

**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 основе  
мультидифференциального операционного усилителя**

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

Бутырлагин Н.В., [nbutyrlagin@mail.ru](mailto:nbutyrlagin@mail.ru),

Иванов Ю.И., [ivanov.taganrog@gmail.com](mailto:ivanov.taganrog@gmail.com),

Прокопенко Н.Н., [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru)

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

**1. Области применения активного RC-фильтра на основе  
мультидифференциального операционного усилителя (МОУ)**

Активные RC-фильтры нижних частот (ФНЧ) широко используются в современной электронике и оказывают существенное влияние на качественные показатели многих аналого-цифровых систем связи и автоматического управления [1-4].

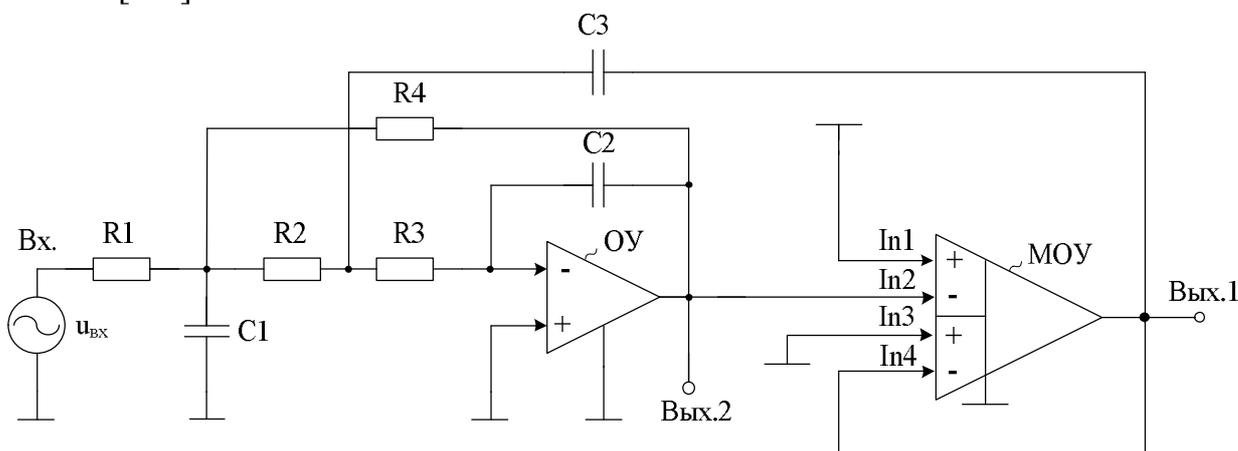


Рис. 1. Активный RC-фильтр нижних частот третьего порядка на основе мультидифференциального операционного усилителя [5]

Практическая реализация схемы рис. 1 может быть осуществлена в рамках различных технологий: tsmc (BiCMOS), SiGe (IHP, Германия), NHGRACE SoI (кремний на изоляторе), H10-CMOS090\_LP (АО «Микрон», г. Зеленоград), ЗКБТ (BiJFet-биполярно-полевой техпроцесс, АО «Интеграл», г. Минск), комплементарный биполярный техпроцесс (АО «НПП Пульсар», г. Москва) и др.

## 2. Текстовое описание функциональной схемы МОУ

Схема ARC-фильтра рис.1 включает:

- частотоподающие резисторы (R1, R2, R3, R4),
- частотоподающие конденсаторы (C1, C2, C3),
- операционный усилитель (ОУ),
- мультидифференциальный операционный усилитель (МОУ).

Основная задача рассмотренной схемы ARC-фильтра на основе МОУ состоит в увеличении гарантированного затухания амплитудно-частотной характеристики активного RC-фильтра, что положительно сказывается на метрологических характеристиках измерительных систем и устройств ввода аналоговой информации в ЭВМ, в которых ФНЧ определяет динамическую погрешность аналого-цифрового интерфейса [2-4].

Передаточные функции ФНЧ 3-го порядка рис. 1 в общем виде описываются 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.

Можно показать, что указанные выше коэффициенты передаточной функции ФНЧ рис. 1 определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_4}{R_1}, \\ a_2 &= \frac{1}{R_4 C_1} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_2 C_1} - \frac{1}{R_3 C_2}, \\ a_1 &= \frac{1}{R_2 R_4 C_1 C_3} + \frac{1}{R_4 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_3} - \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_2}, \\ a_0 &= \frac{1}{R_2 R_3 R_4 C_1 C_2 C_3}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

### 3. Компьютерное моделирование схемы ARC-фильтра

В частном случае схема ARC-фильтра на основе МОУ [6] рис. 1 исследовалась в САПР Micro-Cap 11 и показана на рис. 2.

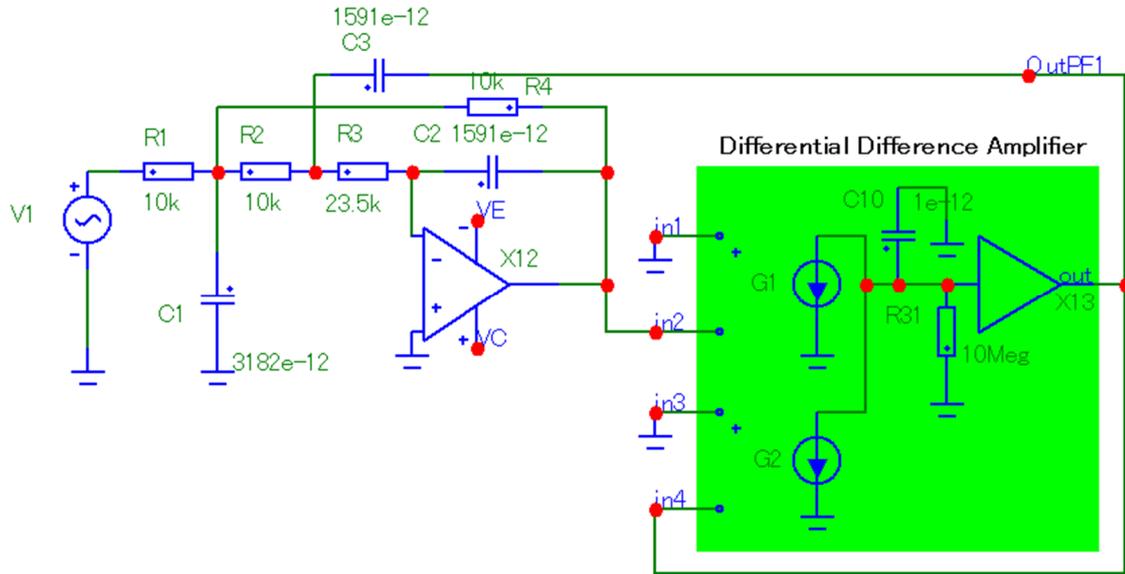


Рис. 2 Схема ARC-фильтра на основе МОУ рис. 1

### 4. Ожидаемые параметры и характеристики ARC-фильтра на основе МОУ

На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования схемы аналогового RC-фильтра рис. 2.

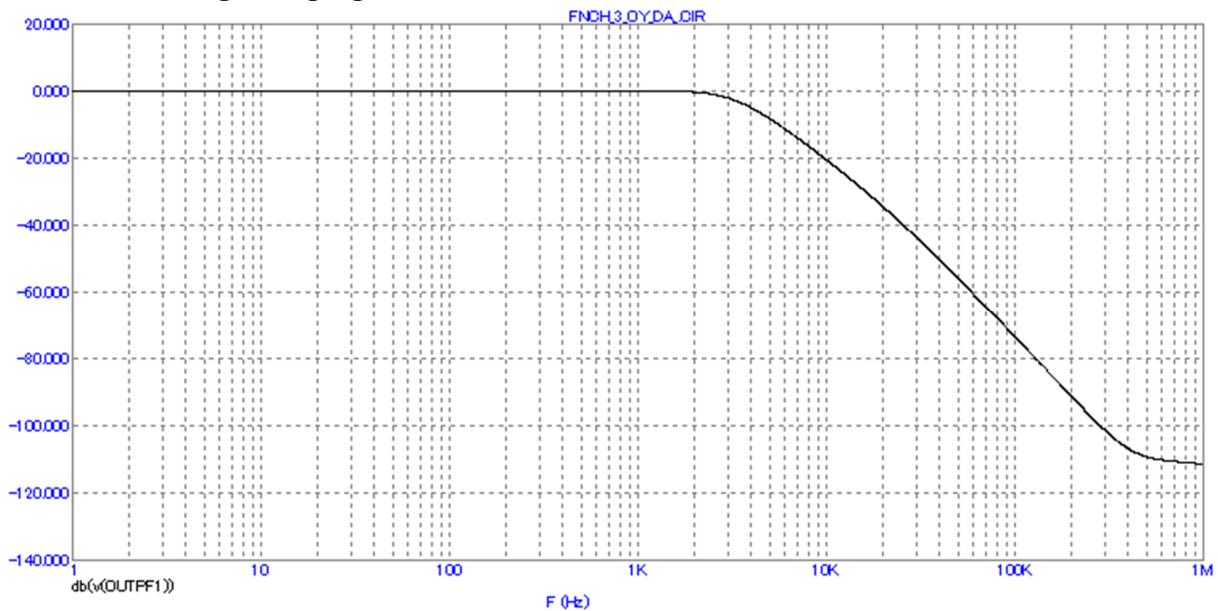


Рис. 3 АЧХ коэффициента усиления схемы ARC-фильтра

График рис. 3 показывает, что схема рассмотренного ФНЧ обеспечивает высокое затухание сигнала вне полосы пропускания и имеет три частотозадающих конденсатора. Уменьшение числа частотозадающих конденсаторов повышает технологичность ФНЧ при его практической реализации и упрощает процедуры его настройки [5].

## 5. Параметры оптимизации

Практический интерес представляет определение оптимальных значений  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  при заданных ограничениях на максимальную скорость нарастания выходного напряжения МОУ, разомкнутый коэффициент усиления, запас устойчивости по фазе, энергопотребление, ослабление синфазных сигналов, геометрию транзисторов, схемотехнику токовых зеркал (более 50 модификаций) [7] и буферного усилителя (более 30 модификаций) и т.п.

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

### Netlist в Spice (рис.2)

```
1: C:\Users\Uset\Desktop\FNCH_3n_netlist\FNCH_3_OY_DA_.CIR
2: V4 VC 0 DC 15
3: V5 VE 0 DC -15
4: V1 INTERIOR_NONE1 0 SIN (0 1 2000 0 0 0)
5: RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
6: R4 in2 5 10k
7: R2 5 6 10k
8: R3 6 7 23.5k
9: C1 5 0 3182e-12
10: R1 3 5 10k
11: C3 6 in4 1591e-12
12: C2 7 in2 1591e-12
13: X12 0 7 VE in2 VC OP_27
14: X13 9 in4 AMP PARAMS: GAIN=1
15: R31 0 9 10Meg
16: C10 9 0 1e-12
17: G1 9 0 0 in2 0.00001
18: RG1 0 in2 1G ;added by G1
19: G2 9 0 0 in4 0.00001
20: RG2 0 in4 1G ;added by G2
21: *
22: *** From file C:\MC11\library\AMP.MAC
23: .SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
24: E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
25: RE1 PINA 0 1G;added by E1
26: .ENDS AMP
27: *
28: OPAMP
29: PINS: 1=NC+ 2=NC- 3=VEE 4=VO 5=VCC
30: .SUBCKT OP_27 1 2 3 4 5
```

31: IEE 10 3 8.401999999999999e-005  
32: VS1 11 0 0  
33: VC 5 16 1.8000000000000001  
34: VE 17 3 1.8000000000000001  
35: VLP 19 0 20  
36: VLN 0 20 20  
37: VS2 13 15 0  
38: F1 13 14 POLY(5) VS1 VC VE VLP VLN 0 47746482.92756861 -  
47746482.92756861  
39: + 47746482.92756861 47746482.92756861 -47746482.92756861  
40: E1 14 0 POLY(2) 5 0 3 0 0 0.5 0.5  
41: H1 18 0 VS2 1000  
42: GCM 0 12 10 0 7.557734198666343e-010  
43: GA 12 0 6 7 0.001507964473723101  
44: C1 6 7 8.660254037844386e-012  
45: CE 10 14 1e-019  
46: C2 12 13 3e-011  
47: RC1 5 6 663.1455962162306  
48: RC2 5 7 663.1455962162306  
49: RE1 8 10 47.32264900962777  
50: RE2 9 10 47.32264900962777  
51: RE 10 14 2380385.622470841  
52: RP 5 3 40036.65578262764  
53: R2 12 11 100000  
54: RO2 13 14 25  
55: ROUTAC 15 4 50  
56: D5 3 5 D  
57: D3 4 16 D  
58: D4 17 4 D  
59: D1 18 19 D  
60: D2 20 18 D  
61: Q1 6 2 8 QINN  
62: Q2 7 1 9 QINP  
63: \*  
64: .MODEL D D ()  
65: .MODEL QINN NPN (BF=2896.551724137931)  
66: .MODEL QINP NPN (BF=7636.363636363636 IS=1e-016)  
67: .ENDS OP\_27  
68: \*  
69: .LIB "C:\MC11\library\NOM.LIB"  
70: \*  
71: \*  
72: .PROBE  
73: .END

## Список литературы:

1. 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.
2. 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.
3. 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 Intergated Circuit Technology (ICSICT'2018). Proceedings. Oct.31-Nov.3, 2018, Qingdao, China.
4. 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 (EEhPolytech-2018), October 22-23, 2018, Saint Petersburg, Russia.
5. Активный RC-фильтр нижних частот третьего порядка: заявка на патент РФ; МПК: H03H 11/12, H03H 3/70, G01M 1/22, G01H 17/00 / Д.Ю. Денисенко, Н.В. Бутырлагин, Е.А. Жебрун, Н.Н. Прокопенко – № 2018143817/08; Заявл. 11.12.18.
6. Прокопенко Н.Н., Титов А.Е., Бутырлагин Н.В. Токовые зеркала для проектирования КМОП аналоговых микросхем: основные модификации (ТЗ №1-№ 36) [Электронный ресурс] // Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН: [сайт]. [2018]. URL: <http://www.ippm.ru/data/eljrnal/paper/J4.pdf> (дата обращения: 17.04.2018).
7. Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В. Компьютерное моделирование базовых схем включения мультидифференциального операционного усилителя [Электронный ресурс] // Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН: [сайт]. [2018]. URL: <http://www.ippm.ru/data/eljrnal/paper/J23.pdf> (дата обращения: 19.10.2018).