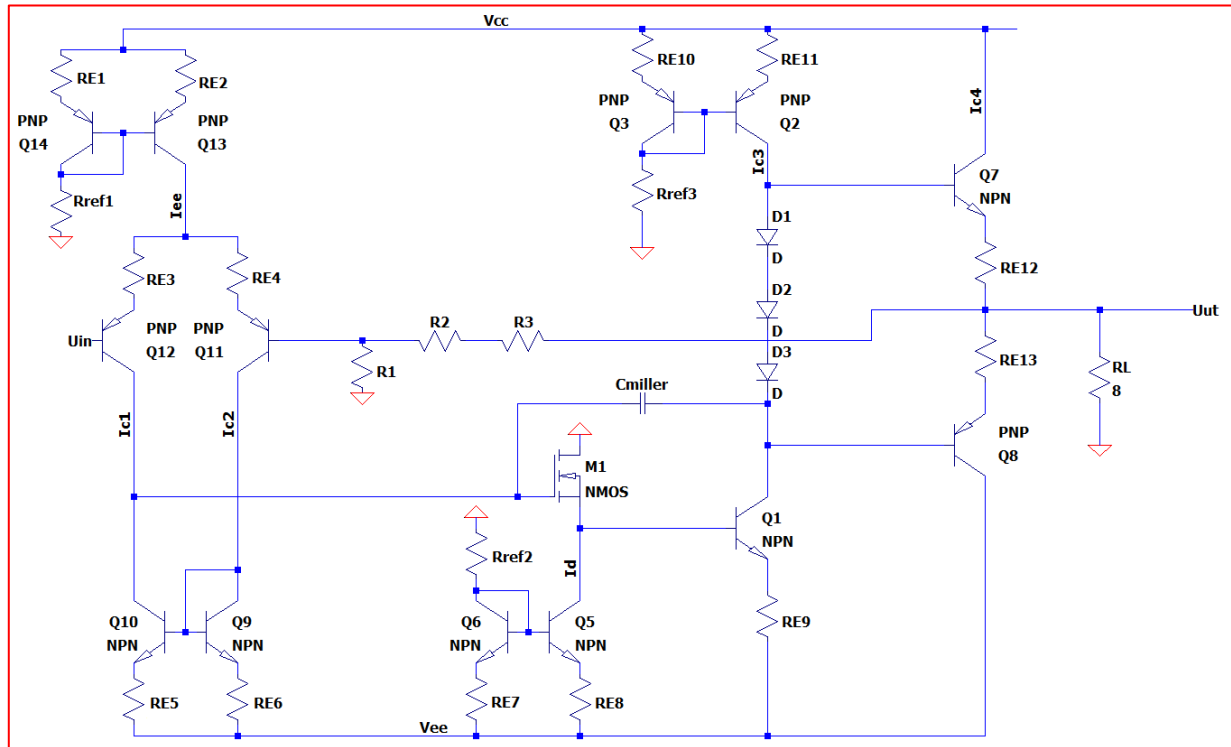


3.6 – Konstruktion av en enkel OP-förstärkare

1. Den enkla OP-förstärkaren nedan är kopplad som en icke-inverterande OP-förstärkarkoppling och skall dimensioneras för att kunna driva en last R_L på $8\ \Omega$. Matningsspänningen V_{CC}/V_{EE} skall sättas till $\pm 20\text{ V}$. Closed-loop-förstärkningsfaktorn G_{CL} , alltså förstärkningsfaktorn med negativ återkoppling, skall sättas till en faktor 20 via resistorer $R_1 - R_3$.



Skelettkrets till en enkel OP-förstärkare, kopplad i form av en icke-inverterande OP-förstärkarkoppling.

- Closed-loop-förstärkningsfaktorn G_{CL} kan approximeras med följande formel:

$$G_{CL} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1},$$

där $R_1 - R_3$ är resistorerna i spänningsdelaren.

- Dimensionera resistorer $R_1 - R_3$ i spänningsdelaren för en closed-loop-förstärkning G_{CL} på 20.
- Dimensionera referensresistor R_{REF1} samt emitterresistorer $R_{E1} - R_{E6}$ för kollektorströmmar $I_{C1} - I_{C2}$ runt 1 mA på respektive sida av differentialförstärkaren i vilopunkten.
- Dimensionera sourceföljarens referensresistor R_{REF2} samt emitterresistorer $R_{E7} - R_{E8}$ för en drainström I_{DQ} på ca $0,2\text{ mA}$ i vilopunkten.
- Dimensionera referensresistor R_{REF3} samt emitterresistorer $R_{E9} - R_{E11}$ för en kollektorström I_{C3} på ca 16 mA genom spänningsförstärkaren i vilopunkten.
- Dimensionera emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$ för en kollektorström I_{C4} på ca 100 mA genom slutsteget i vilopunkten.
- Dimensionera Millerkondensator C_{miller} till ett lämpligt värde för att hålla OP-förstärkaren stabil vid höga frekvenser. Endast tumregel behövs!
- Konstruera kretsen i LTspice och testa dess funktion. Se till att OP-förstärkaren utan problem kan driva en högtalare på $8\ \Omega$ för en insignal U_{IN} med en amplitud $|U_{IN}|$ på $0,5\text{ V}$ och en frekvens f på 1 kHz vid matningsspänning V_{CC}/V_{EE} på $\pm 20\text{ V}$.

Lösningsförslag:**a) Dimensionera resistorer $R_1 - R_3$ i spänningsdelaren för en closed-loop-förstärkning G_{CL} på 20.**

- Tumregel – Sätt resistor R_1 till 1 k Ω :

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

- Dimensionera sedan R_2 och R_3 för att erhålla en förstärkningsfaktor G på 20. Closed-loop-förstärkningen på en icke-inverterande OP-förstärkarkoppling, såsom denna, kan beräknas med formeln

$$G_{CL} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1},$$

vilket kan transformeras till

$$G_{CL} * R_1 = R_1 + R_2 + R_3,$$

vilket i sin tur kan transformeras till

$$G_{CL} * R_1 - R_1 = R_2 + R_3$$

- Genom att faktorisera R_1 i vänsterledet, så ser vi att

$$R_1(G_{CL} - 1) = R_2 + R_3,$$

vilket är ekvivalent med

$$R_2 + R_3 = R_1(G_{CL} - 1)$$

- Genom att sätta in värden i formeln ovan, så ser vi att för en closed-loop-förstärkning G_{CL} på 20 så skall summan av resistor R_2 och R_3 sättas till 19 k Ω , då

$$R_2 + R_3 = 1k * (20 - 1) = 1k * 19 = 19 \text{ k}\Omega$$

- Därmed kan resistor R_2 sättas till 18 k Ω , samtidigt som resistor R_3 kan sättas till 1 k Ω :

$$R_2 = 18 \text{ k}\Omega$$

samt

$$R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

- Därmed hamnar closed-loop-förstärkningen G_{CL} på 20, då

$$G_{CL} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} = \frac{1k + 18k + 1k}{1k} = \frac{20k}{1k} = 20$$

b) Dimensionera referensresistor R_{REF1} samt emitterresistorer $R_{E1} - R_{E6}$ för kollektorströmmar $I_{C1} - I_{C2}$ runt 1 mA på respektive sida av differentialförstärkaren i vilopunkten.

- Emitterresistorer $R_{E3} - R_{E6}$ i differentialförstärkaren bör dimensioneras så att ett spänningsfall på ca 220 mV faller över dem i vilopunkten. Eftersom kollektorströmmar I_{C1} / I_{C2} skall sättas till ca 1 mA var:

$$I_{C1} = I_{C2} \approx 1 \text{ mA}$$

så bör därmed dessa emitterresistorer sättas till ca 220 Ω , då

$$R_{E3} = R_{E4} = R_{E5} = R_{E6} = \frac{220m}{I_{C1}} = \frac{220m}{1m} = 220 \Omega$$

Elektroteknik

- Genom emitterresistorer $R_{E1} - R_{E2}$ så skall strömmarna I_{REF1} / I_{EE} flöda, där I_{REF1} är referensströmmen som flödar genom strömspegelns referenskrets och I_{EE} , som flödar från strömspegeln till differentialförstärkaren, är dess kopia. Därmed är dessa strömmar lika stora:

$$I_{REF1} = I_{EE}$$

- Strömmen I_{EE} är ungefär lika med summan av kollektorströmmar I_{C1} samt I_{C2} genom differentialförstärkaren:

$$I_{EE} \approx I_{C1} + I_{C2}$$

- Eftersom kollektorströmmar I_{C1} samt I_{C2} genom differentialförstärkaren skall sättas till 1 mA var:

$$I_{C1} = I_{C2} = 1 \text{ mA}$$

så hamnar strömmen I_{EE} runt 2 mA, då

$$I_{EE} \approx I_{C1} + I_{C2} = 1 \text{ m} + 1 \text{ m} = 2 \text{ mA}$$

- Eftersom strömmen I_{EE} utgör en kopia av referensströmmen I_{REF1} så skall även denna sättas till 2 mA:

$$I_{REF1} = I_{EE} \approx 2 \text{ mA}$$

- Som en tumregel så kan spänningsfallet över emitterresistorer $R_{E1} - R_{E2}$ sättas tio gånger högre än för övriga emitterresistorer, alltså till ca 2,2 V, då detta medför ökad utresistans $r_{o,CM}$ på strömspegeln och därmed minskad Common Mode-förstärkning G_{CM} , samtidigt som maxvärdet på OP-förstärkarens utsignal U_{UT} inte begränsas i just detta fall.

Därmed kan emitterresistorer R_{E1} och R_{E2} sättas till ca 1 k Ω var, då

$$R_{E1} = R_{E2} = \frac{2,2}{I_{EE}} \approx \frac{2,2}{2 \text{ m}} \approx 1 \text{ k}\Omega$$

- Referensresistor R_{REF1} kan beräknas via Ohms lag:

$$R_{REF1} = \frac{U_{REF1}}{I_{REF1}},$$

där U_{REF1} är spänningsfallet över R_{REF1} , som kan beräknas via Kirchhoffs spänningslag, från matningsspänningen V_{CC} ned till jord via referenskretsen. Under denna väg så faller ca 2,2 V över emitterresistor R_{E1} samt 0,65 V mellan transistor Q14:s emitter och bas. Resten av matningsspänningen V_{CC} faller över referensresistor R_{REF1} .

- Därmed gäller att

$$V_{CC} - 2,2 - 0,65 - U_{REF1} = 0,$$

vilket kan transformeras till

$$U_{REF1} = V_{CC} - 2,2 - 0,65$$

- För en matningsspänning V_{CC} på 20 V, så kommer därmed ca 17,15 V falla över referensresistor R_{REF1} , då

$$U_{REF1} = V_{CC} - 2,2 - 0,65 = 20 - 2,2 - 0,65 = 17,15 \text{ V}$$

- Därmed bör referensresistor R_{REF1} sättas till ca 8,6 k Ω , då

$$R_{REF1} = \frac{U_{REF1}}{I_{REF1}} \approx \frac{17,15}{2 \text{ m}} = 8,575 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 8,2 k Ω , som därmed används:

$$R_{REF1} = 8,2 \text{ k}\Omega$$

c) Dimensionera sourceföljarens referensresistor R_{REF2} samt emitterresistorer $R_{E7} - R_{E8}$ för en drainström I_{DQ} på ca 0,2 mA i vilopunkten.

- Emitterresistorer $R_{E7} - R_{E8}$ i sourceföljarens strömspegel bör dimensioneras så att ett spänningsfall på ca 220 mV faller över dem i vilopunkten. Eftersom drainströmmen I_D och därmed även referensströmmen I_{REF2} skall sättas till ca 0,2 mA:

$$I_D = I_{REF2} \approx 0,2 \text{ mA}$$

så bör därmed dessa emitterresistorer sättas till ca 1,1 k Ω , då

$$R_{E7} = R_{E8} = \frac{220 \text{ mV}}{I_D} = \frac{220 \text{ mV}}{0,2 \text{ mA}} = 1,1 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 1 k Ω samt 1,2 k Ω . I detta fall används hellre det högre värdet, då detta medför högre emitterfaktor samt inte märkbart högre spänningsfall över emitterresistorerna:

$$R_{E7} = R_{E8} = 1,2 \text{ k}\Omega$$

- Därmed faller ca 240 mV över emitterresistorer $R_{E7} - R_{E8}$, då

$$U_{RE7} = U_{RE8} = R_{E8} \cdot I_D = 1,2 \text{ k} \cdot 0,2 \text{ mA} = 240 \text{ mV}$$

- Referensresistor R_{REF2} kan beräknas via Ohms lag:

$$R_{REF2} = \frac{U_{REF2}}{I_{REF2}},$$

där U_{REF2} är spänningsfallet över R_{REF2} , som kan beräknas via Kirchhoffs spänningslag, från matningsspänningen V_{EE} upp till jord via referenskretsen. Under denna väg så faller ca 240 mV (0,24 V) över emitterresistor R_{E7} samt 0,65 V mellan transistor Q6:s bas och emitter. Resterande spänning faller över referensresistor R_{REF2} .

- Eftersom vi i detta fall går mot strömmens riktning, så beräknas spänningsfallet som positiva, då ström flödar från plus- till minuspol och vi nu beräknar åt motsatt håll. Därmed gäller att

$$V_{EE} + 0,24 + 0,65 + U_{REF2} = 0,$$

vilket kan transformeras till

$$U_{REF2} = -V_{EE} - 0,24 - 0,65$$

- För en matningsspänning V_{EE} på -20 V, så kommer därmed ca 19,11 V falla över referensresistor R_{REF2} , då

$$U_{REF2} = -V_{EE} - 0,24 - 0,65 = -(-20) - 0,24 - 0,65 = 19,11 \text{ V}$$

- Därmed bör referensresistor R_{REF2} sättas till ca 96 k Ω , då

$$R_{REF2} = \frac{U_{REF2}}{I_{REF2}} \approx \frac{19,11}{0,2 \text{ mA}} = 95,55 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 100 k Ω , som vi därmed använder:

$$R_{REF2} = 100 \text{ k}\Omega$$

d) Dimensionera referensresistor R_{REF3} samt emitterresistorer $R_{E9} - R_{E11}$ för en kollektorström I_{C3} på ca 16 mA genom spänningsförstärkaren i vilopunkten.

- Emitterresistorer $R_{E9} - R_{E11}$ i spänningsförstärkaren bör dimensioneras så att ett spänningsfall på ca 220 mV faller över dem i vilopunkten. Eftersom kollektorströmmen I_{C3} och därmed även referensströmmen I_{REF3} skall sättas till ca 16 mA:

$$I_{C3} = I_{REF3} = 16 \text{ mA}$$

så bör därmed dessa emitterresistorer sättas till ca 14 Ω , då

$$R_{E9} = R_{E10} = R_{E11} = \frac{220 \text{ mV}}{I_{C3}} = \frac{220 \text{ mV}}{16 \text{ mA}} = 13,75 \Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 15 Ω , som därmed används:

$$R_{E9} = R_{E10} = R_{E11} = 15 \Omega$$

- Därmed faller ca 240 mV över emitterresistorer $R_{E9} - R_{E11}$, då

$$U_{RE9} = U_{RE10} = U_{RE11} = R_{E9} * I_{C3} = 15 * 16 \text{ mA} = 240 \text{ mV}$$

- Referensresistor R_{REF3} kan beräknas via Ohms lag:

$$R_{REF3} = \frac{U_{REF3}}{I_{REF3}},$$

där U_{REF3} är spänningsfallet över R_{REF3} , som kan beräknas via Kirchhoffs spänningslag, från matningsspänningen V_{CC} ned till jord via referenskretsen. Under denna väg så faller ca 240 mV (0,24 V) över emitterresistor R_{E10} samt 0,65 V mellan transistor Q3:s bas och emitter. Resten av matningsspänningen V_{CC} faller över referensresistor R_{REF3} .

- Därmed gäller att

$$V_{CC} - 0,24 - 0,65 - U_{REF3} = 0,$$

vilket kan transformeras till

$$U_{REF3} = V_{CC} - 0,24 - 0,65$$

- För en matningsspänning V_{CC} på 20 V, så kommer därmed ca 19,11 V falla över referensresistor R_{REF3} , då

$$U_{REF3} = V_{CC} - 0,24 - 0,65 = 20 - 0,24 - 0,65 = 19,11 \text{ V}$$

- Därmed bör referensresistor R_{REF3} sättas till ca 1,2 k Ω , då

$$R_{REF3} = \frac{U_{REF3}}{I_{REF3}} \approx \frac{19,11}{16 \text{ mA}} = 1,2 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är just 1,2 k Ω , som vi därmed använder:

$$R_{REF3} = 1,2 \text{ k}\Omega$$

e) Dimensionera emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$ för en kollektorström I_{C4} på ca 100 mA genom slutsteget i vilopunkten.

- Via de tre dioderna i klass-AB slutsteget, så hamnar spänningsskillnaden mellan transistor Q7 och Q8 i slutsteget på ca 2 V, då spänningsfallet över respektive diod kan antas vara ca 0,65 V vid drift, vilket medför en spänningsskillnad på $3 * 0,65 \text{ V} = 1,95 \text{ V}$. Därmed ser vi till att en av transistorer Q7 och Q8 alltid leder vid drift, samtidigt som förlusteffekterna reduceras jämfört med ett klass-A slutsteg.
- Vid drift så kommer 0,65 V falla mellan transistor Q7:s samt Q8:s respektive bas och emitter, som erhålls från spänningsskillnaden mellan dessa transistorer. Därmed återstår $1,95 - 2 * 0,65 = 0,65 \text{ V}$, som faller över slutsteget. Anledningen till att just två dioder användes istället för tre var just för att erhålla ett litet spänningsfall för att kunna reglera kollektorströmmen I_{C4} genom slutsteget via två små emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$.
- Därmed gäller att spänningsfallet U_{OPS} över slutsteget är lika med 0,65 V, där OPS står för *Output Stage*:

$$U_{OPS} = 0,65 \text{ V}$$

- För att hålla slutsteget symmetriskt så skall emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$ sättas till samma värde:

$$R_{E12} = R_{E13}$$

- Spänningsfallet över emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$ hamnar alltså på ca 0,65 V vid drift. För att hålla kollektorströmmen I_{C4} till ca 100 mA i vilopunkten, så bör summan av emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$ sättas till ca 6,5 Ω , vilket kan beräknas via Ohms lag:

$$R_{E12} + R_{E13} = \frac{U_{OPS}}{I_{C4}} = \frac{0,65}{100\text{mA}} = 6,5 \Omega$$

- Eftersom emitterresistorer $R_{E12} - R_{E13}$ skall sättas till samma värde, så bör respektive resistor sättas till hälften av 6,5 Ω , alltså ca 3,25 Ω , då

$$R_{E12} = R_{E13} = \frac{6,5}{2} = 3,25 \Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 3,3 Ω , som vi därmed använder:

$$R_{E12} = R_{E13} = 3,3 \Omega$$

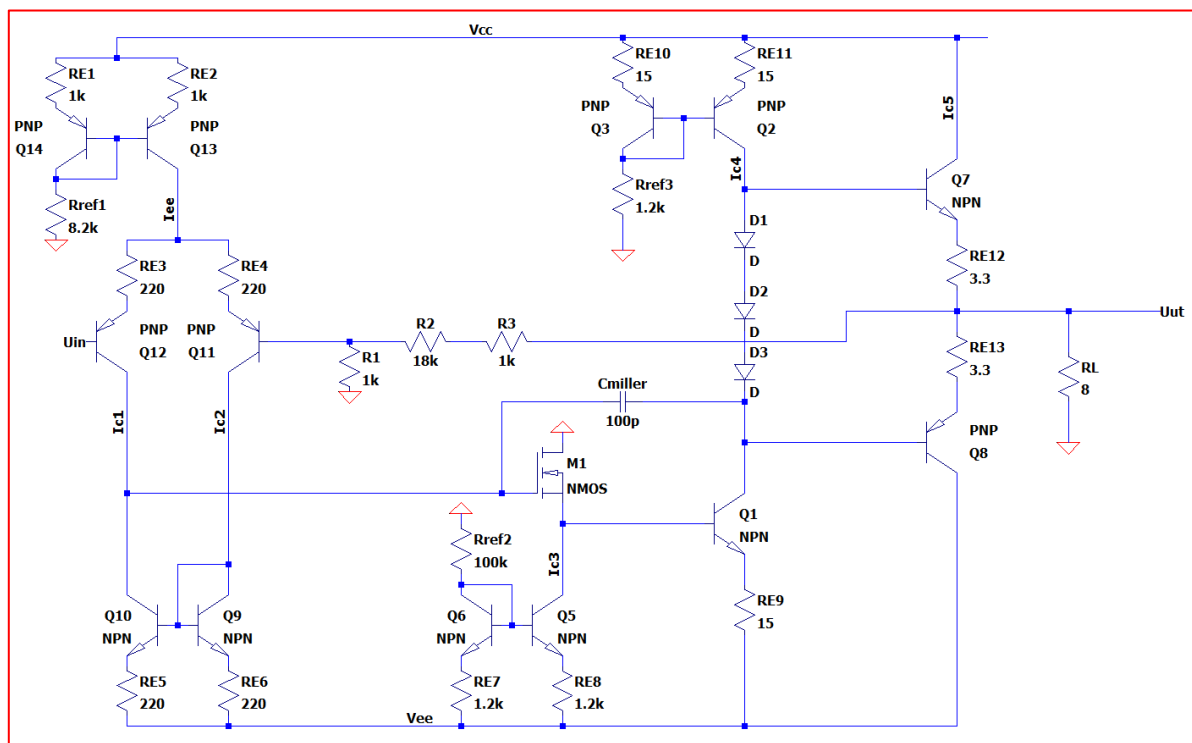
f) Dimensionera Millerkondensator C_{miller} till ett lämpligt värde för att hålla OP-förstärkaren stabil vid höga frekvenser. Endast tumregel behövs!

- Som en tumregel så kan Millerkondensator C_{miller} sättas till ca 100 pF. Detta värde brukar vara lagom för att gradvis sänka OP-förstärkarens open-loop-förstärkning G_{OL} vid ökad frekvens, vilket medför att förstärkningen har minskat till under ett vid den kritiska frekvens då OP-förstärkaren kan bli instabil och börja oscillera när återkoppling används.

g) Konstruera kretsen i LTspice och testa dess funktion. Se till att OP-förstärkaren utan problem kan driva en högtalare på 8 Ω för en insignal U_{IN} med en amplitud $|U_{IN}|$ på 0,5 V och en frekvens f på 1 kHz vid matningsspänning V_{CC}/V_{EE} på $\pm 20 \text{ V}$.

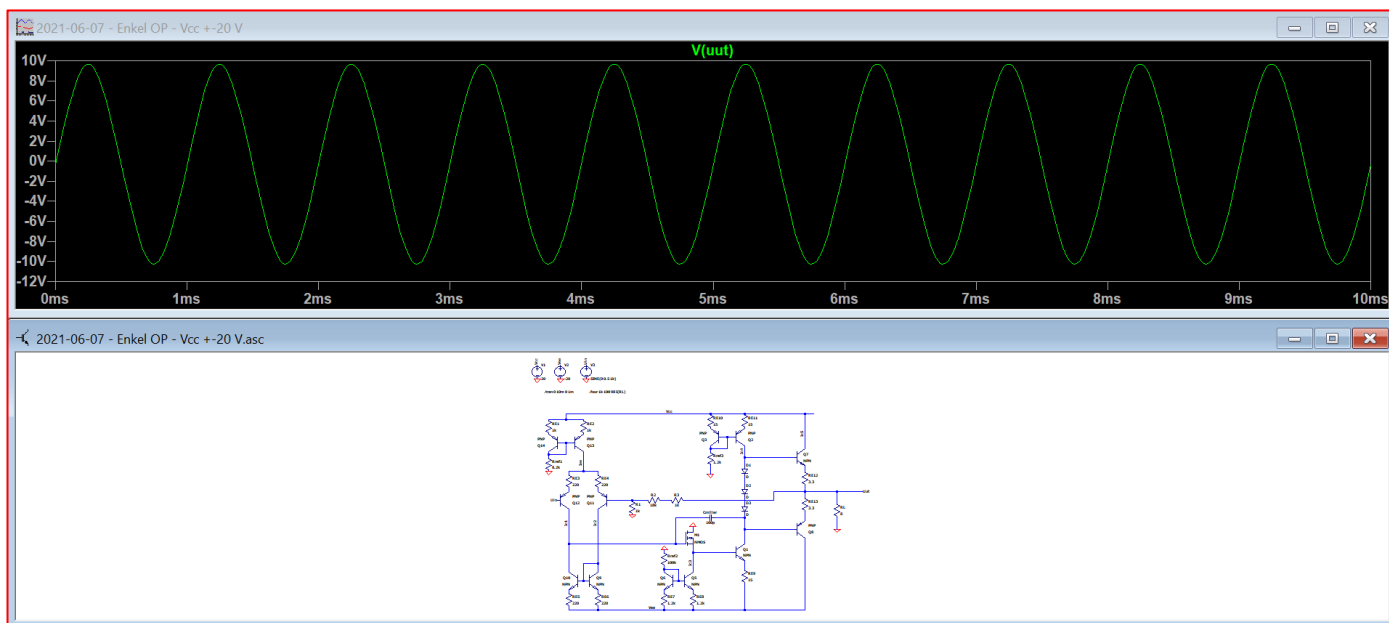
- Se resultat på nästa sida!

Resultat:



Färdigdimensionerad OP-förstärkare.

Simulering:



Matningsspänning: $V_{CC}/V_{EE} = \pm 20 \text{ V}$

Insignal: $|U_{IN}| = 0,5 \text{ V}, f = 1 \text{ kHz}$

Distorsion: Ca 1,38 %.