

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

**Библиотека схемотехнических решений**

**Универсальный активный RC-фильтр второго порядка на  
мультидифференциальных операционных усилителях с минимальным  
количеством пассивных и активных элементов**

Денисенко Д.Ю., [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com),

Пахомов И.В., [ilyavpakhomov@gmail.com](mailto:ilyavpakhomov@gmail.com),

Жук А.А., [alexey.zhuk96@mail.ru](mailto:alexey.zhuk96@mail.ru)

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

**1. Области применения**

В устройствах частотной селекции активно используются универсальные активные RC-фильтры (УАРСФ), которые работают в различных частотных диапазонах. Предлагается УАРСФ (рис.1), при подключении определённых входов и выходов, позволяют реализовать комплекс амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) (фильтров низких частот (ФНЧ), фильтров высоких частот (ФВЧ), режекторных (РФ) и полосовых (ПФ) фильтров).

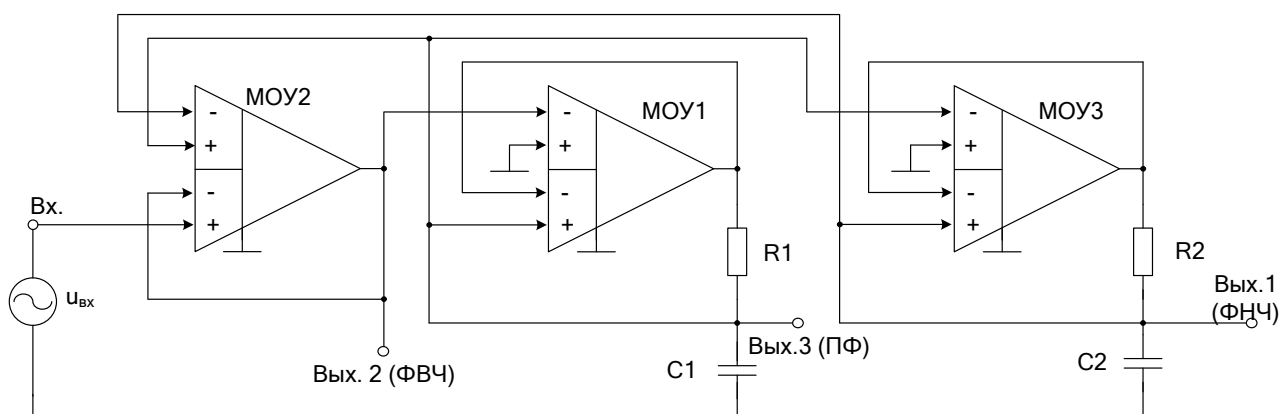


Рисунок 1 – Схема УАРСФ [1]

## 2. Текстовое описание УАРСФ

Схема УАРСФ рис.1 [1] включает следующие компоненты:

- мультидифференциальные операционные усилители (МОУ1÷МОУ3);
- частотоподающие резисторы (R1÷R2);
- частотоподающие конденсаторы (C1÷C2).

Рассмотрим работу предлагаемого УАРСФ [1] (рис. 1), используя уравнения для его основных параметров. Обобщенная передаточная функция УАРСФ второго порядка описывается уравнением:

$$F(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = M \frac{p^2 + pd_0\omega_0 + \omega_0^2}{p^2 + pd_p\omega_p + \omega_p^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega_p$  – частота нуля и полюса передаточной функции,  $d_0$ ,  $d_p$  – затухание нуля и полюса передаточной функции,  $M$  – коэффициент передачи фильтра.

Введем обозначения:  $R_1$ ,  $R_2$  – сопротивления частотоподающих резисторов R1, R2;  $C_1$ ,  $C_2$  – емкости частотоподающих конденсаторов C1, C2. Поэтому в предлагаемой схеме рис. 1 со входа устройства на второй выход (Вых. 2) ФВЧ реализуется следующая передаточная функция:

$$F(p) = \frac{p^2}{p^2 + p\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}}, \quad (2)$$

где  $\tau_1=R_1C_1$ ,  $\tau_2=R_2C_2$ .

Коэффициент передачи ФВЧ на большой частоте равен единице ( $M=1$ ).

Со входа на третий выход (Вых. 3) ПФ схемой рис. 1 реализуется передаточная функция, которая представлена ниже:

$$F(p) = -\frac{p\frac{1}{\tau_1}}{p^2 + p\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}}. \quad (3)$$

При этом коэффициент передачи ПФ на частоте полюса равен единице ( $M=-1$ ).

Со входа универсального активного RC-фильтра рис. 1 на первый выход (Вых. 1) ФНЧ реализуется передаточная функция:

$$F(p) = \frac{1}{\tau_1\tau_2} \frac{1}{p^2 + p\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1\tau_2}}, \quad (4)$$

а его коэффициент передачи на нулевой частоте равен единице ( $M=1$ ).

Параметры схем всех рассмотренных выше фильтров, такие как частота

полюса и затухание полюса определяются одинаковыми математическими выражениями:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}, \quad (5)$$

$$d_p = \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}. \quad (6)$$

### 3. Компьютерное моделирование УАРСФ второго порядка

УАРСФ второго порядка рис. 1 был промоделирован в среде Micro-Cap 11 и показан на рис. 2.

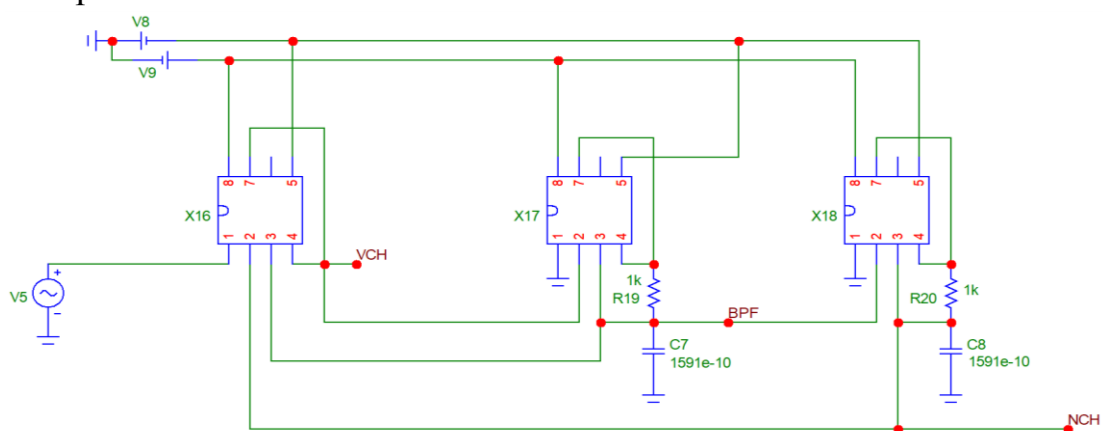


Рисунок 2 – УАРСФ второго порядка рис.1 в среде Micro-Cap 11

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) УАРСФ рис. 2, полученные в среде Micro-Cap.

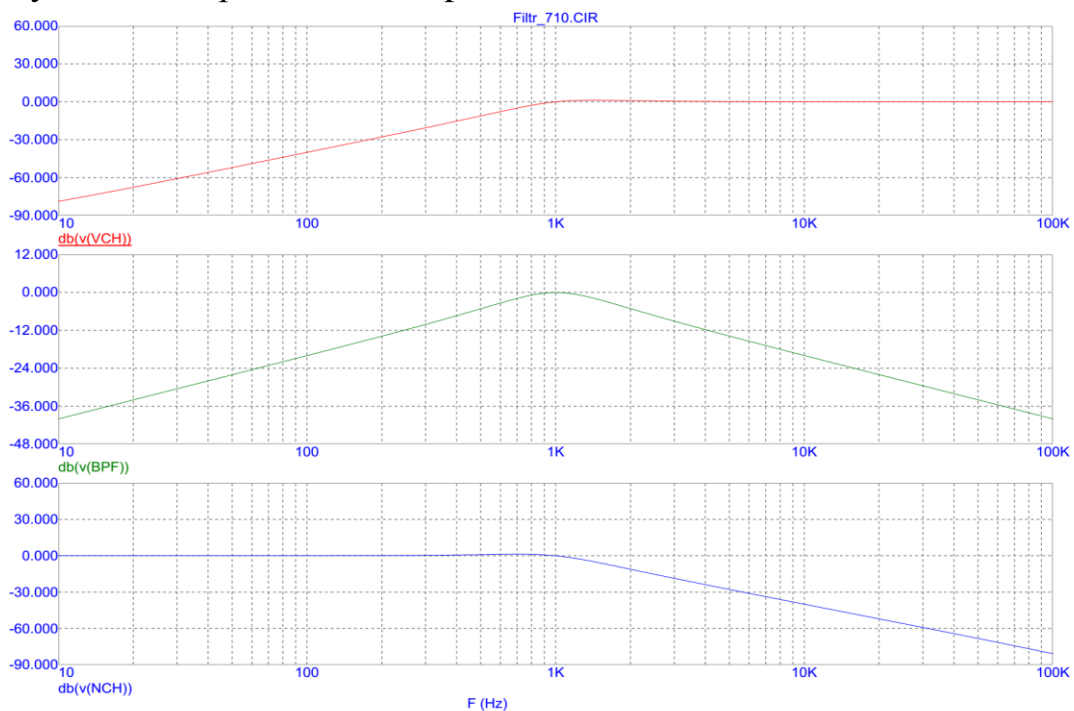


Рисунок 3 – АЧХ УАРСФ рис. 2

Анализ графика рис. 3 показывает, что фильтр рис. 1 позволяет реализовать на его выходах ФВЧ, ПФ и ФНЧ. При этом схема УАРСФ содержит минимальное количество пассивных и активных элементов при заданном порядке передаточной функции и обеспечивает расширенный частотный диапазон.

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

#### Netlist схемы RC-фильтра второго порядка рис. 4

```

1: Filtr_710.CIR AC Analysis
2: Converted From Micro Cap Source file to PSPICE
3: *
4: .FUNC DPWR(D) {I(D)*V(D)}
5: .FUNC BPWR(Q) {IC(Q)*VCE(Q)+IB(Q)*VBE(Q)}
6: .FUNC FPWR(M) {ID(M)*VDS(M)}
7: .FUNC HOTD(D,MAX) {IF((V(D)*I(D)>MAX),1,0)}
8: .FUNC HOTB(Q,MAX) {IF((VCE(Q)*IC(Q)+IB(Q)*VBE(Q)>MAX),1,0)}
9: .FUNC HOTF(M,MAX) {IF((VDS(M)*ID(M)>MAX),1,0)}
10:.PARAM LOW3MIN={IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES)}
11:.PARAM HIGH3MAX={IMPORT(HIGH3MAX.OUT,HIGH3THRES)}
12:.PARAM LOWLVDS={IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT)}
13:.PARAM HILVDS={IMPORT(HILVDS.OUT,HILIMIT)}
14:.PARAM LIMTLVDS={IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS)}
15:.FUNC
    SKINAC(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)**2))*DCRES}
16:.FUNC
    SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*F)))}
17:.FUNC
    SKINTR(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS,FREQ)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)**2))*DCRES}
18:.FUNC
    SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*FREQ)))}
19:C7 0 BPF 1591e-10
20:C8 0 NCH 1591e-10
21:R19 9 BPF 1k
22:R20 10 NCH 1k
23:V1 VC 0 DC 5
24:V2 VE 0 DC -5
25:V5 INTERIOR_NONE1 0 AC 1 SIN (0 1 1000 0 0 0)
26:RV5 3 INTERIOR_NONE1 1 ;added by V5
27:V6 VC1 0 DC 15
28:V7 VE1 0 DC -15
29:V8 0 7 DC 15

```

30:V9 8 0 DC 15  
 31:X16 3 NCH BPF VCH 7 VCH 8 AD830\_AD  
 32:X17 0 VCH BPF 9 7 9 8 AD830\_AD  
 33:X18 0 BPF NCH 10 7 10 8 AD830\_AD  
 34:\*  
 35:\*\*\* From file F:\MC12\library\ANALOG.LIB  
 36:.SUBCKT AD830\_AD 1 2 3 4 5 7 8  
 37:\*  
 38:X1-X2 INPUT STAGE  
 39:\*  
 40:Q1 17 1 9 QX  
 41:Q2 18 11 10 QX  
 42:R1 9 12 1100  
 43:R2 10 12 1100  
 44:I1 12 5 2E-3  
 45:EOS1 2 11 POLY(1) (31,98) 1.5E-3 1  
 46:IOS1 1 2 0.5E-7  
 47:C1 1 2 2E-12  
 48:RD1 1 2 1.93E6  
 49:\*  
 50:Y1-Y2 INPUT STAGE  
 51:\*  
 52:Q3 17 3 14 QX  
 53:Q4 18 13 15 QX  
 54:R3 14 16 1100  
 55:R4 15 16 1100  
 56:I2 16 5 2.02E-3  
 57:VOS2 4 13 1.5E-3  
 58:IOS2 3 4 0.5E-7  
 59:C2 3 4 2E-12  
 60:RD2 3 4 1.93E6  
 61:\*  
 62:VC1 32 17 DC 0.4  
 63:VC2 33 18 DC 0.4  
 64:D7 8 32 DX  
 65:D8 8 33 DX  
 66:\*  
 67:EREF 98 0 24 0 1  
 68:\*  
 69:\* TRANSCONDUCTANCE STAGE DOMINANT POLE AT 17.9 KHZ  
 70:\*  
 71:R7 19 98 2.46E6  
 72:C3 19 98 3.62E-12  
 73:F1 98 19 POLY(2) VC1 VC2 0 1 -1  
 74:V2 8 20 1.7  
 75:V3 21 5 1.7

76:D1 19 20 DX  
77:D2 21 19 DX  
78:\*  
79:POLE AT 250 MHZ  
80:\*  
81:R6 22 98 1E6  
82:C4 22 98 637E-18  
83:G2 98 22 19 98 1E-6  
84:\*  
85:COMMON-MODE GAIN NETWORK WITH ZERO AT 100 KHZ  
86:\*  
87:R10 30 31 1E6  
88:R11 31 98 1  
89:C7 30 31 3.18E-12  
90:E3 98 30 POLY(2) (1,98) (2,98) 0 5 5  
91:\*  
92:POLE AT 200 MHZ  
93:\*  
94:R12 23 98 1E6  
95:C8 23 98 796E-18  
96:G4 98 23 22 98 1E-6  
97:\*  
98:OUTPUT STAGE  
99:\*  
100: R13 24 8 500E3  
101: R14 24 5 500E3  
102: FSY 8 5 POLY(2) V7 V8 10E-3 1 1  
103: R15 29 8 34  
104: R16 29 5 34  
105: L1 29 7 6E-10  
106: G7 29 8 8 23 2.94E-2  
107: G8 5 29 23 5 2.94E-2  
108: V4 25 29 0.74  
109: V5 29 26 0.74  
110: D3 23 25 DX  
111: D4 26 23 DX  
112: G5 98 70 29 23 2.94E-2  
113: D5 70 71 DX  
114: D6 72 70 DX  
115: V7 71 98 DC 0  
116: V8 98 72 DC 0  
117: \*  
118: MODELS USED  
119: \*  
120: .MODEL QX NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=202 BR=1 CJC=0 CJE=0 CJS=0  
EG=1.11 FC=500m

```

121: + GAMMA=10p IKF=0 IKR=0 IRB=0 IS=.1f ISC=0 ISE=0 ISS=0 ITF=0
      KF=0 MJC=330m
122: + 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
123: + RBM=0 RC=0 RCO=0 RE=0 TF=0 TR=0 TRB1=0 TRB2=0 TRC1=0
      TRC2=0 TRE1=0 TRE2=0
124: + TRM1=0 TRM2=0 VAF=0 VAR=0 VG=1.206 VJC=750m VJE=750m
      VJS=750m VO=10 VTF=0
125: + XCJC=1 XTB=0 XTF=0 XTI=3)
126: .MODEL DX D (LEVEL=2 AF=1 BV=0 CJO=0 EG=1.11 FC=500m
      IBV=100p IBVL=0 IKF=0
127: + 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
128: + TIKF=0 TRS1=0 TRS2=0 TT=0 VJ=1 XTI=3)
129: .ENDS
130: *
131: .OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
      DEFW=100u DEFNRD=0
132: + DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
      DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
133: + DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
      DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
134: + DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10
      PIVREL=1m PIVTOL=.1p RELTOL=1m
135: + TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
136: *
137: .LIB "F:\MC12\library\NOM.LIB"
138: *
139: .TEMP 27
140: *
141: .AC LIN 50 10 1E5
142: .PLOT AC vDB([VCH])
143: .PLOT AC vDB([BPF])
144: .PLOT AC vDB([NCH])
145: *
146: .PROBE
147: .END

```

### Список литературы:

1. Пат. 2724917 Российская Федерация, МПК H03H 11/12. Универсальный активный RC-фильтр второго порядка на мультидифференциальных операционных усилителях с минимальным количеством пассивных и активных элементов / Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.В., Прокопенко Н.Н., Овсепян Е.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – № 2020110712/08; заявл. 13.03.2020; опубл.

26.06.2020, БЮЛ. № 18. – 14с.