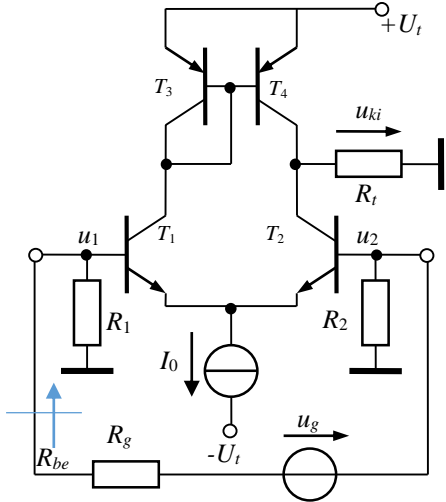


1.) Feladat



$T_1=T_2$ ,  $n-p-n$  tranzisztor  $\beta_1 = \beta_2 = 99$ ,  
 $T_3=T_4$ :  $p-n-p$  tranzisztor  $\beta_3 = \beta_4 \rightarrow \infty$   
 $U_t = 15\text{ V}$ ,  $I_0 = 2\text{ mA}$ ,  $I_{BIAS} = 10\text{ }\mu\text{A}$ ,  $I_{off} = 0.1\text{ }\mu\text{A}$   
 $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_g = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_t = 10\text{ k}\Omega$ ,

$$I_{B1} = I_{BIAS} + \frac{I_{off}}{2}$$

$$I_{B2} = I_{BIAS} - \frac{I_{off}}{2}$$

Kérdések:

- a.)  $A_D = ?$ ,  $A_K = ?$
- b.)  $u_{ki}/u_g = ?$
- c.) Mekkora  $U_H$  hibakiegyenlítő feszültséget kell sorba kapcsolni  $u_g$ -val, ha  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10.2\text{ k}\Omega$
- d.)  $U_{ki0} = ?$ , ha nem alkalmazunk hibakiegyenlítést

Megoldás:

a.)  $A_D = ?$   $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{99}{100} = 0.99$   $I_{E01} = I_{E02} = \frac{I_0}{2} = 1\text{ mA}$   $r_d = \frac{U_T}{I_{E01}} = \frac{26\text{ mV}}{1\text{ mA}} = 26\text{ }\Omega$

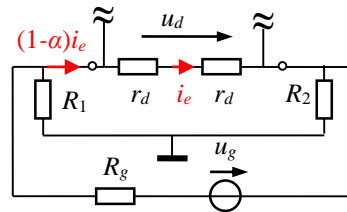
$$A_d = \frac{u_{ki}}{u_1 - u_2} = \frac{1}{u_1 - u_2} \left( \alpha \frac{u_1 - u_2}{2r_d} + \alpha \frac{u_1 - u_2}{2r_d} \right) R_t = \alpha \frac{R_t}{r_d} = 0.99 \frac{10000}{26} = 381$$

$A_K = 0$  (egyrészt a kollektor körben lévő áramtükrő miatt, másrészt az áram generátoros emitter áram beállítás miatt)

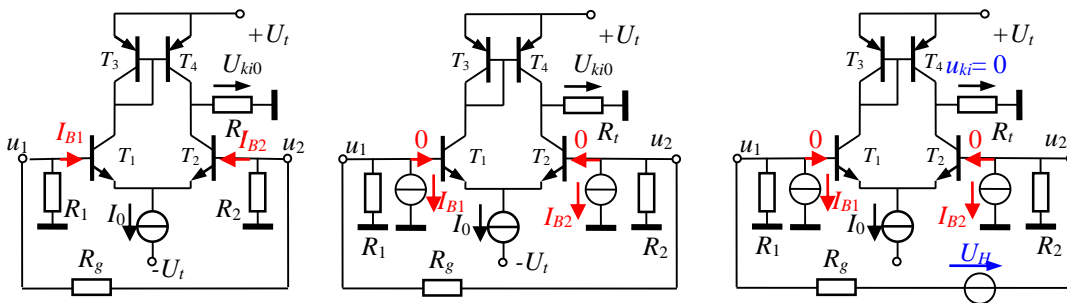
b.)  $u_{ki}/u_g = ?$

$$R_{be} = [(1 + \beta)2r_d] \times [R_1 + R_2] = 5.2 \times 20 = 4.13\text{ k}\Omega$$

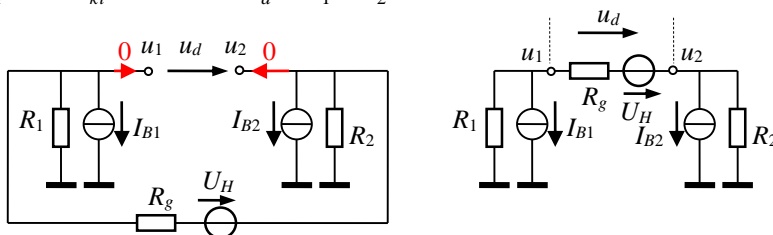
$$\frac{u_{ki}}{u_g} = \frac{R_{be}}{R_g + R_{be}} A_d = 0.8 \times 381 = 305$$



c.)  $U_H = ?$  ha  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10.2\text{ k}\Omega$



$$u_g = 0, U_H = ? \quad u_{ki} = 0 \quad \rightarrow \quad u_d = u_1 - u_2 = 0$$



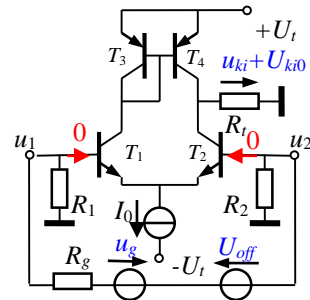
Feszültség- és áram osztásokkal:  $u_d = u_1 - u_2 = U_H \frac{R_1 + R_2}{R_g + R_1 + R_2} - I_{B1} \frac{R_1}{R_g + R_1 + R_2} R_g + I_{B2} \frac{R_2}{R_g + R_1 + R_2} R_g = 0$

$U_H$ -ra átrendezve, behelyettesítve A BIAS és az offset áramokat :

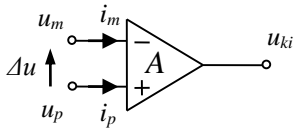
$$\begin{aligned}
 U_H \frac{R_1 + R_2}{R_g + R_1 + R_2} &= I_{B1} \frac{R_1}{R_g + R_1 + R_2} R_g - I_{B2} \frac{R_2}{R_g + R_1 + R_2} R_g \\
 U_H &= I_{B1} \frac{R_1}{R_1 + R_2} R_g - I_{B2} \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_g \\
 U_H &= \left( I_{BIAS} + \frac{I_{off}}{2} \right) \frac{R_1}{R_1 + R_2} R_g - \left( I_{BIAS} - \frac{I_{off}}{2} \right) \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_g = \\
 &= I_{BIAS} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} R_g - \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_g \right) + \frac{I_{off}}{2} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} R_g + \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_g \right) = \\
 &= I_{BIAS} \frac{R_g}{R_1 + R_2} (R_1 - R_2) + I_{off} \frac{R_g}{R_1 + R_2} \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) = I_{BIAS} \frac{R_g}{R_1 + R_2} \Delta R + I_{off} \frac{R_g}{R_1 + R_2} R = \\
 &= \frac{R_g}{R_1 + R_2} (I_{BIAS} \Delta R + I_{off} R) \\
 R &= \frac{R_1 + R_2}{2} \cong 10 \text{ k}\Omega & \Delta R &= R_1 - R_2 = 0.2 \text{ k}\Omega \\
 U_H &= \frac{R_g}{2R} (I_{BIAS} \Delta R + I_{off} R) = \frac{1}{20} (10 * 0.2 + 0.1 * 10) = 0.15 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

**d.)**  $U_{ki0} = ?$  Ha az előbb kiszámított hibakiegyenlítő feszültséget ( $U_H$ ) nem alkalmazzuk, akkor az ezzel megegyező nagyságú, de ellentétes irányú feszültség leosztott változata, a differenciális erősítéssel a kimenetre kerül:

$$U_{ki0} = -U_H \frac{R_1 + R_2}{R_g + R_1 + R_2} A_d = -0.15 \frac{20}{21} 381 = -54 \text{ mV}$$



Elméleti összefoglaló - Műveleti erősítők (ME):



Ideális ME:

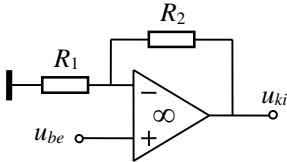
$$\begin{aligned} A &= \infty \rightarrow \Delta u = 0 \\ R_{be} &= \infty \rightarrow i_p = i_m = 0 \\ R_{ki} &= 0 \end{aligned}$$

Valóságos ME:

$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{u_{ki}}{\Delta u} \rightarrow \Delta u \neq 0 \\ R_{be} &\cong \infty \rightarrow i_p = i_m \cong 0 \\ R_{ki} &= 0 \end{aligned}$$

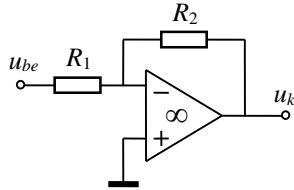
Alapkapcsolások:

Nem invertáló



$$A_{id} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Invertáló

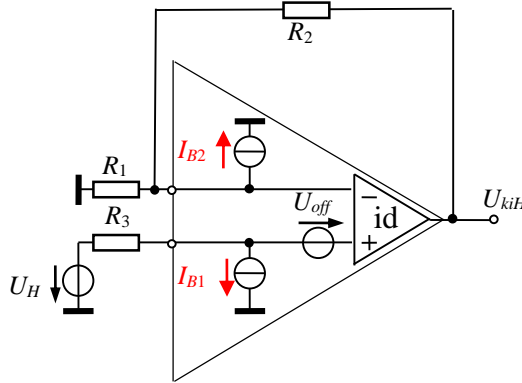
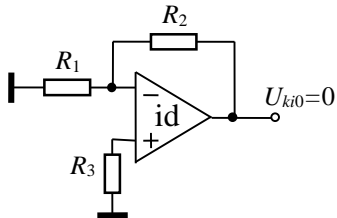


$$A_{id} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

### 1. ME munkapont beállítása:

Valóságos ME munkapont beállítása

Ideális ME munkapont beállítása



Az áramköröket a nyugalmi munkaponti állapotukban, gerjesztés nélkül vizsgáljuk. Ekkor az ideális műveleti erősítő kimenő feszültsége 0. A valóságos áramkör a kívánatos nulla kimeneti feszültséget csak egy hibakiegyenlítő feszültség hatására éri el:

$U_H$ : hibakiegyenlítő feszültség generátor, (ideális ME esetén nulla)

$U_{off}$ : a műveleti erősítő offset feszültsége, (ideális ME esetén nulla)

$I_{B1}, I_{B2}$ : a műveleti erősítő munkaponti bemenő áramjai (ideális ME esetén nulla)

$U_{kiH}$ : A kimeneti hibafeszültség, amit majd az  $U_H$ -val nullára szeretnénk állítani:

$$U_{kiH} = U_H \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{off} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - I_{B1} R_3 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{B2} R_2$$

$$U_{kiH} = U_H \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_{off} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \left(I_{BIAS} + \frac{I_{off}}{2}\right) R_3 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \left(I_{BIAS} - \frac{I_{off}}{2}\right) R_2$$

12. gyakorlat

$$U_{kiH} = U_H \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{off} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{BIAS} \left[ R_2 - R_3 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right] - \frac{I_{off}}{2} \left[ R_2 + R_3 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right]$$

Ha:  $R_2 = R_3 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \rightarrow R_2 = R_3 \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \rightarrow$

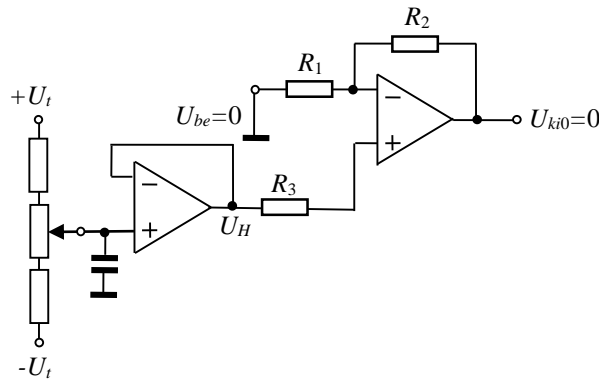
$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \times R_2$$

Ekkor:  $U_{kiH} = U_H \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{off} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - I_{off} R_2$

A maradék  $U_{kiH}$  is megszüntethető  $U_H$  beállításával:

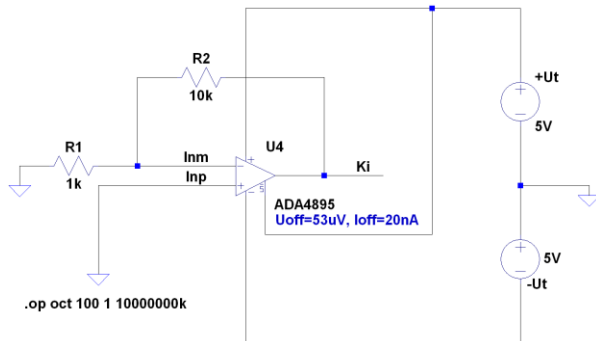
$$U_H = \frac{U_{off} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{off} R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} = U_{off} + I_{off} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) = U_{off} + I_{off} R_1 \times R_2 = U_{off} + I_{off} R_3$$

pl. egy invertáló erősítőben:



Szám példa: Az ADA4895 típusú műveleti erősítő offset feszültsége tipikusan 53uV, BIAS árama tipikusan 11uA, offset árama tipikusan 20nA.

a.) Mekkora a kimeneti hibafeszültség tipikusan az ábra szerinti kapcsolásban:

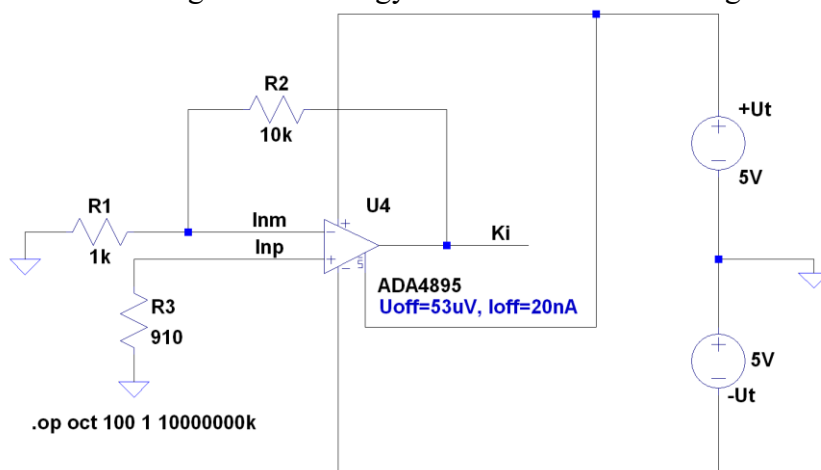


$$U_{kiH} = -U_{off} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{BIAS} R_2 - \frac{I_{off}}{2} R_2 = 53\mu V (1 + 10) + 11\mu A 10k - \frac{10n}{2} 10k \approx 11\mu A 10k = 0.011 * 10 = 0,11V$$

LTspice szimuláció eredménye: **v(ki): -0.110779 voltage**

Látható, hogy nagy hibafeszültség alakul ki az  $R_3$  elhagyása miatt.

b.) Válasszuk meg  $R_3$  értékét úgy, hogy a műveleti erősítő BIAS árama ne hozzon létre kimeneti hiba feszültséget. Mekkora így a kimeneti hibafeszültség?



$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \times R_2 = 910 \text{ Ohm}$$

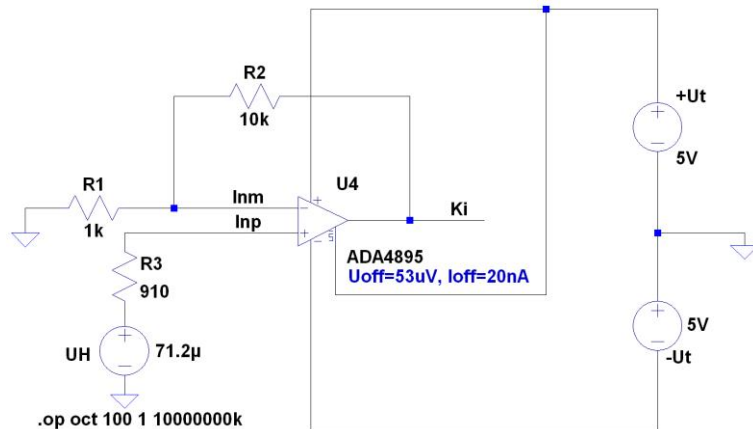
$$U_{kiH} = -U_{off} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - I_{off} R_2 = -53e - 6(1 + 10) - 20e - 9 * 10e3 = 0,8mV$$

LTspice szimuláció eredménye:  $v(ki) : -0.000873087 \text{ voltage}$

Látható, hogy az ellenállás megfelelő megválasztásával a hibafeszültség jelentősen lecsökkent.

c.) Teljes hibafeszültség kioltás:

$$U_H = U_{off} + I_{off} R_1 \times R_2 = 53e - 6 * 20e - 9 * 910 = 71,2 \mu V$$



LTspice :  $v(ki) : -8.99184e-005 \text{ voltage}$

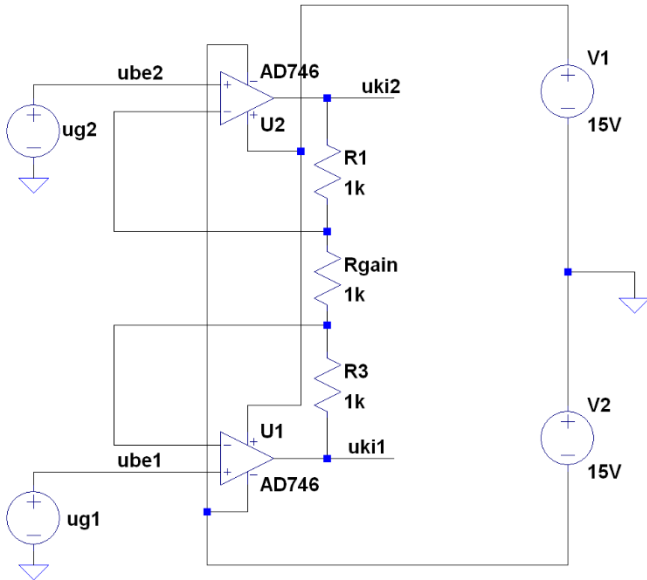
*Instrumentational Amplifier*

Differenciális (Differential) bemenetű aszimmetrikus (Single Ended) kimenetű áramkör

- **nagy** bemenő ellenállással,
- jó **KME**-vel,
- **egy** ellenállás segítségével beállítható differenciális erősítéssel

Az Instrumentational Amplifier két fokozatból áll:

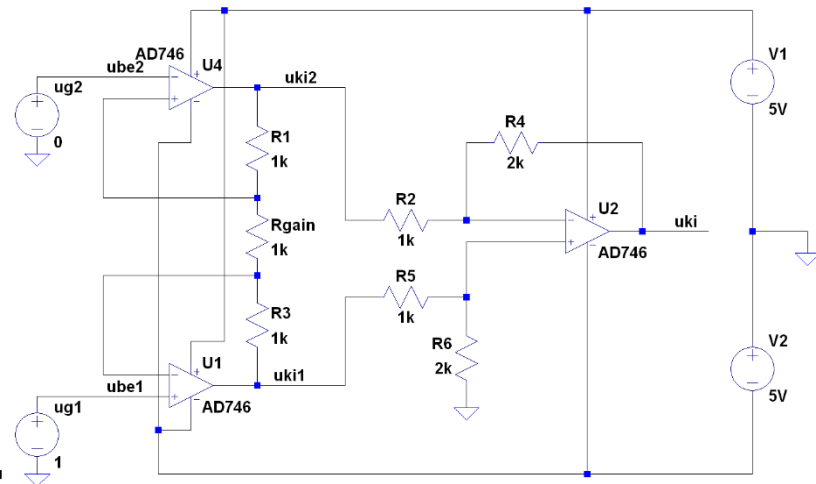
bemeneti fokozat differenciális bemenete, differenciális kimenettel, egy erősítés beállító ellenállással:



$$u_{ki2} = u_{be2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_{gain}} \right) - u_{be1} \frac{R_1}{R_{gain}}$$

$$u_{ki1} = u_{be1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_{gain}} \right) - u_{be2} \frac{R_3}{R_{gain}}$$

Kapcsoljuk össze a differenciális kimenetet az előadáson megismert kivonó áramkörrel, ami a második fokozatot alkotja:



$$u_{ki} = u_{ki1} \frac{R_6}{R_5 + R_6} \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right) - u_{ki2} \frac{R_4}{R_2}$$

Legyen  $R_4 = R_6$ ,  $R_2 = R_5$ : 
$$u_{ki} = u_{ki1} \frac{R_4}{R_2 + R_4} \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right) - u_{ki2} \frac{R_4}{R_2} = u_{ki1} \frac{R_4}{R_2} - u_{ki2} \frac{R_4}{R_2} = \frac{R_4}{R_2} (u_{ki1} - u_{ki2})$$

Az első fokozatra kiszámítottuk:

$$u_{ki1} = u_{be1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_{gain}} \right) - u_{be2} \frac{R_3}{R_{gain}} \qquad u_{ki2} = u_{be2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_{gain}} \right) - u_{be1} \frac{R_1}{R_{gain}}$$

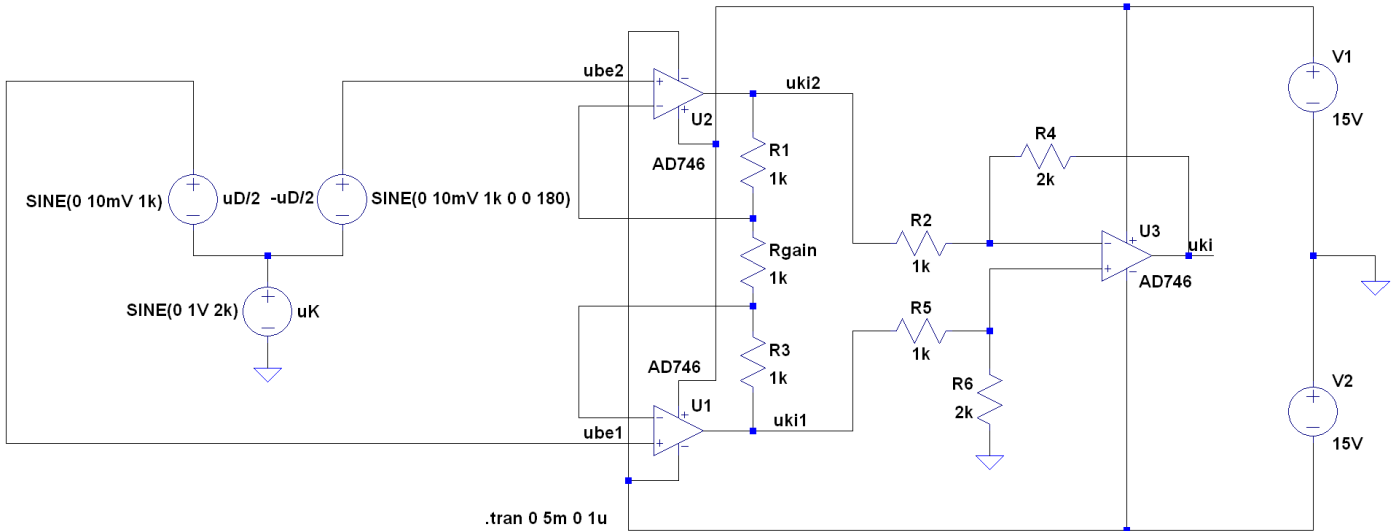
$$u_{ki1} - u_{ki2} = u_{be1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_{gain}} \right) - u_{be2} \frac{R_3}{R_{gain}} - u_{be2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_{gain}} \right) + u_{be1} \frac{R_1}{R_{gain}}$$

Legyen  $R_3 = R_1$ , ekkor:

## 12. gyakorlat

$$u_{ki1} - u_{ki2} = u_{be1} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right) - u_{be2} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right) \quad u_{ki1} - u_{ki2} = \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right) (u_{be1} - u_{be2})$$

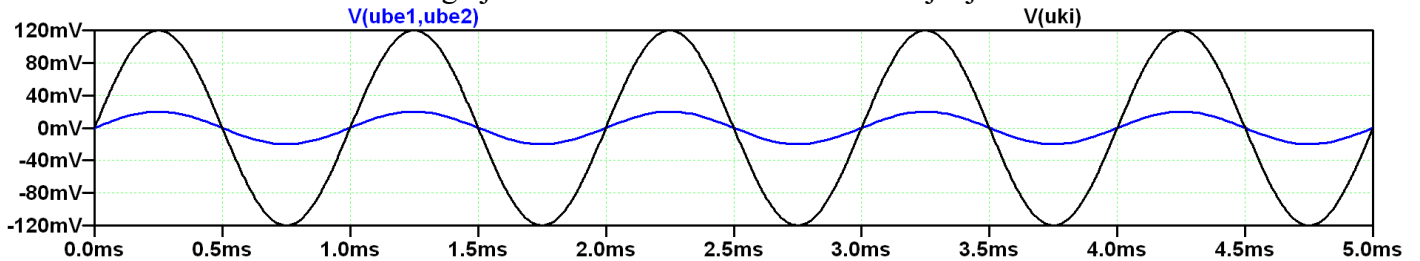
$$u_{ki} = \frac{R_4}{R_2} (u_{ki1} - u_{ki2}) = \frac{R_4}{R_2} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right) (u_{be1} - u_{be2})$$



$$\frac{u_{ki}}{u_D} = \frac{R_4}{R_2} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right)$$

Az ábra szerinti elrendezés esetén a differenciális erősítés:  $\frac{u_{ki}}{u_D} = \frac{R_4}{R_2} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right) = \frac{2}{1} \left( 1 + 2 \frac{1}{1} \right) = 6$

20mV-os szinuszos differenciális gerjesztés hatására 120mV-os kimenőjel jön létre:



A kimenet akkor is ugyanilyen, ha közös módusú jel is van a bemeneten, hiszen a kimenet csak a bemenő jelek különbségétől függ.