

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

**Библиотека схемотехнических решений**

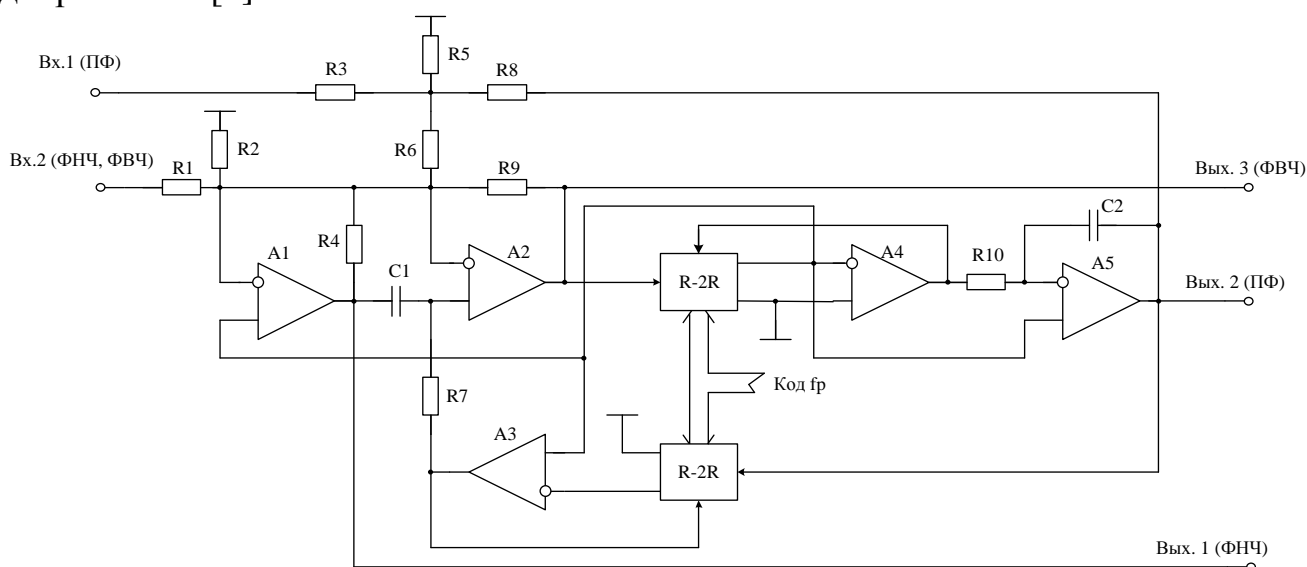
**Универсальный программируемый ARC-фильтр**

Денисенко Д.Ю., [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com),  
Титов А.Е., [alex.evgeny.titov@gmail.com](mailto:alex.evgeny.titov@gmail.com),  
Клейменкин Д.В., [k-dima-01@mail.ru](mailto:k-dima-01@mail.ru)

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

**1. Области применения универсального программируемого ARC-фильтра**

Программируемые активные RC-фильтры (ПАФ), обеспечивающие на разных выходах формирование амплитудно-частотных характеристик фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра высоких частот (ФВЧ), полосового фильтра (ПФ), широко используются в качестве перестраиваемых ограничителей спектра, включаемых на входе аналого-цифровых преобразователей различного назначения. На рис. 1 показан ПАФ с повышенной стабильностью реализуемой добротности [1].



**Рис. 1. Схема ПАФ [1]**

При этом в качестве элементов программирования и перестройки ПАФ применяются матрицы R-2R, управляемые кодом. Достаточно важным направлением совершенствования программируемых АРСФ является подстройка и перестройка их основных параметров, в т.ч. за счет цифровой коммутации пассивных элементов и применения микросхем цифровых потенциометров [2-4].

## 2. Текстовое описание ПАФ

Схема ПАФ рис.1 включает:

- Частотоподающие конденсаторы (C1, C2)
- Частотоподающие резисторы (R1÷R10);
- Матрицы сопротивлений (R-2R);
- Операционные усилители OP27 (A1÷A5).

В качестве матриц сопротивлений R-2R в схеме рис. 1 могут применяться как российские (572ПА1), так и зарубежные (AD7520) перемножающие ЦАП с традиционным обозначением их выводов.

## 3. Компьютерное моделирование ПАФ

В частном случае схема ПАФ рис. 1 исследовалась в среде Micro-Cap и показана на рис.2, причём в качестве модели операционного усилителя (ОУ) был выбран OP27 [5].

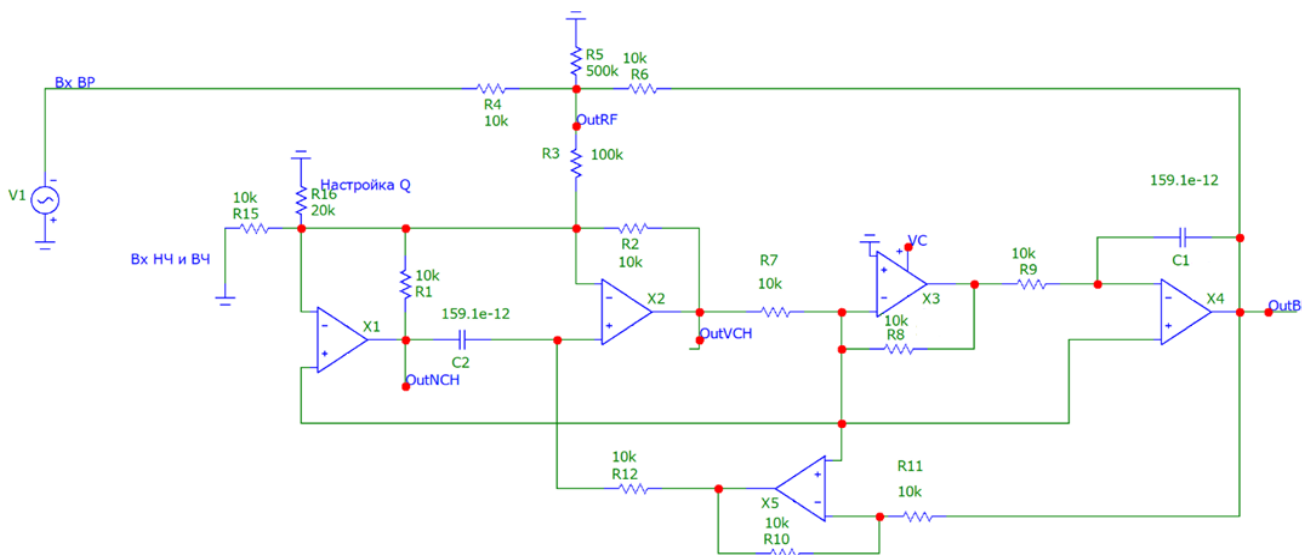


Рис. 2. ПАФ рис. 1 в среде Micro-Cap

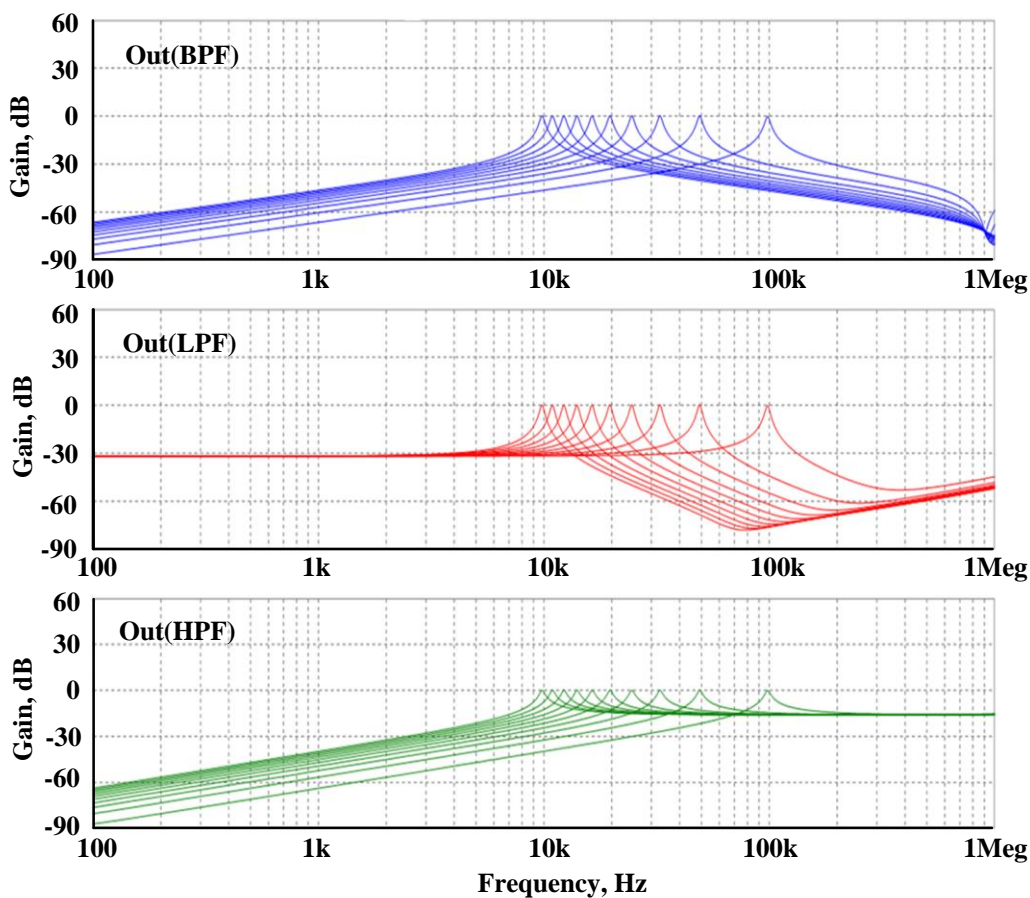
## 4. Ожидаемые параметры и характеристики ПАФ

Результаты компьютерного моделирования ПАФ рис. 2, представленные на рис. 3, показывают, что предлагаемый ПАФ обеспечивает более чем

десятикратную перестройку частоты квазирезонанса ПФ, частоты полюса ФНЧ и частоты полюса ФВЧ.

За счет введения новых связей достигается компенсация влияния частотных свойств ОУ без применения конденсатора С1 (рис. 1). При этом одновременно повышается и стабильность реализуемой фильтром добротности, так как устраняется влияние разности температурных коэффициентов используемых конденсаторов и площадей усиления ОУ.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ПАФ рис. 2 для выходов ПФ, ФНЧ и ФВЧ.



**Рис. 3.** АЧХ ПАФ рис. 1 для выходов ПФ, ФНЧ и ФВЧ

## 5. Параметры оптимизации

Практический интерес представляет определение оптимальных значений параметров схемы ПАФ (рис. 1) при изменении сопротивления частото задающего резистора R1.

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

## 6. Netlist для ПАФ Рис. 2

```
1: .FUNC DPWR(D) {I(D)*V(D)}
2: .FUNC BPWR(Q) {IC(Q)*VCE(Q)+IB(Q)*VBE(Q)}
3: .FUNC FPWR(M) {ID(M)*VDS(M)}
4: .FUNC HOTD(D,MAX) {IF((V(D)*I(D)>MAX),1,0)}
5: .FUNC HOTB(Q,MAX) {IF((VCE(Q)*IC(Q)+IB(Q)*VBE(Q)>MAX),1,0)}
6: .FUNC HOTF(M,MAX) {IF((VDS(M)*ID(M)>MAX),1,0)}
7: .PARAM LOW3MIN={IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES)}
8: .PARAM HIGH3MAX={IMPORT(HIGH3MAX.OUT,HIGH3THRES)}
9: .PARAM LOWLVDS={IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT)}
10:.PARAM HILVDS={IMPORT(HILVDS.OUT,HILIMIT)}
11:.PARAM LIMTLVDS={IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS)}
12:.FUNC
    SKINAC(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)**2))*DCRES}
13:.FUNC
    SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*F))))}
14:.FUNC
    SKINTR(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS,FREQ)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)**2))*DCRES}
15:.FUNC
    SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*FREQ))))}
16:C1 10 OutBP 159.1e-12
17:C2 OutNCH 7 159.1e-12
18:R1 3 OutNCH 10k
19:R2 3 OutVCH 10k
20:R3 3 OutRF 100k
21:R4 OutRF 1 10k
22:R5 OutRF 0 500k
23:R6 OutRF OutBP 10k
24:R7 OutVCH 2 10k
25:R8 2 9 10k
26:R9 9 10 10k
27:R10 13 12 10k
28:R11 12 OutBP 10k
29:R12 7 13 10k
30:R15 0 3 10k
31:R16 3 0 20k
32:V1 INTERIOR_NONE1 1 AC 1 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
33:RV1 0 INTERIOR_NONE1 1m ;added by V1
34:V2 VC 0 DC 15
35:V3 VE 0 DC -15
36:X1 2 3 VE OutNCH VC OP_27
37:X2 7 3 VE OutVCH VC OP_27
```

```

38:X3 0 2 VE 9 VC OP_27
39:X4 2 10 VE OutBP VC OP_27
40:X5 2 12 VE 13 VC OP_27
41:*
42:OPAMP
43:PINS: 1=NC+ 2=NC- 3=VEE 4=VO 5=VCC
44:.SUBCKT OP_27 1 2 3 4 5
45:IEE 10 3 8.401999999999999e-005
46:VS1 11 0 0
47:VC 5 16 1.8000000000000001
48:VE 17 3 1.8000000000000001
49:VLP 19 0 20
50:VLN 0 20 20
51:VS2 13 15 0
52:F1 13 14 POLY(5) VS1 VC VE VLP VLN 0 47746482.92756861 -
    47746482.92756861
53:+ 47746482.92756861 47746482.92756861 -47746482.92756861
54:E1 14 0 POLY(2) 5 0 3 0 0 0.5 0.5
55:H1 18 0 VS2 1000
56:GCM 0 12 10 0 7.557734198666343e-010
57:GA 12 0 6 7 0.001507964473723101
58:C1 6 7 8.660254037844386e-012
59:CE 10 14 1e-019
60:C2 12 13 3e-011
61:RC1 5 6 663.1455962162306
62:RC2 5 7 663.1455962162306
63:RE1 8 10 47.32264900962777
64:RE2 9 10 47.32264900962777
65:RE 10 14 2380385.622470841
66:RP 5 3 40036.65578262764
67:R2 12 11 100000
68:RO2 13 14 25
69:ROUTAC 15 4 50
70:D5 3 5 D
71:D3 4 16 D
72:D4 17 4 D
73:D1 18 19 D
74:D2 20 18 D
75:Q1 6 2 8 QINN
76:Q2 7 1 9 QINP
77:*
78:.MODEL D D ()
79:.MODEL QINN NPN (BF=2896.551724137931)
80:.MODEL QINP NPN (BF=7636.363636363636 IS=1e-016)
81:.ENDS OP_27

```

```

82:*
83: .OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
    DEFW=100u DEFNRD=0
84: + DEFNRS=0 DEFPS=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
    DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
85: + DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
    DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
86: + DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10
    PIVREL=1m PIVTOL=.1p RELTOL=1m
87: + TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
88:*
89: .LIB "F:\MC12\library\NOM.LIB"
90:*
91: .TEMP 27
92:*
93: .AC LIN 50 100 1E6
94: .PLOT AC vDB([OUTBP])
95: .PLOT AC vDB([OUTNCH])
96: .PLOT AC vDB([OUTVCH])
97: .STEP LIN R7 10000 100000 10000 ;$MCE Value;AC Analysis
98: .STEP LIN R11 10000 100000 10000 ;$MCE Value;AC Analysis
99:*
100: .PROBE
101: .END

```

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Универсальный программируемый ARC-фильтр / Денисенко Д.Ю., Викулина Е.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В. – № 2019137424/08; заявл. 21.11.2019 (з. 7236)
2. C.-M. Chang, "Analytical synthesis of the digitally programmable voltage-mode OTA-C universal biquad," IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, vol. 53, pp. 607-611, 2006. DOI: 10.1109/TCSII.2006.876411
3. M. Kumngern, B. Knobnob, K. Dejhan, "Electronically tunable high-input impedance voltage-mode universal biquadratic filter based on simple CMOS OTAs," International Journal of Electronics and Communications, vol. 64, pp. 934-939, 2010.
4. M. Kumngern, U. Torteanchai and K. Dejhan, "Electronically tunable multiple-input single-output voltage-mode multifunction filter employing simple CMOS OTAs," in Proceeding of 2010 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2010), Kuala Lumpur, Malaysia, December 6-9, 2010, pp. 1099-1102. DOI: 10.1109/APCCAS.2010.5774819
5. Модели операционного усилителя OP27 // URL: <https://www.analog.com/ru/products/op27.html>