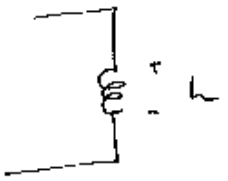
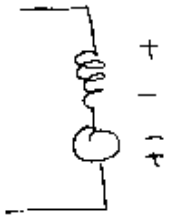
## Tidsplanet



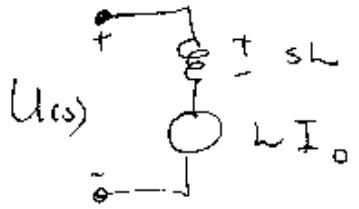

## S-planet




eller $Li(0)$

| | |
|---|---|
| $R$ | $R$ |
| $L$ | $sL$ |
| $C$ | $\frac{1}{sC}$ |
| $u(t)$ | $U(s)$ |
| $u_R(t) = Ri(t)$ | $U_R(s) = RI(s)$ |
| $u_L(t) = L\frac{di(t)}{dt}$ | $U_L(s) = L(sI(s) - i(0))$ |
| | $= sLI(s) - Li(0)$ |

Gå runt med Kirchoff:




- vilket tecken?

$$-U(s) + sLI \overset{?}{\pm} LI_0 = 0$$

$$U(s) = sLI - LI_0$$

Fel i Electric Circuits:

- s. 389 Tabell 16:2
  rad 2: $sL\,I(s) - L\,i(0^+)$
- s. 390 ex. 16.5

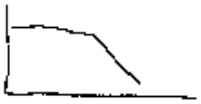
rad 5:

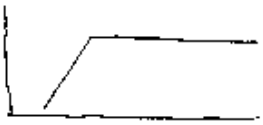
$$RI(s) + sLI(s) - Li(0^+) + \frac{I(s)}{sC} + \frac{Q_0}{sC} = \frac{V_2}{s}$$

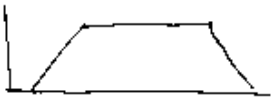
OBS! $\frac{Q_0}{sC} = \frac{V_0}{s}$

Samma fel i figur 16-4 b

Riktningen bestäms av strömmens riktning vid $t=0$.
Är den "positiv" så blir $Li(0)$ "negativ".

lågpass 

högpass 

bandpass 

bandspärr 

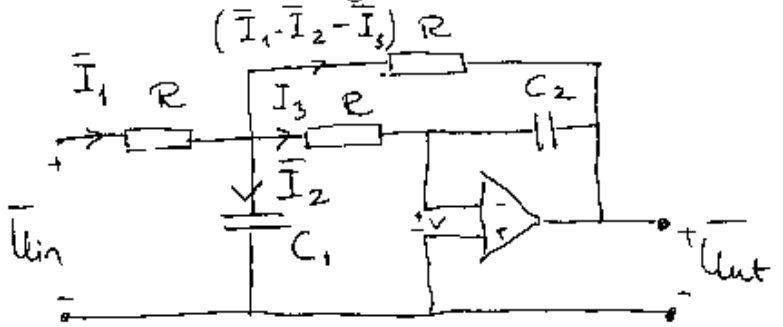
$\bar{G} = \bar{F}$ G som i gain

kvadratisk [lågpass filter länk]

$$\frac{k}{\left(1 + j\frac{f}{f_{br}}\right)\left(1 + j\frac{f}{f_{br}}\right)} = \frac{k}{\left(1 + j\frac{f}{f_{br}}\right)^2}$$

**En 24** Sökes: a) Bodediagram till en kvadratisk lågpassfilterlänk

b) Beräkna C så att den övre gränsfrekvensen blir 5 kHz




$R = 1\,k\Omega$

$C_1 = \frac{3C}{2}$

$C_2 = \frac{2C}{3}$

$$(1)\quad -\bar{U}_{in} + R\bar{I}_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\bar{I}_2 = 0$$

$$(2)\quad -\bar{U}_{in} + R\bar{I}_1 + R\bar{I}_3 + \cancel{V} = 0$$

$$(3)\quad -\bar{U}_{ut} - \frac{1}{j\omega C_2}\bar{I}_3 + \cancel{V} = 0$$

$$(4)\quad -\bar{U}_{ut} - R\left(\bar{I}_1-\bar{I}_2-\bar{I}_3\right) + R\bar{I}_3 + \cancel{V} = 0$$

(3) ger: $\bar{I}_3 = -j\omega C_2 \bar{U}_{ut}$

(2) ger: $\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_{in}}{R} - \bar{I}_3 = \frac{\bar{U}_{in}}{R} + j\omega C_2 \bar{U}_{ut}$

(4) ger: $\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_{ut}}{R} + \bar{I}_1 - 2\bar{I}_3 = \frac{\bar{U}_{ut}}{R} + 3j\omega C_2 \bar{U}_{ut}$

(1) ger: $\cancel{\bar{U}_{in}} = \cancel{R\frac{\bar{U}_{in}}{R}} + Rj\omega C_2 \bar{U}_{ut} + \frac{1}{j\omega C_1}\left(\frac{\bar{U}_{ut}}{R} + \frac{\bar{U}_{in}}{R} + 3j\omega C_2 \bar{U}_{ut}\right)$

$$\Rightarrow\quad 0 = j\omega R C_2 \bar{U}_{ut} + \frac{\bar{U}_{ut}}{j\omega R C_1} + \frac{\bar{U}_{in}}{j\omega R C_1} + \frac{3C_2 \bar{U}_{ut}}{C_1}$$

$$\bar{U}_{ut}\left(j\omega R C_2 + \frac{1}{j\omega R C_1} + \frac{3C_2}{C_1}\right) = -\frac{1}{j\omega R C_1}\bar{U}_{in}$$

$$\bar{F} = \frac{\bar{U}_{ut}}{\bar{U}_{in}} = -\frac{1}{(j\omega R)^2 C_1 C_2 + 1 + 3j\omega R C_2}$$

Givet: $C_1 = \frac{3C}{2}$ och $C_2 = \frac{2C}{3}$ $\Longrightarrow$

$$\bar{F} = -\frac{1}{1 + \cancel{3}j\omega R\frac{2C}{\cancel{3}} + (j\omega R)^2 \frac{\cancel{3}C}{\cancel{2}}\cdot\frac{\cancel{2}C}{\cancel{3}}} = -\frac{1}{1 + 2j\omega RC + (j\omega RC)^2}$$

$$= -\frac{1}{(1 + j\omega RC)^2}$$

$$|\bar{F}| = \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_1}\right)^2}$$ där $f_1 = \frac{1}{2\pi RC}$ = brytfrekvenser

* Låga frekvenser: $f < f_1 \Rightarrow |\bar{F}| = 1 \hat{=} 0\,dB$
* Höga frekvenser: $f > f_1 \Rightarrow |\bar{F}| \sim \frac{1}{f^2} \Rightarrow -40\,dB/dekad$

Vid brytfrekvensen: $|\bar{F}_{br}| = |\bar{F}|_{dB} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow |\bar{F}|_{dB_{max}} - 3\,dB$

Nu: kvadratisk länk $\Rightarrow$ $2 \cdot (-3) = \underline{-6\,dB}$ *

Övregränsfrekvensen definieras som den frekvens där den verkliga förstärkningen ligger 3dB under $|\bar{F}|_{max}$.

Givet: $f_{\ddot{o}} = 5\,kHz$

$$|\bar{F}|(f_{-3dB}) = \frac{1}{1+\left(\frac{5000}{f_1}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

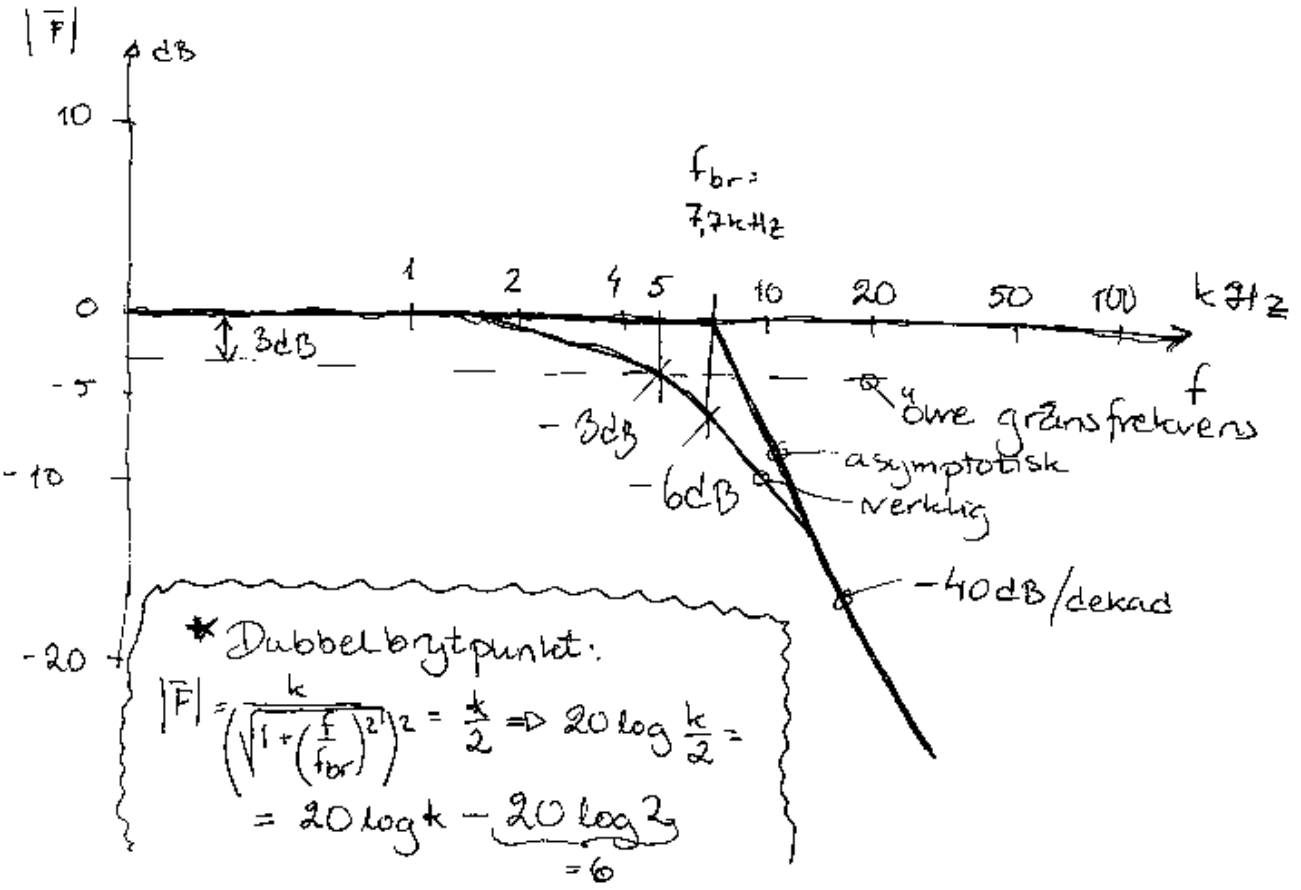
$$\sqrt{2} = 1 + \left(\frac{5000}{f_1}\right)^2 \Leftrightarrow \sqrt{0.414} = \frac{5000}{f_1}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{5000}{\sqrt{0.414}} = 7770\,Hz$$

Givet: $R = 1\,k\Omega \Rightarrow$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 7770} = 2{,}05 \cdot 10^{-8} = 20\,nF$$

Svar: $C_1 = \frac{3C}{2} = \underline{30\,nF}$ $\quad C_2 = \frac{2C}{3} = \underline{14\,nF}$



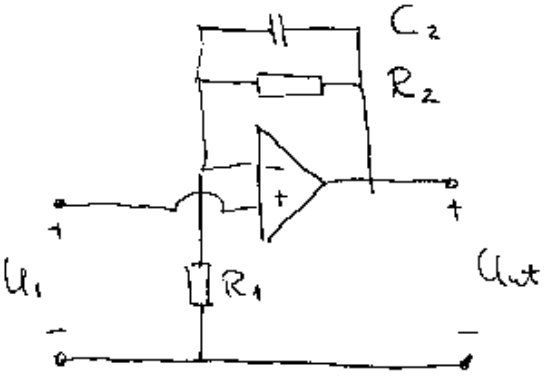

* Dubbelbrytpunkt:

$$|\bar{F}| = \frac{k}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_{br}}\right)^2}\right)^2} = \frac{k}{2} \Rightarrow 20\log\frac{k}{2} =$$

$$= 20\log k - \underbrace{20\log 2}_{=6}$$

En 26 Svar: a) Brytfrekvens (-er), låg- och högfrekvens-förstärkning för OP-kopplingen

b) Rita asymptotiskt Bode-diagram




$R_1 = 3{,}8\,k\Omega$
$R_2 = 34\,k\Omega$
$C_2 = 47\,nF$

$$\bar{F} = 1 + \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1}$$

$$\left.\begin{aligned} \bar{Z}_1 &= R_1 \\ \bar{Z}_2 &= \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1} = \frac{\frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}}{R_1} = \dots\dots = \frac{R_2}{R_1(1 + j\omega R_2 C_2)}$$

$$\bar{F} = 1 + \frac{R_2}{R_1 \cdot (1 + j\omega R_2 C_2)} = \frac{R_1 + R_2 + j\omega R_1 R_2 C_2}{R_1(1 + j\omega R_2 C_2)} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \frac{\left(1 + j\omega \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C_2\right)}{(1 + j\omega R_2 C_2)}$$

$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{\left(1 + j\frac{f}{f_1}\right)}{\left(1 + j\frac{f}{f_2}\right)}$$

där: $\frac{\cancel{f}}{f_1} = \frac{2\pi \cancel{f} R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C_2 \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C_2} = \underline{\underline{990\,Hz}}$

$\frac{\cancel{f}}{f_2} = 2\pi \cancel{f} R_2 C_2 \Rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \underline{\underline{100\,Hz}}$

Låga frekvenser: $f \ll f_2$ och $f_1$

$$|\bar{F}| = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 9{,}95 \text{ ggr} \triangleq 20\,dB \quad \Big\} \; 20 \log 10 = 20\,dB$$

Höga frekvenser: $f \gg f_1$ och $f_2$

$$|\bar{F}| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{f_2}{f_1} = 1 \triangleq 0\,dB \qquad \Big\} \; 20 \log 1 = 0\,dB$$

Argumentet: $\arg \bar{F} = \arctan \frac{f}{f_1} - \arctan \frac{f}{f_2}$

Låga frekvenser: $f \ll f_2$ och $f_1$

$\arg \bar{F} = 0$

Då $f_2 < f < f_1$

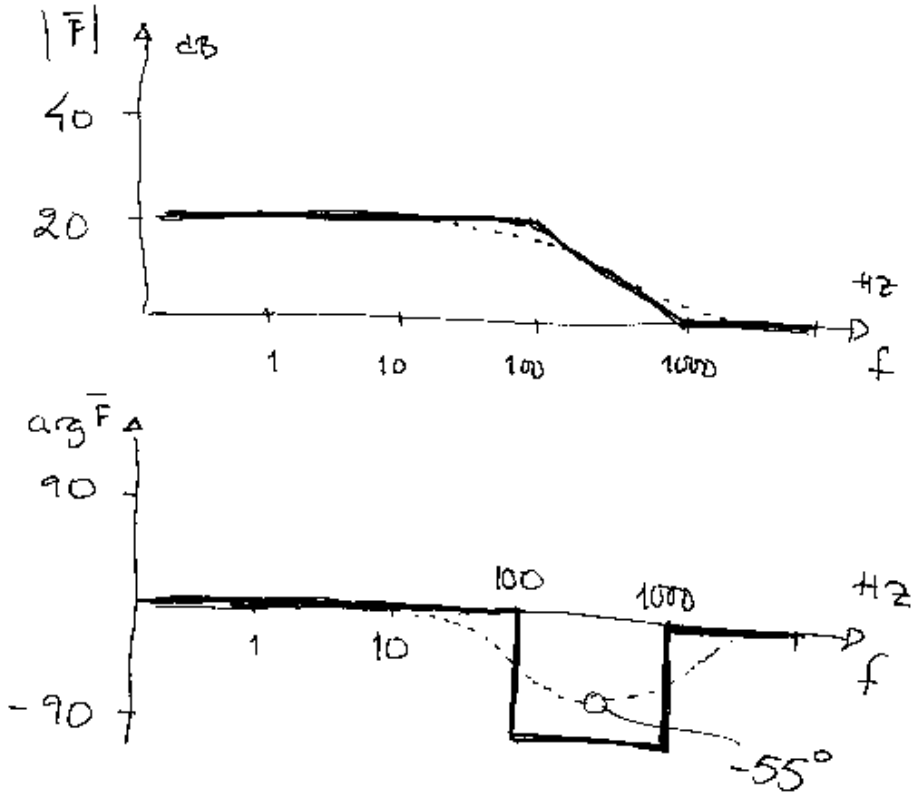
$\arg \bar{F} = 0° - 90° = -90°$

Höga frekvenser: $f \gg f_1$ och $f_2$

$\arg \bar{F} = 90° - 90° = 0°$

Svar: a) 100 Hz och 990 Hz

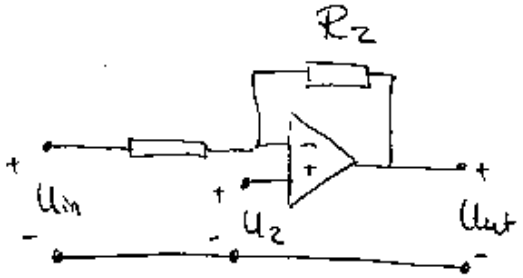
b)



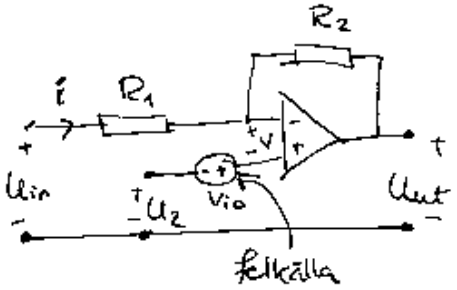
## Icke ideal OP-förstärkare

se teori Elektronikboken s. 25ff + 50

Egentligen är ju OP:n inte ideal.
Approximationen med ideal OP gäller bara då de ingående resistanserna väljs 100 Ω – 1 MΩ.




Om $U_{in} = 0$ bör $U_{ut} = 0$, med det blir inte riktigt noll, bla beroende av input offset voltage, $V_{io}$, som definiera enl.:




$U_{in} = U_2 = 0$

(1) $R_1 i + v + V_{io} = 0 \Rightarrow i = -\frac{V_{io}}{R_1}$

(2) $R_1 i + R_2 i + U_{ut} = 0 \Rightarrow U_{ut} = -i(R_1 + R_2)$

$$U_{ut} = (R_1 + R_2)\frac{V_{io}}{R_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{io} \Rightarrow \text{Felspänning}$$

se s. 50 för storleken av $V_{io}$: $V_{io} = \pm 7_m V_{DC}$

Det finns även ett temperatur beroende: (se s. 50)

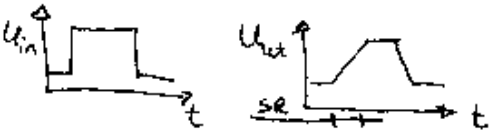
Input Offset Voltage Drift: 7 μV / °C

Åtgärd:
* köpa noggrannare OP
* köpa justerbar OP dvs definiera en nollnivå med hjälp av en summator

## Slew rate (SR)

Elektronikboken s. 28

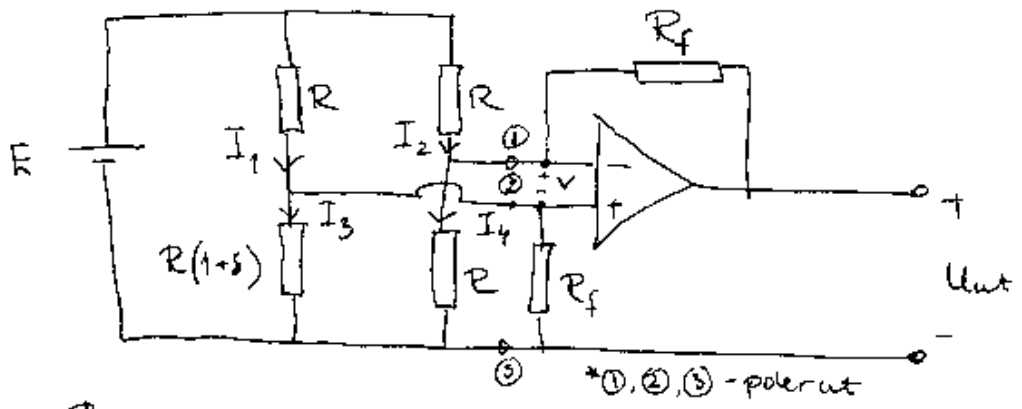
Om man på en OP-koppling lägger en fyrkantspuls på ingången, kommer inte utsignalen att följa insignalen helt. Slew rate är ett mått på hastigheten var med utsignalen ändras då insignalen plötsligt förändras.
Slew rate anges i V/μs.



En 18 Sökes: Utsignalen som funktion av $\delta$

B:6:2

Bryggförstärkarkoppling:




$E = 10\,V$
$R = 600\,\Omega$
$R_f = 120\,k\Omega$
förutsätt att $\delta << 1$
$R_g = R(1+\delta)$
$R << R_f$

Bryggan kan ej göras om till ekvivalent tvåpol, eftersom det finns 3 poler ut*.

Använd Kirchoff:

(1) $-U_{ut} - R_f(I_2 - I_4) + \cancel{V} + R_f(I_1 - I_3) = 0$

(2) $-E + RI_1 + R(1+\delta)I_3 = 0$

(3) $-E + RI_1 + R_f(I_1 - I_3) = 0$

(4) $RI_4 - R(1+\delta)I_3 - \cancel{V} = 0$

(5) $RI_1 - \cancel{V} - RI_2 = 0$

(1) ger: $U_{ut} = R_f(I_1 - I_3 - I_2 + I_4)$

(5) ger $I_1 = I_2 \Rightarrow U_{ut} = R_f(I_4 - I_3)$

(4) ger $I_4 = (1+\delta)I_3 \Rightarrow U_{ut} = R_f(I_3 + \delta I_3 - I_3) = R_f \delta I_3$

(3) ger $E = (R + R_f)I_1 - R_f I_3$

$$I_1 = \frac{E}{R+R_f} + \frac{R_f}{R+R_f} I_3$$

(2) ger $E = R\left(\frac{E}{R+R_f} + \frac{R_f}{R+R_f} \cdot I_3\right) + R(1+\delta)I_3$

forts En 18

D:6:3

$$\frac{E}{R} - \frac{E}{R+R_f} = \left(1+\delta+\frac{R_f}{R+R_f}\right) I_3$$

$$\frac{\cancel{ER} + E\cdot R_f - \cancel{ER}}{R(R+R_f)} = \frac{(R+R_f)(1+\delta)+R_f}{(R+R_f)} \cdot I_3$$

$$I_3 = \frac{E\cdot\frac{R_f}{R}}{R_f+(R+R_f)(1+\delta)} = \frac{E}{R\left(1+\left(\frac{R}{R_f}+1\right)(1+\delta)\right)}$$

$$U_{ut} = \frac{R_f \cdot \delta \cdot E}{R\cdot\left[1+\left(1+\frac{R}{R_f}\right)(1+\delta)\right]}$$

$$\frac{R}{R_f} = \frac{600}{120\cdot 10^3} = 5\cdot 10^{-3} \ll 1$$

$$U_{ut} \approx E\cdot\frac{R_f}{R}\cdot\frac{\delta}{1+(1+\delta)}$$

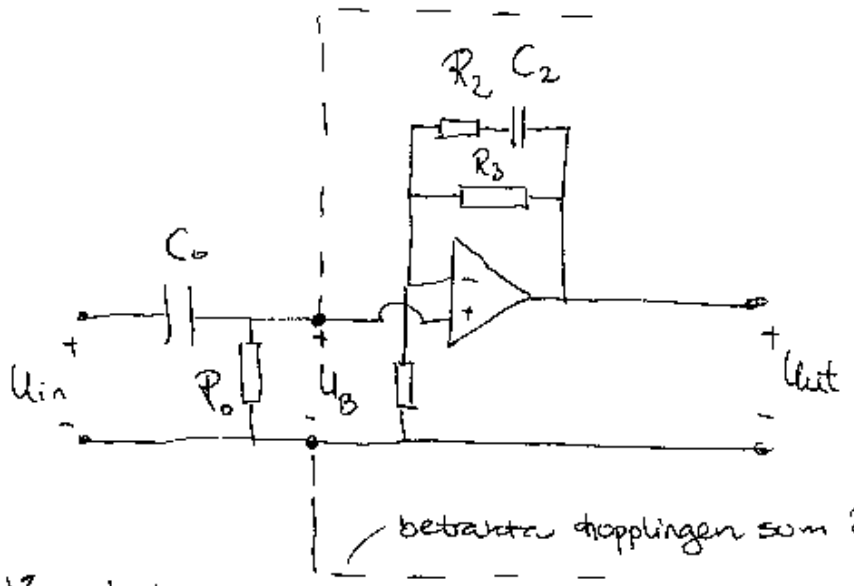
$$U_{ut} \approx E\cdot\frac{R_f}{R}\cdot\frac{\delta}{2} = 10\cdot 200\cdot\frac{\delta}{2} = 1000\,\delta$$

Svar: $U_{ut} = 1000\,\delta$

En 29 Sökes: Förstärkningen

Rita asymptotiskt Bodediagram






$R_0 = 10k\Omega$
$R_1 = 1k\Omega$
$R_2 = 10k\Omega$
$R_3 = 100k\Omega$
$C_0 = 1\mu F$
$C_2 = 10nF$

Högra halvan:

$$\bar{F} = \frac{\bar{U}_{ut}}{\bar{U}_B} = 1 + \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1}$$

där $\bar{Z}_1 = R_1$

$$\bar{Z}_2 = \frac{\left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right)R_3}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_3} = \dots = \frac{R_3\left(1 + j\omega R_2 C_2\right)}{1 + j\omega(R_2 + R_3)C_2}$$

Vänstra halvan:

$$\bar{U}_B = \frac{\bar{U}_{in}}{R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} \cdot R_0$$

Ohms lag:

$$\bar{U}_B = \frac{U}{Z_{serie}} \cdot R$$

dägg ihop HH & VH:

$$\bar{F} = \frac{\bar{U}_{ut}}{\bar{U}_{in}} = \frac{R_0}{R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} \cdot \left(1 + \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1}\right)$$

$$= \frac{j\omega R_0 C_0}{1 + j\omega R_0 C_0} \cdot \left(1 + \frac{R_3(j\omega C_2 R_2 + 1) \cdot \frac{1}{R_1}}{1 + j\omega C_2(R_2 + R_3)}\right) = \frac{j\omega R_0 C_0}{1 + j\omega R_0 C_0} \cdot \frac{1 + j\omega C_2(R_2 + R_3) + \frac{R_3}{R_1}(j\omega C_2 R_2 + 1)}{1 + j\omega C_2 R_2 + R_3} =$$

$$= \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \cdot \frac{j\omega R_0 C_0}{(1 + j\omega R_0 C_0)} \cdot \frac{\left(1 + j\omega C_2 \frac{R_2 + R_3 + \frac{R_3 \cdot R_2}{R_1}}{1 + R_3/R_1}\right)}{\left(1 + j\omega C_2(R_2 + R_3)\right)}$$

$$\bar{F} = \left(1+\frac{R_3}{R_1}\right) \frac{jf\overbrace{2\pi R_0 C_0}^{\approx 0{,}063}}{1+j\frac{f}{f_1}} \cdot \frac{1+j\frac{f}{f_3}}{1+j\frac{f}{f_2}}$$

$$= \frac{6{,}35 \cdot jf\left(1+j\frac{f}{f_3}\right)}{\left(1+j\frac{f}{f_1}\right)\left(1+j\frac{f}{f_2}\right)}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_0 C_0} = 16\,\text{Hz}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi(R_2+R_3)C_2} = 145\,\text{Hz}$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi\frac{(R_1R_2+R_1R_3+R_2R_3)}{R_1+R_3}\cdot C_2} = 1450\,\text{Hz}$$

då $f = 1\,\text{Hz}$ : $|\bar{F}| = 6{,}35_{ggr} \hat{=} 16\,\text{dB}$

då $f_1 < f < f_2$ : $|\bar{F}| = 6{,}35 \cdot f_1 = 102_{ggr} \hat{=} 40\,\text{dB}$

då $f_3 < f$ : $|\bar{F}| = 6{,}35 \cdot \frac{f_1 \cdot f_2}{f_3} = 10_{ggr} \hat{=} 20\,\text{dB}$

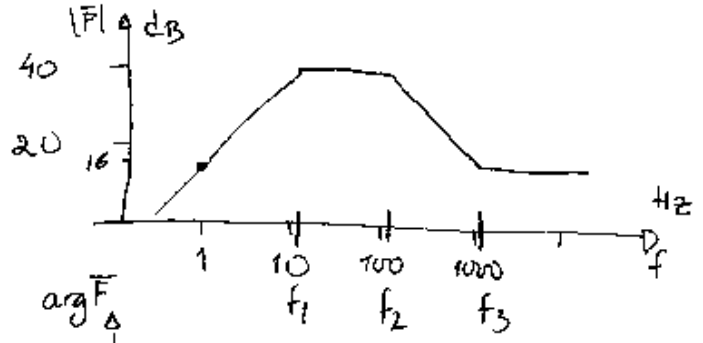
$\arg \bar{F} = \arg k + \arg j + \arctan\left(\frac{f}{f_3}\right) - \arctan\left(\frac{f}{f_1}\right) - \arctan\left(\frac{f}{f_2}\right)$

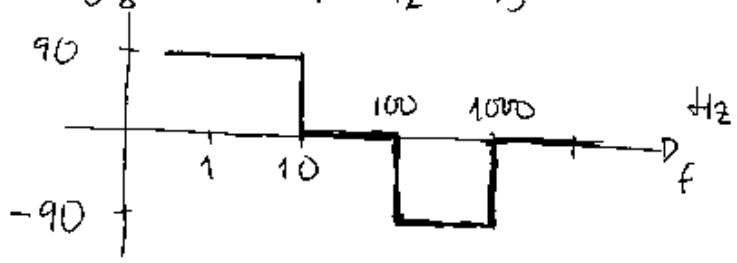
då $f < f_1$ : $\arg \bar{F} = 0 + 90 + 0 - 0 - 0 = 90°$

då $f_1 < f < f_2$ : $\arg \bar{F} = 0 + 90 + 0 - 90 - 0 = 0°$

då $f_2 < f < f_3$ : $\arg \bar{F} = 0 + 90 + 0 - 90 - 90 = -90°$

då $f_3 < f$ : $\arg \bar{F} = 0 + 90 + 90 - 90 - 90 = 0°$

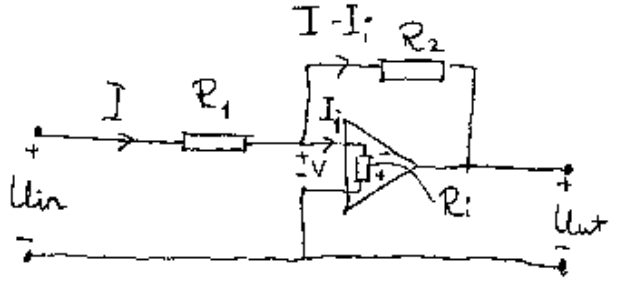


Kn 23 Sökes: a) $\bar{F}$ uttryckt i $R_2, R_1, A$ och $R_i$ (B:6:6)

b) skillnaden, i %, för $\bar{F} = -\frac{R_2}{R_1}$ jämfört med a)

Med detta tal vill man visa att de approximationer som annars används är mycket bra ($A \to \infty$ och $R_i \to \infty$). Trots mycket lägre värden på $A$ och $R_i$ i detta tal så blir felet litet.




$R_1 = 1k\Omega$

$R_2 = 100k\Omega$

$R_1$ & $R_2$ = precisionsmotstånd

OP:n har förhållandevis dåliga värden: $A \geq 4 \cdot 10^4$ [ggr]

$R_i \geq 4 \cdot 10^5 \Omega$

OBS! V-dan här inte anses som noll

(1) $-U_{in} + R_1 I + V = 0$

(2) $-V + R_i I_i = 0$

(3) $-U_{ut} - R_2(I - I_i) + V = 0$

(4) $U_{ut} = -A \cdot V \Rightarrow V = \frac{-U_{ut}}{A}$

(1+4) ger: $I = \frac{U_{in}}{R_1} + \frac{U_{ut}}{R_1 A}$

(2+4) ger: $I_i = \frac{-U_{ut}}{A \cdot R_i}$

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

$$U_{ut} + \frac{R_2 U_{ut}}{R_1 A} + \frac{R_2 U_{ut}}{A R_i} + \frac{U_{ut}}{A} = -\frac{R_2 U_{in}}{R_1}$$

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

Svar: $$\bar{F} = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{A}\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} + 1\right)\right)}$$

$$\bar{F}_{approximativt} = \frac{-R_2}{R_1} = \frac{-100 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = -100 \text{ggr}$$

Enligt a):

$$|\bar{F}_{verklig}| \geq 100 \frac{1}{1 + 2{,}5 \cdot 10^{-5}(100 + 0{,}25 + 1)}$$

$$|\bar{F}_{approx.}| = 100 \text{ ggr}$$

$$|\bar{F}_{verklig}| = 99.75 \text{ ggr}$$

Relativa felet $\sigma$: $\dfrac{|\bar{F}_{approx.}| - |\bar{F}_{verklig}|}{|\bar{F}_{verklig}|}$

$$\sigma = \frac{100 - 99{,}75}{99{,}75} = 0{,}0025\ldots$$

Svar: $\sigma \leq 0{,}25\%$

Med normala värden på A (bex. $> 10^5$) och $R_i > 10^7 \Omega$ erhålles:

$$|\bar{F}_{verklig}| = 99.90$$

$$\sigma = 0.1\%$$

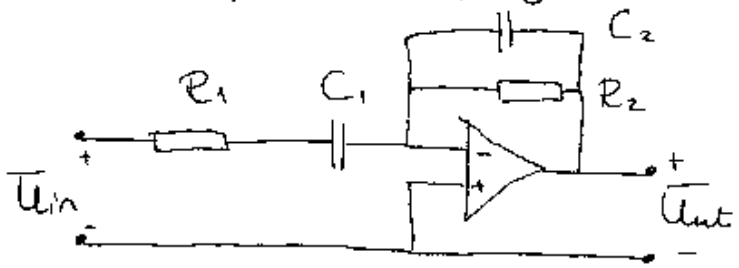
Detta skall jämföras med onoggrannheter på resistanser som är ± 5-10% och kondensatorer ± 20%

En 25 Sökes: a) komponenterna i en smalbandsförstärkare (Extra 6:1)

* asymptotiska bodediagrammet skall luta: +20dB/dekad för $f < 1000$ Hz
  −20dB/dekad för $f > 1000$ Hz
* $|\bar{F}|$ skall vara 34dB vid 1000 Hz
* $|\bar{Z}_{in}|$ skal vara $> 1\,k\Omega$

b) bandbredden

För att konstruera en smalbandsförstärkare tänker man använda en inverterande förstärkar koppling.




$|\bar{F}| = 34\,dB \triangleq 50$ ggr
då $f = 1$ kHz

$$\bar{F} = \frac{\bar{U}_{ut}}{\bar{U}_{in}} = -\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1}$$

$$\bar{Z}_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1 + j\omega R_1 C_1}{j\omega C_1}$$

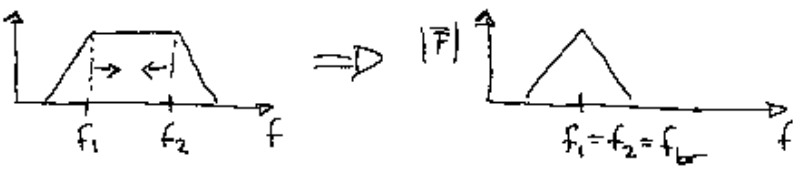
$$\bar{Z}_2 = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$\bar{F} = -\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \cdot \frac{j\omega C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} = -\frac{j\omega C_1 R_2}{\left(1 + j\frac{f}{f_2}\right)\left(1 + j\frac{f}{f_1}\right)} \Rightarrow |\bar{F}| = \frac{2\pi f C_1 R_2}{1 + \left(\frac{f}{f_{br}}\right)^2}$$

$$\Rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad \text{och} \quad f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

då $f_2 = f_1 = f_{br} \Rightarrow 1000$ Hz

dvs




$$|\bar{Z}_{in}| = |\bar{Z}_1| \gtrsim R_1 \Rightarrow \text{Välj } \underline{R_1 = 1.5\,k\Omega}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f \cdot R_1} = \underline{106\,nF}$$

Då $f = 1$ kHz är $f = f_{br} \Rightarrow$

$$|\bar{F}| = \frac{2\pi \cdot 1000 \cdot C_1 R_2}{1 + 1} = \pi\, 1000\, R_2 \cdot 1{,}06 \cdot 10^{-7} = 50$$

Giret: 50ggr = 34dB

forts En 25

Extra 6:2

$$R_2 = \underline{\underline{150\ k\Omega}}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f \cdot R_2} = \underline{\underline{1.06\ nF}}$$

Med insatta värden:

$$|\bar{F}| = \frac{2\pi f \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 10\,6 \cdot 10^{-9}}{1 + \left(\frac{f}{1000}\right)^2} = \frac{0.1\,f}{1 + \left(\frac{f}{1000}\right)^2}$$

Asymptoter: $f \ll 1kHz \Rightarrow |\bar{F}| = 0.1f$

$f \gg 1kHz \Rightarrow |\bar{F}| = \frac{10^5}{f}$

Bandbredd: då förstärkningen sjunkit $3dB \hat{=} \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow$

$$\frac{0.1 \cdot f}{1 + \left(\frac{f}{1000}\right)^2} = \frac{50}{\sqrt{2}} \qquad \frac{50}{\sqrt{2}} \hat{=} 31dB$$

$$10^5 f\sqrt{2} = 50\left(10^6 + f^2\right) \Leftrightarrow f^2 - 2828f + 10^6 = 0$$

$$f = 1414 \pm \sqrt{1414^2 - 10^6}$$

$$f = \begin{cases} 414 \\ 2414 \end{cases}$$

Svar: $B = f_o - f_u = 2414 - 414 = \underline{\underline{2kHz}}$