

Elektronika

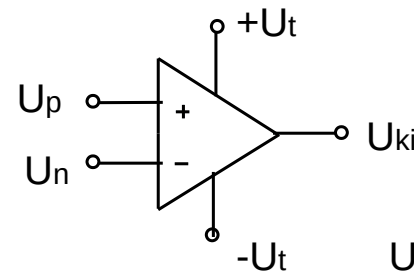
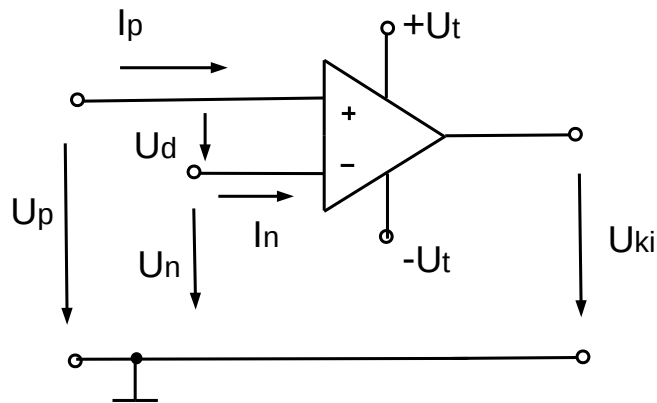
XVI. Műveleti erősítők

16.1. Műveleti erősítők

Jellemzői

- több fokozatú, egyenáramú erősítő → közvetlen csatolások
- integrált áramköri kivitelben
- nagyon nagy erősítés (A_{U0}) !! (jellemzően több ezerszeres, tízezerszeres)
- nagyon nagy bemeneti ellenállás (néhány $M\Omega$ vagy $G\Omega$)
→ nagyon kicsi bemeneti áram !!
- két bemenetük van (szimmetrikus bemenet) → egy invertáló és egy nem invertáló
- szimmetrikus tápfeszültséget igényelnek ($+U_t$ $-U_t$)
- rajzjele

Működése



U_p nem invertáló bemenet

U_n invertáló bemenet

$$U_{ki} = A_{U0} * U_d \rightarrow$$

$$U_{ki} = A_{U0} * (U_p - U_n)$$

**A két bemenet
különbségét erősíti !!**

A_{U0} → nyílt hurkú
differenciális erősítés
(nagyon nagy !!)

16.1. Műveleti erősítők

Fontosabb paraméterek

- nyílt hurkú feszültség erősítés (differenciális) $\rightarrow A_{U0}$
 $A_{U0} = U_{ki} / (U_p - U_n) \sim 10^5\text{-}10^6$, ideális a végtelen lenne
- közös módusú feszültség erősítés \rightarrow ha $U_p = U_n = U_k$
 $A_{UK} = U_{ki} / U_k$ általában 10-100 körül, ideálisan 0 lenne
- bemeneti munkaponti áram $\rightarrow I_B$ (input bias current)
 $I_B = (I_p + I_n) / 2$ általában néhány nA vagy pA, ideálisan 0 lenne
- bemeneti ofszet áram $\rightarrow I_{B0}$
 $I_{B0} = I_p - I_n$ ha $U_{ki} = 0$ általában néhány pA
- bemeneti ofszet feszültség $\rightarrow U_{B0}$
 $U_{B0} = U_p - U_n$ ha $U_{ki} = 0$ általában néhány mV
- bemeneti ellenállás $\rightarrow R_{be} = U_D / I_B$
általában $n \cdot 100\text{M}\Omega$ (FET esetén néhány $\text{G}\Omega$), ideális a végtelen lenne
- kimeneti ellenállás $\rightarrow R_{ki} = U_{ki0} / I_{kir}$
negatív visszacsatolás hatására $\rightarrow R_{kiv} / R_{ki0} = A_v / A_{U0}$

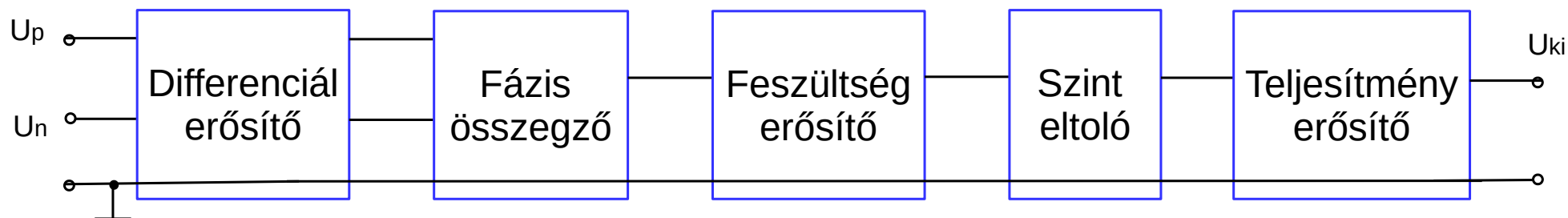
16.1. Műveleti erősítők

Fontosabb paraméterek

- közös módusú feszültség elnyomás $\rightarrow G$ vagy CMMR (common mode rejection ratio)
 $G = A_{U0} / A_{Uk} \sim 10^3\text{-}10^5$, ideális a végtelen lenne
- maximális kimeneti feszültség $\rightarrow U_{k\max}$
- maximális kimeneti áram $\rightarrow I_{k\max}$
- sávszélesség (nyílt hurkú) $\rightarrow f_0$ vagy f_h általában $n \cdot 10\text{Hz}$
(ez igazából a felső határfrekvencia, de mivel az alsó 0 \rightarrow a sávszélesség is egyben)
- egységnyi erősítés frekvenciája $\rightarrow f_1$ (amikor az erősítés lecsökken 1-re)
- tápfeszültség tartomány ($\pm U_t$)
- maximális teljesítmény disszipáció $\rightarrow P_{D\max}$
- erősítés sávszélesség szorzat ($A_{U0} * f_0$) $\rightarrow f_T$ általában 1-10MHz
Gain Bandwidth Product
- maximális jel változási sebesség (slew rate)
 \rightarrow a kimeneti jel változásának max. sebessége (V/μ)

16.2. Műveleti erősítők felépítése

Műveleti erősítők áramkörei



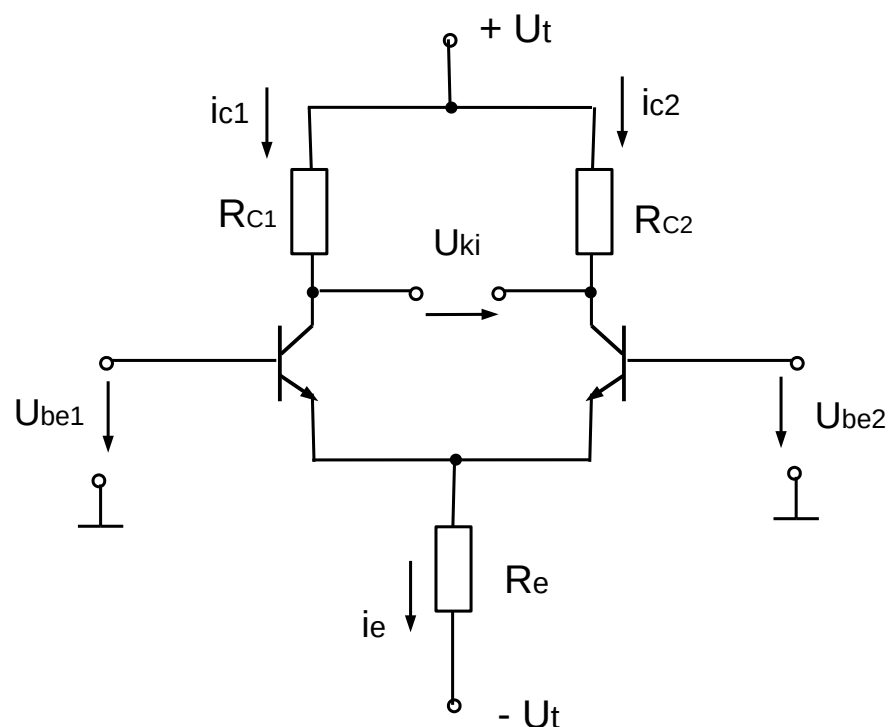
Differenciál erősítő

Szimmetrikus bemeneti fokozat, a két bemenet különbségét erősíti

$$U_{kis} = A_{us} * (U_{be2} - U_{be1})$$

$A_{us} \rightarrow$ differenciális erősítés

Kevésbé érzékeny a hőmérséklet vagy a tápfeszültség változására !



16.2. Műveleti erősítők felépítése

Differenciál erősítő

Teljesen azonos alkatrészek esetén , ha $U_{be2} = U_{be1} \rightarrow I_{c2} = I_{c1} = \frac{1}{2} * I_e \rightarrow U_{kis} = 0$

A valóságban nincs tökéletes szimmetria ! $\rightarrow U_{be2} = U_{be1} = 0$ esetén is U_{kis} nem nulla !!
 \rightarrow nullázás, ofszet kiegyenlítés szükséges

differenciális vezérlés

$$\text{Ha } U_{be2} = - U_{be1} \rightarrow \\ U_{bes} = U_{be1} - U_{be2}$$



differenciális erősítés $\rightarrow A_{us}$

$$U_{kis} = A_{us} * (U_{be2} - U_{be1})$$

$$A_{us} = - \frac{1}{2} * S * r_{ki} \quad (\sim 100)$$

$$S = \beta / (2 * h_{11e})$$

U_{bes} kicsi lehet csak (max. 60-70mV) !!

Közös módusú vezérlés

$$\text{Ha } U_{be2} = U_{be1} \rightarrow U_{bek} = \frac{1}{2} * (U_{be1} + U_{be2})$$



Közös módusú erősítés $\rightarrow A_{uk}$

$$A_{uk} = U_{kis} / U_{bek} \rightarrow$$

$$A_{uk} = - R_c / (2 * R_e)$$

$\sim 10^{-3}$ az a jó ha kicsi !! \rightarrow
 R_e legyen nagy \rightarrow helyette
áramgenerátor alkalmazása !!

16.2. Műveleti erősítők felépítése

μA741 műveleti erősítő belső felépítése

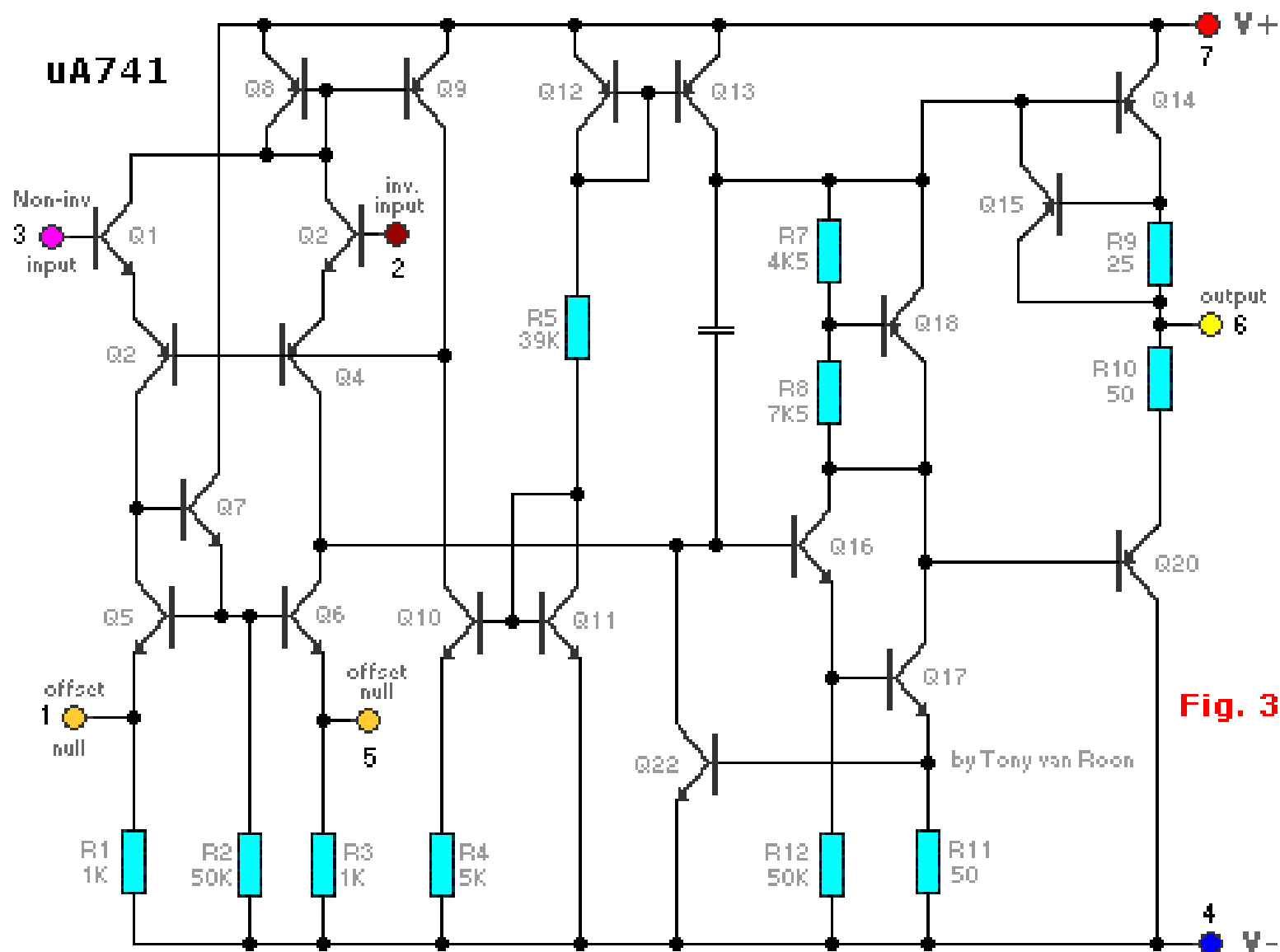
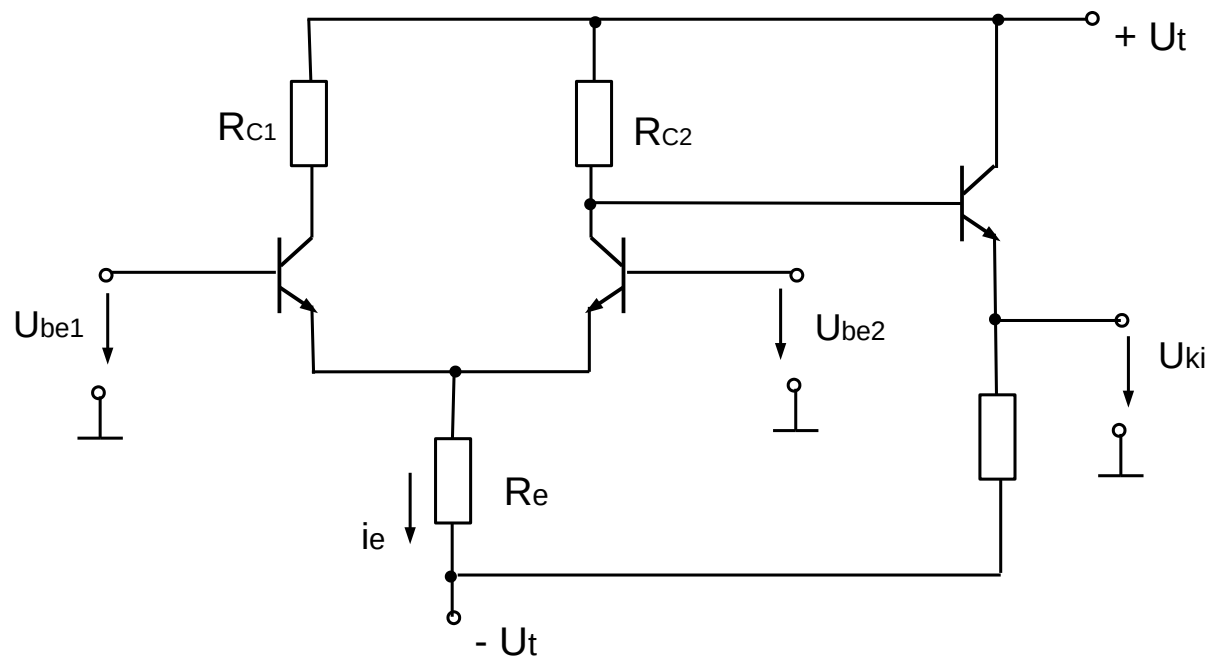


Fig. 3

16.2. Műveleti erősítők felépítése

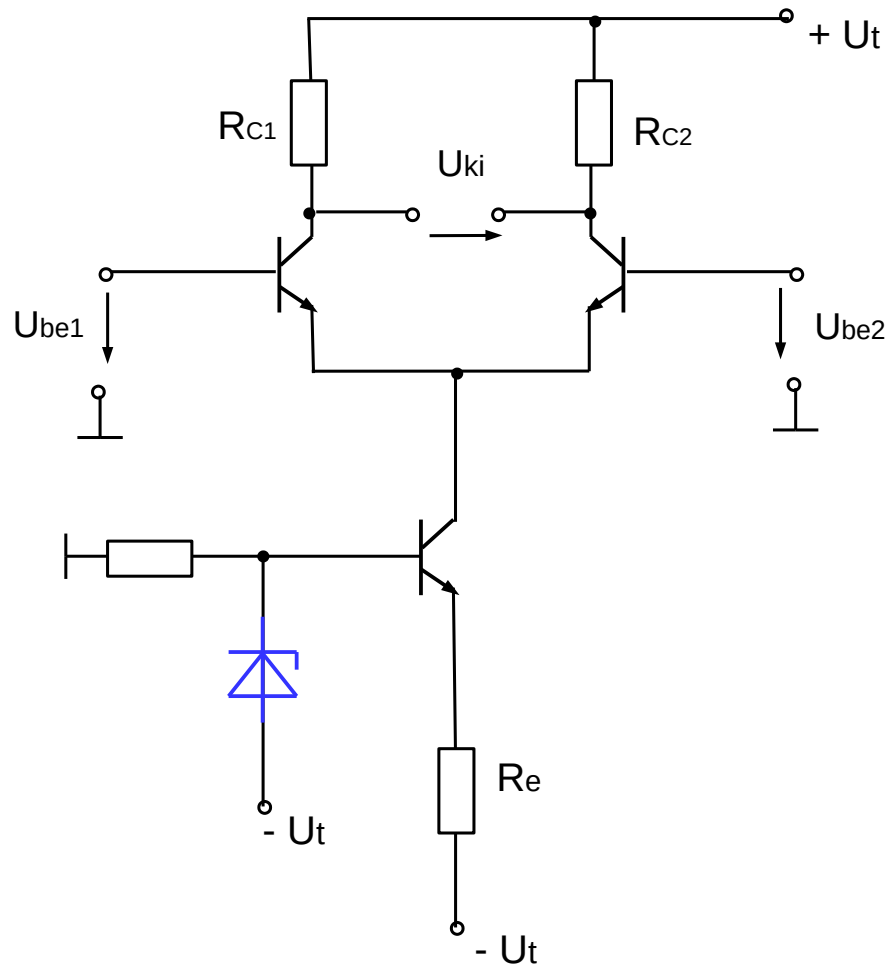
Asszimetrikus kimenetű differenciál erősítő

differenciális erősítő + fázis összegző



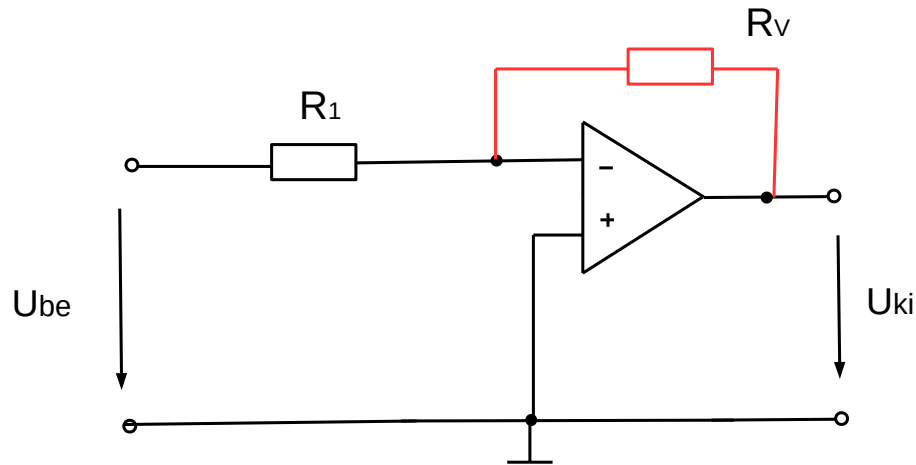
16.2. Műveleti erősítők felépítése

Differenciál erősítő áramgenerátorral



16.3. Alapkapcsolások

Invertáló alapkapcsolás



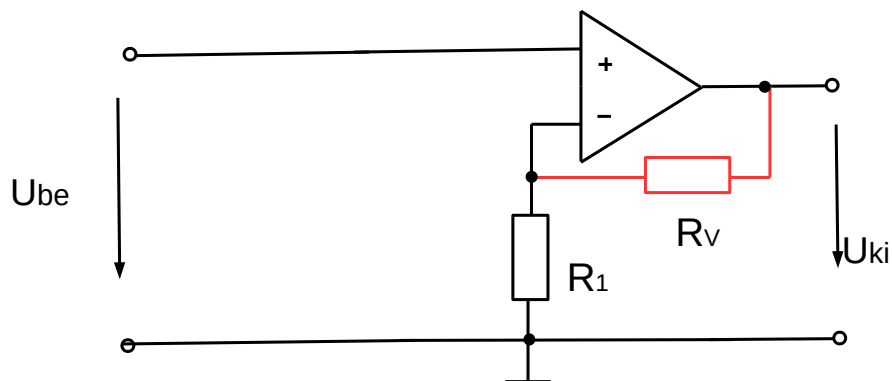
Visszacsatolt erősítés:

$$A_{UV} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = - \frac{R_v}{R_1}$$

Bemeneti ellenállás:

$$R_{be} = R_1$$

Nem invertáló alapkapcsolás



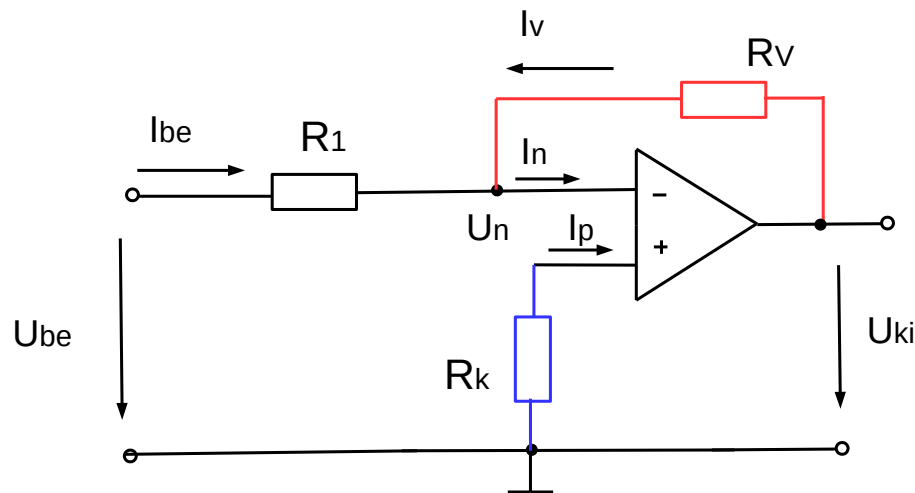
Erősítés:

$$A_{UV} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = 1 + \frac{R_v}{R_1}$$

$R_{be} = \text{nagyon nagy !}$
(több száz $M\Omega$)

16.3. Alapkapcsolások

Invertáló alapkapcsolás kompenzáló ellenállással



I_p és I_n nem nulla (bár nagyon kicsi)
ezért $U_{be} = 0$ esetén

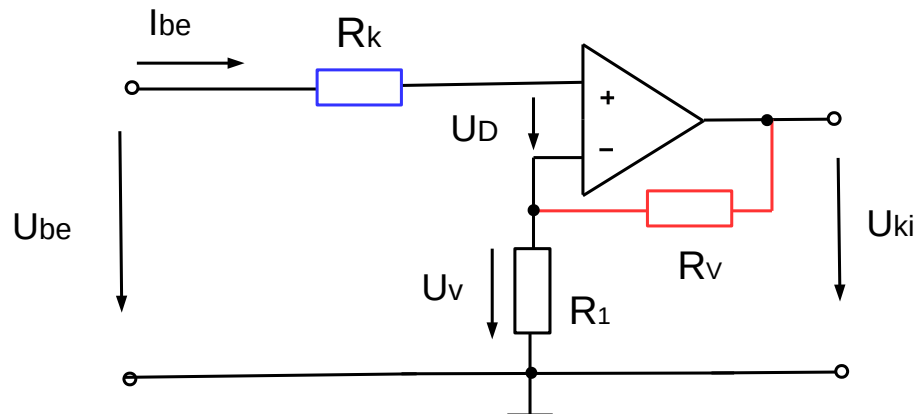
U_{ki} nem marad 0, mert
feszültség esik R_v ellenálláson !!

$$U_{ki} = R_v \cdot I_n$$

A bemeneti nyugalmi áram
kompenzálása $\rightarrow R_k$ ellenállás
beiktatásával

$$R_k = R_1 \times R_v$$

Nem invertáló alapkapcsolás kompenzáló ellenállással

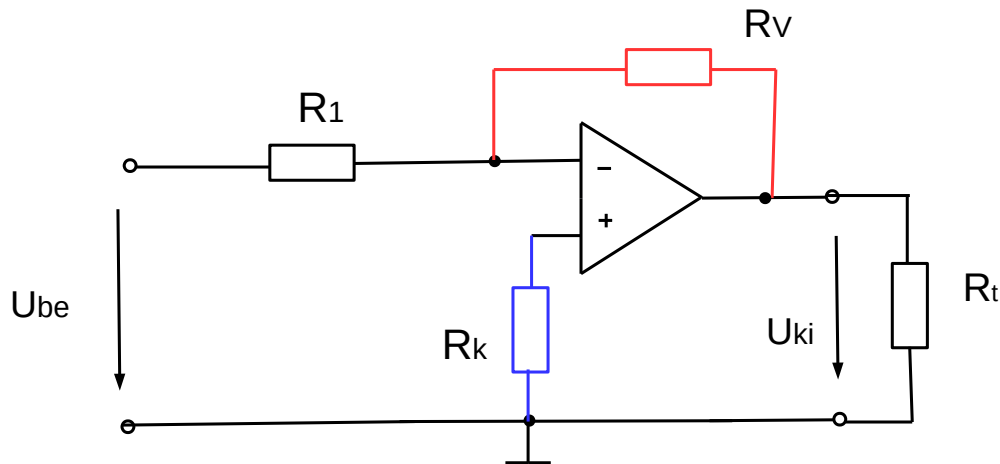


A bemeneti nyugalmi áram
kompenzálása \rightarrow ebben az
esetben is egy R_k ellenállás
beiktatásával, de most a nem
invertáló lábra kell kötni !

$$R_k = R_1 \times R_v$$

16.4. Feladatok

1. feladat



$$R_{be} = 25 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = -40$$

$$U_{kimax} = 14 \text{ V}$$

$$R_t = 100 \text{ }\Omega$$

$$R_1 = ?$$

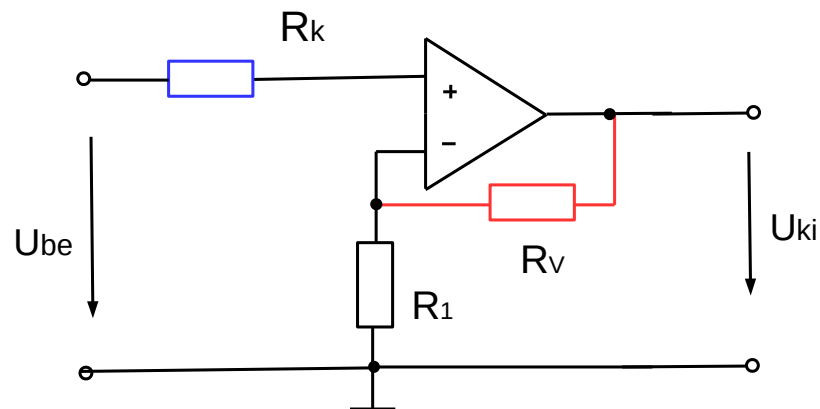
$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

$$U_{bemax} = ?$$

$$I_{kimax} = ?$$

2. feladat



$$R_v = 800 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be} = 20 \text{ mV}$$

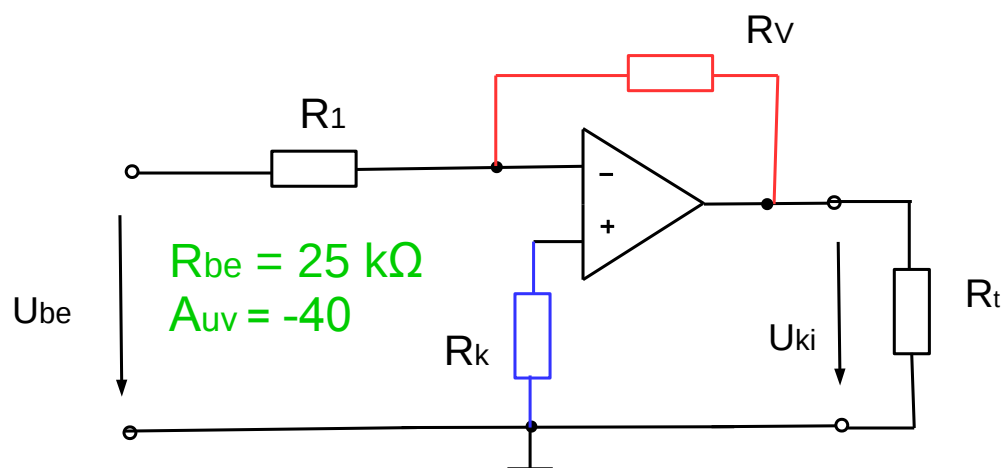
$$R_k = ?$$

$$A_{uv} = ?$$

$$U_{ki} = ?$$

16.4. Feladatok

1. feladat, megoldás



$$U_{ki\max} = 14V$$

$$R_t = 100 \Omega$$

$$R_{be} = R_1 \rightarrow R_1 = 25 \text{ k}\Omega$$

$$A_{Uv} = -R_v / R_1 = -40$$

$$\rightarrow R_v = -A_{Uv} * R_1 = 1 \text{ M}\Omega$$

$$R_k = R_1 \times R_v = 25 \times 1000 \text{ k}\Omega$$

$$R_k = 24,4 \text{ k}\Omega$$

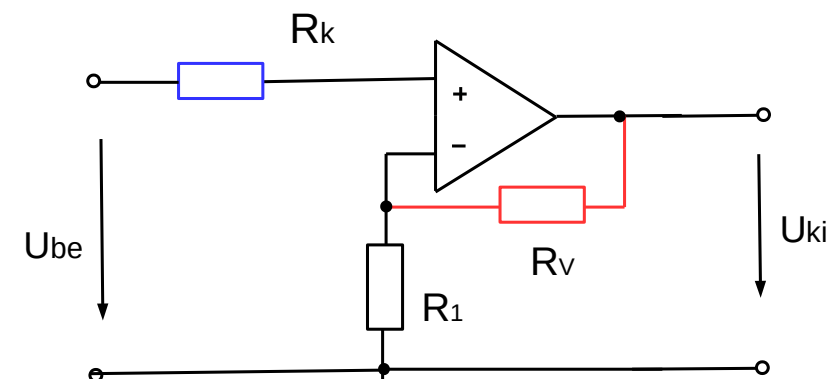
$$U_{ki} = U_{be} * A_{Uv}$$

$$\rightarrow U_{be\max} = U_{ki\max} / A_{Uv}$$

$$U_{be\max} = 14 \text{ V} / 40 = 0,35 \text{ V}$$

$$I_{ki\max} = U_{ki\max} / R_t = 140 \text{ mA}$$

2. feladat, megoldás



$$U_{be} = 20\text{mV}$$

$$R_v = 800 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$A_{Uv} = R_v / R_1 + 1 = 80$$

$$A_{Uv} = 800 / 20 + 1 = 41$$

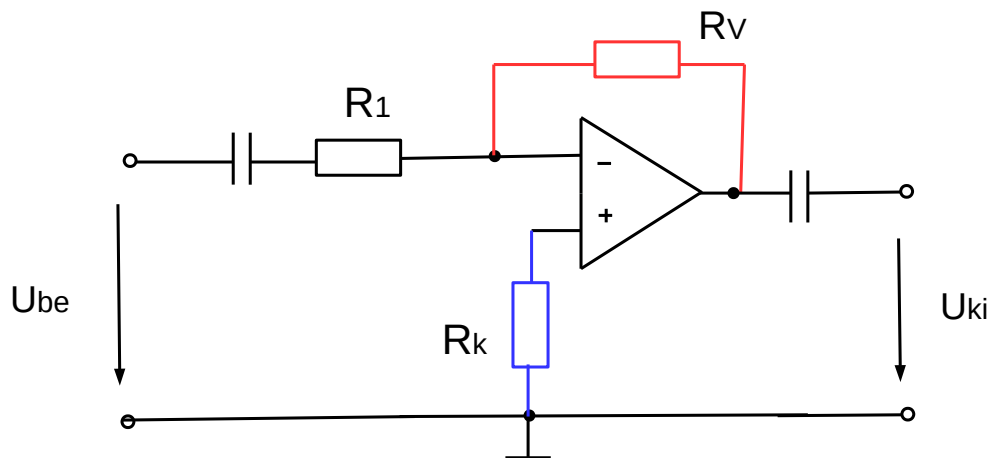
$$R_k = R_1 \times R_v$$

$$R_k = 20 * 800 / (20+800) = 19,5 \text{ k}\Omega$$

$$U_{ki} = U_{be} * A_{Uv} = 20 \text{ mV} * 41 = 820 \text{ mV}$$

16.5. Váltakozó áramú erősítő

Invertáló, váltakozó áramú erősítő



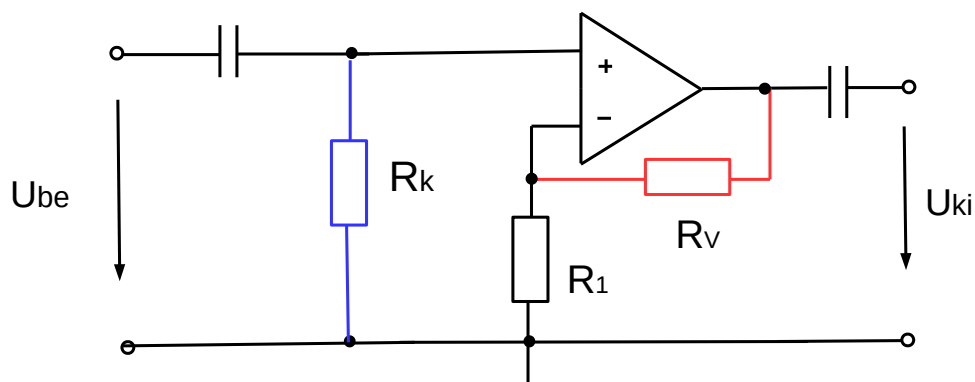
Egyenfeszültséget (illetve kis frekvenciás bemenő jelet) nem erősít !!
Nagyobb frekvenciákon az erősítés nem változik.

De ! a csatoló kondenzátor miatt R_1 ellenállást nem kell figyelembe venni a kompenzáló ellenállás számításakor !

$$A_{UV} = - \frac{R_v}{R_1}$$

$$R_k = R_v$$

Nem invertáló, váltakozó áramú erősítő



$$A_{UV} = \frac{R_v}{R_1} + 1$$

Erősítés szintén nem változik.

De ! → Ebben az esetben a csatoló kondenzátor miatt R_k ellenállást máshogy kell bekötni ! (nem invertáló láb és a földpont közé)

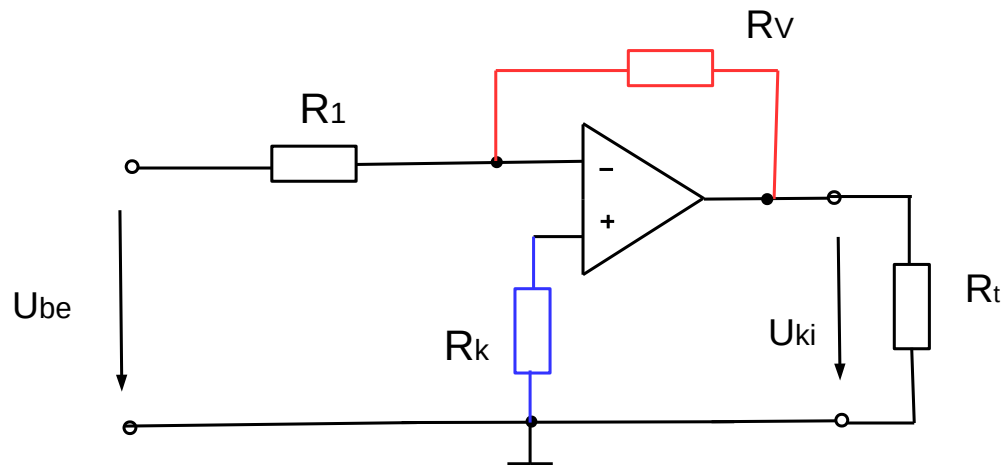
$$R_k = R_1 \times R_v$$

Bemeneti ellenállás értékét csökkenti !

$$R_{be} = R_k$$

16.6. Feladatok

1. feladat



$$R_{be} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = -50$$

$$U_{kimax} = 12 \text{ V}$$

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

$$R_1 = ?$$

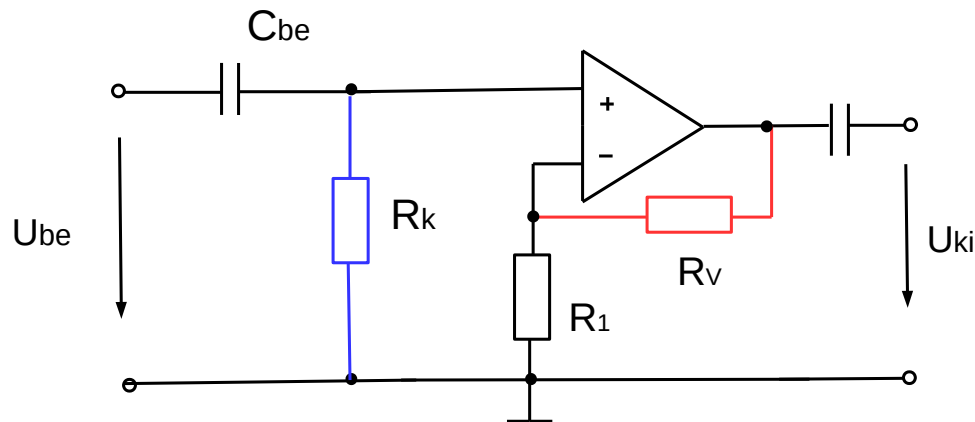
$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

$$U_{bemax} = ?$$

$$I_{kimax} = ?$$

2. feladat



$$R_{be} = 6 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = 80$$

$$f_a = 20 \text{ Hz}$$

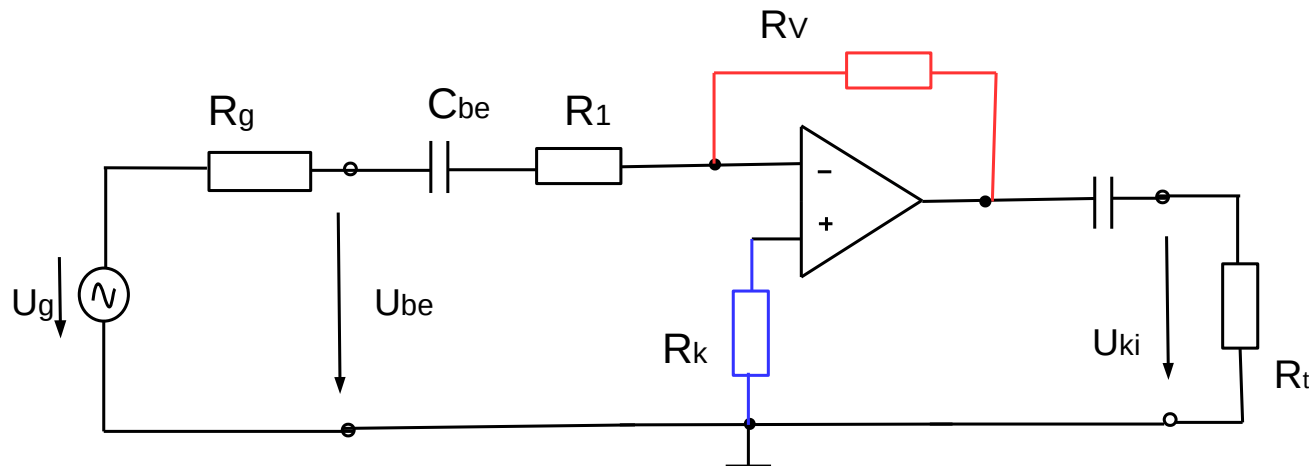
$$R_1 = ?$$

$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

$$C_{be} = ?$$

16.6. Feladatok



3. feladat

$$R_1 = 12 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = -60$$

$$U_{ki} = 10 \text{ V}$$

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

$$R_g = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{be} = ?$$

$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

$$U_{be} = ?$$

$$U_g = ?$$

4. feladat

$$R_1 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_v = 600 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be} = 300 \text{ mV}$$

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

$$R_g = 5 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = ?$$

$$R_{be} = ?$$

$$R_k = ?$$

$$U_{ki} = ?$$

$$U_g = ?$$

16.6. Feladatok

1. feladat, megoldás

$$R_{be} = R_1 \rightarrow R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$A_{Uv} = - R_v / R_1 = - 50$$

$$\rightarrow R_v = - A_{Uv} * R_1 = 500 \text{ k}\Omega$$

$$R_k = R_1 \times R_v = 10 \times 500 \text{ k}\Omega = 9,8 \text{ k}\Omega$$

$$U_{ki} = U_{be} * A_{Uv} \rightarrow U_{kimax} = U_{bemax} * A_{Uv}$$

$$\rightarrow U_{bemax} = U_{kimax} / A_{Uv} = 0,24 \text{ V}$$

$$I_{kimax} = U_{kimax} / R_t = 12 \text{ mA}$$

2. feladat, megoldás

$$R_{be} = R_k \rightarrow R_k = 6 \text{ k}\Omega$$

$$A_{Uv} = R_v / R_1 + 1 = 80$$

$$\rightarrow R_v = (A_{Uv} - 1) * R_1 \rightarrow$$

$$R_v = 79 * R_1$$

$$R_k = R_1 \times R_v = 6 \text{ k}\Omega$$

$$\rightarrow R_1 * 79 * R_1 / 80 * R_1 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 6 \text{ k}\Omega * 80 / 79 = 6,1 \text{ k}\Omega$$

$$R_v = 480 \text{ k}\Omega$$

$$f_a = 20 \text{ Hz} \rightarrow X_{cbe} = R_{be}$$

$$\rightarrow C_{be} = 1 / (2 * \pi * f_a * R_{be})$$

$$C_{be} = 1 / (2 * \pi * 20 \text{ Hz} * 6 \text{ k}\Omega) = 1,3 \text{ }\mu\text{F}$$

3. feladat, megoldás

$$R_{be} = R_1 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$A_{Uv} = - R_v / R_1 = - 600 / 15 = - 40$$

$$R_k = R_v = 600 \text{ k}\Omega \text{ (} C_{be} \text{ miatt)}$$

$$U_{ki} = U_{be} * A_{Uv} = 300 \text{ mV} * -40 = -12 \text{ V}$$

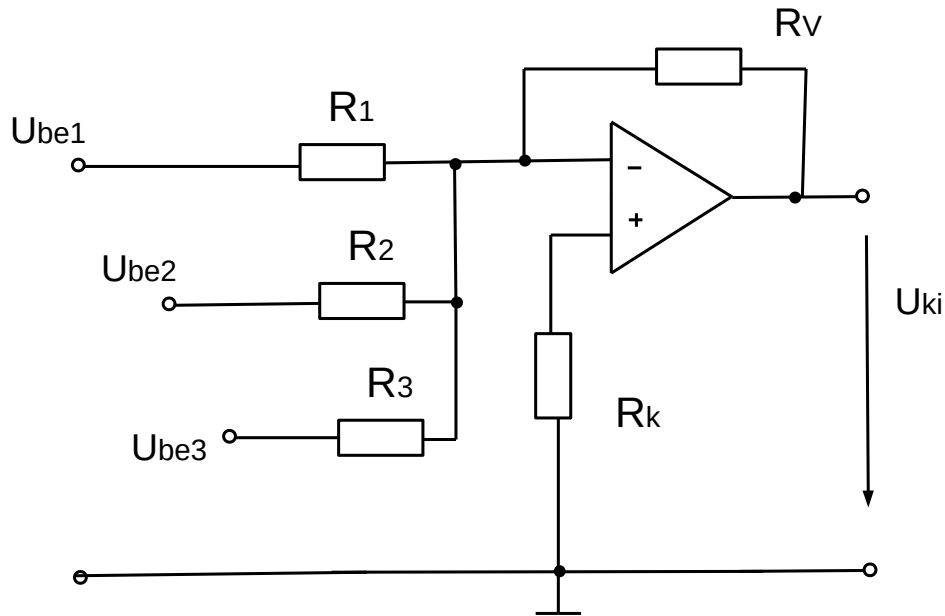
$$I_{be} = U_{be} / R_{be} = 20 \text{ }\mu\text{A}$$

$$U_g = I_{be} * (R_{be} + R_g) = 20 \text{ }\mu\text{A} * 20 \text{ k}\Omega$$

$$U_g = 400 \text{ mV}$$

16.7. Speciális kapcsolások

Összegző áramkör



$$U_{ki} = - R_v * \left(\frac{U_{be1}}{R_1} + \frac{U_{be2}}{R_2} + \frac{U_{be3}}{R_3} \right)$$

Súlyozva összegzi a bemeneteket !

$$R_k = ((R_1 \times R_2) \times R_3) \times R_v$$

pl. ha $R_2 = 2 * R_1$ és $R_3 = 4 * R_1$

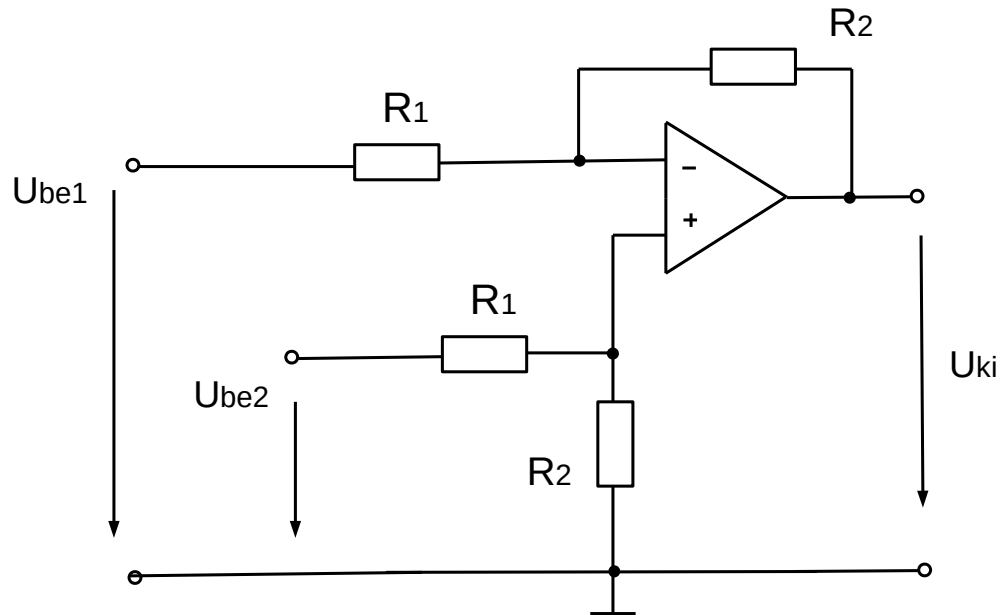
akkor $\rightarrow U_{ki} = - \frac{R_v}{R_1} \left(U_{be1} + \frac{U_{be2}}{2} + \frac{U_{be3}}{4} \right) \rightarrow$ bináris súlyozás

U_{ki} másképpen:

$$U_{ki} = - \frac{R_v}{R_1} * U_{be1} - \frac{R_v}{R_2} * U_{be2} - \frac{R_v}{R_3} * U_{be3}$$

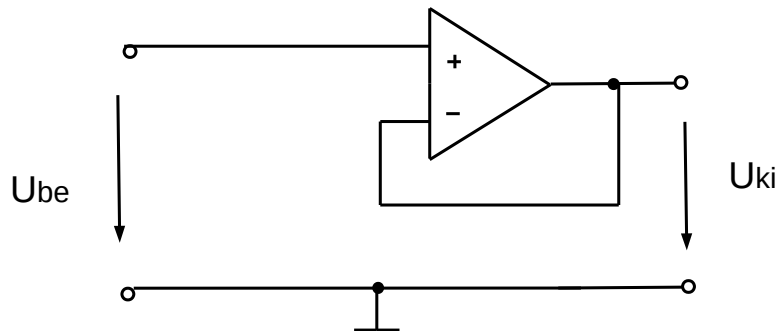
16.7. Speciális kapcsolások

Kivonó áramkör



$$U_{ki} = (U_{be2} - U_{be1}) * \frac{R_2}{R_1}$$

Feszültség követő áramkör



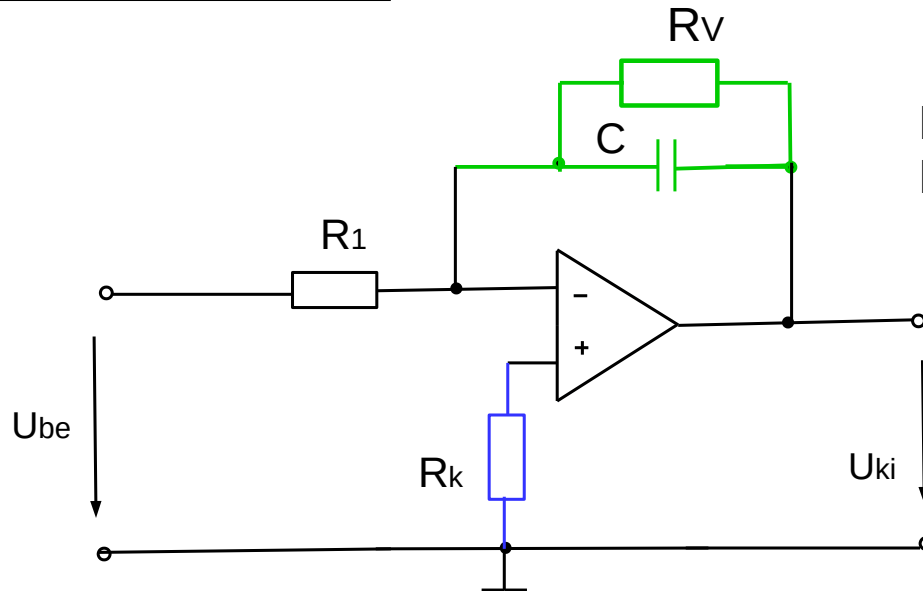
$$U_{ki} = U_{be} \rightarrow A_{UV} = 1$$

R_{be} nagyon nagy
 R_{ki} nagyon kicsi

→ Felhasználása:
Impedancia illesztő,
meghajtó áramkör

16.7. Speciális kapcsolások

Aktív aluláteresztő szűrő



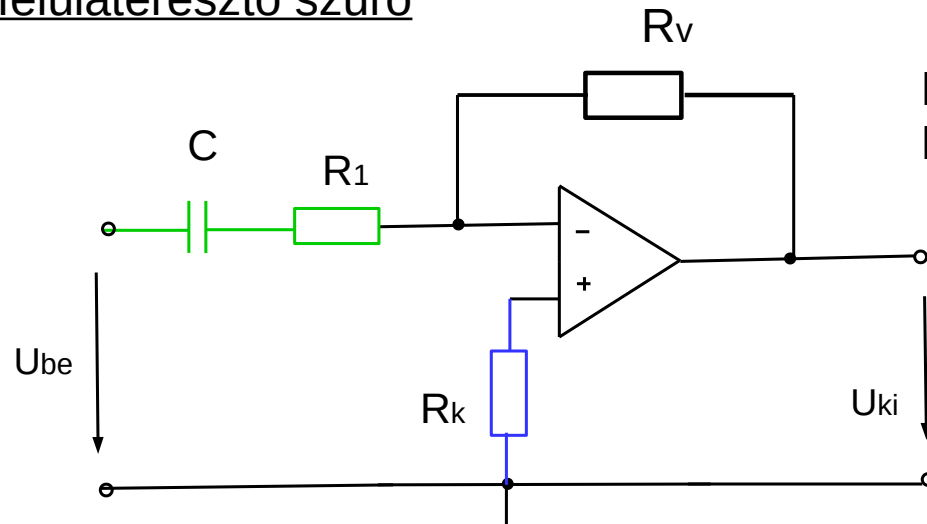
Határ frekvencia $\rightarrow f_h = 1 / (2\pi \cdot R_v \cdot C)$

Kis frekvencián $\rightarrow A_U = - R_v / R_1$

A frekvencia függő erősítés:

$$A_U = - Z_C R_v / R_1$$

Aktív felüláteresztő szűrő



Határ frekvencia $\rightarrow f_h = 1 / (2\pi \cdot R_1 \cdot C)$

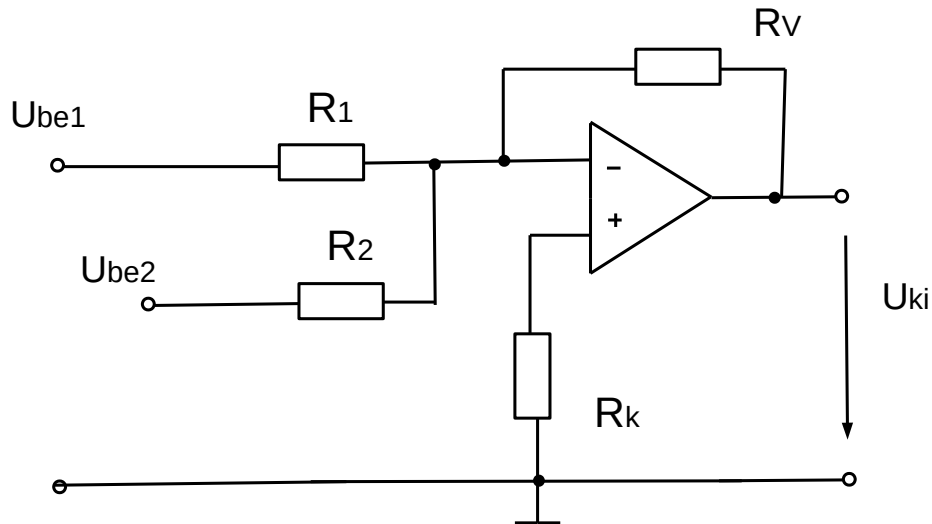
Nagy frekvencián $\rightarrow A_U = - R_v / R_1$

A frekvencia függő erősítés:

$$A_U = - R_v / Z_C R_1$$

16.8. Feladatok

1. feladat



$$R_2 = 40 \text{ k}\Omega$$

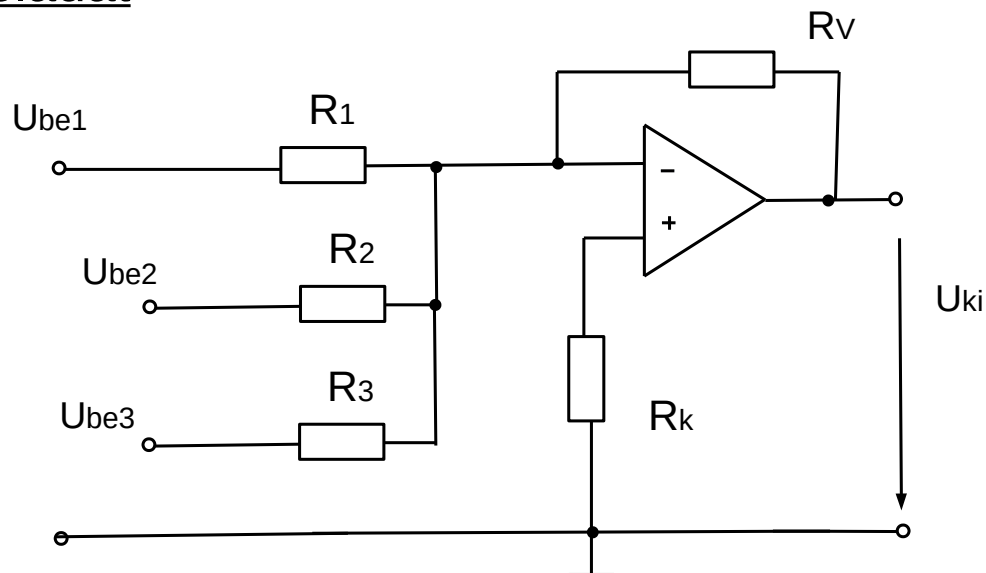
$$\text{és } U_{ki} = -36 * U_{be1} - 9 * U_{be2}$$

$$R_1 = ?$$

$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

2. feladat



$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega \text{ és}$$

$$U_{ki} = -25 * U_{be1} - 20 * U_{be2} - 10 * U_{be3}$$

$$R_2 = ?$$

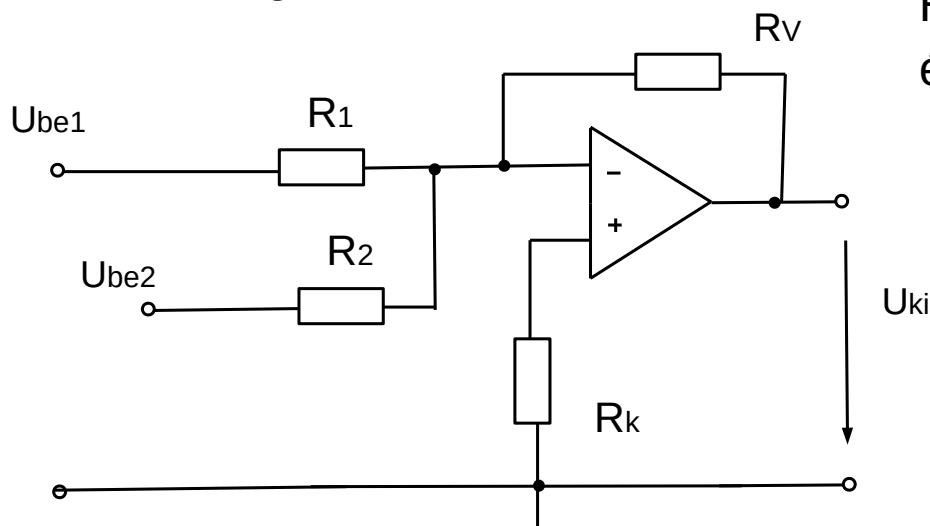
$$R_3 = ?$$

$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

16.8. Feladatok

1. feladat, megoldás



$$R_2 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$\text{és } U_{ki} = -36 \cdot U_{be1} - 9 \cdot U_{be2}$$

$$U_{ki} = -R_v \cdot (U_{be1}/R_1 + U_{be2}/R_2)$$

$$U_{ki} = -(R_v/R_1) \cdot U_{be1} - (R_v/R_2) \cdot U_{be2}$$

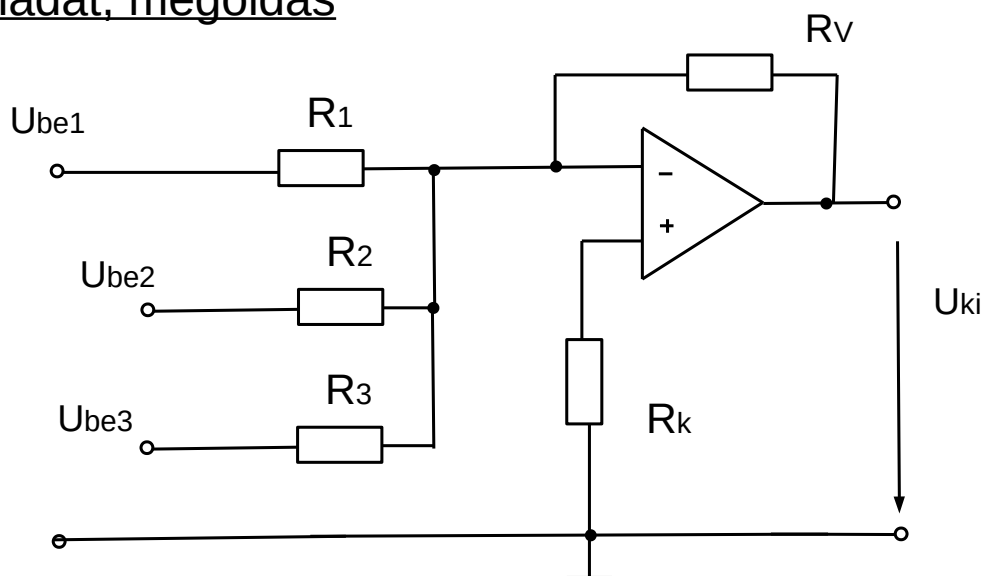
$$\rightarrow R_v/R_1 = 36 \text{ és } R_v/R_2 = 9$$

$$R_v = 9 \cdot R_2 = 360 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = R_v / 36 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_k = (R_1 \times R_2) \times R_v = 7,83 \text{ k}\Omega$$

2. feladat, megoldás



$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega \text{ és}$$

$$U_{ki} = -25 \cdot U_{be1} - 20 \cdot U_{be2} - 10 \cdot U_{be3}$$

$$U_{ki} = -(R_v/R_1) \cdot U_{be1} - (R_v/R_2) \cdot U_{be2} - (R_v/R_3) \cdot U_{be3}$$

$$\rightarrow R_v/R_1 = 25 \text{ és } R_v/R_2 = 20 \\ \text{és } R_v/R_3 = 10$$

$$R_v = 25 \cdot R_1 = 500 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_v / 20 = 25 \text{ k}\Omega$$

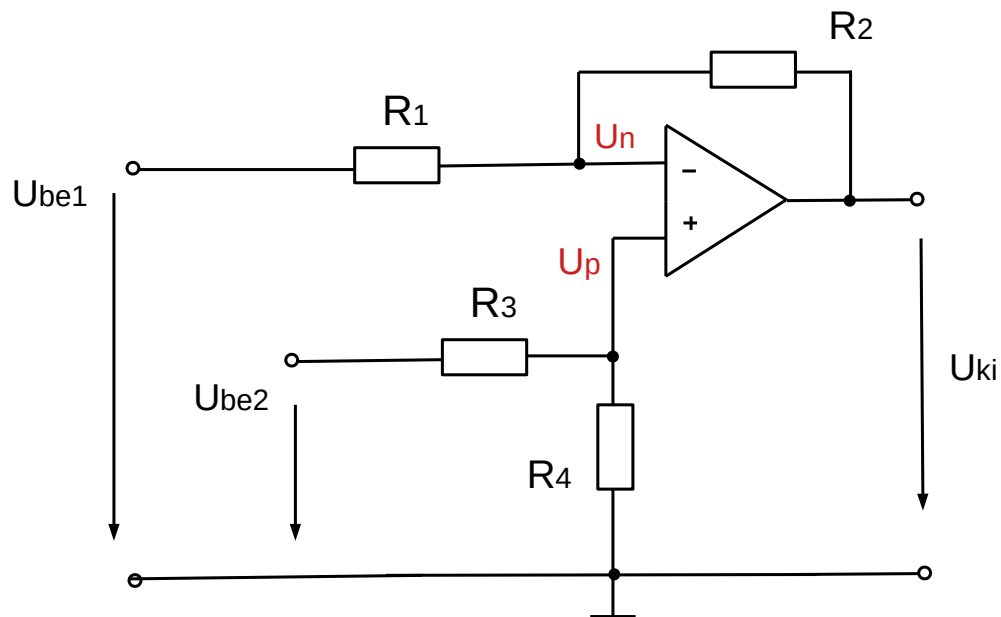
$$R_3 = R_v / 10 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_k = ((R_1 \times R_2) \times R_3) \times R_v = 8,93 \text{ k}\Omega$$

16.9. Speciális kapcsolások *

Kivonó áramkör 2.

Nem azonos a két bemenet erősítése



nyugalmi áram kompenzálása miatt célszerű, ha:

$$R_1 \times R_2 = R_3 \times R_4$$

$$U_{ki} = A_{U0} * (U_p - U_n)$$

Mivel a nyílthurkú erősítés (A_{U0}) nagyon nagy, és negatív visszacsatolás van →

$$U_n \approx U_p$$

$$U_p = U_{be2} * R_4 / (R_3 + R_4) \approx U_n$$

U_n közelében lévő csomópontra a csomóponti törvény:

$$(U_{be1} - U_n) / R_1 = - (U_{ki} - U_n) / R_2$$



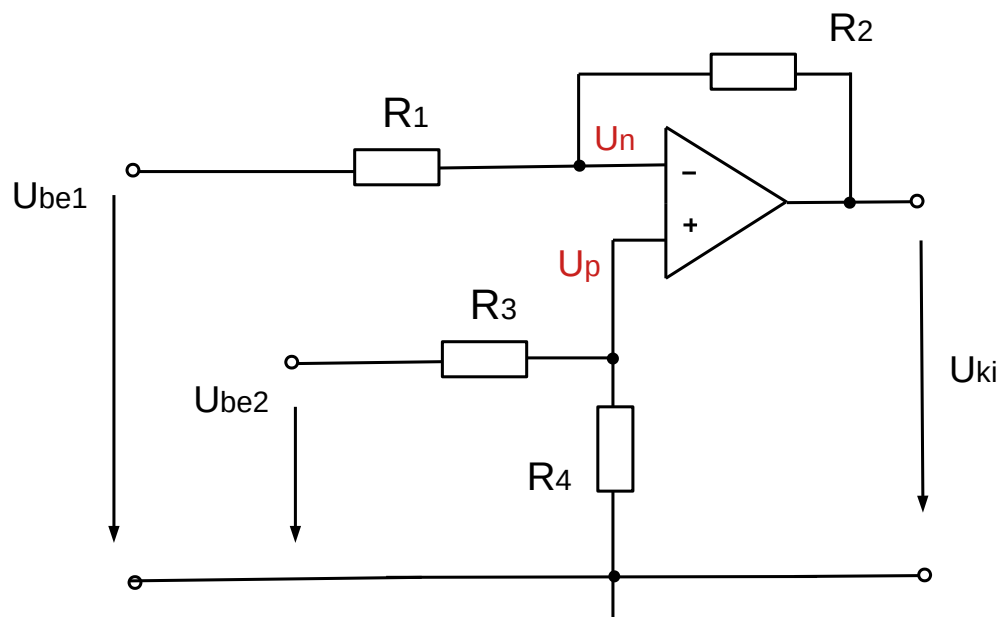
$$U_{ki} - U_n = - \frac{R_2}{R_1} * U_{be1} + \frac{R_2}{R_1} * U_n$$

$$U_{ki} = - \frac{R_2}{R_1} * U_{be1} + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) * \frac{R_4}{R_3 + R_4} * U_{be2}$$

16.9. Speciális kapcsolások *

Kivonó áramkör 2.

mintafeladat



$$U_p = U_{be2} * R_4 / (R_3 + R_4) \approx U_n$$

U_n közelében lévő csomópontra a csomóponti törvény:

$$(U_{be1} - U_n)/R_1 = - (U_{ki} - U_n)/R_2$$

Adatok:

$$R_1 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 60 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be1} = 5 \text{ V}$$

$$U_{be2} = 3 \text{ V}$$

$$U_{ki} = ???$$

Megoldás:

$$U_{ki} = - \frac{R_2}{R_1} * U_{be1} + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) * \frac{R_4}{R_3 + R_4} * U_{be2}$$

$$U_{ki} = - 2 * U_{be1} + 3 * (1/2) * U_{be2}$$

$$U_{ki} = - 2 * 5 \text{ V} + (3/2) * 3 \text{ V} = - 10 + 4,5 = - 5,5 \text{ V}$$

16.9. Speciális kapcsolások

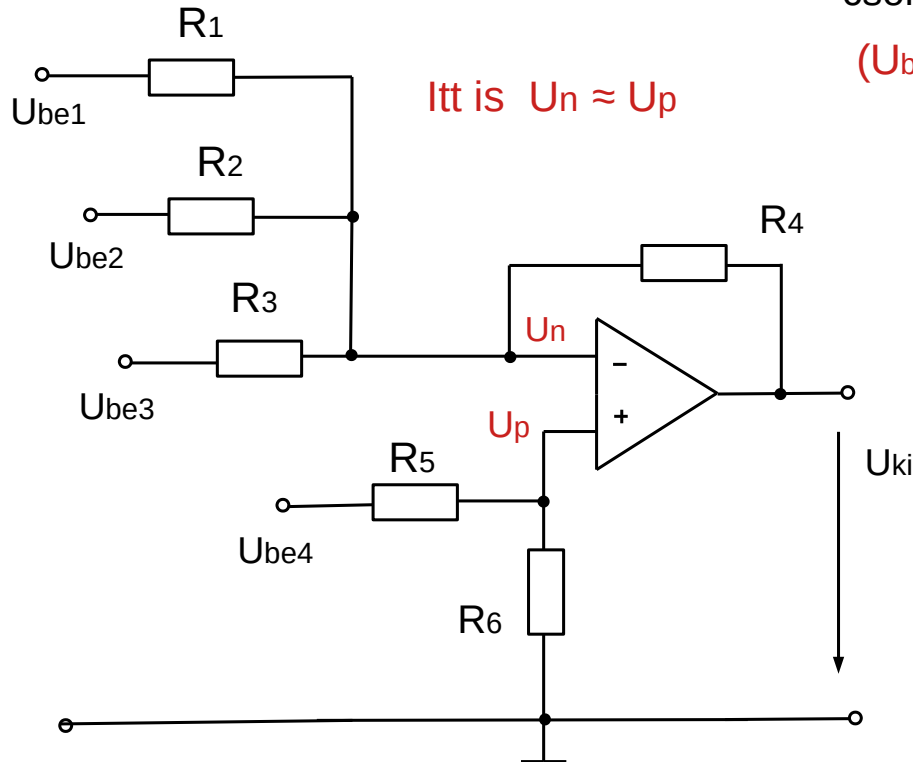
Speciális kivonó áramkör (összegző-kivonó)

U_n közelében lévő csomópontra a csomóponti törvény:

$$(U_{be1}-U_n)/R_1 + (U_{be2}-U_n)/R_2 + (U_{be3}-U_n)/R_3 = - (U_{ki} - U_n)/R_4$$

Itt is $U_n \approx U_p$

$$U_p = U_{be4} * R_6 / (R_5 + R_6) \approx U_n$$



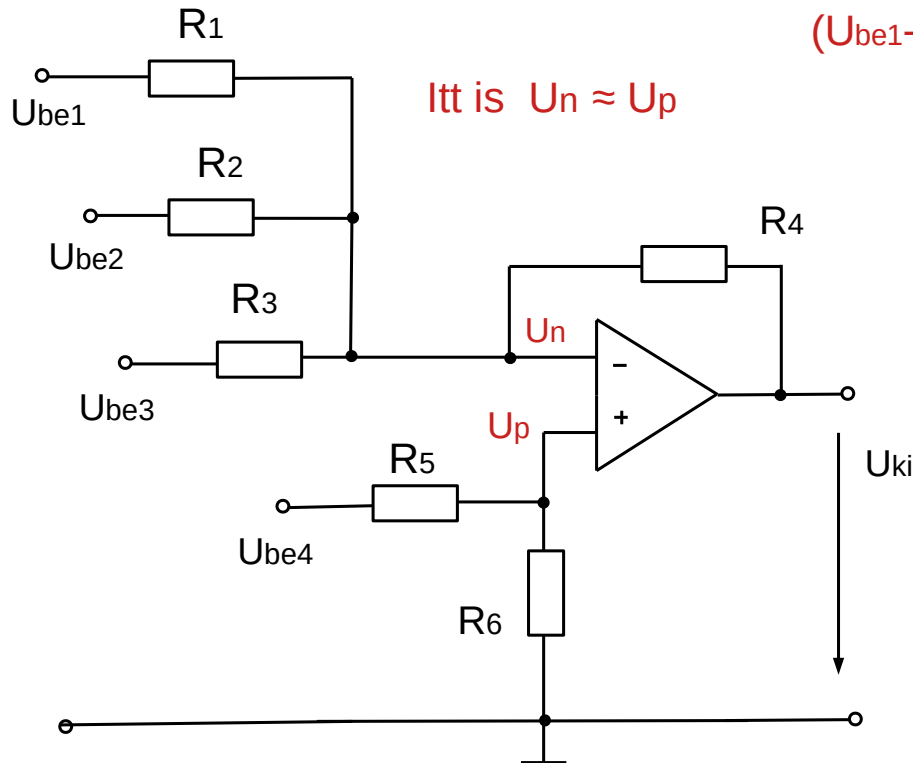
U_{ki} ezekből az előző áramkörhöz hasonló képlettel számolható:

$$U_{ki} = - \frac{R_4}{R_1} * U_{be1} - \frac{R_4}{R_2} * U_{be2} - \frac{R_4}{R_3} * U_{be3} + \left(\frac{R_4}{R_1} + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) * \frac{R_6}{R_5 + R_6} * U_{be4}$$

16.9. Speciális kapcsolások

Speciális kivonó áramkör

(összegző-kivonó) **mintafeladat**



Itt is $U_n \approx U_p$

$$(U_{be1}-U_n)/R_1 + (U_{be2}-U_n)/R_2 + (U_{be3}-U_n)/R_3 = -(U_{ki} - U_n)/R_4$$

$$U_p = U_{be4} * R_6 / (R_5 + R_6) \approx U_n$$

Adatok:

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 60 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be1} = 0,5 \text{ V}$$

$$U_{be2} = 1 \text{ V}$$

$$U_{be3} = 2 \text{ V}$$

$$U_{be4} = 3 \text{ V}$$

$$U_{ki} = ???$$

Megoldás:

$$U_{ki} = -\frac{R_4}{R_1} * U_{be1} - \frac{R_4}{R_2} * U_{be2} - \frac{R_4}{R_3} * U_{be3} + \left(\frac{R_4}{R_1} + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) * \frac{R_6}{R_5 + R_6} * U_{be4}$$

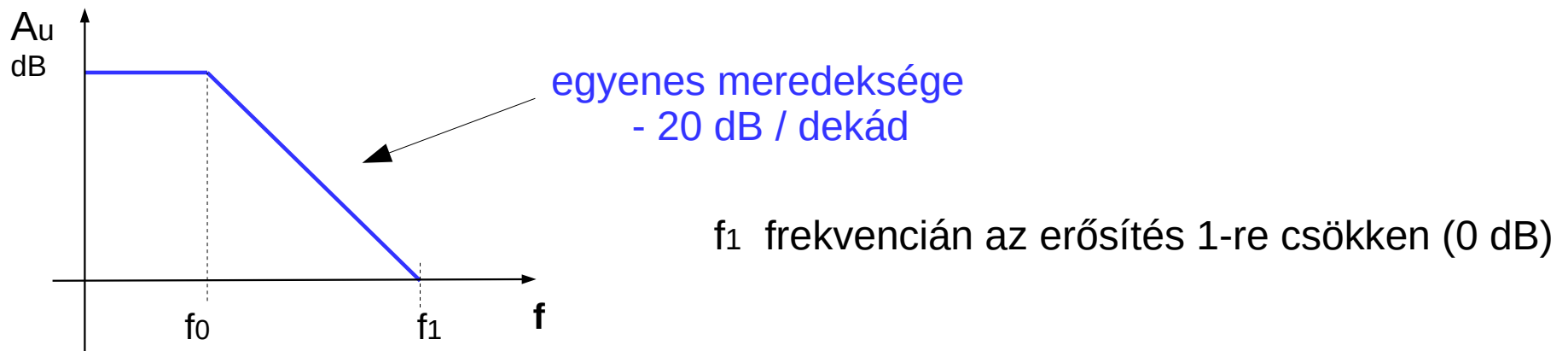
$$U_{ki} = -6 * U_{be1} - 3 * U_{be2} - 2 * U_{be3} + (6+3+2+1) * (5/45) * U_{be4}$$

$$U_{ki} = -6 * 0,5 \text{ V} - 3 * 1 \text{ V} - 2 * 2 \text{ V} + (12*5/45) * 3 \text{ V} = -3 - 3 - 4 + (4/3)*3 = -6 \text{ V}$$

16.10. Sávzélesség

Nyílthurkú sávzélesség

- A műveleti erősítő egyen feszültséget is erősít \rightarrow alsó határ frekvenciája 0 (f_a)
- Felső határ frekvenciája (f_f) visszacsatolás nélkül (nyílthurkú) sajnos nagyon kicsi !!
 - \rightarrow jellemzően csak néhány Hz ($n \cdot 10\text{Hz}$) \rightarrow jelölése f_0 vagy f_h
- Ezért visszacsatolás nélkül a sávzélessége kicsi !! $\rightarrow B_0 = f_0$



Erősítés sávzélesség szorzat

- erősítés sávzélesség szorzat ($A_{U0} * f_0$) $\rightarrow f_T$ általában $1\text{-}10\text{MHz}$
- az erősítés sávzélesség szorzat viszont közel állandó !!
- negatív visszacsatolás \rightarrow csökken az erősítés és
 - \rightarrow növekszik a sávzélesség

$$A_{U0} * B_0 = A_{uv} * B_v$$

vagy

$$A_{U0} * f_0 = A_{uv} * f_f$$

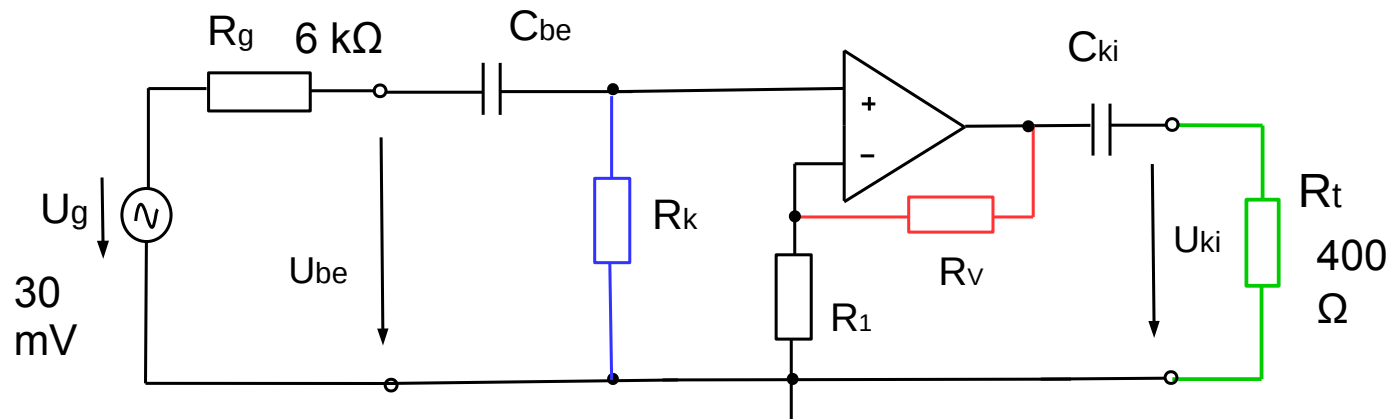
pl.

$A_{U0} = 40000$ és $f_0 = 20\text{ Hz}$, majd visszacsatolással $\rightarrow A_{uv} = 50$

$$\rightarrow B_v = A_{U0} * B_0 / A_{uv} = 40000 * 20 / 50 = 16000\text{ Hz}$$

16.10. Sáv szélesség

1. mintafeladat



$$A_{U0} = 10^5$$

$$f_0 = 10 \text{ Hz}$$

$$C_{be} = 1 \mu\text{F}$$

$$U_g = 30 \text{ mV}$$

$$U_{ki} = 1,5 \text{ V}$$

$$R_k = 30 \text{ k}\Omega$$

$$C_{ki} = 10 \mu\text{F}$$

$$R_g = 6 \text{ k}\Omega$$

- Az erősítő bemeneti ellenállása, $R_{be} = ?$
- feszültség erősítése, $A_U = ?$
- $R_v = ?$ $R_k = ?$
- az erősítő felső és alsó határfrekvenciája

$$R_{be} = R_k = 30 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be} = U_g \cdot R_{be} / (R_g + R_{be})$$

$$U_{be} = 30 \text{ mV} \cdot 30 \text{ k}\Omega / (6 \text{ k}\Omega + 30 \text{ k}\Omega)$$

$$U_{be} = 25 \text{ mV}$$

$$A_U = U_{ki} / U_{be} = 1,5 \text{ V} / 25 \text{ mV} = 60$$

$$A_U = 1 + R_v / R_1 \rightarrow R_v = 59 \cdot R_1$$

$$\text{és } R_k = 30 \text{ k}\Omega = R_v \cdot R_1 \rightarrow$$

$$30 \text{ k}\Omega = 59 \cdot R_1 \cdot R_1 / (59 \cdot R_1 + R_1)$$

$$30 \text{ k}\Omega = R_1 \cdot 59 / 60 \rightarrow R_1 = 30,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_v = 1800 \text{ k}\Omega$$

$$f_{a1} \rightarrow X_{C_{be}} = R_{be} + R_g$$

$$\rightarrow f_{a1} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot C_{be} \cdot (R_{be} + R_g))$$

$$f_{a1} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 1 \mu\text{F} \cdot 36 \text{ k}\Omega) = 4,42 \text{ Hz}$$

$$f_{a2} \rightarrow X_{C_{ki}} = R_t \rightarrow f_{a2} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot C_{ki} \cdot R_t)$$

$$f_{a2} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 10 \mu\text{F} \cdot 400 \Omega) = 39,8 \text{ Hz}$$

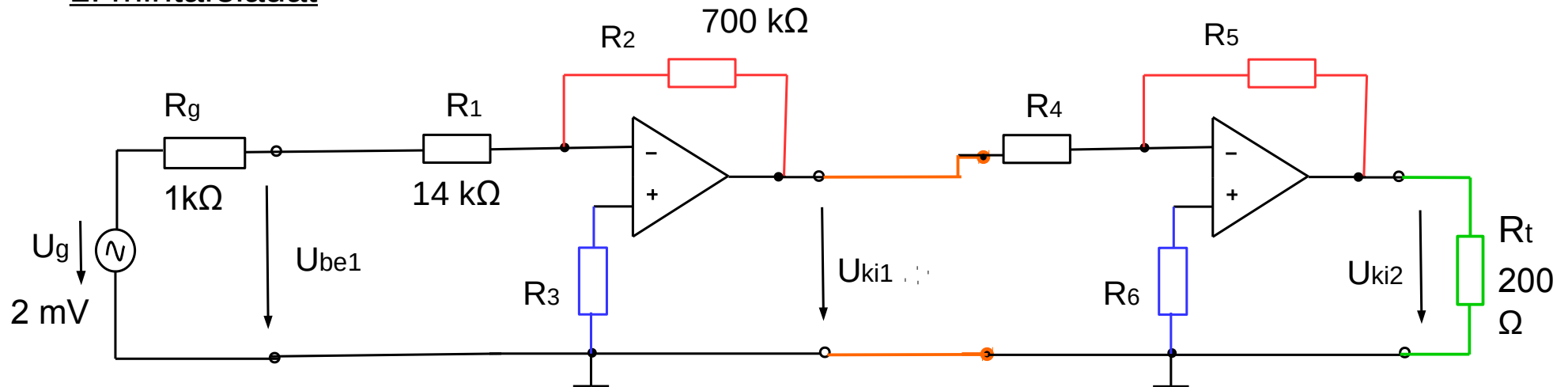
$$f_a = 39,8 \text{ Hz}$$

$$A_{U0} \cdot f_0 = A_{uv} \cdot f_f \rightarrow f_f = A_{U0} \cdot f_0 / A_{uv}$$

$$f_f = 10^5 \cdot 10 \text{ Hz} / 60 = 16,66 \text{ kHz}$$

16.11. Több fokozatú erősítő

1. mintafeladat



$$\begin{aligned} R_3 &= ? & R_{be1} &= ? \\ U_{be1} &= ? & A_{U1} &= ? \\ U_{ki1} &= ? \end{aligned}$$

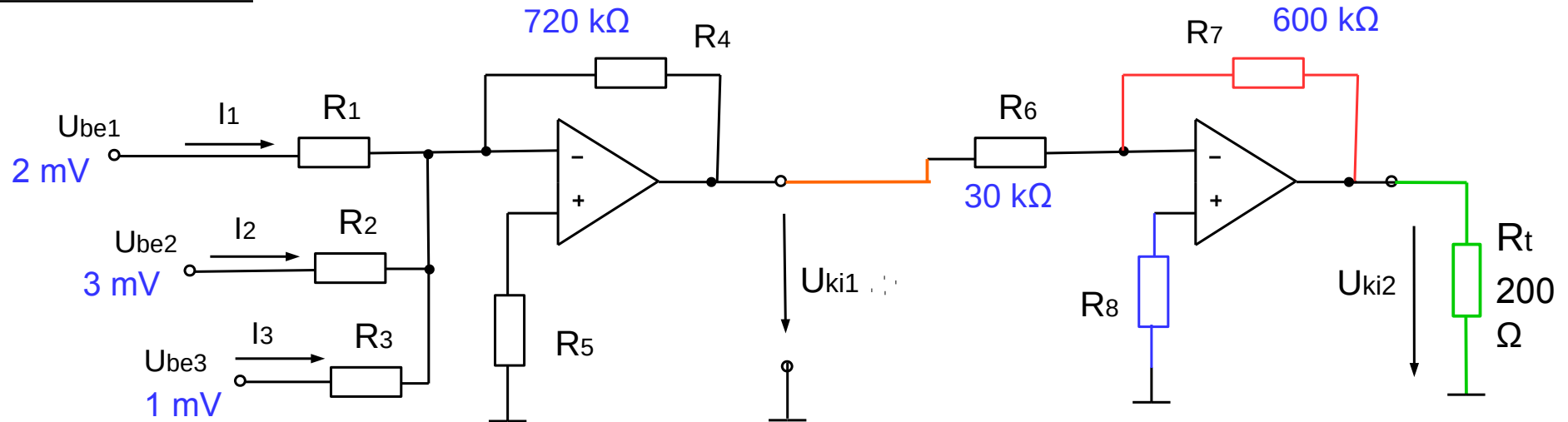
$$\begin{aligned} R_{be2} &= 20 \text{ k}\Omega & A_{U2} &= -40 \\ R_4 &= ? & R_5 &= ? & R_6 &= ? \\ U_{ki2} &= ? & A_U &= ? & A_i &= ? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_3 &= R_1 \times R_2 = 14 \times 700 \text{ k}\Omega = 13,7 \text{ k}\Omega \\ R_{be1} &= R_1 = 14 \text{ k}\Omega \\ A_{U1} &= -R_2 / R_1 = -50 \\ U_{be1} &= U_g \times R_{be1} / (R_g + R_{be1}) \\ U_{be1} &= 1,87 \text{ mV} \\ U_{ki1} &= U_{be1} \times A_{U1} = -93,33 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{be2} &= R_4 \rightarrow R_4 = 20 \text{ k}\Omega \\ A_{U2} &= -R_5 / R_4 = -40 \\ &\rightarrow R_5 = -A_{U2} \times R_4 = 800 \text{ k}\Omega \\ R_6 &= R_4 \times R_5 = 20 \times 800 \text{ k}\Omega = 19,5 \text{ k}\Omega \\ U_{ki2} &= U_{be2} \times A_{U2} = -93,33 \text{ mV} \times -40 \\ U_{ki2} &= 3733,33 \text{ mV} = 3,73 \text{ V} \\ A_U &= A_{U1} \times A_{U2} = 2000 \\ A_i &= A_U \times R_{be1} / R_t = 140000 \end{aligned}$$

16.11. Több fokozatú erősítő

2. mintafeladat



$$R_4 = 720 \text{ k}\Omega \quad \text{és}$$

$$U_{ki1} = -30 \cdot U_{be1} - 20 \cdot U_{be2} - 40 \cdot U_{be3}$$

$$R_6 = 30 \text{ k}\Omega \quad \text{és} \quad R_7 = 600 \text{ k}\Omega$$

$$\begin{matrix} R_1 = ? & R_2 = ? & R_3 = ? & R_5 = ? \\ R_8 = ? & A_{u2} = ? & U_{ki1} = ? & U_{ki2} = ? \end{matrix}$$

$$U_{ki1} = - (R_4/R_1) \cdot U_{be1} - (R_4/R_2) \cdot U_{be2} - (R_4/R_3) \cdot U_{be3}$$

$$\rightarrow R_4/R_1 = 30 \quad \text{és} \quad R_4/R_2 = 20 \\ \text{és} \quad R_4/R_3 = 40$$

$$R_1 = R_4 / 30 = 720/30 = 24 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_4 / 20 = 720/20 = 36 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_4 / 40 = 720/40 = 18 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = ((R_1 \times R_2) \times R_3) \times R_4 = 7,91 \text{ k}\Omega$$

$$R_8 = R_6 \times R_7 = 28,57 \text{ k}\Omega$$

$$A_{u2} = - R_7 / R_6 = - 600/30 = - 20$$

$$U_{ki1} = -30 \cdot U_{be1} - 20 \cdot U_{be2} - 40 \cdot U_{be3}$$

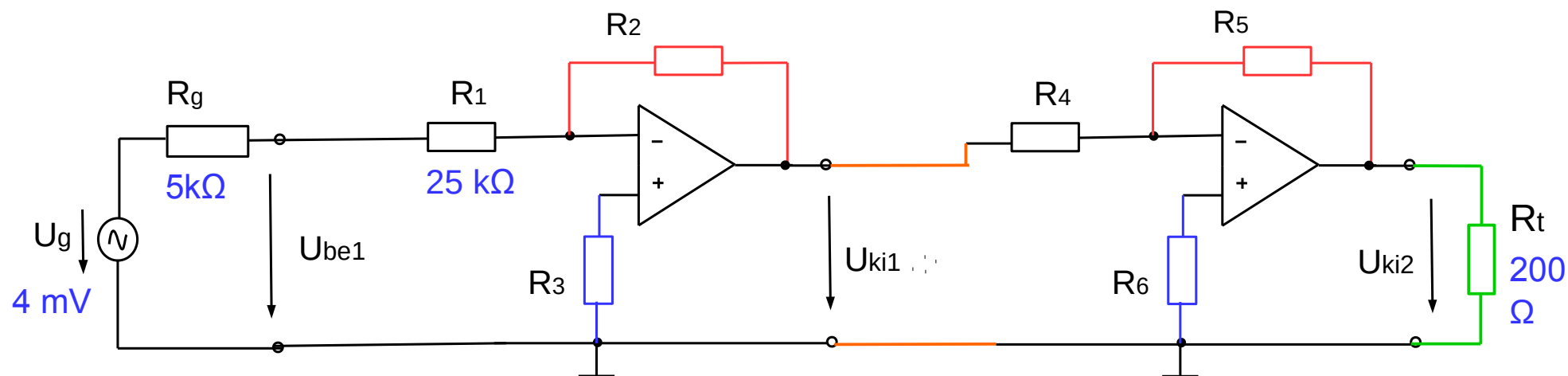
$$U_{ki1} = -30 \cdot 2 - 20 \cdot 3 - 40 \cdot 1 \text{ mV} = -160 \text{ mV}$$

$$U_{ki2} = U_{be2} \cdot A_{u2} = -160 \text{ mV} \cdot -20$$

$$U_{ki2} = 3200 \text{ mV} = 3,2 \text{ V}$$

16.12. Feladatok

1. feladat



$$A_{U1} = -30$$

$$R_2 = ?$$

$$U_{be1} = ?$$

$$R_3 = ?$$

$$U_{ki1} = ?$$

$$R_{be1} = ?$$

$$R_{be2} = 25\text{ k}\Omega$$

$$R_4 = ?$$

$$U_{ki2} = ?$$

$$R_5 = 600\text{ k}\Omega$$

$$A_{U2} = ?$$

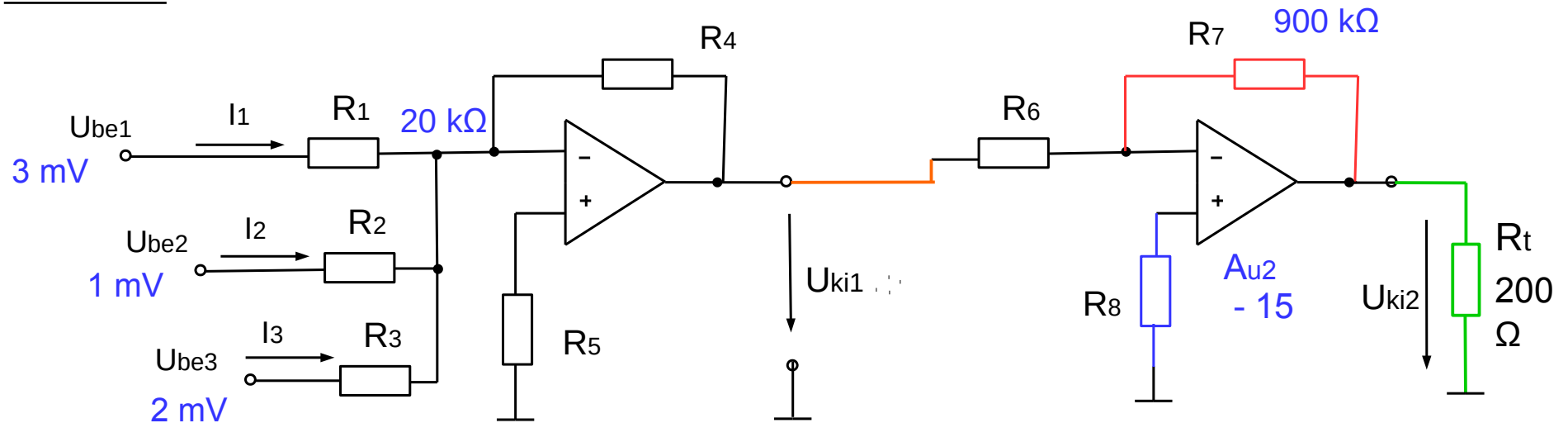
$$A_U = ?$$

$$R_6 = ?$$

$$A_i = ?$$

16.12. Feladatok

2. feladat



$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega \quad \text{és}$$

$$U_{ki1} = -32 \cdot U_{be1} - 16 \cdot U_{be2} - 8 \cdot U_{be3}$$

$$A_{u2} = -15$$

és

$$R_7 = 300 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = ?$$

$$R_2 = ?$$

$$R_3 = ?$$

$$R_5 = ?$$

$$R_6 = ?$$

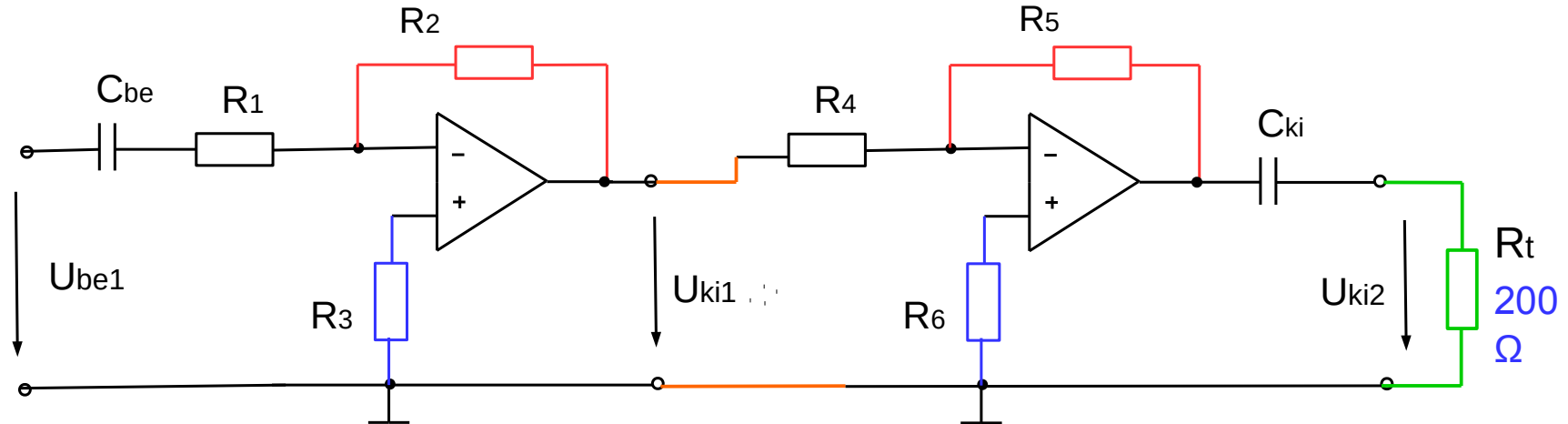
$$R_8 = ?$$

$$U_{ki1} = ?$$

$$U_{ki2} = ?$$

16.12. Feladatok

3. feladat



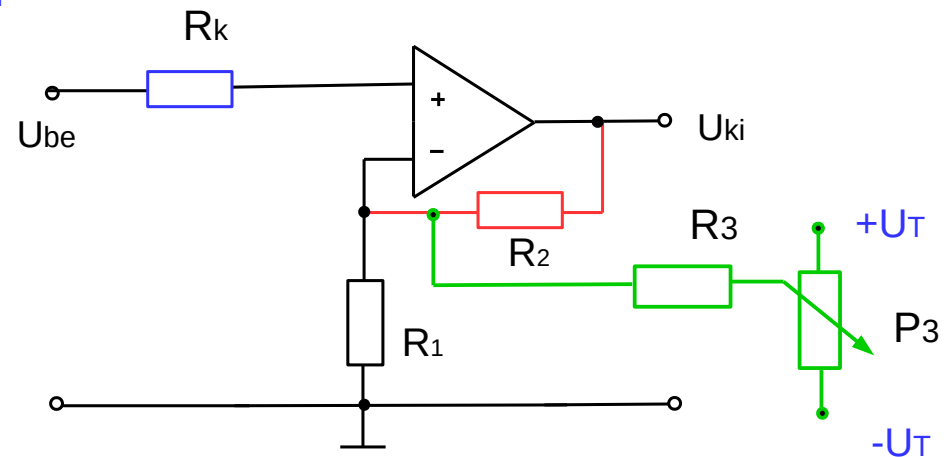
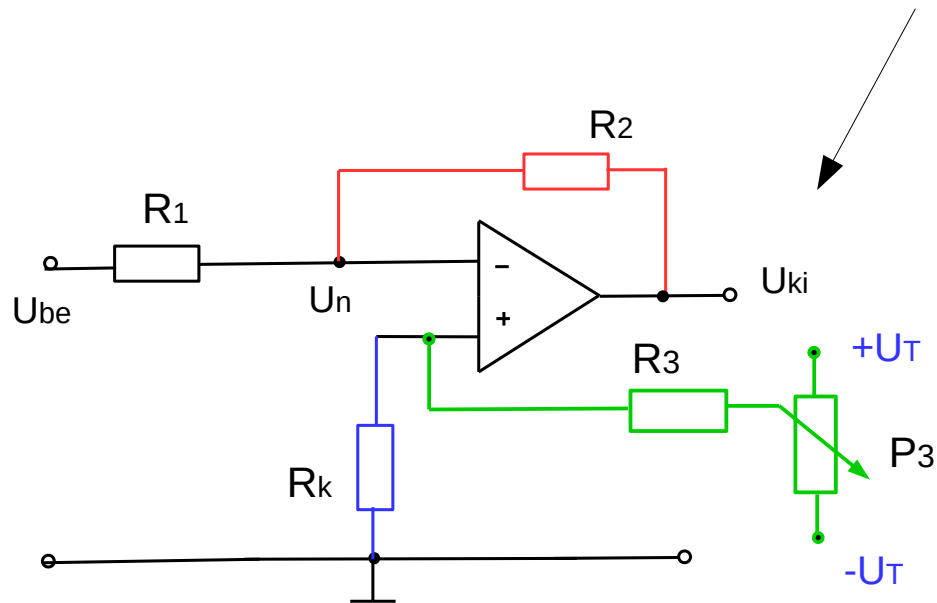
$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 400 \text{ k}\Omega \quad R_4 = 30 \text{ k}\Omega \quad R_5 = 750 \text{ k}\Omega$$

- a, $R_3 = ?$ $R_6 = ?$
- b, feszültség erősítés, $A_u = ?$ (viszonyszámként és dB-ben is !)
- c, kimeneti teljesítmény, $p_{ki} = ?$ ha $U_{be1} = 3 \text{ mV}$
- d, $C_{be} = ?$ és $C_{ki} = ?$ hogy az erősítő alsó határ frekvenciája 15 Hz legyen !
A vezérlő jelforrás belső ellenállása, $R_g = 5 \text{ k}\Omega$!
A műveleti erősítő kimeneti ellenállása elhanyagolható !

16.13. Hiba feszültség kompenzálása

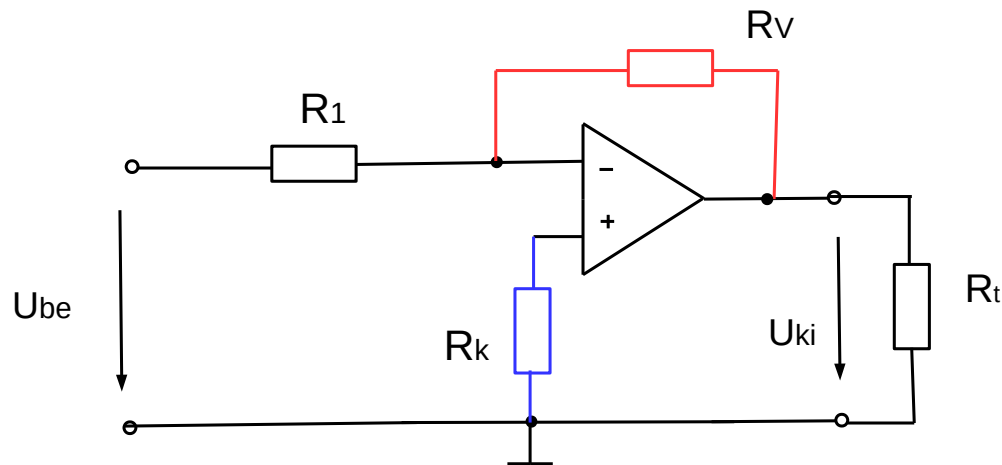
Nullpont beállítás, offset kiegyenlítés

- U_{ki} nem biztos hogy 0, $U_{be} = 0$ esetén
- van olyan műveleti erősítő, amelyeknek külön bemenetei vannak ilyen célra, de ha nincs akkor is van lehetőség külsőleg megoldani



16.14. Ismétlő feladatok

1. feladat



$$R_1 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = -32$$

$$U_{kimax} = 13 \text{ V}$$

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

$$R_{be} = ?$$

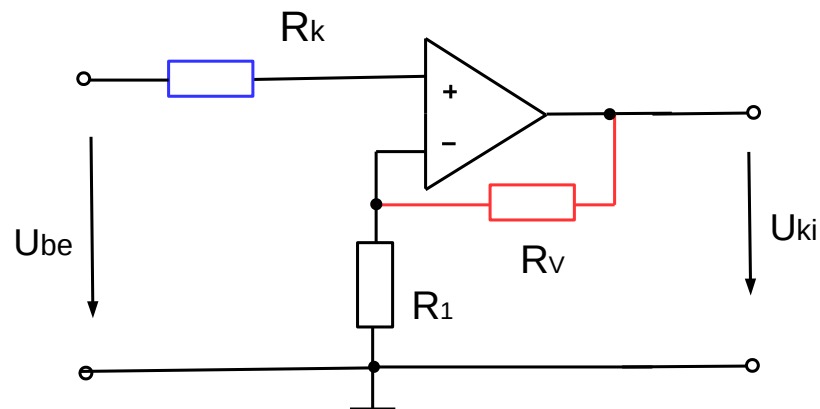
$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

$$U_{bemax} = ?$$

$$I_{kimax} = ?$$

2. feladat



$$R_v = 984 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 24 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be} = 40 \text{ mV}$$

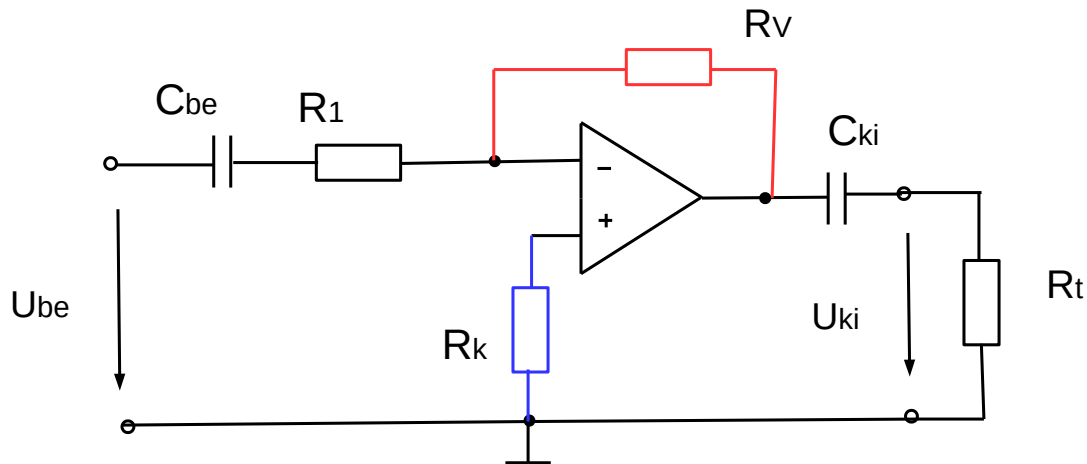
$$R_k = ?$$

$$A_{uv} = ?$$

$$U_{ki} = ?$$

16.14. Ismétlő feladatok

3. feladat



$$R_{be} = 25 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = -40$$

$$U_{kimax} = 12 \text{ V}$$

$$R_t = 500 \text{ }\Omega$$

$$R_1 = ?$$

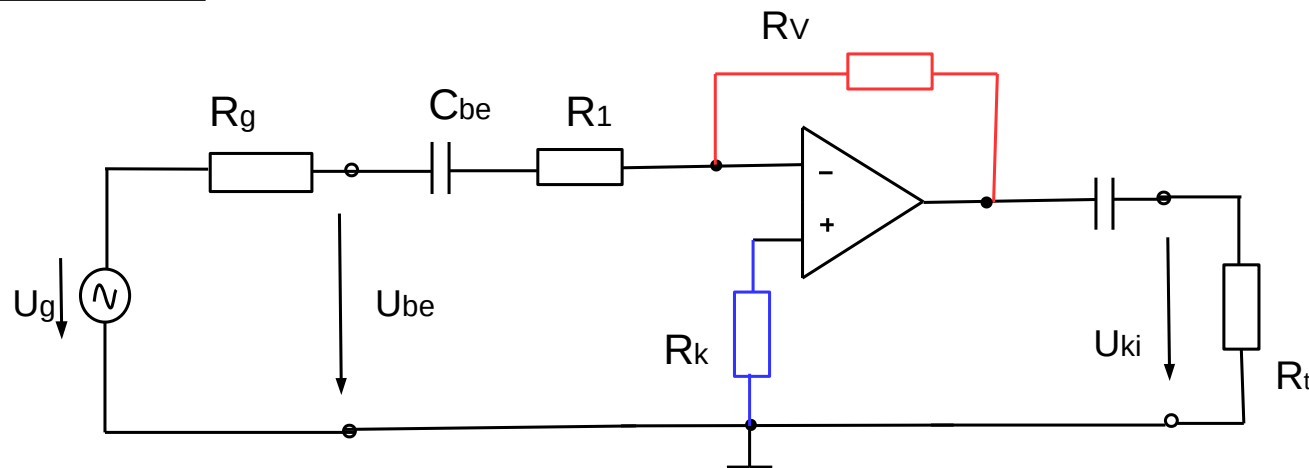
$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

$$U_{bemax} = ?$$

$$I_{kimax} = ?$$

4. feladat



$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_v = 700 \text{ k}\Omega$$

$$U_{be} = 200 \text{ mV}$$

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

$$R_g = 5 \text{ k}\Omega$$

$$A_{uv} = ?$$

$$R_{be} = ?$$

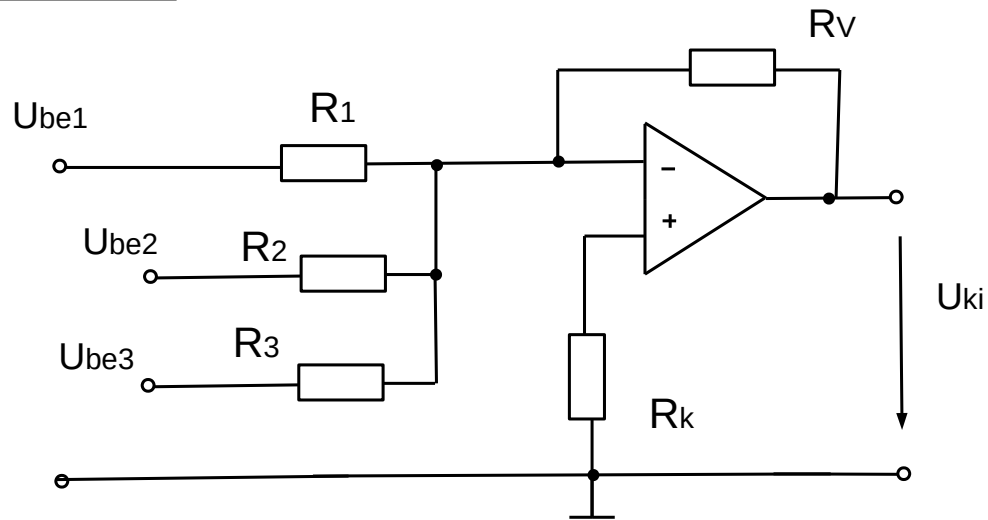
$$R_k = ?$$

$$U_{ki} = ?$$

$$U_g = ?$$

16.14. Ismétlő feladatok

5. feladat



$$R_1 = 20 \text{ k}\Omega \text{ és}$$

$$U_{ki} = -30 \cdot U_{be1} - 40 \cdot U_{be2} - 20 \cdot U_{be3}$$

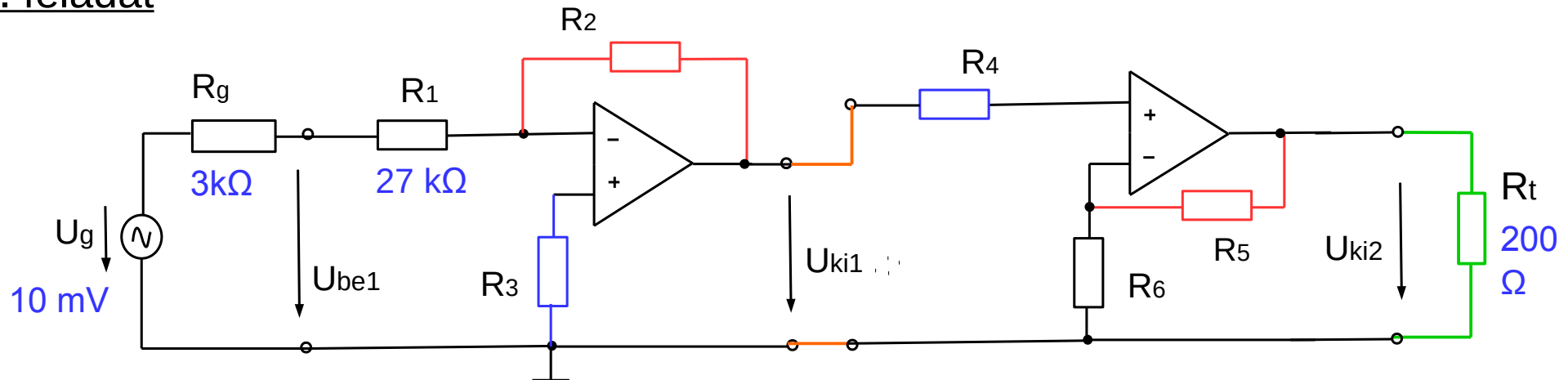
$$R_2 = ?$$

$$R_3 = ?$$

$$R_v = ?$$

$$R_k = ?$$

6. feladat



$$A_{U1} = -20$$

$$R_2 = ?$$

$$U_{be1} = ?$$

$$R_3 = ?$$

$$U_{ki1} = ?$$

$$R_{be1} = ?$$

$$R_6 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = ?$$

$$U_{ki2} = ?$$

$$R_5 = 780 \text{ k}\Omega$$

$$A_{U2} = ?$$

$$A_U = ?$$

$$R_4 = ?$$

$$A_i = ?$$