

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

Библиотека схемотехнических решений

Исследование характеристик активных RC-фильтров Саллена и Ки с
дифференциальным входом при разбросе параметров их элементов

Денисенко Д.Ю., d.u.denisenko@gmail.com,

Бутырлагин Н.В., nbutyrlagin@mail.ru,

Титов А.Е., alex.evgeny.titov@gmail.com

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

1. Области применения и основные свойства активных RC-фильтров
Саллена и Ки с дифференциальным входом

Построение активных RC-фильтров с дифференциальным входом (АРСФ) актуально, например, для устранения нежелательного содержимого в аудио сигналах [1-2].

В статье рассматривается пример компьютерного моделирования разброса характеристик схемы фильтра Саллена и Ки (S&K) в среде Micro-Cap [3] для исследования разброса параметров. Для сравнения показаны результаты компьютерного моделирования фильтра S&K с одним входом и одним выходом.

В идеальном операционном усилителе (ОУ) (рис. 1) напряжение дополнительной ошибки, обусловленной наличием входного синфазного сигнала на входах ОУ, равно нулю ($e_{сф}=0$), а входные сопротивления для синфазного сигнала имеют бесконечно большие значения ($R_{с1}=\infty$, $R_{с2}=\infty$).

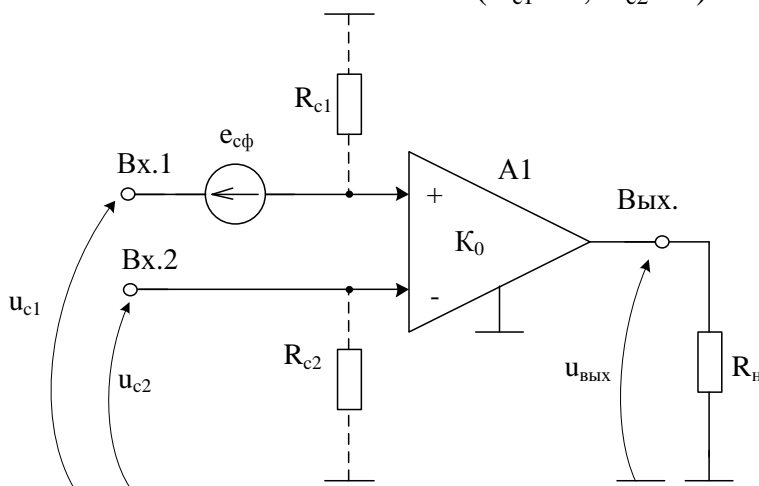


Рис. 1 Эквивалентная схема ОУ с учетом приведенной ко входу ошибки $e_{сф}$ от неполного подавления синфазного сигнала

Практическая реализация схемы рис. 1 может быть осуществлена в рамках различных технологий: TSMC (BiCMOS), SiGe (ИП, 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 эквивалентной схемы ОУ

Эквивалентная схема на рис.1 включает:

- операционный усилитель (А1),
- сопротивления для синфазного входа (R_{c1}, R_{c2}),
- источник сигнала ошибки ($e_{сф}$),
- сопротивление нагрузки (R_n).

В практических аналоговых схемах на основе ОУ возникает ошибка $e_{сф}$, зависящая от численных значений коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{oc.сф}$) и, как следствие, частоты сигнала:

$$e_{сф} \approx \frac{u_c}{K_{oc.сф}}, \quad (1)$$

где

$$K_{oc.сф} \approx \frac{K_0}{K_{сф}},$$

u_c – входной синфазный сигнал ОУ: $u_c=0,5(u_{c1}+u_{c2})$;

$K_0 \gg 1$ – коэффициент усиления дифференциального сигнала ОУ ($u_{вх}=u_{c1}-u_{c2}$);

$K_{сф} \ll 1$ – коэффициент преобразования входного синфазного сигнала u_c в выходное напряжение ОУ.

С повышением частоты $K_{oc.сф}$ уменьшается, что вызывает увеличение приведенной ко входу ошибки $e_{сф}$.

В первом приближении можно считать, что передаточная функция $K_{oc.сф}(p)$ имеет вид:

$$K_{oc.сф}(p) = \frac{K_{oc.сф}}{1 + p\tau_{сф}},$$

где $\tau_{сф}$ - постоянная времени передаточной функции $K_{oc.сф}(p)$.

3. АРСФ с дифференциальным входом и парафазным выходом

На рисунках 2-3 показаны известные [4-5] схемы АРСФ на буферных усилителях (БУ1, БУ2) с дифференциальным входом и парафазным выходом. коэффициент ослабления синфазного сигнала фильтра такого АРСФ $K_{oc.сф}^*$ зависит не только от параметров буферных усилителей, но и от разброса параметров частотоподающих элементов.

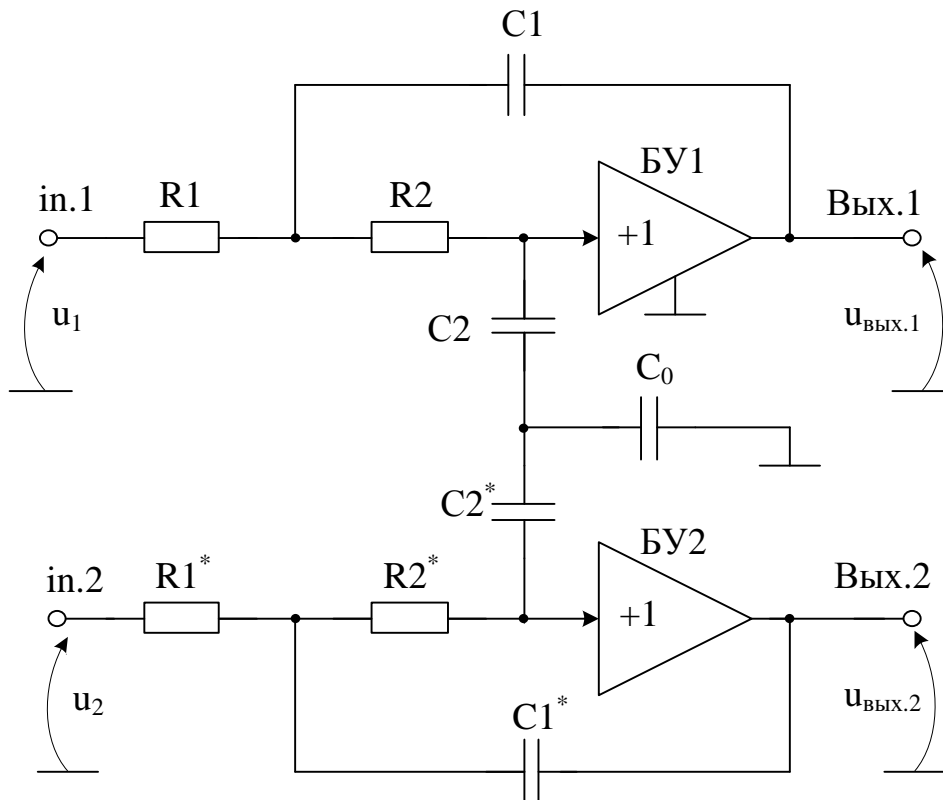


Рис. 2 ФНЧ Sallen-Key с дифференциальным входом [5]

Разделение конденсаторов и добавление небольшой емкости на землю (C_0 на рис. 2) стабилизирует схему S&K за счет снижения их номиналов.

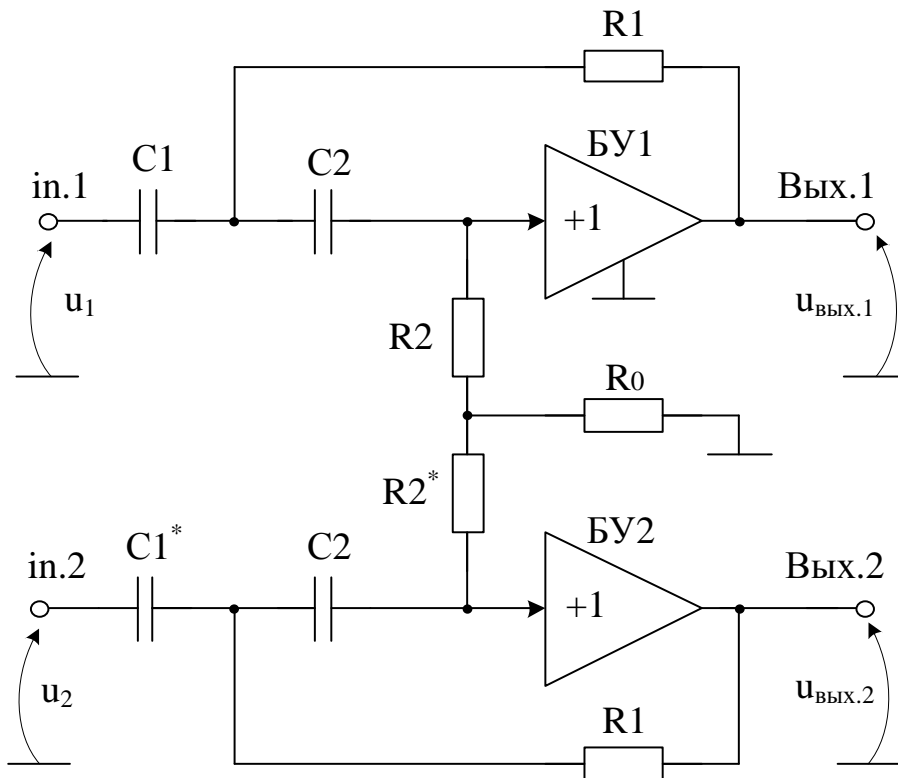


Рис. 3 ФВЧ Sallen-Key с дифференциальным входом [5]

Если конденсаторы отличные от C_0 (рис. 2), имеют номинальное значение C и допуск β , а резисторы имеют номинальное значение R и допуск α , при $C_0 \ll C$ коэффициент ослабления синфазного сигнала фильтра $K_{oc.cф}^*$ равен:

$$K_{oc.cф}^* \approx -\frac{1}{2RC_0(\alpha + \beta)} \frac{1 + RC_0p + R^2CC_0p^2}{(1 + RCp)p}, \quad (2)$$

а передаточная функция G_{cc} дифференциальной схемы фильтра [5] определяется как

$$G_{cc} \approx \frac{1}{1 + RC_0p + R^2C \frac{C_0}{2} p^2}, \quad (3)$$

имеет резонанс с амплитудой $M_r \approx \sqrt{\frac{C}{2C_0}}$ при $\omega_r \approx 1/R\sqrt{\frac{CC_0}{2}}$. Если C_0 близко к

нулю, то амплитуда M_r стремится к бесконечности, делая, таким образом, схему рис. 2 неустойчивой. При увеличении ёмкости C_0 , уменьшается не только амплитуда M_r (и ω_r), но и коэффициент ослабления синфазного сигнала фильтра $K_{oc.cф}^*$ на низких частотах [4-5].

9. Низкодобротная схема S&K с одним входом и выходом

На рис. 4 для сравнения приведена недифференциальная низкодобротная схема S&K ($Q=0,5$) и результаты компьютерного моделирования её амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), фазо-частотных характеристик (ФЧХ) и их чувствительности к параметрам частото задающих элементов (рис. 5-6).

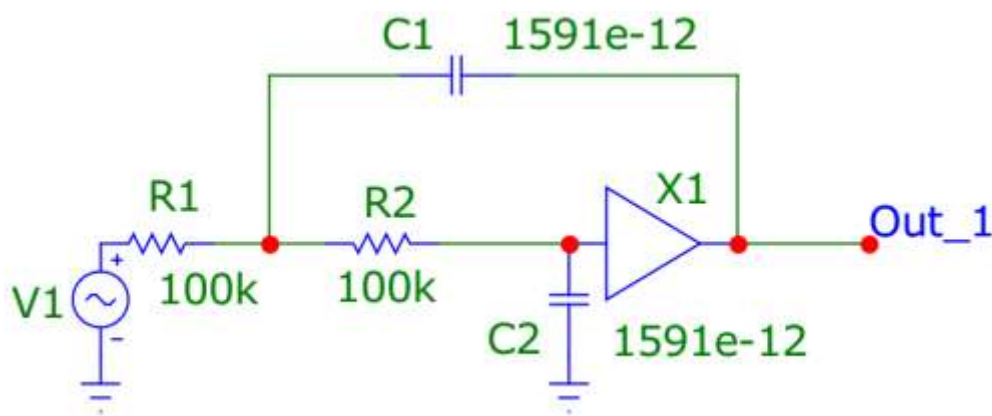


Рис. 4 Низкодобротная схема S&K ($Q=0,5$) с одним входом и выходом

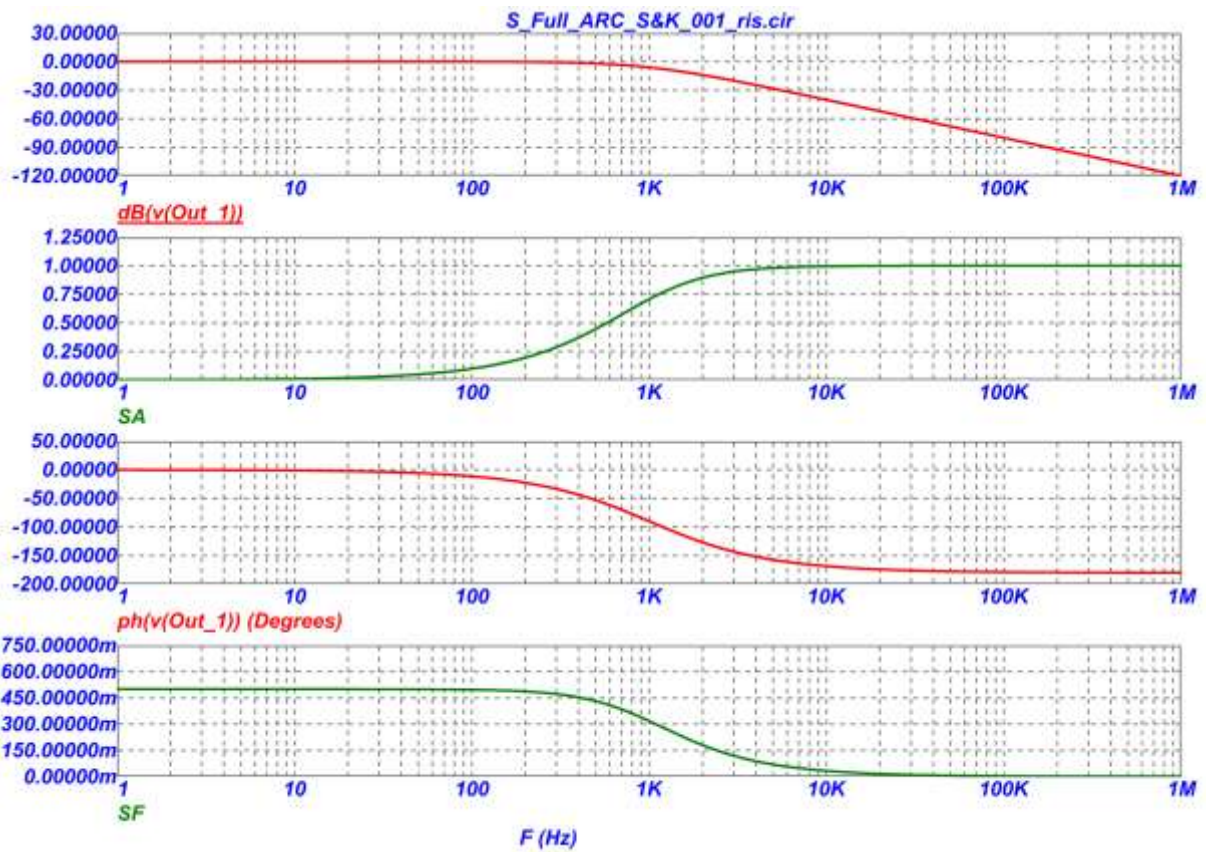


Рис. 5 АЧХ и чувствительность к R1, ФЧХ и чувствительность к R1

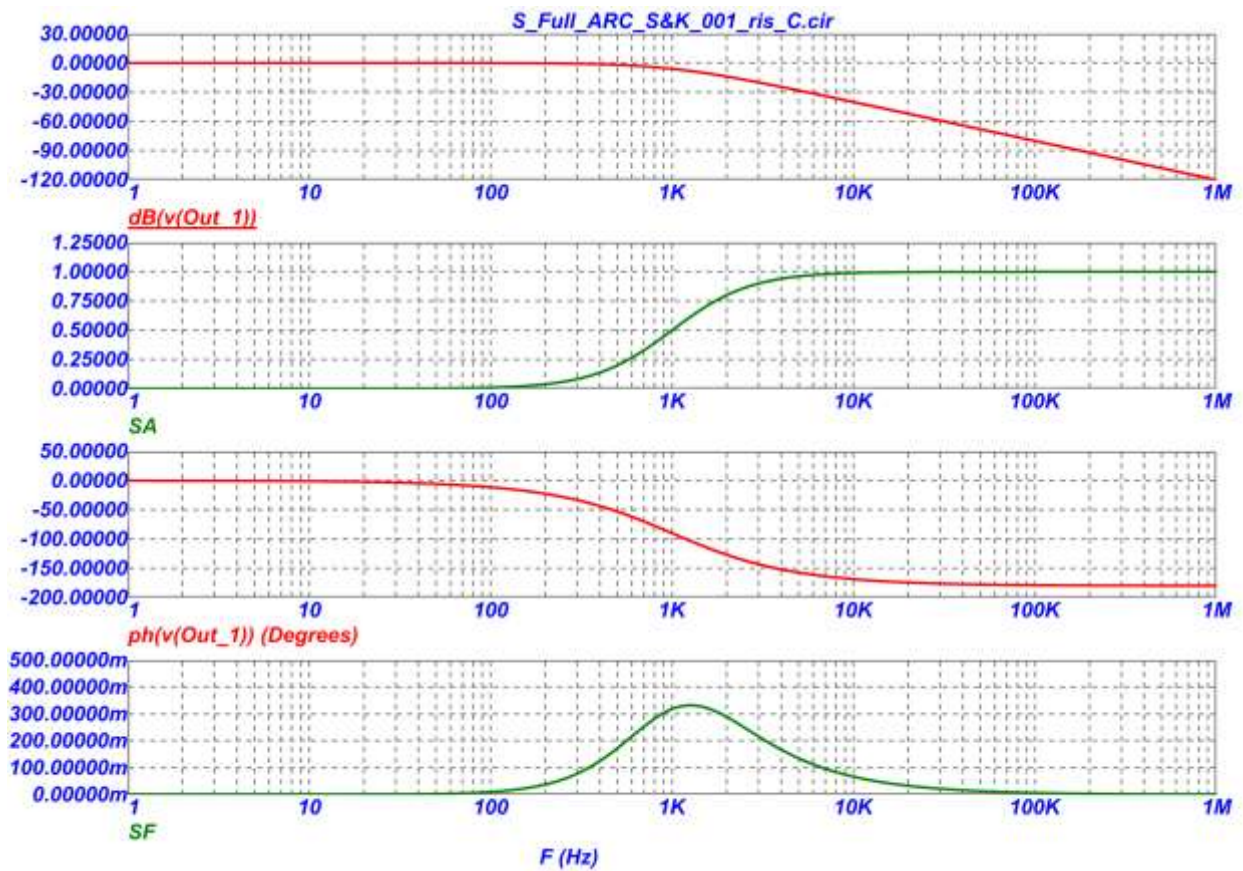


Рис. 6 АЧХ и чувствительность к C1, ФЧХ и чувствительность к C1

Netlist в Spice для схемы рис.4

```
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:.PARAM VAR1=100K
17:.PARAM VAR2=100.0001K
18:.PARAM SF={{(PH(V(OUT_2))-PH(V(OUT_1)))/(PH(V(OUT_1))))/((VAR2-
    VAR1)/VAR1)}
19:.PARAM SA={{(V(OUT_2)-V(OUT_1))/V(OUT_1))/((VAR2-VAR1)/VAR1)}
20:C1 Out_1 4 1591e-12
21:C2 0 5 1591e-12
22:C3 7 Out_2 1591e-12
23:C4 0 9 1591e-12
24:R1 3 4 100k
25:R2 5 4 100k
26:R3 7 8 {VaR2}
27:R4 9 7 100k
28:V1 INTERIOR_NONE1 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
29:RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
30:V2 INTERIOR_NONE2 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
31:RV2 8 INTERIOR_NONE2 0.001 ;added by V2
32:V3 VC 0 DC 15
33:V4 VE 0 DC -15
34:X1 5 Out_1 AMP PARAMS: GAIN=1
35:X2 9 Out_2 AMP PARAMS: GAIN=1
36:*
37:*** From file C:\MC12\library\AMP.MAC
```

```

38:.SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
39:E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
40:RE1 PINA 0 1G;added by E1
41:.ENDS AMP
42:*
43:.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
    DEFW=100u DEFNRD=0
44:+ DEFNRS=0 DEFPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
    DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
45:+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
    DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
46:+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
    PIVTOL=.1p RELTOL=1m
47:+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
48:*
49:.LIB "C:\MC12\library\NOM.LIB"
50:*
51:.TEMP 27
52:*
53:.TRAN 2e-008 1u 0
54:.PLOT TRAN v([OUT_1]) v([OUT_2])
55:*
56:.PROBE
57:.END

```

10. Высокочастотная схема S&K с одним входом и выходом

На рис. 7 для сравнения приведена не дифференциальная высокочастотная схема S&K ($Q=5$) и результаты её компьютерного моделирования (рис. 8-9).

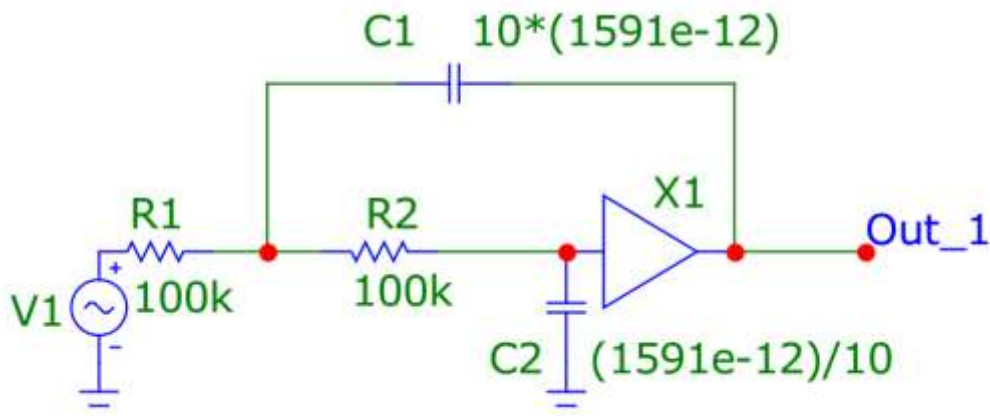


Рис. 7 Высокочастотная схема ($Q=5$) с одним входом и выходом

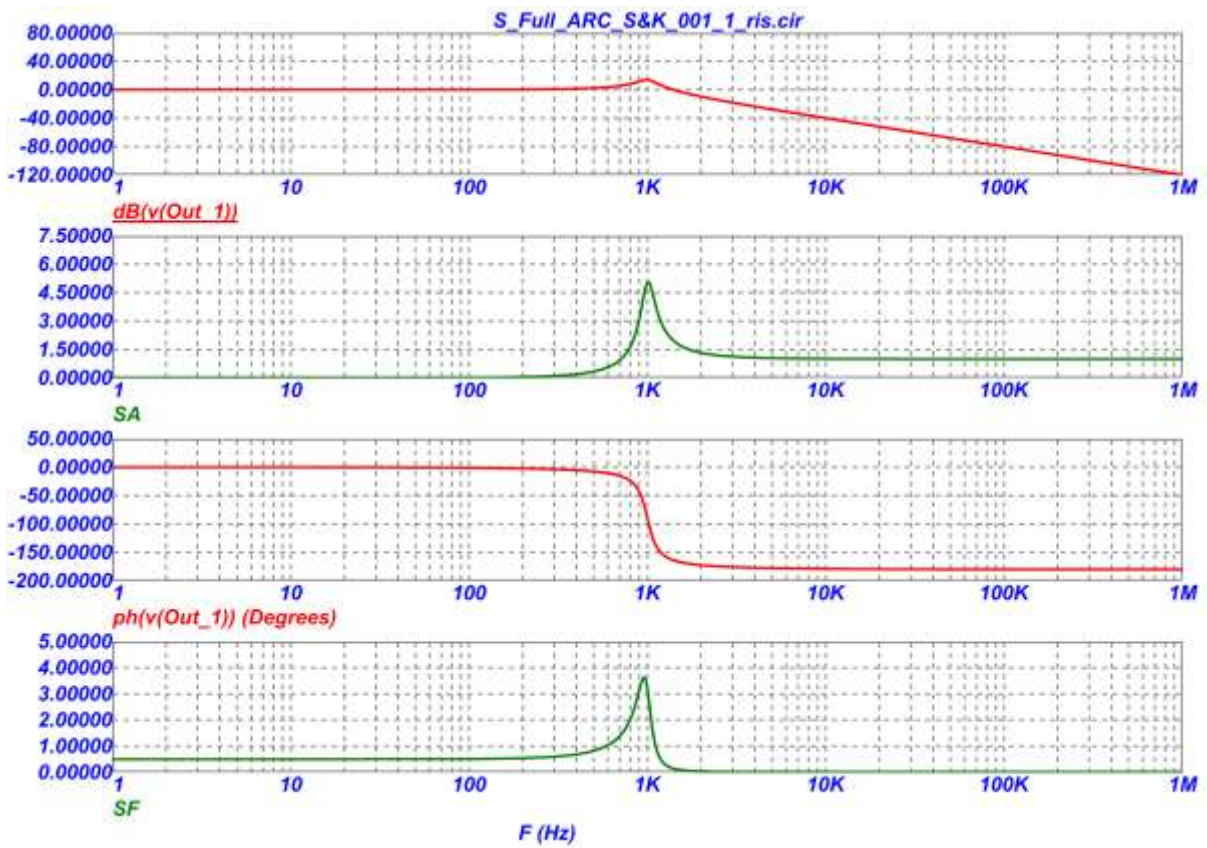


Рис. 8 АЧХ и чувствительность к R1, ФЧХ и чувствительность к R1

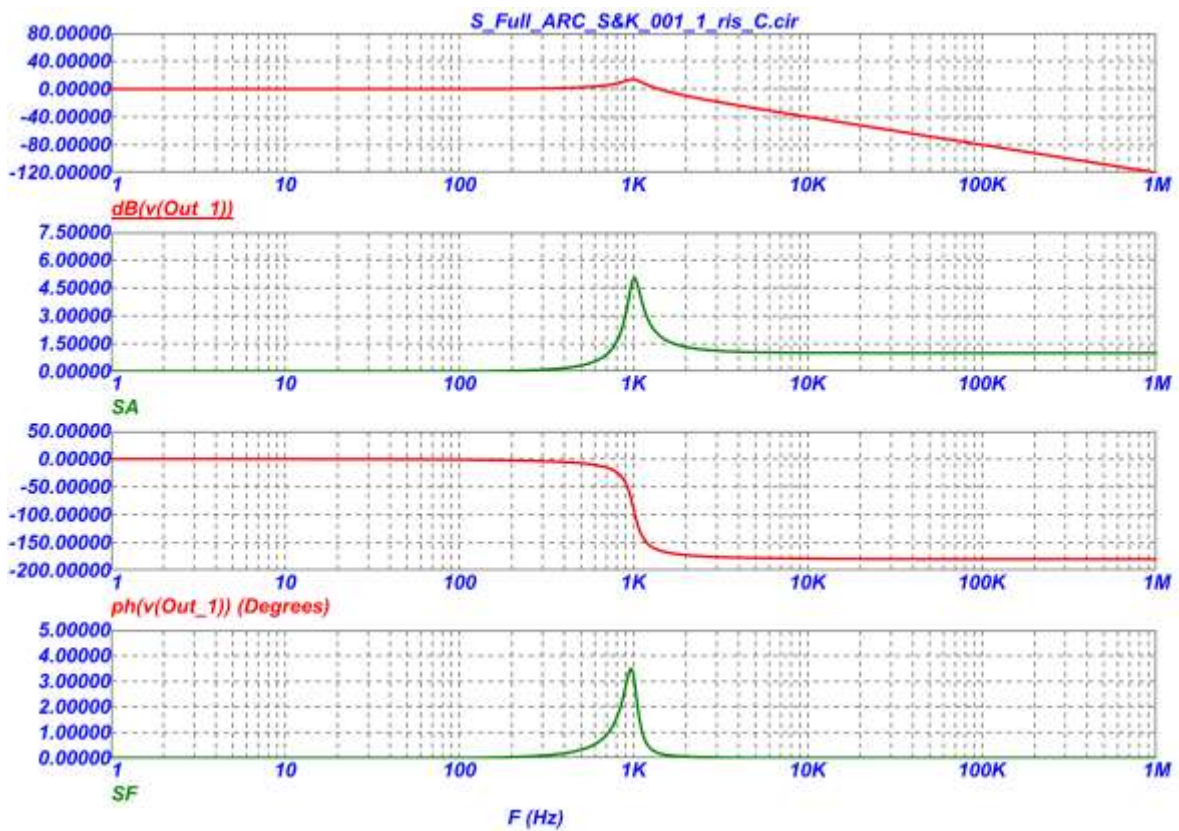


Рис. 9 АЧХ и чувствительность к C1, ФЧХ и чувствительность к C1

Netlist в Spice для схемы рис.7

```
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:.PARAM VAR1=100K
17:.PARAM VAR2=100.0001K
18:.PARAM SF={((PH(V(OUT_2))-PH(V(OUT_1)))/(PH(V(OUT_1))))/((VAR2-
    VAR1)/VAR1)}
19:.PARAM SA={((V(OUT_2)-V(OUT_1))/V(OUT_1))/((VAR2-VAR1)/VAR1)}
20:C1 Out_1 4 {10*(1591e-12)}
21:C2 0 5 {(1591e-12)/10}
22:C3 7 Out_2 {10*(1591e-12)}
23:C4 0 9 {(1591e-12)/10}
24:R1 3 4 100k
25:R2 5 4 100k
26:R3 7 8 {VaR2}
27:R4 9 7 100k
28:V1 INTERIOR_NONE1 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
29:RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
30:V2 INTERIOR_NONE2 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
31:RV2 8 INTERIOR_NONE2 0.001 ;added by V2
32:V3 VC 0 DC 15
33:V4 VE 0 DC -15
34:X1 5 Out_1 AMP PARAMS: GAIN=1
35:X2 9 Out_2 AMP PARAMS: GAIN=1
36:*
37:*** From file C:\MC12\library\AMP.MAC
38:.SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
```

```

39:E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
40:RE1 PINA 0 1G;added by E1
41:.ENDS AMP
42:*
43:.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
    DEFW=100u DEFNRD=0
44:+ DEFNRS=0 DEFDPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
    DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
45:+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
    DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
46:+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
    PIVTOL=.1p RELTOL=1m
47:+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
48:*
49:.LIB "C:\MC12\library\NOM.LIB"
50:*
51:.TEMP 27
52:*
53:.TRAN 2e-008 1u 0
54:.PLOT TRAN v([OUT_1]) v([OUT_2])
55:*
56:.PROBE
57:.END

```

11. Низкодобротная схема S&K с двумя входами и одним выходом

На рис. 10 приведена дифференциальная низкодобротная схема S&K и результаты её компьютерного моделирования (рис. 11-12).

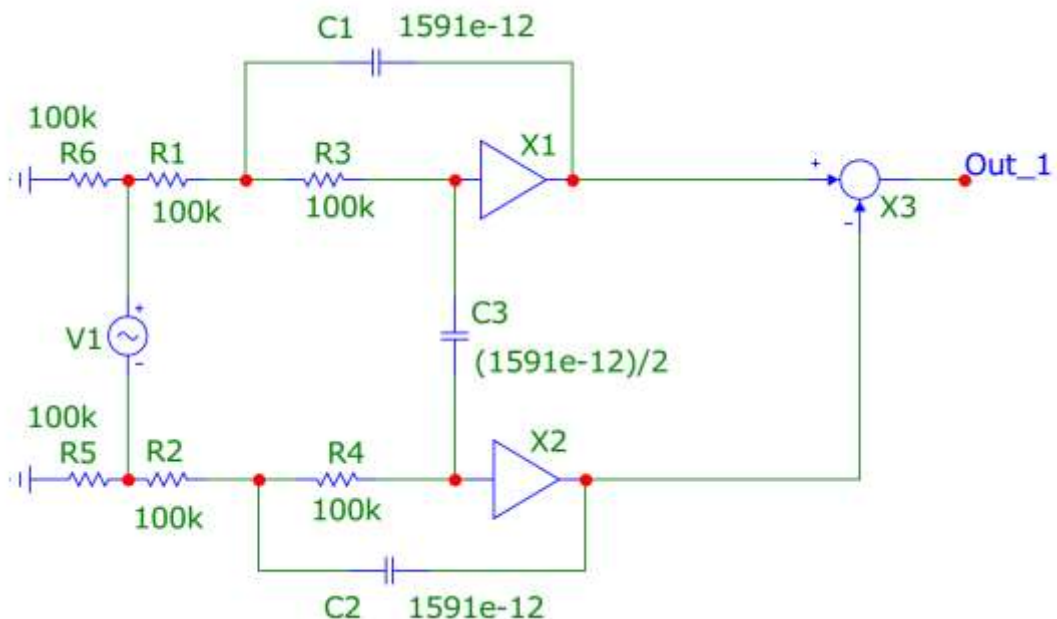


Рис. 10 Низкодобротная схема S&K с двумя входами и одним выходом

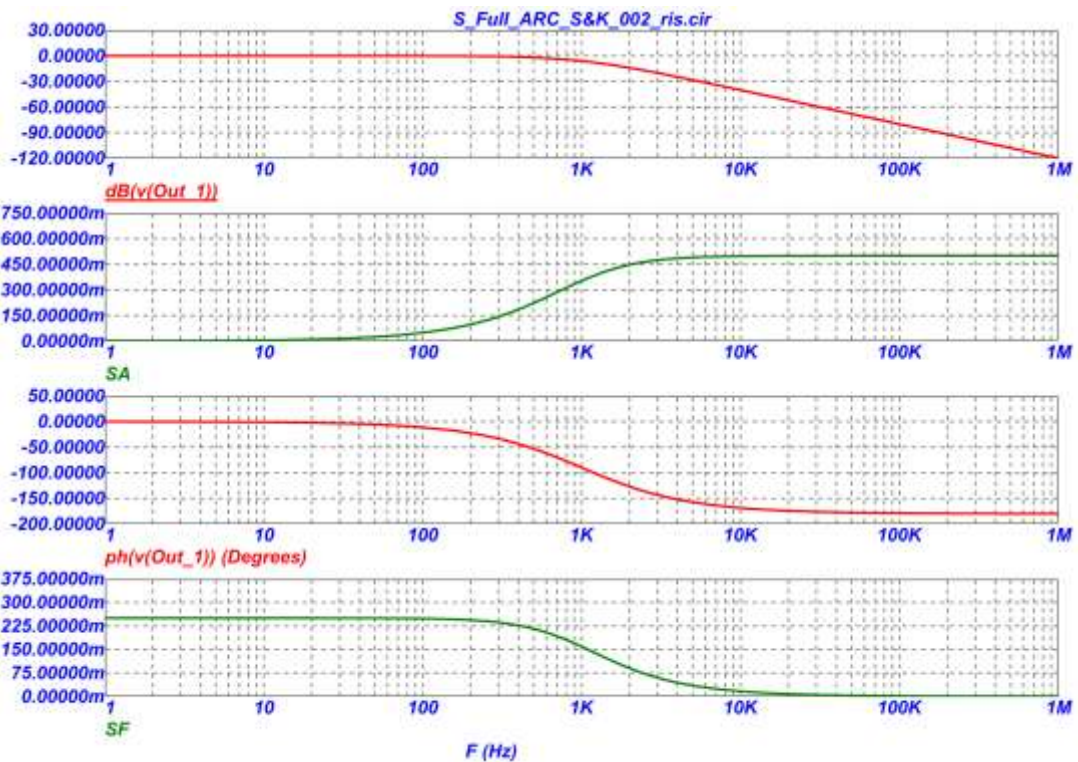


Рис. 11 АЧХ и чувствительность к R1, ФЧХ и чувствительность к R1

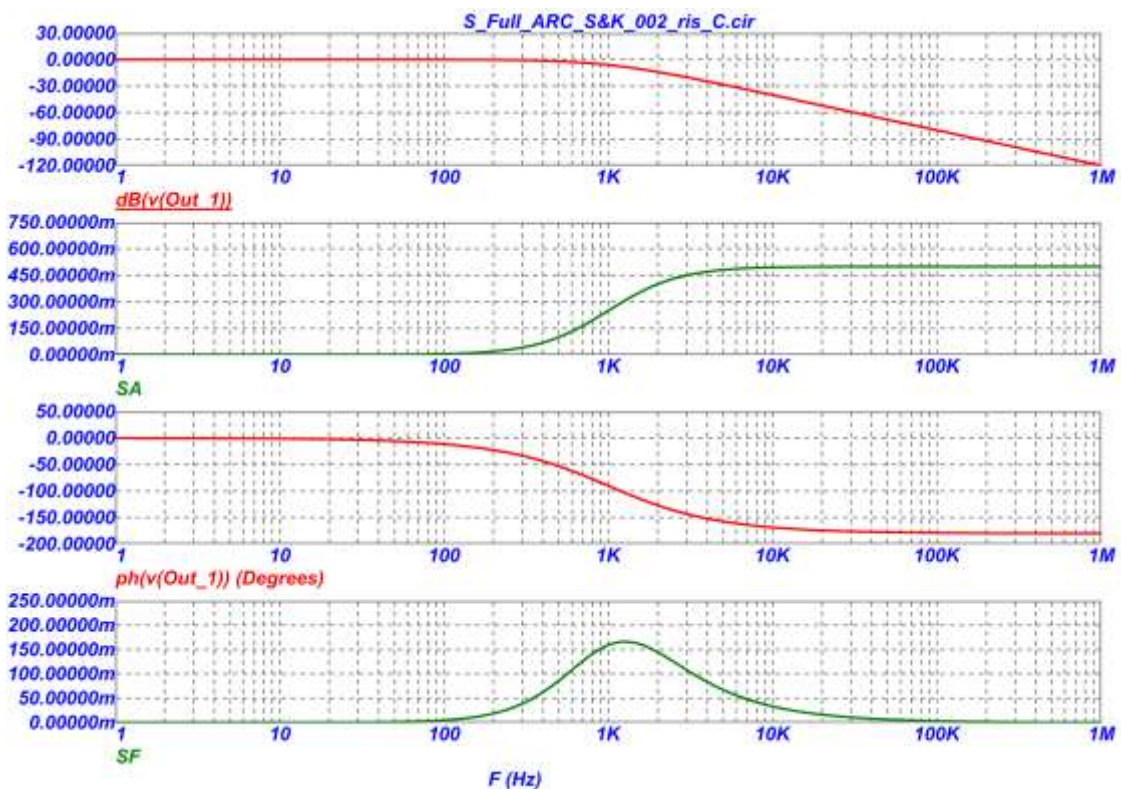


Рис. 12 АЧХ и чувствительность к C1, ФЧХ и чувствительность к C1

Netlist в Spice для схемы рис.10

- 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:.PARAM VAR1=100K
17:.PARAM VAR2=100.0001K
18:.PARAM SF={((PH(V(OUT_2))-PH(V(OUT_1)))/(PH(V(OUT_1))))/((VAR2-
    VAR1)/VAR1)}
19:.PARAM SA={((V(OUT_2)-V(OUT_1))/V(OUT_1))/((VAR2-VAR1)/VAR1)}
20:C1 9 4 1591e-12
21:C2 5 10 1591e-12
22:C3 8 7 {(1591e-12)/2}
23:C5 18 13 1591e-12
24:C6 14 19 1591e-12
25:C7 17 16 {(1591e-12)/2}
26:R1 3 4 100k
27:R2 5 6 100k
28:R3 7 4 100k
29:R4 8 5 100k
30:R5 0 6 100k
31:R6 0 3 100k
32:R7 12 13 {VaR1}
33:R8 14 15 {VaR2}
34:R9 16 13 100k
35:R10 17 14 100k
36:R11 0 15 100k
37:R12 0 12 100k
38:V1 INTERIOR_NONE1 6 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
39:RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
40:V2 VC 0 DC 15
41:V3 VE 0 DC -15
42:V4 INTERIOR_NONE2 15 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
43:RV4 12 INTERIOR_NONE2 0.001 ;added by V4

```

```

44:X1 7 9 AMP PARAMS: GAIN=1
45:X2 8 10 AMP PARAMS: GAIN=1
46:X3 9 10 Out_1 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
47:X4 16 18 AMP PARAMS: GAIN=1
48:X5 17 19 AMP PARAMS: GAIN=1
49:X6 18 19 Out_2 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
50:*
51:*** From file C:\MC12\library\AMP.MAC
52:.SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
53:E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
54:RE1 PINA 0 1G;added by E1
55:.ENDS AMP
56:*
57:*** From file C:\MC12\library\SUB.MAC
58:.SUBCKT SUB PinA PinB PinC PARAMS: KA=1 KB=1
59:E1 PINC 0 VALUE = {KA*V(PINA)-KB*V(PINB)}
60:.ENDS SUB
61:*
62:.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DEFNRD=0
63:+ DEFNRS=0 DEFPPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
64:+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
65:+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
PIVTOL=.1p RELTOL=1m
66:+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
67:*
68:.LIB "C:\MC12\library\NOM.LIB"
69:*
70:.TEMP 27
71:*
72:.TRAN 2e-008 1u 0
73:.PLOT TRAN v([OUT_1]) v([OUT_2])
74:*
75:.PROBE
76:.END

```

12. Высокодобротная схема S&K с двумя входами и одним выходом

На рис. 13 приведена высокодобротная схема S&K и результаты её компьютерного моделирования (рис. 14-15)

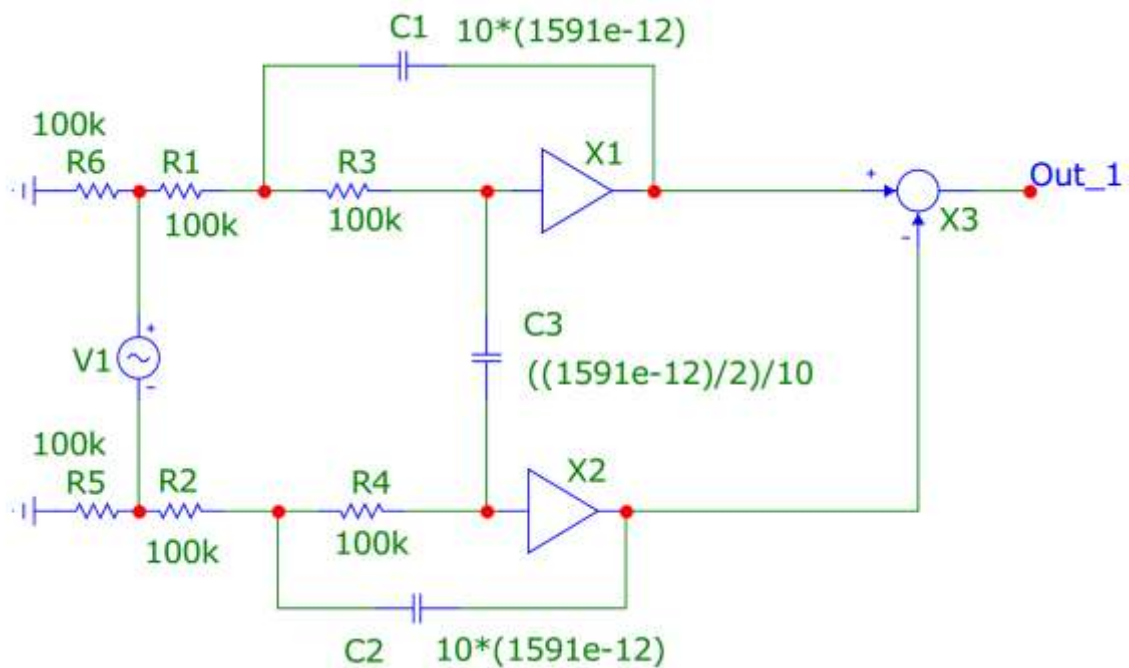


Рис. 13 Высокодобротная схема S&K с двумя входами и одним выходом

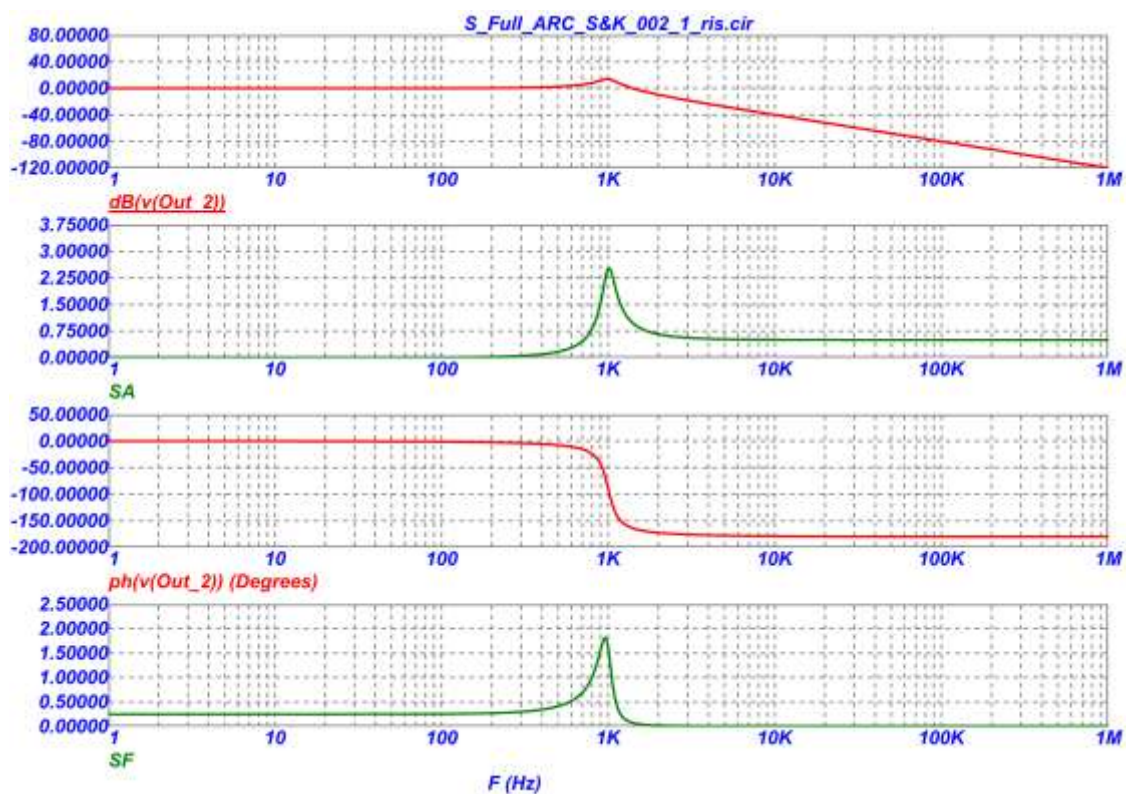


Рис. 14 АЧХ и чувствительность к R1, ФЧХ и чувствительность к R1

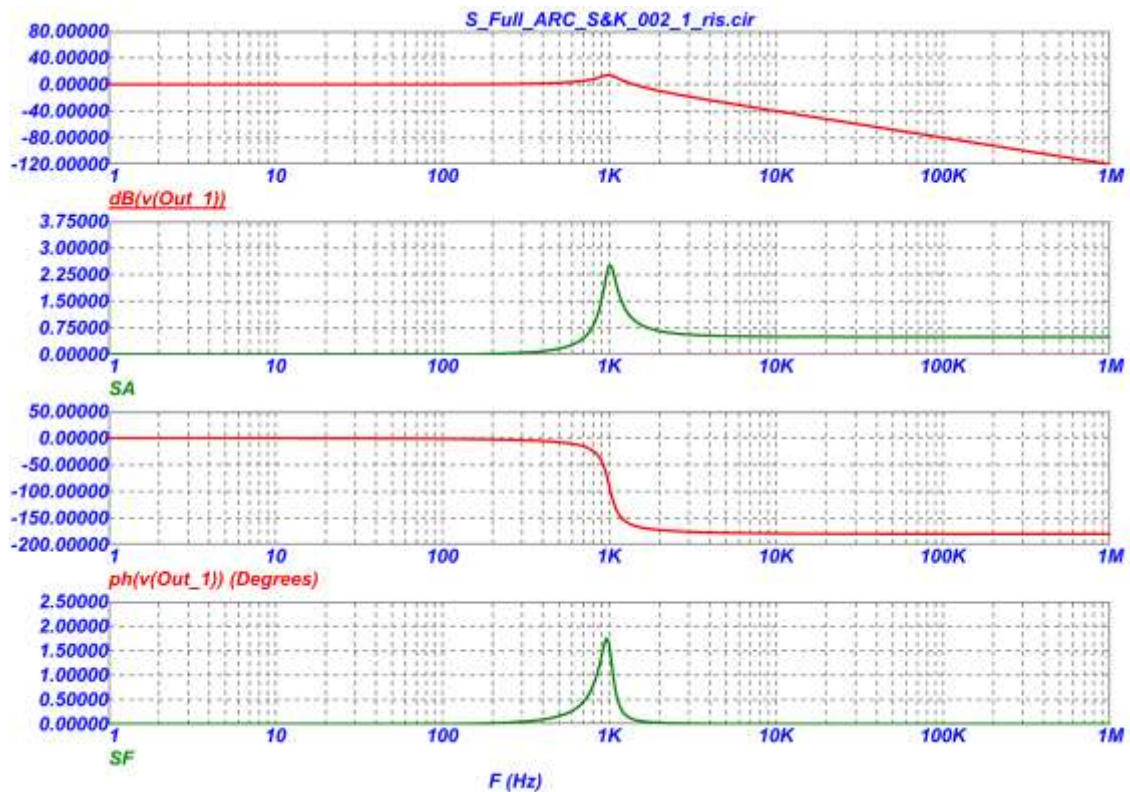


Рис. 15 АЧХ и чувствительность к C1, ФЧХ и чувствительность к C1

Netlist в Spice для схемы рис.13

```

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: .PARAM VAR1=100K
17: .PARAM VAR2=100.0001K
18: .PARAM SF={{(PH(V(OUT_2))-PH(V(OUT_1)))/(PH(V(OUT_1))))/((VAR2-
    VAR1)/VAR1)}
19: .PARAM SA={{(V(OUT_2)-V(OUT_1))/V(OUT_1))/((VAR2-VAR1)/VAR1)}

```

```

20:C1 9 4 {10*(1591e-12)}
21:C2 5 10 {10*(1591e-12)}
22:C3 8 7 {((1591e-12)/2)/10}
23:C5 18 13 {10*(1591e-12)}
24:C6 14 19 {10*(1591e-12)}
25:C7 17 16 {((1591e-12)/2)/10}
26:R1 3 4 100k
27:R2 5 6 100k
28:R3 7 4 100k
29:R4 8 5 100k
30:R5 0 6 100k
31:R6 0 3 100k
32:R7 12 13 100k
33:R8 14 15 {VaR2}
34:R9 16 13 100k
35:R10 17 14 100k
36:R11 0 15 100k
37:R12 0 12 100k
38:V1 INTERIOR_NONE1 6 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
39:RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
40:V2 VC 0 DC 15
41:V3 VE 0 DC -15
42:V4 INTERIOR_NONE2 15 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
43:RV4 12 INTERIOR_NONE2 0.001 ;added by V4
44:X1 7 9 AMP PARAMS: GAIN=1
45:X2 8 10 AMP PARAMS: GAIN=1
46:X3 9 10 Out_1 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
47:X4 16 18 AMP PARAMS: GAIN=1
48:X5 17 19 AMP PARAMS: GAIN=1
49:X6 18 19 Out_2 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
50:*
51:*** From file C:\MC12\library\AMP.MAC
52:.SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
53:E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
54:RE1 PINA 0 1G;added by E1
55:.ENDS AMP
56:*
57:*** From file C:\MC12\library\SUB.MAC
58:.SUBCKT SUB PinA PinB PinC PARAMS: KA=1 KB=1
59:E1 PINC 0 VALUE = {KA*V(PINA)-KB*V(PINB)}
60:.ENDS SUB
61:*
62:.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DEFNRD=0
63:+ DEFNRS=0 DEFPPD=0 DEFPPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
64:+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
65:+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
PIVTOL=.1p RELTOL=1m
66:+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
67:*

```



```

68: .LIB "C:\MC12\library\NOM.LIB"
69: *
70: .TEMP 27
71: *
72: .TRAN 2e-008 1u 0
73: .PLOT TRAN v([OUT_1]) v([OUT_2])
74: *
75: .PROBE
76: .END

```

13. Низкодобротная схема S&K с синфазным входом

На рис. 16 приведена низкодобротная схема S&K с синфазным входом и результаты её компьютерного моделирования (рис. 17-18)

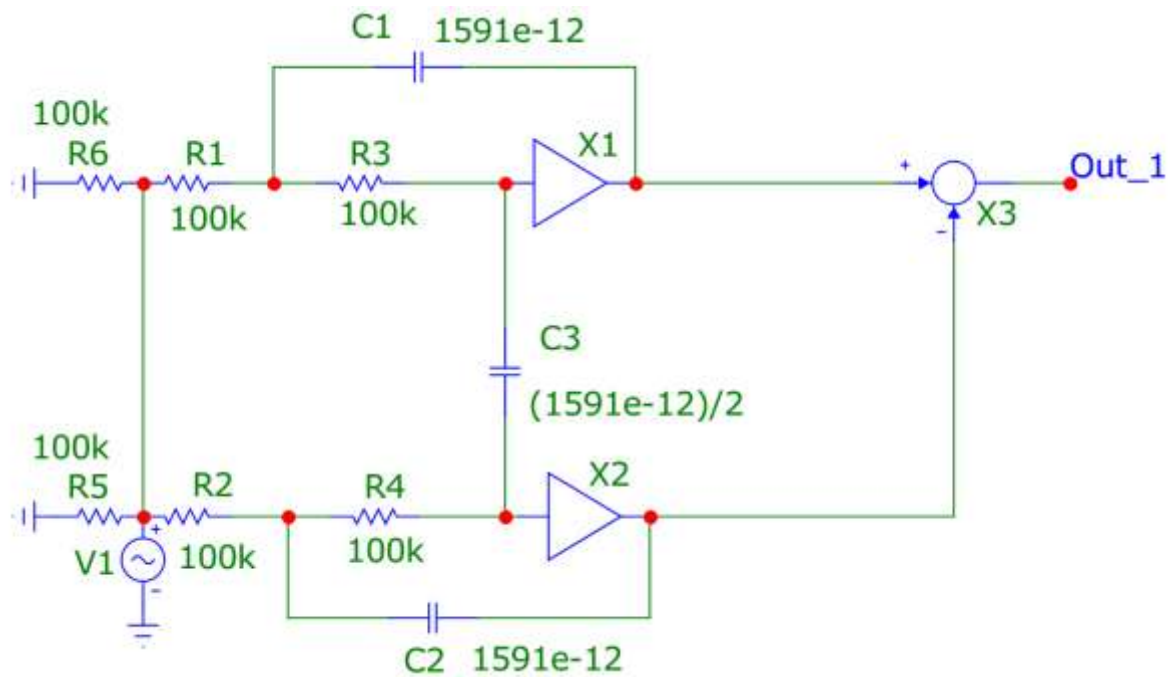


Рис. 16 Низкодобротная схема S&K с синфазным входом

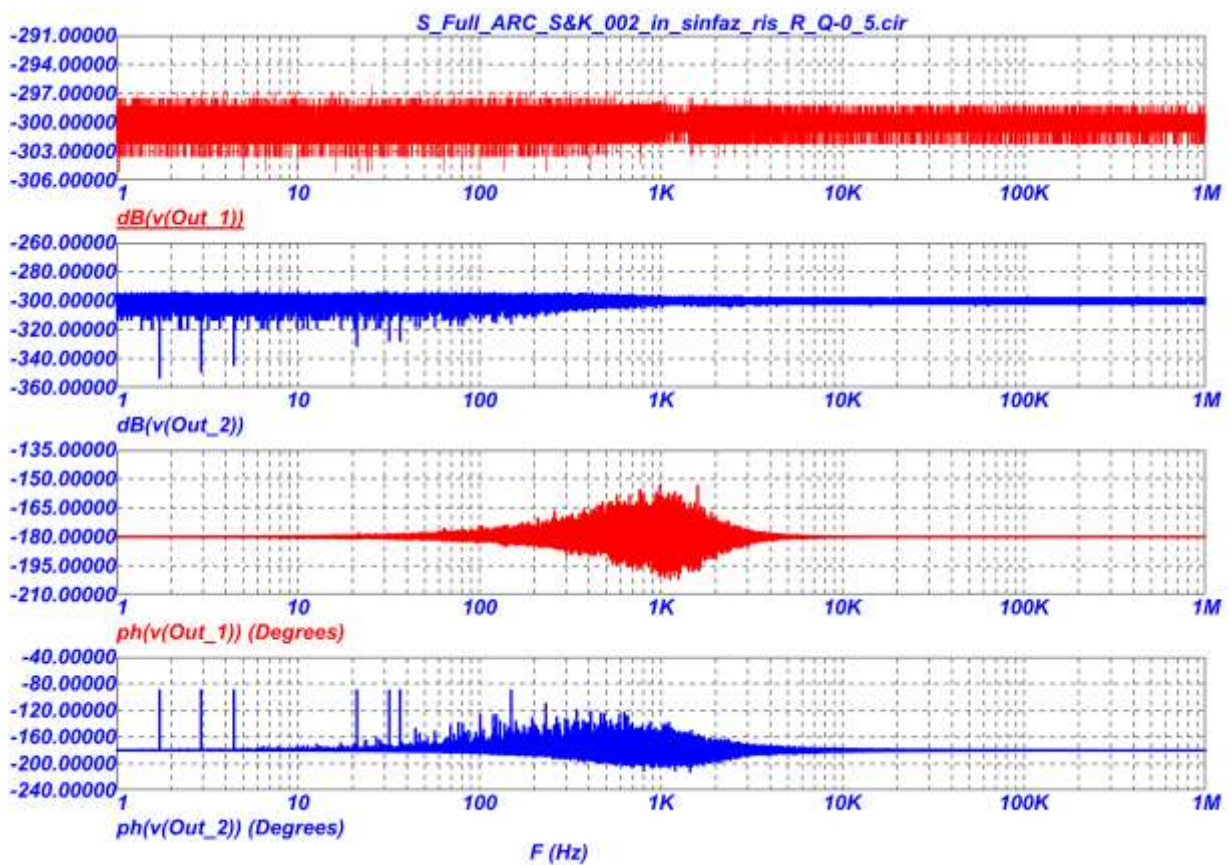


Рис. 17 АЧХ идеальной схемы, АЧХ с отклонением R1 на 1%, ФЧХ идеальной схемы, ФЧХ с отклонением R1 на 1%.

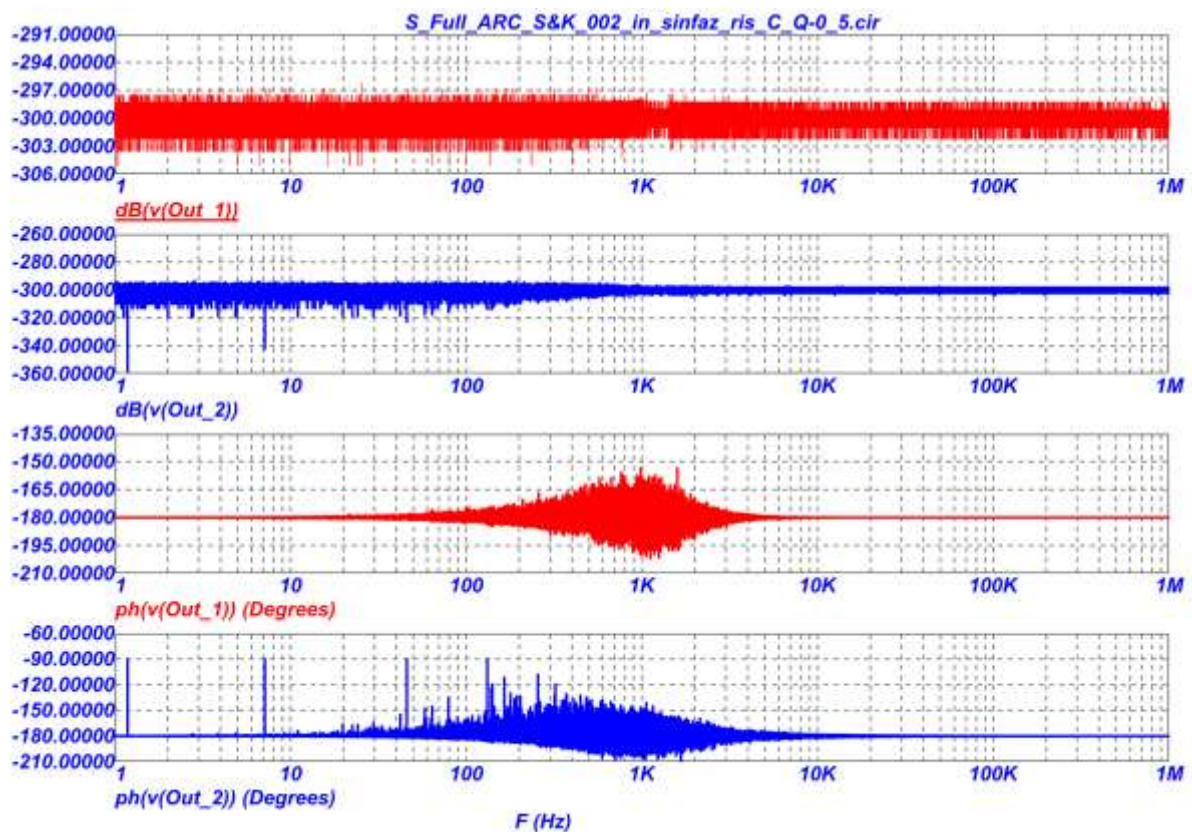


Рис. 18 АЧХ идеальной схемы, АЧХ с отклонением C2 на 1%, ФЧХ идеальной схемы, ФЧХ с отклонением C2 на 1%.

Netlist в Spice для схемы рис.16

```
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: .PARAM VAR1=100K
17: .PARAM VAR2=101K
18: .PARAM SF={{(PH(V(OUT_2))-PH(V(OUT_1)))/(PH(V(OUT_1)))/((VAR2-
    VAR1)/VAR1)}
19: .PARAM SA={{(V(OUT_2)-V(OUT_1))/V(OUT_1)/((VAR2-VAR1)/VAR1)}
20: C1 8 4 1591e-12
21: C2 5 9 1591e-12
22: C3 7 6 {(1591e-12)/2}
23: C5 16 12 {(1591e-12)}
24: C6 13 17 {(1591e-12)}
25: C7 15 14 {((1591e-12)/2)}
26: R1 3 4 100k
27: R2 5 3 100k
28: R3 6 4 100k
29: R4 7 5 100k
30: R5 0 3 100k
31: R6 0 3 100k
32: R7 11 12 100k
33: R8 13 11 {VaR2}
34: R9 14 12 100k
35: R10 15 13 100k
36: R11 0 11 100k
37: R12 0 11 100k
38: V1 INTERIOR_NONE1 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
39: RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
40: V2 VC 0 DC 15
41: V3 VE 0 DC -15
42: V4 INTERIOR_NONE2 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
```

```

43:RV4 11 INTERIOR_NONE2 0.001 ;added by V4
44:X1 6 8 AMP PARAMS: GAIN=1
45:X2 7 9 AMP PARAMS: GAIN=1
46:X3 8 9 Out_1 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
47:X4 14 16 AMP PARAMS: GAIN=1
48:X5 15 17 AMP PARAMS: GAIN=1
49:X6 16 17 Out_2 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
50:*
51:*** From file C:\MC12\library\AMP.MAC
52:.SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
53:E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
54:RE1 PINA 0 1G;added by E1
55:.ENDS AMP
56:*
57:*** From file C:\MC12\library\SUB.MAC
58:.SUBCKT SUB PinA PinB PinC PARAMS: KA=1 KB=1
59:E1 PINC 0 VALUE = {KA*V(PINA)-KB*V(PINB)}
60:.ENDS SUB
61:*
62:.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
DEFW=100u DEFNRD=0
63:+ DEFNRS=0 DEFPPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
64:+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
65:+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
PIVTOL=.1p RELTOL=1m
66:+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
67:*
68:.LIB "C:\MC12\library\NOM.LIB"
69:*
70:.TEMP 27
71:*
72:.TRAN 2e-008 1u 0
73:.PLOT TRAN v([OUT_1]) v([OUT_2])
74:*
75:.PROBE
76:.END

```

13. Высокодобротная схема S&K с синфазным входом

На рис. 19 приведена высокодобротная схема S&K с синфазным входом и результаты её компьютерного моделирования (рис. 20-21)

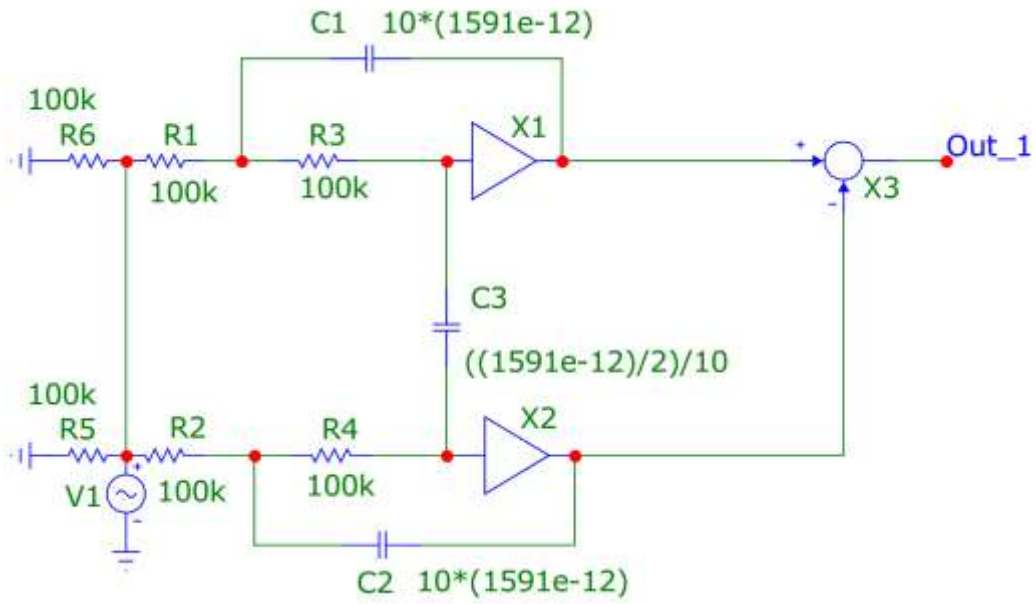


Рис. 19 Высокодобротная схема S&K с синфазным входом

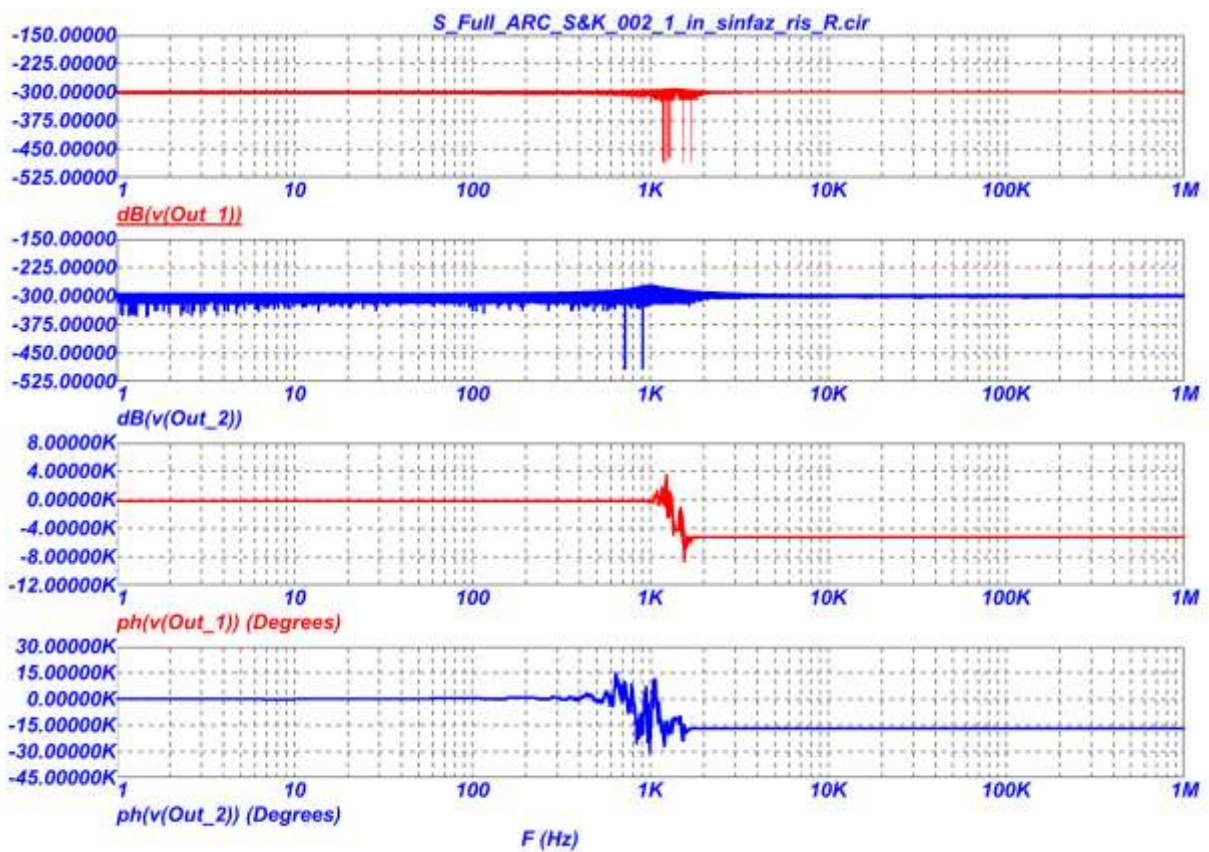


Рис. 20 АЧХ идеальной схемы, АЧХ с отклонением R2 на 1%, ФЧХ идеальной схемы, ФЧХ с отклонением R2 на 1%.

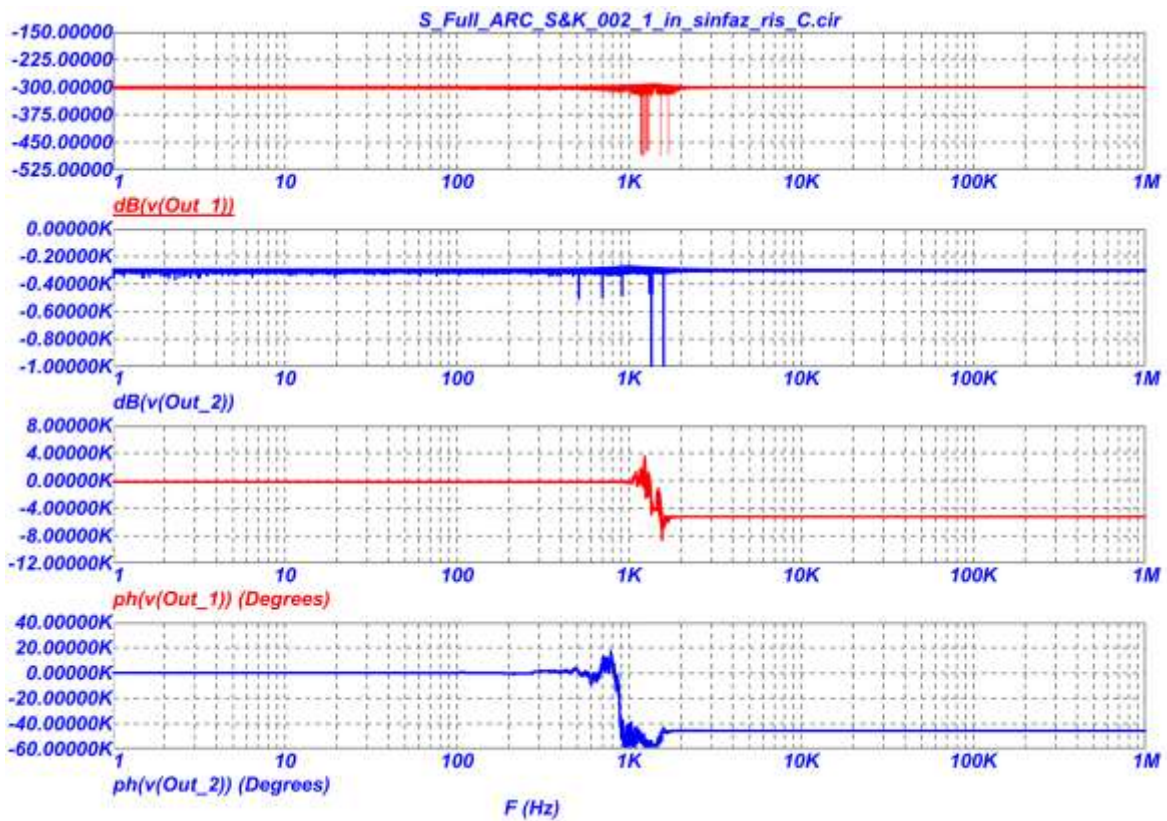


Рис. 21 АЧХ идеальной схемы, АЧХ с отклонением C2 на 1%, ФЧХ идеальной схемы, ФЧХ с отклонением C2 на 1%.

Netlist в Spice для схемы рис.19

```

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: .PARAM VAR1=100K
17: .PARAM VAR2=100.1001K

```

```

18: .PARAM SF={{(PH(V(OUT_2))-PH(V(OUT_1)))/(PH(V(OUT_1))))/((VAR2-
    VAR1)/VAR1)}}
19: .PARAM SA={{(V(OUT_2)-V(OUT_1))/V(OUT_1))/((VAR2-VAR1)/VAR1)}}
20: C1 8 4 {10*(1591e-12)}
21: C2 5 9 {10*(1591e-12)}
22: C3 7 6 {((1591e-12)/2)/10}
23: C5 16 12 {10*(1591e-12)}
24: C6 13 17 {10*(1591e-12)}
25: C7 15 14 {((1591e-12)/2)/10}
26: R1 3 4 100k
27: R2 5 3 100k
28: R3 6 4 100k
29: R4 7 5 100k
30: R5 0 3 100k
31: R6 0 3 100k
32: R7 11 12 {VaR1}
33: R8 13 11 {VaR2}
34: R9 14 12 100k
35: R10 15 13 100k
36: R11 0 11 100k
37: R12 0 11 100k
38: V1 INTERIOR_NONE1 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
39: RV1 3 INTERIOR_NONE1 0.001 ;added by V1
40: V2 VC 0 DC 15
41: V3 VE 0 DC -15
42: V4 INTERIOR_NONE2 0 SIN (0 169.7 60 0 0 0)
43: RV4 11 INTERIOR_NONE2 0.001 ;added by V4
44: X1 6 8 AMP PARAMS: GAIN=1
45: X2 7 9 AMP PARAMS: GAIN=1
46: X3 8 9 Out_1 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
47: X4 14 16 AMP PARAMS: GAIN=1
48: X5 15 17 AMP PARAMS: GAIN=1
49: X6 16 17 Out_2 SUB PARAMS: KA=1 KB=1
50: *
51: *** From file C:\MC12\library\AMP.MAC
52: .SUBCKT AMP PinA PinB PARAMS: GAIN=1
53: E1 PINB 0 PINA 0 {GAIN}
54: RE1 PINA 0 1G;added by E1
55: .ENDS AMP
56: *
57: *** From file C:\MC12\library\SUB.MAC
58: .SUBCKT SUB PinA PinB PinC PARAMS: KA=1 KB=1
59: E1 PINC 0 VALUE = {KA*V(PINA)-KB*V(PINB)}
60: .ENDS SUB
61: *
62: .OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC DEFL=100u
    DEFW=100u DEFNRD=0
63: + DEFNRS=0 DEFPPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
    DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
64: + DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
    DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3

```

```
65: + DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10 PIVREL=1m
    PIVTOL=.1p RELTOL=1m
66: + TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
67: *
68: .LIB "C:\MC12\library\NOM.LIB"
69: *
70: .TEMP 27
71: *
72: .TRAN 2e-008 1u 0
73: .PLOT TRAN v([OUT_1]) v([OUT_2])
74: *
75: .PROBE
76: .END
```


15. Выводы

Выполнено сравнительное моделирование параметров активных RC-фильтров с дифференциальными и недифференциальными входами в среде Micro-Cap:

1. При исследовании схем фильтров S&K с одним входом и одним выходом выявлены следующие свойства: схемы с дифференциальным входом имеют в 2 раза ниже чувствительность АЧХ к разбросу параметров пассивных элементов и коэффициенту усиления буферных усилителей. Причем, элементы, которые являются общими для двух каналов (C2 и C3 в схемах рис. 7 и рис. 13), имеют одинаковую чувствительность в схемах с недифференциальными и дифференциальными входами.

2. При исследовании схем фильтров S&K по синфазному входу установлено: что из-за большого подавления сигнала, путем моделирования находить функции (графики) чувствительностей не представляется целесообразным (величины чувствительностей получаются очень большими). В этой связи приведены для сравнения графики АЧХ и ФЧХ исследуемой схемы и схемы с отклонением пассивных элементов на 1%, а коэффициента усиления буферного усилителя на 0.01% и 1%. Наибольший вклад в ошибку подавления синфазной составляющей вносит разброс параметров буферного усилителя. Для схемы S&K по синфазному входу это ожидаемый результат, так как у неё чувствительность АЧХ к коэффициенту усиления буферного усилителя (K) при больших значениях добротности (Q) - высокая. Также следует отметить, что чувствительность коэффициента подавления синфазного сигнала фильтра $K_{oc.cф}^*$ к “общим элементам” двух каналов (на примере конденсатора C3 в схеме рис. 19) равна нулю.

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

Список литературы:

1. Difference Amplifier with Equation Example URL: <https://www.electronicclinic.com/difference-amplifier-with-equation-example/> (дата обращения: 13.04.2023).
2. A Differential Op-Amp Circuit Collection URL: <https://users.fmf.uni-lj.si/ponikvar/PDFji/A%20Differential%20Op-Amp%20Circuit%20Collection%20%20sloa064a.pdf> (дата обращения: 13.04.2023).
3. Амелина, М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 : учебное пособие для вузов / М. А. Амелина, С. А. Амелин. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 632 с. — ISBN 978-5-8114-6995-6. — Текст : электронный // Лань : электронно- библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/153923> (дата обращения: 13.04.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. John M. da Cunha, "A compact and flexible signal conditioning system for data acquisition," Hewlett-Packard Journal, pp. 9-15, Oct. 1994. <https://www.hpl.hp.com/hpjournal/94oct/oct94a2.pdf>
5. M. Gasulla, O. Casas and R. Pallas-Areny, "On the common mode response of fully differential circuits," *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*, Baltimore, MD, USA, 2000, pp. 1045-1049 vol.2, doi: 10.1109/IMTC.2000.848900.