

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

**Библиотека схемотехнических решений**

**Активный RC-фильтр нижних частот третьего порядка на  
операционном усилителе с парафазным выходом**

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)

Иванов Ю.И., [yiivanov@sfedu.ru](mailto:yiivanov@sfedu.ru)

Свизев Г.А., [grits1989@mail.ru](mailto:grits1989@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 системах автоматического управления, в различных аналого-цифровых преобразователях (АЦП) часто применяются аналоговые активные RC-фильтры нижних частот (ФНЧ), которые выполняют функцию ограничителей спектра входных сигналов. Так, АЦП с дифференциальным входом подразумевают использование антиэлайзинговых ФНЧ с дифференциальным выходом.

Существенным недостатком известного ФНЧ рис. 1 [1], является то, что при его реализации не обеспечивается высокое ослабление паразитных сигналов за пределами полосы частот полезного сигнала.

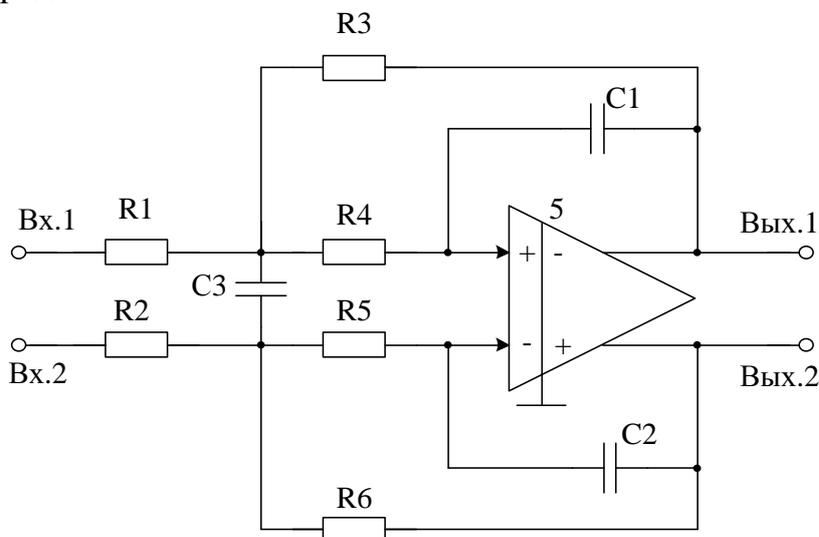


Рисунок 1 – Схема классического ФНЧ с дифференциальными входом и выходом [1]

## 2. Текстовое описание предлагаемой схемы ФНЧ рис. 2

В предлагаемом ФНЧ третьего порядка [2] (рис. 2) обеспечивается увеличение крутизны амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в переходной области и увеличение затухания АЧХ в полосе задерживания. Данный эффект достигается за счет повышения порядка ФНЧ, причем без применения дополнительных активных элементов.

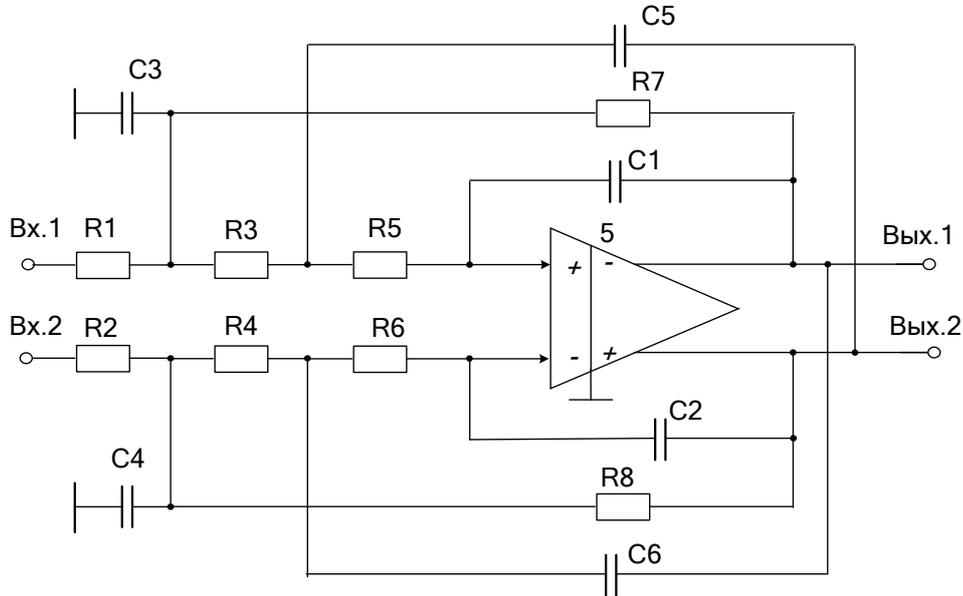


Рисунок 2 – Схема ФНЧ третьего порядка [2]

В общем случае передаточная функция схемы ФНЧ 3-го порядка, в т.ч. рис. 2, описывается выражением [3,4,5]

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

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

При анализе введем следующие обозначения:  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$  – сопротивления резисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$  соответственно,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – емкости конденсаторов  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  соответственно.

При выполнении ряда условий

$$R_1 = R_2, R_3 = R_4, R_5 = R_6, R_7 = R_8, \\ C_1 = C_2; C_3 = C_4, C_5 = C_6,$$

которые необходимо обеспечить в схеме рис. 2 для симметричной работы каналов ФНЧ, коэффициенты передаточной функции (1) находятся с помощью следующих формул

$$\left. \begin{aligned}
 M &= \frac{R_7}{R_1}, \\
 a_2 &= \frac{1}{R_7 C_3} + \frac{1}{R_3 C_5} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_5 C_5} + \frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_5 C_8}, \\
 a_1 &= \frac{1}{R_3 R_7 C_3 C_5} + \frac{1}{R_7 R_5 C_3 C_5} + \frac{1}{R_1 R_3 C_3 C_5} + \\
 &+ \frac{1}{R_1 R_5 C_3 C_5} + \frac{1}{R_3 R_5 C_3 C_5} - \frac{1}{R_1 R_5 C_3 C_8} - \\
 &- \frac{1}{R_5 R_7 C_3 C_8} - \frac{1}{R_3 R_5 C_3 C_8}, \\
 a_0 &= \frac{1}{R_3 R_5 R_7 C_3 C_5 C_8}.
 \end{aligned} \right\} (2)$$

### 3. Компьютерное моделирование ФНЧ рис. 2

ФНЧ рис. 2 моделировался в среде MicroCap11 в соответствии со схемой рис. 3.

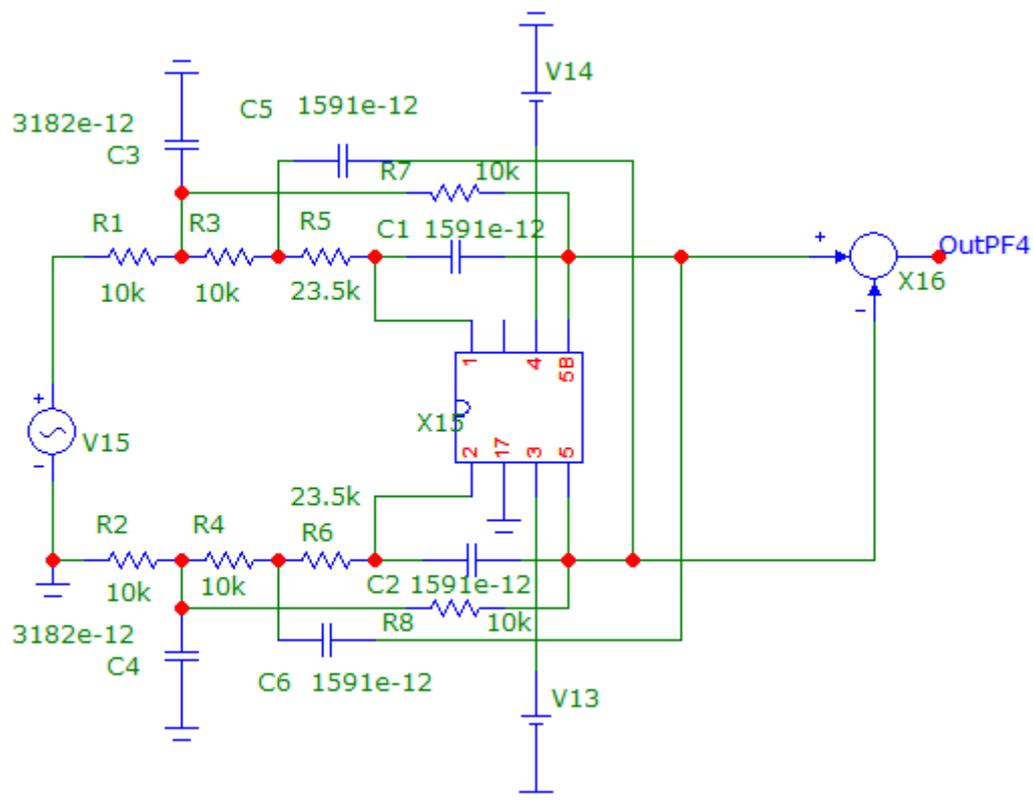


Рисунок 3 – Схема ФНЧ третьего порядка рис.2 в среде MicroCap11

На рис. 4 представлено сравнение трех АЧХ предлагаемой схемы ФНЧ, полученных при компьютерном моделировании на ОУ THS4131 («1»), AD8132 («2») и теоретических расчетах («3»), выполненных по формуле (1).

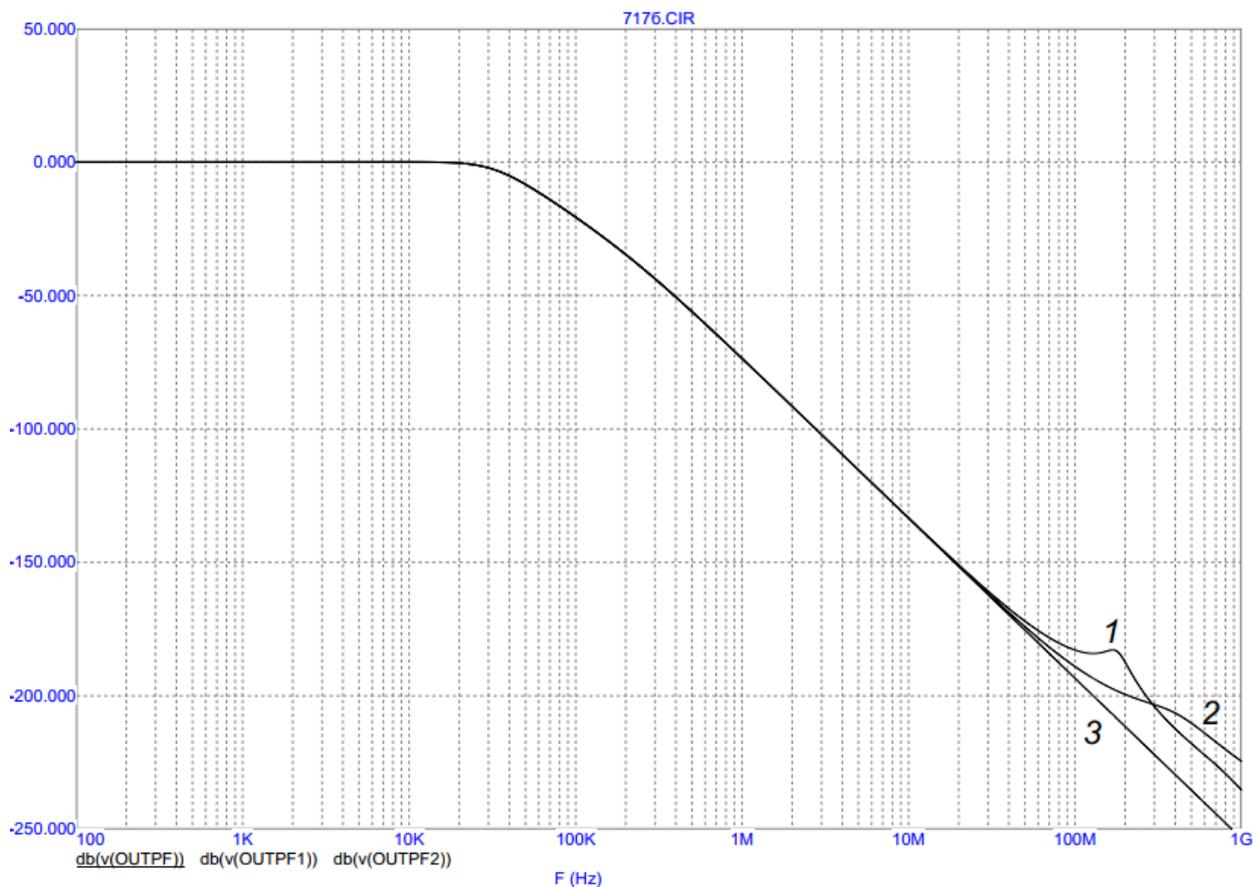


Рисунок 4 - Сравнение трех АЧХ предлагаемой схемы ФНЧ

Незначительное отклонение в области высоких частот амплитудно-частотной характеристики, полученной в результате моделирования схемы с реальными ОУ («1», «2») от АЧХ, полученной расчетным путем («3») по формуле (1), связано с влиянием частотных свойств ОУ, которое не учитывалось при нахождении коэффициентов (2) передаточной функции (1).

Следовательно, предлагаемая схема обеспечивает практически идеальную теоретическую АЧХ «3» ФНЧ третьего порядка в частотном диапазоне до 50-80 МГц. При этом на данных частотах ФНЧ дает ослабление сигнала более 120 дБ, что достаточно для многих применений.

Кроме этого, схема рис. 2 имеет более высокую крутизну АЧХ в переходной области и повышенное затухание АЧХ в полосе задерживания. Данный эффект достигается за счет повышения порядка ФНЧ, причем без применения дополнительных активных элементов.

Таким образом, предлагаемый ФНЧ, в сравнении с классическим, имеет более высокие обобщенные показатели качества.

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

### Netlist схемы ФНЧ рис. 3

```
* 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)))}
C14 11 0 3182e-12
C15 13 8 1591e-12
C16 14 9 1591e-12
C17 6 9 1591e-12
C18 7 8 1591e-12
C19 0 10 3182e-12
R38 9 10 10k
R39 11 8 10k
R40 10 13 10k
R41 11 14 10k
R42 13 6 23.5k
R43 14 7 23.5k
R44 5 10 10k
R45 0 11 10k
V4 VC 0 DC 15
V5 VE 0 DC -15
V13 3 0 DC 15
V14 0 4 DC 15
V15 INTERIOR_NONE1 0 AC 1 SIN (0 1 2000 0 0 0)
RV15 5 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V15
X15 6 7 3 4 8 9 0 THS4131
```

```

X16 9 8 OutPF4 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
*
*** From file F:\MC11\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:\MC11\library\TI.LIB
.SUBCKT THS4131 1 2 3 4 5 5b 17
*
* INPUT *
Q1 27 1 28 NPN_IN 2
Q2 25 2 29 NPN_IN 2
R2 26 29 15
R1 26 28 15

* SECOND STAGE *
Q3 07 Vref 27 PNP 2
Q4 09 Vref 25 PNP 2
Q5 07 105 06 NPN 1
Q7 09 105 08 NPN 1
R3 4 06 333
R4 4 08 333
Cc 0 09 25.5p
Ccb 0 07 25.5p

* HIGH FREQUENCY SHAPING *
Ehf 34 0 09 0 1
Lhf 34 35 7n
Rhlf 102 35 25
Chf 0 102 23p
Ehfb 24 0 07 0 1
Lhfb 24 33 7n
Rhfb 12 33 25
Chfb 0 12 23p

* OUTPUT *
Q8 102 102 103 PNP 1
Q9 102 102 104 NPN 1
Q10 3 103 30 NPN 5
Q11 4 104 31 PNP 7.5
R5 5 30 4
R7 31 5 4
Q8b 12 12 13 PNP 1
Q9b 12 12 15 NPN 1
Q10b 3 13 22 NPN 5

```

```
Q11b      4  15  23 PNP 7.5
R5b       5b  22  4
R7b      23  5b  4
```

```
* Vcm ERROR AMP *
```

```
Gcm      0 105  16  17b 1e-4
Vcm     17 17b 285e-3
```

```
Rtop     17  3 30k
Rbot     17  4 30k
Rcm      16  5 10k
Ccm      16 5b 100p
Rcm2     16 5b 10k
Ccm2     16  5 100p
```

```
* BIAS SOURCES *
```

```
V1       3 Vref 1.85
I1       3 27 DC 2.1e-3
I2       3 25 DC 2.1e-3
I3       0 103 DC 1.225e-3
I4       26  4 DC 2.1e-3
I5      104  0 DC 1.86e-3
I6       0 13 DC 1.225e-3
I7      15  0 DC 1.86e-3
```

```
.MODEL NPN_IN NPN
```

```
+ IS=170E-18 BF=400 NF=1 VAF=100 IKF=0.0389 ISE=7.6E-18
+ NE=1.13489 BR=1.11868 NR=1 VAR=4.46837 IKR=8 ISC=8E-15
+ NC=1.8 RB=25 RE=0.1220 RC=20 CJE=120.2E-15 VJE=1.0888
MJE=0.381406
+ VJC=0.589703 MJC=0.265838 FC=0.1 CJC=133.8E-15 XTF=272.204
TF=12.13E-12
+ VTF=10 ITF=0.147 TR=3E-09 XTB=1 XTI=5 KF=7.5E-14
```

```
.MODEL NPN NPN
```

```
+ IS=170E-18 BF=100 NF=1 VAF=100 IKF=0.0389 ISE=7.6E-18
+ NE=1.13489 BR=1.11868 NR=1 VAR=4.46837 IKR=8 ISC=8E-15
+ NC=1.8 RB=250 RE=0.1220 RC=200 CJE=120.2E-15 VJE=1.0888
MJE=0.381406
+ VJC=0.589703 MJC=0.265838 FC=0.1 CJC=133.8E-15 XTF=272.204
TF=12.13E-12
+ VTF=10 ITF=0.147 TR=3E-09 XTB=1 XTI=5
```

```
.MODEL PNP PNP
```

```
+ IS=296E-18 BF=100 NF=1 VAF=100 IKF=0.021 ISE=494E-18
+ NE=1.49168 BR=0.491925 NR=1 VAR=2.35634 IKR=8 ISC=8E-15
```

```

+ NC=1.8 RB=250 RE=0.1220 RC=200 CJE=120.2E-15 VJE=0.940007
MJE=0.55
+ VJC=0.588526 MJC=0.55 FC=0.1 CJC=133.8E-15 XTF=141.135
TF=12.13E-12
+ VTF=6.82756 ITF=0.267 TR=3E-09 XTB=1 XTI=5

.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:\MC11\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
*
.TRAN 0.0001 5m 0 0.001m UIC
.PLOT TRAN v(OUTPF)
*
.AC LIN 49999 0.01 1E8
.PLOT AC vDB([OUTPF4]) -200,50
*
.PROBE
.END
; $SpiceType=PSPICE

```

### Список литературы:

1. Texas Instruments «THS413x High-Speed, Low-Noise, Fully-Differential I/O Amplifiers». SLOS318I –MAY 2000–REVISED AUGUST 2015. p. 20, fig. 41.
2. Активный RC-фильтр нижних частот третьего порядка на операционном усилителе с парафазным выходом; МПК: H03H 11/12, H03H 3/70, G01M 1/22, G01H 17/00 / Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.В., Титов А.Е., Прокопенко Н.Н. – заявка на патент РФ № 2019105508/08; Заявл. 27.02.19.

3. The Antialiasing ARC-LPF with Independent Trimming of the Main Characteristics / D. Denisenko, N. Prokopenko, Y. Ivanov // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 - October 2, 2017. Pp. 571-574
4. Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.В., Иванов Ю.И., Прокопенко Н.Н., Активный RC-фильтр для обработки сигналов пьезоэлектрического преобразователя на основе мультидифференциального операционного усилителя [Электронный ресурс] // Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН: [сайт]. [2018]. URL: <http://www.ippm.ru/index.php?page=journ&code=J25> (дата обращения: 17.11.2018).
5. Низкочувствительный активный RC-фильтр второго порядка с расширенным частотным диапазоном/ Д.Ю. Денисенко, Н.Н. Прокопенко// VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», МЭС-2018., Москва. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППИМ РАН, 2018. Выпуск IV. Стр. 17-23.