

**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**

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**

Универсальные активные RC-фильтры (УАРСФ) широко применяются в современной электронике в качестве адаптивного средства частотной селекции, в том числе включаемых на входе аналого-цифровых преобразователей различного назначения [1-7] и оказывают существенное влияние на качественные показатели многих аналого-цифровых систем связи и автоматического управления [1-4]. Данный класс устройств частотной селекции (УЧС) особенно перспективен при создании специализированных структурных кристаллов, в которых те или иные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) (фильтров низких частот (ФНЧ), фильтров высоких частот (ФВЧ), режекторных (РФ) и полосовых (ПФ) фильтров) реализуются за счёт коммутации входов УЧС, к которым подключается источник сигнала, и использования разных выходов УЧС.

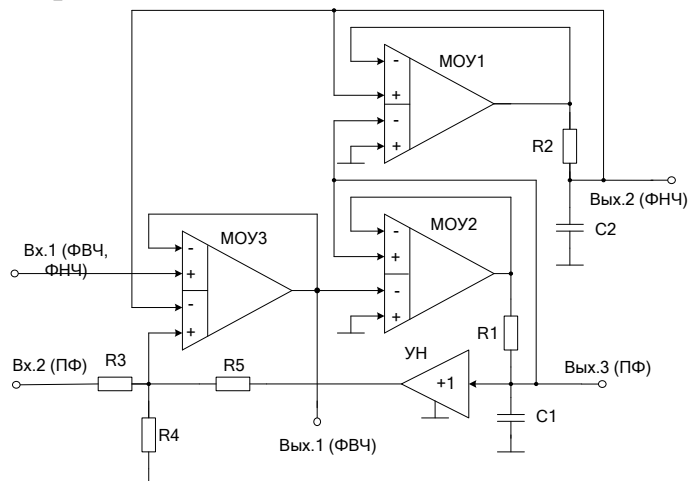


Рисунок 1 – УАРСФ второго порядка на МОУ [8]

## 2. Текстовое описание УАРСФ

Схема УАРСФ рис.1 [8] включает следующие компоненты:

- мультидифференциальные операционные усилители (МОУ1÷МОУ3);
- частотозадающие резисторы (R1÷R5);
- частотозадающие конденсаторы (C1÷C2);
- повторитель напряжения (УН).

На рис. 1 показана схема УАРСФ [8], содержащего минимальное количество пассивных и активных элементов при втором порядке передаточной функции, обладающего расширенным частотным диапазоном и возможностью регулировки добротности полюса.

Обобщенная передаточная функция УАРСФ второго порядка описывается выражением:

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

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:  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$  – сопротивления частотозадающих резисторов R1, R2, R3, R4, R5.  $C_1, C_2$  – емкости частотозадающих конденсаторов C1, C2 соответственно. В связи с этим, в схеме УАРСФ рис.1 с первого входа УАРСФ на первый выход фильтра верхних частот реализуется следующая передаточная функция:

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

где  $\alpha = \frac{R_3 \parallel R_4}{R_5 + R_3 \parallel R_4}$ ,  $\beta = \frac{R_4 \parallel R_5}{R_3 + R_4 \parallel R_5}$ ,  $\tau_1 = R_1 C_1$ ,  $\tau_2 = R_2 C_2$ .

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

Со второго входа УАРСФ на третий выход полосового фильтра реализуется передаточная функция, которая представлена ниже:

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

При этом коэффициент передачи на частоте полюса ПФ  $M = -\frac{\beta}{\alpha} = -\frac{R_5}{R_3}$ .

С первого входа УАРСФ рис. 1 на второй выход фильтра нижних частот реализуется передаточная функция:

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

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

Параметры схем всех рассмотренных выше фильтров, такие как частота полюса:

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

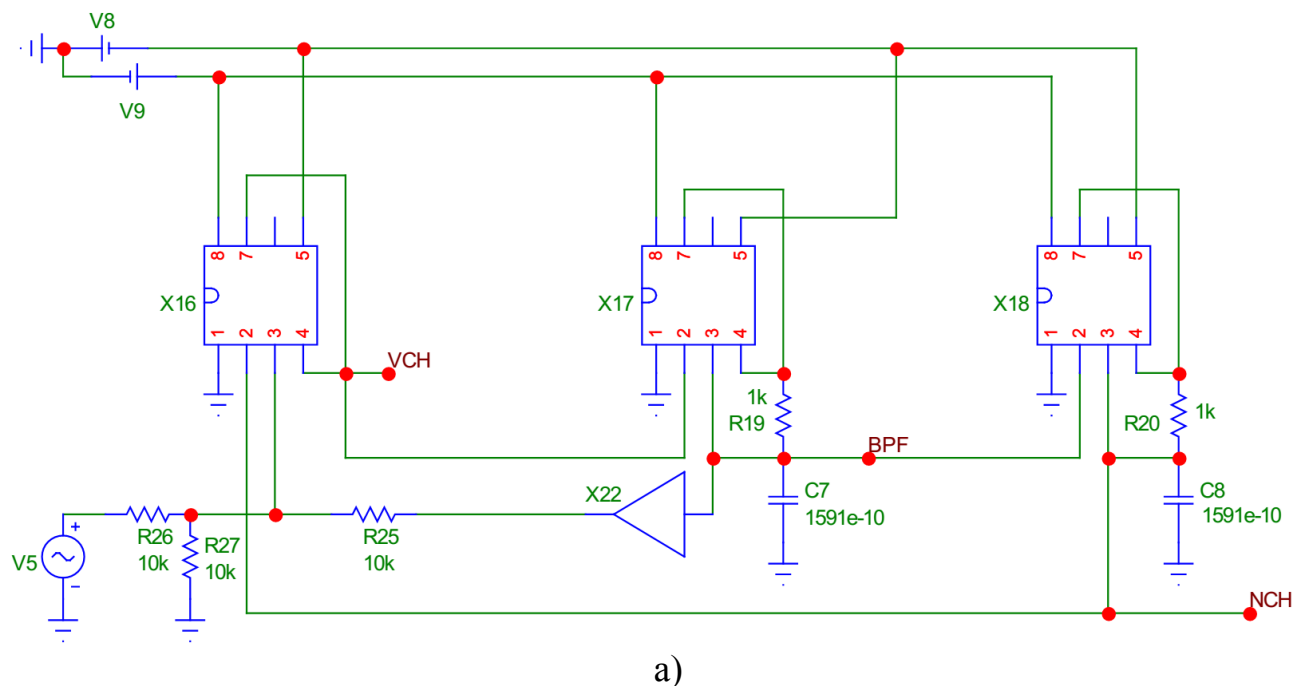
и затухание полюса:

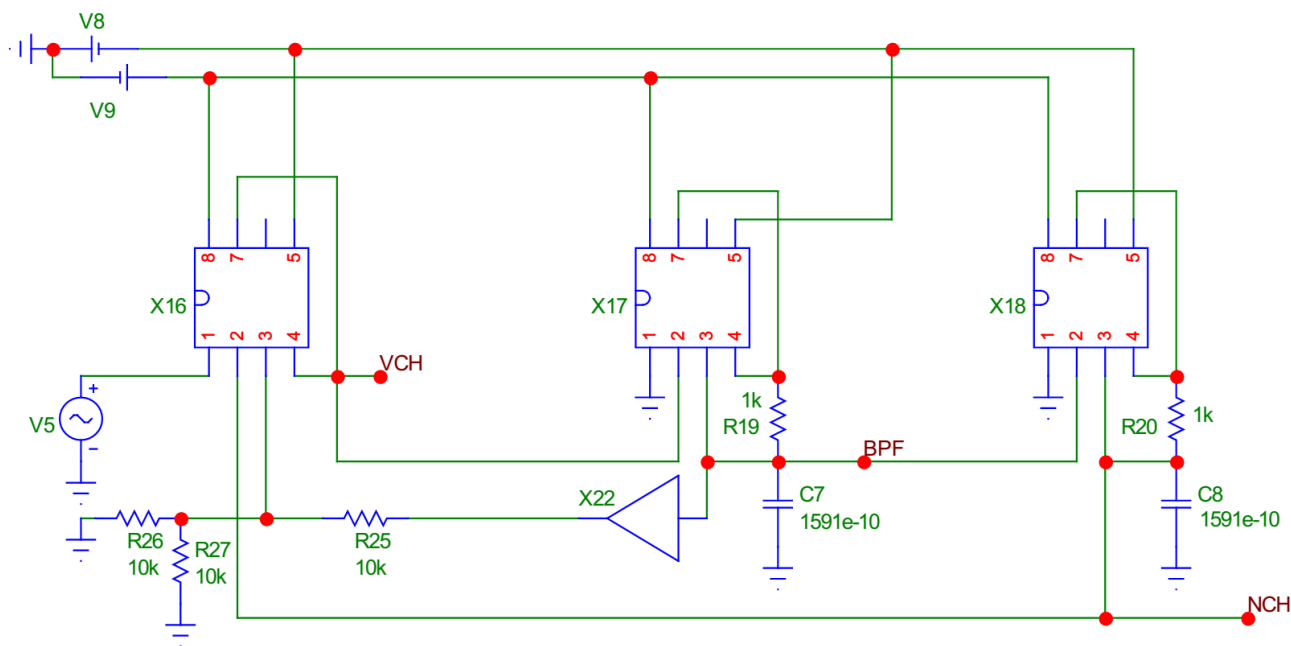
$$d_p = \alpha \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}. \quad (6)$$

определяются одинаковыми математическими выражениями.

### 3. Компьютерное моделирование УАРСФ

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





б)

Рисунок 2 – Схемы включения УАРСФ рис.1 для случаев подключения источника сигнала к первому входу (ФВЧ, ФНЧ) (а) и ко второму входу (ПФ) (б)

На рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) при подключении источника сигнала к первому входу схемы УАРСФ рис. 2а, полученные в среде Micro-Cap 11, а на рис. 4 изображены АЧХ УАРСФ рис. 2б при подключении источника сигнала ко второму входу.

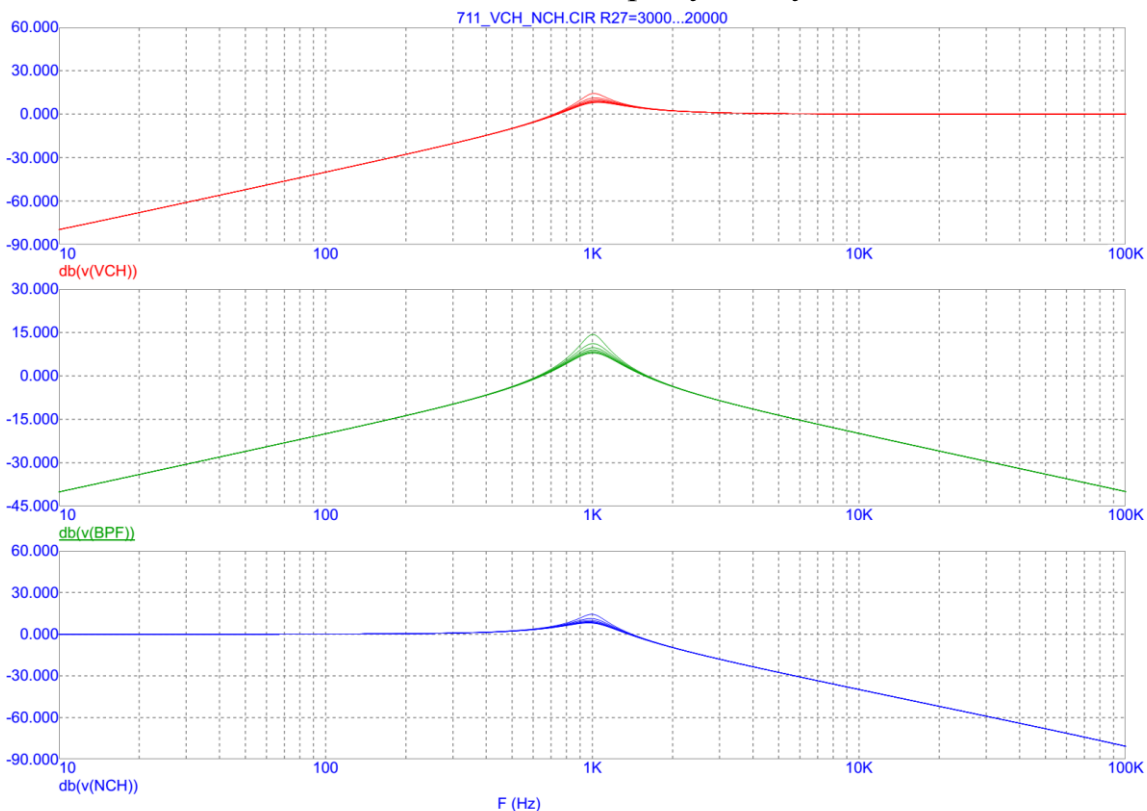


Рисунок 3 - АЧХ УАРСФ рис. 2а

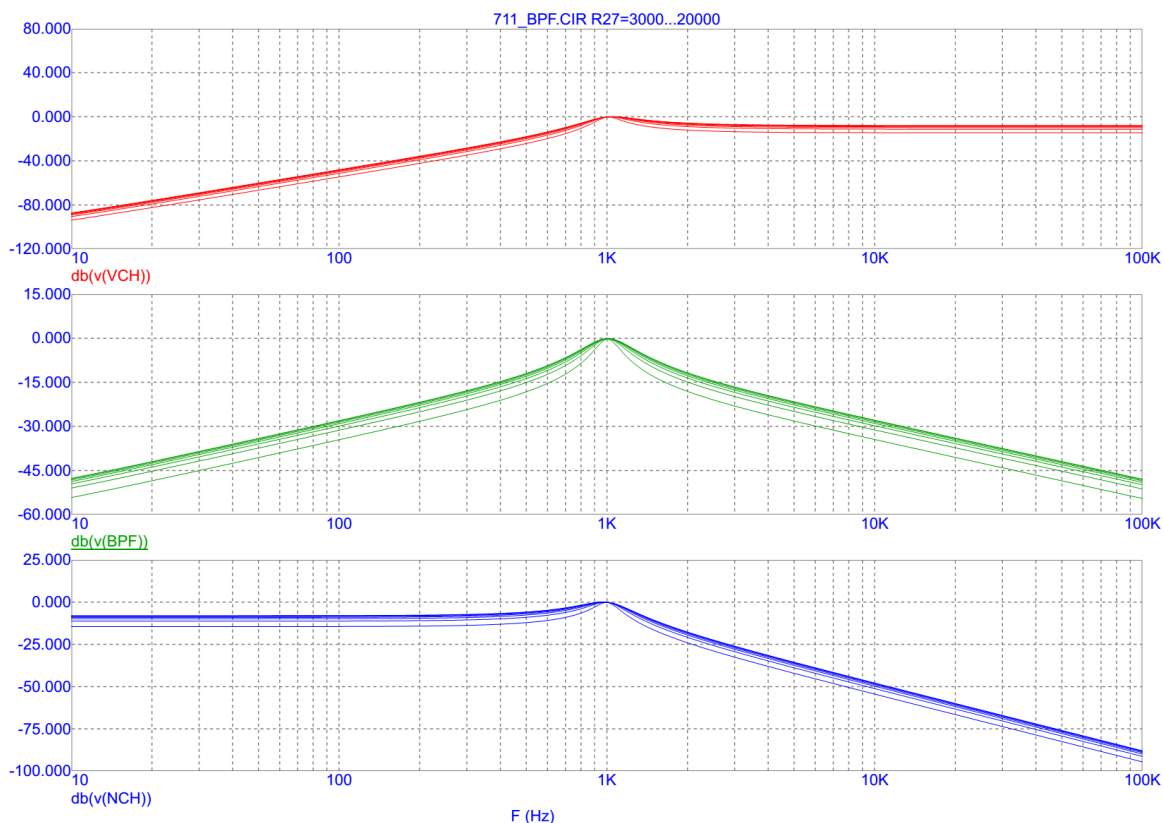


Рисунок 4 - АЧХ УАРСФ рис 2б

Анализ графиков рис. 3 и рис. 4 показывает, что УАРСФ рис. 1 позволяет реализовать на его выходах ФВЧ, ПФ, ФНЧ. Кроме этого, как следует из формулы (6), УАРСФ обеспечивает широкодиапазонную регулировку добротности полюса за счёт изменения сопротивления резистора R4. Схема УАРСФ рис. 1 имеет также увеличенное затухание АЧХ вне диапазона рабочих частот, что связано с положительным влиянием на АЧХ частотных характеристик МОУ. Таким образом, предлагаемый фильтр имеет существенные преимущества в сравнении с классическими решениями.

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

### Netlist схемы УАРСФ второго порядка рис. 2а

- 1: Filtr\_710.CIR AC Analysis
  - Converted From Micro Cap Source file to PSPICE
- 2: \*
- 3: .FUNC DPWR(D) {I(D)\*V(D)}
- 4: .FUNC BPWR(Q) {IC(Q)\*VCE(Q)+IB(Q)\*VBE(Q)}
- 5: .FUNC FPWR(M) {ID(M)\*VDS(M)}
- 6: .FUNC HOTD(D,MAX) {IF((V(D)\*I(D)>MAX),1,0)}
- 7: .FUNC HOTB(Q,MAX) {IF((VCE(Q)\*IC(Q)+IB(Q)\*VBE(Q)>MAX),1,0)}

```

8: .FUNC HOTF(M,MAX) {IF((VDS(M)*ID(M)>MAX),1,0)}
9: .PARAM LOW3MIN={IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES)}
10: .PARAM HIGH3MAX={IMPORT(HIGH3MAX.OUT,HIGH3THRES)}
11: .PARAM LOWLVDS={IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT)}
12: .PARAM HILVDS={IMPORT(HILVDS.OUT,HILIMIT)}
13: .PARAM LIMTLVDS={IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS)}
14: .FUNC          SKINAC(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)**2))*DCRES}
15: .FUNC          SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*F)))}
16: .FUNC          SKINTR(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS,FREQ)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)**2))*DCRES}
17: .FUNC          SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*FREQ)))}
18: C7 0 BPF 1591e-10
19: C8 0 NCH 1591e-10
20: R19 9 BPF 1k
21: R20 10 NCH 1k
22: V1 VC 0 DC 5
23: V2 VE 0 DC -5
24: V5 INTERIOR_NONE1 0 AC 1 SIN (0 1 1000 0 0 0)
25: RV5 3 INTERIOR_NONE1 1 ;added by V5
26: V6 VC1 0 DC 15
27: V7 VE1 0 DC -15
28: V8 0 7 DC 15
29: V9 8 0 DC 15
30: X16 3 NCH BPF VCH 7 VCH 8 AD830_AD
31: X17 0 VCH BPF 9 7 9 8 AD830_AD
32: X18 0 BPF NCH 10 7 10 8 AD830_AD
33: *
34: *** From file F:\MC12\library\ANALOG.LIB
35: .SUBCKT AD830_AD 1 2 3 4 5 7 8
36: *
• X1-X2 INPUT STAGE
37: *
38: Q1 17 1 9 QX
39: Q2 18 11 10 QX
40: R1 9 12 1100
41: R2 10 12 1100
42: I1 12 5 2E-3
43: EOS1 2 11 POLY(1) (31,98) 1.5E-3 1
44: IOS1 1 2 0.5E-7
45: C1 1 2 2E-12
46: RD1 1 2 1.93E6

```

47: \*  
 • Y1-Y2 INPUT STAGE  
 48: \*  
 49: Q3 17 3 14 QX  
 50: Q4 18 13 15 QX  
 51: R3 14 16 1100  
 52: R4 15 16 1100  
 53: I2 16 5 2.02E-3  
 54: VOS2 4 13 1.5E-3  
 55: IOS2 3 4 0.5E-7  
 56: C2 3 4 2E-12  
 57: RD2 3 4 1.93E6  
 58: \*  
 59: VC1 32 17 DC 0.4  
 60: VC2 33 18 DC 0.4  
 61: D7 8 32 DX  
 62: D8 8 33 DX  
 63: \*  
 64: EREF 98 0 24 0 1  
 65: \*  
 66: \* TRANSCONDUCTANCE STAGE DOMINANT POLE AT 17.9 KHZ  
 67: \*  
 68: R7 19 98 2.46E6  
 69: C3 19 98 3.62E-12  
 70: F1 98 19 POLY(2) VC1 VC2 0 1 -1  
 71: V2 8 20 1.7  
 72: V3 21 5 1.7  
 73: D1 19 20 DX  
 74: D2 21 19 DX  
 75: \*  
 • POLE AT 250 MHZ  
 76: \*  
 77: R6 22 98 1E6  
 78: C4 22 98 637E-18  
 79: G2 98 22 19 98 1E-6  
 80: \*  
 • COMMON-MODE GAIN NETWORK WITH ZERO AT 100 KHZ  
 81: \*  
 82: R10 30 31 1E6  
 83: R11 31 98 1  
 84: C7 30 31 3.18E-12  
 85: E3 98 30 POLY(2) (1,98) (2,98) 0 5 5  
 86: \*  
 • POLE AT 200 MHZ  
 87: \*

```

88: R12 23 98 1E6
89: C8 23 98 796E-18
90: G4 98 23 22 98 1E-6
91: *
  • OUTPUT STAGE
92: *
93: R13 24 8 500E3
94: R14 24 5 500E3
95: FSY 8 5 POLY(2) V7 V8 10E-3 1 1
96: R15 29 8 34
97: R16 29 5 34
98: L1 29 7 6E-10
99: G7 29 8 8 23 2.94E-2
100: G8 5 29 23 5 2.94E-2
101: V4 25 29 0.74
102: V5 29 26 0.74
103: D3 23 25 DX
104: D4 26 23 DX
105: G5 98 70 29 23 2.94E-2
106: D5 70 71 DX
107: D6 72 70 DX
108: V7 71 98 DC 0
109: V8 98 72 DC 0
110: *
  • MODELS USED
111: *
112: .MODEL QX NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=202 BR=1 CJC=0 CJE=0 CJS=0
    EG=1.11 FC=500m
113: + GAMMA=10p IKF=0 IKR=0 IRB=0 IS=.1f ISC=0 ISE=0 ISS=0 ITF=0
    KF=0 MJC=330m
114: + 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
115: + RBM=0 RC=0 RCO=0 RE=0 TF=0 TR=0 TRB1=0 TRB2=0 TRC1=0
    TRC2=0 TRE1=0 TRE2=0
116: + TRM1=0 TRM2=0 VAF=0 VAR=0 VG=1.206 VJC=750m VJE=750m
    VJS=750m VO=10 VTF=0
117: + XCJC=1 XTB=0 XTF=0 XTI=3)
118: .MODEL DX D (LEVEL=2 AF=1 BV=0 CJO=0 EG=1.11 FC=500m
    IBV=100p IBVL=0 IKF=0
119: + 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
120: + TIKF=0 TRS1=0 TRS2=0 TT=0 VJ=1 XTI=3)
121: .ENDS
122: *
123: .OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
    DEFW=100u DEFNRD=0

```



```

124: + DEFNRS=0  DEFPD=0  DEFPS=0  DIGDRVF=2  DIGDRVZ=20K
      DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
125: + DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
      DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
126: + DIGTYMXSCALE=1.6  GMIN=1p  ITL1=100  ITL2=50  ITL4=10
      PIVREL=1m PIVTOL=.1p RELTOL=1m
127: + TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
128: *
129: .LIB "F:\MC12\library\NOM.LIB"
130: *
131: .TEMP 27
132: *
133: .AC LIN 50 10 1E5
134: .PLOT AC vDB([VCH])
135: .PLOT AC vDB([BPF])
136: .PLOT AC vDB([NCH])
137: *
138: .PROBE
139: .END

```

### Список литературы:

1. Estimation to Efficiency of the Using of Anti-Alias Filter in the A/D Interface of Instrumentation and Control Systems / L.K. Samoylov, N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14 - 17, 2018, pp. 422-425
2. Выбор параметров аналоговых ограничителей спектра для цифровых систем обработки сигналов с учетом допусков и температурной нестабильности пассивных компонентов / Денисенко Д.Ю., Иванов Ю.И., Прокопенко Н.Н. // Радиотехника. – 2017. - № 1. – С.148-153
3. The Function Approximation of the Signal Delay Time in the Anti-Alias Filter of the A/D Interface of the Instrumentation and Control System / L.K. Samoylov, D.Yu.Denisenko, N.N. Prokopenko // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2018), October 22-23, 2018, Saint Petersburg, Russia
4. Selection of the Band-Pass Range of the Normalizing Signal Transducer of the Sensing Element in the Instrumentation and Control Systems / L.K. Samoylov, N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova // 2018 14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Solid-State

and Integrated Circuit Technology (ICSICT'2018). Proceedings. Oct.31-Nov.3, 2018, Qingdao, China

5. Пат. 1777233 СССР, МПК Н03Н 11/12. Активный RC-фильтр / Гришин С.В., Иванов Ю.И., Крутччинский С.Г.; заявитель и патентообладатель «Таганрогский радиотехнический институт им. В.Д. Калмыкова ». – № 4828626/09; заявл. 23.05.90; опубл. 23.11.92, Бюл. № 43. – 7с.

6. Пат. 2089998 Российская Федерация, Н03Н11/12. Полосовой активный RC-фильтр/ Гришин С.В., Крутччинский С.Г., Иванов Ю.И.; заявитель и патентообладатель «Таганрогский государственный радиотехнический университет»; заявл. 04.08.1992; опубл. 10.09.1997, Бюл. № 28. – 5с.

7. Пат. 2702496 Российская Федерация, МПК Н03Н 11/00, СПК Н03Н 11/12. Универсальный активный RC - фильтр на основе мультидифференциальных операционных усилителей/ Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – № 2019107341/01; заявл. 15.03.2019; опубл. 08.10.2019, Бюл. № 28. – 32с.

8. Пат. 2730172 Российская Федерация, МПК Н03Н 11/00, Н03Н 11/12, Н03Н 11/18. Универсальный активный RC - фильтр второго порядка на мультидифференциальных операционных усилителях / Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.Н., Прокопенко Н.Н., Титов А.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – № 2020110715 /02; заявл. 13.03.2020; опубл. 19.08.2020, Бюл. № 23. – 15с.