

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
ГЛАВА 1 Динамические погрешности ARC ограничителей спектра, включаемых на входе аналого-цифровых преобразователей в устройствах автоматического управления и обработки радиотехнических сигналов	12
1.1 Фильтры Чебышева.....	13
1.2 Фильтры Баттерворта	23
1.3 Фильтры Бесселя	32
1.4 Режекторные фильтры.....	39
1.5 Выводы к главе 1	49
ГЛАВА 2 Элементная база микроэлектронных ARC- и ARLC-фильтров	51
2.1 Резисторы, конденсаторы, интегральные индуктивности и КМОП ключи.....	51
2.2. Основы схемотехники повторителей напряжения.....	55
2.3 Малошумящие и специальные операционные усилители для антиалайзинговых ФНЧ.....	70
2.3.1 Низкотемпературные CJFET ОУ без токовых зеркал.....	70
2.3.2 Операционные усилители на биполярных транзисторах с малым уровнем систематической составляющей напряжения смещения нуля.....	74
2.4 Выводы к главе 2	86
ГЛАВА 3 Активные RC-фильтры семейств Саллена-Ки и Рауха с перестраиваемыми параметрами.....	88
3.1 Классические схемы ARCФ Саллена-Ки	88
3.2 Обобщенная структура ARCФ второго порядка с независимой настройкой частоты полюса, добротности полюса и коэффициента передачи	96
3.3 Фильтры нижних частот	99
3.4 Полосовые ARCФ второго порядка.....	124
3.5 Фильтры верхних частот	156
3.6 Режекторные ARC фильтры на повторителях напряжения.....	168
3.7 Фильтры Рауха	176
3.8 Выводы к главе 3	184
ГЛАВА 4 Активные RLC-фильтры с независимой подстройкой основных параметров.....	185
4.1 Проектирование перестраиваемых RLC-фильтров для программно-конфигурируемых и адаптивных систем связи нового поколения	185
4.2. Фильтры нижних частот	193
4.3 Фильтры верхних частот	198

4.4 Полосовые фильтры	203
4.5 Режекторные фильтры.....	209
4.6 Выводы к главе 4.....	211
ГЛАВА 5 ARC фильтры высокого порядка с перестраиваемыми параметрами	212
5.1 Семейство полосовых фильтров	212
5.2 Режекторные ARC-фильтры с регулируемой полосой задерживания и управляемой неравномерностью АЧХ.....	223
5.2.1 Варианты построения режекторных фильтров	230
5.3 Выводы к главе 5.....	238
ГЛАВА 6 Активные RC и RLC фильтры на основе широкополосных каскадов с минимальным количеством транзисторов	240
6.1 СВЧ ARC полосовой фильтр	240
6.2 RLC полосовой фильтр КВЧ диапазона	243
6.3 Полосовой фильтр с неинвертирующим усилителем тока	245
6.4 СВЧ полосовой фильтр на биполярных p-n-p транзисторах	246
6.5 Избирательный усилитель на SiGe n-p-n транзисторах техпроцесса SGB25VD.....	248
6.6 Низковольтный избирательный усилитель на комплементарных биполярных транзисторах	249
6.7 Управляемый полосовой RC фильтр на основе усилителя Гильберта.....	250
6.8 Полосовой фильтр на основе токового зеркала	251
6.9 Выводы к главе 6.....	253
ГЛАВА 7 Дискретно-аналоговые и цифровые фильтры.....	254
7.1 Методика моделирования дискретно-аналоговых фильтров	254
7.2 Дискретно-аналоговый фильтр низких частот на переключаемых конденсаторах	263
7.3 Цифровые фильтры с независимой настройкой основных параметров	268
7.4 Выводы к главе 7.....	270
Заключение	271
Библиографический список.....	275
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Семейство активных RC-фильтров второго порядка (ФНЧ, ФВЧ, ПФ) с независимой подстройкой основных параметров.....	309

ВВЕДЕНИЕ

Устройства частотной селекции оказывают существенное влияние на работу многих радиотехнических и измерительных систем. Данный класс электронной компонентной базы (ЭКБ) продолжает развиваться в направлении ВЧ и СВЧ микросхемных изделий и востребован при проектировании сложно-функциональных блоков (IP-модулей) перестраиваемых ВЧ фильтров нижних частот для программно-конфигурируемых радиосистем связи нового поколения. Растущий спрос на мультистандартные приложения резко увеличил потребность в программно-управляемых радиостанциях (SDR). Архитектуры SDR основываются на перестраиваемых ФНЧ, которые необходимы при выборе канала и подавлении внеполосного сигнала (Bluetooth, CDMA, WCDMA, WPAN, ZigBee, WiMax и др.). Без данного класса микросхем невозможно обеспечить программно-управляемую высокоскоростную связь и передачу цифровой информации. Перестраиваемые ФНЧ являются обязательным элементом новых и перспективных радиопередатчиков с АЦП и ЦАП, например AD9125 (Analog Devices), 5101HB045 (АО «ПКК «Миландр»). Зарубежные аналоги фильтров, обеспечивающие перестройку ФНЧ в диапазоне 1-60 МГц, - это микросхемы ADRF6518, ADRF6516, ADRF6510, HMC1023, HMC900, HMC960, SKY73202. Они включают модули цифрового управления, регулируемые усилители с цифровым управлением, систему автоматической калибровки частоты среза, имеют энергосберегающие режимы и управление 6-разрядным кодом. Данный класс ЭКБ востребован многими российскими предприятиями.

В этой связи в монографии рассматриваются схемотехнические методы проектирования активных RC и RLC фильтров с перестраиваемыми параметрами на новой и перспективной электронной компонентной базе и даются рекомендации по их практической реализации.

Глава 1. Показано, что динамические погрешности полосовых фильтров (ПФ) Чебышева, Баттерворта и Бесселя n -го порядка, включаемых на входе АЦП в структуре аналогово-цифровых систем управления, определяются динамической погрешностью входящего в ПФ фильтра нижних частот. Полученные оценки времени задержки сигнала для ПФ Чебышева, Баттерворта и Бесселя позволяют определить максимальную динамическую погрешность ПФ при изменении порядка фильтра от 1 до 3.

Результаты исследования рекомендуют использовать при проектировании быстродействующих аналогово-цифровых систем автоматического управления, устройств радиотехники и связи, в которых на входе АЦП включаются широкополосные ограничители спектра сигнала датчиков, содержащего посторонние шумы и помехи. Так, динамические погрешности сетевых фильтров измеряются сотнями и тысячами процентов, что не

На рисунке 1.7 приведены временные диаграммы переходных процессов в пяти ПФ2 при заданных значениях ω_{SB}/ω_{SH} , полученные в результате моделирования в прикладной программе Micro Cap 12.

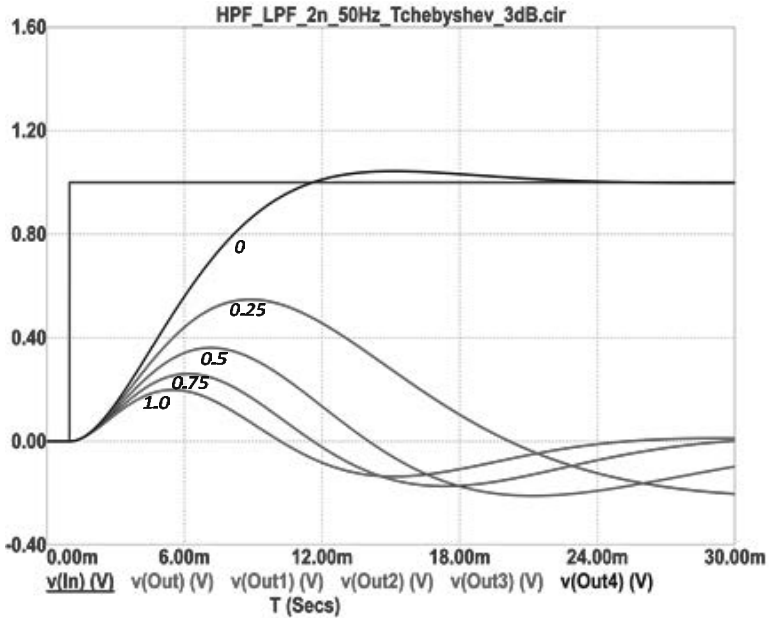


Рисунок 1.7. Временные диаграммы переходных процессов в ПФ2 Чебышева для пяти значений ω_{SB}/ω_{SH} (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0).

Для получения аналитического выражения времени задержки ПФ2 ($t_{\text{зад}}(2)$) была выбрана, также как и для ПФ1, экспоненциальная функция (отрицательная экспонента) с коррекцией аналитического выражения с помощью синусоидальной функции:

$$t_{\text{зад}}(2) = t_0(2) \cdot \left(e^{-\frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}}} - 0,1 \sin \pi \cdot \frac{\omega_{SB}}{\omega_{SH}} \right). \quad (1.10)$$

Результаты измерений и расчетов для ПФ2 сведены в таблицу 1.2.

дающей индуктивности L1 и ёмкости частото-задающего конденсатора C1. Предлагаемая архитектура фильтра рекомендуется для применения в адаптивных радиотехнических и измерительных системах. За счет соответствующего выбора параметров активных и пассивных элементов можно обеспечить работу RLC-фильтра как на низких, так и на высоких частотах.

4.4 Полосовые фильтры

На рисунке 4.17 представлена схема предлагаемого в [304, 305] RLC ПФ, в которой, в отличие от [306] предусмотрено введение двух дополнительных повторителей напряжения VF3 и VF4, а также соответствующих резистивных делителей R3, R6 и R5, R4.

Диапазон рабочих частот, статические и динамические параметры RLC-фильтра на рисунке 4.17 зависят от свойств применяемых повторителей напряжения. Практическая реализация полосовых RLC-фильтров на повторителях напряжения имеет, в отличие от RLC ПФ на операционных усилителях, важное преимущество – схемы VF могут выполняться в виде простейших и более широкополосных эмиттерных или истоковых повторителей, реализуемых на одном или нескольких транзисторах (BJT, CMOS, КНИ и т.д.). Как следствие, такие активные элементы отличаются более широким диапазоном рабочих частот и малым, в сравнении с ОУ, энергопотреблением.

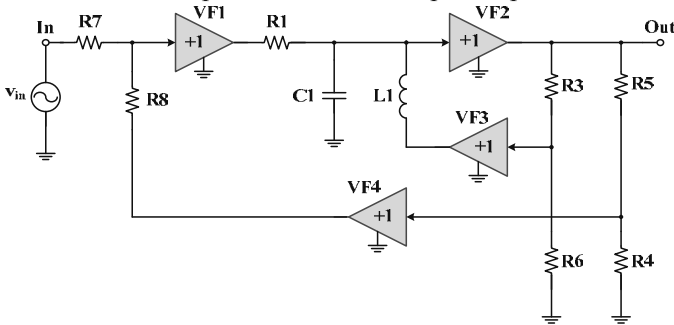


Рисунок 4.17. Схема полосового RLC-фильтра с независимой подстройкой основных параметров [305]

Введем обозначение коэффициентов передач резистивных делителей напряжений в соответствии со схемой RLC ПФ на рисунке 4.17:

$$\lambda = \frac{R_8}{R_7 + R_8}, \quad (4.17)$$

$$\gamma = \frac{R_4}{R_4 + R_5}, \quad (4.18)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 СЕМЕЙСТВО АКТИВНЫХ RC-ФИЛЬТРОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА (ФНЧ, ФВЧ, ПФ) С НЕЗАВИСИМОЙ ПОДСТРОЙКОЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

На основе обобщенной структуры (раздел 3.1) можно синтезировать новый подкласс активных RC-фильтров [1-14], в которых реализуется независимая настройка основных параметров: частота полюса ω_p , добротность полюса d_p и затем масштабный коэффициент передачи M .

1. Полосовые фильтры второго порядка

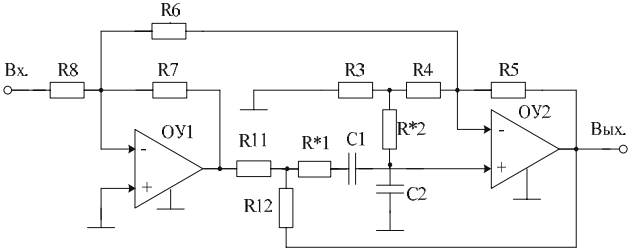
В таблице 1 показаны звенья ПФ и их основные параметры, впервые представленные в [1-14], где приведены результаты компьютерного моделирования их амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик. Передаточные функции этих звеньев в общем виде определяются выражением

$$F_{14}(p) = M \frac{pd_p \omega_p}{p^2 + pd_p \omega_p + \omega_p^2},$$

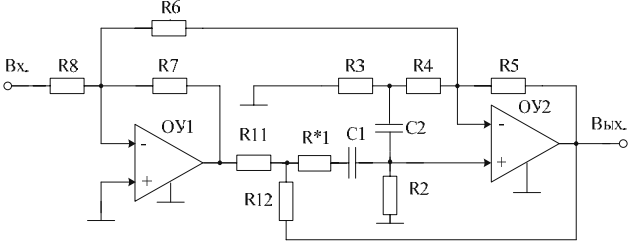
а формулы её коэффициентов для каждой схемы приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Схемы ПФ второго порядка с независимой настройкой параметров

Но- мер звена ПФ	Схема звена ПФ [3-14]	
1.		
M	$-\frac{\gamma_1 \alpha \beta \frac{1}{R_1 C_2}}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{1-k}{\tau_2} + \frac{1}{R_1 C_2} [1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1 - \beta)]}$	
ω_p	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$	

Продолжение таблицы 1

	d_p	$\sqrt{1 + \frac{R_4}{R_3}} \times \left(\sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} + (1-k) \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} (1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1-\beta)) \right)$
	Примечание	$R_1 = R_1^* + R_{11} \parallel R_{12}; R_2 = R_2^* + R_3 \parallel R_4; \gamma_1 = \frac{R_7}{R_6}; \gamma_2 = \frac{R_7}{R_8};$ $k = \frac{R_3}{R_3 + R_4}; \alpha = \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_6}; \tau_1 = R_1 C_1; \tau_2 = R_2 C_2;$ $\beta = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}$
2.		
	M	$-\frac{\gamma_1 \alpha \beta}{1-k} \frac{1}{R_1 C_2} \left[\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{1-k} \left[\frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{R_1 C_2} [1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1-\beta)] \right] \right]$
	ω_p	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$
	d_p	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \times \left(\sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} + \frac{1}{(1-k)} \left[\sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} [1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1-\beta)] \right] \right)$
	Примечание	$R_1 = R_1^* + R_{11} \parallel R_{12}; \gamma_1 = \frac{R_7}{R_6}; \gamma_2 = \frac{R_7}{R_8};$ $k = \frac{R_3}{R_3 + R_4}; \alpha = \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_6}; \tau_1 = R_1 C_1; \tau_2 = R_2 C_2;$ $\beta = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}$

Денисенко Д. Ю.

Активные RC и RLC фильтры с перестраиваемыми параметрами

Монография

Ответственный за выпуск: **В. Митин**

Верстка и обложка: **СОЛОН-Пресс**

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «СОЛОН-Пресс»

123001, г. Москва, а/я 82

Телефоны: (495) 617-39-64, (495) 617-39-65

E-mail: kniga@solon-press.ru, www.solon-press.ru

Распространение через сеть магазинов и маркетплейсов

ООО КТК «Галактика»

115487, г. Москва, проспект Андропова, д. 38

Телефоны: (499) 782-38-89

E-mail: books@aliens-kniga.ru, <https://www.galaktika-dmk.com/>

По вопросам подписки на журнал «Ремонт & Сервис» обращаться:

ООО «СОЛОН-Пресс»

тел.: (495) 617-39-64, www.remserv.ru

ООО «СОЛОН-Пресс»

115487, г. Москва,

пр-кт Андропова, дом 38, помещение № 8, комната № 2.

Формат 60×88/8. Объем 20 п. л. Тираж 1000 экз.