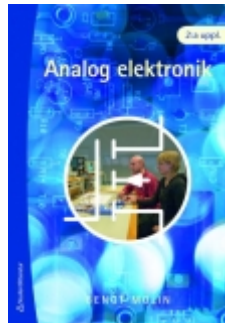


*Lösningsförslag till
övningsuppgifter*

Analog elektronik

2:a upplagan



Bengt Molin

Studentlitteratur
ISBN 978-91-44-05367-7

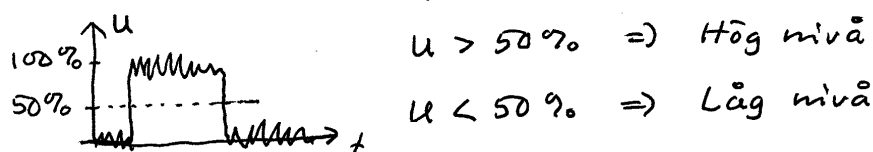
© *Bengt Molin*

Det är tillåtet att fritt kopiera lösningarna när
de används tillsammans med läroboken.

Version 2009-08-24

- 1.1 Digitala spänningar, som använder två spänningsnivåer, kan återskapas även om de är överlagrade med brus.

Det går att avgöra om det är hög eller låg spänningsnivå om inte brusnivån är alltför hög.



1.2 $A_v = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{2}{0,01} = 200 \text{ gånger}$

$A_{v\text{dB}} = 20 \log \frac{U_{ut}}{U_{in}} = 20 \cdot \log 200 = 46 \text{ dB}$

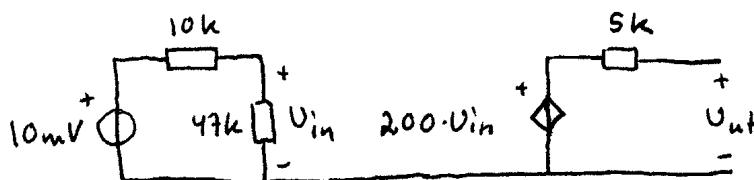
1.3 Använd $20 \cdot \log \frac{U_{ut}}{U_{in}}$ för spänningsförstärkning.

1.4 Använd $10 \cdot \log \frac{P_{ut}}{P_{in}}$ för effektförstärkning

1.5 Ökar 5 gånger $\Rightarrow 20 \log 5 = 14 \text{ dB}$

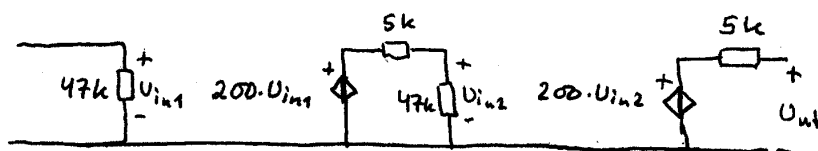
Alternativt: Tiodubbling (20 dB) och halvering (-6 dB) = $20 - 6 = 14 \text{ dB}$

1.6



$$U_{ut} = 0,01 \cdot \frac{47k}{10k + 47k} \cdot 200 = 1,65 \text{ V}$$

1.7



$$R_{in} = 47k\Omega \quad R_{ut} = 5k\Omega$$

$$A_v = 200 \cdot 200 \cdot \frac{47k}{5k + 47k} = 36200$$

$$1.8 \quad B = f_o - f_u = 50kHz - 30kHz = 20kHz$$

$$1.9 \quad a \quad CMRR = \frac{A_{vDM}}{A_{vCM}}$$

Räknat i dB blir det

$$(A_{vDM})_{dB} - (A_{vCM})_{dB} = 40 - (-20) = 60dB$$

$$b \quad U_{DM} = U_1 - U_2 = 0 + 0,02 \sin(\omega t) \text{ V}$$

$$c \quad U_{CM} = \frac{1}{2}(U_1 + U_2) = 3 + 0,03 \sin(\omega t) \text{ V}$$

d Differential mode:

$$A_{vDM} = 100 \text{ gånger (20dB)}$$

$$U_{utDM} = 100 \cdot 0,02 \sin(\omega t) = 2 \sin(\omega t) \text{ V}$$

Common mode:

$$A_{vCM} = 0,1 \text{ gånger (-20dB)}$$

$$U_{utCM} = 0,1 \cdot (3 + 0,03 \sin(\omega t)) = \\ = 0,3 + 0,003 \sin(\omega t) \text{ V}$$

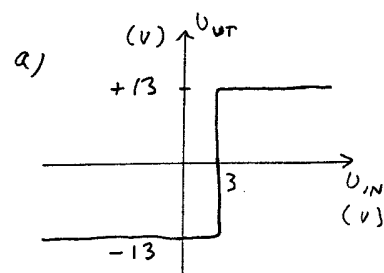
Total utspänning

$$U_{ut} = U_{utDM} + U_{utCM} = 0,3 + 2,003 \sin(\omega t) \text{ V}$$

2.1

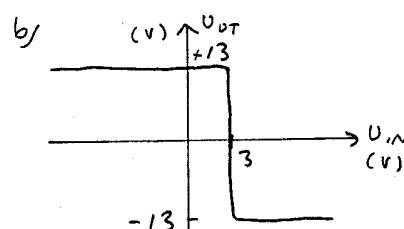
$$a) U_{IN} > 3V \Rightarrow \text{OP bottnar i } +13V$$

$$U_{IN} < 3V \Rightarrow \text{OP bottnar i } -13V$$



$$b) U_{IN} > 3V \Rightarrow \text{OP bottnar i } -13V$$

$$U_{IN} < 3V \Rightarrow \text{OP bottnar i } +13V$$



2.2

$$A_v = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{10k + 120k}{10k} = 13$$

2.3

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{120k}{10k} = -12$$

2.4 Kopplingen är en differentialsförstärkare

$$\frac{U_{ut}}{U_1 - U_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{100k}{10k} = 10 \quad (\text{Se figur 2.12})$$

2.5

Grundkopplingar: Spänningsföljare, inverterare, summerator

$$U_{ut} = -\frac{R_7}{R_5} \cdot U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_7}{R_6} \left(-U_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \right) = -U_1 \frac{R_7}{R_5} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_2 \frac{R_7 \cdot R_4}{R_6 \cdot R_3}$$

2.6

Ansätt pot. V på utgången av första OP:

$$a) \frac{U_1 - 0}{R_1} = \frac{V - U_1}{R_2} \Rightarrow V = U_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cdot R_2 \quad V = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_1 \quad (\text{Icke inv. grundkoppling})$$

$$\frac{V - U_2}{R_3} = \frac{U_2 - U_{ut}}{R_4} \Rightarrow U_{ut} = U_2 \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3} \right) R_4 - V \frac{R_4}{R_3} =$$

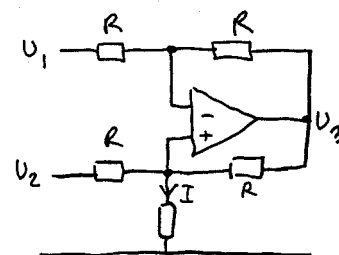
$$= U_2 \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - U_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_4}{R_3}$$

b) Differentialsförstärkare (Instrumentförstärkare)

$$\text{Om } R_1 = R_4, R_2 = R_3 \text{ blir } U_{ut} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (U_2 - U_1)$$

2.7

$$\begin{cases} \frac{U_1 - U_-}{R} = \frac{U_- - U_3}{R} & (1) \\ \frac{U_2 - U_+}{R} + \frac{U_3 - U_+}{R} = \frac{U_+}{R_L} & (2) \\ U_+ = U_- & (3) \end{cases}$$



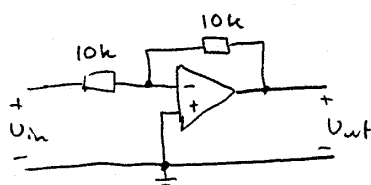
$$(1) \Rightarrow U_3 = 2U_- - U_1$$

$$\text{Sätt in (1), (3) i (2): } U_2 - U_+ + 2U_+ - U_1 - U_+ = \frac{R}{R_L} U_+$$

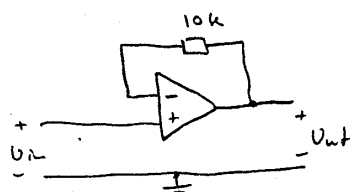
$$\Rightarrow U_2 - U_1 = R \cdot \underbrace{\frac{U_+}{R_L}}_{=I} \Rightarrow \underline{\underline{I = \frac{U_2 - U_1}{R}}}$$

2.8

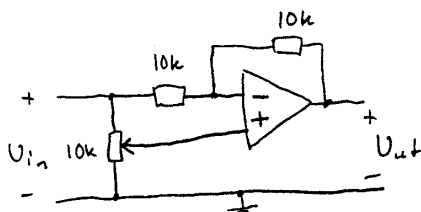
Inverterande koppling (-1)



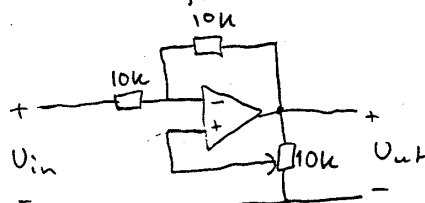
Icke-inverterande koppling (+1, spänningsföljare)



Kombination av dena + grubblande ger



Alternativ lösning:



Undre läget på 10k-pot ger inverterande koppling enligt ovan

Övre läget ger

$$U_+ = U_{in}$$

Eftersom $U_- = U_+$ blir $U_{out} = U_{in}$ ty ingen ström genom 10k-motståndet

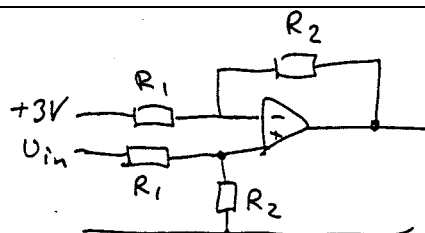
2.9

$$U_{in} = 3-4V$$

$$U_{out} = 0-5V$$

$$U_{out} = 5(U_{in} - 3)$$

Differential förstärkare



$$\frac{R_2}{R_1} = 5$$

$$\text{Tex } R_2 = 50k\Omega$$

$$R_1 = 10k\Omega$$

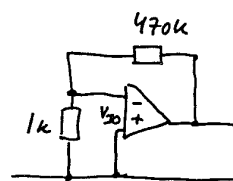
3.1 Se svaren i boken.

3.2 a) Låt $V_{I0} = 0$

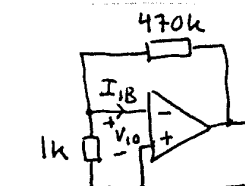
$$\text{Offset ut} = \frac{V_{I0}}{1k} \cdot (1k + 470k) = 471 V_{I0}$$

$$\text{Typ } V_{I0} = \pm 1 \text{ mV} \Rightarrow 471 \cdot 1 \text{ m} = \pm 0,47 \text{ V}$$

$$\text{Max } V_{I0} = \pm 5 \text{ mV} \Rightarrow 471 \cdot 5 \text{ m} = \pm 2,36 \text{ V}$$



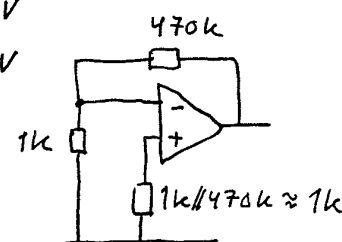
b) Om $V_{I0} = 0$ är spänningen över $1k = 0 \text{ V}$. Det medför att I_{IB} går igenom $470 k\Omega$



$$\text{Typ } I_{IB} = 80 \text{ nA} \quad U_{UT} = 470k \cdot 80 \text{ n} = 38 \text{ mV}$$

$$\text{Max } I_{IB} = 500 \text{ nA} \quad U_{UT} = 470k \cdot 500 \text{ n} = 0,24 \text{ V}$$

c) Se till så att det är samma värdhoms-
reistans till plus- och minusingången
 $\Rightarrow$ Lika stort spänningsfall pga I_{IB} för
båda ingångarna $\Rightarrow U_{UT} = 0$ (I_{IB} går
genom $1k$)

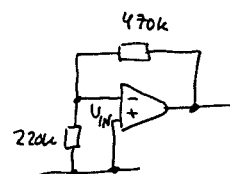


3.3 På samma sätt som i föregående uppgift erhålls:

$$a) \text{ Offset ut} = \frac{470k + 220k}{220k} \cdot V_{I0} = 3,14 V_{I0}$$

$$\text{Typ } V_{I0} = \pm 1 \text{ mV} \Rightarrow \text{Offset ut} \pm 3,14 \text{ mV}$$

$$\text{Max } V_{I0} = \pm 5 \text{ mV} \Rightarrow \text{Offset ut} \pm 15,7 \text{ mV}$$

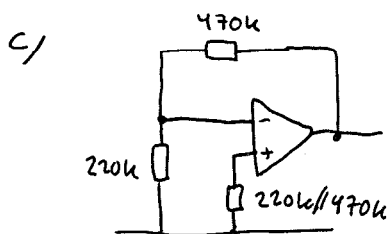


b) $V_{I0} = 0 \Rightarrow$ Spänningen över $220k$ är 0 V .

$$\Rightarrow U_{UT} = 470k \cdot I_{IB}$$

$$\text{Typ } I_{IB} = 80 \text{ nA} \Rightarrow U_{UT} = 470k \cdot 80 \text{ nA} = 38 \text{ mV}$$

$$\text{Max } I_{IB} = 500 \text{ nA} \Rightarrow U_{UT} = 470k \cdot 500 \text{ n} = 0,24 \text{ V}$$



Kompensering av förstärkarnas
inverkan bör göras eftersom
den inverkan är större än
inverkan av V_{I0} .

Höga resistanser ger större
offset pga förstärkarna.

$$3.4 \quad \pm 15 \cdot \frac{100}{100 + 150k} \approx \pm 10 \text{ mV}$$

- 3.5 Slew rate bestäms av stighastigheten på utspänningen, 10 V på 4 μ s.

$$\text{Slew rate} = \frac{10 \text{ V}}{4 \mu\text{s}} = 2,5 \text{ V}/\mu\text{s}$$

- 3.6 a) $\hat{U}_{in} = 100 \text{ mV} \Rightarrow \hat{U}_{ut} = 100 \text{ m} \cdot 100 = 10 \text{ V}$

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi\hat{U}} = \frac{0,5}{2\pi \cdot 10} \cdot 10^6 = 7,96 \text{ kHz} \approx 8,0 \text{ kHz}$$

- b) FB-produkten är konstant $\Rightarrow$

$$S \cdot 200\,000 = f_g \cdot 100 \Rightarrow f_g = 10 \text{ kHz}$$

- c) Slew rate begränsar i detta fall högsta användbara frekvens.

- 3.7 Se svaren i boken

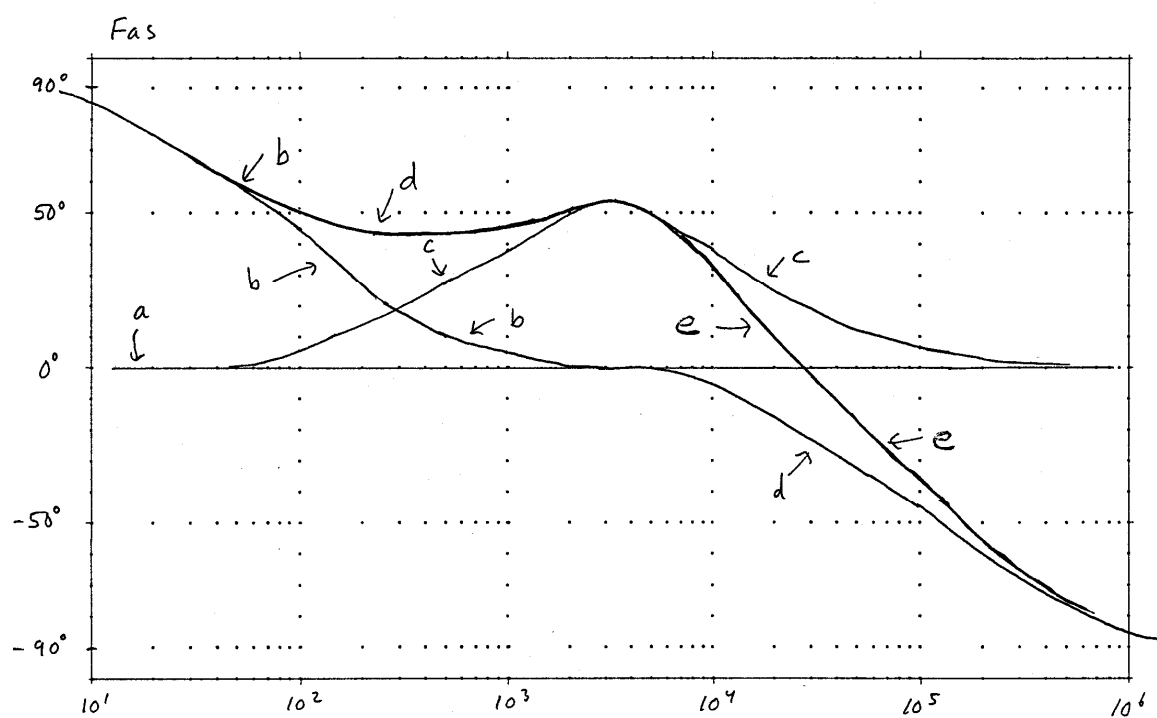
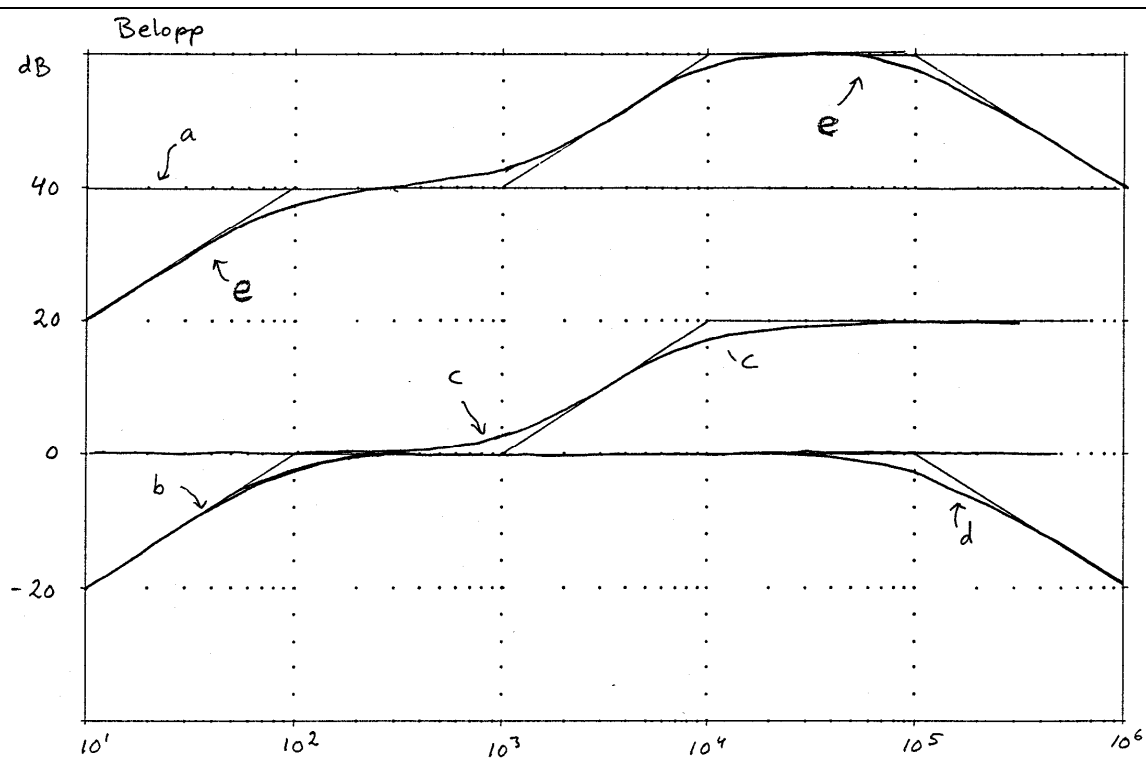
5.1

a) Belopp: Konstant nivå $20 \cdot \log 100 = 40 \text{ dB}$ Fas : 0° b) Belopp: +1 lutning vid låga frekvenser
0 lutning vid höga frekvenser
Brytpunkt vid 10^2 Hz Fas: $+90^\circ$ vid låga frekvenser
 0° vid höga frekvenser
 $+45^\circ$ vid 10^2 Hz c) Belopp 0 dB (=1) vid låga frekvenser
+1 brytpunkt vid 10^3 Hz
-1 brytpunkt vid 10^4 Hz
Konstant nivå +20 dB vid höga frekvenserFas 0° vid låga frekvenser
+1 brytpunkten vid 10^3 Hz ger positiv fasvridning
-1 brytpunkten vid 10^4 Hz tar ned fasen mot noll igen.
Fasvinkel vid 10^3 Hz : $+45^\circ - 6^\circ$ (en dekad från 10^4)
Fasvinkel vid 10^4 Hz : $+45^\circ - 6^\circ$ (en dekad från 10^3)d) Belopp Konstant nivå 0 dB vid låga frekvenser
-1 brytpunkt vid 10^5 Hz
-1 lutning vid höga frekvenserFas 0° vid låga frekvenser
 -90° vid höga frekvenser
 -45° vid 10^5 Hz

e) = summan av kurvorna a-d

Diagram se nästa sida...

5.1

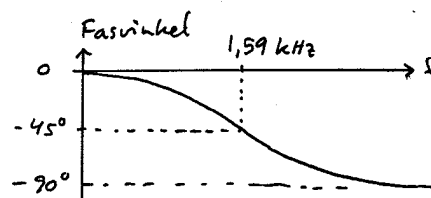
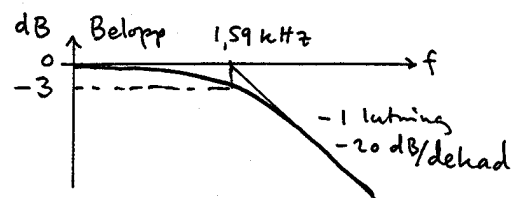


5.2

$$a) \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} =$$

$$= \frac{1}{1 + j\omega/\omega_1} = \frac{1}{1 + j f/f_1}$$

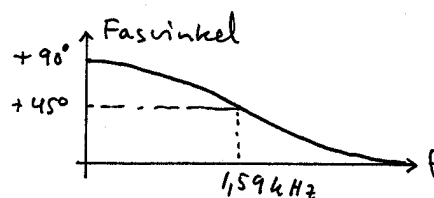
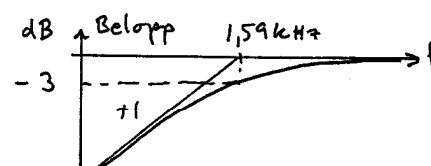
$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 10k \cdot 10n} = 1,59 \text{ kHz}$$



$$b) \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} =$$

$$= \frac{j\omega/\omega_1}{1 + j\omega/\omega_1} = \frac{j f/f_1}{1 + j f/f_1}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 10k \cdot 10n} = 1,59 \text{ kHz}$$



5.3

$$R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C}$$

$$\frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C} + R_3} = \frac{R_3}{R_1 + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C} + R_3} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Förkläng med } 1 + j\omega R_2 C \text{ så} \\ \text{att det inte finns några} \\ \text{bråk i täljare och nämnare} \end{array} \right\}$$

$$= \frac{R_3 (1 + j\omega R_2 C)}{R_1 + j\omega R_1 R_2 C + R_2 + R_3 + j\omega R_2 R_3 C} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Täljare ok!} \\ \text{Bryt ut realdelen i nämnaren} \\ \text{så att en etta erhålls som realdel} \end{array} \right\}$$

$$= \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} C} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega R_2 \parallel (R_1 + R_3) C} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Bodes} \\ \text{normalform} \end{array} \right\}$$

$$= \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{1 + j\omega/\omega_1}{1 + j\omega/\omega_2} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{1 + j f/f_1}{1 + j f/f_2}$$

$$\text{Konstant } \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10k}{10k + 80k + 10k} = \frac{1}{10} \hat{=} -20 \text{ dB vid låga } f \text{ (} f=0 \text{)}$$

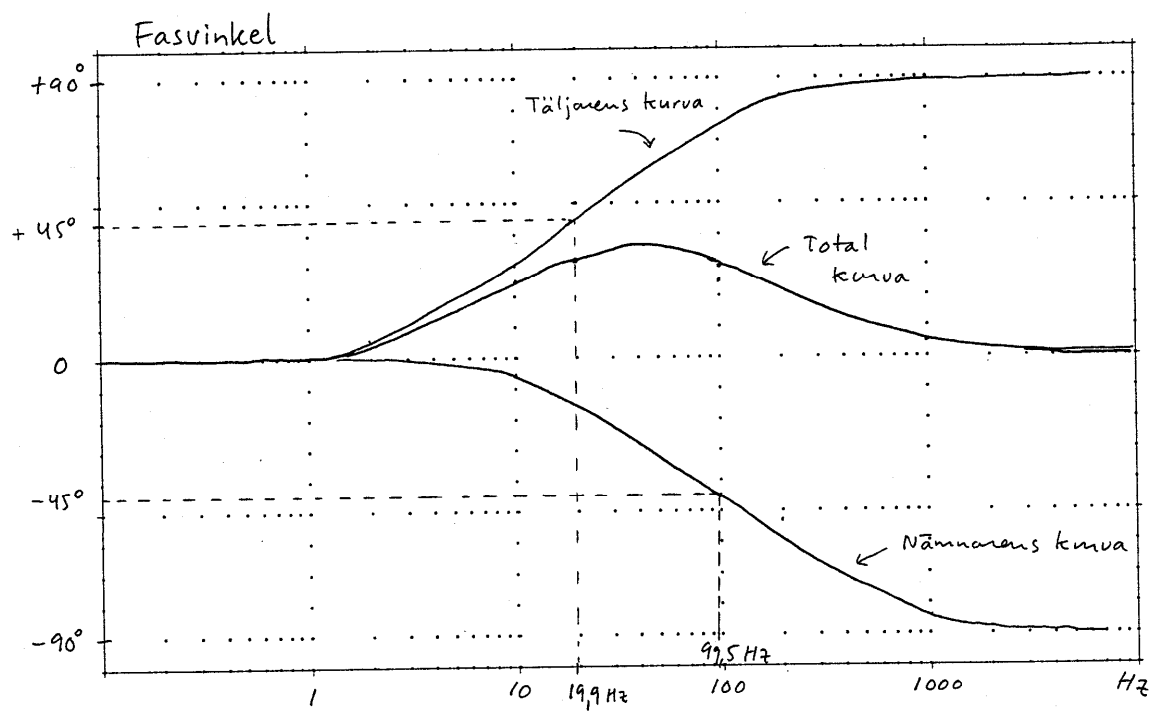
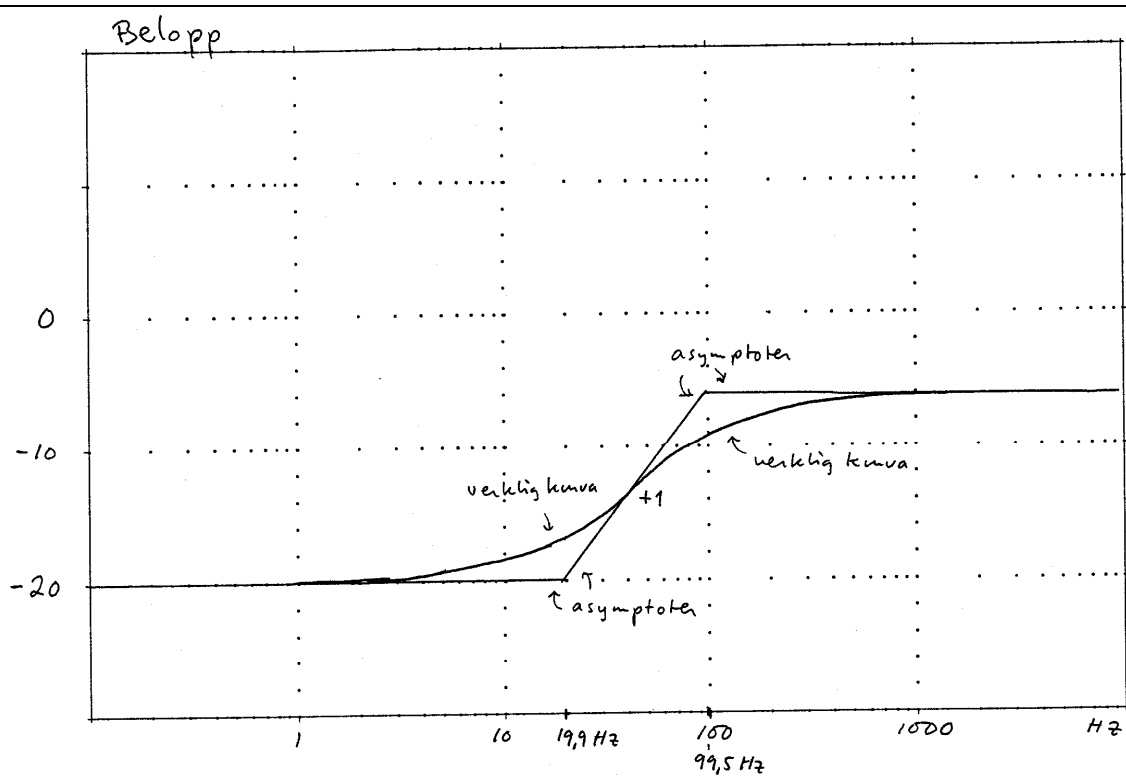
$$+1 \text{ brytpunkt vid } f_1 = \frac{1}{2\pi R_2 C} = \frac{1}{2\pi 80k \cdot 100n} = 19,9 \text{ Hz}$$

$$-1 \text{ brytpunkt vid } f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 \parallel (R_1 + R_3) \cdot C} = \frac{1}{2\pi 80k \parallel 20k \cdot 100n} = 99,5 \text{ Hz}$$

$$\text{Vid höga frekvenser blir nivån } \frac{R_3}{R_1 + R_3} = \frac{10k}{10k + 10k} = \frac{1}{2} \hat{=} -6 \text{ dB} \\ \text{(C "kontakter")}$$

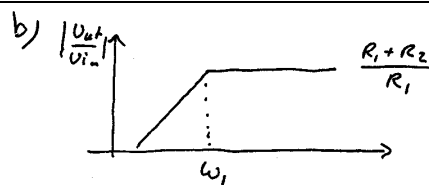
Diagram se nästa sida...

5.3



5.4

$$a) \begin{cases} U_+ = U_{in} \cdot \frac{R_3}{R_3 + \frac{1}{j\omega C}} = U_{in} \cdot \frac{j\omega R_3 C}{1 + j\omega R_3 C} \\ U_- = U_{out} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ U_+ = U_- \end{cases}$$

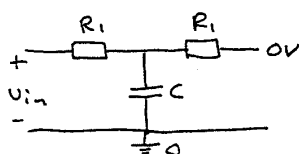


$\omega_1 = \frac{1}{R_3 C}$ Förstärkarens undre gränsvinkel/frekvens

$$\Rightarrow \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{j\omega R_3 C}{1 + j\omega R_3 C}$$

- c) Det måste finnas en likströmsväg på OP:ns ingångar så att förstärkarna I_{IB} (basströmmar till ingångshansistorena) kan gå in till OP-förstärkaren.
 R_3 bör väljas $R_1 \parallel R_2$ för att minimera inverkan av förstärkarna.

5.5



$(\Leftrightarrow)$
Tvåpols-
satsen

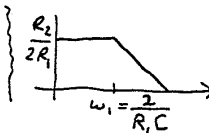
$$\frac{U_{in}}{2}$$

$$R_1 \parallel R_1 = \frac{1}{2} R_1$$

$$U_C = \frac{U_{in}}{2} \cdot \frac{j\omega C}{\frac{1}{j\omega C} + \frac{R_1}{2}} = \frac{U_{in}}{2} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \frac{R_1}{2} C}$$

Förstärkning $\frac{U_{out}}{U_C} = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{2R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \frac{R_1}{2} C}$$



5.6

$$\begin{cases} U_+ = U_{in} \cdot \frac{j\omega C}{\frac{1}{j\omega C} + R} = U_{in} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC} \\ \frac{U_{in} - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{out}}{R_1} \\ U_+ = U_- \end{cases}$$

$$\Rightarrow U_{out} = 2 \cdot U_{in} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC} - U_{in}$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{2}{1 + j\omega RC} - 1 = \frac{2 - 1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

$$\left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| = 1 \text{ (0 dB)}$$

$$\arg \frac{U_{out}}{U_{in}} = \arctan(-\omega RC) - \arctan(\omega RC) = -2 \arctan(\omega RC)$$

Variabel fasvridning!

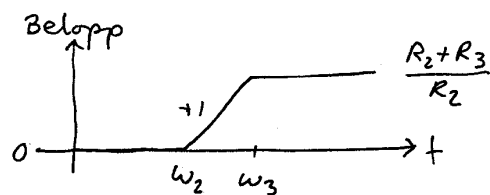
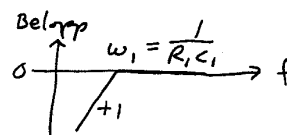
5.7

Högpassfilter på ingången: $\frac{j\omega R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}$

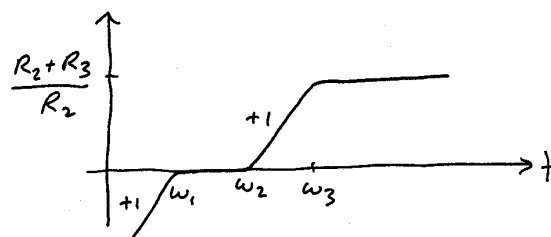
Förstärkarkoppling:

$$\frac{R_3 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{1 + j\omega(R_2 + R_3)C_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{(R_2 + R_3)C_2} \quad \omega_3 = \frac{1}{R_2 C_2}$$



Total beloppsskiva (asymptot)



5.8

$$R_2 \parallel (R_3 + \frac{1}{j\omega C}) = \frac{R_2(R_3 + \frac{1}{j\omega C})}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_2(1 + j\omega R_3 C)}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C}$$

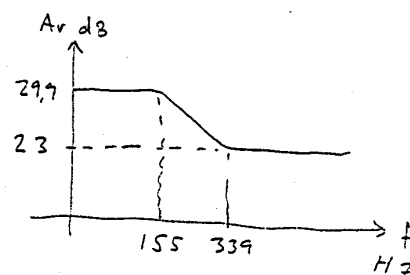
$$A_v = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = - \frac{R_2 \parallel (R_3 + \frac{1}{j\omega C})}{R_1} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega R_3 C}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega/\omega_2}{1 + j\omega/\omega_1}$$

$$A_v(f=0) = - \frac{R_2}{R_1} = -31,199r = 29,9 \text{ dB}$$

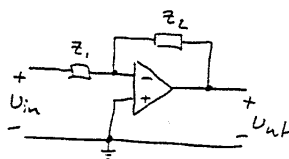
$$\omega_1 = \frac{1}{(R_2 + R_3)C} \quad f_1 = \frac{1}{2\pi(R_2 + R_3)C} = 155 \text{ Hz}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_3 C} \quad f_2 = \frac{1}{2\pi R_3 C} = 339 \text{ Hz}$$

$$A_v(f=\infty) = - \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1} = 14,299r = 23 \text{ dB}$$



5.9



$$\frac{U_{ut}}{U_{in}} = - \frac{Z_2}{Z_1}$$

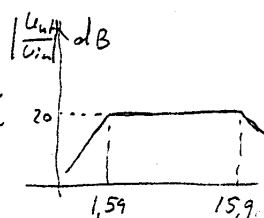
$$Z_2 = R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$\frac{U_{ut}}{U_{in}} = - \frac{R_2}{(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1})(1 + j\omega R_2 C_2)} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{j\omega R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 1,59 \text{ Hz} \quad f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = 15,9 \text{ kHz}$$

$$\text{Förstärkning däremellan} = - \frac{R_2}{R_1} = -1099r (20 \text{ dB})$$



5.10

$$a) R_3 // (R_2 + \frac{1}{j\omega C}) = \frac{R_3(R_2 + \frac{1}{j\omega C})}{R_3 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = R_3 \cdot \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C}$$

$$\frac{U_{ut}}{U_{in}} = - \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C}$$

$$100 = \frac{1}{2\pi(R_2 + R_3)C}$$

$$10 \cdot 10^3 = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

$$\frac{R_3}{R_1} = 1000 \quad (60 \text{ dB})$$

$$\frac{R_3 // R_2}{R_1} = 10 \quad (20 \text{ dB})$$

Enligt specifikation

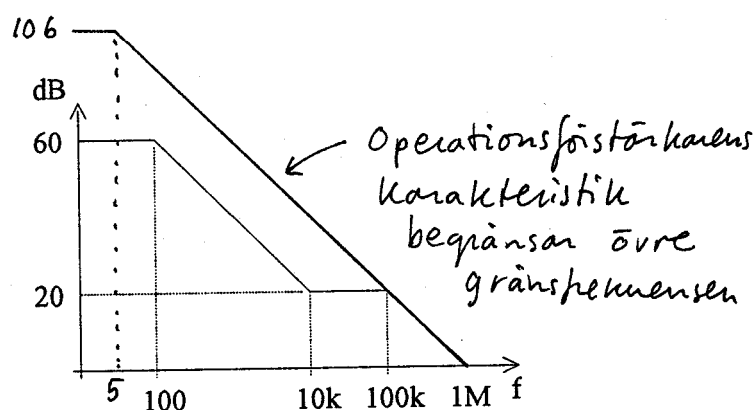
Förslag till dimensionering:

$$R_1 = 100 \Omega \quad R_3 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 // R_3 = 1 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_2 = 1010 \Omega$$

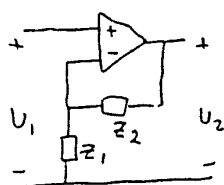
$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 1010 \cdot 10 \cdot 10^3} = 15,8 \text{ nF}$$

b)



5.11

0° fasförskjutning vid låga frekv. $\Rightarrow$ Icke inverterande koppling



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

Högre förstärkning vid låga frekvenser
 $\Rightarrow$ Z_2 större vid låga f än höga f
 eller Z_1 mindre vid låga f än höga f

Ex: $Z_1 = R_1$

$$Z_2 = R_2 \parallel (R_3 + \frac{1}{j\omega C}) \quad \begin{array}{l} \text{Låga } f \quad Z_2 = R_2 \\ \text{Höga } f \quad Z_2 = R_2 \parallel R_3 \end{array}$$

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot (R_3 + \frac{1}{j\omega C})}{R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_2 (1 + j\omega R_3 C)}{1 + j\omega (R_2 + R_3) C}$$

$$A_v = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} = \frac{R_1 + R_2 \cdot \frac{1 + j\omega R_3 C}{1 + j\omega (R_2 + R_3) C}}{R_1} = \frac{R_1 (1 + j\omega (R_2 + R_3) C) + R_2 (1 + j\omega R_3 C)}{R_1 (1 + j\omega (R_2 + R_3) C)} =$$

$$= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 + R_2} C}{1 + j\omega (R_2 + R_3) C} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j\omega / \omega_1}{1 + j\omega / \omega_2}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{(R_2 + R_3) C}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 + R_2} C}$$

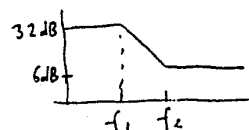
$$\omega = 0 \quad A_v = 32 \text{ dB} = 39,899 \Rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 39,8 \quad \text{Välj } R_1 = 10 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_2 = 388 \text{ k}\Omega$$

$$\omega \text{ stor} \quad A_v = 6 \text{ dB} = 2 \Rightarrow \frac{R_1 + R_2 \parallel R_3}{R_1} = 2 \Rightarrow R_2 \parallel R_3 = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow R_3 = 10,3 \text{ k}\Omega$$

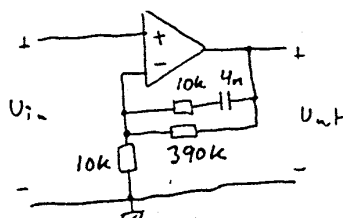
$f_1 = 100 \text{ Hz}$ (-3dB-gränser) enligt diagram.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi (R_2 + R_3) C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi 100 (388 + 10,3) \cdot 10^3} = 4 \text{ nF}$$



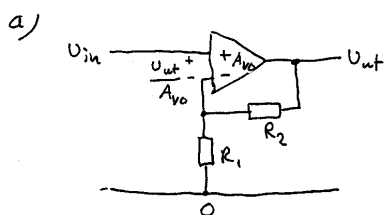
Kontroll

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 + R_2} C} = 2000 \text{ Hz} \quad \text{Stämmer med diagrammet OK!}$$



6.1

$$R_{in} = \infty \quad R_{ut} = 0 \quad (\text{ideal})$$



$$U_{ut} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_{in} - \frac{U_{ut}}{A_{v0}}$$

$$U_{ut} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{A_{v0}} \right) = U_{in}$$

$$A = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{A_{v0}}} = \frac{A_{v0}(R_1 + R_2)}{A_{v0}R_1 + R_1 + R_2} = \frac{A_{v0}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{v0}}$$

$$= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{v0}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{v0}}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad k = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

a-c) $\beta A_{v0} \gg 1$

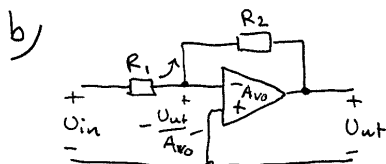
$$\Rightarrow A = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

a-d) spänning-spänning-motkoppling

a-e) $R_1 = 1k\Omega \quad R_2 = 100k\Omega$
 $A_{v0} = 2000$

$$\beta A_{v0} = \frac{1k}{1k + 100k} \cdot 2000 = 19,8$$

$$A = \frac{1k + 100k}{1k} \cdot \frac{19,8}{1 + 19,8} = 96,1$$



$$\frac{U_{in} - (-\frac{U_{ut}}{A_{v0}})}{R_1} = \frac{-\frac{U_{ut}}{A_{v0}} - U_{ut}}{R_2}$$

$$\frac{U_{in}}{R_1} = -U_{ut} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2 A_{v0}} + \frac{1}{A_{v0}} \right)$$

$$\frac{1}{A} = \frac{U_{in}}{U_{ut}} = - \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_2 A_{v0}} + \frac{1}{A_{v0}} \right) = - \frac{R_1 A_{v0} + R_1 + R_2}{R_2 A_{v0}}$$

$$A = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = - \frac{R_2 A_{v0}}{R_1 A_{v0} + R_1 + R_2} = - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{A_{v0}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_{v0}} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{v0}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_{v0}}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad k = - \frac{R_2}{R_1}$$

Obs! Samma β som i a)

b-c) $\beta A_{v0} \gg 1$

$$\Rightarrow A = - \frac{R_2}{R_1}$$

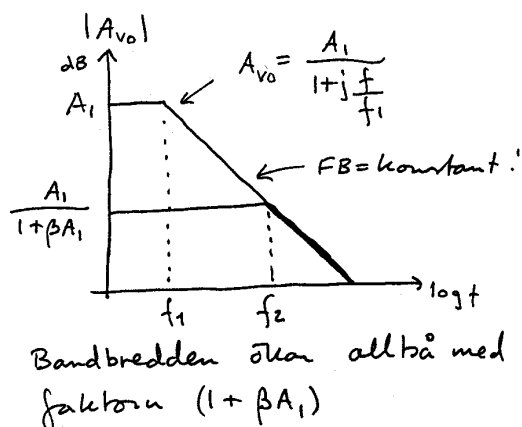
b-d) spänning-shöm-motkoppling
 Utspänningen är känd
 och återförs som shöm.

b-e) $R_1 = 1k\Omega \quad R_2 = 100k\Omega$
 $A_{v0} = 2000$

$$\beta A_{v0} = 19,8 \quad (\text{se ovan})$$

$$A = - \frac{100k}{1k} \cdot \frac{19,8}{1 + 19,8} = -95,2$$

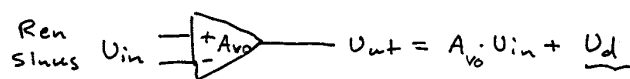
6.2



$$A = \frac{A_{v0}}{1 + \beta A_{v0}} = \frac{\frac{A_1}{1 + j f/f_1}}{1 + \frac{\beta A_1}{1 + j f/f_1}} = \frac{A_1}{1 + j f/f_1 + \beta A_1} = \frac{A_1}{1 + \beta A_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{j f}{f_1(1 + \beta A_1)}} = \frac{A_1}{1 + \beta A_1} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_2}}$$

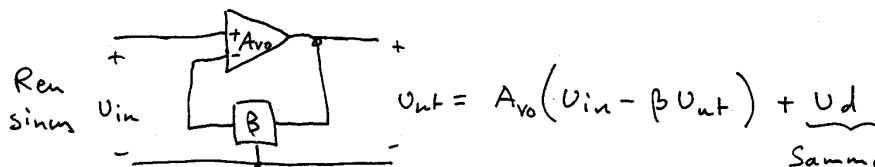
där $f_2 = f_1 \cdot (1 + \beta A_1)$

6.3 Förstärkare utan motkoppling



Distorsion = övertoner.

Förstärkare med motkoppling

Samma utbigningsvä-
ger samma distorsion

$$\Rightarrow U_{ut}(1 + \beta A_{vo}) = A_{vo} U_{in} + U_d$$

$$U_{ut} = \frac{A_o}{1 + \beta A_{vo}} \cdot U_{in} + \frac{U_d}{1 + \beta A_{vo}}$$

Resulterande distorsion minskar
alltså med faktorn $\frac{1}{1 + \beta A_{vo}}$!

6.4

a) Bodediagram:

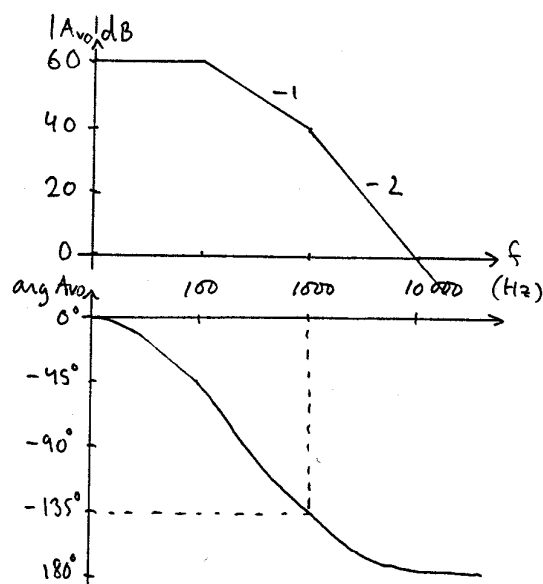
Vid andra -1 brytpunkten
är fasvinkeln ca -135° .
(Approximativt ty fas-
vridningen från första
-1 brytpunkten har 6° kvar
till -90°)

Beloppet A_{vo} är då 40 dB
 ≈ 100 ggr

$$\Rightarrow \beta_{max} = \frac{1}{|A_{vo}|} = \frac{1}{100} = 0,01$$

Låga f:

$$A = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{1000}{1 + \frac{1000}{100}} = 91$$



(Egentligen ligger amplitudkurvan 3 dB under asymptoten
i brytpunkten. Med $A_{vo} = 37$ dB blir
 $\Rightarrow \beta_{max} = \frac{1}{|A_{vo}|} = \frac{1}{70,7} = 0,014$ $A_{min} = \frac{1000}{1 + \frac{1000}{70,7}} = 66$)

Fortsättning på nästa sida ...

6.4

b) Exakt beräkning

Vad är $|A_{vo}|$ då $\arg A_{vo} = -135^\circ$ (Resistut β ger ingen fasförändring)

$$-135^\circ = -\arctan \frac{f}{100} - \arctan \frac{f}{1000} \quad (1)$$

Lös ekvationen med parningsräkning, datorhjälp eller analytiskt:

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \beta} \quad (2)$$

$$(1) + (2) \Rightarrow \underbrace{\tan(+135^\circ)}_{=-1} = \frac{\frac{f}{100} + \frac{f}{1000}}{1 - \frac{f}{100} \cdot \frac{f}{1000}} \Rightarrow -1 = \frac{10^3 f + 10^2 f}{10^5 - f^2}$$

$$f^2 - (10^3 + 10^2)f - 10^5 = 0$$

$$f = \frac{1 \cdot 10^3}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{1 \cdot 10^3}{2}\right)^2 + 10^5} = 550 \left(\pm \sqrt{550^2 + 10^5} \right) \Rightarrow f = 1184 \text{ Hz}$$

då $\arg A_{vo} = -135^\circ$

$$\text{Då är } |A_{vo}| = 1000 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1184}{100}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1184}{1000}\right)^2}} = 54,3$$

$$|\beta A_{vo}| = 1 \text{ vid } -135^\circ \Rightarrow \beta_{\max} = \frac{1}{|A_{vo}|} = \frac{1}{54,3} = 0,018$$

$$\text{Låga } f: A = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{1000}{1 + \frac{1000}{54,3}} = 51,5 \text{ (34,2 dB)}$$

6.5

$$a) |\beta A_{vo}| = -17,5 \text{ dB vid } \arg(\beta A_{vo}) = -180^\circ$$

$$\Rightarrow A_m = 17,5 \text{ dB} \quad A_m = 7,5 \text{ ggr}$$

$$\arg(\beta A_{vo}) = -120^\circ \text{ vid } |\beta A_{vo}| = 0 \text{ dB}$$

$$\Rightarrow \phi_m = 60^\circ$$

$$b) \text{ Låga } f: |\beta A_{vo}| = 18 \text{ dB} = 7,94 \text{ ggr}$$

$$\beta = \frac{1k}{1k + 19k} = \frac{1}{20}$$

$$A = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{\frac{1}{\beta} \cdot \beta A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{20 \cdot 7,94}{1 + 7,94} = 17,8$$

$$c) \text{ Om } \beta \text{ ökar 17,5 dB blir } |\beta A_{vo}| = 1 \text{ (0 dB)}$$

$$\text{vid } \arg(\beta A_{vo}) = -180^\circ$$

$$\Rightarrow \text{Själusvängning om } \beta \text{ ökar 7,5 ggr (17,5 dB)}$$

$$\beta_{\text{själusvängning}} = \frac{1}{20} \cdot 7,5 = 0,37$$

$$\text{Själusvängningsfrekvens} \approx 20 \text{ kHz då}$$

$$\arg(\beta A_{vo}) = -180^\circ$$

6.6

a) Vid fasvinkeln -135° för A_{vo} är

$$|A_{vo}| = +18 \text{ dB}$$

$$|\beta A_{vo}| = 1 \text{ (0 dB)} \Rightarrow \beta = -18 \text{ dB} = 0,1399$$

Vid fasvinkeln -180° för A_{vo} är

$$|A_{vo}| = -3 \text{ dB}$$

$$A_m = 6 \text{ dB} \Rightarrow \beta = -3 - 6 \text{ dB} = -9 \text{ dB} = 0,3599$$

 ϕ_m stängare krav är $A_m \Rightarrow \text{Max } \beta = 0,13$

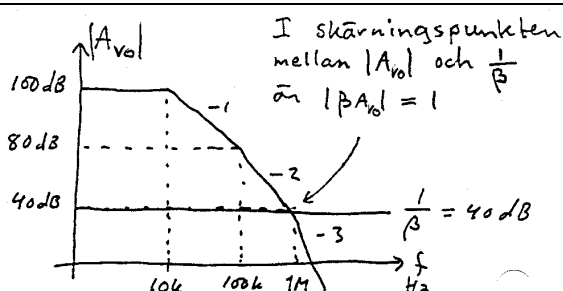
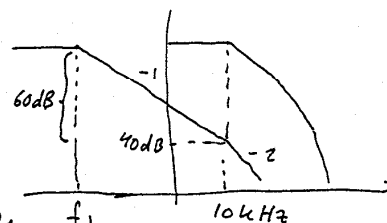
$$b) A_v = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{100}{1 + 0,13 \cdot 100} \approx 7,4$$

6.7

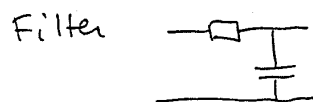
 $A_{vo} = 100\,000 = 100 \text{ dB}$ vid låga f .Då önskas $A = 40 \text{ dB}$

$$\Rightarrow 1 + \beta A_{vo} = 60 \text{ dB}$$

$$\beta \approx \frac{1}{A} = -40 \text{ dB} = \frac{1}{100}$$

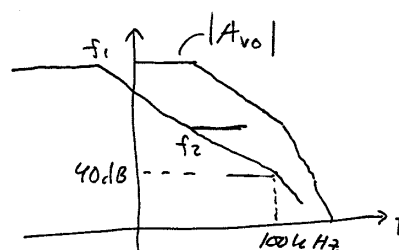
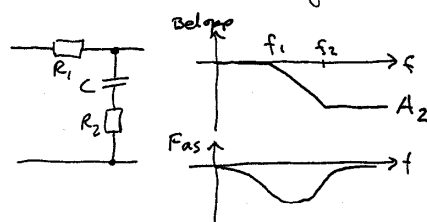
a) Om förstärkaren motkopplas så att $A = 40 \text{ dB}$ är arg $A_{vo} \approx -225^\circ$ (helt brytpunkten) då $|\beta A_{vo}| = 1$ och förstärkaren är klart instabil!b) Dominerande -1 brytpunkt
kompenserad kurva skall ha andra
brytpunkten ($\approx -135^\circ$) på 40 dB om
 $\phi_m = 45^\circ$  $\Rightarrow$ Brytthänsen f_1 ligger tre dekader
under 10 kHz ($60 \text{ dB} \approx 3$ dekader)

$$\text{Dvs } f_1 = 10 \text{ Hz}$$

Resultande övre gränshänsen för den motkopplade
förstärkaren blir $\approx 10 \text{ kHz}$.

Fortsättning på nästa sida ...

6.7 c) Fasretarderande filter



f_2 läggs på första -1 brytpunkt för A_0 och så att slingförstärken andra brytpunkt (fas $\approx -135^\circ$) hamnar på -40 dB

$f_1 = 100$ Hz (tre dekader under 100 kHz)

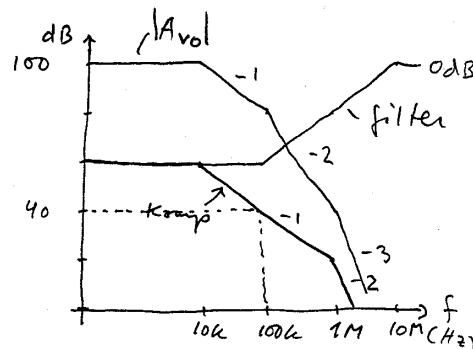
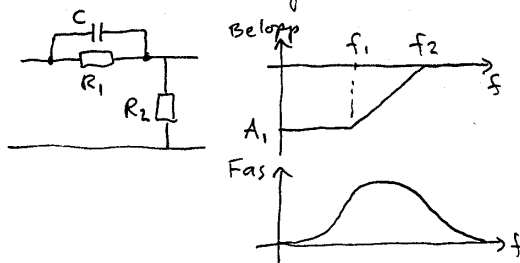
$f_2 = 10$ kHz

Nivå A_2 för filtret $= -40$ dB

$$f_1 = \frac{1}{2\pi(R_1+R_2)C} \quad f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad A_2 = \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

Resulterande övre gränshetern blir ≈ 100 kHz

d) Fasavancerande filter



f_1 läggs så att +1 brytpunkten "tar ut" råförstärkningens andra brytpunkt. Dess tredje brytpunkt blir då andra brytpunkt efter kompensering med filtret. För att filterets -1 brytpunkt inte skall tillföra alltför mycket fasvridning måste f_2 läggas ca en dekad över 1 MHz.

$$\Rightarrow f_1 = 100 \text{ kHz} \quad f_2 = 10 \text{ MHz} \Rightarrow A_1 = -40 \text{ dB}$$

Nackdelen är att den resulterande råförstärkningen blir låg. Resulterande förstärkning skall vara 40 dB $\Rightarrow f_2$ kan läggas lägre än 10 MHz och A_1 kan vara lite större. f_2 kan dock inte läggas vid 1 MHz med $A_1 = -20$ dB eftersom den kompenserade A_0 då får en dubbel -1 brytpunkt vid nivån 40 dB $\Rightarrow$ fasvridning ca -180° och instabilitet.

Övre gränshetern med filter enligt fig. blir ≈ 100 kHz

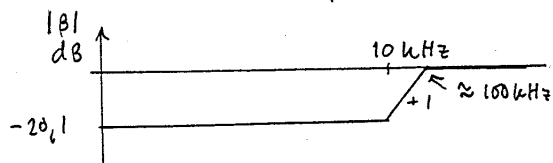
6.8

Lösning: $\beta = \frac{10k}{10k + 91k} = 0,099 \quad (-20,1 \text{ dB})$

$A = \frac{A_{vo}}{1 + \beta A_{vo}} = \frac{10^5}{1 + 10^5 \cdot 0,099} = 10,1 \left(\approx \frac{1}{\beta} \right) \text{ vid låga frekvenser}$
(20,1 dB)

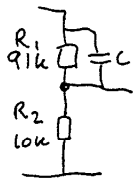
$|\beta A_{vo}| = 1$ efter andra brytfrekvensen $\Rightarrow$ fasvridningen är större än -135° ($\approx -174^\circ$)

Modifiera β så att den får följande frekvenskurva



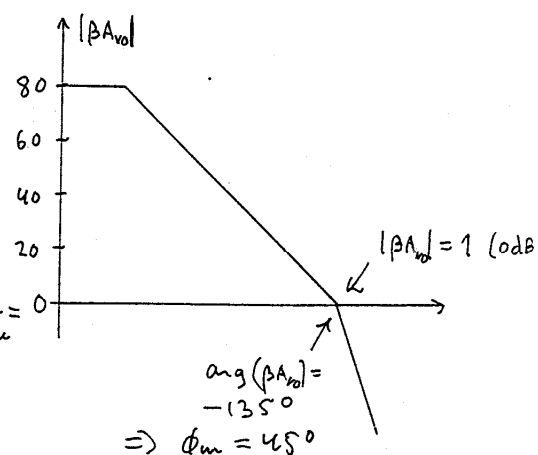
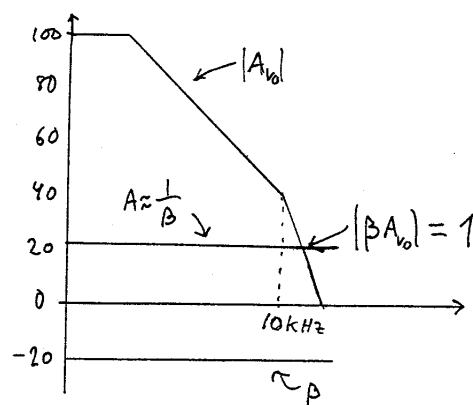
$\beta = 1$ vid höga $f \Rightarrow C$ parallellt med $91 \text{ k}\Omega$

β :



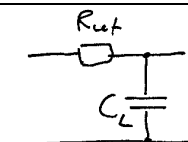
$$\beta = \frac{R_2}{R_2 + R_1 \parallel \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_2}{R_2 + \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1 + j\omega R_1 C}{1 + j\omega R_1 \parallel R_2 \cdot C}$$

$$\frac{1}{2\pi R_1 C} \approx 10 \text{ kHz} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi \cdot 91k \cdot 10k} = 175 \text{ pF}$$



6.9

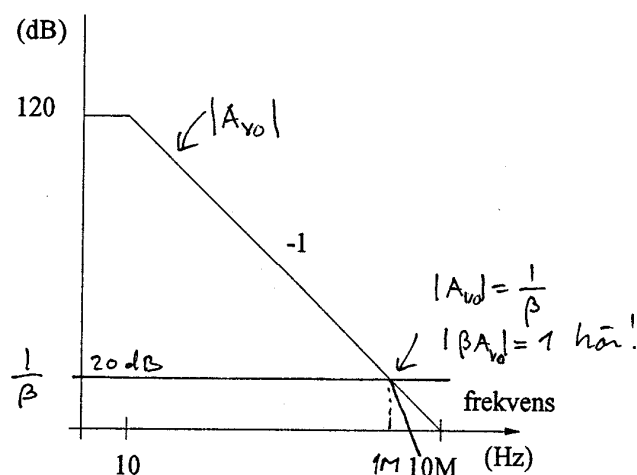
C_L inför tillsammans med R_{ut} en extra -1 brytpunkt i värförstärkningen



Eftersom $\beta = \frac{10k}{10k+90k} = \frac{1}{10}$ och

$\frac{1}{\beta} = 10 \approx 20 \text{ dB}$ får den brytpunkten

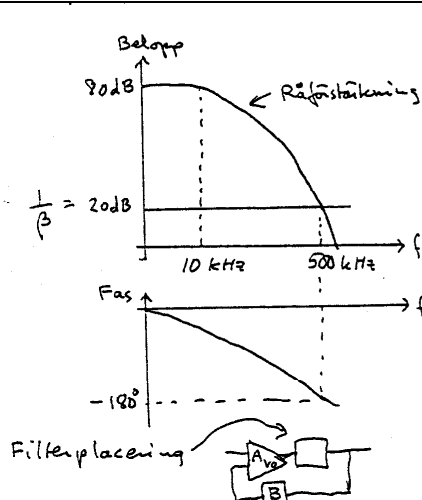
inte ligga lägre än en dekad under 10 MHz, dvs 1 MHz. Fasvridningen vid andra -1 brytpunkten är ju -135° , dvs 45° kvar till -180°



$$a) \quad \frac{1}{2\pi R_{ut} C_L} > 1 \text{ MHz} \Rightarrow C_L < \frac{1}{2\pi \cdot 70 \cdot 1M} = 2,3 \text{ nF}$$

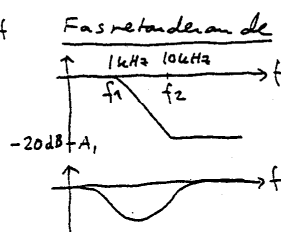
$$b) \quad l = \frac{2,3 \text{ nF}}{0,1 \text{ nF/m}} = 23 \text{ m}$$

6.10

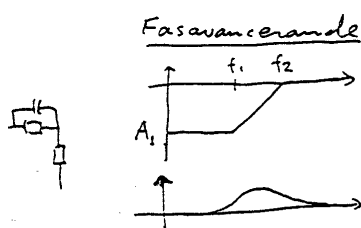


Enklarest är att lägga in dominerande -1 brytpunkt.
 med brytfrekvens 4. dekaderna under 10 kHz = 1 Hz
 Övre gränshänsynen blir emellertid
 med denna metod låg.

Om amplitudkurvan kan sänkas 20 dB
 vid 500 kHz utan tillkommande fasförändring
 vid den frekvensen ligger den på gränsen
 till instabilitet (inga marginaler)



För att hålla
 marginalerna bön
 f_1 sänkas med
 bibehållit f_2 , dvs
 nivån A_1 vid höga
 frekvenser sänks.

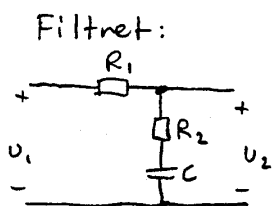


f_1 skall läggas vid andra brytfrekvensen. Var den
 ligger vet vi inte. En gissning vore att lägga
 f_1 och f_2 minst en dekad från varandra och
 500 kHz mitt emellan f_1 och f_2 .

Förslå företaget att utförlikare mätning
 av råförstärkningens belopp och faskurva
 bör göras om hög övre gränshänsyn önskas.

6.11

Resultaterande råförstärkning, A_{vo} + filtret, skall ha
 andra brytpunkten på 0 dB-linjen.



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C}}{R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega (R_1 + R_2) C} = \frac{1 + j\omega/\omega_1}{1 + j\omega/\omega_2}$$

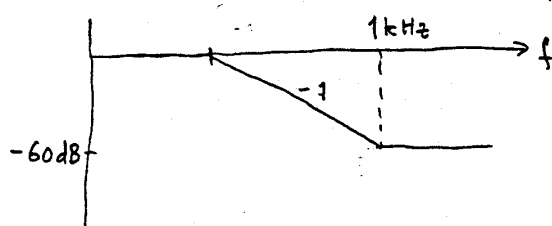
$$\omega_1 = \frac{1}{R_2 C}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{(R_1 + R_2) C}$$

$$\omega_2 < \omega_1$$

Filtrets +1-brytpunkt (ω_1, f_1) skall läggas vid A_{vo} 's första
 brytpunkt, dvs 1,0 kHz.

Filtret skall alltså ha följande karakteristik



Första brytpunkten ($-1, \omega_2$)
 skall läggas vid $f_2 = 1 \text{ Hz}$
 (60 dB $\sim$ 3 dekaderna med
 lutningen -20 dB/dekad)

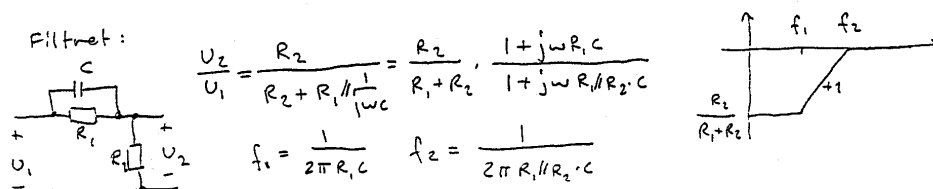
$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1000}$$

$$\text{Tex } R_2 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 999 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow C = \frac{1}{R_2 \cdot 2\pi f_1} = \frac{1}{1 \text{ k} \cdot 2\pi \cdot 1,0 \text{ k}} = 159 \text{ nF}$$

$$\text{Koll: } C = \frac{1}{(R_1 + R_2) \cdot 2\pi f_2} = \frac{1}{(999 \text{ k} + 1 \text{ k}) \cdot 2\pi \cdot 1} = 159 \text{ nF ok!}$$

6.12



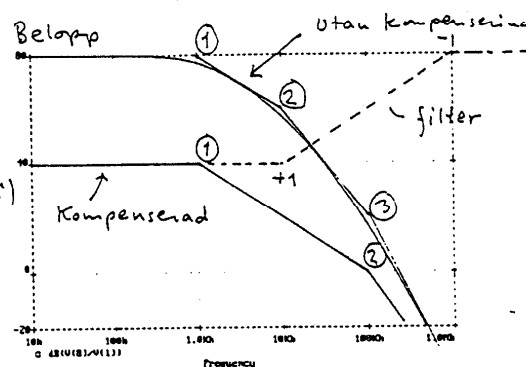
+1-brytpunkten skall läggas vid förstärkarens andra -1 brytpunkt då fasvidningen är -135° . På så sätt blir förstärkarens tredje brytpunkt resulterande förstärkarens andra brytpunkt. Nivån väljs så att andra brytpunkten läggs vid 0 dB.

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{100} \quad (-40 \text{ dB})$$

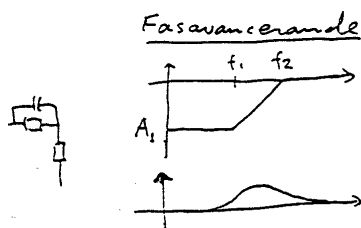
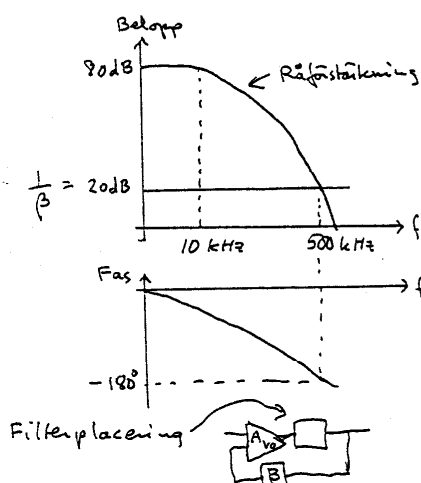
$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C} = 10 \text{ kHz}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_1 \parallel R_2 C} = 1 \text{ MHz} \quad (\text{En dekad över } 100 \text{ kHz OK!})$$

T.ex: $R_1 = 99 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ $C = 161 \text{ pF}$



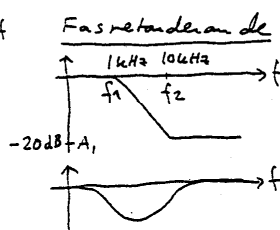
6.13



Enklarest är att lägga in dominerande -1 brytpunkt.

med brytfrekvens 4 dekader under $10 \text{ kHz} = 1 \text{ Hz}$
Övre gränshänsen blir emellertid med denna metod låg.

Om amplitudkurvan kan sänkas 20 dB vid 500 kHz utan tillkommande fasvidning vid den frekvensen ligger den på gränsen till instabilitet (inga marginaler)

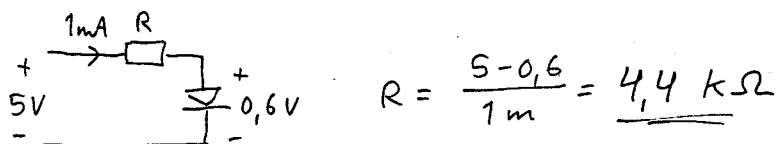


För att hålla marginalen bör f_1 sänkas med bibehållit f_2 , dvs nivån A_1 vid höga frekvenser sänks.

f_1 skall läggas vid andra brytfrekvensen. Var den ligger vet vi inte. En gissning vore att lägga f_1 och f_2 minst en dekad från varandra och 500 kHz mitt emellan f_1 och f_2 .

Förslå företaget att utförlikare mätning av förstärkningens belopp och faskurva bör göras om hög övre gränshänsen önskas.

- 7.1 Kisel diod med 1mA ström $\Rightarrow$ Spänningsfall $\approx 0,6V$



Lämpligt E12-värde $4,7 \text{ k}\Omega$.

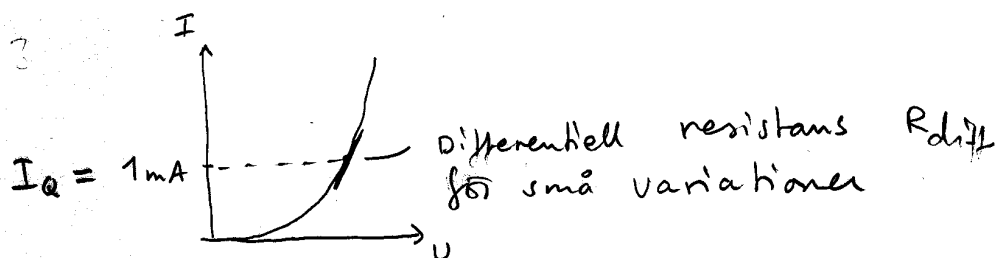
- 7.2 Undersök för vilka inspänningar som dioden leder.

Ledande diod $\Rightarrow$ 0V över dioden.

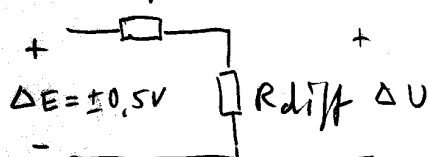
När dioden inte leder går det ingen ström genom R och det blir således inget spänningsfall över R.

Lösning i övrigt, se facit!

- 7.3



$R = 4,3k \text{ enligt 7.1}$



10% variation = 0,5V

$$\frac{1}{R_{diff}} = \frac{dI}{dU} = \frac{d}{dU} (I_0 \cdot e^{U/V_T}) = \frac{1}{V_T} I_0 \cdot e^{U/V_T} =$$

$$= \frac{I_Q}{V_T} = \frac{1mA}{25mV} = 40 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\Omega}$$

$$R_{diff} = \frac{1}{40 \cdot 10^{-3}} = 25 \Omega$$

$$\Delta U = \Delta E \cdot \frac{R_{diff}}{R + R_{diff}} = \pm 0,5 \cdot \frac{25}{4,3k + 25} = \pm 2,8 mV$$

$$8.1 \quad I_D = k' \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

$$U_T = U_{T0} = 0,7 \text{ V}$$

$$\frac{W}{L} = \frac{I_D}{k' (U_{GS} - U_T)^2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{75 \cdot 10^{-6} (1,5 - 0,7)^2} = 10,4$$

$$W = 10,4 \cdot 4 \mu\text{m} = 42 \mu\text{m} \quad (L = 4 \mu\text{m})$$

$$8.2 \quad I_D = k' \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

$$U_{GS} - U_T = \sqrt{\frac{I_D}{k' \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{60}{4}}} = 0,67 \text{ V}$$

$$U_{GS} = U_T + 0,67 \text{ V} = 1,37 \text{ V}$$

8.3

a) $t_{ox} = 8 \text{ nm}$ $\epsilon_{ox} = 3,45 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ för kiseldioxid

$$\mu_n = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$U_T = 0,8 \text{ V}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3,45 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}}{8 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ F/m}^2 =$$

$$= 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (10^{-6})^2 \text{ F/mm}^2 =$$

$$= 4,3 \cdot 10^{-15} \text{ F/mm}^2 = 4,3 \text{ fF/mm}^2$$

$$k' = \mu_n C_{ox} = 450 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}} \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F}}{\text{m}^2} =$$

$$= 194 \mu \frac{\text{F}}{\text{Vs}} = 194 \mu\text{A/V}^2$$

b) $U_{GS} = U_T + \sqrt{\frac{I_D}{\frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L}}} = 0,8 + \sqrt{\frac{100 \mu}{\frac{194 \mu}{2} \cdot \frac{40 \mu}{4 \mu}}} = 1,12 \text{ V}$

$$U_{Dsmih} = U_{GS} - U_T = 1,12 - 0,8 = 0,32 \text{ V}$$

8.4

$$U_T = U_{T0} + \gamma \left(\sqrt{|2\phi_f| + U_{SB}} - \sqrt{|2\phi_f|} \right) =$$

$$= 0,7 + 0,5 \left(\sqrt{0,6 + 1,0} - \sqrt{0,6} \right) =$$

$$= 0,95 \text{ V}$$

9.1 $g_m = k' \cdot \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)$ $k' = 200 \mu A/V^2$ $U_T = 0,8 V$

$U_{GS} = 1,0 V$ $g_m = 200 \mu \cdot \frac{100 \mu}{4 \mu} \cdot (1,0 - 0,8) = 1 \text{ mA/V}$

$U_{GS} = 1,2 V$ $g_m = 200 \mu \cdot \frac{100 \mu}{4 \mu} (1,2 - 0,8) = 2 \text{ mA/V}$

9.2 a) $U_{GS} = 1,0 V$
 $I_D = \frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 = \frac{200 \mu}{2} \cdot \frac{100}{4} \cdot (1,0 - 0,8)^2 =$
 $= 100 \mu A = 1,0 \text{ mA}$

$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_D} = \frac{3 - 1,5}{0,1 \text{ mA}} = 15 \text{ k}\Omega$

b) $r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,01 \cdot 1 \text{ mA}} = 100 \text{ k}\Omega$

$A_v = -g_m (R_D \parallel r_o) = -1 \text{ mA/V} \cdot (100 \text{ k} \parallel 15 \text{ k}) = -13$

$\Delta U_{GS} = \pm 10 \text{ mV} = U_{gs}$

$U_{ds} = A_v \cdot U_{gs} = -13 \cdot (\pm 10 \text{ mV}) = \mp 130 \text{ mV}$

9.3 $I_D \propto \frac{W}{L} \Rightarrow I_D$ ökar 2 ggr

$g_m \propto \frac{W}{L} \Rightarrow g_m$ ökar 2 ggr

$r_o \propto \frac{1}{I_D} \Rightarrow r_o$ halveras

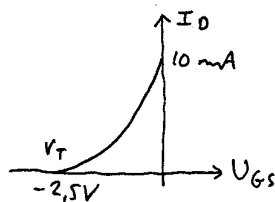
9.4

NMOS av utarmningstyp:

a) Vilopunkt

$$U_{GSQ} = 0 \Rightarrow I_{DQ} = 10 \text{ mA}$$

$$U_{DSQ} = E - R_D \cdot I_{DQ} = 20 - 1k \cdot 10m = 10 \text{ V}$$

b) Kvadratisk överföringskarakteristik: $I_D = 10 \text{ mA} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{-2.5 \text{ V}}\right)^2$

$$g_m = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = 10 \text{ mA} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{-2.5}\right) \cdot 2 \cdot \frac{1}{2.5} = 10 \text{ mA} \cdot 1 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2.5} = 8 \text{ mA/V}$$

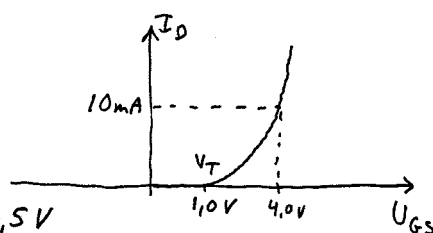
$$A_v = -g_m R_D \parallel R_L = -8 \text{ mA/V} \cdot 1k \parallel 10k = -7.3$$

9.5

NMOS av anrikningstyp:

a) Vilopunkt

$$U_{GS} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{270k}{270k + 820k} = 2.5 \text{ V}$$



Kvadratisk överföringskarakteristik

$$I_D = 10 \text{ mA} \cdot \frac{(U_{GS} - 1 \text{ V})^2}{(4 \text{ V} - 1 \text{ V})^2} = 10 \text{ mA} \cdot \frac{(U_{GS} - 1)^2}{9}$$

$$U_{GSQ} = 2.5 \text{ V} \Rightarrow I_{DQ} = 10 \text{ mA} \cdot \frac{(2.5 - 1)^2}{9} = 2.5 \text{ mA}$$

$$U_{DSQ} = E - R_D I_{DQ} = 10 - 2.5 \text{ mA} \cdot 1k = 7.5 \text{ V}$$

b) $g_m = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{10 \text{ mA}}{9} \cdot 2 \cdot (U_{GS} - 1) = \frac{10 \text{ mA}}{9} \cdot 2 \cdot (2.5 - 1) = 3.3 \text{ mA/V}$

$$A_v = -g_m R_D = -3.3 \text{ mA/V} \cdot 1k = -3.3$$

9.6

a) $U_{UT} = \frac{1}{2} V_{DD} \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD} - U_{UT}}{R_D} = \frac{1,5}{1k} = 1,5 \text{ mA}$

$$g_m = \sqrt{2k' \cdot \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{2 \cdot 100\mu \cdot 50 \cdot 1,5 \text{ mA}} = 3,87 \text{ mA/V}$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,005 \cdot 1,5 \text{ mA}} = 133 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = -g_m (R_D // r_o) = -3,87 \text{ mA/V} \cdot (1k // 133k) = -3,84$$

b) $I_D = \frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{100\mu}{2} \cdot 50 (V_{GS} - 0,8)^2 =$
 $= 2,5 \text{ mA} (V_{GS} - 0,8)^2$ i mättade området

Skiss:

 $U_{IN} < V_t \Rightarrow$ stängt transistor

$$I_D = 0 \quad U_{UT} = V_{DD}$$

 $U_{IN} > V_t \Rightarrow$ Mättade området

$$\text{ty } U_{UT} = U_{DS} > V_{GS} - V_t$$

$$U_{UT} = V_{DD} - R_D I_D =$$

$$= 3 - 1k \cdot 2,5 \text{ mA} (U_{IN} - 0,8)^2$$

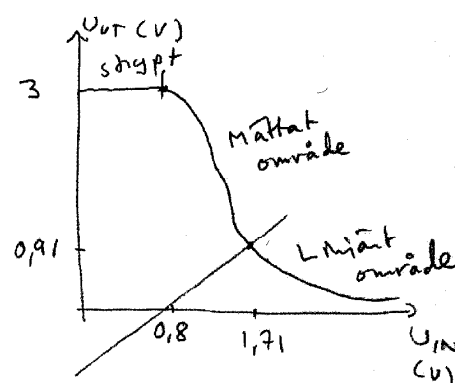
Dä $V_{DS} = V_{GS} - V_t$, $U_{UT} = U_{IN} - 0,8$ går transistoren in i linjära området.

$$U_{UT} = 3 - 2,5 \cdot U_{UT}^2$$

$$U_{UT}^2 + \frac{1}{2,5} U_{UT} - \frac{3}{2,5} = 0$$

$$U_{UT} = -\frac{1}{5} + \sqrt{\left(\frac{1}{5}\right)^2 + \frac{3}{2,5}} = 0,91 \text{ V}$$

$$U_{IN} = U_{UT} + 0,8 = 0,91 + 0,8 = 1,71 \text{ V}$$



9.7

a

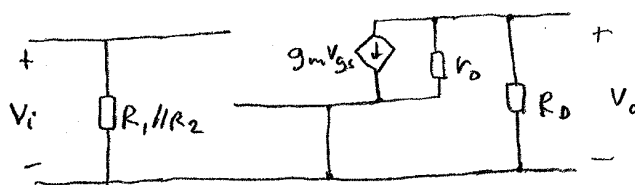
$$V_{GS} = V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \cdot \frac{150k}{150k + 330k} = 1,56 \text{ V}$$

$$I_{DQ} = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \cdot 5m \cdot (1,56 - 0,8)^2 = 1,44 \text{ mA}$$

Försummar inverkan av V_{DS} eftersom $\lambda = \frac{1}{V_A} = 0,01$

$$\left. \begin{aligned} g_m &= \frac{2I_{DQ}}{V_{GS} - V_t} = 3,8 \text{ mA/V} \\ r_o &= \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{1,44m} = 69,3 \text{ k}\Omega \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U_{DSQ} &= V_{DD} - R_D I_{DQ} = \\ &= 5 - 1,8k \cdot 1,44m = \\ &= 2,41 \text{ V} \end{aligned}$$

Signalschema:

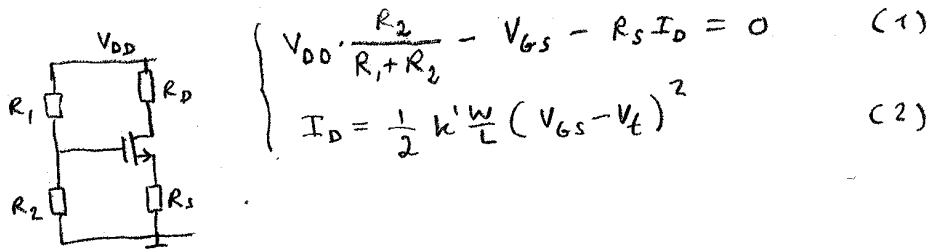


$$\frac{V_o}{V_i} = -g_m (r_o \parallel R_D) = -3,8m \cdot (69,3k \parallel 1,8k) = -6,799$$

$$R_i = R_1 \parallel R_2 = 330k \parallel 150k = 103 \text{ k}$$

$$R_o = r_o \parallel R_D = 1,75 \text{ k}\Omega$$

b)



$$\left\{ \begin{aligned} V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{GS} - R_S I_D &= 0 \quad (1) \\ I_D &= \frac{1}{2} k' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \quad (2) \end{aligned} \right.$$

$$(1) \Rightarrow 5 \cdot \frac{150k}{150k + 330k} - V_{GS} - 0,22k \cdot I_D = 0$$

$$I_D = \frac{1,56}{0,22k} - \frac{1}{0,22k} \cdot V_{GS} \quad \text{insätter i (2)}$$

$$\frac{1,56}{0,22k} - \frac{1}{0,22k} \cdot V_{GS} = \frac{1}{2} \cdot 5m (V_{GS} - 0,8)^2$$

$$7,1m - 4,55m V_{GS} = 2,5m (V_{GS}^2 + 0,8^2 - 2 \cdot 0,8 \cdot V_{GS})$$

$$2,84 - 1,82 V_{GS} = V_{GS}^2 + 0,64 - 1,6 V_{GS}$$

forts...

9.7b
forts.

$$V_{GS}^2 + 0,22 V_{GS} - 2,2 = 0$$

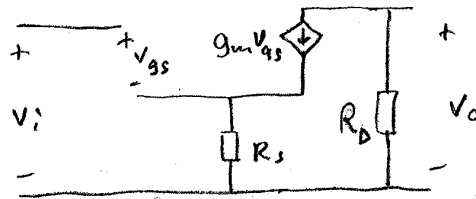
$$V_{GS} = -\frac{0,22}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,22}{2}\right)^2 + 2,2} = 1,38 \text{ V}$$

$$I_{DQ} = \frac{1}{2} 5 \text{ m} (1,38 - 0,8)^2 = 0,83 \text{ mA}$$

$$g_m = \frac{2 I_D}{V_{GS} - V_t} = \frac{2 \cdot 0,83 \text{ m}}{1,38 - 0,8} = 2,87 \text{ mA/V}$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{DSQ} = 5 - 1,8 \text{ k} \cdot 0,83 \text{ m} = \\ = 3,5 \text{ V} \end{array} \right\}$$

Signal schema



$$\begin{cases} V_o = -g_m V_{gs} \cdot R_D \\ V_i = V_{gs} + g_m V_{gs} \cdot R_s \end{cases}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_s} = - \frac{2,87 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ k}}{1 + 2,87 \text{ m} \cdot 0,22 \text{ k}} = -3,17$$

$$10.1 \quad I_{Cmax} = \frac{E - U_{CEsat}}{R_{Cmin}} = \frac{5 - 0,2}{0,9 \cdot 1k} = 5,33 \text{ mA} \quad (0,9 \text{ pga } -10\% \text{ tolerans})$$

$$I_B > \frac{I_{Cmax}}{\beta_{min}} = \frac{5,33 \text{ mA}}{100} = 53,3 \mu\text{A} \quad \text{krävs för bottning}$$

$$R_{Bmax} = \frac{U_1 - U_{BEsat}}{I_{Bmin}} = \frac{3 - 0,7}{53,3 \mu} = 43,1 \text{ k}\Omega$$

$$+10\% \text{ tolerans} \Rightarrow 1,1 \cdot R_B = 43,1 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_B = \frac{43,1 \text{ k}}{1,1} = 39,2 \text{ k}\Omega$$

Högsta tillåtna E12-värde är således 39 k Ω .

$$10.2 \quad \text{Reläström} = \frac{5V}{50\Omega} = 0,1 \text{ A} = 100 \text{ mA}$$

$$I_B > \frac{100 \text{ mA}}{300} = 0,333 \text{ mA} \quad \text{krävs för bottning}$$

R_{Bmax} bestäms av lägsta I_B som krävs för bottning.

R_{Bmin} bestäms av hur stor ström som grunden får belastas med.

$$a) \quad R_{Bmax} = \frac{2,4 - 0,7}{0,333 \text{ mA}} = 5,1 \text{ k}\Omega$$

Välj $R_B = 4,7 \text{ k}\Omega$.

NPN

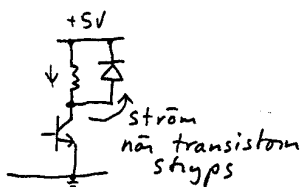
$$R_{Bmin} = \frac{2,4 - 0,7}{0,400 \text{ mA}} = 4,25 \text{ k}\Omega$$

$$b) \quad R_{Bmax} = \frac{5 - 0,7 - 0,4}{0,333 \text{ mA}} = 11,7 \text{ k}\Omega$$

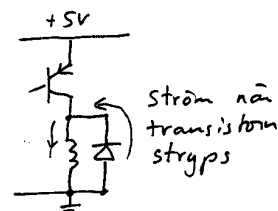
Välj $R_B = 10 \text{ k}\Omega$.

$$\text{PNP} \quad R_{Bmin} = \frac{5 - 0,7 - 0,4}{16 \text{ mA}} = 244 \Omega$$

c) NPN:



PNP:



$$11.1 \quad a) \quad \begin{cases} V_{CC} - R_B I_B - U_{BE} - R_E (I_C + I_B) = 0 \\ V_{CC} - R_C I_C - U_{CE} - R_E (I_C + I_B) = 0 \\ I_C = \beta_{DC} I_B \end{cases}$$

Med värden enligt uppgiften blir vilopunkten med

$$\beta_{DC} = 50: \quad I_{CQ} = 0,76 \text{ mA} \quad U_{CEQ} = 8,7 \text{ V}$$

$$\beta_{DC} = 300: \quad \text{Transistorn bottenas. } I_C \text{ begränsas av } R_E \text{ och } R_C \text{ till } I_{CQ} = 2,8 \text{ mA. } U_{CEQ} \approx 0 \text{ V}$$

(eller ca 0,1 V) observera att $I_C = \beta_{DC} I_B$ inte gäller då transistorn är bottenad!

$$b) \quad \begin{cases} V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - R_1 \parallel R_2 \cdot I_B - U_{BE} - R_E (I_C + I_B) = 0 \\ V_{CC} - R_C I_C - U_{CE} - R_E (I_C + I_B) = 0 \\ I_C = \beta_{DC} I_B \end{cases}$$

Med värden enligt uppgiften blir vilopunkten med

$$\beta_{DC} = 50: \quad I_{CQ} = 1,6 \text{ mA} \quad U_{CEQ} = 5,1 \text{ V}$$

$$\beta_{DC} = 300: \quad I_{CQ} = 2,1 \text{ mA} \quad U_{CEQ} = 2,9 \text{ V}$$

Kopplingen enligt b ger alltså en vilopunkt som inte är lika känslig för att förstärkningsfaktorn ändras!

$$11.2 \quad a) \quad \beta_{ac} \approx \beta_{DC} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}} = \frac{2 \text{ mA}}{10 \mu\text{A}} = 200$$

$$g_m = \frac{1}{V_T} \cdot I_{CQ} = \frac{1}{25 \text{ mV}} \cdot 2 \text{ mA} = 80 \text{ mA/V}$$

$$r_\pi = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \frac{200}{80 \text{ mA/V}} = 2,5 \text{ k}\Omega$$

$$r_o \approx \frac{U_A}{I_{CQ}} \approx \frac{50}{2 \text{ mA}} = 25 \text{ k}\Omega \quad (\text{Grov uppskattning})$$

$$b) \quad \beta_{ac} = 200 \quad \text{oförändrad}$$

$$g_m \propto I_{CQ} \quad I_{CQ} \text{ ökar med faktor 5.}$$

$$g_m = 5 \cdot 80 \text{ mA/V} = 400 \text{ mA/V}$$

$$r_\pi = \frac{2,5 \text{ k}\Omega}{5} = 0,5 \text{ k}\Omega \quad \text{Minskar med}$$

en faktor 5 när strömmen ökar med en faktor 5.

$$r_o \propto \frac{1}{I_{CQ}} \Rightarrow r_o = \frac{25}{5} \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

11.3

a)

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE}}{\frac{1}{\beta_{DC}} \cdot R_1 \parallel R_2 + R_E} = \frac{12 \cdot \frac{27k}{82k+27k} - 0,7}{\frac{1}{200} \cdot 82k \parallel 27k + 1k} =$$

$$= 2,1 \text{ mA}$$

$$g_m = \frac{1}{V_T} \cdot I_{CQ} = \frac{1}{25m} \cdot 2,1m = 82,5 \text{ mA/V}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \frac{200}{82,5m} = 2,4 \text{ k}\Omega$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{ie} = 82k \parallel 27k \parallel 2,4k = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$r_o \approx \frac{U_A}{I_{CQ}} \quad U_A \text{ är i storleksordning } 50-100 \text{ V}$$

$$\text{Antag t.ex. } U_A = 75 \text{ V} \Rightarrow r_o = \frac{75}{2,1m} = 36 \text{ k}\Omega$$

$$R_{ut} = R_C \parallel r_o = 3,3k \parallel 36k = 3,0 \text{ k}\Omega$$

$$A_v = -g_m R_C \parallel r_o = -82,5 \cdot 3,0 = -248$$

obs! I svaren i boken har r_o försummats!

$$b) \quad U_{ut} = U_{in} \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} \cdot |A_{vo}| \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{ut}} =$$

$$= 0,01 \cdot \frac{2,2k}{2,2k + 4,7k} \cdot 248 \cdot \frac{10k}{10k + 2,9k} = 0,61 \text{ V}$$

$$c) \quad A_{vtot} = A_{vo}^2 \cdot \frac{R_{in2}}{R_{in2} + R_{ut1}} = (-248)^2 \cdot \frac{2,2k}{2,2k + 2,9k} = 26500$$

Svar till uppgitt b och c är i boken något högre eftersom r_o där har försummats vid beräkning av förstärkning

11.4

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_{\pi} + \beta_{ac} R_E) =$$

$$= 82k \parallel 27k \parallel (2,4k + 200 \cdot 1k) = 18,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{ut} = R_E \parallel \frac{r_{\pi}}{\beta_{ac}} = R_E \parallel \frac{1}{g_m} = 1k \parallel \frac{1}{82,5m} = 12 \Omega$$

$$A_v \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{g_m R_E}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{82,5m \cdot 1k}} = 0,99$$

11.5 $I_{CQ} = 2,1 \text{ mA}$ enligt 8.3

Likspänningsnivåer:

$$U_E \approx R_E \cdot I_{CQ} = 1k \cdot 2,1m = 2,1 \text{ V}$$

$$U_B = U_E + U_{BE} = 2,1 + 0,7 = 2,8 \text{ V}$$

$$U_C = V_{CC} - R_C \cdot I_{CQ} = 12 - 3,3k \cdot 2,1m = 5,1 \text{ V}$$

Signalspänningsamplitud:

$$\hat{U}_b = \hat{U}_{in} = 0,1 \text{ V}$$

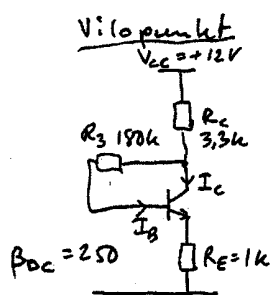
$$\hat{U}_e = \hat{U}_b = 0,1 \text{ V} \quad (\text{emittern följer basen})$$

$$\frac{\hat{U}_c}{\hat{U}_{in}} = - \frac{R_C}{R_E} = - \frac{3,3k}{1k} = -3,3 \Rightarrow \hat{U}_c = 0,33 \text{ V}$$

Spänningen på kollektorn är i motfas till inspänningen.

Figur, se svaren i boken!

11.6



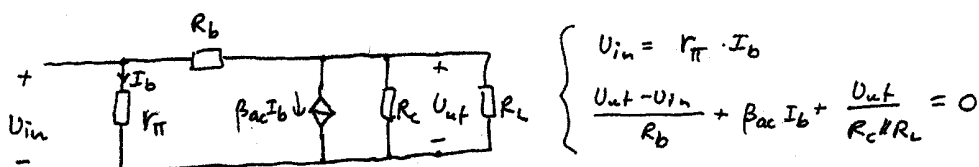
$$V_{CC} - R_C(I_C + I_B) - R_E I_B - U_{BE} - R_E(I_C + I_B) = 0$$

$$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$$

$$I_{CQ} = \frac{E - U_{BE}}{(R_C + R_E)(1 + \frac{1}{\beta_{DC}}) + \frac{R_B}{\beta_{DC}}} = 2.24 \text{ mA} \quad I_{BQ} = 9.0 \mu\text{A}$$

$$U_{CEQ} = E - (I_{CQ} + I_{BQ})(R_C + R_E) = 2.33 \text{ V}$$

$$g_m = \frac{1}{V_T} \cdot I_{CQ} = 89.6 \text{ mA/V} \quad \beta_{AC} = \beta_{DC} = 250 \quad r_{\pi} = \frac{\beta_{AC}}{g_m} = 2.79 \text{ k}\Omega$$

SignalberäkningFörstärkning

$$\frac{U_{out} - U_{in}}{R_b} + \beta_{AC} \cdot \frac{U_{in}}{r_{\pi}} + \frac{U_{out}}{R_C \parallel R_L} = 0$$

$$\frac{\beta_{AC}}{r_{\pi}} = g_m$$

$$U_{out} \left(\frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_C \parallel R_L} \right) = U_{in} \left(\frac{1}{R_b} - \frac{\beta_{AC}}{r_{\pi}} \right)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_C \parallel R_L}} \left(\frac{1}{R_b} - g_m \right) = - \underbrace{g_m R_C \parallel R_L}_{210.6} \underbrace{\left(1 - \frac{1}{g_m R_b} \right)}_{\approx 1} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + \frac{R_C \parallel R_L}{R_b}}}_{0.987} = -208$$

Genom att ställa upp förstärkningsuttrycket på det här sättet
 erhåller vi förstärkningsuttrycket som "vanliga" uttrycket $-g_m R_C \parallel R_L$
 multiplicerat med en korrektionsfaktor $\left(1 - \frac{1}{g_m R_b} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_C \parallel R_L}{R_b}}$

Vi ser dessutom av storleksordningarna att

$$\frac{1}{g_m R_b} \ll 1 \Rightarrow \left(1 - \frac{1}{g_m R_b} \right) \approx 1 \quad \frac{R_C \parallel R_L}{R_b} \ll 1 \Rightarrow \frac{1}{1 + \frac{R_C \parallel R_L}{R_b}} \approx 1$$

Dvs $-g_m R_C \parallel R_L$ duger i regel

(Lite större approximation)

som uttryck för förstärkningen även i denna koppling.

Innreinslans

$$I_{in} = \frac{U_{in} - U_{out}}{R_b} + I_b \approx \frac{U_{in} + g_m R_C \parallel R_L U_{in}}{R_b} + \frac{U_{in}}{r_{\pi}}$$

$$\frac{1}{R_{in}} = \frac{I_{in}}{U_{in}} = \frac{1}{r_{\pi}} + \frac{1 + g_m R_C \parallel R_L}{R_b}$$

$$R_{in} = r_{\pi} \parallel \frac{R_b}{1 + g_m R_C \parallel R_L}$$

$$= 2.79 \text{ k}\Omega \parallel \frac{180 \text{ k}\Omega}{1 + 210.6} = 0.65 \text{ k}\Omega$$

Dvs. R_b ser här ingången ut att vara
 $\frac{1}{1 + g_m R_C \parallel R_L} = \frac{1}{1 + A}$ gånger mindre!

Jämför med millereffekten!

11.7 Beräkna först vilopunkten:

$$E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - R_1 \parallel R_2 \cdot \frac{I_{CQ}}{\beta_{DC}} - V_{BE} - \left(1 + \frac{1}{\beta_{DC}}\right) I_{CQ} \cdot (R_{E1} + R_{E2}) = 0$$

$$\Rightarrow I_{CQ} = 1,9 \text{ mA}$$

$$E - R_C I_{CQ} - V_{CEQ} - \left(1 + \frac{1}{\beta_{DC}}\right) I_{CQ} \cdot (R_{E1} + R_{E2}) = 0$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 3,8 \text{ V} \quad \text{Transistorn är inte i bottenmod} \Rightarrow \text{OK!}$$

Signalparametrar:

$$r_{\pi} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \frac{\beta_{ac}}{\frac{1}{V_T} \cdot I_{CQ}} = \frac{300}{\frac{1}{25 \text{ mV}} \cdot 1,9 \text{ mA}} = 4,0 \text{ k}\Omega$$

Innenistans

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_{\pi} + \beta_{ac} \cdot R_{E1}) = 9,0 \text{ k}\Omega \quad (R_{E2} \text{ avkopplad med } C_E)$$

Förstärkning

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_g} = - \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} \cdot \frac{R_C \parallel R_L}{R_{E1}} = -11,3$$

Icke avkopplat GE-steg

11.8

Beräkna vilopunkten för att erhålla signalparametrar
Antag att basströmmen in till T_1 kan försummas
jämfört med strömmen genom R_1, R_2

$$\Rightarrow I_{C2} \approx \frac{V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 2 \cdot V_{BE}}{R_E} = 2,8 \text{ mA}$$

$$I_{C1} \approx \frac{I_{C2}}{\beta_{DC}} = \frac{2,8 \text{ mA}}{200} = 14 \mu\text{A}$$

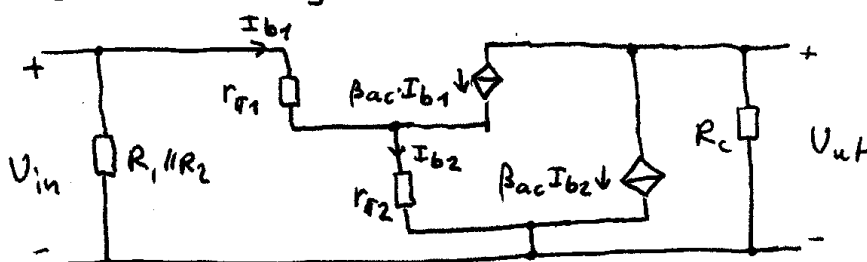
$$g_{m1} = \frac{1}{V_T} \cdot I_{C1} = \frac{1}{25 \text{ mV}} \cdot 14 \mu\text{A} = 0,56 \text{ mA/V}$$

$$r_{\pi 1} = \frac{\beta_{AC}}{g_{m1}} = \frac{200}{0,56 \text{ mA/V}} = 360 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m2} = \frac{1}{V_T} \cdot I_{C2} = \frac{1}{25 \text{ mV}} \cdot 2,8 \text{ mA} = 112 \text{ mA/V}$$

$$r_{\pi 2} = \frac{\beta_{AC}}{g_{m2}} = \frac{200}{112 \text{ mA/V}} = 1,8 \text{ k}\Omega$$

Signalberäkning:



$$\begin{cases} V_{in} = r_{\pi 1} \cdot I_{b1} + r_{\pi 2} \cdot I_{b2} \\ I_{b2} = (\beta_{AC} + 1) I_{b1} \\ V_{out} = -(\beta_{AC} I_{b1} + \beta_{AC} I_{b2}) R_C \end{cases}$$

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{\beta_{AC} I_{b1} + \beta_{AC} (\beta_{AC} + 1) I_{b1}}{r_{\pi 1} I_{b1} + r_{\pi 2} (\beta_{AC} + 1) I_{b1}} \cdot R_C =$$

$$= - \frac{\beta_{AC} + \beta_{AC}^2 + \beta_{AC}}{r_{\pi 1} + r_{\pi 2} (\beta_{AC} + 1)} \cdot R_C \approx - \frac{\beta_{AC}^2}{r_{\pi 1} + \beta_{AC} r_{\pi 2}} \cdot R_C = \left. \begin{matrix} + \\ - \end{matrix} \right\} r_{\pi 1} = \beta_{AC} r_{\pi 2}$$

$$= - \frac{\beta_{AC}}{2 \cdot r_{\pi 2}} \cdot R_C = - \frac{g_{m2}}{2} \cdot R_C = - \frac{112 \text{ mA/V}}{2} \cdot 2,2 \text{ k}\Omega = -124$$

11.9 a)

$$10 \cdot \frac{27k}{27k+120k} - \frac{I_{C1}}{200} \cdot 27k // 120k - 0,7 - 2,2k \cdot I_{C1} \left(1 + \frac{1}{200}\right) = 0$$

$$\Rightarrow I_{C1Q} = 0,49 \text{ mA}$$

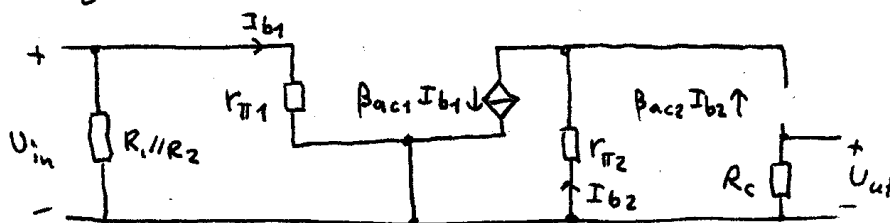
$$I_{C2Q} + I_{B2Q} = I_{C1Q} \Rightarrow I_{C2Q} \approx I_{C1Q} = 0,49 \text{ mA}$$

$$U_{B2} = 10 \cdot \frac{56k}{56k+100k} - I_{B2} \cdot 56k // 100k = 3,5 \text{ V}$$

$$U_{CE1Q} = U_{B2} - 0,7 - 2,2k (I_{C1Q} + I_{B1Q}) \approx 1,7 \text{ V}$$

$$U_{CE2Q} = 10 - (U_{B2} - 0,7) - 8,2k \cdot I_{C2} \approx 3,2 \text{ V}$$

b) Signalschema



$$\begin{cases} U_{in} = r_{\pi 1} \cdot I_{b1} \\ \beta_{ac1} \cdot I_{b1} = I_{b2} + \beta_{ac2} \cdot I_{b2} \\ U_{ut} = -R_c \cdot \beta_{ac2} \cdot I_{b2} \end{cases}$$

Samma vilostöm I_{CQ} för T_1 och T_2

$$\Rightarrow \beta_{ac1} = \beta_{ac2} \text{ och } r_{\pi 1} = r_{\pi 2}$$

$$\begin{aligned} A_V = \frac{U_{ut}}{U_{in}} &= - \frac{R_c \beta_{ac2} I_{b2}}{r_{\pi 1} \cdot I_{b1}} = - \frac{R_c \beta_{ac2} I_{b2}}{r_{\pi 1} \cdot \frac{\beta_{ac2} + 1}{\beta_{ac1}} \cdot I_{b2}} = \\ &= - \frac{\beta_{ac1} \cdot \beta_{ac2}}{r_{\pi 1} (\beta_{ac2} + 1)} R_c \approx - \frac{\beta_{ac}}{r_{\pi}} \cdot R_c = -g_m R_c = \end{aligned}$$

$$c) = - \frac{1}{V_T} \cdot I_{CQ} R_c = - \frac{1}{25m} \cdot 0,49m \cdot 8,2k = -160$$

Kommentar: Det går ungefär samma signalstöm genom båda transistorerna.

$$11.10 \quad I_{CQ} = 0,5 \text{ mA} \Rightarrow g_m = \frac{1}{V_T} I_{CQ} = \frac{1}{25\text{m}} \cdot 0,5\text{mA} = 20 \text{ mA/V}$$

$$a) \quad \frac{U_3 - U_4}{U_1 - U_2} = -g_m R_c = -20\text{m} \cdot 12\text{k} = -240$$

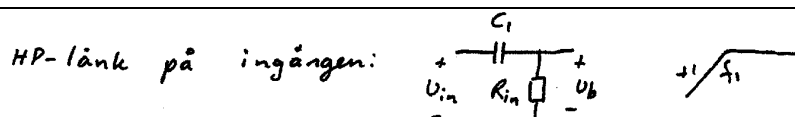
b) I detta fall tas endast halva utspänningen ut.

$$\frac{U_4}{U_1 - U_2} = +\frac{1}{2} g_m R_c = +120$$

c) Ingång 2 jordas ($U_2 = 0$) $\Rightarrow$ Spänningen U_1 fördelas över båda transistorerna

$$\frac{U_3 - U_4}{U_1} = -g_m R_c = -240$$

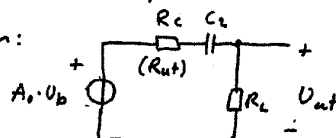
11.11



$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel (r_{\pi} + \beta_{ac} R_E) = 82k \parallel 27k \parallel (4,3k + 350 \cdot 1k) = 19,2 k\Omega$$

$$\frac{U_b}{U_{in}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{j\omega R_{in} C_1}{1 + j\omega R_{in} C_1} = \frac{j f / f_1}{1 + j f / f_1} \quad f_1 = \frac{1}{2\pi R_{in} C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 19,2k \cdot 1\mu} = 8,3 \text{ Hz}$$

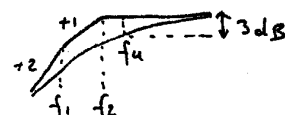
HP-länk på utgången:



$$\begin{aligned} \frac{U_{out}}{A_o U_b} &= \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{j\omega C_2} + R_c} = \frac{j\omega C_2 R_L}{1 + j\omega (R_L + R_c) C_2} = \frac{R_L}{R_L + R_c} \cdot \frac{j\omega C_2 (R_L + R_c)}{1 + j\omega C_2 (R_L + R_c)} = \\ &= \frac{R_L}{R_L + R_c} \cdot \frac{j f / f_2}{1 + j f / f_2} \end{aligned}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi (R_L + R_c) C_2} = \frac{1}{2\pi (10k + 3,3k) \cdot 1\mu} = 12 \text{ Hz}$$

Brytfrekvenserna ligger nära varandra och resulterande undre gränshänsen ligger högre än 12 Hz.



Beräkning av resulterande gränshänsen:

$$\frac{f/f_1}{\sqrt{1 + (f/f_1)^2}} \cdot \frac{f/f_2}{\sqrt{1 + (f/f_2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$2 \cdot \left(\frac{f}{f_1} \cdot \frac{f}{f_2} \right)^2 = \left(1 + \left(\frac{f}{f_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{f}{f_2} \right)^2 \right)$$

$$2 \cdot \frac{f^4}{f_1^2 \cdot f_2^2} = 1 + \frac{f^2}{f_1^2} + \frac{f^2}{f_2^2} + \frac{f^4}{f_1^2 \cdot f_2^2}$$

$$f^4 - f_1^2 \cdot f_2^2 \left(\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} \right) f^2 - f_1^2 \cdot f_2^2 = 0$$

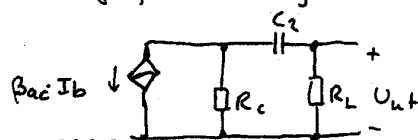
$$\text{Sätt in } f_1 = 8,3 \text{ Hz och } f_2 = 12 \text{ Hz}$$

$$f^4 - 212 f^2 - 9829 = 0$$

$$f^2 = \frac{212}{2} \pm \sqrt{\frac{212^2}{4} + 9829} = 106 \pm 114,5 = 251$$

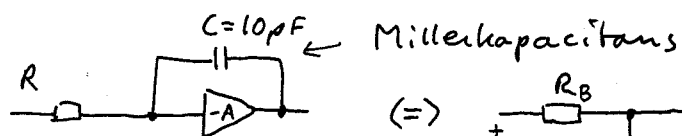
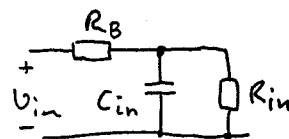
$$f = \sqrt{251} = 15,8 \text{ Hz} = \text{undre gränshänsen.}$$

Kommentar: Alternativt kan HP-länken på utgången beräknas utifrån följande signalschema:



Vilket naturligtvis ger samma resultat.

11.12

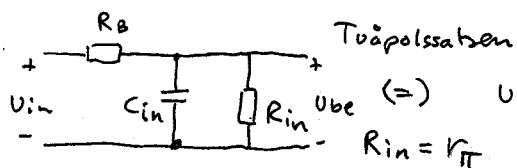
 $(\Rightarrow)$ 

A är förstärkning
från transistorens bas
till kollektor

Se avsnittet om
Millereffekten

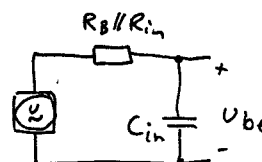
$$A = g_m R_c = 150 \cdot 1,5k = 225$$

$$C_{in} = A \cdot C = 225 \cdot 10p = 2,25 \text{ nF}$$

 $(\Rightarrow)$

$$U_{in} \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_B}$$

$$R_{in} = r_{\pi}$$



$$f_o = \frac{1}{2\pi R_B // R_{in} \cdot C_{in}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10k // 2k \cdot 2,25n} = 42 \text{ kHz}$$

$$12.1 \quad I_D = \frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

Transistorerna har samma k' , L , U_{GS} och U_T

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{W_2}{W_1} \Rightarrow W_2 = W_1 \cdot \frac{I_{D2}}{I_{D1}} = W_1 \cdot \frac{250 \mu A}{100 \mu A} = 2,5 W_1$$

Transistor T_2 skall vara 2,5 gånger bredare än T_1

$$12.2 \quad a) \quad I_{ref} = I_{D1} = \frac{1}{2} k' \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2$$

$$100 \mu A = \frac{1}{2} \cdot 200 \mu A \cdot 10 \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

$$U_{GS} - U_T = \frac{1}{\sqrt{10}} = 0,316 V$$

$$U_{GS} = U_T + 0,316 = 0,7 + 0,316 = 1,016 V$$

$$R_{ref} = \frac{V_{DD} - U_{GS}}{I_{ref}} = \frac{3 - 1,016}{0,1 mA} = 19,8 k\Omega$$

b) Transistorn skall arbeta i mättnadsområdet
där $U_{DS} > U_{GS} - U_T \Rightarrow U_{UT} > U_{GS} - U_T = 0,316 V$

$$c) \quad r_o = r_{o2} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D} = \frac{U_A}{I_D} = \frac{20}{0,1 mA} = 200 k\Omega$$

$$d) \quad r_o = \frac{\Delta U_{UT}}{\Delta I} \Rightarrow \Delta I = \frac{\Delta U_{UT}}{r_o} = \frac{1}{200 k} = 5 \mu A$$

12.3

$$U_{T1} = U_{T0} = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{GS1} = U_{UT} = 1,5 \text{ V}$$

$$T_1: I_D = \frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L} (U_{UT1} - U_{T1})^2$$

$$\frac{W}{L} = \frac{I_D}{\frac{1}{2} k' (U_{UT1} - U_{T1})^2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{\frac{150 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot (1,5 - 0,7)^2} = 10,4$$

$$W_1 = 10,4 \cdot 4 \mu\text{m} = 42 \mu\text{m}$$

$$T_2: U_{T2} = U_{T0} + \gamma \left(\sqrt{2 \phi_f + U_{T1}} - \sqrt{2 \phi_f} \right) =$$

$$= 0,7 + 0,6 \left(\sqrt{0,8 + 1,5} - \sqrt{0,8} \right) = 1,07$$

$$I_D = \frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{DD} - U_{UT} - U_{T2})^2 \quad U_{GS2} = V_{DD} - U_{UT}$$

$$\frac{W}{L} = \frac{I_D}{\frac{k'}{2} \cdot (V_{DD} - U_{UT} - U_{T2})^2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{\frac{150 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot (5 - 1,5 - 1,07)^2} = 1,13$$

$$W_2 = 1,13 \cdot 4 \mu\text{m} = 4,5 \mu\text{m}$$

12.4

$$A_v = -g_{m1} \frac{1}{g_{m2}} = - \frac{g_{m1}}{g_{m2}} = - \frac{\sqrt{\frac{W_1}{L_1}}}{\sqrt{\frac{W_2}{L_2}}}$$

$$L_1 = L_2 \Rightarrow A_v = - \sqrt{\frac{W_1}{W_2}} = - \sqrt{10} = -3,2$$

12.5

$$A_v = -(g_{m1} + g_{m2}) \cdot \frac{1}{g_{o1} + g_{o2}} \quad \begin{array}{l} \text{Transistorerna} \\ \text{Jobbar parallellt} \end{array}$$

$$g_m = \frac{2 I_{DQ}}{U_{GSQ} - U_T} \quad g_o = \lambda \cdot I_{DQ}$$

$$I_{DQ} = \frac{k'}{2} \cdot \frac{W}{L} (U_{GS} - U_T)^2 \quad (U_{GS1} = |U_{GS2}| = 2,5 \text{ V})$$

$$\begin{array}{l} T_1: \quad I_{DQ1} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{8}{4} (2,5 - 0,7)^2 = 0,5 \text{ mA} \\ T_2: \quad I_{DQ2} = \frac{52 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{30}{4} (2,5 - 0,9)^2 = 0,5 \text{ mA} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} T_1 \\ T_2 \end{array}} \right\} \text{ok!}$$

$$T_1: \quad g_{m1} = \frac{2 \cdot 0,5 \text{ m}}{2,5 - 0,7} = 0,56 \text{ mA/V}$$

$$g_{o1} = 0,03 \cdot 0,5 \text{ m} = 0,015 \text{ mS}$$

$$T_2: \quad g_{m2} = \frac{2 \cdot 0,5 \text{ m}}{2,5 - 0,9} = 0,63 \text{ mA/V}$$

$$g_{o2} = 0,09 \cdot 0,5 \text{ m} = 0,045 \text{ mS}$$

$$A_v = - \frac{g_{m1} + g_{m2}}{g_{o1} + g_{o2}} = - \frac{0,56 \text{ m} + 0,63 \text{ m}}{0,015 \text{ m} + 0,045 \text{ m}} = -20$$

12.6

$$I_{DQ} = \frac{1 \text{ mA}}{2} = 0,5 \text{ mA} \quad \text{för alla transistorer}$$

$$T_3, T_4: \quad g_{o1} = \lambda \cdot I_{DQ} = 0,09 \cdot 0,5 \text{ m} = 0,045 \text{ mS}$$

$$T_1, T_2: \quad g_{oi} = \lambda \cdot I_{DQ} = 0,03 \cdot 0,5 \text{ m} = 0,015 \text{ mS}$$

$$\begin{aligned} g_{mi} &= \frac{2 I_{DQ}}{U_{GS} - U_T} = \sqrt{2 \cdot k' \cdot \frac{W}{L} I_{DQ}} = \\ &= \sqrt{2 \cdot 150 \mu \cdot \frac{42}{4} \cdot 0,5 \text{ m}} = 1,25 \text{ mA/V} \end{aligned}$$

$$A_v = \frac{g_{mi}}{g_{oi} + g_{ol}} = \frac{1,25 \text{ m}}{0,015 \text{ m} + 0,045 \text{ m}} = 21$$

$$12.7 \quad I_{DQ1} = I_{DQ2} = I_{DQ3} = I_{REF} = 100 \mu A$$

$$g_{m1} = \sqrt{2 \cdot I_{DQ1} \cdot k' \cdot \frac{W_1}{L_1}} = \sqrt{2 \cdot 100 \mu A \cdot 180 \mu A/V^2 \cdot \frac{100 \mu m}{2 \mu m}} = 1,34 \text{ mA/V}$$

T_1 förstärkantransistor med T_2 som last.

$$r_{o1} = \frac{1}{\lambda_1 I_{DQ1}} = \frac{1}{0,01 \cdot 100 \mu A} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$r_{o2} = \frac{1}{\lambda_2 I_{DQ2}} = \frac{1}{0,02 \cdot 100 \mu A} = 0,5 \text{ M}\Omega$$

$$A_v = -g_{m1} \cdot (r_{o1} \parallel r_{o2}) = -1,34 \text{ mA/V} \cdot (1000 \text{ k}\Omega \parallel 500 \text{ k}\Omega) = -447$$

12.8 a) $k'_n = \mu_n C_{ox} = 180 \mu A/V^2$ $k'_p = \mu_p C_{ox} = 60 \mu A/V^2$

$$I_{DQ6} = \frac{W_6}{W_5} \cdot 50 \mu A = 100 \mu A$$

$$I_{DQ1} = I_{DQ2} = |I_{DQ3}| = |I_{DQ4}| = \frac{I_{DQ6}}{2} = 50 \mu A$$

$$I_{D8} = |I_{D7}| = 50 \mu A$$

$$g_{m1} = g_{m1} = g_{m2} = \sqrt{2 I_{DQ} \cdot k'_n \cdot \frac{W}{L}} = \sqrt{2 \cdot 50 \mu \cdot 180 \mu \cdot \frac{20}{1}} = 600 \mu A/V$$

$$g_{m7} = \sqrt{2 |I_{DQ7}| \cdot k'_p \cdot \frac{W}{L}} = \sqrt{2 \cdot 50 \mu \cdot 60 \mu \cdot \frac{10}{1}} = 245 \mu A/V$$

$$r_{o2} = \frac{1}{\lambda_n I_{DQ2}} = \frac{1}{0,02 \cdot 50 \mu} = 1 M\Omega = r_{o8}$$

$$r_{o4} = \frac{1}{|\lambda_p \cdot I_{DQ4}|} = \frac{1}{0,02 \cdot 50 \mu} = 1 M\Omega = r_{o7}$$

Småsignalförstärkning för differentiell insignal

$$A_v = \frac{U_{ut}}{U_{in1} - U_{in2}} = - g_{m1} \cdot (r_{o2} \parallel r_{o4}) \cdot g_{m7} \cdot (r_{o7} \parallel r_{o8})$$

$$= - 600 \mu \cdot (1 M \parallel 1 M) \cdot 245 \mu \cdot (1 M \parallel 1 M) = -36750$$

b) I_{n1} är inverterande ingång.

Om spänningen på ingång I_{n1} ökar så kommer strömmen genom T_1 T_3 T_4 att öka så att utspänningen på diffsteget (gate till T_7) också ökar. Då minskar $|U_{GS}|$ för T_7 så strömmen genom T_7 minskar och spänningen i noden U_t minskar. $\Rightarrow I_{n1}$ är inverterande ingång

12.9 a) Strömspegel

b) $I = \frac{E - U_{BE}}{R} = \frac{5 - 0,6}{47k} = 94 \mu A$

- 12.10 a) Samma U_{BE} för T_1 och T_2 och likadana transistorer
 $\Rightarrow$ Strömmen genom R blir lika stor som I .
 Basströmmarna försummas eftersom strömförstärkningen
 är stor. För korrekt funktion är transistorerna
 inte bottenade och $I_c = \beta_{DC} \cdot I_B$ gäller.

$$R = \frac{E - 2U_{BE}}{I} = \frac{5 - 2 \cdot 0,6}{0,17\text{mA}} = \underline{22,4\text{ k}\Omega}$$

- b) När spänningen över R_L blir så stor så att
 transistor T_3 bottenar slutar kopplingen att
 fungera som strömgenerator.

Max spänning över R_L : $U_{Lmax} = E - U_{CESat3} - U_{BE}$
 Transistor T_2 bottenar inte eftersom $U_{CE} = U_{BE}$.

$$R_{Lmax} = \frac{U_{Lmax}}{I} = \frac{E - U_{CESat} - U_{BE}}{I} = \frac{5 - 0,2 - 0,7}{0,17\text{mA}} = \underline{24,1\text{ k}\Omega}$$

- c) Spänningsvariationer pga ändrad belastning R_L upptas
 av transistor T_3 . U_{CE} för T_2 påverkas inte och
 därigenom påverkas inte U_{BE} för T_2 (och T_1).

Om strömmen I tenderar att öka så kommer
 även strömmen i T_2 och T_1 att öka.

Då strömmen i T_1 ökar kommer det att
 minska basströmmen till T_3 så att det
 motverkar strömökningen i T_3 , dvs.
 motkoppling stabiliserar utströmmen I .

12.11

$$\begin{cases} I_{E2} \cdot R_E = V_T \ln \frac{I_{E1}}{I_{E2}} & (V_T = 25 \text{ mV}) \\ I_{E1} \approx \frac{E - U_{BE}}{R} = \frac{5 - 0,6}{10k} = 0,44 \text{ mA} & (I_B \text{ försummas } I \approx I_C) \\ I_{E2} \approx I \end{cases}$$

$$I \cdot 0,27k = 25m \cdot \ln \frac{0,44m}{I}$$

$$I \cdot \frac{0,27k}{25m} = \ln \frac{0,44m}{I}$$

$$I \cdot 10,8k = \ln \frac{0,44m}{I}$$

Ekvationen kan lösas numeriskt eller genom att prova sig fram till en lösning eller med hjälp av datorprogram

$$\Rightarrow I \approx 0,12 \text{ mA}$$

Observera att spänningen över R_E är liten $\approx 0,03V$

Denna koppling ger en lägre ström än referensströmmen $0,44 \text{ mA}$

12.12

Antag att I_B är mycket mindre än strömmen genom R_1 och R_2

$$U_{CE} = \frac{U_{BE}}{R_2} \cdot (R_1 + R_2) = \frac{0,7}{1k} (2,5k + 1k) = 2,45 \text{ V}$$

13.1

$$a) R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_2} = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$\beta = \frac{R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 \parallel \frac{1}{j\omega C_2} + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{j\omega R_2 C_1}{j\omega R_2 C_1 + j\omega R_1 C_1 (1 + j\omega R_2 C_2) + 1 + j\omega R_2 C_2} =$$

$$= \frac{j\omega R_2 C_1}{1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2 + j\omega (R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2)}$$

$$\beta \text{ reellt om } 1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2 = 0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

$$\text{Då är } |\beta| = \frac{R_2 C_1}{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}$$

$$b) f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10k \cdot 0,05\mu \cdot 22k \cdot 0,01\mu}} = 480 \text{ Hz}$$

$$c) |\beta| = \frac{R_2 C_1}{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2} = \frac{22k \cdot 0,05\mu}{10k \cdot 0,05\mu + 22k \cdot 0,05\mu + 22k \cdot 0,01\mu} = 0,60$$

$$|\beta| > 1 \Rightarrow A > \frac{1}{\beta} = \frac{1}{0,60} = 1,65$$

$$A = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \Rightarrow R_3 A = R_3 + R_4 \quad R_3 (A - 1) = R_4 \Rightarrow R_3 = \frac{R_4}{A - 1} = \frac{10k}{1,65 - 1} = 15,3k$$

$$d) A = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad \text{Minskande } R_3 \Rightarrow A \text{ ökar} \therefore R_3 \text{ skall minskas}$$

13.2 Enligt föregående uppgift (12.1) är

$$(2\pi f_0)^2 = \frac{1}{R_1 C_1 R_T C_2} \Rightarrow R_T = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot 10k \cdot 0,1\mu \cdot 0,1\mu} = \frac{253 \cdot 10^6}{f_0^2}$$

$$f_0 = 100 \text{ Hz} \Rightarrow R_T = \frac{253 \cdot 10^6}{100^2} = 25,3 \text{ k}\Omega$$

$$f_0 = 1 \text{ kHz} \Rightarrow R_T = \frac{253 \cdot 10^6}{1000^2} = 253 \Omega$$

$$|\beta| = \frac{R_T C_1}{R_1 C_1 + R_T C_1 + R_T C_2} = \frac{R_T}{R_1 + R_T + R_T}$$

$$R_T = 25,3 \text{ k}\Omega \Rightarrow |\beta| = 0,418$$

$$A = 1 + \frac{R_F}{5k} > \frac{1}{0,418} \Rightarrow R_F > 7,0 \text{ k}\Omega$$

$$R_T = 253 \Omega \Rightarrow |\beta| = 24,1 \cdot 10^{-3}$$

$$1 + \frac{R_F}{5k} > \frac{1}{24,1 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow R_F > 202 \text{ k}\Omega$$

$$f_0 \quad 100 \text{ Hz} \quad 1 \text{ kHz}$$

$$R_T \quad 25,3 \text{ k}\Omega \quad 253 \Omega$$

$$R_F \quad > 7,0 \text{ k}\Omega \quad > 202 \text{ k}\Omega$$

13.3

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$

$$f_{\text{min}} = \frac{f_{\text{nominell}}}{\sqrt{1,1^2 \cdot 1,2^2}} = \frac{f_{\text{nom}}}{1,1 \cdot 1,2} = 0,76 f_{\text{nominell}}$$

$$f_{\text{max}} = \frac{f_{\text{nominell}}}{\sqrt{0,9^2 \cdot 0,8^2}} = \frac{f_{\text{nom}}}{0,9 \cdot 0,8} = 1,39 f_{\text{nominell}}$$

$$13.4 \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10\text{m} \cdot 0,01\mu}} = 15,9 \text{ kHz}$$

$$\frac{(1-k)P}{kP} = \frac{100\text{k}}{5\text{k}} \quad \text{krävs för att förstärkningen skall vara tillräckligt stor för självsvängning}$$

$$\frac{1-k}{k} = 20 \quad 1-k = 20k \Rightarrow k = \frac{1}{21} = 0,0476$$

$$13.5 \quad a) \quad j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} = 0 \quad C_1 = 7,5\text{nF} \quad C_2 = 100\text{pF}$$

$$\omega_0^2 L = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

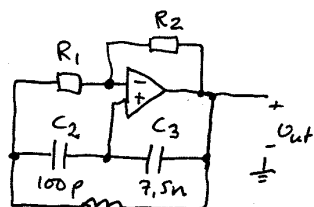
$$\frac{1}{C_{\text{tot}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C_{\text{tot}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 98,7\text{pF}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC_{\text{tot}}} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C_{\text{tot}}} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot C_{\text{tot}}}$$

$$f_0 = 950 \text{ kHz} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi \cdot 950\text{k})^2 \cdot 98,7\text{p}} = 284 \mu\text{H}$$

$$f_0 = 2050 \text{ kHz} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi \cdot 2050\text{k})^2 \cdot 98,7\text{p}} = 61 \mu\text{H}$$

b)



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C_3}}{\frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{C_2}{C_3} = \frac{7,5\text{n}}{0,1\text{n}} = 75$$

$$\text{T.ex. } R_1 = 10\text{k}\Omega \quad R_2 > 750\text{k}\Omega$$

$$13.6 \quad a) \quad C_{\text{tot}} = \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} = 0,21 \text{ nF}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{\text{tot}}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{100\mu \cdot 0,21\text{n}}} = 1,1 \text{ MHz}$$

$$b) \quad \beta = \frac{\frac{1}{j\omega_0 C_2}}{\frac{1}{j\omega_0 C_2} + j\omega_0 L} \quad \text{vid resonans gäller att } \frac{1}{j\omega_0 C_2} + \frac{1}{j\omega_0 C_3} + j\omega_0 L = 0$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{\frac{1}{j\omega_0 C_2}}{-\frac{1}{j\omega_0 C_3}} = -\frac{C_3}{C_2} \quad \text{Återkoppling till minussingången} \Rightarrow \text{rätt fasläge}$$

$$|\beta A| > 1 \Rightarrow |A| > \frac{1}{|\beta|} = \frac{C_2}{C_3} = \frac{4,7\text{n}}{0,22\text{n}} = 21,4$$

$$13.7 \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{tot}} \cdot C}} \quad L_{\text{tot}} = L_2 + L_3 \quad \text{ty} \quad \frac{1}{j\omega_0 C} + j\omega_0 L_2 + j\omega_0 L_3 = 0$$

$$\beta = \frac{j\omega_0 L_2}{j\omega_0 L_2 + \frac{1}{j\omega_0 C}} = \frac{j\omega_0 L_2}{-j\omega_0 L_3} = -\frac{L_2}{L_3} \quad \text{GE-steget inverterande ok!}$$

$$|A| > \frac{1}{|\beta|} \quad \text{krävs, dus } |A| > \frac{L_3}{L_2}$$

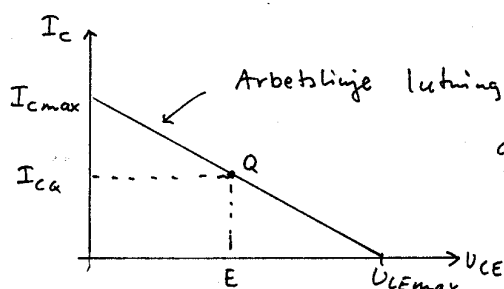
$$13.8 \quad a) \quad \text{Wienbruggsoscillator} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10\text{k} \cdot 22\text{n}} = 723 \text{ Hz}$$

b) Se avsnitt 12.4 i läroboken

14.1 $T_j - T_a = P_f (R_{thjc} + R_{thck} + R_{thka})$

$200 - 50 = 25 (3,0 + 0,5 + R_{thka}) \Rightarrow R_{thka} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ Välj 1,8 °C/W

14.2



Arbetslinje lutning $-\frac{1}{R_L'}$

$R_L' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_L = \left(\frac{3}{1}\right)^2 \cdot 4 = 36 \Omega$

a) $V_{CEQ} = E \quad R_L' = \frac{E}{I_{CQ}}$ (symmetrisk utstyning)

$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{E}{R_L'} = \frac{25}{36} = 0,69 \text{ A}$

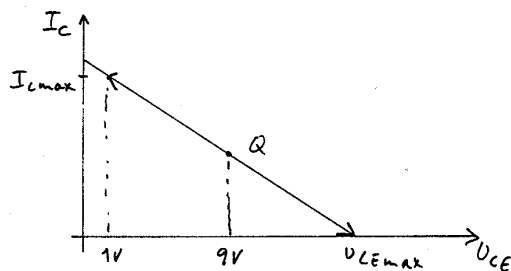
b) $P_{utmax} = \frac{\hat{V}_{max}^2}{2 R_L'} = \frac{E^2}{2 R_L'} = \frac{25^2}{2 \cdot 36} = 8,7 \text{ W}$

c) $P_{fmax} = E \cdot I_{CQ} = 25 \cdot 0,69 = 17,4 \text{ W}$ om utstyning = 0

d) $I_{Cmax} = 2 \cdot I_{CQ} = 2 \cdot 0,69 = 1,4 \text{ A}$

e) $V_{CEmax} = 2 \cdot E = 2 \cdot 25 = 50 \text{ V}$

14.3



$V_{CEQ} = 9 \text{ V}$

Max utstyning $\hat{V}'_{max} = 8 \text{ V}$ på primärsidan

Max utstyning i ström

$\hat{I}'_{max} = \frac{2 \cdot P_{utmax}}{\hat{V}'_{max}} = \frac{2 \cdot 5}{8} = 1,25 \text{ A}$

($P_{utmax} = \frac{\hat{V}'_{max} \cdot \hat{I}'_{max}}{2}$)

$\Rightarrow I_{CQ} = 1,25 \text{ A}$

$R_L' = \frac{\hat{V}'_{max}}{\hat{I}'_{max}} = \frac{8}{1,25} = 6,4 \Omega \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R_L'}{R_L}} = \sqrt{\frac{6,4}{8}} = 0,89$

$P_{fmax} = V_{CEQ} \cdot I_{CQ} = 9 \cdot 1,25 = 11,25 \text{ W}$ (vid utstyning = 0)

$V_{CEmax} = 9 + 8 = 17 \text{ V}$

$I_{Cmax} = 2 \cdot I_{CQ} = 2 \cdot 1,25 = 2,5 \text{ A}$

Kylning: $175 - 50 = 11,25 (2 + 0,5 + R_{thkylfläm})$

$\Rightarrow R_{thkylfläm} = 8,6 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ Välj kylfläms med $R_{th} < 8,6 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

- 14.4 a) Maximal utstyrning $\hat{U}_{max} = 30V$ om transistorerna antas kunna styras ut ned till $U_{CE} = 0V$.

$$P_{utmax} = \frac{\hat{U}_{max}^2}{2R_L} = \frac{30^2}{2 \cdot 8} = 56W \quad (\text{sinus})$$

- b) Max förlusteffekt inhäffan vid kritisk utstyrning

$$X_{krit} = \frac{2}{\pi} \quad (\text{sinus}) \quad \hat{U}_{krit} = 30 \cdot \frac{2}{\pi}$$

Vid kritisk utstyrning är $2P_{fmax} = P_{ut}$

$$2P_{fmax} = P_{utkrit} = \frac{(\hat{U}_{krit})^2}{2 \cdot R_L} = \frac{(30 \cdot \frac{2}{\pi})^2}{2 \cdot 8} = 22,8W$$

$$P_{fmax} = \frac{22,8}{2} = 11,4W$$

Kylning: $T_j - T_a = P_{fmax} (R_{thj-a} + R_{thc-a})$

$$\Rightarrow R_{thc-a} = \frac{200-50}{11,4} - 1,5 = 11,7 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad \text{Välj kylfläns med lägre termisk resistans!}$$

- c) $U_{CEmax} = 2 \cdot E = 60V$ När en transistor styrs ut till 0V får den andra transistorn hela matningsspänningen som U_{CE}

$$I_{Cmax} = \frac{\hat{U}_{max}}{R_L} = \frac{30}{8} = 3,75A$$

Välj transistor med $U_{CEmax} > 60V$, $I_{Cmax} > 3,75A$ och $P_{fmax} > 11,4W$

- d) C_2 uppladdad till en likspänning. När utspänningen ökar följer potentialen i punkten mellan R_1 och R_2 med och förbättrar drivningen av T_1 under positiva haluperioder. T_1 får basström från C_2 när utspänningen går upp mot 30V. Detta kallas för bootkap.

14.5

a) Dioderna ger förspänning U_{BE} till sluthansistorena.

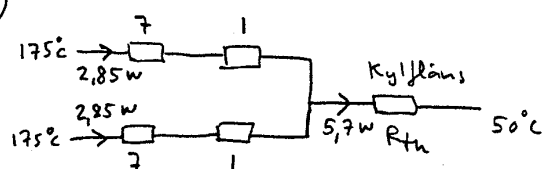
$$b) \hat{U}_{max} = \frac{30}{2} - 1 = 14V \Rightarrow P_{utmax} = \frac{\hat{U}^2}{2R_L} = \frac{14^2}{2 \cdot 4} = 24,5W$$

Teoretisk full utstyrning är $\hat{U} = \frac{E}{2} = 15V$

$$c) 2P_{fmax} = P_{utkrit} = \frac{\hat{U}_{krit}^2}{2 \cdot R_L} = \frac{(\frac{2}{\pi} \cdot 15)^2}{2 \cdot 4} = 11,4W$$

$$P_{fmax} = 5,7W$$

d)



$$175 - 50 = 5,7(7+1) + 11,4 \cdot R_{Th}$$

$$R_{Th} = 6,9^\circ C/W$$

e) Med P regleras så att mittpunkten vid emitterna

ligger på $\frac{E}{2} = 15V$ så att symmetrisk utstyrning erhålles.

$$f) P_{utmax} = \frac{\hat{U}_{max}^2}{R_L} = \frac{14^2}{4} = 49W$$

$$g) 2P_{fmax} = P_{utkrit} = \frac{\hat{U}_{krit}^2}{R_L} = \frac{(0,5 \cdot 15)^2}{4} = 14W$$

$$P_{fmax} = \underline{7W}$$

h)

$$U_{CEmax} = E = 30V (= E - U_{CEmin} = 29V)$$

på den transistor som inte leder.

$$I_{Cmax} = \frac{\hat{U}}{R_L} = \frac{14}{4} \approx 3,5A.$$

14.6

$$P_{ut} = \frac{1}{2} \frac{\hat{U}^2}{R_L} \Rightarrow \hat{U} = \sqrt{2R_L P_{ut}} = \sqrt{2 \cdot 4 \cdot 70} = 23,7V$$

$$U_{CEmin} = 2V \Rightarrow E = \hat{U} + U_{CEmin} \approx 26V$$

$$U_{CEmax} \approx 2 \cdot E = 2 \cdot 26 = 52V$$

$$I_{Cmax} = \frac{\hat{U}}{R_L} \approx \frac{24}{4} = 6A$$

$$2P_{fmax} = P_{utkrit} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\hat{U}_{krit}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\frac{2}{\pi} \cdot 26)^2}{4} \approx 34W$$

$$P_{fmax} = \underline{17W}$$

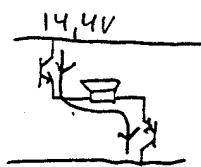
14.7

Transistorerna leder korsvis

$$\Rightarrow \hat{U}_{\max} = 14,4 \text{ V}$$

$$P_{\text{utmax}} = \frac{1}{2} \frac{\hat{U}^2}{R_L} = \frac{14,4^2}{2 \cdot 8} = 13 \text{ W}$$

(= 4 qqr mer än med ett slutsteg)



Positiv
halvperiod



Negativ
halvperiod

14.8

$$2 P_{f\max} = P_{\text{utkrift}} = \frac{(x_{\text{krit}} \cdot E)^2}{2 \cdot R_L} = \frac{(\frac{2}{\pi} \cdot 15)^2}{2 \cdot 4} = 11,4 \text{ W}$$

All förlusteffekt utvecklas i samma kapsel

$$T_j - T_a = 2 P_f \cdot R_{th}$$

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{2 P_f} = \frac{150 - 50}{11,4} = 8,8 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{th\text{fläns}} = R_{th} - R_{th\text{kapsel}} = 8,8 - 3 = 5,8 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Välj en kylfläns med termisk resistans
lägre än $5,8 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

$$15.1 \quad a) \quad \left. \begin{aligned} I_{L\max} &= \frac{U_Z}{R_{L\min}} = \frac{4,7}{1k} = 4,7 \text{ mA} \\ I_{Z\min} &= 0,1 \text{ mA} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_{tot} = 4,8 \text{ mA}$$

Lägstaspanning (10V) skall kunna ge 4,8 mA genom R_1

$$\frac{10 - 4,7}{R_1} = 4,8 \text{ mA} \Rightarrow R_1 = \frac{10 - 4,7}{4,8 \text{ mA}} = 1,1 \text{ k}\Omega = R_{1\max}$$

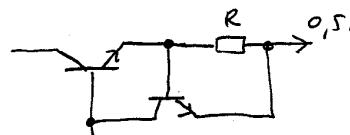
b) Störst ström genom Z om $I_L = 0$ ($R_L = \infty$)

$$I_{Z\max} = \frac{U_{IN\max} - U_Z}{R_1} = \frac{15 - 4,7}{820} = 12,6 \text{ mA}$$

$$c) \quad P_{f\max} = U_Z \cdot I_{Z\max} = 4,7 \cdot 12,6 \text{ mA} = 59 \text{ mW}$$

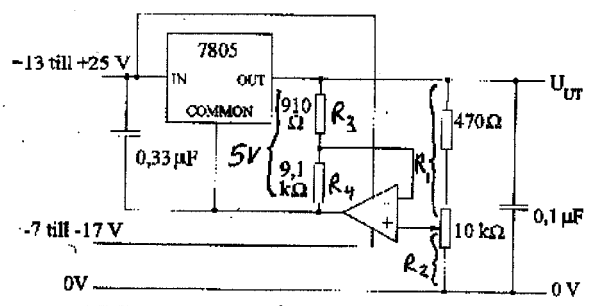
$$15.2 \quad a) \quad U_{OT\min} = \frac{6}{22k + 50k} \cdot (10k + 22k + 50k) = 6,8 \text{ V} \quad (\text{övre läget på } 50k\text{-pot})$$

$$U_{OT\max} = \frac{6}{22k} \cdot (10k + 22k + 50k) = 22,4 \text{ V} \quad (\text{nedre läget på } 50k\text{-pot})$$

b)  $R = \frac{0,7}{0,5} = 1,4 \Omega$

$$c) \quad P_{f\max} = U_{CE\max} \cdot I_{C\max} = (35 - 6,8) \cdot 0,5 = 14,1 \text{ W}$$

15.3



$$a) \quad 5V \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} = U_{OT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{OT} = 5V \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 5 \cdot \frac{0,91k}{0,91k + 9,1k} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 0,455 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Undre läget på pot: $R_2 = 0$, $R_1 = 10,47 \text{ k}\Omega \Rightarrow U_{OT\min} = 0,455 \text{ V}$

Övre läget på pot: $R_1 = 0,47k$, $R_2 = 10k \Rightarrow U_{OT\max} = 10,1 \text{ V}$

b) $R_{sc} = \frac{U_{BE}}{I_{\max}} = \frac{0,7}{3} = 0,23 \Omega$

15.4 a) $U_{R2} = U_3$ och $U_{R2} = U_{R1}$ ty $R_1 = R_2 \Rightarrow U_{UT} = 2 \cdot U_3 = 9,4 \text{ V}$

$$U_{R3} = (U_{UT} + U_{RSC}) \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Strömbevägningen händer i funktion när

$$U_{RSC} = U_{R3} + 0,7$$

$$U_{RSC} = (U_{UT} + U_{RSC}) \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} + 0,7$$

$$\Rightarrow U_{RSC} \left(1 - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = U_{UT} \frac{R_3}{R_3 + R_4} + 0,7 \Rightarrow U_{RSC} = \frac{9,4 \cdot 0,1 + 0,7}{0,9} = 1,82 \text{ V}$$

Strömbevägningen händer alltså i funktion då $U_{RSC} = I_{Lmax} \cdot R_{SC} = 1,82$

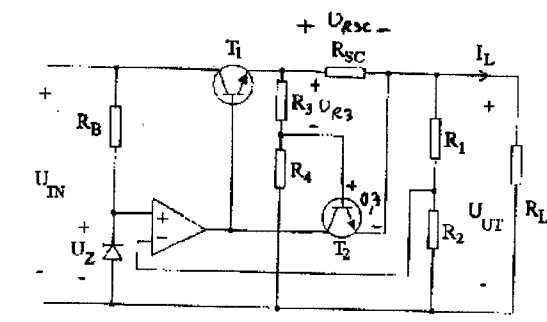
$$\Rightarrow R_{SC} = \frac{1,82}{I_{Lmax}} = 1,82 \Omega$$

b) Om utgången kastslut är $U_{UT} = 0 \text{ V}$

T_2 leder om

$$U_{RSC} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 0,7 \text{ V} \Rightarrow U_{RSC} = \frac{0,7}{0,9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_{Lfoldback} = \frac{U_{RSC}}{R_{SC}} = \frac{0,7}{0,9 \cdot 1,82} = 0,43 \text{ A}$$

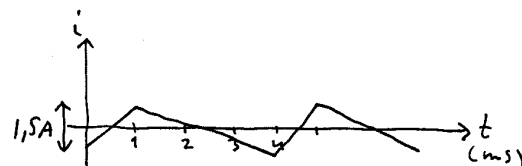


15.5

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} \Rightarrow \Delta I = \frac{U}{L} \cdot \Delta t$$

$$0 - 1 \text{ ms}: \Delta I = \frac{3}{2 \text{ m}} \cdot 1 \text{ m} = 1,5 \text{ A}$$

$$1 - 4 \text{ ms}: \Delta I = \frac{-1}{2 \text{ m}} \cdot 3 \text{ m} = -1,5 \text{ A}$$



15.6 Räkna på första deltonen eftersom högre deltonerna dämpas starkt av LC-filtret.

Delton 1 med frekvensen 10 kHz: $\hat{U} = 5 \cdot \frac{2}{\pi} = \frac{10}{\pi}$

LC-filtret:

$$\frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \approx -\frac{1}{\omega^2 LC}$$

Rippel ut: $\hat{U}_{rippel} = \frac{10}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega^2 LC} = \frac{10}{\pi} \cdot \frac{1}{(2\pi \cdot 10^4)^2 \cdot 1 \text{ m} \cdot 10 \mu} = 80,8 \text{ mV}$

$$\Rightarrow \text{Rippel } 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ V topp till topp}$$

15.7

$$a) U_{UT} = \delta \cdot U_{IN} \Rightarrow \delta = \frac{U_{UT}}{U_{IN}} = \frac{5}{15} = \frac{1}{3}$$

$$b) U_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{U_L}{L}$$

$$\frac{\Delta I_L}{\delta \cdot T} = \frac{U_{IN} - U_{UT}}{L} \Rightarrow \Delta I_L = \frac{U_{IN} - U_{UT}}{L} \cdot \delta \cdot T = \frac{U_{IN} - U_{UT}}{L} \cdot \frac{\delta}{f_s} =$$

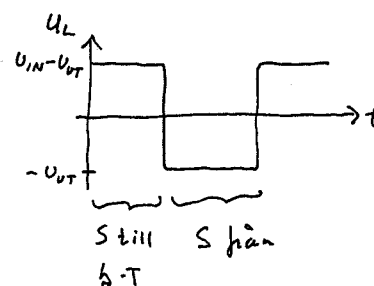
$$= \frac{15 - 5}{330 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1}{3 \cdot 50 \cdot 10^3} = 0,2 \text{ A}$$

15.8

$$\delta = \frac{U_{UT}}{U_{IN}} = \frac{10}{20} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{U_L}{L} \Rightarrow L = \frac{U_L}{\Delta I_L} \cdot \Delta t =$$

$$= \frac{U_{IN} - U_{UT}}{\Delta I_L} \cdot \delta \cdot \frac{1}{f_s} = \frac{20 - 10}{0,4} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{30 \cdot 10^3} =$$



$$= 417 \mu\text{H} \quad \text{Välj t.ex. } L = 470 \mu\text{H}$$

$$\text{Rippel pga kondensatorns ESR: } \Delta U_{UT} = \Delta I_L \cdot \text{ESR} = \\ = 0,4 \cdot 0,06 = 24 \text{ mV}$$

Ripplet som härrör från LC-filtrets dämpning av den sänderhackade inspänningen bör vara i storleksordningen 20-25 mV för att totala ripplet skall undershiga 50 mV

Formel 14-15:

$$\Delta U_{UT} = 2 \cdot \hat{U}_{utac} = \frac{4}{\pi} U_{IN} \cdot \frac{1}{(2\pi f_s)^2 LC}$$

$$\Rightarrow C = \frac{4}{\pi} \cdot U_{IN} \cdot \frac{1}{(2\pi f_s)^2 \cdot L \cdot \Delta U_{UT}} = \frac{4}{\pi} \cdot 20 \cdot \frac{1}{(2\pi 30 \cdot 10^3)^2 \cdot 417 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 69 \mu\text{F} \quad \text{Välj } C = 100 \mu\text{F}$$

$$15.9 \quad U_{UT} = U_{IN} \frac{1}{1-b} \Rightarrow 1-b = \frac{U_{IN}}{U_{UT}} \Rightarrow b = 1 - \frac{U_{IN}}{U_{UT}} = 1 - \frac{10}{30} = \frac{2}{3}$$

$$\{14-17\} \Rightarrow L = \frac{U_{IN} \cdot b T}{\Delta I_L} = \frac{U_{IN} \cdot b}{\Delta I_L \cdot f_s} = \frac{10 \cdot \frac{2}{3}}{0,2 \cdot 30 \cdot 10^3} = 1,1 \text{ mH}$$

$$\{14-21\} \Rightarrow \Delta U_{UT} = \frac{I_{UT} b T}{C} \Rightarrow C = \frac{I_{UT} \cdot b}{\Delta U_{UT} \cdot f_s} = \frac{0,5 \cdot \frac{2}{3}}{30 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^3} = 370 \mu F$$

$$\text{Välj t.ex. } L = 1,2 \text{ mH} \quad C = 390 \mu F$$

17.1 Skindjup

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi f \sigma \mu}}$$

Enligt exempel 15.1 är $\delta = 0,05 \text{ mm}$ vid frekvensen 1 MHz . Vid frekvensen 1 GHz (1000 gånger högre) blir skindjupet

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{1000}} \cdot 0,05 \text{ m} = 1,6 \text{ } \mu\text{m}$$

eftersom $\delta \propto \frac{1}{\sqrt{f}}$

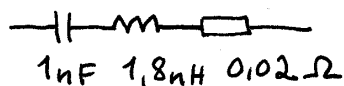
17.2 $C = 1 \text{ nF}$

Serieresonans f_0 vid 120 MHz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 120 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= 1,8 \text{ nH}$$

Vid serieresonansen är impedansen $\approx 0,02 \Omega$ vilket ger serieeristansen



$$17.3 \quad \lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} \cdot f} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{2,3} \cdot 5 \cdot 10^8} = 0,4 \text{ m}$$

$$1 \text{ m lång kabel} \Rightarrow l = \frac{1 \text{ m}}{0,4 \text{ m}} \lambda = 2,5 \lambda \text{ lång}$$

$$17.4 \quad a) \quad \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{50 - 75}{50 + 75} = -0,2$$

$$b) \quad \text{SWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1,2}{0,8} = 1,5$$

$$c) \quad Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + j Z_0 \tan \beta l}{Z_0 + j Z_L \tan \beta l} = \left\{ \begin{array}{l} \beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2} \\ \tan \frac{\pi}{2} = \infty \end{array} \right.$$

$$= 75 \cdot \frac{50 + j 75 \cdot \tan \frac{\pi}{2}}{75 + j 50 \cdot \tan \frac{\pi}{2}} =$$

$$= 75 \cdot \frac{75}{50} \text{ då } \tan \frac{\pi}{2} = \infty$$

$$Z_{in} = 112,5 \Omega$$

19.1 $E_n = \sqrt{4kTRB} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 0,13 \mu V$

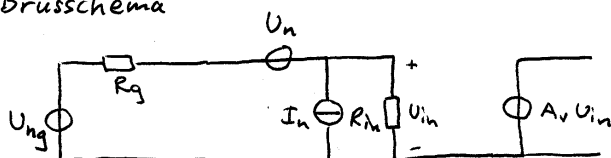
19.2 $I_n = \sqrt{2qIB} = \sqrt{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3} \cdot 10^6} = 18 \text{ pA}$

19.3 Brusfaktor 2 dB motsvarar $10^{\frac{2}{10}}$ gånger
 " 6 dB " " $10^{\frac{6}{10}}$ gånger
 Förstärkning 12 dB motsvarar $10^{\frac{12}{10}}$ gånger
 " 10 dB " " $10^{\frac{10}{10}} = 10$ gånger

$$F_{tot} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} = 10^{\frac{2}{10}} + \frac{10^{\frac{6}{10}} - 1}{10} = 1,88$$

$$F_{tot} = 10 \cdot \log 1,88 = 2,75 \text{ dB}$$

19.4 Brusschema



$$U_n = \bar{U}_n \cdot \sqrt{B} = 3,5 \text{ n} \cdot \sqrt{10^7} = 11,1 \mu V$$

$$I_n = \bar{I}_n \cdot \sqrt{B} = 1,5 \text{ p} \cdot \sqrt{10^7} = 4,74 \text{ nA}$$

$$U_{ng} = \sqrt{4kTRB} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 50 \cdot 10^7} = 2,88 \mu V$$

Bidrag till ingångsbrus:

Generatort $U_{ng} \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} = 2,88 \mu \cdot \frac{100}{100 + 50} = 1,92 \mu V$

Först. sp. brus $U_n \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} = 11,1 \mu \cdot \frac{100}{100 + 50} = 7,38 \mu V$

Först. shömsbrus $I_n \cdot \frac{R_{in} \cdot R_g}{R_{in} + R_g} = 4,74 \text{ n} \cdot \frac{100 \cdot 50}{100 + 50} = 0,16 \mu V$

$$\text{Totalt spänningsbrus på ingången} = \sqrt{1,92^2 + 7,38^2 + 0,16^2} \mu V = 7,63 \mu V$$

Utspanning

Signal: $U_{ut} = U_g \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} \cdot A_v = 25 \text{ m} \cdot \frac{100}{100 + 50} \cdot 40 = 0,67 \text{ V}$

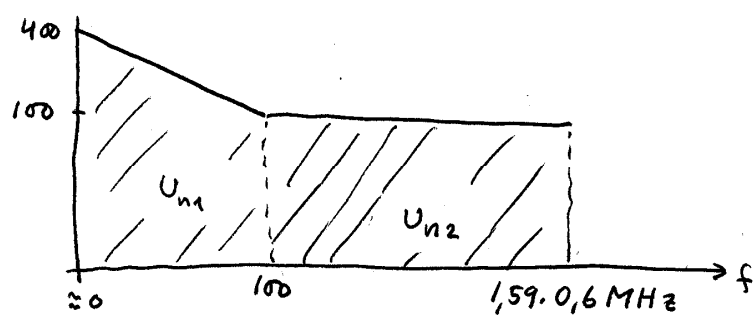
Brus: $U_{nut} = A_v \cdot U_{in} = 40 \cdot 7,63 \mu V = 305 \mu V$

$$SNR = 20 \log \frac{U_{ut}}{U_{nut}} = 20 \log \frac{0,67}{305 \mu} = 67 \text{ dB}$$

19.5 a) $R_g = \frac{U_n}{I_n} = \frac{3,5 \text{ n}}{1,5 \text{ p}} = 2,3 \text{ k}\Omega$

19.6

Approximativt



$$U_{n1}^2 \approx \frac{(400 \cdot 10^{-9})^2 + (100 \cdot 10^{-9})^2}{2} \cdot 100 = 8,5 \cdot 10^{-12} \text{ V}^2$$

$$U_{n2}^2 = (100 \cdot 10^{-9})^2 \cdot (0,6 \cdot 10^6 \cdot 1,59 - 100) = 9,54 \cdot 10^{-9} \text{ V}^2$$

$$U_{nbt} = \sqrt{U_{n1}^2 + U_{n2}^2} = 98 \mu\text{V}$$