШАННЫХ СнК И СвК

Сформулированы комплексные требования к экономичным сенсорным интерфейсам нового поколения, ориентированным на взаимодействие с современными прецизионными датчиками. Обоснована перспективность и показана возможность интеграции интерфейсов в смешанные СнК и СвК для локальных систем управления и диагностики. Освещены структурные и схемотехнические подходы, обеспечивающие удовлетворение предъявленных к интерфейсам требований. Представлены результаты моделирования разработки.

Прецизионный экономичный КМОП аналоговый сенсорный интерфейс; смешанные СнК и СвК; МЭМС, прецизионный широкополосный мультидифференциальный ОУ; ограничитель спектра; оценка производных.