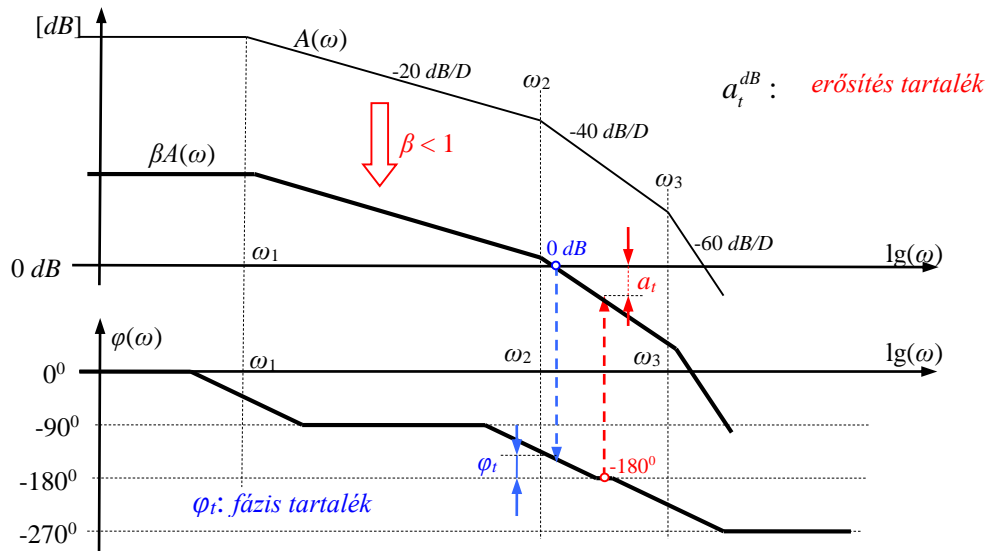


1.) *Feladat.* Ismertesse a visszacsatolt műveleti erősítők Bode stabilitás vizsgálati módszerét.

- a.) Rajzolja fel hárompólusú műveleti erősítő *nyílthurkú erősítésének* töréspontos Bode diagramját (abszolút érték és fázis) 5p
- b.) Rajzolja fel - ugyanebben a diagramban - ohmos visszacsatoló hálózattal létrehozott visszacsatolási tényező figyelembevételével a *hurokerősítést*, amely stabil rendszerhez tartozik 5p
- c.) Jelölje be a diagramon a fázistartalékot 5p
- d.) Jelölje be a diagramon az amplitúdó tartalékot 5p

Megoldás

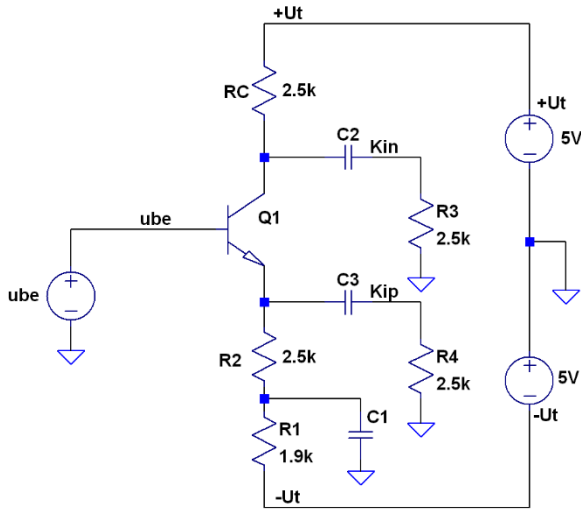
Bode stabilitásvizsgálat módszere:



- 1.) Fázistartalék: ahol $|\beta A(j\omega_x)| = 1$ (0 dB) ott a fázis: $\varphi(\omega_x) = -\pi + \varphi_i > -\pi$
- 2.) Erősítés tartalék: ahol $\varphi(\omega_y) = -\pi$ ott $|\beta A(j\omega_y)| < 1$ $a_i = -20 \lg |\beta A(j\omega_y)| > 0$

2.) Feladat. Határozza meg az áramkör paramétereit.

Q_1 npn tranzisztor, $U_{BE0}=0,6V$, $U_m=0,5V$, $\beta=B=\infty$, $R_1=1,9k\Omega$, $R_2=R_3=R_4=2,5k\Omega$, $R_C=2,5k\Omega$, $U_t=5V$, $C_1=C_2=C_3=\infty$, u_{be} szinuszos feszültség generátor.



a.) $I_{E0}=?$, $U_{kin0}=?$, $U_{kip0}=?$, $r_d=?$ 2+1+1+1p

b.) Közepes frekvenciás erősítés:

$$\frac{u_{kin}}{u_g} = ? \quad \frac{u_{kip}}{u_g} = ? \quad 5p$$

c.) Az u_{kip} , u_{kin} maximális kimeneti feszültség amplitúdója? 5p

d.) Ábrázolja közös idődiagramban az u_{kip} , u_{kin} feszültség – idő függvényeket, ha u_{be} 10mV-os 1kHz-es szinuszos feszültség 5p

Megoldás:

a.) Egyenáramú analízis:

$$U_t = (R_1 + R_2)I_{E0} + U_{BE0}, \quad I_{E0} = \frac{U_t - U_{BE0}}{R_1 + R_2} = \dots = 1 \text{ mA}, \quad r_d = \frac{U_T}{I_{E0}} = \dots = 26 \text{ ohm}$$

C_2 miatt $U_{kin0} = 0$, C_3 miatt $U_{kip0} = 0$

b.) Váltóáramú, kisjelű analízis:

$$\frac{u_{kin}}{u_g} = -\alpha \frac{R_C \times R_3}{r_d + R_2 \times R_4} = -1 \frac{1250}{26 + 1250} = 0,98$$

$$\frac{u_{kip}}{u_g} = \frac{R_2 \times R_4}{r_d + R_2 \times R_4} = \frac{1250}{26 + 1250} = 0,98$$

a.) Kivezérelhetőség vizsgálat

$$R_e = R_C + R_1 + R_2 = 2,5 + 2,5 + 1,9 = 6,9k\Omega$$

$$R_v = R_C \times R_3 + R_2 \times R_4 = 1,25 + 1,25 = 2,5k\Omega$$

$$U_{CE0} = 2U_t - I_{E0}R_e = 10 - 1 \cdot 6,9 = 3,1V$$

$$U_{CE}^+ = U_{CE0} - U_m = 3,1 - 0,5 = 2,6V$$

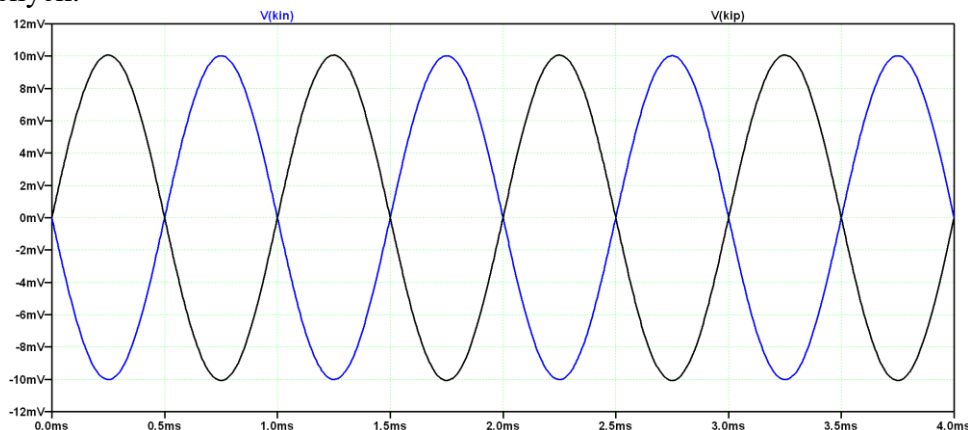
$$U_{CE}^- = I_{E0}R_v = 1 \cdot 2,5 = 2,5V$$

$$U_{kin}^+ = U_{CE}^+ \frac{R_C \times R_3}{R_C \times R_3 + R_2 \times R_4} = 2,6 \frac{1250}{1250 + 1250} = 1,3V, \quad U_{kin}^- = U_{CE}^- \frac{R_C \times R_3}{R_C \times R_3 + R_2 \times R_4} = 2,5 \frac{1250}{1250 + 1250} = 1,25V$$

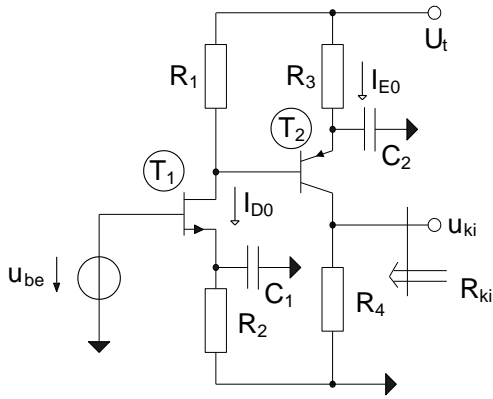
$$U_{kip}^+ = U_{CE}^+ \frac{R_4 \times R_2}{R_C \times R_3 + R_2 \times R_4} = 2,6 \frac{1250}{1250 + 1250} = 1,3V, \quad U_{kip}^- = U_{CE}^- \frac{R_4 \times R_2}{R_C \times R_3 + R_2 \times R_4} = 2,5 \frac{1250}{1250 + 1250} = 1,25V$$

Mindkét kimeneten 1,25V a maximális szinuszos kimeneti amplitúdó.

d.) Az időfüggvények:



3.) Feladat Határozza meg az áramkör paramétereit.



$$U_i = 12 \text{ V}, R_1 = 3,6 \text{ k}\Omega, R_2 = 2 \text{ k}\Omega, R_3 = 1 \text{ k}\Omega, R_4 = 2 \text{ k}\Omega,$$

T₁: n-csatornás kiürítéssel MOSFET, $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$, $U_P = -4 \text{ V}$,

T₂: pnp tranzisztor, $\beta_2 = B_2 \rightarrow \infty$, $U_{EB0} = 0,6 \text{ V}$.

a.) $I_{E0} = ?$, $I_{D0} = ?$,

b.) $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = ?$, $r_d = 26/3 \Omega$, $S = 1 \text{ mS}$, $C_1 = C_2 \rightarrow \infty$

c.) $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = ?$, $r_d = 26/3 \Omega$, $S = 1 \text{ mS}$, $C_1 \rightarrow \infty$, $C_2 = 0$,

d.) $R_{ki} = ?$

Megoldás:

a.) $I_{E0} = ?$, $I_{D0} = ?$,

$$u_{be} = 0 \quad 0 = u_{GS} + i_D R_2 = u_{GS} + 2i_{iD} \quad \text{és} \quad i_D = I_{DSS} \left(\frac{u_{GS} - U_P}{U_P} \right)^2 = \frac{1}{4} (u_{GS} + 4)^2$$

$$4i_D = (4 - 2i_D)^2 \quad \text{vagy} \quad -2u_{GS} = (u_{GS} + 4)^2$$

$$i_D^2 - 5i_D + 4 = 0 \quad \text{vagy} \quad u_{GS}^2 + 10u_{GS} + 16 = 0$$

$$i_D = I_{D0} = \frac{5 - \sqrt{25 - 16}}{2} = 1 \text{ mA} \quad u_{GS} = U_{GS0} = \frac{-10 + \sqrt{100 - 64}}{2} = -2 \text{ V}$$

$$I_{D0} R_1 = I_{E0} R_3 + U_{EB0} \quad \rightarrow \quad I_{E0} = \frac{I_{D0} R_1 - U_{EB0}}{R_3} = \frac{3,6 - 0,6}{1} = 3 \text{ mA}$$

5 p.

b.) $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = ?$, $r_d = 26/3 \Omega$, $S = 1 \text{ mS}$, $C_1 = C_2 \rightarrow \infty$

$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \left(-\frac{R_1}{1/S} \right) \left(-\frac{R_4}{r_d} \right) = SR_1 \frac{R_4}{r_d} = 3,6 \frac{2000}{26/3} = 3,6 \frac{6000}{26} = 831$$

5 p.

c.) $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = ?$, $r_d = 26/3 \Omega$, $S = 1 \text{ mS}$, $C_1 \rightarrow \infty$, $C_2 = 0$,

$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \left(-\frac{R_1}{1/S} \right) \left(-\frac{R_4}{R_3 + r_d} \right) = SR_1 \frac{R_4}{r_d} = 3,6 \frac{2000}{1000 + 26/3} = 3,6 \frac{6000}{3026} = 7,14$$

5 p.

d.) $R_{ki} = ?$

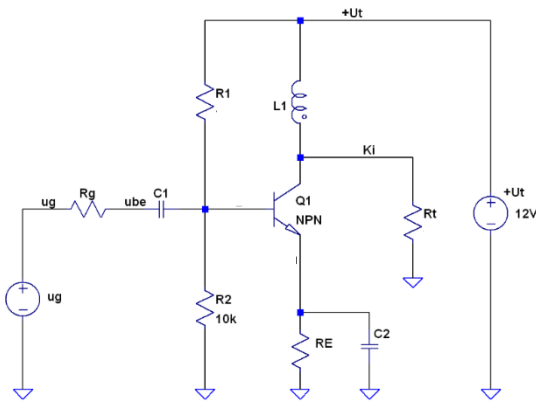
$$R_{ki} = R_4 = 2 \text{ k}\Omega$$

5 p.

4.) *Feladat* Határozzuk meg az alábbi erősítőfokozat kisjelű paramétereit.

$U_t = 12V$, $R_g = 5k\Omega$, $R_t = 10k\Omega$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$, $R_E = 5,4k\Omega$, $L_1 = \infty$, $C_1 = C_2 = 10\mu F$,

Q_1 : NPN tranzisztor: $B = \beta = \infty$, $U_{BE0} = 0,6V$, $C_{be} = 40pF$, $C_{bc} = 4pF$, $I_{E0} = 1mA$, $r_d = 26\Omega$



a.) *Sávközépi* kisjelű lineáris helyettesítőkép 5p

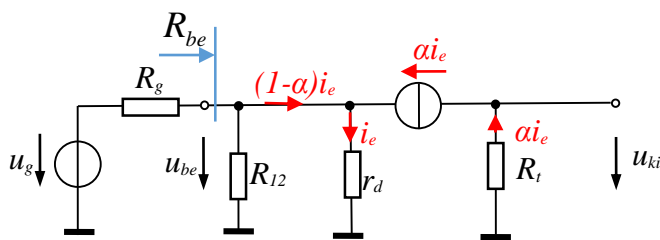
b.) $\frac{u_{ki}}{u_g} = ?$ *sávközépi* erősítés dB-ben 5p

c.) $\frac{u_{ki}}{u_g}$ -3dB-es *alsó* határfrekvenciája Hz-ben 5p

d.) $\frac{u_{ki}}{u_g}$ -3dB-es *felső* határfrekvenciája Hz-ben 5p

Megoldás :

a.) A lineáris kisjelű helyettesítőkép sávközépre (kapacitások: C_1 , C_2 váltóáramú rövidzár, a parazita kapacitások szakadások, induktivitás szakadás):



5p

b.) $R_{be} = R_1 \times R_2 \times (1 + \beta)r_d = 10k\Omega \times 10k\Omega = 5k\Omega$.

Mivel $R_{be} = R_g$, ezért a bemeneti leosztás 6dB.

$$\frac{u_{ki}}{u_g} = \frac{u_{be}}{u_g} \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{R_{be}}{R_{be} + R_g} \left(-\alpha \frac{R_t}{r_d} \right) = -\frac{5}{5+5} \left(-1 \frac{10000}{26} \right) = -192, \quad \frac{u_{ki}}{u_g} \Big|_{dB} = 20 \lg \left| \frac{u_{ki}}{u_g} \right| = 45,7dB \quad 5p$$

c.) Mivel L végtelen, az alsó határfrekvenciát a C_1 , vagy a C_2 határozza meg:

$$\omega_{a1} = \frac{1}{C_1(R_g + R_{be})} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-6} (5 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3)} = 10rad/s, \quad f_{a1} = \frac{\omega_{a1}}{2\pi} = \frac{10rad/s}{2\pi} = 1,59Hz$$

$$\omega_{a2} = \frac{1}{C_2(R_E r_d)} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-6} (5,4 \cdot 10^3 \times 26)} = 3864rad/s, \quad f_{a2} = \frac{\omega_{a2}}{2\pi} = \frac{3864rad/s}{2\pi} = 615Hz$$

Az eredő alsó határfrekvencia: $f_a = f_{a2} = \frac{\omega_{a2}}{2\pi} = \frac{3864rad/s}{2\pi} = 615Hz \quad 5p$

d.) A felső határfrekvenciákat a parazita kapacitások hozzák létre, ezek közül a kisebb lesz a felső határfrekvencia:

$$\omega_{p1} = \frac{1}{(R_g \times R_{be})C_{p1}}, \quad \omega_{p2} = \frac{1}{R_t C_{p2}},$$

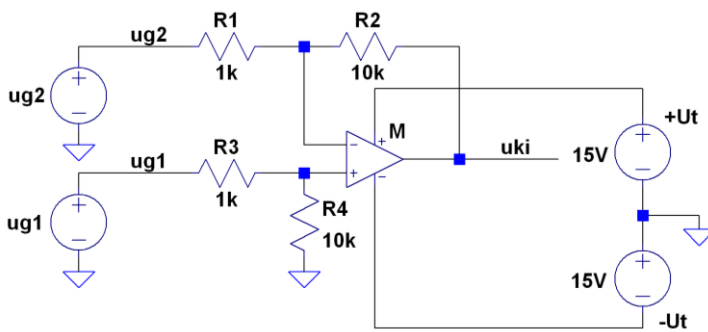
$$C_{p1} = C_{be} + (1 - A)C_{bc} = 40 + (1 + 384)4 = 1580 pF,$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{(R_g \times R_{be})C_{p1}} = \frac{1}{(5000 \times 5000) \cdot 1580 \cdot 10^{-12}} = 253krad/s,$$

$$\omega_{p2} = \frac{1}{R_t C_{p2}} = \frac{1}{R_t C_{bc}} = \frac{1}{10 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-12}} = 25Mrad/s, \quad f_f = \frac{\omega_{p1}}{2\pi} = \frac{253krad/s}{2\pi} = 40,3kHz \quad 5p$$

5.) Feladat. Határozza meg az alábbi áramkör paramétereit.

$R_1 = R_3 = 1k\Omega$, $R_2 = R_4 = 10k\Omega$, $U_t = 15V$, u_{g1} , u_{g2} kis amplitúdójú szinuszos feszültség generátorok.



a.) Milyen tartományon van az U_{ki0} kivezélés nélküli kimenő feszültség, ha az M műveleti erősítő offset feszültsége $5mV$, egyéb paramétere ideális. 5p

b.) Írja fel az $\frac{u_{ki}}{u_{g1}}$, $\frac{u_{ki}}{u_{g2}}$ erősítéseket, ha a műveleti erősítő ideális. 5p

c.) Mekkora a differenciál- és a közös módusú erősítés, valamint a KME (CMRR), ha a műveleti erősítő ideális? 5p

d.) Ábrázolja közös abszolút érték Bode diagramban az $\frac{u_{ki}}{u_{g1}}$, $\frac{u_{ki}}{u_{g2}}$ frekvenciafüggését, ha a műveleti

erősítő nyílthurkú erősítése jól közelíthető az egypólusú modellel, GBW paramétere $5MHz$, a műveleti erősítő egyéb paramétere ideális. 5p

A megoldás

a.) Az offset feszültség következménye a kimeneten:

$$u_{g1} = u_{g2} = 0, \quad U_{ki0} = U_{off} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 5 \left(1 + \frac{10}{1}\right) = 55mV \quad -55mV < U_{ki0} < +55mV$$

b.) $u_{g2} = 0, \quad \frac{u_{ki}}{u_{g1}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{10}{10+1} \left(1 + \frac{10}{1}\right) = 10$

$$u_{g1} = 0, \quad \frac{u_{ki}}{u_{g2}} = -\frac{R_2}{R_1} = -10$$

c.) $u_{g1} = u_k + \frac{u_d}{2} \quad u_{g2} = u_k - \frac{u_d}{2}$

Tiszta differenciális gerjesztés: $u_k = 0$

$$u_{ki} = 10u_{g1} - 10u_{g2} = 10 \left(\frac{u_d}{2} + \frac{u_d}{2}\right) \quad A_d = \frac{u_{ki}}{u_d} = 10$$

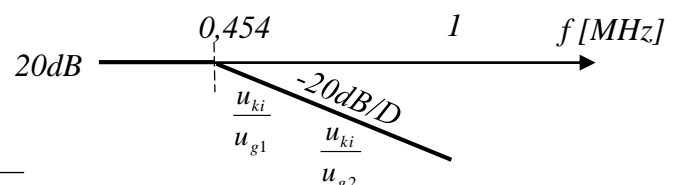
Tiszta közös módusú gerjesztés: $u_d = 0$

$$u_{ki} = 10u_{g1} - 10u_{g2} = 10(u_k - u_k) = 0 \quad A_k = \frac{u_{ki}}{u_k} = 0$$

$$KME = CMRR = \left| \frac{A_d}{A_k} \right| = \infty$$

d.) A műveleti erősítő nyílthurkú erősítése:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}, \quad 2\pi GBW = A_0 \omega_0 = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$



$$\text{Visszacatolt erősítők: } T(s) = \frac{\alpha}{\beta} \frac{A_0 \beta}{1 + A_0 \beta} \frac{1}{1 + \frac{s}{(1 + A_0 \beta) \omega_0}}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1+10} = \frac{1}{11}$$

A visszacatolt erősítő pólusfrekvenciája, ω_p , (a -3dB-es felső határfrekvencia) mindkét bemenetről:

$$\omega_p = (1 + A_0 \beta) \omega_0 \approx \beta A_0 \omega_0 = \beta GBW = \frac{1}{11} 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 = 2,85 \text{ Mrad/s} \quad f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{2,85 \text{ Mrad/s}}{2\pi} = 454 \text{ kHz}$$

B megoldás:

a.) Az offset feszültség következménye a kimeneteken:

$$u_g = 0, U_{ki0} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{offset} = 11U_{offset} = \rightarrow -55 \text{ mV} < U_{ki0} < +55 \text{ mV}$$

$$\text{b.) } \frac{u_{ki}}{u_{g1}} \Big|_{u_{g2}=0} = \frac{R_4}{R_3+R_4} \frac{R_1+R_2}{R_1} = \frac{10}{11} \frac{11}{1} = 10 \quad \frac{u_{ki}}{u_{g2}} \Big|_{u_{g1}=0} = -\frac{R_2}{R_1} = -10$$

c.)

Differenciál erősítés: $i = \frac{u_d}{R_1 + R_2} \quad u_{ki} = R_2 i + R_4 i$

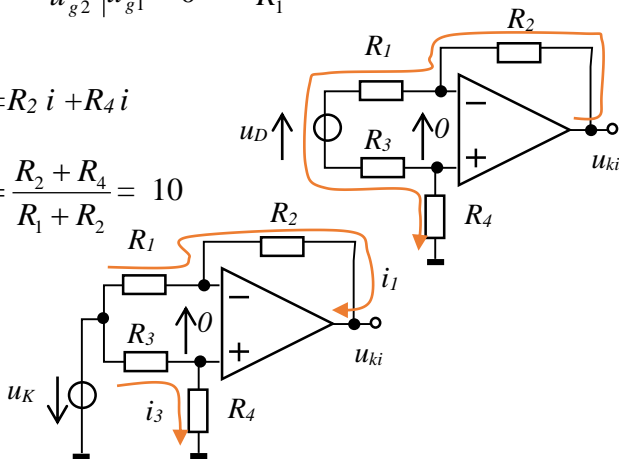
$$A_D = \frac{u_{ki}}{u_D} = \frac{u_{ki}}{u_{g1} - u_{g2}} = \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_2} = 10$$

Közözmódusú erősítés:

$$R_1 = R_3 \rightarrow i_1 = i_3$$

$$R_2 = R_4 \rightarrow u_{ki} = 0$$

$$A_K = \frac{u_{ki}}{u_K} \Big|_{u_{1g} = u_{2g} = u_K} = 0, \quad KME = \infty$$



d.) Műveleti erősítők: $A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{2\pi f_p}}$, $GBW = A_0 f_p = 5 \text{ MHz}$

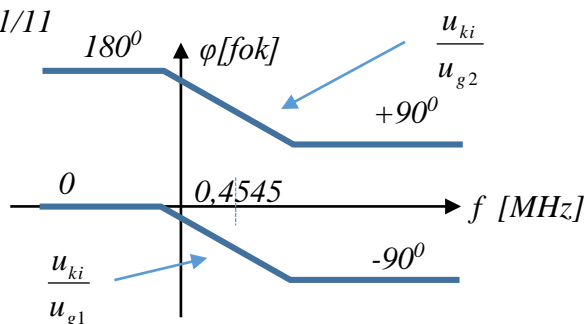
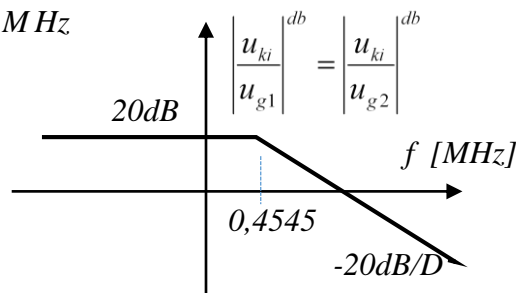
Visszacsatolt erősítők: $u_{ki} = A(\alpha u_g - \beta u_{ki})$

$$T(s) = \frac{\alpha A_0 \phi}{\beta 1 + A_0 \beta} \frac{A_0}{1 + \frac{s}{(1 + A_0 \beta) 2\pi f_p}}$$

$$\frac{u_{ki}}{u_{g1}} : \alpha = 10/11, \beta = 1/11 \quad \frac{u_{ki}}{u_{g2}} : \alpha = -10/11, \beta = 1/11$$

$$\frac{u_{ki}}{u_{g1}} \cong 10 \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{2\pi 5 \cdot 10^6 / 11}\right)} = -\frac{u_{ki}}{u_{g2}}$$

Közös pólus frekvencia: $f_p = 5/11 = 0.4545 \text{ MHz}$



Abszolút érték karakterisztikák azonosak, fáziskarakterisztikában 180 fok eltolás.