

Diferenční zesilovač (P14-04)

Semestrální práce předmětu AEO

Ondřej Jirman

Zadání

Zapojení diferenčního zesilovače včetně hodnot součástek je na obr. 1. Použité tranzistory mají $B \approx \beta \gg 10$. Klidová napětí bází předpokládejte $U_{be} \approx 0,7V$.

1. Vypočítejte přibližnou velikost paramterů klidových bodů všech tranzistorů $P_0(I_c, U_{ce})$.
2. Určete přibližnou velikost stejnosměrného souhlasného napětí, které můžeme přivést na vstup, aniž by byla porušena funkce zesilovače.
3. Pro analýzu vlivu jednotlivých stupňů na výsledné parametry zapojení nakreslete dílčí modely jednotlivých stupňů. Použijte nejjednodušší modely tranzistorů. Uveďte obecné vztahy pro určení paramterů jednotlivých stupňů.
4. Vypočítejte
 - (a) zesílení rozdílového napětí v jednotlivých stupních zesilovače
 - (b) celkové zesílení A_d rozdílového napětí
 - (c) vstupní odpor pro rozdílové napětí R_{ad}
 - (d) výstupní odpor R_k
5. Obvod naprogramujte ve SPICE, použijte tranzistory DEFAULT (BF=100).
6. Zkontrolujte všechny parametry z bodů 1, 2 a 3.
7. Odsimulujte funkci zesilovače pro harmonická vstupní napětí s amplitudami $U_{m01} = 1 \text{ mV}$ a $U_{m02} = 2 \text{ mV}$.
8. Srovnejte hodnoty vypočítané v bodech 1, 2 a 3 s výsledky SPICE a vyhodnoťte je.

Schéma

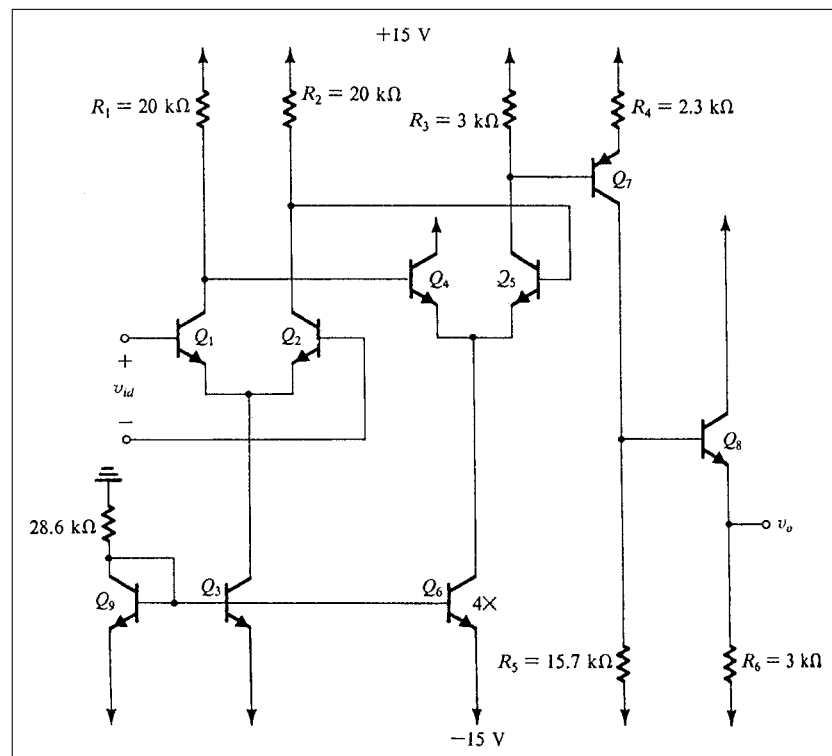


Schéma 1: Zapojení diferenčního zesilovače

Pracovní body tranzistorů

Pracovní body jsou určeny pro $u_{id} = 0$. U_{ss} je souhlasné stejnosměrné napětí na vstupu proti zemi. V následující tabulce jsou dále uvedeny parametry tranzistorů (g_m , r_π , r_o) určené pro konkrétní pracovní bod při $U_{ss} = 0$, $\beta = 100$ a $V_A = 70 \text{ V}$.

$$r_o = \frac{V_A}{I_{cP0}} \quad (1)$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad (2)$$

$$g_m = 40I_{cP0} \quad (3)$$

Tranzistor	U_{ceP0} [V]	I_{cP0} [mA]	r_0 [k Ω]	r_π [Ω]	g_m [S]
Q_1	$10,7 - U_{ss}$	0,25	280	10000	0,01
Q_2	$10,7 - U_{ss}$	0,25	280	10000	0,01
Q_3	$14,3 + U_{ss}$	0,5			
Q_4	5,7	1	70	2500	0,04
Q_5	2,7	1	70	2500	0,04
$4 \times Q_6$	24,3	$4 \times 0,5$			
Q_7	12	1	70	2500	0,04
Q_8	15	5	14	500	0,2
Q_9	0,6	0,5			

Tabulka 1: Pracovní body a parametry tranzistorů diferenčního zesilovače

Určení rozsahu U_{ss}

Horní hranice U_{ssmax} se určí z podmínky $U_{cbQ_1} > 0$ takto:

$$U_{cbQ_1} > 0 \quad \Rightarrow \quad U_{bQ_1} < U_{cQ_1} \quad \Rightarrow \quad U_{ss} < 10$$

$$U_{ssmax} = 10 \text{ V}$$

Dolní hranice U_{ssmin} se určí z podmínky $U_{cbQ_3} > 0$ a rovnic $U_{ss} = U_{eQ_1} + U_{beQ_1}$ a $U_{eQ_1} = U_{cQ_3}$ takto:

$$U_{cbQ_3} > 0 \quad \Rightarrow \quad U_{bQ_3} < U_{cQ_3} \quad \Rightarrow \quad -14,3 < U_{ss} - 0,7 \quad \Rightarrow \quad U_{ss} > -13,6$$

$$U_{ssmin} = -13,6 \text{ V}$$

Platný rozsah souhlasného vstupního napětí je:

$$-13,6 < U_{ss} < 10 \tag{4}$$

SPICE Simulace

Simulací programem *spice3f4* vyšel rozsah napětí při kterých zesílení zesilovače nepoklesne o více jak 3dB takto:

$$-14 < U_{ss} < 10.75 \tag{5}$$

Analýza jednotlivých stupňů

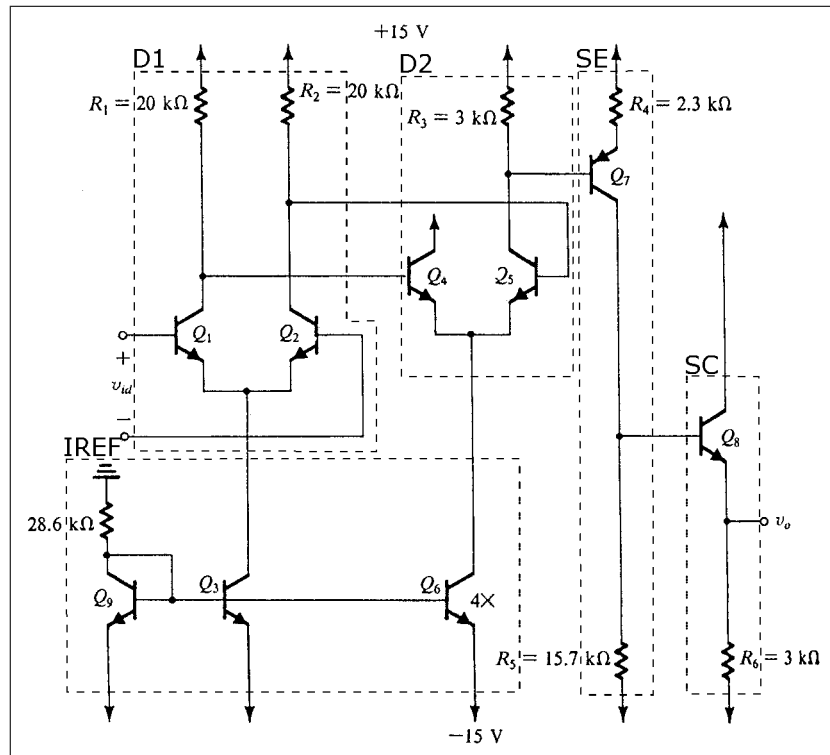


Schéma 2: Stupně diferenčního zesilovače

Analýzovaný zesilovač se skládá ze čtyř zesilovacích stupňů: D1, D2, SE, SC. Pro každý z těchto stupňů vypočteme tři základní parametry: R_i , R_o a A_u . Pro výpočet parametrů každého stupně je potřeba znát i výstupní odpor předchozího stupně R_{op} a vstupní odpor následujícího stupně R_{in} . Parametry zesilovacího stupně R_i a A_u určíme tak, že na výstup izolovaného stupně připojíme odpor odpovídající vstupnímu odporu následujícího stupně. Spočítáme $R_i = u_1/i_1$ a $A_u = u_2/i_2$.

Dále spočítáme R_o podle rovnice $R_o = u_2/i_2$, tak že na výstup místo vstupního odporu následujícího stupně připojíme zdroj napětí u_2 a na vstup výstupní odpor předchozího stupně.

Uvádím dvě sady obvodových rovnic a jejich řešení. Mezikroky neuvádím, protože řešení rovnic bylo provedeno v programu *Maple 9.5*.

Náhradní schémata pro jednotlivé stupně jsou uvedena v příloze.

Výstupní stupeň (SC)

Obvodové rovnice pro výpočet A_u a R_i

Použita metoda uzlových napětí.

$$R_{z1} = R_6 \parallel r_0 \parallel R_{in} \tag{6}$$

$$0 = u_2 \left(\frac{1}{R_{z1}} + \frac{1}{r_\pi} \right) - u_1 \frac{1}{r_\pi} - g_m(u_1 - u_2) \tag{7}$$

Obvodové rovnice pro výpočet R_o

Použita metoda uzlových napětí.

$$R_{z_2} = R_6 \parallel r_0 \quad (8)$$

$$0 = u_1 \left(\frac{1}{R_{op}} + \frac{1}{r_\pi} \right) - u_2 \frac{1}{r_\pi} \quad (9)$$

Řešení

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_i - r_\pi}{R_i} \quad (10)$$

$$R_i = \frac{u_1 r_\pi}{u_1 - u_2} = (R_{in} \parallel r_0 \parallel R_6) (1 + \beta) + r_\pi \quad (11)$$

$$R_o = \frac{u_2}{u_2/R_z - (u_1 + u_2)g_m} = \frac{(r_0 \parallel R_6)(r_\pi + R_{op})}{r_\pi + R_{op} + \beta(r_0 \parallel R_6)} \quad (12)$$

Budič výstupního stupně (SE)**Obvodové rovnice pro výpočet A_u a R_i**

Použita metoda uzlových napětí.

$$R_z = R_5 \parallel R_{in} \quad (13)$$

$$0 = u_2 \left(\frac{1}{R_z} + \frac{1}{r_0} \right) + g_m(u_1 - u_3) - u_3 \frac{1}{r_0} \quad (14)$$

$$0 = u_3 \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_\pi} \right) - g_m(u_1 - u_3) - u_2 \frac{1}{r_0} - u_1 \frac{1}{r_\pi} \quad (15)$$

Obvodové rovnice pro výpočet R_o

Použita metoda uzlových napětí.

$$0 = u_1 \left(\frac{1}{R_{op}} + \frac{1}{r_\pi} \right) - u_3 \frac{1}{r_\pi} \quad (16)$$

$$0 = u_3 \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_\pi} \right) - g_m(u_1 - u_3) - u_2 \frac{1}{r_0} - u_1 \frac{1}{r_\pi} \quad (17)$$

Řešení

$$R_z = R_{in} \parallel R_5 \quad (18)$$

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = - \frac{(\beta r_0 - R_4)R_z}{r_0 R_4 (1 + \beta) + r_\pi (r_0 + R_z + R_4) + R_z R_4} \quad (19)$$

$$A_{u_0} = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} A_u = - \frac{\beta R_z}{R_4 (1 + \beta) + r_\pi} \quad (20)$$

$$R_i = \frac{u_1 r_\pi}{u_1 - u_3} = \frac{R_4 (r_0 (1 + \beta) + r_\pi + R_z) + r_\pi (R_z + r_0)}{R_z + R_4 + r_0} \quad (21)$$

$$R_{i_0} = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} R_i = r_\pi + R_4 (1 + \beta) \quad (22)$$

$$(23)$$

$$R_o = \frac{u_2}{\frac{u_2}{R_5 \parallel r_0} - \frac{u_3}{r_0} + g_m(u_1 - u_3)} = \frac{R_5(R_4(r_0(1+\beta) + r_\pi + R_{op}) + r_0(r_\pi + R_{op}))}{R_4(r_0(1+\beta) + r_\pi + R_5 + R_{op}) + (R_5 + r_0)(r_\pi + R_{op})} \quad (24)$$

$$R_{o0} = \lim_{r_0 \rightarrow \infty} R_o = R_5 \quad (25)$$

Rozdílový zesilovač (D2)

Obvodové rovnice pro výpočet A_u a R_i

Použita metoda smyčkových proudů.

$$0 = i_3(R_z + 2r_0) - 2r_0r_\pi g_m i_1 \quad (26)$$

$$0 = 2i_1 r_\pi - u_1 \quad (27)$$

Obvodové rovnice pro výpočet R_o

Vypočteno tak, že proudové zdroje byly rozpojeny a spočítán odpor vzniklé odporové sítě.

Řešení

$$A_u = \frac{g_m}{2}(R_3 \parallel 2r_0 \parallel R_{in}) \quad (28)$$

$$R_i = 2r_\pi \quad (29)$$

$$R_o = R_3 \parallel 2r_0 \quad (30)$$

Vstupní rozdílový zesilovač (D1)

Obvodové rovnice pro výpočet A_u a R_i

Použita metoda smyčkových proudů.

$$0 = i_3(R_{in} + 2r_0) - 2r_0r_\pi g_m i_1 - i_4 R_{in} \quad (31)$$

$$0 = i_4(R_1 + R_2 + R_{in}) - i_3 R_{in} \quad (32)$$

$$0 = 2i_1 r_\pi - u_1 \quad (33)$$

Obvodové rovnice pro výpočet R_o

Vypočteno tak, že proudové zdroje byly rozpojeny a spočítán odpor vzniklé odporové sítě.

Řešení

$$A_u = -\frac{g_m}{2}((R_1 + R_2) \parallel 2r_0 \parallel R_{in}) \quad (34)$$

$$R_i = 2r_\pi \quad (35)$$

$$R_o = (R_1 + R_2) \parallel 2r_0 \quad (36)$$

Vypočtené a nasimulované hodnoty parametrů

Hodnoty parametrů g_m a I_c platí pro tranzistory v konkrétním zesilovacím stupni.

	D1	D2	SE	SC	CELEK
A_u [-]	-22	57,84	-6,26	0,998	7972
R_i [Ω]	20000	5000	190000	250000	20000
R_o [Ω]	37333	2937	15586	151	151
g_m [S]	0,01	0,04	0,04	0,2	–
I_c [mA]	0,25	1	1	5	–
U_{ce} [V]	10,7	5,7 / 2,7	12	15	–

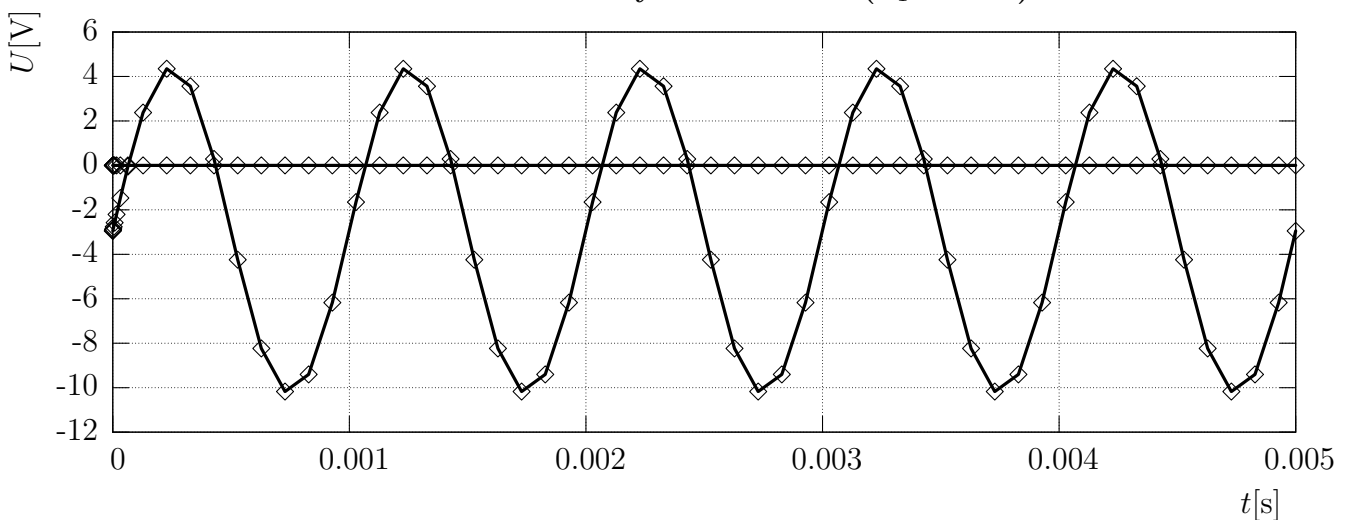
Tabulka 2: Vypočtené parametry stupňů diferenčního zesilovače

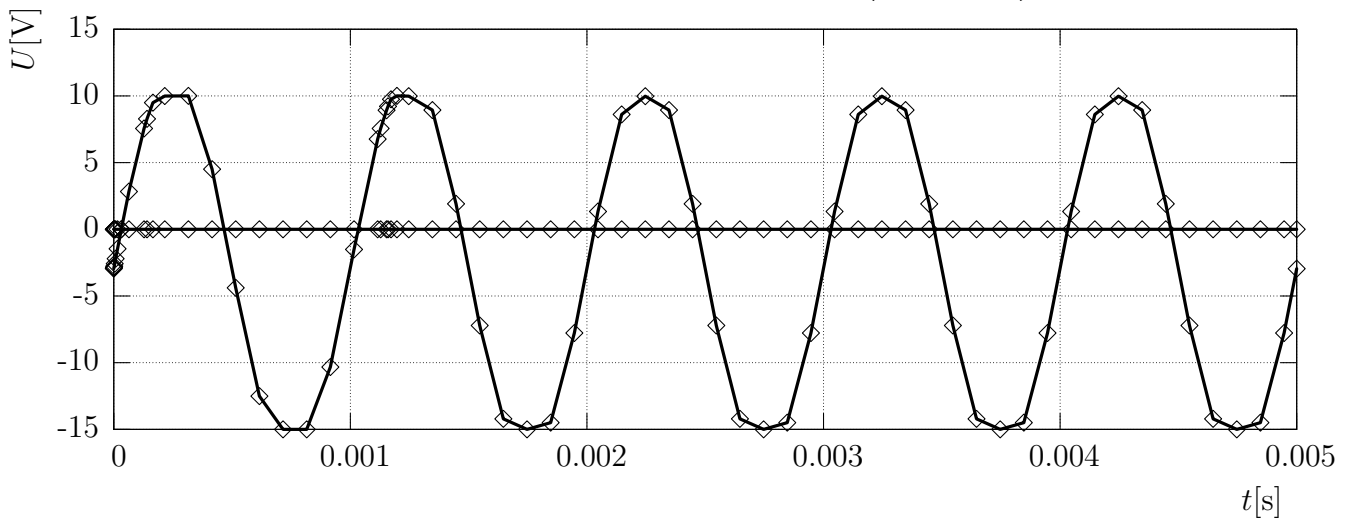
	D1	D2	SE	SC	CELEK
A_u [-]	-21,954	53,285	-6,344	0,998	7405
R_i [Ω]	22232	–	–	–	–
R_o [Ω]	–	–	–	–	153,6
g_m [S]	0,009	0,036	0,0332	0,154	–
I_c [mA]	0,233	0,93	0,859	3,98	–
U_{ce} [V]	10,936	5,612 / 2,842	15,17	17,91	–

Tabulka 3: Nasimulované parametry stupňů diferenčního zesilovače

Přechodová analýza zesilovače

Přechodová analýza zesilovače ($U_1 = 1\text{mV}$)



Přechodová analýza zesilovače ($U_1 = 2\text{mV}$)

Závěr

Zesílení diferenčního zesilovače je 7405. Ručním výpočtem vyšlo zesílení 7972. (chyba +7,6%) Celá tato chyba byla způsobena při analýze stupně D2, zanedbáním odporu proudového zdroje. Vstupní odpor diferenčního zesilovače je 22232 Ω . Ručním výpočtem 20000 Ω . (chyba -10%) Tato chyba byla způsobena nepřesným určením parametru g_m (s chybou +10%) tranzistorů stupně D1. Výstupní odpor diferenčního zesilovače je 153,6 Ω . Ručním výpočtem 151 Ω . (chyba -1,6%)

Ostatní vypočítané a nasimulované parametry zesilovače jsou v tabulkách č. 2 a 3.

Analýzovaný diferenční zesilovač měl vstupní napěťovou nesymetrii 0,33 μV .

Při buzení zesilovače napětím 2mV bylo výstupní napětí zkreslené. Toto zkreslení bylo způsobeno mírným přebuzením zesilovače a především vstupní napěťovou nesymetrií. Tato nesymetrie způsobila stejnosměrnou složku výstupního napětí o velikosti -2,5V.

Zesilovač pracuje (pokles zesílení o 3dB) při souhlasném vstupním napětí v rozsahu $-14 < U_{ss} < 10,75$. Ručním výpočtem byl určen rozsah $-13,6 < U_{ss} < 10$. (chyba -7,5%)

Ruční analýza je v porovnání se SPICE analýzou méně (s největší chybou $\pm 10\%$) přesná a to hlavně díky chybnému určení parametrů tranzistorů a díky idealizaci proudových zrcadel v stupni IREF.

SPICE Modely

```

1  * AEO P14-04 (models)
2
3  * D1
4  .SUBCKT D1 ip in op on vcc ir
5  R1 vcc op          20K
6  R2 vcc on          20K
7  Q1 op ip ir       mynpn
8  Q2 on in ir       mynpn
9  .ENDS D1
10
11 * D2
12 .SUBCKT D2 ip in o vcc ir
13 R3 vcc o           3K
14 Q4 vcc ip ir      mynpn
15 Q5 o in ir        mynpn
16 .ENDS D2
17
18 * SE
19 .SUBCKT SE i o vcc vdd
20 R4 e vcc          2.3K
21 R5 vdd o          15.7K
22 Q7 o i e         mypnp
23 .ENDS SE
24
25 * SC
26 .SUBCKT SC i o vcc vdd
27 R6 vdd o          3K
28 Q8 vcc i o       mynpn
29 .ENDS SC
30
31 * IREF
32 .SUBCKT IREF ir1 ir2 vdd
33 Q3 ir1 vr vdd    mynpn
34 Q6A ir2 vr vdd   mynpn
35 Q6B ir2 vr vdd   mynpn
36 Q6C ir2 vr vdd   mynpn
37 Q6D ir2 vr vdd   mynpn
38 Q9 vr vr vdd    mynpn
39 R7 vr 0          28.6K
40 .ENDS IREF
41
42 .MODEL mynpn NPN (BF=100)
43 .MODEL mypnp PNP (BF=100)

```

Kód 1: Modely stupňů zesilovače

```

1  * AEO P14-04 (Au)
2
3  XIR ir1  ir2  vdd                IREF
4  XD1 inp  inn  dlop dlon vcc ir1  D1
5  XD2 dlop dlon d2o  vcc  ir2     D2
6  XSE d2o  seo  vcc  vdd          SE
7  XSC seo  sco  vcc  vdd          SC
8  VCC vcc  0                    15
9  VDD 0    vdd                  15
10 VIN inp  inn                    0 AC SIN(0 0.001 1000)
11 VSS inn  0                      0
12
13 .INCLUDE subckts.ckt
14 .OP
15 .AC DEC 5 1e3 1e3
16 .PRINT AC V(inp,inn) V(dlop,dlon) V(d2o) V(seo) V(sco)
17 .END

```

Kód 2: Model pro simulaci A_u

```

1  #!/bin/sh
2  # sim-au
3  simdir=./out
4  mkdir -p $simdir
5
6  spice3 < au.ckt > $simdir/au.out
7  gcc -s -o $simdir/divide divide.c
8  div=$simdir/divide
9
10 get_amp() { sed -n "/$1/{ n; n; p; q }" $simdir/au.out | \
11     awk '{ print $4 }' | sed 's/://' ; }
12
13 # extract voltages from simulation output
14 vin=`get_amp 'v(inp)-v(inn)'\`
15 vd1=`get_amp 'v(dlop)-v(dlon)'\`
16 vd2=`get_amp 'v(d2o)'\`
17 vse=`get_amp 'v(seo)'\`
18 vsc=`get_amp 'v(sco)'\`
19
20 # calculate Au
21 ad1=`$div $vd1 $vin\`
22 ad2=`$div $vd2 $vd1\`
23 ase=`$div $vse $vd2\`
24 asc=`$div $vsc $vse\`
25 a=`$div $vsc $vin\`
26
27 echo "$ad1 $ad2 $ase $asc = $a"

```

Skript 1: Simulační skript pro simulaci A_u

```

1  * AEO P14-04 (Uss in)
2
3  XIR ir1  ir2  vdd                IREF
4  XD1 inp  inn  dlop dlon vcc ir1  D1
5  XD2 dlop dlon d2o vcc ir2      D2
6  XSE d2o  seo  vcc  vdd          SE
7  XSC seo  sco  vcc  vdd          SC
8  VCC vcc  0                    15
9  VDD 0    vdd                    15
10 VIN inp  inn                    0 AC SIN(0 0.001 1000)
11 VSS inn  0                        @VSS@
12
13 .INCLUDE subckts.ckt
14 .AC DEC 5 1e3 1e3
15 .PRINT AC V(inp,inn) V(sco)
16 .END

```

Kód 3: Model pro simulaci vlivu U_{ss} na A_u

```

1  #!/bin/sh
2  # sim-uss
3  simdir=./out
4  mkdir -p $simdir
5
6  gcc -s -o $simdir/divide divide.c
7  gcc -s -o $simdir/add add.c
8  gcc -s -o $simdir/compare compare.c
9  div=$simdir/divide
10 add=$simdir/add
11 cmp=$simdir/compare
12
13 get_amp() { sed -n "$1/{n;n;p;q}" $simdir/ussin.out | \
14   awk '{print $4}' | sed 's/,//'; }
15
16 VSS=-15.0
17 while $cmp 15.1 $VSS; do
18   sed "s/@VSS@/$VSS/" ussin.ckt > $simdir/ussin.ckt
19   spice3 < $simdir/ussin.ckt > $simdir/ussin.out
20
21   vin=`get_amp 'v(inp)-v(inn)'\`
22   vsc=`get_amp 'v(sco)'\`
23   a=`$div $vsc $vin`
24
25   echo "VSS=$VSS: $a"
26   VSS=`$add $VSS 0.25`
27 done

```

Skript 2: Simulační skript pro simulaci vlivu U_{ss} na A_u

```

1  * AEO P14-04 (Rin)
2
3  XIR ir1  ir2  vdd                IREF
4  XD1 inp  inn  dlop dlon vcc ir1  D1
5  XD2 dlop dlon d2o vcc ir2      D2
6  XSE d2o  seo  vcc  vdd          SE
7  XSC seo  sco  vcc  vdd          SC
8  VCC vcc  0                    15
9  VDD 0    vdd                    15
10 VIN inp  inn                    0 AC SIN(0 0.001 1000)
11 VSS inn  0                        0
12
13 .INCLUDE subckts.ckt
14 .AC DEC 5 1e3 1e3
15 .PRINT AC V(inp,inn) I(VIN)
16 .END

```

Kód 4: Model pro simulaci R_{ad}

```

1  #!/bin/sh
2  # sim-uss
3  simdir=./out
4  mkdir -p $simdir
5  spice3 < rin.ckt > $simdir/rin.out
6
7  gcc -s -o $simdir/divide divide.c
8  div=$simdir/divide
9
10 get_amp() { sed -n "%$1/{n;n;p;q}" $simdir/rin.out | \
11   awk '{print $4}' | sed 's/,// ' ; }
12
13 vin='get_amp 'v(inp)-v(inn)''
14 iin='get_amp 'vin#branch''
15 rin='$div -$vin $iin'
16 echo "$rin"

```

Skript 3: Simulační skript pro simulaci R_{ad}

```

1  * AEO P14-04 (Rout)
2
3  XIR ir1  ir2  vdd                IREF
4  XD1 inp  inn  dlop dlon vcc ir1  D1
5  XD2 dlop dlon d2o vcc ir2      D2
6  XSE d2o  seo  vcc  vdd          SE
7  XSC seo  sco  vcc  vdd          SC
8  VCC vcc  0                    15
9  VDD 0    vdd                    15
10 VIN inp  inn                    0
11 VSS inn  0                        0
12 VO co  0                          0 AC SIN(0 0.001 1000)
13 CO sco  co                          1000
14
15 .INCLUDE subckts.ckt
16 .AC DEC 5 1e3 1e3
17 .PRINT AC V(sco) I(VO)
18 .END

```

Kód 5: Model pro simulaci R_k

```
1  #!/bin/sh
2  # sim-rout
3  simdir=./out
4  mkdir -p $simdir
5
6  gcc -s -o $simdir/divide divide.c
7  div=$simdir/divide
8
9  get_amp() { sed -n "$1/{ n; n; p; q }" $simdir/rout.out | \
10     awk '{ print $4 }' | sed 's,//' ; }
11
12 spice3 < rout.ckt > $simdir/rout.out
13 io='get_amp 'vo#branch''
14 ro='$div -l $io'
15 echo "$ro"
```

Skript 4: Simulační skript pro simulaci R_k