

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

Библиотека схемотехнических решений

**Низкочувствительный активный RC-фильтр второго порядка на основе двух
мультидифференциальных операционных усилителей с независимой
настройкой основных параметров**

Денисенко Д.Ю., d.u.denisenko@gmail.com,

Прокопенко Н.Н., prokopenko@sssu.ru,

Жук А.А., alexey.zhuk96@mail.ru,

Бутырлагин Н.В., nbutyrlagin@mail.ru

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

1. Области применения универсальных RC-фильтров

Универсальные активные RC-фильтры (АРСФ), обеспечивающие на разных выходах формирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра высоких частот (ФВЧ), полосового фильтра (ПФ), режекторного фильтра (РФ), широко используются в современной электронике и оказывают существенное влияние на качественные показатели многих аналого-цифровых систем связи и автоматического управления.

Достаточно важным направлением совершенствования АРСФ является подстройка и перестройка их основных параметров, в т.ч. за счет цифровой коммутации пассивных элементов и применения микросхем цифровых потенциометров.

Один из векторов развития современной теории активных RC-фильтров связан с их построением на новой электронной компонентной базе, в т.ч. на основе мультидифференциальных операционных усилителей (МОУ), обеспечивающих новые качества устройств частотной селекции.

Основной существенный недостаток известного фильтра рис.1 [1] состоит в том, что при регулировке добротности полюса АЧХ изменяется его коэффициент передачи и частота полюса.

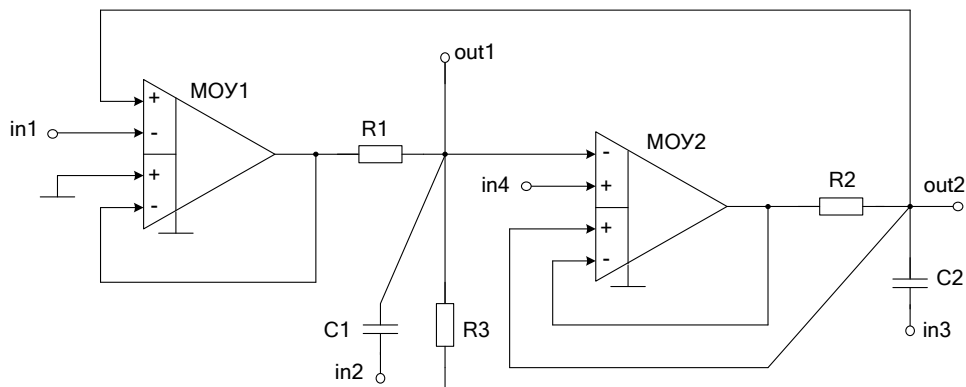


Рисунок 1 - Схема классического ARC-фильтра [1]

В ARCФ рис.1 при сопротивлении резистора R_3 , стремящемся к бесконечности (при равных постоянных времени) RC-цепей, добротность фильтра изменяется от нуля и приближается к единице. В схеме рис.2 при изменении сопротивления резистора R_3 от равного сопротивлению резистора R_1 до бесконечности – добротность изменяется от единицы до бесконечности (для идеальных ОУ). Причем при $R_3 < R_1$ добротность в схеме ARCФ рис.2 будет меньше единицы, т.е. она может принимать такие же значения, как и в известной схеме рис.1.

2. Текстовое описание схемы фильтра рис.2

На рис.2 показана схема предлагаемого ARC фильтра [1,2], в котором обеспечивается независимая регулировка добротности полюса АЧХ, при которой коэффициент передачи и частота полюса АЧХ, зависящие от других параметров элементов, остаются постоянными. Это существенно упрощает процесс подстройки и регулировки устройств частотной селекции на основе схемотехнического решения ARCФ.

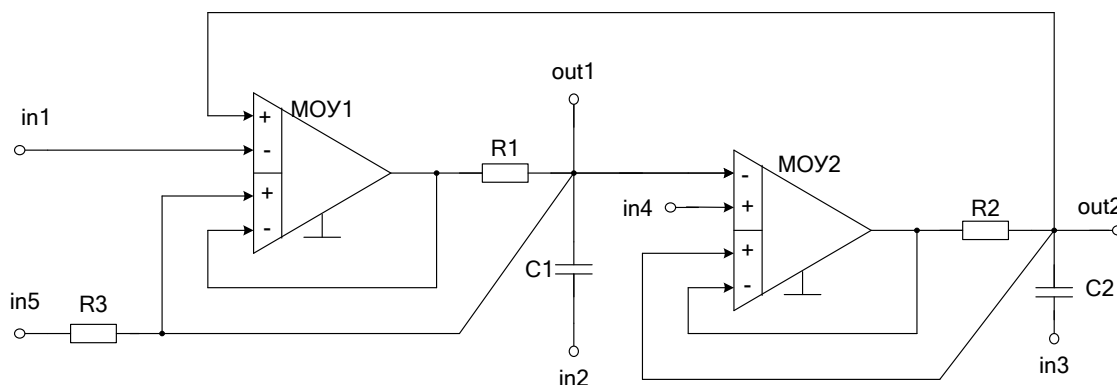


Рисунок 2 - Схема ARC-фильтра [1]

Активные RC-фильтры на базе схемы рис.2, обозначенные далее как ФНЧ⁽⁺⁾, ФВЧ⁽⁺⁾, ПФ⁽⁺⁾, РФ⁽⁺⁾, обладают свойствами независимой регулировки добротности полюса, коэффициента передачи и частоты полюса.

Активные RC-фильтры схемы рис.2, обозначенные далее как ФНЧ⁽⁻⁾, ФВЧ⁽⁻⁾, ПФ⁽⁻⁾, имеют наклон амплитудно-частотной характеристики, соответствующей передаточной функции первого порядка.

Обобщенная передаточная функция всех типов активных RC-фильтров (ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ), реализуемых на основе схемы рис. 2, имеет вид:

$$F(p) = \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}, \quad (1)$$

где a_i, b_j – коэффициенты числителя и знаменателя формулы (1), зависящие от параметров элементов, а также - используемых входов и выходов в схеме рис. 2.

Конкретный набор коэффициентов a_i числителя передаточной функции (1), определяет тип АРС-фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ).

Коэффициенты a_i числителей передаточных функций (1), реализуемых схемой фильтра на рис.2, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты a_i числителя передаточной функции (1)

		ВЫХОДЫ	
		1	2
ВХОДЫ	1	ПФ $a_2 = 0$ $a_1 = -\frac{M_2}{\tau_1}$ $a_0 = 0$	ФНЧ ⁽⁺⁾ $a_2 = a_1 = 0$ $a_0 = \frac{M_2}{\tau_1 \tau_2}$
	2	ФВЧ ⁽⁺⁾ $a_2 = 1$ $a_1 = 0$ $a_0 = 0$	ПФ $a_2 = a_0 = 0$ $a_1 = -\frac{1}{\tau_2}$
	3	ПФ $a_2 = 0$ $a_1 = \frac{M_2}{\tau_1}$ $a_0 = 0$	ФВЧ ⁽⁻⁾ +ПФ ⁽⁻⁾ $a_2 = 1$ $a_1 = \frac{M_1}{\tau_1}$ $a_0 = 0$
	4	ФНЧ ⁽⁺⁾ $a_2 = a_1 = 0$ $a_0 = \frac{M_2}{\tau_1 \tau_2}$	ПФ ⁽⁻⁾ +ФНЧ ⁽⁻⁾ $a_2 = 0$ $a_1 = \frac{1}{\tau_2}$ $a_0 = \frac{M_1}{\tau_1 \tau_2}$
	5	ПФ ⁽⁺⁾ $a_2 = 0$ $a_1 = \frac{M_1}{\tau_1}$ $a_0 = 0$	ФНЧ $a_2 = a_1 = 0$ $a_0 = -\frac{M_1}{\tau_1 \tau_2}$
	2 + 4	РФ ⁽⁺⁾ $a_2 = 1$ $a_1 = 0$ $a_0 = \frac{M_2}{\tau_1 \tau_2}$	ФНЧ $a_2 = 0$ $a_1 = 0$ $a_0 = \frac{M_1}{\tau_1 \tau_2}$

Коэффициенты знаменателей b_j передаточных функций (1) связаны с элементами схемы рис.2 следующими формулами:

$$b_2 = 1, \quad b_1 = \frac{M_1}{\tau_1}, \quad b_0 = \frac{M_2}{\tau_1 \tau_2}. \quad (2)$$

При этом в формулах (1), (2) приняты следующие обозначения:

$$M_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_3}, M_2 = \frac{R_3}{R_1 + R_3}, \tau_1 = C_1 \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}, \tau_2 = R_2 C_2. \quad (3)$$

3. Компьютерное моделирование частных вариантов включения ARC-фильтра

Результаты компьютерного моделирования универсального ARC-фильтра рис.2 и его модификаций выполнены в среде MicroCap [2] и представлены на рис.4, рис.6, рис.8, рис.10, рис.12, рис.14. Они показывают, что в схеме рис.2 и частных вариантах ее включения реализуются ФНЧ⁽⁺⁾, ФВЧ⁽⁺⁾, ПФ⁽⁺⁾, РФ⁽⁺⁾, в которых при изменении добротности полюса их коэффициент передачи и частота полюса не изменяются.

На рис.3 представлена схема ARCФ, в которой входной сигнал подается на вход устройства (in.1). При этом по выходу устройства (out1) входной сигнал инвертируется. По выходу устройства (out2) входной сигнал не инвертируется.

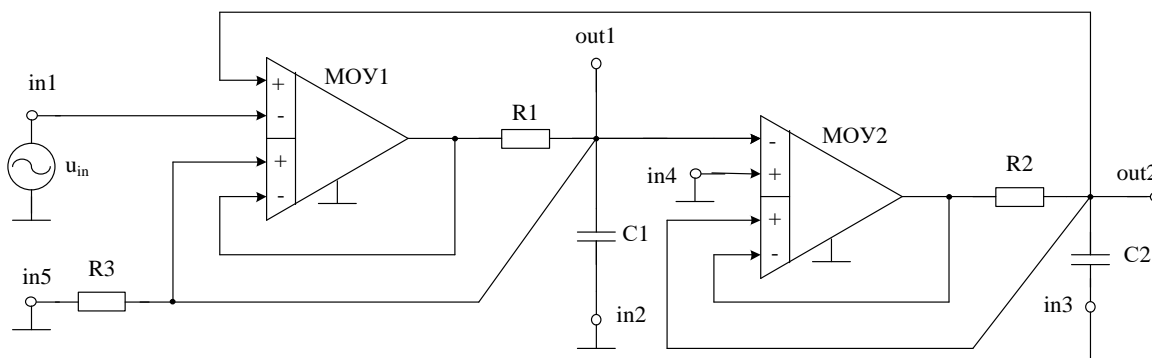


Рисунок 3 - Схема включения ARC-фильтра рис. 2 при использовании входа in.1

На рис.4 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ARCФ рис.3 для выходов устройства out1 и out2. Анализ АЧХ рис.4 показывает, что в схеме рис.3 реализуются следующие типы фильтров: ПФ, ФНЧ⁽⁺⁾.

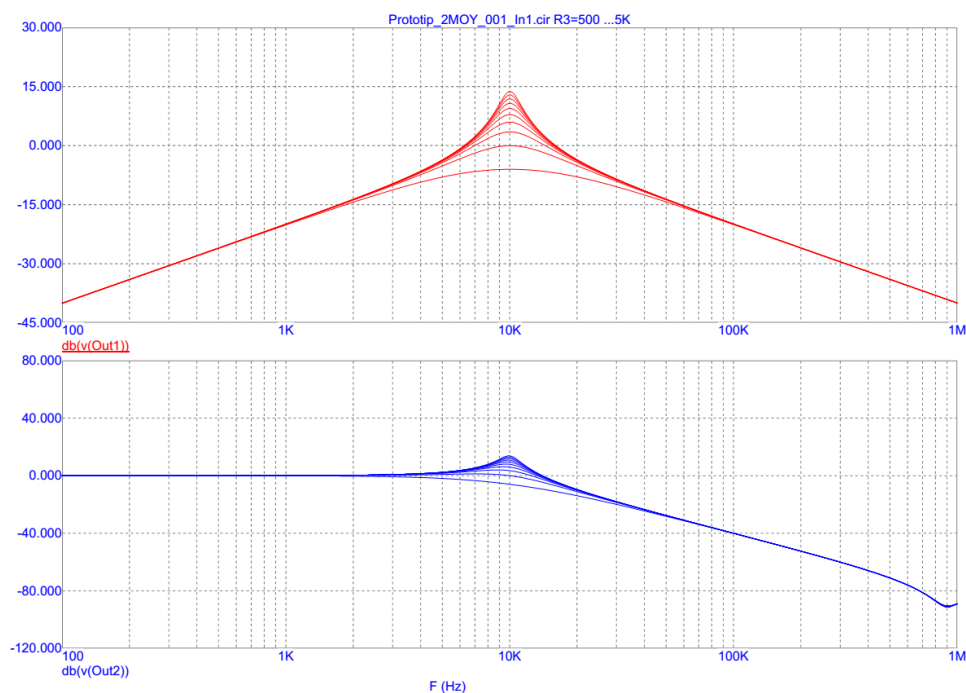


Рисунок 4 - АЧХ ARC-фильтра рис.3

На рис.5 показана схема ARCФ, в которой входной сигнал подается на вход устройства (in.2). При этом по выходу устройства (out1) входной сигнал не инвертируется, а по выходу устройства (out2) входной сигнал инвертируется.

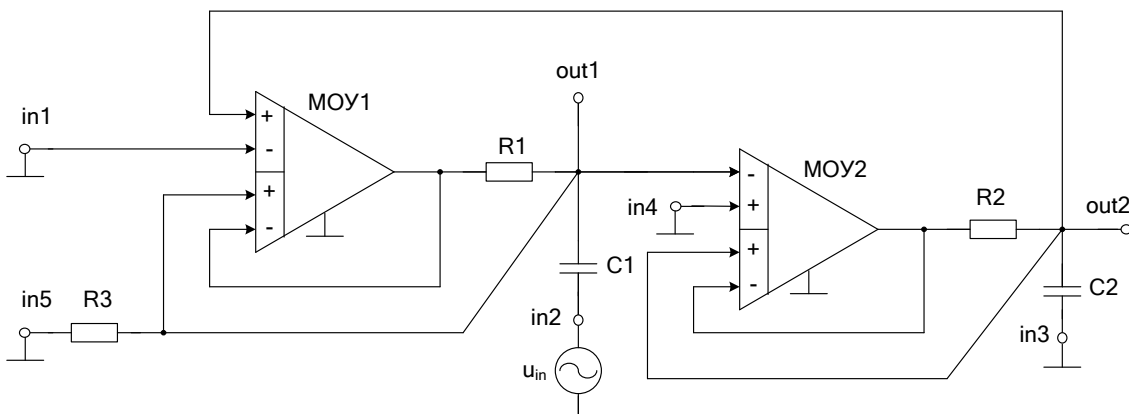


Рисунок 5 - Схема включения ARC-фильтра рис. 2 при использовании входа in.2

На рис.6 представлены АЧХ ARCФ рис.5 для выходов устройства out1 и out2. Анализ АЧХ рис.6 показывает, что в схеме рис.5 реализуются следующие типы фильтров: ФВЧ⁽⁺⁾, ПФ.

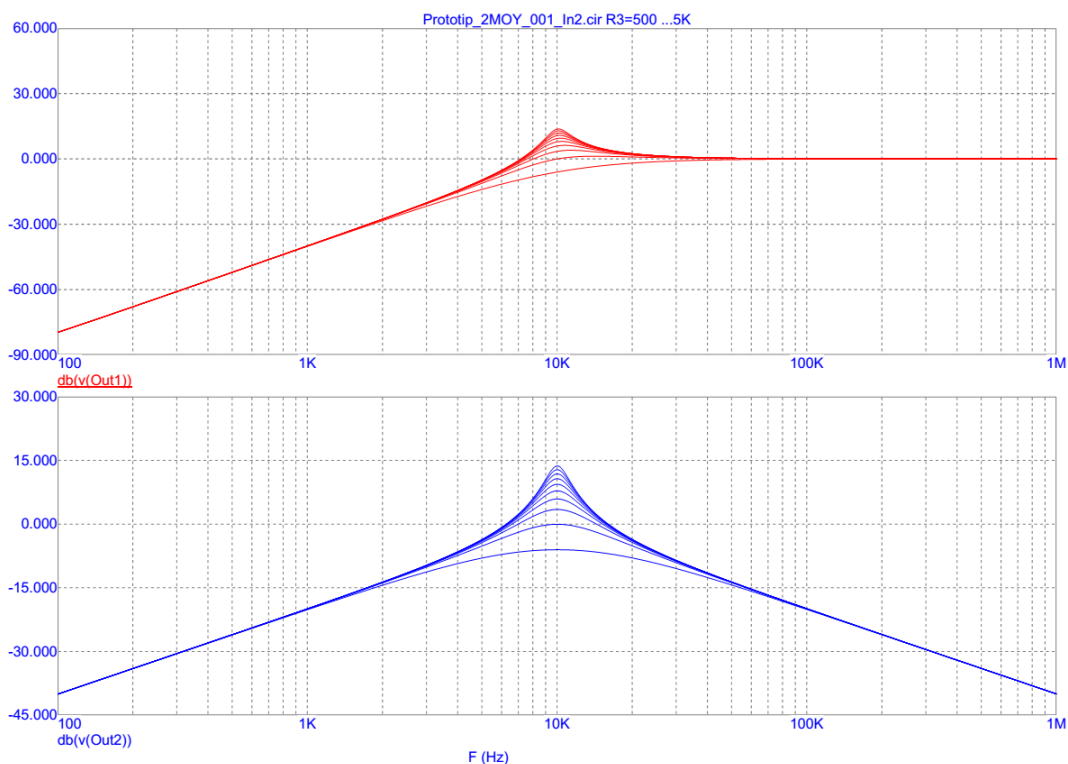


Рисунок 6 - АЧХ ARC-фильтра рис.5

На рис.7 приведена схема ARCФ, в которой входной сигнал подается на вход устройства (in.3). Причём по выходам устройства (out1) и (out2) входной сигнал не инвертируется.

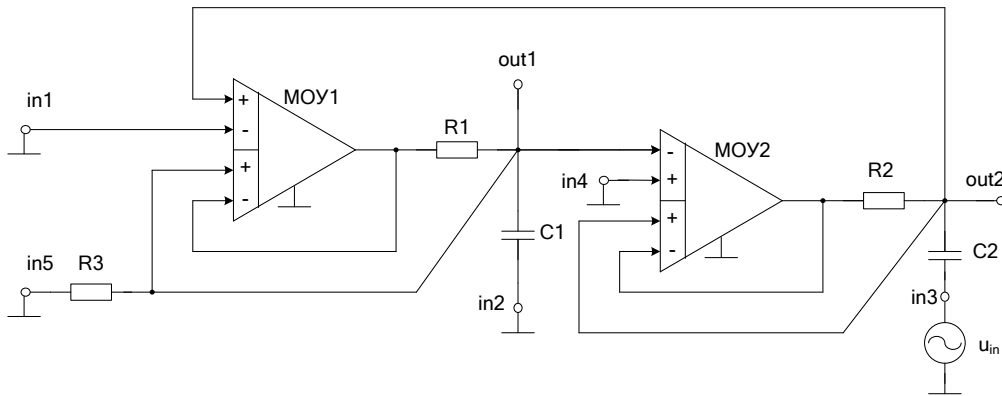


Рисунок 7 - Схема включения ARC-фильтра рис. 2 при использовании входа in.3

На рис.8 показаны АЧХ ARCФ рис.7 для выходов устройства out1 и out2. Анализ АЧХ рис.8 показывает, что в схеме рис.7 реализуются следующие типы фильтров: ПФ, ФВЧ⁽⁻⁾+ПФ⁽⁻⁾.

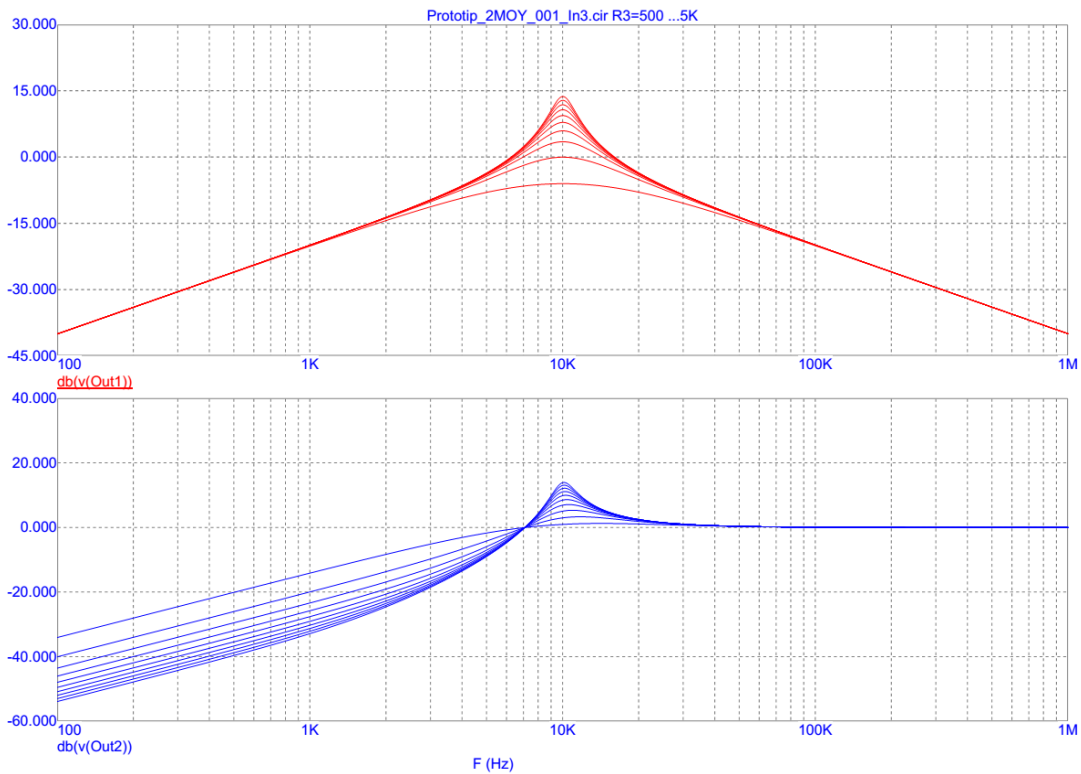


Рисунок 8 - АЧХ ARC-фильтра рис.7

На рис.9 приведена схема ARCФ, в которой входной сигнал подается на вход устройства (in.4). При этом по выходам устройства (out1) и (out2) входной сигнал не инвертируется.

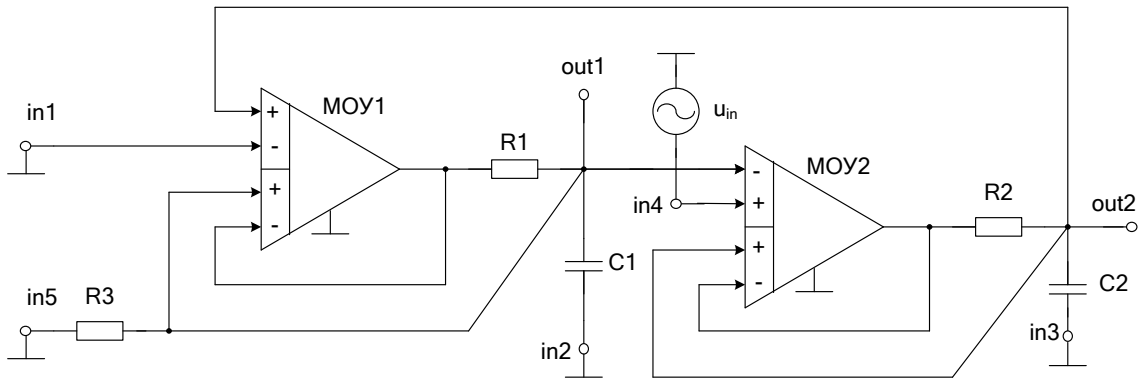


Рисунок 9 - Схема включения ARC-фильтра рис. 2 при использовании входа in.4

На рис.10 представлены АЧХ ARCФ рис.9 для выходов устройства out1 и out2. Анализ АЧХ рис.10 показывает, что в схеме рис.9 реализуются следующие типы фильтров: ФНЧ⁽⁺⁾, ПФ⁽⁻⁾+ФНЧ⁽⁻⁾.

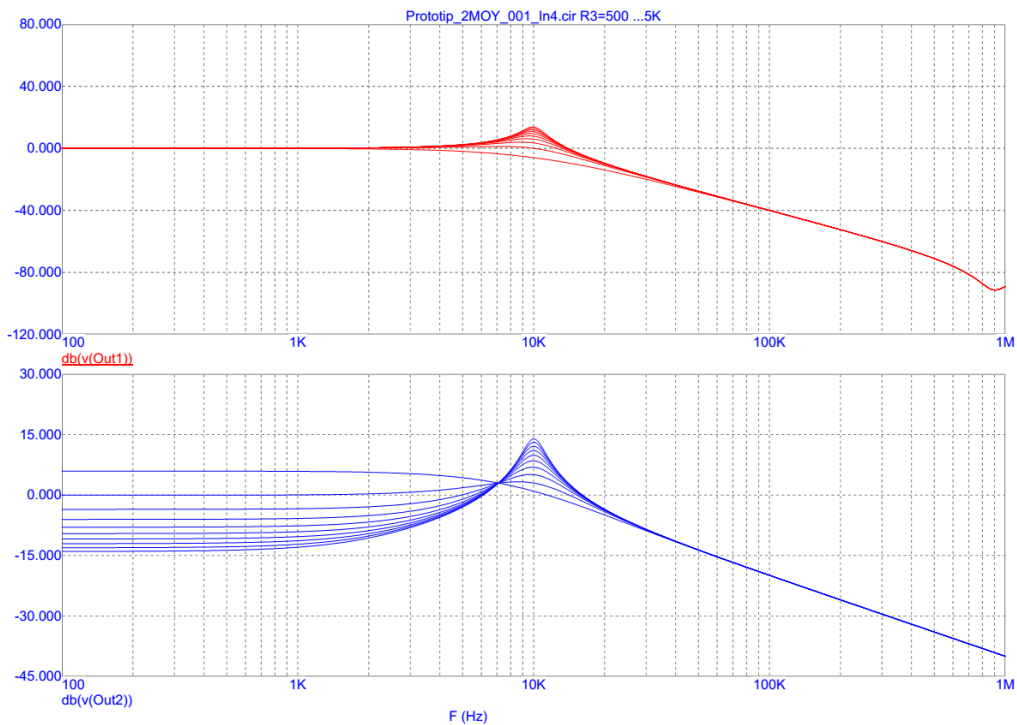


Рисунок 10 - АЧХ ARC-фильтра рис.9

На рис.11 показана схема ARCФ, в которой входной сигнал подается на вход устройства (in.5). Причём входной сигнал по выходу устройства (out1) не инвертируется, а по выходу устройства (out2) - инвертируется.

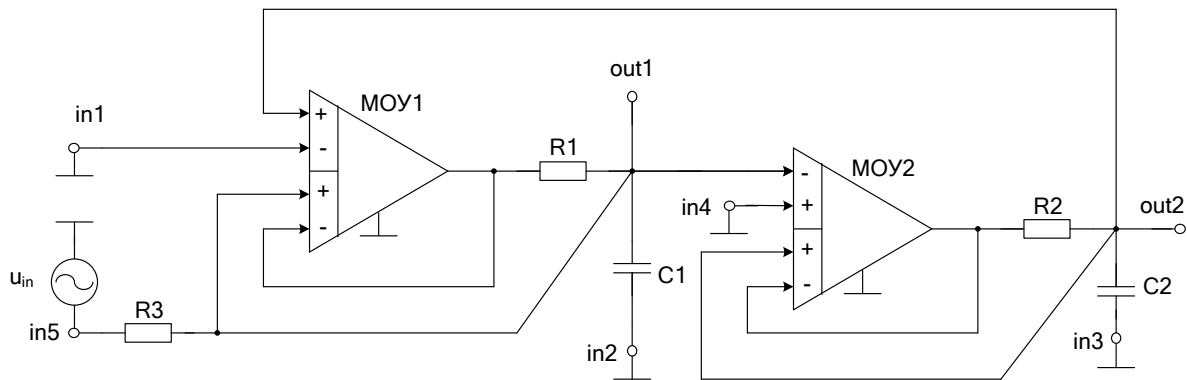


Рисунок 11 - Схема включения ARC-фильтра рис. 2 при использовании входа in.5

На рис.12 приведены АЧХ предлагаемого ARCФ рис. 11 для выходов устройства out1 и out2. Анализ АЧХ рис. 12 показывает, что в схеме рис. 11 реализуются следующие типы фильтров: ПФ⁽⁺⁾, ФНЧ.

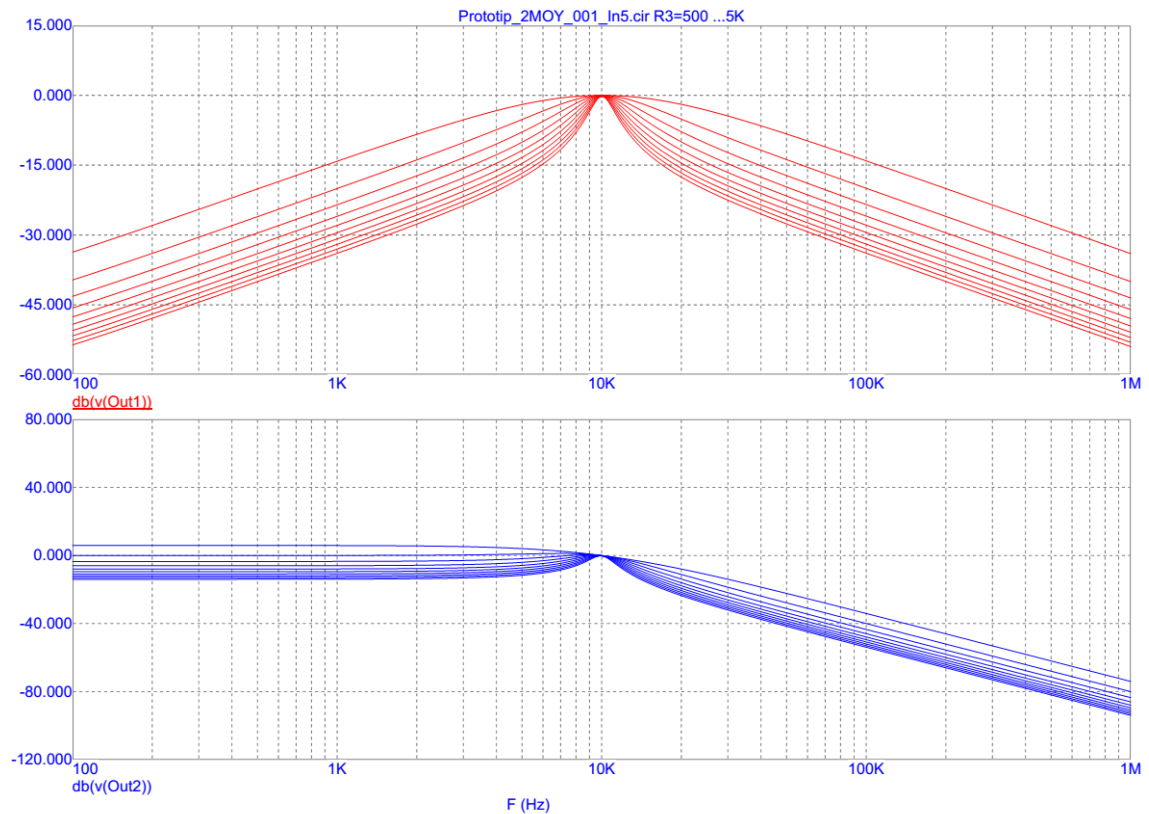


Рисунок 12 - АЧХ ARC-фильтра рис.11

На рис.13 представлена схема предлагаемого ARCФ, в которой входной сигнал подается на входы устройства in.2 и in.4. При этом по выходам устройства (out1) и (out2) входной сигнал не инвертируется.

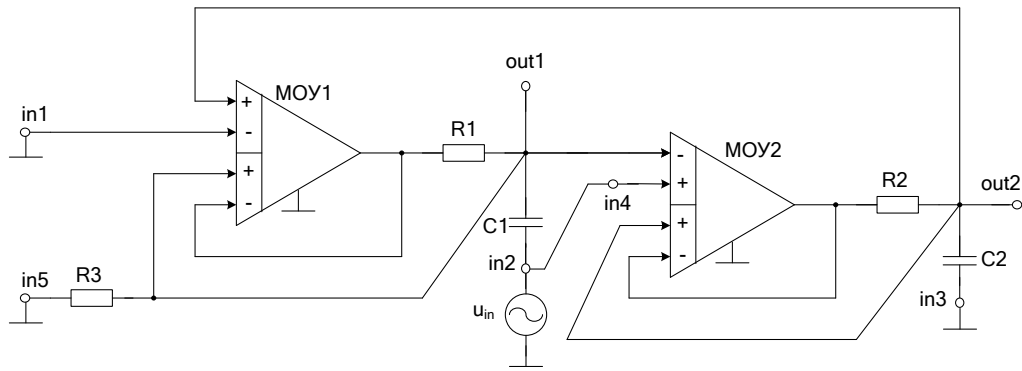


Рисунок 13 - Схема включения ARC-фильтра рис. 2 при использовании входов in.2 и in.4

На рис.14 показаны АЧХ ARCФ рис.13 для выходов устройства out1 и out2. Анализ АЧХ рис.14 показывает, что в схеме рис.13 реализуются следующие типы фильтров: $РФ^{(+)}$, ФНЧ.

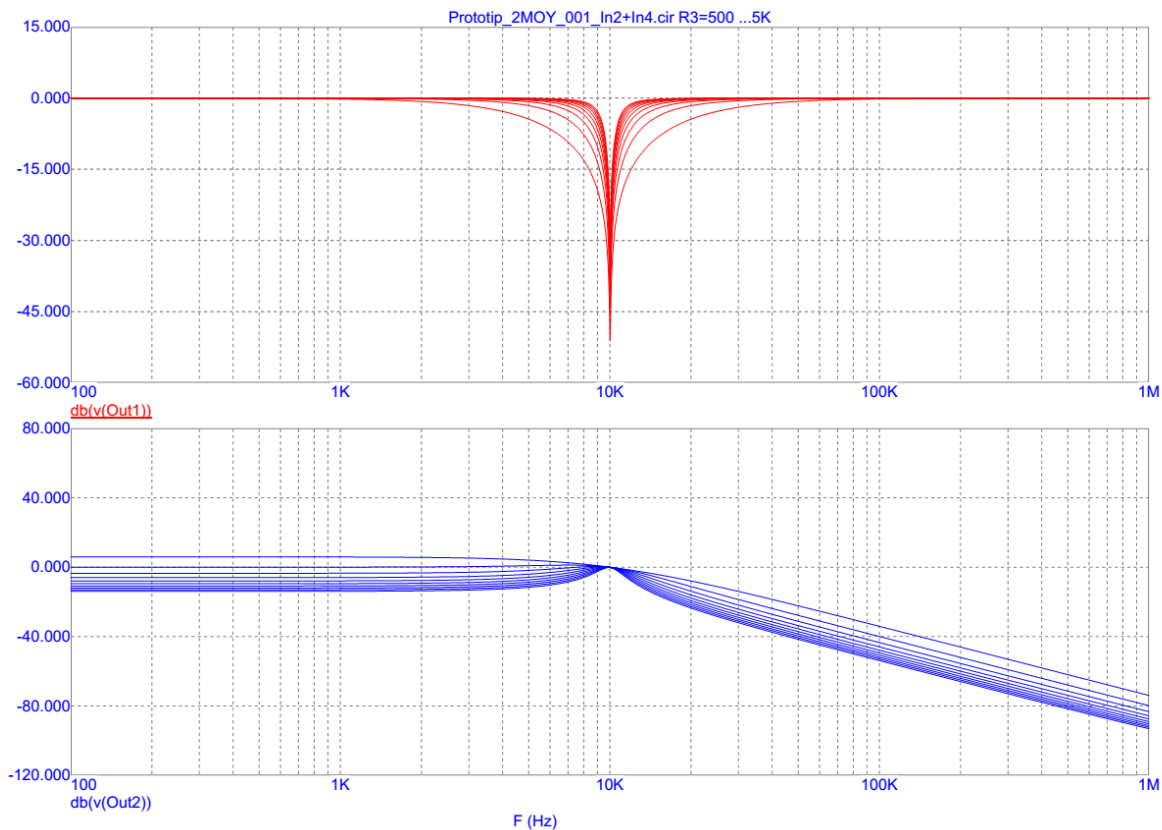


Рисунок 14 - АЧХ ARC-фильтра рис.13

Показанные выше АЧХ частных вариантов включения ARCФ получены в результате компьютерного моделирования соответствующих частных схем ARCФ в среде MicroCap на моделях MOY AD830 фирмы Analog Devices (США) [2].

Таким образом, в соответствии с результатами теоретического анализа и компьютерного моделирования, в схеме рис. 1 реализуется широкий спектр АЧХ фильтров второго и первого порядка (ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ). При этом в ряде случаев за счет новых связей при регулировке добротности полюса коэффициент передачи и частота полюса ARCФ не изменяются. Это является существенным преимуществом

схемотехнического решения рис. 1 в сравнении с известными ARC-фильтрами данного класса[1].

Разработка выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект 18-79-10109)

4. Netlist в среде Microcap

```
.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 0 Out 159.1e-10
C2 0 Out2 159.1e-10
R1 Out3 Out 1k
R2 Out4 Out2 1k
R3 0 9 10k
R4 In1 9 10k
R5 Out1 9 10k
V1 VC 0 DC 5
V2 VE 0 DC -5
V5 INTERIOR_NONE1 0 AC 1 SIN (0 1 1000 0 0 0)
RV5 In1 INTERIOR_NONE1 1 ;added by V5
V6 VC1 0 DC 15
V7 VE1 0 DC -15
V8 0 6 DC 15
V9 7 0 DC 15
X16 Out 0 0 Out1 6 Out1 7 AD830_AD
```

X17 Out2 9 Out Out3 6 Out3 7 AD830_AD
X18 0 Out1 Out2 Out4 6 Out4 7 AD830_AD

*

*** From file F:\MC12\library\ANALOG.LIB
.SUBCKT AD830_AD 1 2 3 4 5 7 8

*

* X1-X2 INPUT STAGE

Q1 17 1 9 QX
Q2 18 11 10 QX
R1 9 12 1100
R2 10 12 1100
I1 12 5 2E-3
EOS1 2 11 POLY(1) (31,98) 1.5E-3 1
IOS1 1 2 0.5E-7
C1 1 2 2E-12
RD1 1 2 1.93E6

*

* Y1-Y2 INPUT STAGE

Q3 17 3 14 QX
Q4 18 13 15 QX
R3 14 16 1100
R4 15 16 1100
I2 16 5 2.02E-3
VOS2 4 13 1.5E-3
IOS2 3 4 0.5E-7
C2 3 4 2E-12
RD2 3 4 1.93E6

*

VC1 32 17 DC 0.4
VC2 33 18 DC 0.4
D7 8 32 DX
D8 8 33 DX

*

EREF 98 0 24 0 1

* TRANSCONDUCTANCE STAGE DOMINANT POLE AT 17.9 KHZ

R7 19 98 2.46E6
C3 19 98 3.62E-12
F1 98 19 POLY(2) VC1 VC2 0 1 -1
V2 8 20 1.7
V3 21 5 1.7
D1 19 20 DX
D2 21 19 DX

*

* POLE AT 250 MHZ

R6 22 98 1E6

```

C4 22 98 637E-18
G2 98 22 19 98 1E-6
*
* COMMON-MODE GAIN NETWORK WITH ZERO AT 100 KHZ
R10 30 31 1E6
R11 31 98 1
C7 30 31 3.18E-12
E3 98 30 POLY(2) (1,98) (2,98) 0 5 5
*
* POLE AT 200 MHZ
R12 23 98 1E6
C8 23 98 796E-18
G4 98 23 22 98 1E-6
*
* OUTPUT STAGE
R13 24 8 500E3
R14 24 5 500E3
FSY 8 5 POLY(2) V7 V8 10E-3 1 1
R15 29 8 34
R16 29 5 34
L1 29 7 6E-10
G7 29 8 8 23 2.94E-2
G8 5 29 23 5 2.94E-2
V4 25 29 0.74
V5 29 26 0.74
D3 23 25 DX
D4 26 23 DX
G5 98 70 29 23 2.94E-2
D5 70 71 DX
D6 72 70 DX
V7 71 98 DC 0
V8 98 72 DC 0
*
* MODELS USED
.MODEL QX NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=202 BR=1 CJC=0 CJE=0 CJS=0 EG=1.11
FC=500m
+ GAMMA=10p IKF=0 IKR=0 IRB=0 IS=.1f ISC=0 ISE=0 ISS=0 ITF=0 KF=0
MJC=330m
+ MJE=330m MJS=0 NC=2 NE=1.5 NF=1 NK=500m NR=1 NS=1 PTF=0 QCO=0
QUASIMOD=0 RB=0
+ RBM=0 RC=0 RCO=0 RE=0 TF=0 TR=0 TRB1=0 TRB2=0 TRC1=0 TRC2=0 TRE1=0
TRE2=0
+ TRM1=0 TRM2=0 VAF=0 VAR=0 VG=1.206 VJC=750m VJE=750m VJS=750m
VO=10 VTF=0
+ XCJC=1 XTB=0 XTF=0 XTI=3)

```

```

.MODEL DX D (LEVEL=2 AF=1 BV=0 CJO=0 EG=1.11 FC=500m IBV=100p IBVL=0
IKF=0
+ IS=1E-15 ISR=0 KF=0 M=500m N=1 NBV=1 NBVL=1 NR=2 RL=0 RS=0 TBV1=0
TBV2=0
+ TIKF=0 TRS1=0 TRS2=0 TT=0 VJ=1 XTI=3)
.ENDS
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFPPD=0 DEFPS=0 DIGDRVVF=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:\MC12\library\NOM.LIB"
.TEMP 27
.AC LIN 50 1 1E8
.PLOT AC vDB([OUT]) vDB([OUT1])
.PLOT AC vDB([OUT2])
.STEP LIN R3 1000 10k 2000 ;$MCE value;AC Analysis
.PROBE
.END

```

Список литературы

1. Низкочувствительный активный RC-фильтр второго порядка на основе двух мультидифференциальных операционных усилителей / Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.В., Прокопенко Н.Н. - № 2019115651; заявл. 22.05.19.
2. D. Denisenko, N. Prokopenko, N. Butyrlagin, Differential Difference Amplifiers in the Second Order Low-Sensitive All-Pass Active RC-Filters, 2020 International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM-2020), pp. 275-279. DOI: 10.1109/ICCAKM46823.2020.90515.