

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

Библиотека схемотехнических решений

Режекторный фильтр четвертого порядка с возможностью регулировки полосы задерживания

Бугакова А.В., [annabugakova.1992@mail.ru](mailto:annabugakova.1992@mail.ru),  
Чумаков В.Е., [chumakov.dssa@mail.ru](mailto:chumakov.dssa@mail.ru),  
Денисенко Д.Ю., [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com)

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

1. Область применения активного режекторного RC-фильтра

Активные режекторные RC – фильтры (РФ) используются для подавления сигналов, оказывающих негативное влияние на обработку полезного сигнала. РФ являются составной частью многих радиоприёмных и радиопередающих устройств [1-10].

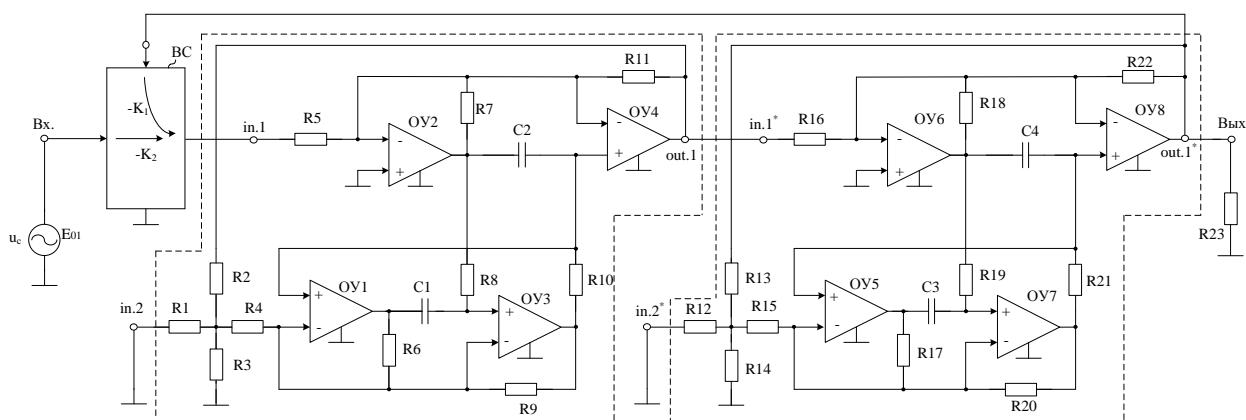


Рис.1 Широкополосный активный РФ четвертого порядка [11]

На рис.1 показана схема РФ четвертого порядка [11], содержащая два последовательно включённых каскада, причём в цепи обратной связи включён входной сумматор (BC). Возможная реализация BC изображена на рис. 2.

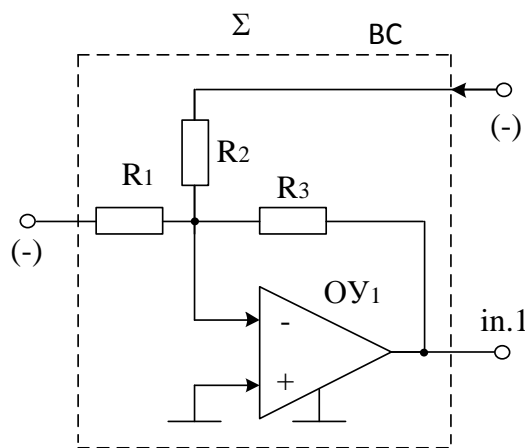


Рис.2 Пример реализации ВС на основе операционного усилителя

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 ПФ

Схема РФ рис.1 [11] включает следующие компоненты:

- частото задающие резисторы (R1÷R22);
- резистор нагрузки (R23);
- частото задающие конденсаторы (C1÷C4);
- операционные усилители с дифференциальным входом (OU1÷ OU8);
- входной сумматор (BC).

Основная задача РФ (рис.1) состоит в создании условий для изменения полосы задерживания, т.е. возможность перестройки по частоте, регулировки полосы пропускания, неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и коэффициентов передач на нулевой и бесконечно большой частоте, и это в свою очередь значительно увеличит область использования данной схемы.

После анализа схемы рис.1 можно определить, что передаточная функция РФ четвертого порядка описывается выражением

$$W(p) = M \frac{p^4 + p^2 b_2 + b_0}{p^4 + p^3 a_3 + p^2 a_2 + p a_1 + a_0}. \quad (1)$$

Характер изменения АЧХ и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) фильтра зависят от численных значений коэффициентов числителя  $b_i$  и знаменателя  $a_i$  передаточной функции, а его свойства, определяются топологией схемы. Известно, что для перестройки фильтра четвертого порядка по частоте при неизменных других параметрах необходимо

одновременно изменять как минимум параметры четырёх элементов, например, сопротивлений четырёх резисторов или ёмкостей четырёх конденсаторов. Наиболее просто это осуществить, используя в качестве элементов перестройки различные переменные резисторы, реализуемые на основе цифровых потенциометров. Причем, наиболее простые схемы получаются, когда все электронные компоненты перестройки имеют идентичные характеристики. Поставленная задача решается, например, на идентичных звеньях РФ второго порядка, имеющих равные значения частот полюсов  $\omega_p$ , затуханий  $d_p$  и масштабных коэффициентов передач  $G$ :

$$F(p) = G \frac{p^2 + \omega_p^2}{p^2 + pd_p\omega_p + \omega_p^2}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} M &= -K_2 G^2 / (1 + G^2 K_1), \\ b_2 &= 2\omega_p^2, \\ b_0 &= \omega_p^4, \\ a_3 &= 2\omega_p d_p / (1 + G^2 K_1), \\ a_2 &= \omega_p^2 (2 + d_p^2 + 2G^2 K_1) / (1 + G^2 K_1), \\ a_1 &= 2\omega_p^3 d_p / (1 + G^2 K_1), \\ a_0 &= \omega_p^4. \end{aligned} \quad (3)$$

Благодаря такой зависимости коэффициентов передаточной функции фильтра от параметров отдельных звеньев и коэффициента передачи ВС в РФ четвёртого порядка возможно задание неравномерности АЧХ в полосе пропускания с помощью изменения коэффициента передачи по цепи обратной связи  $K_1$ . При этом полоса заграждения фильтра зависит от выбранного значения  $d_p$  затуханий в звеньях.

Для упрощения соотношений (3) значения коэффициентов передач звеньев  $G$  выбраны равными, но это не является обязательным условием при реализации конкретной схемы фильтра.

### 3. Компьютерное моделирование схемы режекторного фильтра

В частном случае, представленная на рис.1 схема РФ исследовалась в САПР Micro-Cap 11 [11] (рис.3) при изменении коэффициента обратной связи  $K_1$ .

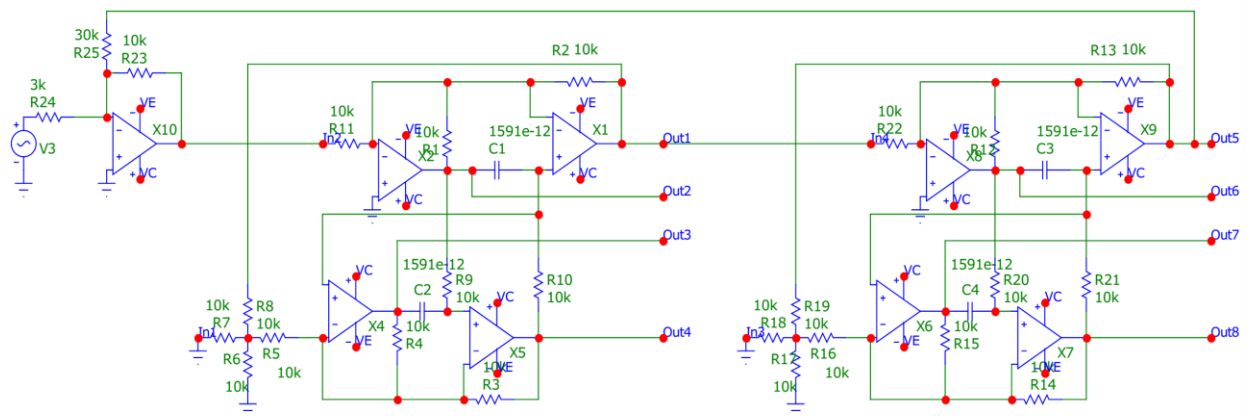


Рис.3 РФ (рис.1) в среде моделирования САПР Micro-Cap 11

На рис.4 изображены АЧХ схемы РФ (рис.3) [11], показывающие, что РФ имеет возможность регулировки полосы задержания. Причем передаточная функция четвертого порядка реализуется путём применения минимального количества пассивных и активных элементов в схеме.

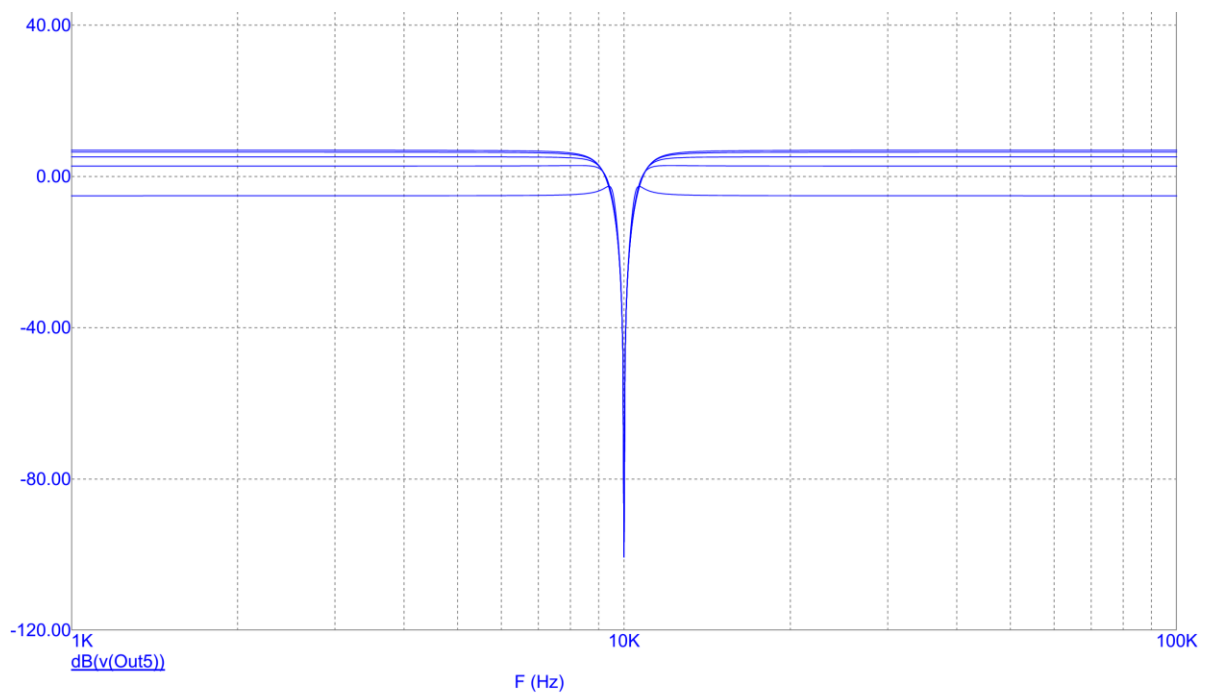


Рис.4 АЧХ схемы РФ четвертого порядка (рис. 3)

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

### Netlist в Spice (рис.3)

```
1. .FUNC DPWR(D) {I(D)*V(D)}
2. .FUNC BPWR(Q) {IC(Q)*VCE(Q)+IB(Q)*VBE(Q)}
3. .FUNC FPWR(M) {ID(M)*VDS(M)}
4. .FUNC HOTD(D,MAX) {IF((V(D)*I(D)>MAX),1,0)}
5. .FUNC HOTB(Q,MAX) {IF((VCE(Q)*IC(Q)+IB(Q)*VBE(Q)>MAX),1,0)}
6. .FUNC HOTF(M,MAX) {IF((VDS(M)*ID(M)>MAX),1,0)}
7. .PARAM LOW3MIN={IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES)}
8. .PARAM HIGH3MAX={IMPORT(HIGH3MAX.OUT,HIGH3THRES)}
9. .PARAM LOWLVDS={IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT)}
10. .PARAM HILVDS={IMPORT(HILVDS.OUT,HILIMIT)}
11. .PARAM LIMTLVDS={IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS)}
12. .FUNC SKINAC(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)**2))*DCRES}
13. .FUNC SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*F)))}
14. .FUNC SKINTR(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS,FREQ)
    {((PI*RADIUS*RADIUS)/((PI*RADIUS*RADIUS)-PI*(RADIUS-
    SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)**2))*DCRES}
15. .FUNC SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)
    {503.3*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM*FREQ)))}
16. C1 1 Out2 1591e-12
17. C2 9 Out3 1591e-12
18. C3 14 Out6 1591e-12
19. C4 16 Out7 1591e-12
20. R1 2 Out2 10k
21. R2 Out1 2 10k
22. R3 Out4 7 10k
23. R4 Out3 7 10k
24. R5 11 7 10k
25. R6 0 11 10k
26. R7 0 11 10k
27. R8 11 Out1 10k
28. R9 9 Out2 10k
29. R10 Out4 1 10k
30. R11 In2 2 10k
31. R12 18 Out6 10k
32. R13 Out5 18 10k
33. R14 Out8 21 10k
34. R15 Out7 21 10k
35. R16 22 21 10k
36. R17 0 22 10k
37. R18 0 22 10k
38. R19 22 Out5 10k
39. R20 16 Out6 10k
40. R21 Out8 14 10k
```

41. R22 Out1 18 10k  
42. R23 23 In2 10k  
43. R24 12 23 3k  
44. R25 Out5 23 30k  
45. V1 VC 0 DC 15  
46. V2 VE 0 DC -15  
47. V3 INTERIOR\_NONE1 0 AC 1 SIN (0 169.7 60 0 0 0)  
48. RV3 12 INTERIOR\_NONE1 1m ;added by V3  
49. X1 1 2 VE Out1 VC OP\_37C  
50. X2 0 2 VE Out2 VC OP\_37C  
51. X4 1 7 VE Out3 VC OP\_37C  
52. X5 9 7 VE Out4 VC OP\_37C  
53. X6 14 21 VE Out7 VC OP\_37C  
54. X7 16 21 VE Out8 VC OP\_37C  
55. X8 0 18 VE Out6 VC OP\_37C  
56. X9 14 18 VE Out5 VC OP\_37C  
57. X10 0 23 VE In2 VC OP\_37C  
58. .SUBCKT OP\_37C 1 2 3 4 5  
59. IEE 10 3 0.00051003000000000001  
60. VS1 11 0 0  
61. VC 5 16 2.1  
62. VE 17 3 2.1  
63. VLP 19 0 20  
64. VLN 0 20 20  
65. VS2 13 15 0  
66. F1 13 14 POLY(5) VS1 VC VE VLP VLN 0 9549296.585513718 -9549296.585513718  
67. + 9549296.585513718 9549296.585513718 -9549296.585513718  
68. E1 14 0 POLY(2) 5 0 3 0 0 0.5 0.5  
69. H1 18 0 VS2 1000  
70. GCM 0 12 10 0 7.539822368615505e-009  
71. GA 12 0 6 7 0.007539822368615505  
72. C1 6 7 8.660254037844386e-012  
73. CE 10 14 1e-019  
74. C2 12 13 3e-011  
75. RC1 5 6 132.6291192432461  
76. RC2 5 7 132.6291192432461  
77. RE1 8 10 31.1993957258437  
78. RE2 9 10 31.1993957258437  
79. RE 10 14 392133.7960512126  
80. RP 5 3 92792.11473229477  
81. R2 12 11 100000  
82. RO2 13 14 25  
83. ROUTAC 15 4 50  
84. D5 3 5 D  
85. D3 4 16 D  
86. D4 17 4 D  
87. D1 18 19 D  
88. D2 20 18 D

```

89. Q1 6 2 8 QINN
90. Q2 7 1 9 QINP
91. .MODEL D D ()
92. .MODEL QINN NPN (BF=12142.85714285714)
93. .MODEL QINP NPN (BF=28333.333333333333 IS=1e-016)
94. .ENDS OP_37C
95. .OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
    DEFW=100u DEFNRD=0
96. + DEFNRS=0 DEFPPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
    DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
97. + DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
    DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
98. + DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
    PIVTOL=.1p RELTOL=1m
99. + TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
100. .LIB "F:\MC12\library\NOM.LIB"
101. .TEMP 27
102. .AC DEC 500 1000 1E5
103. .PLOT AC vDB([OUT5])
104. .STEP LIN R25 2K 20K 5000 ;$MCE value;AC Analysis
105. .END

```

### Список литературы

1. Красиков М.И. Режекторный фильтр КВ диапазона для широкополосных систем радиомониторинга. / М.И. Красиков, Д.Г. Гарш, И.Н. Бармин. // Автоматизация технических процессов и устройств. Сборник докладов. – ИТ АРКТИКА. – 2016. - №3. – С 59 -63.
2. Богнер Р. Введение в цифровую фильтрацию. / Р. Богнер, А. Константи́нидис. - М.: Мир, 1976. – 478 с. 33.
3. Ленк Дж. Электронные схемы. Практическое руководство. / Дж. Ленк. – М.: Мир, 1985. – 343 с.
4. Головин О.В. Профессиональные радиоприемные устройства декаметрового диапазона / О.В. Головин – М.: Радио и связь, 1985. - 288 с.
5. Симон В.А., Герасимов В.А., Кострин Д.К. / Режекторный фильтр с настраиваемыми параметрами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». -2017, №5, С.3-9.
6. Симон В. А. Режекторный фильтр с независимой регулировкой центральной частоты и добротности / В. А. Герасимов, Д. К. Кострин, Л. М. Селиванов, В. А. Симон, А. А. Ухов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. - 2017. - Т. 17. - № 4. - С. 1068-1070.
7. Симон В. А. Способ увеличения глубины подавления режекторного фильтра / В. А. Симон // Труды 71-й научно-технической конференции, посвященной Дню Радио. - Санкт-Петербург. - С. 357-358.

8. Хьюлсман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров: Пер. с англ. Москва, издательство: Радио и связь, 1984. - 384 с.
9. Справочник по расчету и проектированию ARC-схем / Букашкин С.А., Власов В.П., Змий Б.Ф. и др.; Под. ред. А.А. Ланнэ. – М.: Радио и связь, 1984. – 368 с.
10. Huang H. Y., Chen K. Y., Xie J. H., Lee M. T., Hong H. C. and Cheng K. H. Gm-C filter with automatic calibration scheme // 19th IEEE International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS'2016), Kosice. 2016. pp. 1-4.  
DOI: 10.1109/DDECS.2016.7482471
11. Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Иванов Ю.И. Режекторный фильтр четвертого порядка. No. 2021102997, заявл. 09.02.21