## Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН)

## Библиотека схемотехнических решений

# Низкочувствительный полосовой фильтр с независимой подстройкой основных параметров: модификация ПФ-1

Денисенко Д.Ю., <u>d.u.denisenko@gmail.com</u>, Пахомов И.В., <u>ilyavpakhomov@gmail.com</u>, Жебрун Е.А., <u>jackjk@mail.ru</u>

## Научно-исследовательская лаборатория проблем проектирования в экстремальной микроэлектронике ИППМ РАН и Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону)

### 1. Области применения низкочувствительных полосовых фильтров

Полосовые ARC-фильтры (ПФ) относятся к числу достаточно распространенных аналоговых устройств и могут использоваться в качестве интерфейса для выделения заданного спектра источника сигнала, например, при его дальнейшей обработке аналого-цифровыми преобразователями различных модификаций.

Существенный недостаток ARC-фильтра, представленного на рис. 1 [1], а также других известных фильтров рассматриваемого класса, состоит в том, что в процессе подстройки его одного параметра, например, затухания или частоты полюса, изменяется третий важный параметр амплитудночастотной характеристики (AЧX) – коэффициент передачи в полосе пропускания. Это значительно усложняет производство и настройку (например, с помощью микросхем цифровых потенциометров или лазерной подгонки) ARC-фильтров данного класса.



Рисунок 1 – Схема классического полосового фильтра [1]

#### 2. Текстовое описание схемы рис. 2

На рис. 2 показана схема предлагаемого полосового ARC-фильтра [2]. Его задача обеспечить независимую подстройку трех основных параметров AUX – частоты полюса ( $\omega_p$ ), затухания полюса ( $d_p$ ), а также коэффициента передачи в полосе пропускания (M).



Рисунок 2 – Схема предлагаемого полосового ARC-фильтра

Свойства схемы классических полосовых фильтров второго порядка, в том числе схемы рис. 2, определяются его передаточной функцией [3,4]

$$F(s) = \frac{U_{\text{BEX.}}(s)}{U_{\text{BX.}}(s)} = M \frac{sd_p \omega_p}{s^2 + sd_p \omega_p + \omega_p^2},$$

где М – коэффициент передачи фильтра на центральной частоте;  $\omega_p$  – частота полюса;  $d_p$  – затухание полюса.

Коэффициенты передаточной функции предлагаемой схемы полосового фильтра определяются по выражениям:

- коэффициент передачи

$$M = -\frac{\frac{R_3}{R_1} \left(1 + \frac{R_8}{R_5 + R_7}\right)}{\frac{C_2}{C_1} + 1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_7}{R_7 + R_5} \frac{R_4}{R_6}},$$
(1)

- частота полюса

$$\omega_{p} = \sqrt{\frac{R_{7}}{R_{7} + R_{5}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_{4}C_{1}R_{6}C_{2}}},$$
(2)

- затухание полюса

$$d_{p} = \sqrt{1 + \frac{R_{5}}{R_{7}}} \times \left(\sqrt{\frac{R_{6}C_{2}}{R_{4}C_{1}}} + \left(1 + \frac{R_{3}}{R_{2}}\right)\sqrt{\frac{R_{6}C_{1}}{R_{4}C_{2}}} + \frac{R_{7}}{R_{7} + R_{5}}\sqrt{\frac{R_{4}C_{1}}{R_{6}C_{2}}}\right), \quad (3)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ - сопротивления резисторов R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8 соответственно,  $C_1$ ,  $C_2$  - емкости конденсаторов C1 и C2 соответственно.

Независимая настройка параметров ПФ рис. 2 возможна тогда, когда при настройке последующего параметра схемы не потребуется изменять сопротивления резисторов, определяющие уже настроенный параметр. Из анализа полученных выше формул (1)-(3) для  $\omega_p$ ,  $d_p$ , M следует, что в предлагаемом ПФ рис. 2 такая настройка осуществима в следующей последовательности:

Первый этап: настраивается частота полюса ω<sub>p</sub> путем изменения сопротивлений резисторов (R5 и R7). Далее номиналы этих резисторов фиксируются.

Второй этап: настраивается затухание полюса d<sub>p</sub> путем изменения сопротивлений резисторов R2 и R3. На втором этапе сопротивления резисторов R5и R7 не изменяются.

**Третий этап:** настраивается коэффициент передачи М путем изменения сопротивления резисторов R1 и R8. На этом этапе сопротивления резисторов R2, R3, R4, R5, R6, R7 не изменяются.

Следует заметить, что другие известные схемы ПФ, выполненные на двух операционных усилителях, данным свойством не обладают.

Эффективность рассмотренного выше алгоритма настройки ПФ рис. 2 подтверждаются результатами компьютерного моделирования (рис. 3 - рис. 5).

При моделировании схемы рис. 2 собственная частота полюса RC-цепи

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_4 C_1 R_6 C_2}}$$

была выбрана равной 1000 Гц. В рассматриваемой схеме ПФ при любом соотношении сопротивлений резисторов R5 и R7 частота полюса фильтра будет всегда ниже частоты полюса RC-цепи.

#### 3. Компьютерное моделирование схемы ARC-фильтра рис. 2



Рисунок 3 – Схема полосового ARC-фильтра рис. 2 в среде моделирования МісгоСар

На рис. 4 приведены амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра при подстройке частоты полюса  $\omega_p$ . По виду ФЧХ можно судить, что частота полюса  $\omega_p$ , на которой фазовый сдвиг равен -180<sup>0</sup>, изменяется за счет резисторов R5и R7 в относительно широких пределах.



Рисунок 4 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра (рис.3) при подстройке частоты полюса ω<sub>p</sub>

На рис. 5 показаны амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра при подстройке затухания полюса  $d_p$ . По виду ФЧХ рис. 5 можно установить, что при изменении сопротивлений резисторов R3 и R2 изменяются наклон ФЧХ в области частоты полюса и подъем АЧХ на этой частоте. При этом частота полюса остается неизменной ( $\omega_p$ =const). При настройке затухания полюса изменяются частоты, на которых фазовый сдвиг составляет -135<sup>0</sup> и -225<sup>0</sup>.



Рисунок 5 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра (рис.3) при подстройке затухания полюса d<sub>p</sub>

На рис. 6 представлены амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра при подстройке коэффициента передачи М.



Рисунок 6 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра (рис.3) при подстройке коэффициента передачи М

При изменении коэффициента М передачи на центральной частоте с помощью сопротивлений резисторов R1 и R8 изменяется только общий уровень AЧХ, при этом ФЧХ не изменяется – рис. 6.

Таким образом, предлагаемый ПФ имеет существенные преимущества в сравнении с известным фильтром (рис. 1) и обеспечивает независимую подстройку основных параметров.

#### 4. Параметры оптимизации

Современные САПР позволяют решать задачи параметрической оптимизации. Основные направления оптимизации схемы рис. 2. – сопротивление резисторов R5 и R6, затем резисторов R1 и R2, и далее резисторов R3 и R8. При этом, обеспечивается независимая подстройка

параметров ARC-фильтра, таких как затухания полюса, частоты полюса и коэффициент передачи.

Разработка выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10109)

#### Netlist схемы ARCФ (рис.2)

```
* Converted From Micro Cap Source file to PSPICE
.FUNC DPWR(D) \{I(D) * V(D)\}
.FUNC BPWR(Q) {IC(Q) *VCE(Q) + IB(Q) *VBE(Q) }
.FUNC FPWR(M) { ID(M) *VDS(M) }
.FUNC HOTD (D, MAX) {IF ((V(D) * I(D) > MAX), 1, 0) }
.FUNC HOTB(Q,MAX) { IF((VCE(Q) * IC(Q) + IB(Q) * VBE(Q) > MAX), 1, 0) }
.FUNC HOTF(M, MAX) {IF((VDS(M) *ID(M) > MAX), 1, 0)}
.PARAM LOW3MIN={IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES)}
.PARAM HIGH3MAX={IMPORT(HIGH3MAX.OUT, HIGH3THRES)}
.PARAM LOWLVDS={IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT)}
.PARAM HILVDS={IMPORT(HILVDS.OUT, HILIMIT)}
.PARAM LIMTLVDS={IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS)}
.FUNC SKINAC (DCRES, RESISTIVITY, RELPERM, RADIUS)
{ ((PI*RADIUS*RADIUS) / ((PI*RADIUS*RADIUS) - PI* (RADIUS-
SKINDEPTHAC(RESISTIVITY, RELPERM))**2))*DCRES}
.FUNC SKINDEPTHAC (RESISTIVITY, RELPERM)
{503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*F)))}
.FUNC SKINTR (DCRES, RESISTIVITY, RELPERM, RADIUS, FREQ)
{ ((PI*RADIUS*RADIUS) / ((PI*RADIUS*RADIUS) - PI* (RADIUS-
SKINDEPTHTR(RESISTIVITY, RELPERM, FREQ))**2))*DCRES}
.FUNC SKINDEPTHTR (RESISTIVITY, RELPERM, FREQ)
{503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*FREQ)))}
C1 5 8 15910e-12
C2 5 0 159.1e-12
R1 3 8 100k
R2 6 9 2k
R3 9 0 2k
R4 Out 6 2k
R5 5 9 100k
R6 1 3 10k
R7 10 1 10k
R8 1 6 100k
V1 VC 0 DC 15
V2 VE 0 DC -15
V3 INTERIOR NONE1 0 AC 1 SIN (0 169.7 60 0 0)
RV3 10 INTERIOR NONE1 1m ;added by V3
```

```
X1 0 1 VE 3 VC OP 37A
X2 5 6 VE Out VC OP 37A
* OPAMP
* PINS: 1=NC+ 2=NC- 3=VEE 4=VO 5=VCC
.SUBCKT OP 37A 1 2 3 4 5
RSUPPLUS 5 0 1
RSUPMIN 3 0 1
ROUT 4 0 125
GOUT 0 4 1 2 14400
RIN 1 2 1G
.ENDS OP 37A
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
PIVTOL=.1p RELTOL=1m
+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
*
.LIB "F:\MC11\library\NOM.LIB"
.TEMP 27
*
.AC DEC 125 0.1 1E7
.PLOT AC vDB([OUT]) - 64, 16
.PLOT AC vP([OUT]) -270,-45
.STEP LIN R7 5K 20K 20000 ;$MCE value;AC Analysis
*
.PROBE
*** Parts Count
** Battery
                   2
** Resistor
                   8
** Capacitor
                   2
** Sine source
                 1
** Opamp
                    2
.END
;$SpiceType=PSPICE
```

#### Список литературы

- 1. Иванов Ю.И. «Полосовой ARC-фильтр с повышением частоты полюса», Патент RU 2154337; опубл.: 10.08.2000.
- 2. Низкочувствительный полосовой фильтр с независимой подстройкой основных параметров; H03H 11/12 /Денисенко Д.Ю., Бугакова А.В., Игнашин А.А., Прокопенко Н.Н. № 2019106613; Заявл. 11.03.19.
- 3. Topological Features of the Active RC-Filter Schemes with the Extended Frequency Operating Range / D.Yu. Denisenko, Yu.Iv. Ivanov, N.N. Prokopenko // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, 14-16.03.18, Proceedings. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337239
- 4. Низкочувствительный активный RC-фильтр второго порядка С расширенным диапазоном/ Д.Ю. Денисенко, H.H. частотным Всероссийская научно-техническая конференция Прокопенко// VIII «Проблемы разработки перспективных микрои наноэлектронных МЭС-2018., Москва. Сборник трудов / под общ. ред. систем». академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2018. Выпуск IV. Стр. 17-23.
- 5. Digital Potentiometers in the Tasks of Settings Precision Analog RC-filters Taking into Account the Tolerances for Passive Components / Darya Yu. Denisenko, Yuriy Iv. Ivanov, Nikolai N. Prokopenko, Nadezhda A. Dmitrienko//18th IEEE International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM'2017) proceedings in. June 29 - July 3, Erlagol, 2017. – Pp. 205-210.