

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

Библиотека схемотехнических решений

Фильтр нижних частот третьего порядка на основе операционного усилителя с дифференциальным выходом при минимальном количестве конденсаторов на порядок

**Денисенко Д.Ю., d.u.denisenko@gmail.com,
Прокопенко Н.Н., prokopenko@sssu.ru,
Бутырлагин Н.В., nbutyrlagin@mail.ru,
Игнашин А.А., igan_96@mail.ru**

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

1. Применение активных RC-фильтров нижних частот в задачах АЦП-преобразования

Активные RC-фильтры нижних частот (ФНЧ) широко используются в современной электронике, например, в качестве ограничителей спектра, включаемых на входе аналого-цифровых преобразователей различного назначения. Они оказывают существенное влияние на качественные показатели многих аналого-цифровых систем связи и автоматического управления [1-3].

Существенный недостаток классического фильтра, показанного на рис. 1 [4], состоит в том, что при третьем порядке передаточной функции он имеет пять частотоподающих конденсаторов. Кроме этого, при его реализации не обеспечивается высокое ослабление паразитных сигналов за пределами полосы частот полезного сигнала. Это отрицательно сказывается на метрологических характеристиках измерительных систем и устройств ввода аналоговой информации в ЭВМ, в которых ФНЧ определяет динамическую погрешность аналого-цифрового интерфейса [1-3].

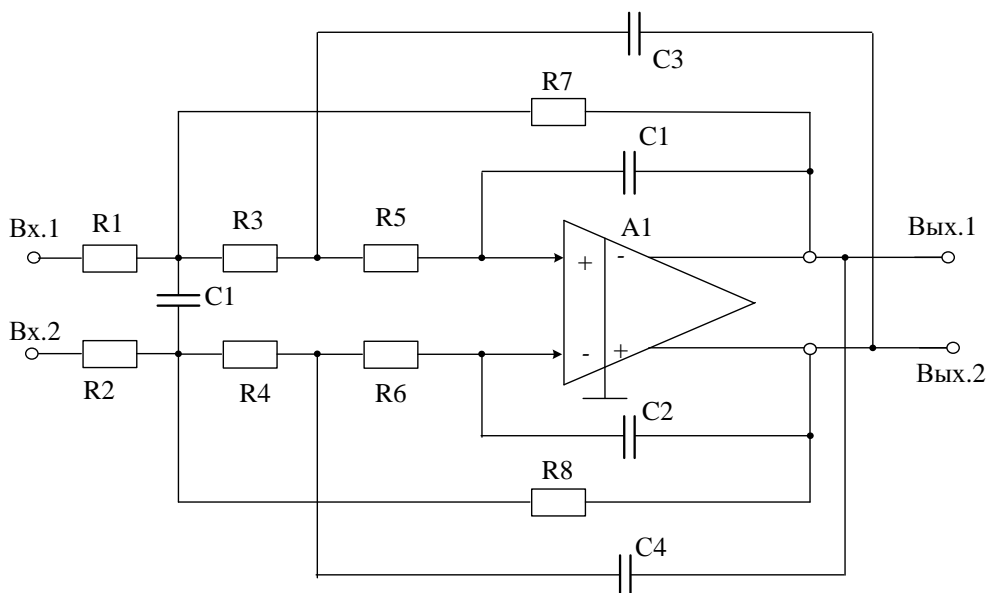


Рисунок 1 – Схема классического ФНЧ [4]

2. Текстовое описание схемы рис. 2

На рис. 2 показана схема предлагаемого фильтра нижних частот [5]. Его задача состоит в уменьшении (при третьем порядке передаточной функции) числа конденсаторов и увеличении гарантированного затухания амплитудно-частотной характеристики вне полосы пропускания.

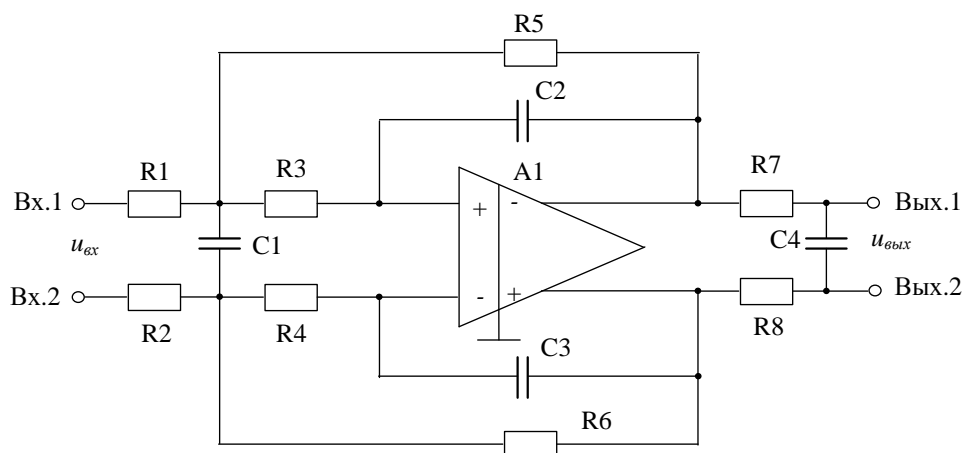


Рисунок 2 – Схема предлагаемого фильтра нижних частот [5]

Передаточная функция ФНЧ 3-го порядка, в т.ч. рис. 2, в общем виде описывается выражением

$$F(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = M \frac{a_0}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (1)$$

где M – коэффициент передачи фильтра на нулевой частоте, $a_2 \dots a_0$ – коэффициенты передаточной функции, зависящие от топологии схемы и параметров её элементов.

Введем обозначения: $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ – сопротивления резисторов $R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8$ соответственно, C_1, C_2, C_3, C_4 – емкости конденсаторов $C1, C2, C3, C4$ соответственно.

При выполнении ряда условий $R_1 = R_2, R_3 = R_4, R_5 = R_6, R_7 = R_8, C_2 = C_3$, которые необходимо обеспечить для симметричной работы каналов ФНЧ, коэффициенты передаточной функции (1) находятся с помощью выражений

$$M = \frac{R_5}{R_1}, \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{1}{2R_5C_1} + \frac{1}{2R_1C_1} + \frac{1}{2R_3C_1} + \frac{1}{2R_7C_4}, \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{1}{4R_5R_7C_4C_1} + \frac{1}{4R_1R_7C_4C_1} + \frac{1}{4R_7R_3C_1C_4} + \frac{1}{2R_5R_3C_1C_2}, \quad (4)$$

$$a_0 = \frac{1}{4R_3R_1R_7C_1C_2C_4}. \quad (5)$$

Функции (1) – (5) позволяют осуществлять синтез схемы ФНЧ при заданных параметрах.

3. Компьютерное моделирование АРС-фильтра рис. 2

Моделирование схемы ФНЧ рис. 2 проводилось в среде MicroCap [6-8] (рис.3) на основе моделей ОУ THS4130 [9] фирмы Texas Instruments.

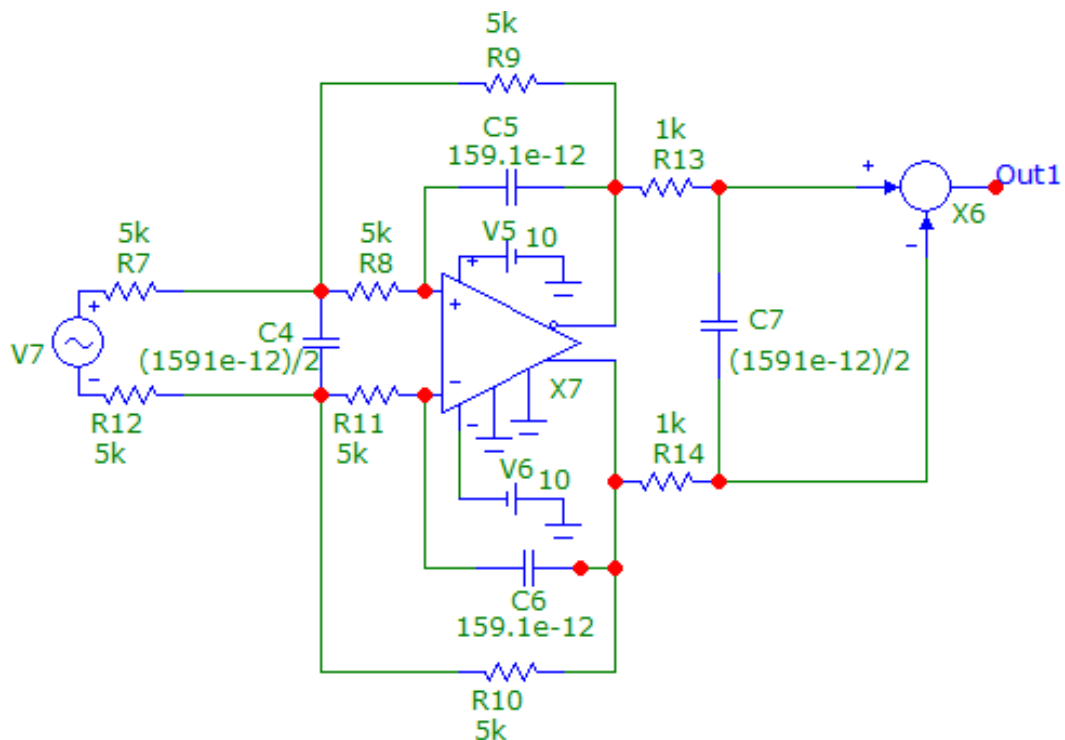


Рисунок 3 – ФНЧ рис. 2 в среде моделирования Micro-Cap

На рис. 4 представлены результаты моделирования амплитудно-частотных характеристик предлагаемого ФНЧ (кривая 1 – для ФНЧ с реальными операционными усилителями, кривая 2 – теоретическая характеристика ФНЧ).

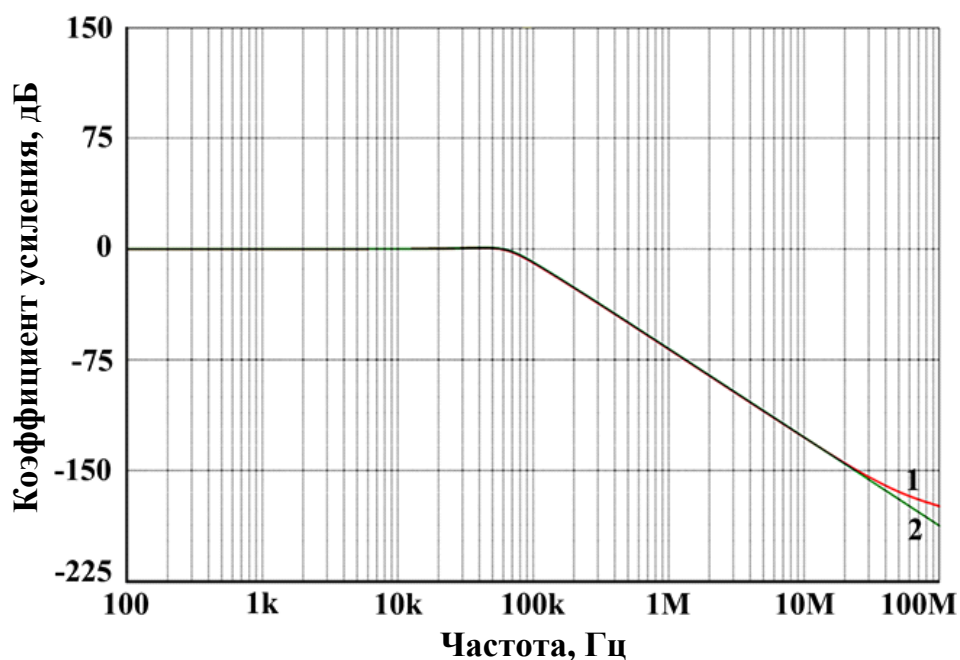


Рисунок 4 - Результаты моделирования амплитудно-частотных характеристик ФНЧ рис.3

Анализ характеристик рис. 4 показывает, что предлагаемый ФНЧ третьего порядка обеспечивает (кривая 1) близкую к идеальной (теоретической) амплитудно-частотную характеристику (кривая 2) при четырех частотоподающих конденсаторах, что на один конденсатор меньше, чем у классического ФНЧ. На современном этапе развития электроники конденсаторы характеризуется большим разбросом параметров и их нестабильностью в диапазоне температур. Уменьшение числа конденсаторов, как наиболее критичных элементов современных фильтров, позволяет упростить настройку ФНЧ рис. 2.

4. Параметры оптимизации

Современные САПР позволяют решать задачи параметрической оптимизации. Основные направления оптимизации схемы рис. 2. состоят в изменении номиналов частотоподающих элементов - сопротивлений резисторов R1-R8, а также ёмкостей конденсаторов C1-C4.

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)))}
C4 6 3 {(1591e-12)/2}
C5 5 7 159.1e-12
C6 8 9 159.1e-12
C7 11 12 {(1591e-12)/2}
R7 3 4 5k
R8 5 3 5k
R9 7 3 5k
R10 6 9 5k
R11 6 8 5k
R12 10 6 5k
R13 11 7 1k
R14 12 9 1k
V2 VC 0 DC 15
V3 VE 0 DC -15
V5 13 0 DC 10
V6 0 14 DC 10
V7 INTERIOR_NONE1 10 AC 1 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
RV7 4 INTERIOR_NONE1 1m ;added by V7
X6 11 12 Out1 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
X7 8 0 13 9 7 14 0 5 THS4130
```

*

*** From file F:\MC12\library\SUB.MAC

```
.SUBCKT SUB PinA PinB PinC PARAMS: KA=1 KB=1
E1 PINC 0 VALUE = {KA*V(PINA)-KB*V(PINB)}
.ENDS SUB
```

*

*** From file F:\MC12\library\TI.LIB

.SUBCKT THS4130 1 2 3 4 5 6 7 8
R51 6 2 30E3
R52 2 3 30E3
C3 5 9 1E-15
C4 9 4 1E-15
C8 8 10 4E-12
C9 1 11 4E-12
R62 0 10 0.1
R63 0 11 0.1
Q18 6 12 13 QOP
Q22 3 14 13 QON
R176 0 5 1E6
D6 5 3 DD
D7 6 5 DD
D8 15 0 DIN
D9 16 0 DIN
I9 0 15 0.1E-3
I10 0 16 0.1E-3
E5 17 0 6 0 1
E6 18 0 3 0 1
D10 19 0 DVN
D11 20 0 DVN
I11 0 19 0.1E-3
I12 0 20 0.1E-3
E7 8 21 19 20 0.163
G3 22 21 15 16 1.5E-22
I13 3 6 1E-6
R178 6 3 1E8
E8 23 0 18 24 1
E9 25 0 17 24 1
E10 26 0 27 0 1
R179 23 28 1E5
R180 25 29 1E5
R181 26 30 1E5
R182 0 28 10
R183 0 29 10
R184 0 30 10
E11 31 1 30 0 0.31
R185 32 27 1E3
R186 27 33 1E3
C18 23 28 1E-12
C19 25 29 0.25E-12
C20 26 30 1E-12
E12 34 31 29 0 -0.06
E13 35 34 28 0 0.06
Q29 18 36 12 QON
Q30 17 36 14 QOP
G7 37 24 38 24 0.1
G8 36 24 37 24 0.1
R187 24 37 10
R188 24 36 10
C22 37 24 2E-10

C23 36 24 2E-14
R191 13 5 5
E19 32 0 21 24 1
E20 33 0 22 24 1
Q34 6 39 40 QOP
Q35 3 41 40 QON
R197 0 4 1E6
D22 4 3 DD
D23 6 4 DD
E21 42 0 6 0 1
E22 43 0 3 0 1
I24 3 6 1E-6
R199 6 3 1E8
Q40 43 44 39 QON
Q41 42 44 41 QOP
G11 45 24 46 24 0.1
G12 44 24 45 24 0.1
R208 24 45 10
R209 24 44 10
C31 45 24 2E-10
C32 44 24 2E-14
R212 40 4 5
G22 43 41 47 0 0.55E-3
G23 39 42 47 0 0.55E-3
G25 18 14 47 0 0.55E-3
G26 12 17 47 0 0.55E-3
G29 3 6 48 0 11.65E-3
E54 49 0 47 0 1
V31 49 48 0
M44 50 7 17 17 NEO L=3U W=300U
M45 51 52 17 17 NEN L=3U W=3000U
R306 50 18 1E4
R307 51 53 1E6
V52 53 17 1
C62 7 0 1E-12
E55 54 0 55 17 1
V53 51 56 1.111E-6
R308 17 56 1E12
C63 18 50 3E-15
C64 53 51 2.5E-15
M50 57 50 17 17 NEN L=3U W=300U
M51 52 57 17 17 NEN L=3U W=300U
R309 57 53 1E4
R310 52 53 1E4
C65 53 57 160E-12
C106 53 52 300E-12
V54 47 54 0.07U
R312 0 54 1E12
R313 0 47 1E12
R314 0 47 1E12
R315 47 0 1E12
R316 47 0 1E12

R317 48 0 1E12
R318 48 0 1E12
E56 9 4 5 4 0.5
E60 58 59 47 0 45
E61 60 38 47 0 -45
V57 61 60 22.5
V58 62 58 -22.5
R328 58 24 1E12
R329 60 24 1E12
M52 38 62 59 63 PSW L=1.5U W=15000U
M53 59 61 38 64 NSW L=1.5U W=15000U
R330 63 24 1E12
R331 64 24 1E12
E62 24 6 3 6 0.5
R332 46 59 0.1
Q42 65 66 67 QIN
Q43 68 21 69 QIN
R338 70 67 15
R339 70 69 15
Q44 71 72 65 QIP
Q45 73 72 68 QIP
Q46 71 74 75 QIN
Q47 73 74 76 QIN
R340 17 75 333
R341 17 76 333
I39 77 78 2.1E-5
I40 79 65 2.1E-3
I41 79 68 2.1E-3
V63 79 72 1.67
Q48 80 81 82 QCP
Q49 74 74 83 QCN
Q50 74 2 84 QCP
R342 82 85 200
R343 84 85 200
I42 3 85 1.05E-3
Q51 80 80 86 QCN
R344 6 86 666
R345 6 83 666
C109 87 71 19.5E-12
C110 73 88 19.5E-12
R346 24 87 60
R347 24 88 60
R348 71 73 7E5
R349 55 51 1E8
C111 55 0 1.5E-14
Q53 70 78 77 QSN
V64 18 79 1.2
V65 77 17 1
I44 0 89 1E-3
D36 89 0 DD
V66 89 90 0.6551
R351 89 0 1E9

E68 22 35 90 0 140E-6
R352 0 90 1E9
V69 66 22 50E-6
V70 81 91 16.15E-3
E69 91 9 90 0 -0.0285
R353 35 22 1E9
R354 34 35 1E9
R355 31 34 1E9
R356 1 31 1E9
R357 6 24 1E9
R358 9 91 1E9
R359 9 4 1E9
R360 7 18 5E4
D37 92 18 DD
D38 93 18 DD
D39 17 94 DD
D40 17 95 DD
V71 92 46 2.14
V72 93 38 2.14
V73 46 94 2.18
V74 38 95 2.18
I45 22 0 1.48E-6
I46 21 0 1.48E-6
G35 3 6 3 6 -15E-6
I47 6 3 0.242E-3
R361 21 8 1E9
V75 38 73 0.55
V76 46 71 0.55
.MODEL PSW PMOS (AF=1 CBD=0 CBS=0 CGBO=0 CGDO=0 CGSO=0 CJ=0 CJSW=0
DELTA=0
+ ETA=0 FC=500m GDSNOI=1 IS=1E-18 JS=0 JSW=0 KF=0 KP=200U L=0 LAMBDA=0
LD=0
+ MJ=500m MJSW=330m N=1 NEFF=1 NFS=0 PB=800m PBSW=800m RB=0 RD=0 RDS=0
RG=0
+ RS=0 RSH=0 THETA=0 TT=0 UCRIT=10K UEXP=0 UTRA=0 VMAX=0 VTO=-7.5 W=0
WD=0 XJ=0
+ XQC=1)
.MODEL NSW NMOS (AF=1 CBD=0 CBS=0 CGBO=0 CGDO=0 CGSO=0 CJ=0 CJSW=0
DELTA=0
+ ETA=0 FC=500m GDSNOI=1 IS=1E-18 JS=0 JSW=0 KF=0 KP=200U L=0 LAMBDA=0
LD=0
+ MJ=500m MJSW=330m N=1 NEFF=1 NFS=0 PB=800m PBSW=800m RB=0 RD=0 RDS=0
RG=0
+ RS=0 RSH=0 THETA=0 TT=0 UCRIT=10K UEXP=0 UTRA=0 VMAX=0 VTO=7.5 W=0
WD=0 XJ=0
+ XQC=1)
.MODEL QSN NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=100 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 QCN NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=100 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 QCP PNP (LEVEL=1 AF=1 BF=100 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 QON NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=150 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=3 TF=0 TR=0 TRB1=0 TRB2=0 TRC1=0 TRC2=0 TRE1=0
 TRE2=0
 + TRM1=0 TRM2=0 VAF=90 VAR=0 VG=1.206 VJC=750m VJE=750m VJS=750m VO=10
 VTF=0
 + XCJC=1 XTB=0 XTF=0 XTI=3)
 .MODEL QOP PNP (LEVEL=1 AF=1 BF=150 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=3 TF=0 TR=0 TRB1=0 TRB2=0 TRC1=0 TRC2=0 TRE1=0
 TRE2=0
 + TRM1=0 TRM2=0 VAF=90 VAR=0 VG=1.206 VJC=750m VJE=750m VJS=750m VO=10
 VTF=0
 + XCJC=1 XTB=0 XTF=0 XTI=3)
 .MODEL QIN NPN (LEVEL=1 AF=1 BF=2000 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=3E-16
 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=12.1 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 QIP PNP (LEVEL=1 AF=1 BF=2000 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=3E-16
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=12.1 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 DVN D (LEVEL=2 AF=1 BV=0 CJO=0 EG=1.11 FC=500m IBV=100p IBVL=0
IKF=0
+ IS=10f ISR=0 KF=1.5E-15 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)
.MODEL DIN D (LEVEL=2 AF=1 BV=0 CJO=0 EG=1.11 FC=500m IBV=100p IBVL=0
IKF=0
+ IS=10f ISR=0 KF=9E-16 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)
.MODEL DD D (LEVEL=2 AF=1 BV=0 CJO=0 EG=1.11 FC=500m IBV=100p IBVL=0
IKF=0
+ IS=10f 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)
.MODEL NEN NMOS (AF=1 CBD=0 CBS=0 CGBO=0 CGDO=0 CGSO=0 CJ=0 CJSW=0
DELTA=0
+ ETA=0 FC=500m GDSNOI=1 IS=1E-18 JS=0 JSW=0 KF=0 KP=200U L=0 LAMBDA=0
LD=0
+ MJ=500m MJSW=330m N=1 NEFF=1 NFS=0 PB=800m PBSW=800m RB=0 RD=0 RDS=0
RG=0
+ RS=0 RSH=0 THETA=0 TT=0 UCRIT=10K UEXP=0 UTRA=0 VMAX=0 VTO=0.5 W=0
WD=0 XJ=0
+ XQC=1)
.MODEL NEO NMOS (AF=1 CBD=0 CBS=0 CGBO=0 CGDO=0 CGSO=0 CJ=0 CJSW=0
DELTA=0
+ ETA=0 FC=500m GDSNOI=1 IS=1E-18 JS=0 JSW=0 KF=0 KP=200U L=0 LAMBDA=0
LD=0
+ MJ=500m MJSW=330m N=1 NEFF=1 NFS=0 PB=800m PBSW=800m RB=0 RD=0 RDS=0
RG=0
+ RS=0 RSH=0 THETA=0 TT=0 UCRIT=10K UEXP=0 UTRA=0 VMAX=0 VTO=0.8 W=0
WD=0 XJ=0
+ XQC=1)
.ENDS
*
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u DEFW=100u
DEFNRD=0

```

```
+ DEFNRS=0 DEFPPD=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:\MC12\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
*
.AC DEC 167 100 1E8
.PLOT AC vDB([OUT1])
*
.PROBE
.END
;$SpiceType=PSPICE
```

Список литературы

1. L. K. Samoylov, D. Y. Denisenko and N. N. Prokopenko, "The Function Approximation of the Signal Delay Time in the Anti-Alias Filter of the A/D Interface of the Instrumentation and Control System," 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russia, 22-23 Oct. 2018, pp. 18-21. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564413.
2. Samoylov L.K., Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N. / Analog/digital anti-aliasing filters // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019, 18–20 апреля, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SIBCON.2019.8729645 WOS:000477706200083
3. Динамические погрешности процесса ввода сигналов датчиков в аналого-цифровых системах управления и контроля / Л.К. Самойлов, Д.Ю. Денисенко, Н.Н. Прокопенко // Радиотехника. № 3. 2019 С. 63-69 DOI 10.18127/j00338486-201903-10
4. Денисенко Д.Ю., Жебрун Е.А., Бугакова А.В., Прокопенко Н.Н. «Активный RC-фильтр нижних частот третьего порядка с дифференциальным входом на базе операционного усилителя с парафазным выходом»; Патент RU 2695981; опубл.: 29.07.2019.
5. Фильтр нижних частот третьего порядка с минимальным количеством конденсаторов на порядок; H03H 11/12, H03H 3/70, G01M 1/22, G01H 17/00 / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Игнашин А.А. - № 2019137446; Заявл. 21.11.19.
6. Micro-Cap 10 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide [Online]. Available: <https://www.spectrumsoft.com/download/ug10.pdf>
7. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual [Online]. Available: <https://www.iee.et.tudresden.de/~jmueller/simulation/soft/microcap/MC11.RefManual.pdf>
8. Micro-Cap 12 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide [Online]. Available: <http://www.spectrumsoft.com/download/ug12.pdf>
9. THS413x High-Speed, Low-Noise, Fully-Differential I/O Amplifiers [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ths4131.pdf>