

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

**Библиотека схемотехнических решений**

**Широкополосный полосовой фильтр с независимой  
подстройкой частоты полюса, затухания полюса и  
коэффициента передачи**

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

Жебрун Е.А., [jackjk@mail.ru](mailto:jackjk@mail.ru)

Титов А.Е., [alex.evgeny.titov@gmail.com](mailto:alex.evgeny.titov@gmail.com)

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

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

## **1. Области применения**

Аналоговые полосовые АРС-фильтры (ПФ) продолжают оставаться крайне востребованными функциональными узлами систем связи и телекоммуникаций. Например, в аналого-цифровых преобразователях на их основе выполняются входные ограничители спектра.

Ведущими микроэлектронными фирмами мира сегодня серийно выпускаются микросхемы цифровых потенциометров, которые находят применение в задачах подстройки параметров активных RC-фильтров [1].

При всём многообразии существующие ПФ нуждаются в улучшении основных параметров, характеризующих их свойства при настройке частоты полюса, затухания полюса и коэффициента передачи в полосе пропускания. Главным недостатком известного АРС-фильтра рис. 1 [2] является то, что при настройке одного параметра с помощью одной группы пассивных элементов схемы изменяются другие параметры.

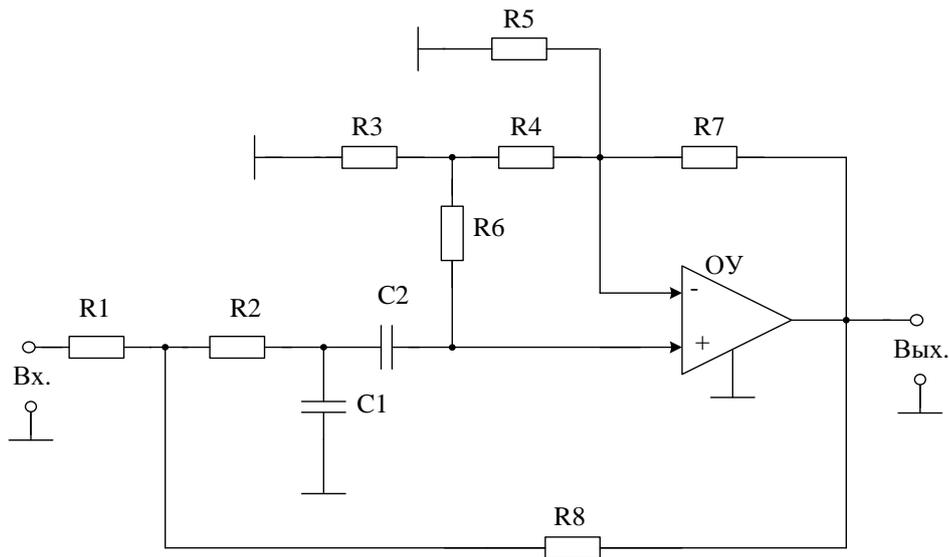


Рисунок 1 - Схема известного ARC-фильтра [2]

## 2. Текстовое описание предлагаемого ПФ рис. 2

Схема разработанного в [3] ПФ представлена на рис. 2. Ее особенность - независимая настройка трёх основных параметров АЧХ, таких как коэффициент передач в полосе пропускания ( $M$ ), затухание полюса ( $d_p$ ), и частота полюса ( $\omega_p$ ).

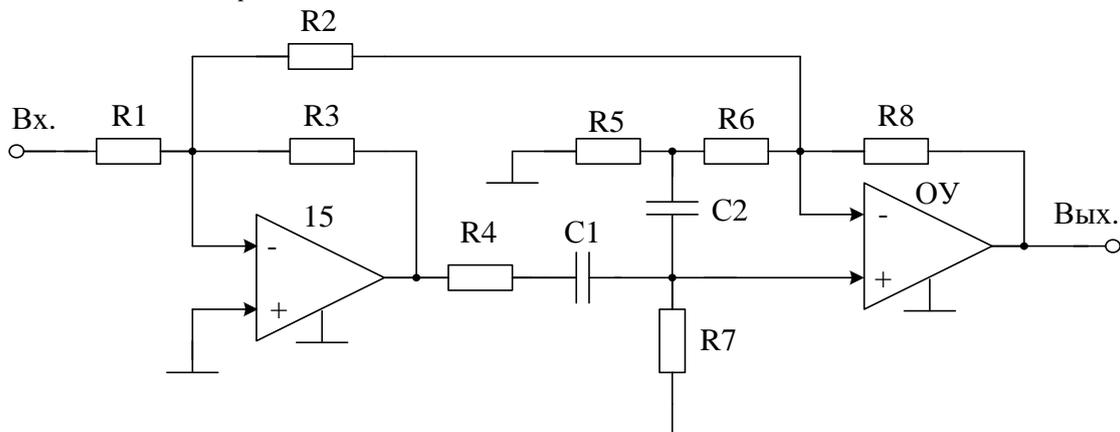


Рисунок 2 - Схема предлагаемого ПФ [3]

Передаточная функция классического полосового фильтра второго порядка, в т.ч. и схемы рис. 2, имеет следующий вид [4,5]

$$F(s) = \frac{U_{\text{Вых.}}(s)}{U_{\text{Вх.}}(s)} = M \frac{sd_p \omega_p}{s^2 + sd_p \omega_p + \omega_p^2},$$

где  $M$  – коэффициент передачи фильтра на центральной частоте;  $\omega_p$  – частота полюса;  $d_p$  – затухание полюса.

Параметры предлагаемого полосового фильтра рис.2 связаны с пассивными элементами схемы следующими формулами:

– коэффициент передачи

$$M = -\frac{\frac{R_2}{R_3}\left(1 + \frac{R_8}{R_5 + R_6}\right)}{\frac{C_2}{C_1} \frac{R_6}{R_5 + R_6} + 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_7}} \quad (1)$$

– частота полюса

$$\omega_p = \sqrt{1 + \frac{R_5}{R_6}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_4 C_1 R_7 C_2}}, \quad (2)$$

– затухание полюса

$$d_p = \sqrt{\frac{R_6}{R_5 + R_6}} \cdot \left( \sqrt{\frac{R_7 C_2}{R_4 C_1}} \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \sqrt{\frac{R_7 C_1}{R_4 C_2}} + \sqrt{\frac{R_4 C_1}{R_7 C_2}} \right), \quad (3)$$

где  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$  - сопротивления резисторов R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8 соответственно,  $C_1, C_2$  - емкости конденсаторов C1 и C2 соответственно.

Схема ПФ рис.2 обеспечивает независимую настройку его параметров, при которой настройка последующего параметра ПФ не потребует изменять сопротивления резисторов, определяющие уже настроенный параметр.

Настройка ПФ рис.2 осуществляется в следующей последовательности.

На первом этапе идёт настройка частоты полюса  $\omega_p$  с помощью резисторов R5 и R6. В дальнейшем сопротивления этих резисторов фиксируются.

На втором этапе с помощью резисторов R1 и R2 осуществляется настройка затухания полюса  $d_p$ .

На третьем этапе с помощью резисторов R3 и R8 настраивается коэффициент передачи M.

Частота  $\omega_p$  в ПФ рис.2 при любом сопротивлении резисторов R5 и R6, будет всегда выше собственной частоты полюса RC-цепи

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_4 C_1 R_7 C_2}}$$

При настройке параметров ПФ необходимо выполнение следующего условия

$$R_{10} \parallel R_{16} \gg R_5 \parallel R_6. \quad (4)$$

При невозможности выполнения условия (4), в схему рис. 2 добавляется повторитель напряжения [3] (рис. 3). Это обеспечивает более высокое ослабление сигнала в диапазоне высоких частот.

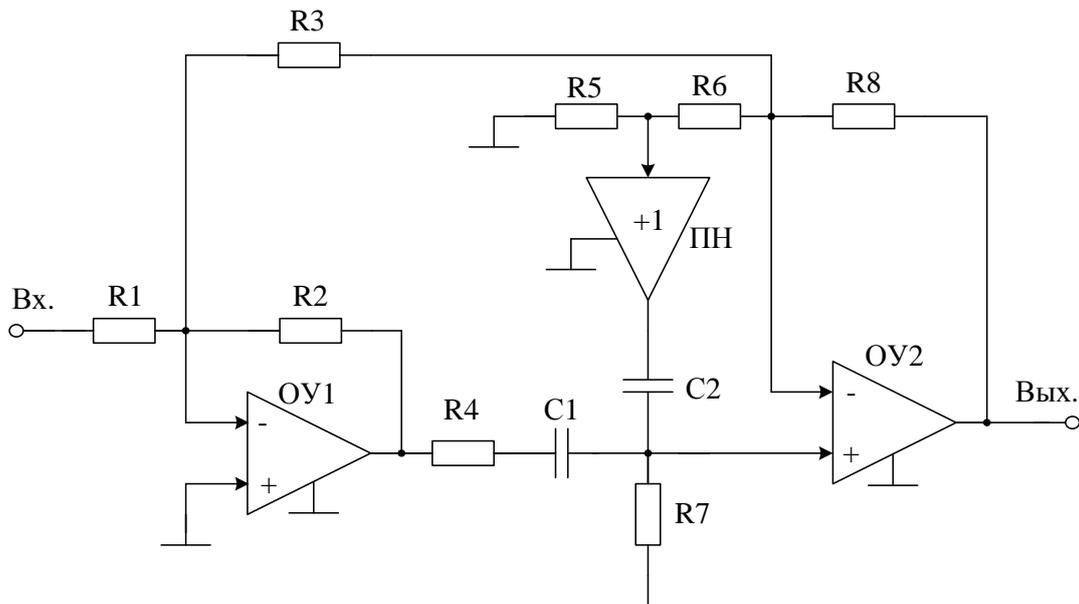


Рисунок 3– Схема ПФ с более высоким ослаблением сигнала в диапазоне высоких частот

### 3. Компьютерное моделирование схемы АРС-фильтра рис. 3

Компьютерное моделирование ПФ рис. 3 проводилось в программе Micro-Cap11 в соответствии со схемой рис. 4.

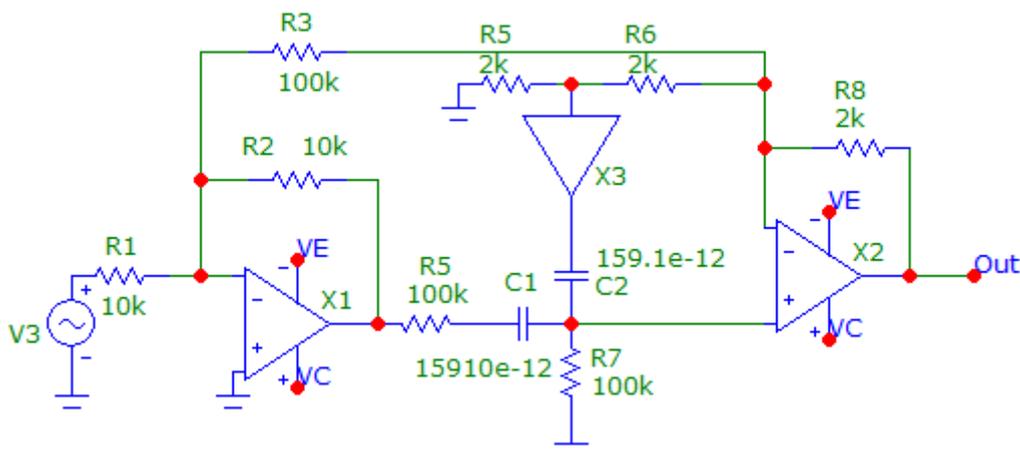


Рисунок 4 – Схема ПФ рис. 3 для моделирования в среде Micro-Cap11

Представленные на рис. 5 амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики ПФ рис.4 показывают, что частота полюса  $\omega_p$  изменяется в относительно широких пределах за счет резисторов R5 и R6.

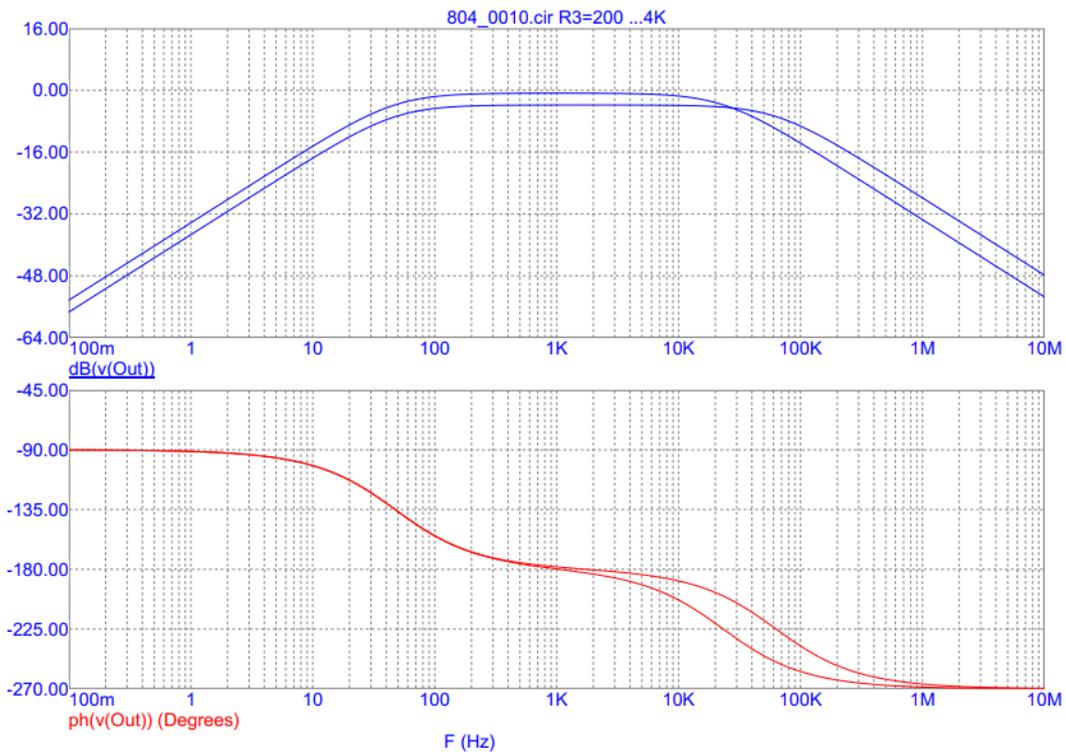


Рисунок 5 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра при подстройке частоты полюса  $\omega_p$

Приведённые на рис. 6 АЧХ и ФЧХ полосового фильтра рис.4 показывают, что при подстройке затухания полюса  $d_p$  за счет изменения сопротивлений резисторов R1 и R2 изменяются наклон ФЧХ в области частоты полюса и подъем АЧХ на этой частоте. При этом частота полюса остается неизменной ( $\omega_p = \text{const}$ ).

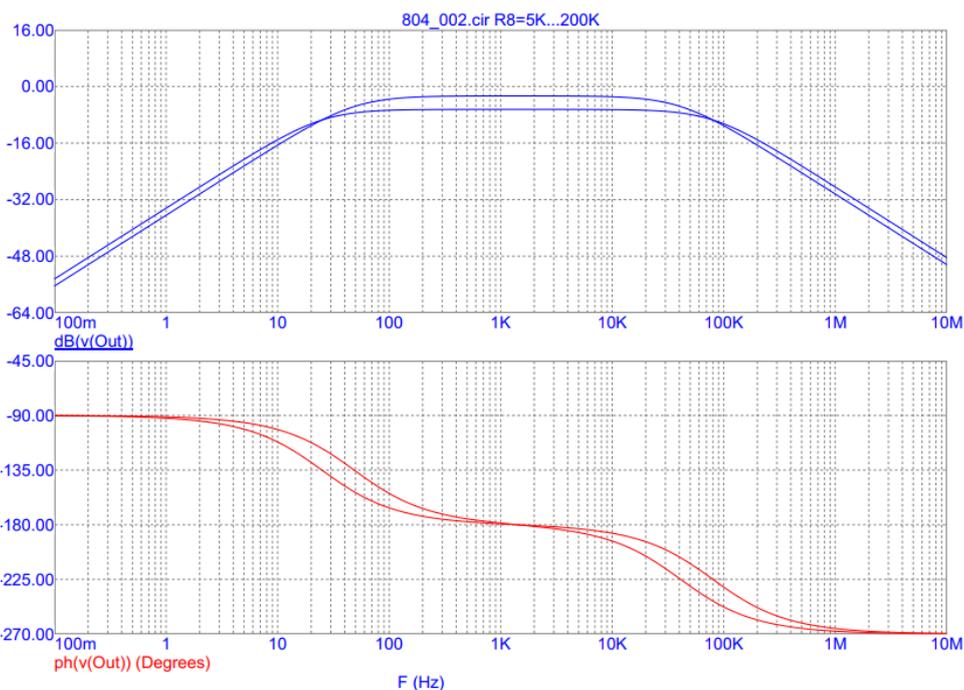


Рисунок 6 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра при подстройке затухания полюса  $d_p$

АЧХ и ФЧХ рассматриваемого ПФ рис.4 при подстройке коэффициента передачи М показаны на рис.7.

За счет резисторов R3 и R8 можно выбирать заданный коэффициент передачи М на центральной частоте. При этом изменяется только общий уровень АЧХ, а ФЧХ остаётся без изменений.

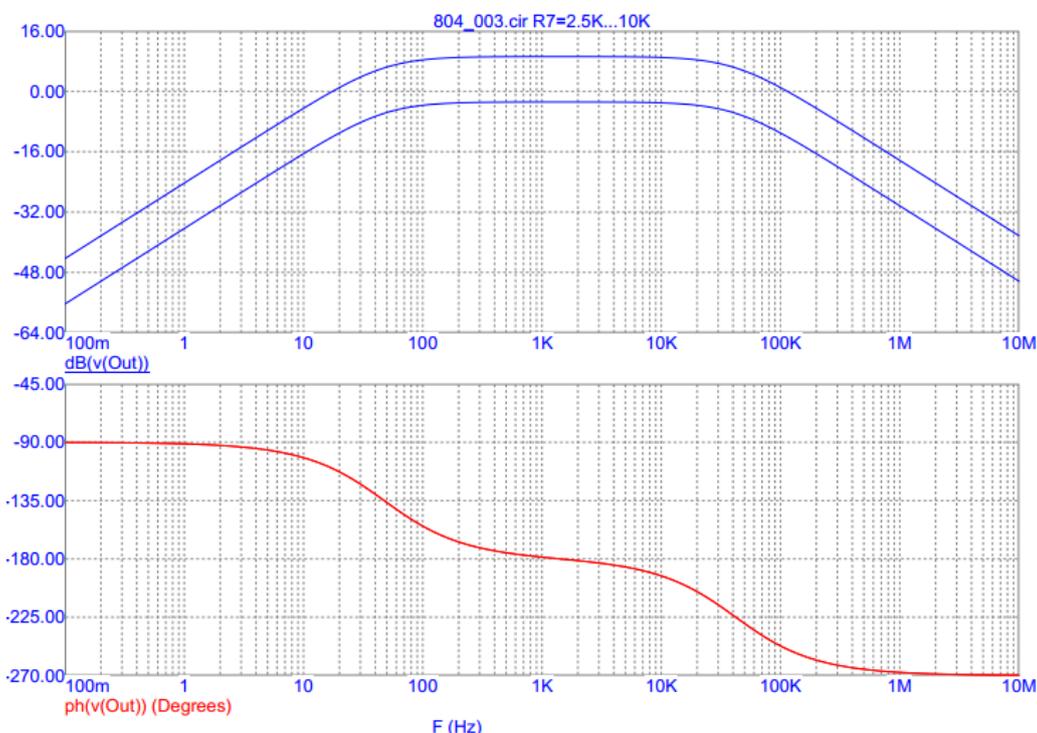


Рисунок 7 – Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики полосового фильтра при подстройке коэффициента передачи М

Таким образом, предлагаемый ПФ позволяет (в отличие от известного фильтра рис.1) осуществлять независимую подстройку основных параметров.

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

### Netlist схемы ПФ 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) ) ) }
C1 5 8 15910e-12
C2 11 5 159.1e-12
R1 3 8 100k
R2 6 9 2k
R3 9 0 2k
R4 Out 6 2k
R5 0 5 100k
R6 1 3 10k
R7 10 1 10k
R8 1 6 100k
V1 VC 0 DC 15
V2 VE 0 DC -15
V3 INTERIOR_NONE1 0 AC 1 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
RV3 10 INTERIOR_NONE1 1m ;added by V3
X1 0 1 VE 3 VC OP_37A
X2 5 6 VE Out VC OP_37A
X3 9 11 AMP PARAMS: GAIN=1
*
*** From file F:\MC11\library\AMP.MAC
.SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
RE1 PINA 0 1G;added by E1
.ENDS AMP
*
* OPAMP
* PINS: 1=NC+ 2=NC- 3=VEE 4=VO 5=VCC
.SUBCKT OP_37A 1 2 3 4 5
RSUPPLUS 5 0 1
RSUPMIN 3 0 1
ROUT 4 0 125
GOUT 0 4 1 2 14400
RIN 1 2 1G
.ENDS OP_37A
*

```

```

.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFPD=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
*
.AC DEC 125 0.1 1E7
.PLOT AC vDB([OUT]) -64,16
.PLOT AC vP([OUT]) -270,-45
.STEP LIN R7 2.5K 10K 10000 ;$MCE value;AC Analysis
*
.PROBE
*** Parts Count
** Battery          2
** Resistor         8
** Capacitor        2
** Sine source      1
** Opamp            2
** Macro            1
** VofV             1
.END
;$SpiceType=PSPICE

```

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

#### Список литературы:

1. Digital Potentiometers in the Tasks of Settings Precision Analog RC-filters Taking into Account the Tolerances for Passive Components / Darya Yu. Denisenko, Yuriy Iv. Ivanov, Nikolai N. Prokopenko, Nadezhda A. Dmitrienko //18th IEEE International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM'2017) proceedings in. June 29 - July 3, Erlagol, 2017. – Pp. 205-210.
2. Иванов Ю.И. «Полосовой ARC-фильтр с понижением частоты полюса», патент RU № 2150782; опубл.: 10.06.2000.

3. Широкополосный полосовой фильтр с независимой подстройкой частоты полюса, затухания полюса и коэффициента передачи; НОЗН 11/12/ Денисенко Д.Ю., Бугакова А.В. Жебрун Е.А. Прокопенко Н.Н. – заявка на патент РФ № 2019106528; Заявл. 07.03.19.
4. 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.
5. Низкочувствительный активный РС-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.: ИППМ РАН, 2018. Выпуск IV. Стр. 17-23.