

Gingl Zoltán, Szeged, 2019.

Elektronika

Műveleti erősítők

Műveleti erősítők

Univerzális építőelem hasznossága

- ▶ Passzív elemek
 - ▶ nem lehet erősíteni, kicsi jeleket kezelni
 - ▶ erősen korlátozott műveletek végezhetőek
- ▶ Tranzisztoros erősítők – hatékonyabbak, de
 - ▶ AC erősítés
 - ▶ nem túl pontos
 - ▶ egyszerű feladatokra elég csak

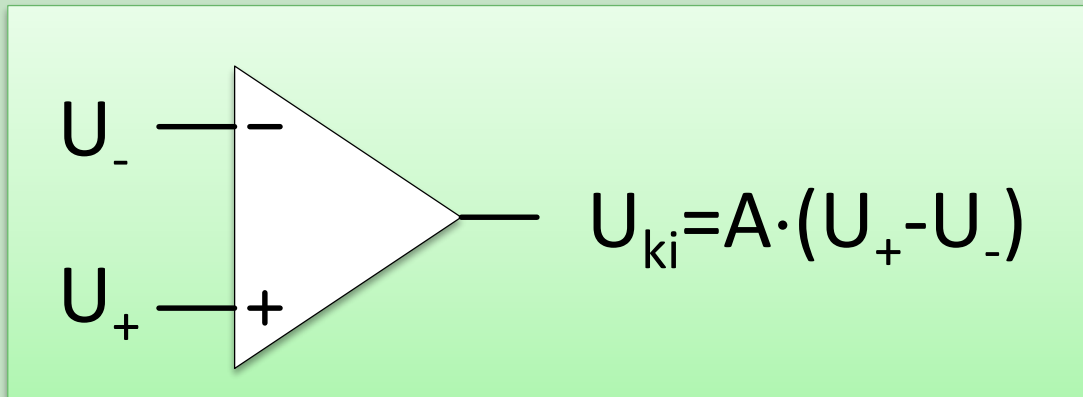
Univerzális építőelem hasznossága

- ▶ Műszerek
 - ▶ szenzorok kezelése
 - ▶ precíz elektronika
 - ▶ komplikált jelfeldolgozás
- ▶ Korszerű eszközök
 - ▶ sokféle feladat
 - ▶ bonyolult feldolgozás
 - ▶ igen sok áramköri elem

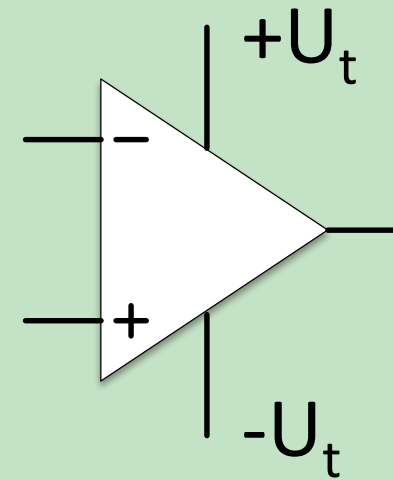
Műveleti erősítők

- ▶ Előre elkészített tranzisztorokból álló kapcsolás
- ▶ Integrált áramkör
- ▶ Nagyon sokféle funkció
 - ▶ erősítés
 - ▶ összeadás, kivonás
 - ▶ integrálás, deriválás
 - ▶ exponenciális, logaritmikus műveletek
 - ▶ áram-feszültség, ellenállás feszültség konverzió
 - ▶ jelgenerátorok, ...

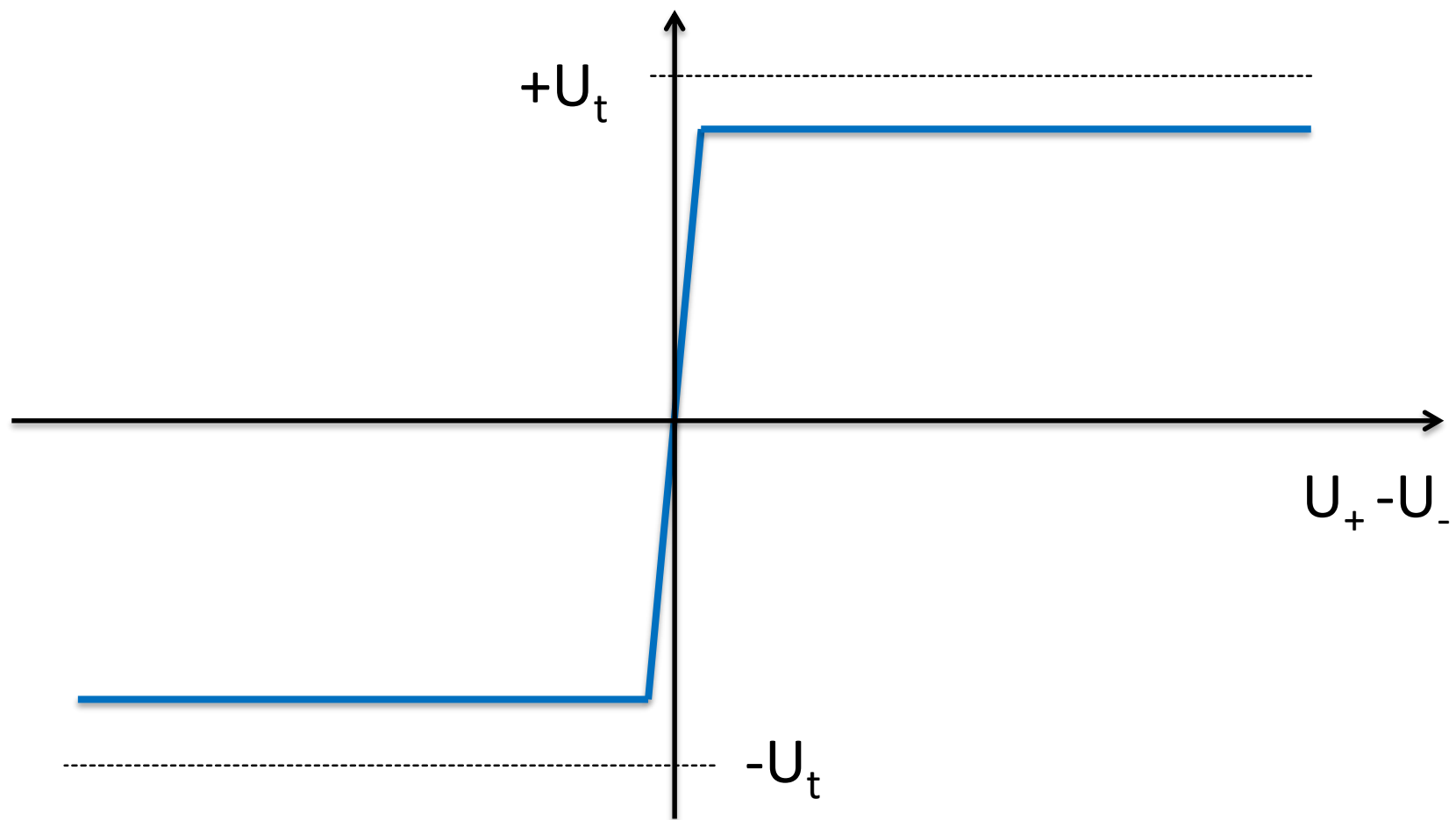
Alapvető működés: feszültségerősítés



- ▶ Van tápfeszültsége is: $+U_t$, $-U_t$
- ▶ Pozitív és negatív jelek is
- ▶ Tranzisztor: β , ME: A
- ▶ Jó: β nagy, A nagy
- ▶ ME: **A igen nagy, 10^5 vagy akár több!**
- ▶ Ideális: A végtelen



Átviteli karakterisztika

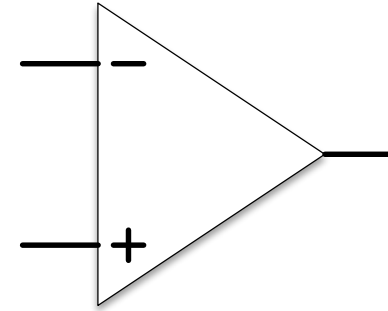


Ideális ME

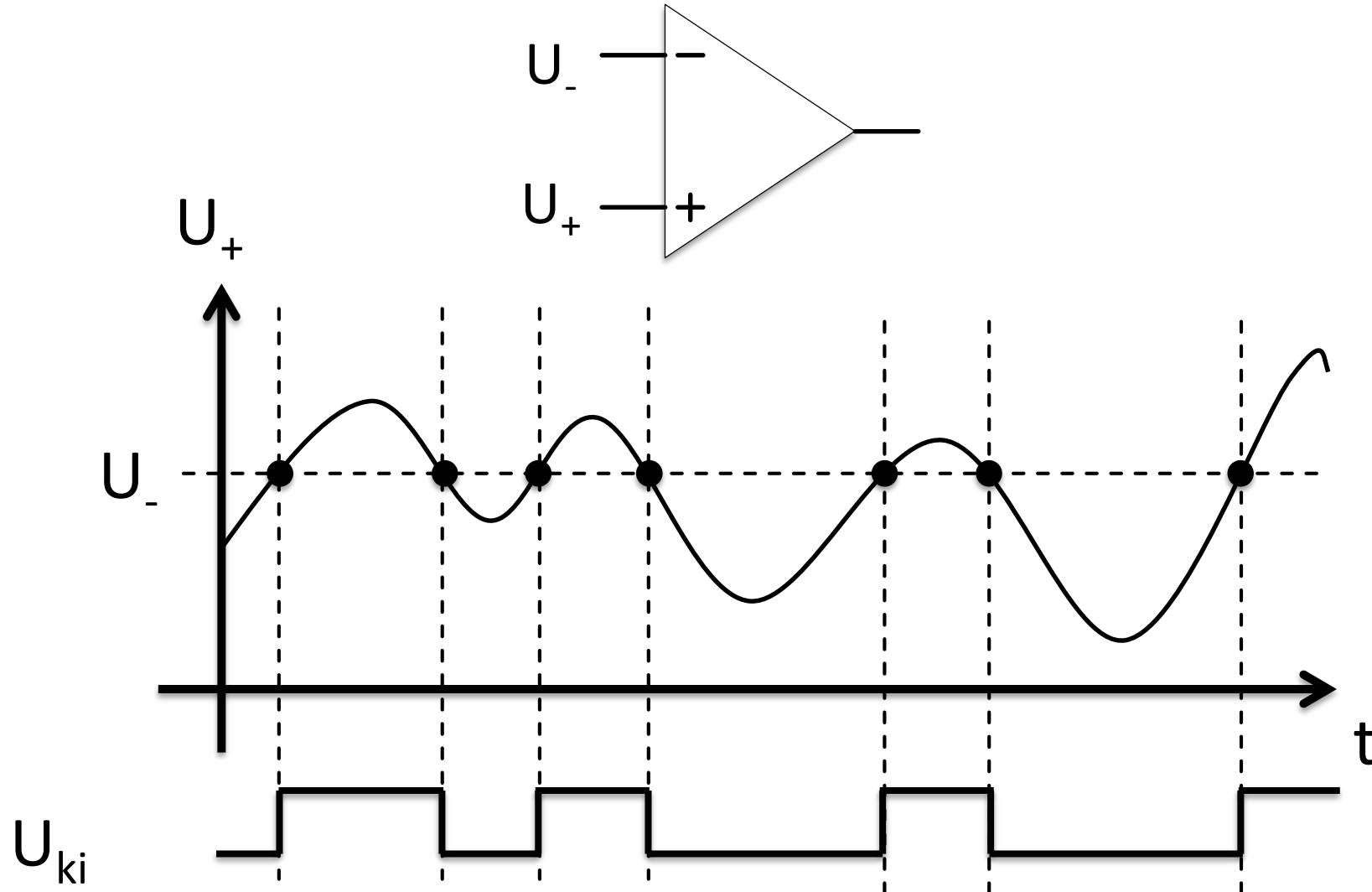
- ▶ **A bemenetekbe áram nem folyik**
- ▶ **A kimenet ideális feszültséggenerátor**
- ▶ **Az erősítés végtelen nagy – mire jó egy ilyen?**

Komparátor

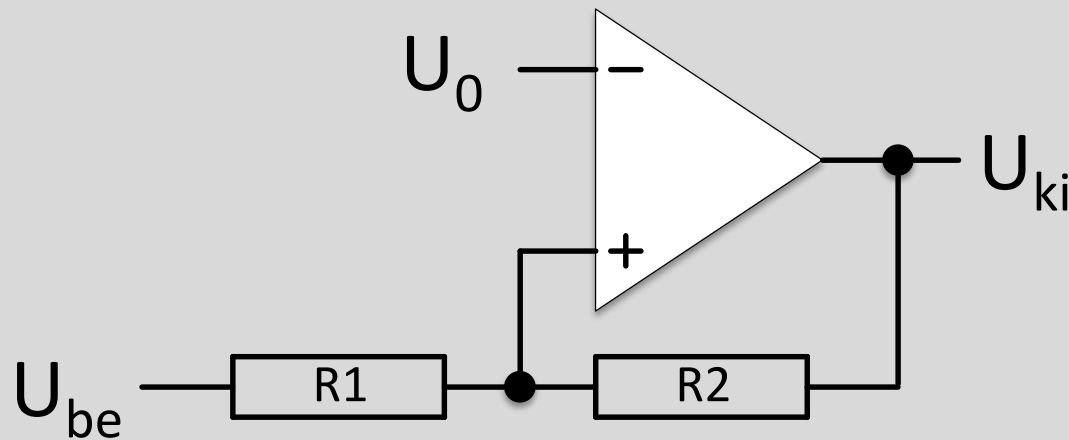
- ▶ A kimenet két állapotú lehet
 - ▶ U_{ki} magas, ha $U_+ > U_-$
 - ▶ U_{ki} alacsony, ha $U_+ < U_-$
- ▶ Analóg bemenet, digitális kimenet
- ▶ Szintmetszés detektálása
 - ▶ szabályozásokhoz
- ▶ Szinuszos jelek digitális jellé alakítása
 - ▶ frekvencia digitális mérése



Komparátor ► Idődiagram



Két küszöbszint – hiszterézis, Schmitt-trigger

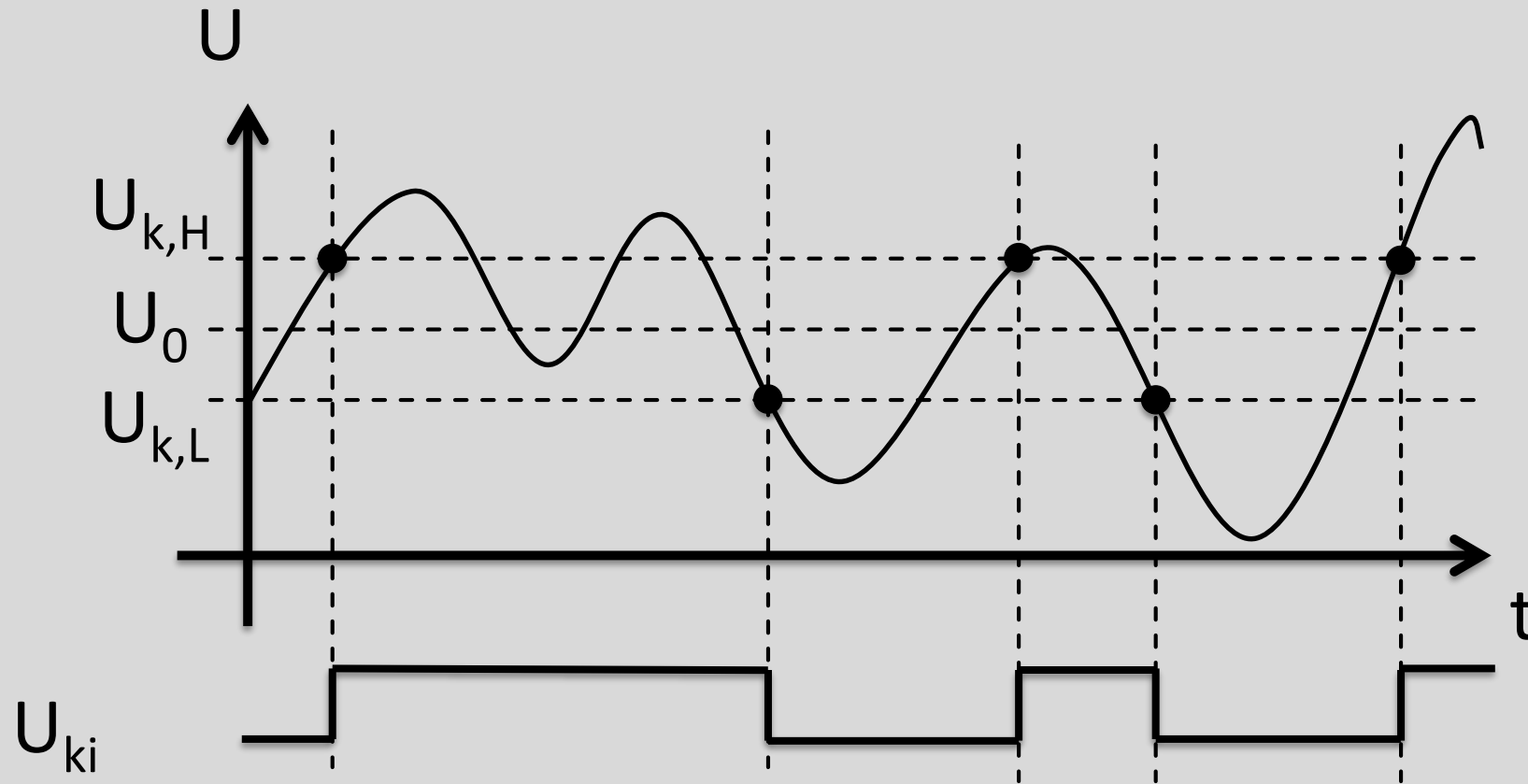


$$U_+ = \frac{U_{be} \cdot R_2 + U_{ki} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_- = U_0$$

- ▶ Az U_{be} -re vonatkozó kapcsolási szintet befolyásolja U_{ki} értéke
 - ▶ Ha U_+ felfelé haladva eléri U_- értékét, akkor U_+ értékét ugrásszerűen növeli, így U_{be} -nek jóval kisebbnek kell lennie a visszabillentéshez
 - ▶ A **billenés továbbra is $U_+ = U_-$ esetben van**, de U_+ -t U_{ki} is befolyásolja

Schmitt-trigger ► Idődiagram



Mire jó?

- ▶ Ha a jel a két szint között van, nincs billenés
- ▶ Ha csak egy szint körül ingadozik a jel, nincs billegés
 - ▶ Csak az első metszéskor
- ▶ Hasznos
 - ▶ Ha zavarjel van a jelen
 - ▶ Ha túl lassú a jel, sokáig van túl közel a küszöbhez
 - ▶ Túl gyakori kapcsolgatások kerüléséhez
 - ▶ Biztonságosabb logikai jellé alakításhoz, pl. mikrovezérlő bemenetek, jelszintek vizsgálata
 - ▶ Oszcillátorok, billegő áramkörök időzítése a küszöbszintek hangolásával

A kapcsolási szintek

- ▶ A küszöb: $U_+ = U_-$
 - ▶ $U_- = U_0$
 - ▶ U_+ függ U_{be} és U_{ki} értékétől
- ▶ Két küszöböt kapunk
 - ▶ U_{ki2} és U_{ki1} esetén
- ▶ Billenés, ha
 - ▶ U_{be} felfelé metszi a nagyobb küszöböt
 - ▶ U_{be} lefelé metszi a kisebb küszöböt

$$U_0 = \frac{U_k R_2 + U_{ki} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_k = U_0 \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_{ki} \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{k,L} = U_0 \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_{ki,\max} \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{k,H} = U_0 \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_{ki,\min} \frac{R_1}{R_2}$$

Műveleti erősítő alkalmazások

- ▶ Eddig: kétállapotú kimenetek
- ▶ A kimeneti érték szabályozható is
- ▶ A nagy erősítés kihasználható precíz szabályozásra
- ▶ Negatív visszacsatolás szükséges
 - ▶ A kimeneti feszültség valahányad részét az invertáló bemenetre kötjük
 - ▶ Valahányad rész: tipikusan feszültségosztóval

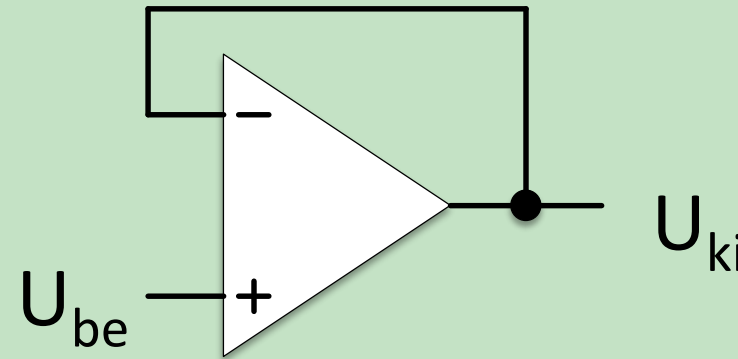
A legegyszerűbb eset: feszültségkövető

$$U_{ki} = A \cdot (U_{be} - U_{ki})$$

$$\frac{U_{ki}}{A} = U_{be} - U_{ki}$$

$$U_{ki} + \frac{U_{ki}}{A} = U_{be}$$

$$U_{ki} = U_{be} \frac{1}{1 + \frac{1}{A}}$$



Azaz, ha $A \rightarrow \infty$:

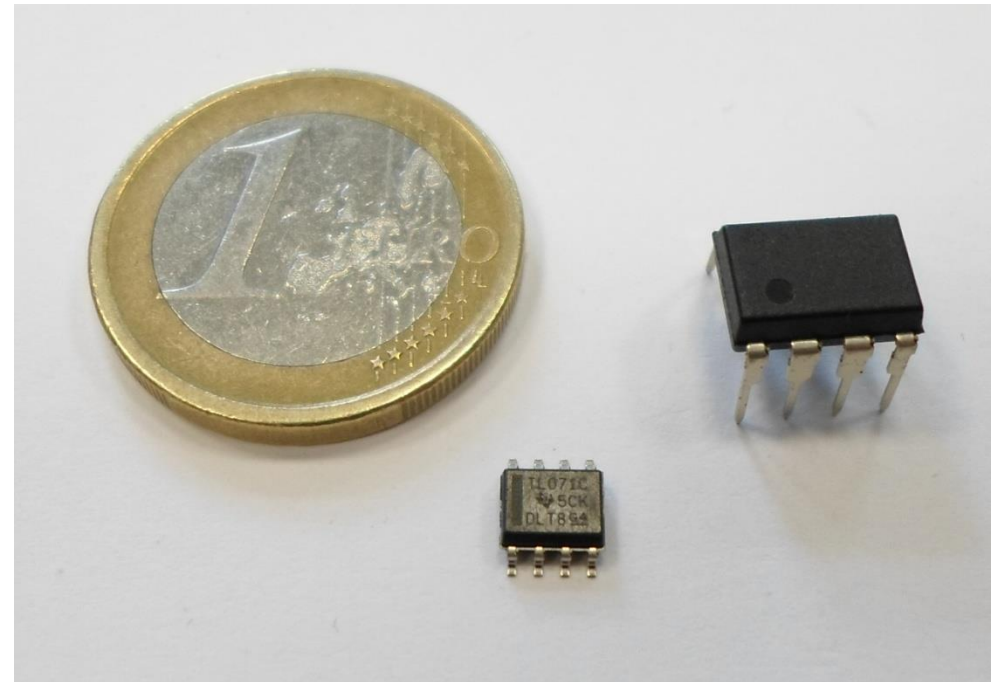
$$U_{ki} = U_{be}$$

A lényeg: negatív visszacsatolás

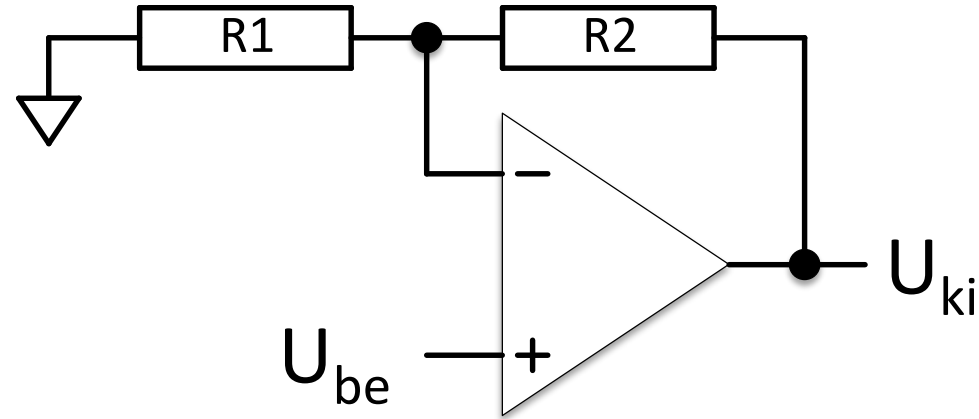
- ▶ A kimenetet visszakötjük a bemenetre
 - ▶ ha a bemenetet változtatjuk, a kimenet követi
 - ▶ minél nagyobb A, annál pontosabban!
 - ▶ a kimeneti érték szabályozása ez
- ▶ **Szabályozás**
 - ▶ mérjük az eltérést a kívánttól
 - ▶ beavatkozunk, hogy az eltérés kicsi legyen

Valódi műveleti erősítők gyakori értékei

- ▶ $A \approx 10^5$ (100dB)
- ▶ Bemeneti áram: 10nA
- ▶ Kimeneti áram: 10mA
- ▶ Tipikus tápfeszültség: $\pm 15V$
- ▶ Tápáram: 5mA
- ▶ Léteznek
 - ▶ egy tápfeszültségű (a negatív táp 0V)
 - ▶ kisfeszültségű (táp akár 2V)
 - ▶ kis bemenő áramú (1pA)
 - ▶ kisfogyasztású (0,1mA)
 - ▶ nagyáramú (akár 1A)



Kicsit bonyolultabb negatív visszacsatolás

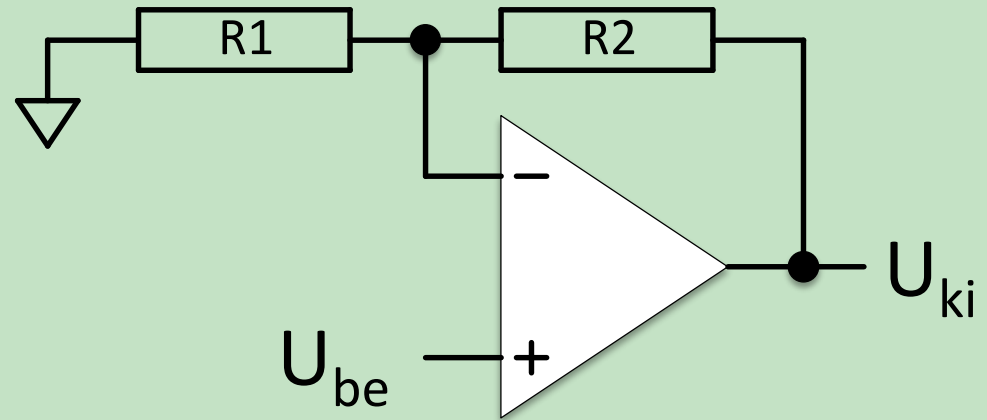


- ▶ A kimenetnek csak egy része van visszakötve
- ▶ Lehetne a szokásos számolással (és $A \rightarrow \infty$)
- ▶ De lehet egyszerűbben is, mivel $U_+ - U_- = U_{ki}/A \approx 0$:
 - ▶ $U_+ = U_-$
 - ▶ *a bemenetekbe áram nem folyik*

Negatív visszacsatolás esetén: egyszerűsített számolási módszer alkalmazható

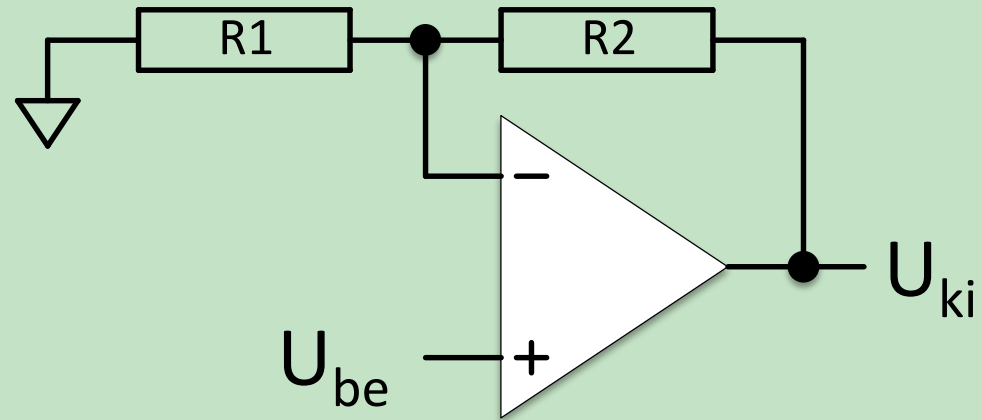
- ▶ ***A bemenetekbe áram nem folyik***
- ▶ **$U_+ = U_-$**
- ▶ A módszer lépései tehát
 - ▶ Számítsuk ki
 - ▶ a neminvertáló bemeneti feszültséget (U_+)
 - ▶ az invertáló bemeneti feszültséget (U_-)
 - ▶ a számítások során az erősítő bemenetek szakadásként viselkednek (azaz mintha nem lennének az áramkörre kötve)
 - ▶ A két feszültség egyenlőségéből kiszámítható a kimeneti feszültség

Egyenes erősítő: nem-invertáló bemenet

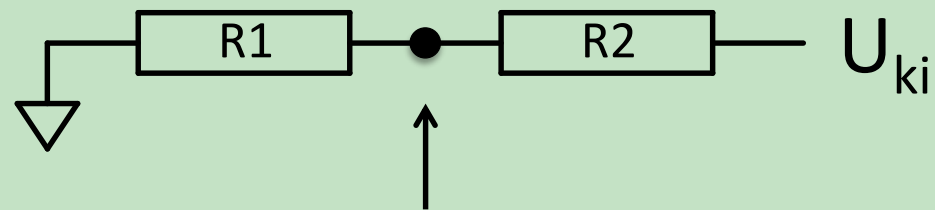


$$U_{+} = U_{be}$$

Egyenes erősítő: invertáló bemenet



A számolásakor csak ezt kell néznünk:



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

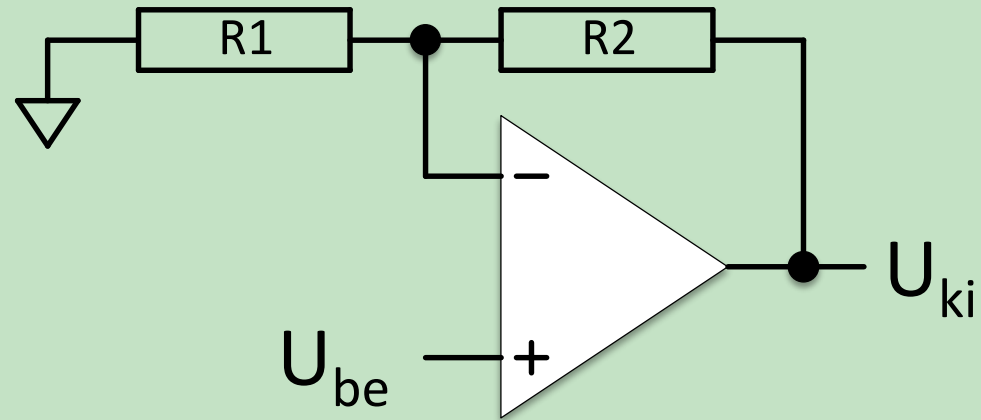
Egyenes erősítő: $U_+ = U_-$

$$U_+ = U_{be}$$

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

$$U_{be} = U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ki} = U_{be} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$



$$U_{ki} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot U_{be}$$

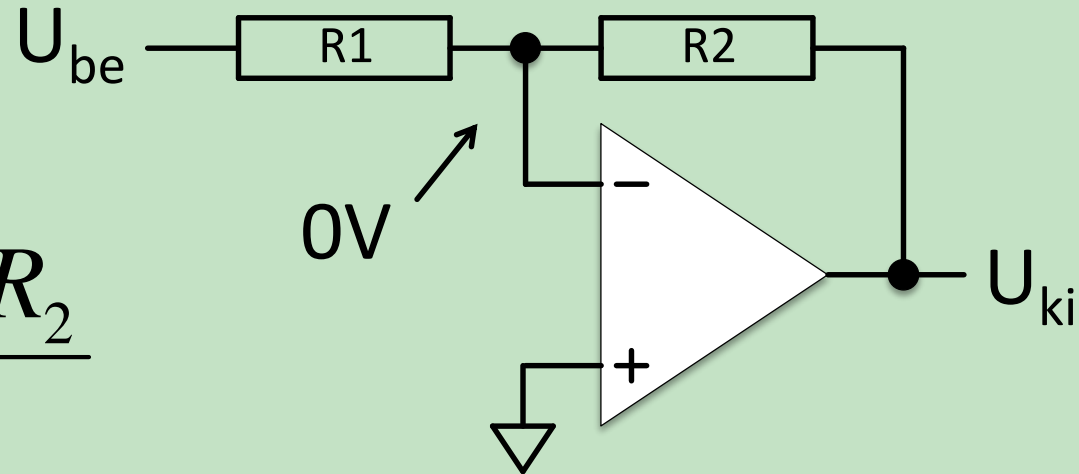
Cseréljük fel a bemeneteket: *invertáló erősítő*

$$U_+ = 0V$$

$$U_- = \frac{U_{ki}R_1 + U_{be}R_2}{R_1 + R_2}$$

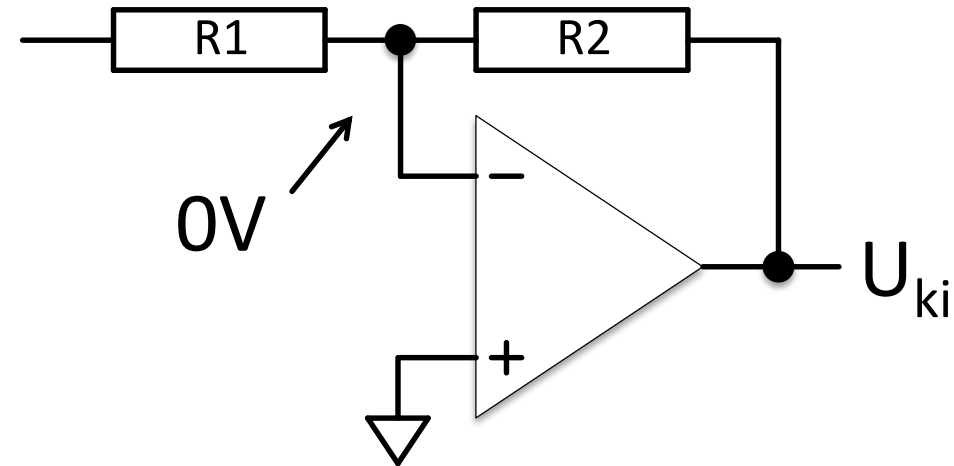
$$0V = \frac{U_{ki}R_1 + U_{be}R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ki}R_1 = -U_{be}R_2$$



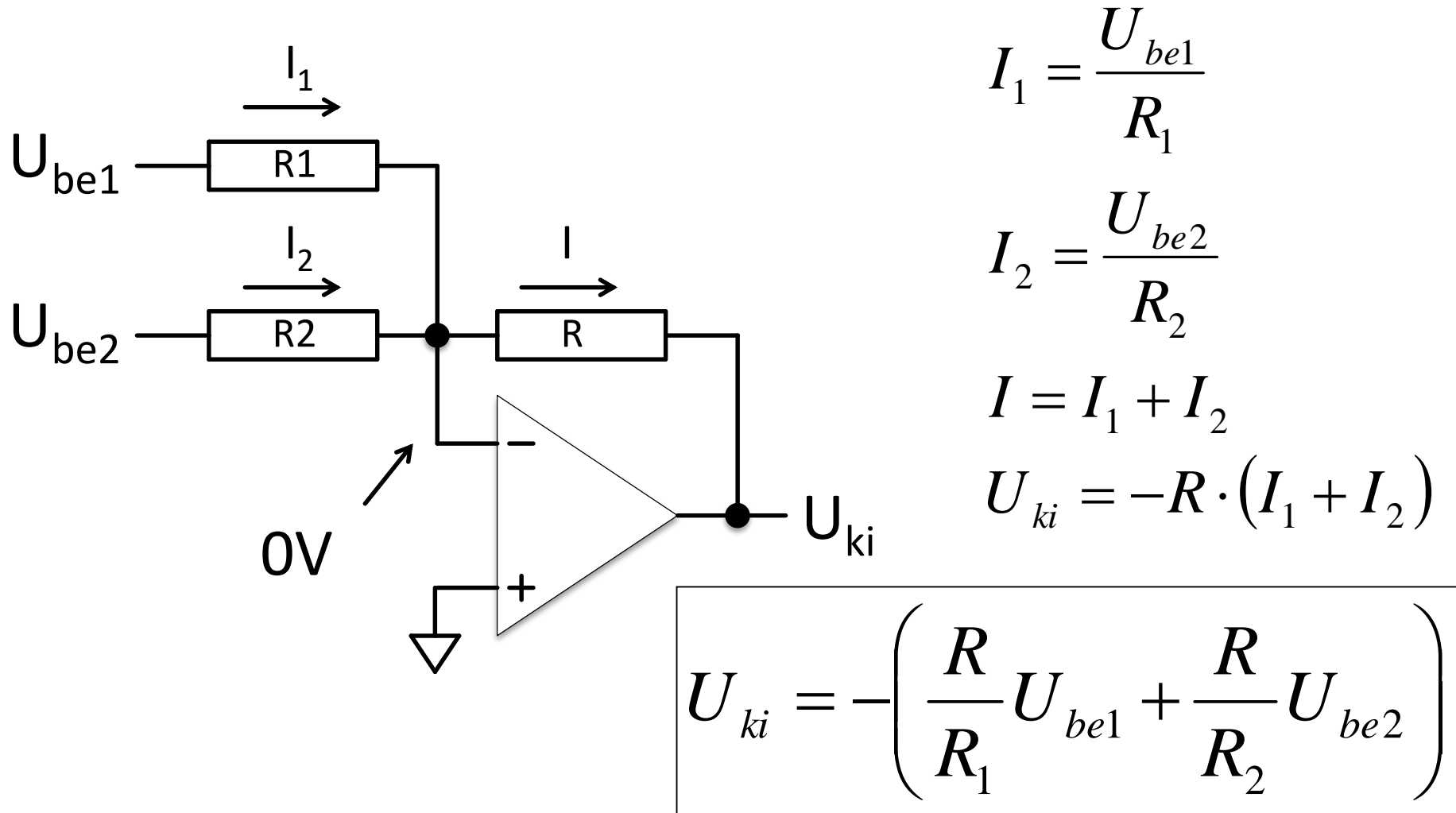
$$U_{ki} = -\frac{R_2}{R_1}U_{be}$$

Virtuális földpont

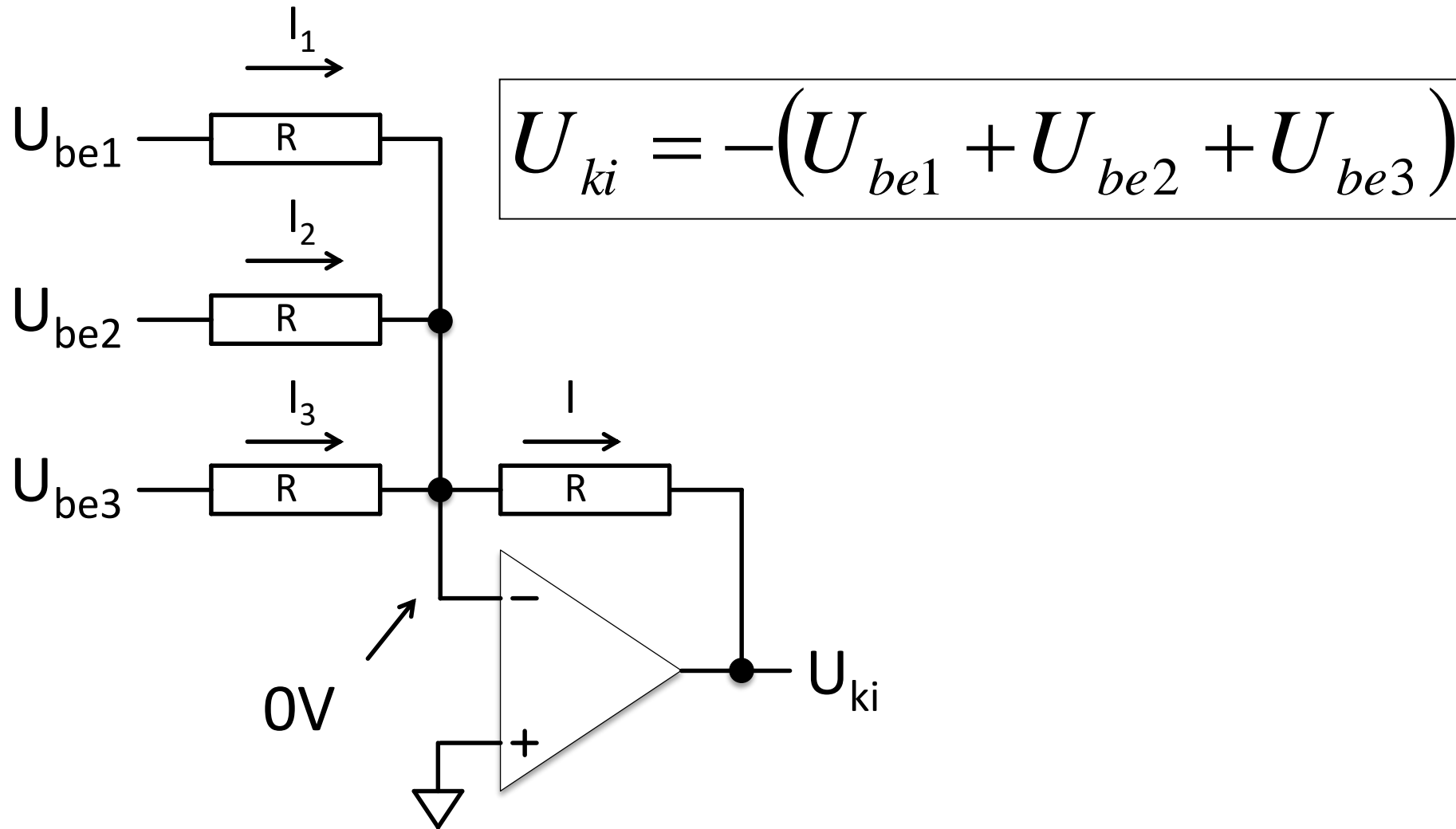


- ▶ Ha a nem-invertáló bemenet földelve van és van negatív visszacsatolás: az invertáló bemenetet az erősítő 0V-ra állítja be
- ▶ Virtuális földpont, egyszerűsíti a számolásokat

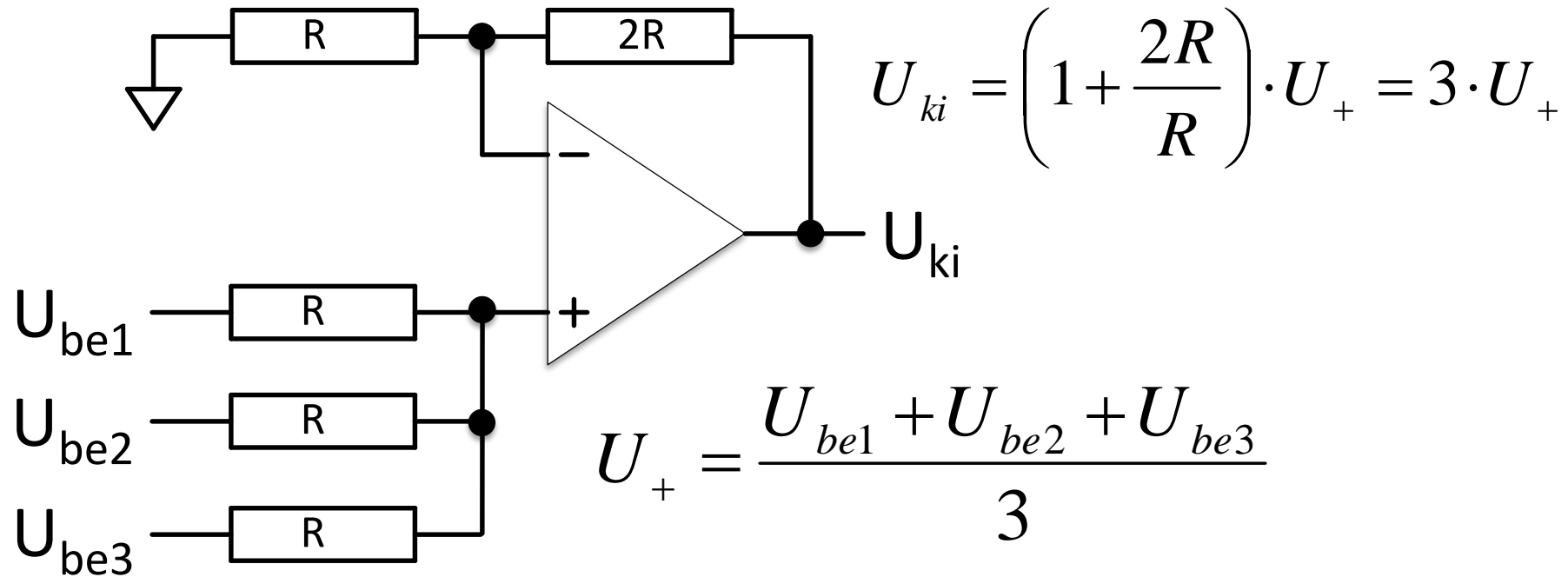
Összegző erősítő



Összegző erősítő: azonos ellenállások

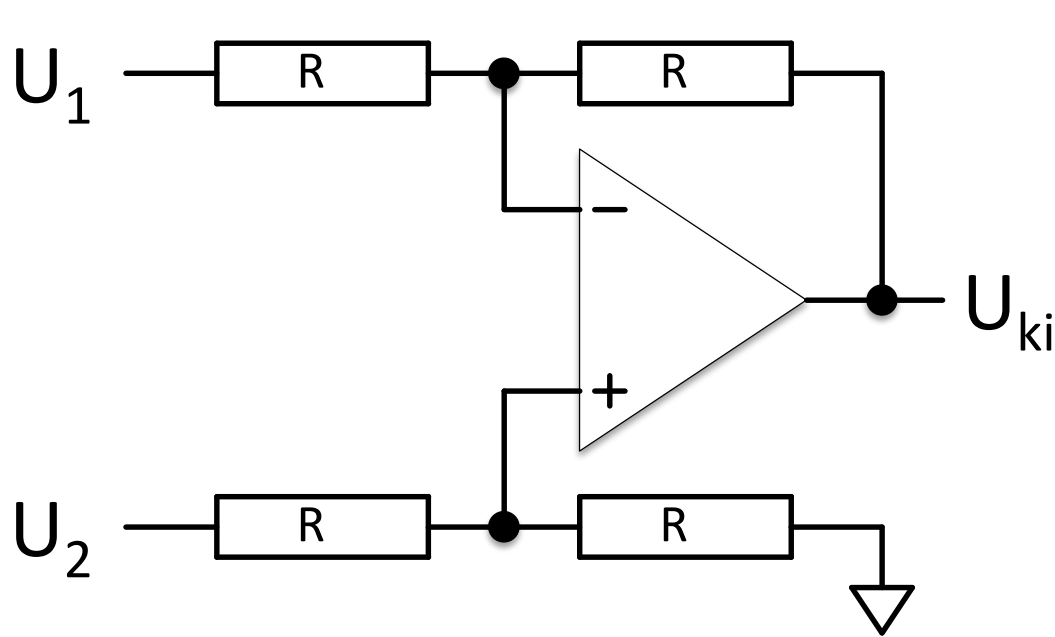


Neminvertáló összegző erősítő



$$U_{ki} = U_{be1} + U_{be2} + U_{be3}$$

Differenciálerősítő (különbségképző)



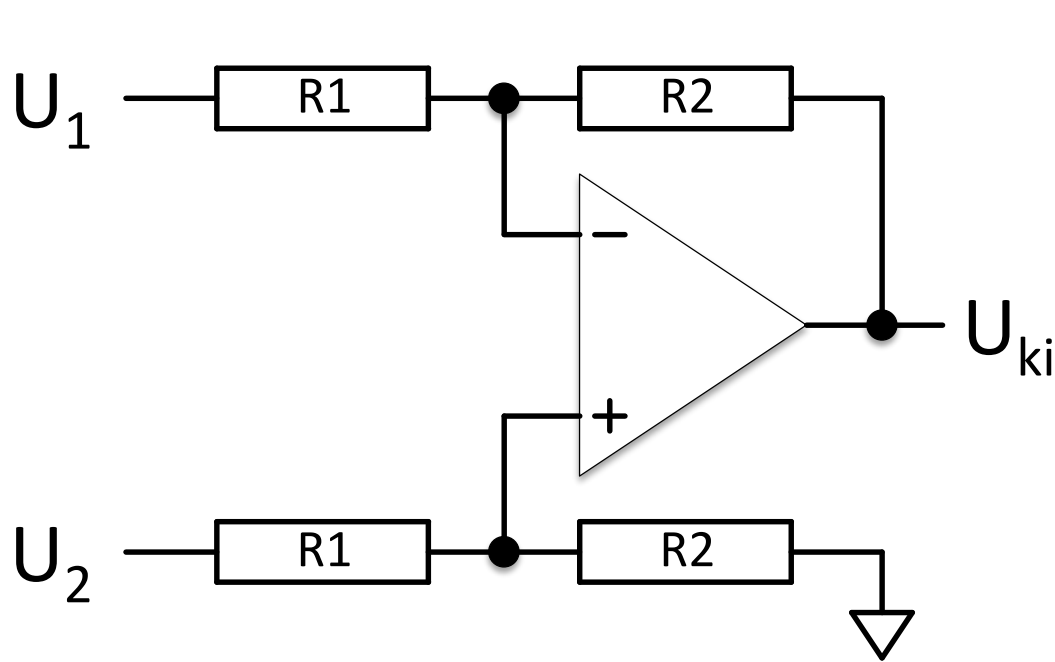
$$U_- = \frac{U_1 + U_{ki}}{2}$$

$$U_+ = \frac{U_2}{2}$$

$$U_+ = U_-$$

$$U_{ki} = U_2 - U_1$$

Differenciálerősítő (különbségképző)



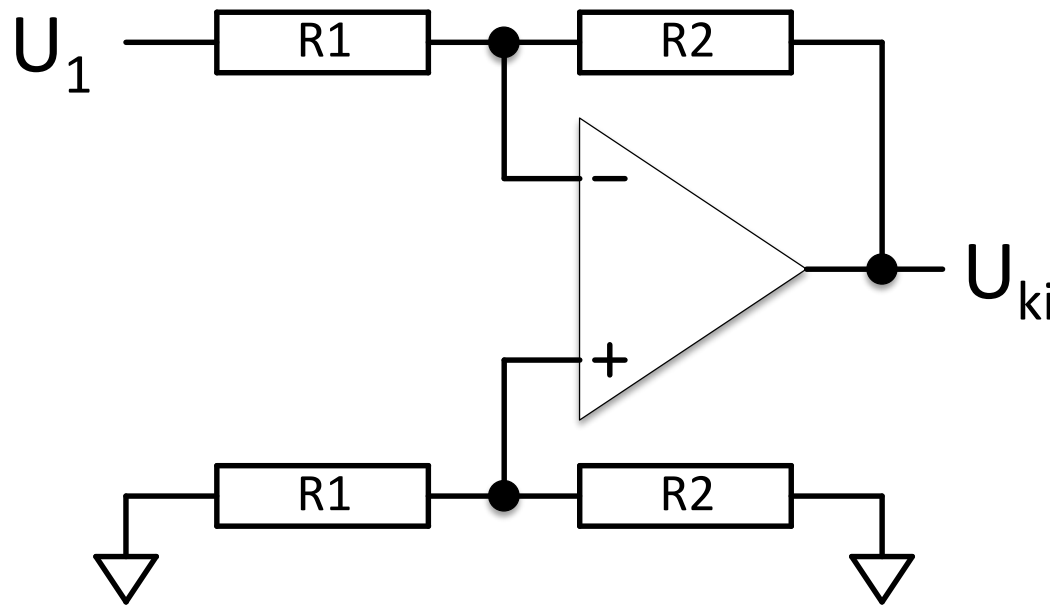
$$U_{-} = \frac{U_1 R_2 + U_{ki} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{+} = \frac{U_2 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{+} = U_{-}$$

$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

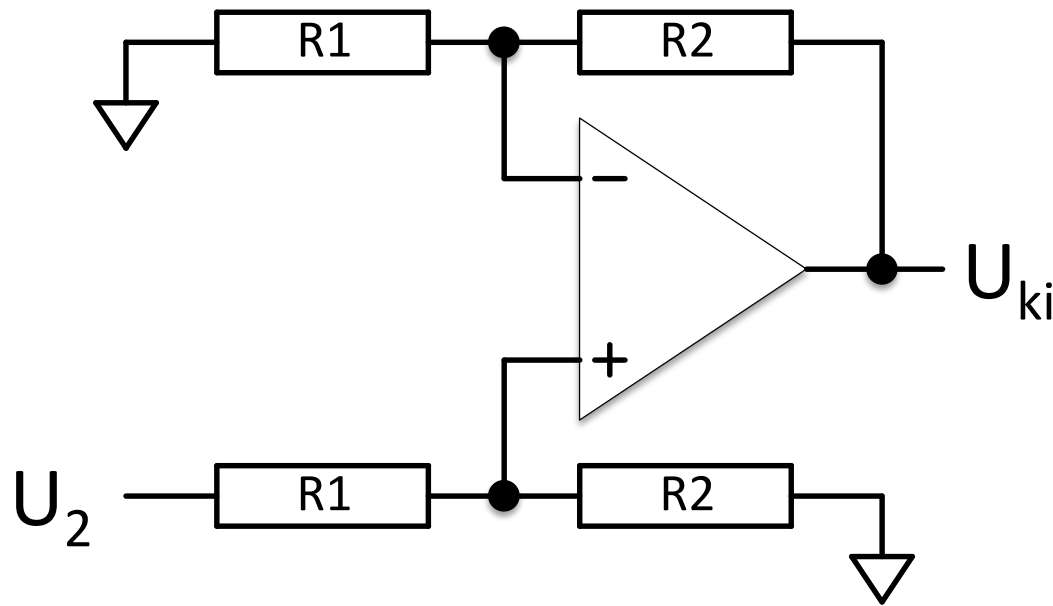
Szuperpozíció tétele is segít: $U_2=0V$



$$U_{ki,1} = -\frac{R_2}{R_1} U_1$$

► Ez egy invertáló erősítő, mert $U_+=0V$

Szuperpozíció tétele is segít: $U_1=0V$



$$U_{ki,2} = \frac{R_2}{R_1} U_2$$

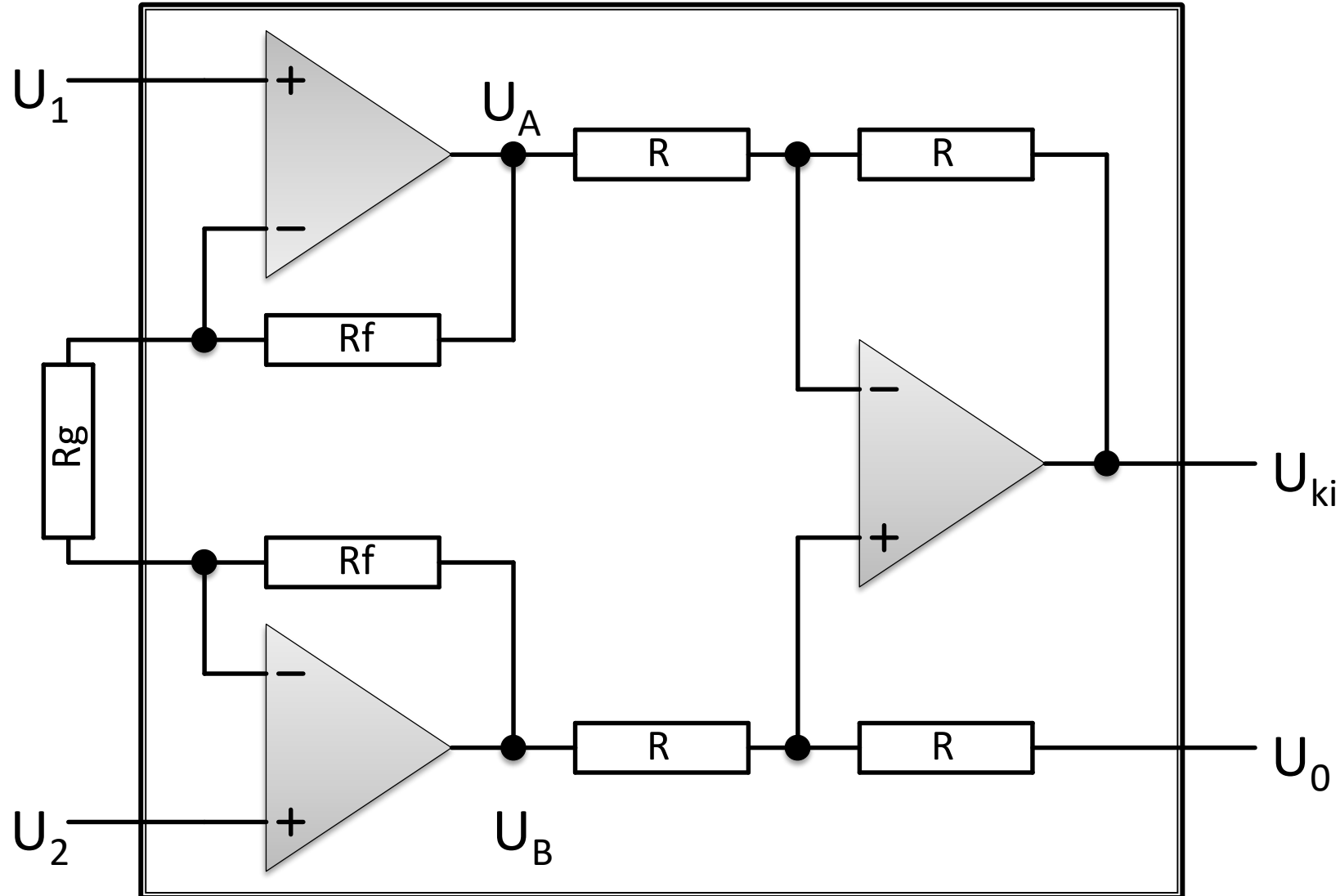
- ▶ Ez egy egyenes erősítő
- ▶ U_+ -t erősíti fel $(R_1+R_2)/R_1$ arányban
- ▶ U_+ értéke $U_2 R_2 / (R_1 + R_2)$

Összesítve tehát

$$U_{ki} = U_{ki,1} + U_{ki,2} = \frac{R_2}{R_1} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1$$

$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

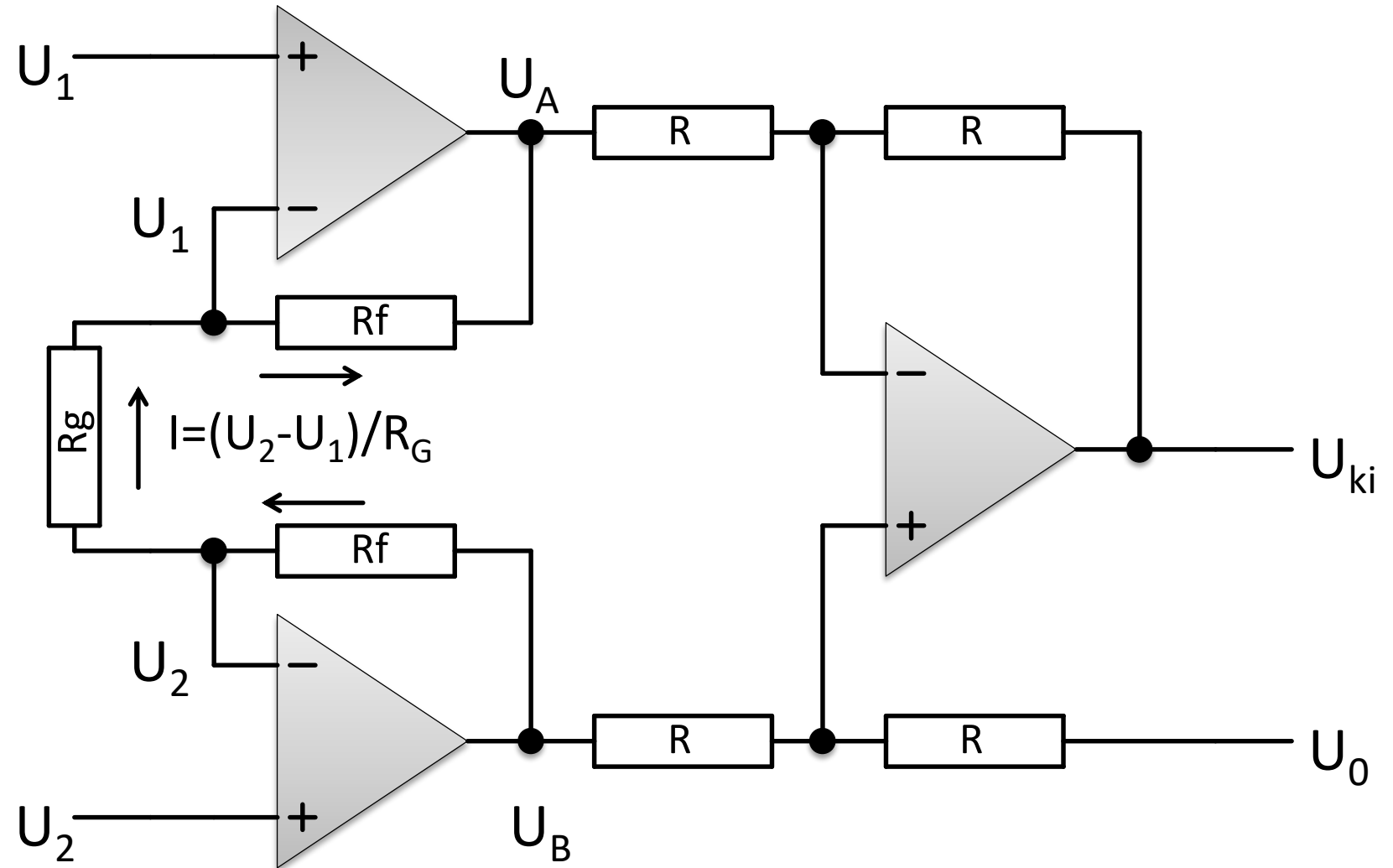
Műszererősítő – precíz differenciálerősítő



Műszererősítő – precíz differenciálerősítő

Mindegyik erősítőre:

- $U_+ = U_-$
- A bemenetekbe nem folyik áram



Számítások

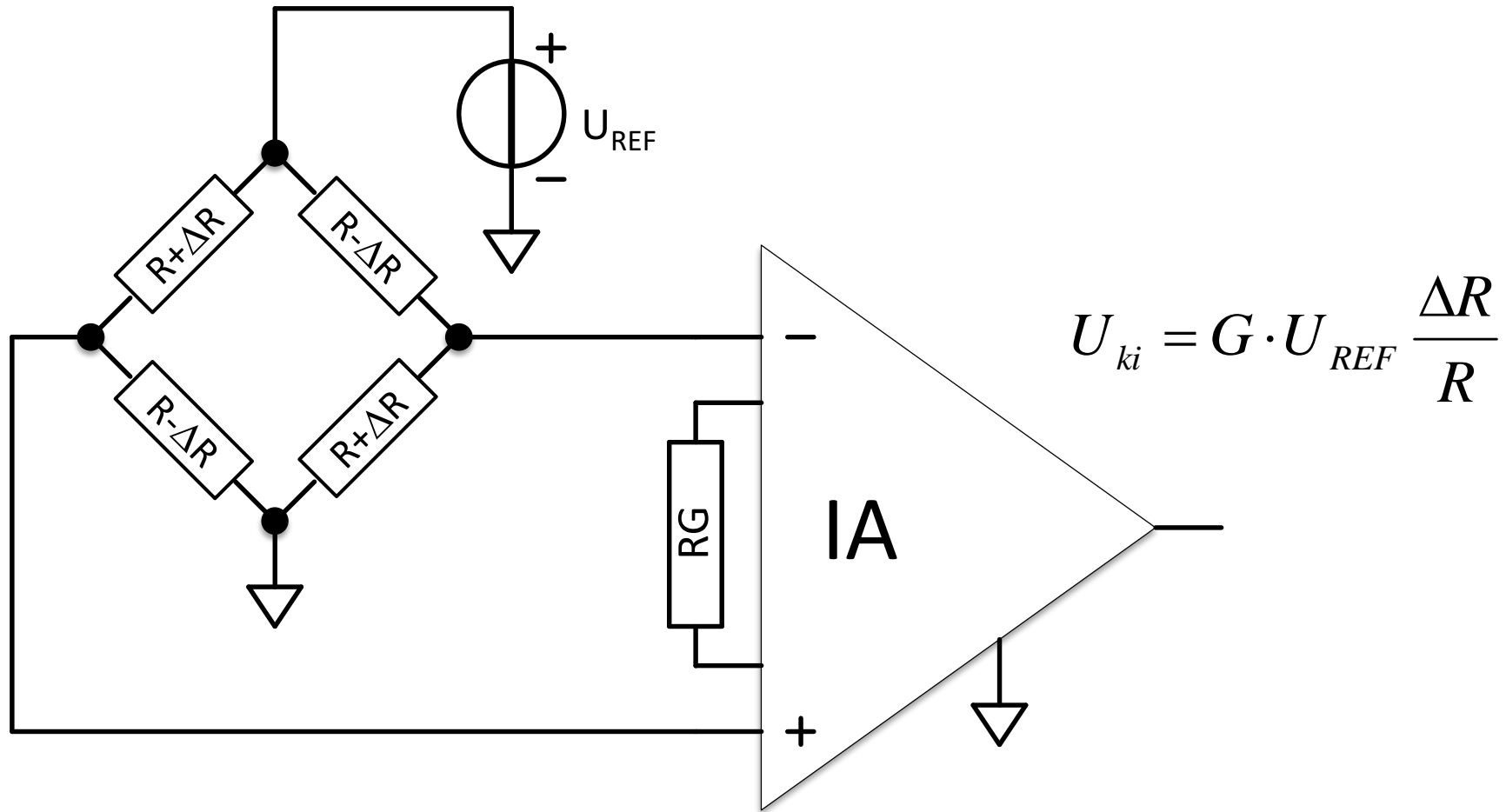
$$U_A = U_1 - \frac{U_2 - U_1}{R_G} R_f$$

$$U_B = U_2 + \frac{U_2 - U_1}{R_G} R_f$$

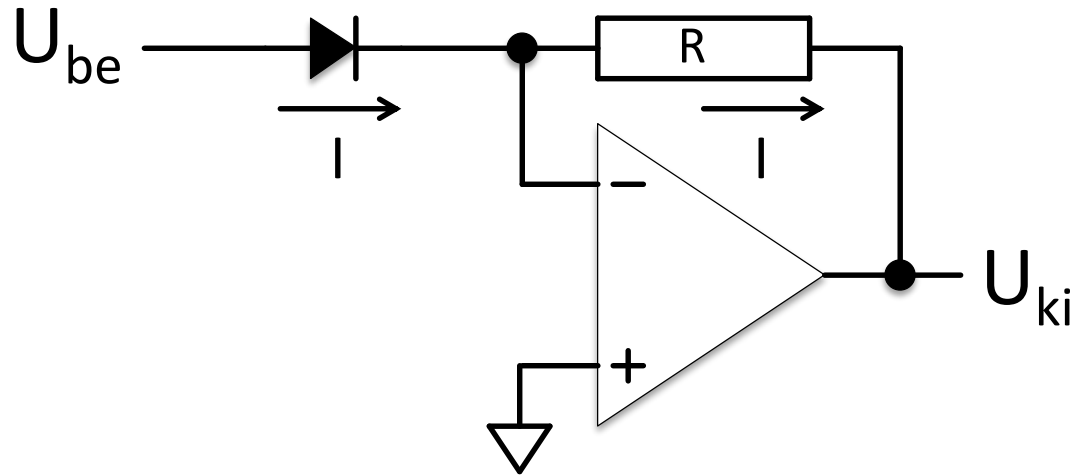
$$U_{ki} = U_B - U_A + U_0$$

$$U_{ki} = (U_2 - U_1) \cdot \left(1 + \frac{2R_f}{R_G} \right) + U_0$$

Mérőhíd erősítése



Exponenciális erősítő (U_{be} virtuális földpont)

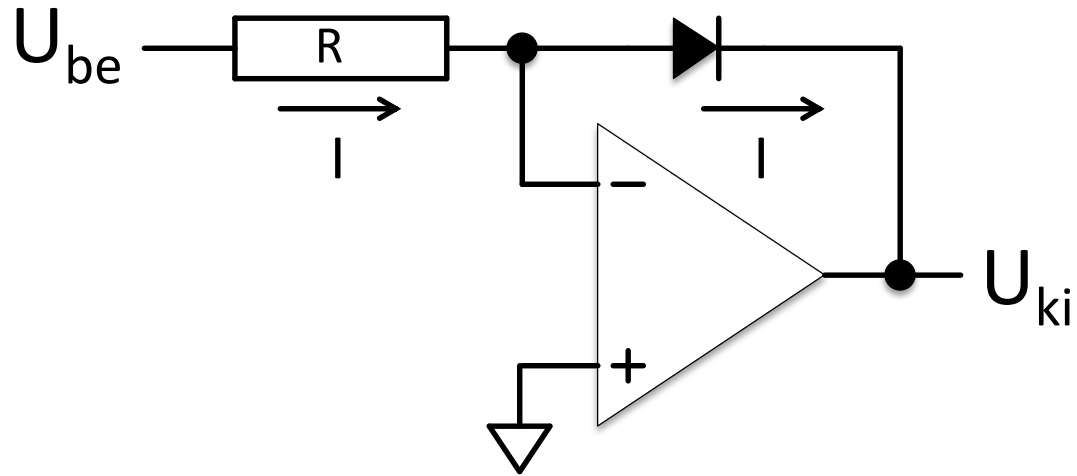


$$I = I_0 e^{\frac{U_{be}}{U_T}}$$

$$U_{ki} = -R \cdot I_0 e^{\frac{U_{be}}{U_T}}$$

$$U_{ki} = -R \cdot I_0 e^{\frac{U_{be}}{U_T}}$$

Logaritmusos erősítő (U_{be} virtuális földpont)



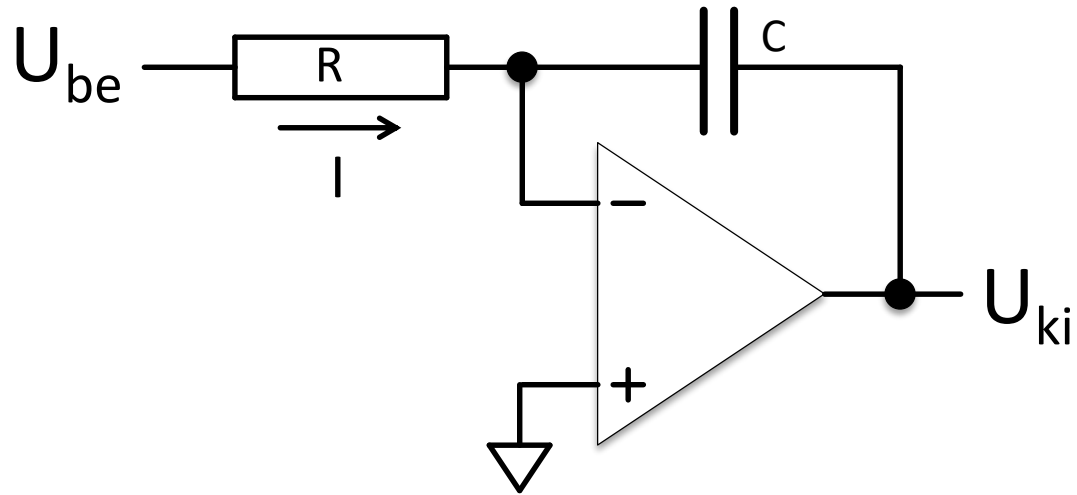
$$I = \frac{U_{be}}{R}$$

$$U_D = U_T \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$U_{ki} = -U_D$$

$$U_{ki} = -U_T \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Integrátor (U_ virtuális földpont)



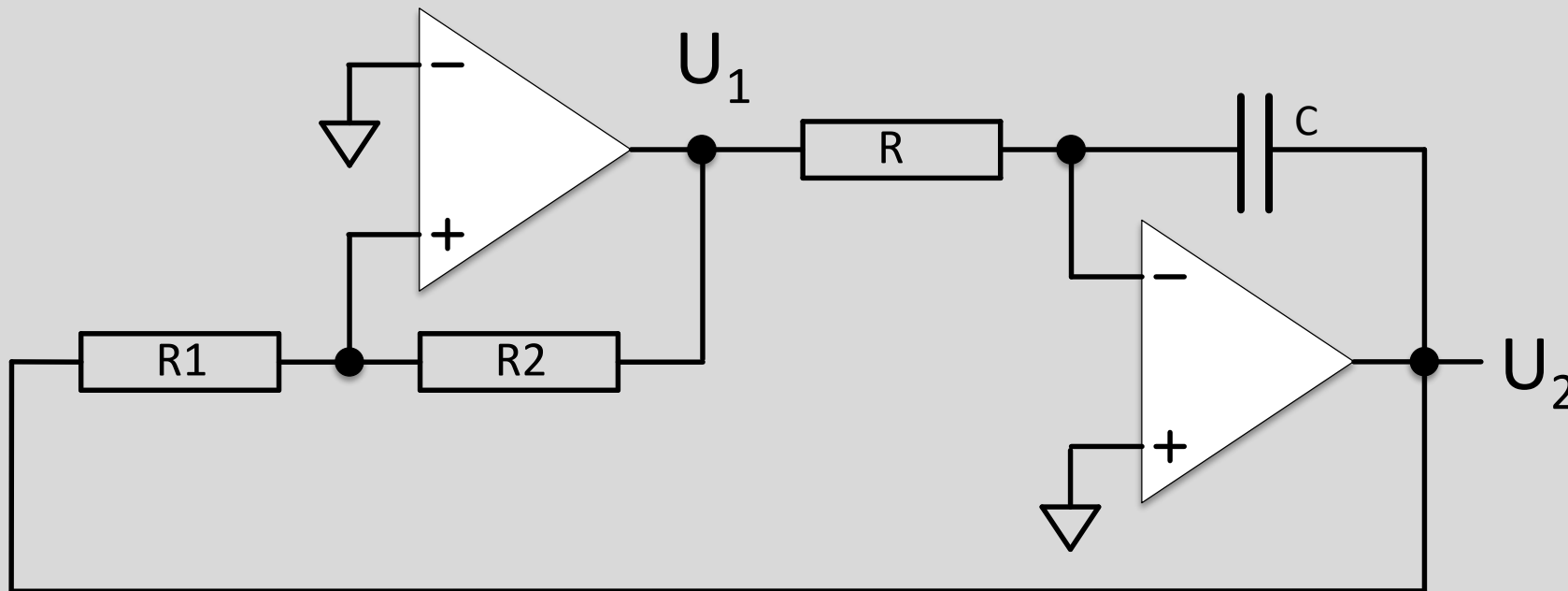
$$I = \frac{U_{be}}{R}$$

$$U_{ki} = -\frac{1}{C} \int I(t) dt$$

$$U_{ki} = -\frac{1}{RC} \int U_{be}(t) dt$$

Oscillátor, háromszögjel, négyszögjel generálása

- ▶ Schmitt-trigger kimenetét integrálja egy erősítő
 - ▶ Háromszögjel a kimeneten
 - ▶ Négyszögjel a Schmitt-trigger kimenetén



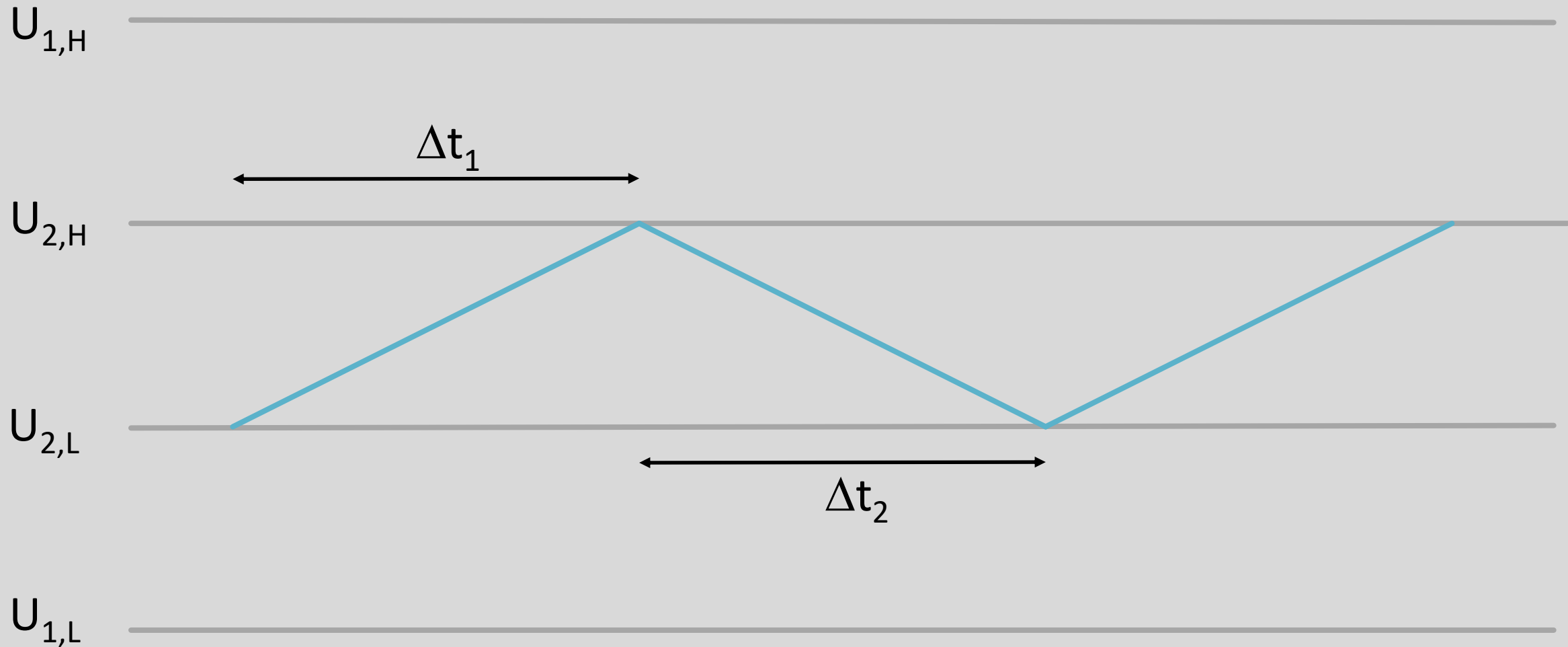
Működés

- ▶ Az első erősítő kimenete U_+ nullmetszéseinél billen, mivel $U_- = 0V$
- ▶ Az első erősítő kimenete kétféle, $U_{1,H}$ vagy $U_{1,L}$ lehet
- ▶ U_+ két esetben lehet $0V$, ha a U_2 értéke:

$$U_{2,H} = -U_{1,L} \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_{2,L} = -U_{1,H} \frac{R_1}{R_2}$$

Ismétlődő töltés és kisütés két szint között



Mennyi a töltési és kisülési fázis időtartama?

TÖLTÉSI SZAKASZ

$$U_2(t) = U_{2,L} - \frac{t}{R \cdot C} U_{1,L}$$

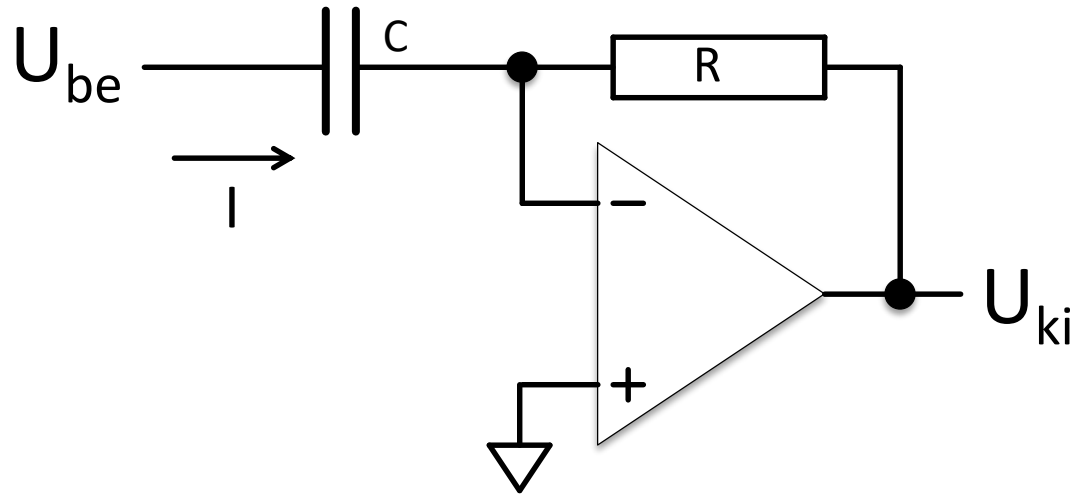
$$\Delta t_1 = R \cdot C \cdot \frac{U_{2,L} - U_{2,H}}{U_{1,L}}$$

KISÜLÉSI SZAKASZ

$$U_2(t) = U_{2,H} - \frac{t}{R \cdot C} U_{1,H}$$

$$\Delta t_2 = R \cdot C \cdot \frac{U_{2,H} - U_{2,L}}{U_{1,H}}$$

Deriváló áramkör (U_{be} virtuális földpont)



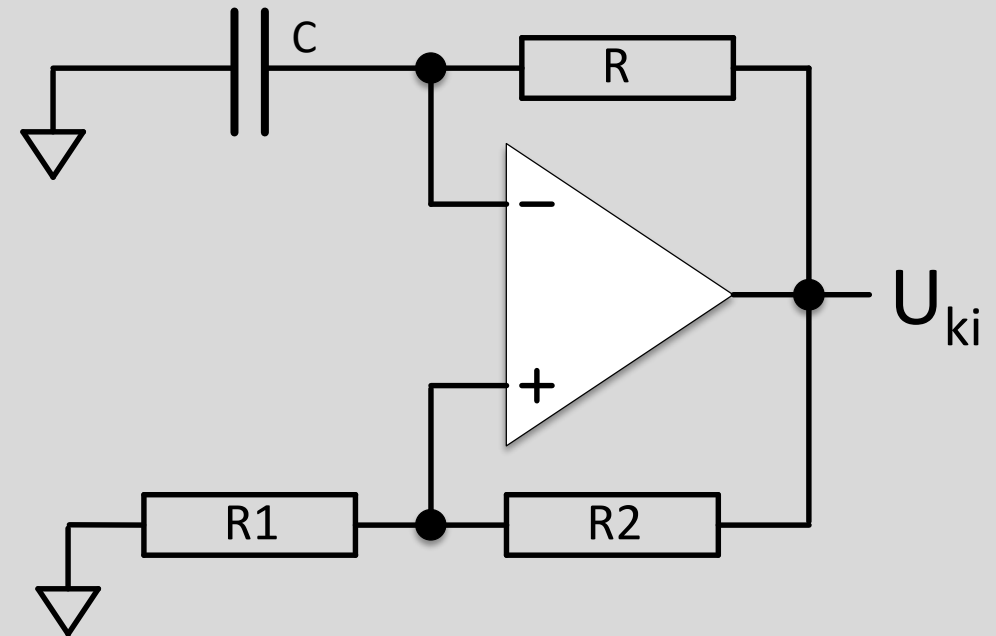
$$I = C \frac{dU_{be}}{dt}$$

$$U_{ki} = -RC \frac{dU_{be}}{dt}$$

$$U_{ki} = -RC \frac{dU_{be}}{dt}$$

Oscillátor, négyszögjel generálása

- ▶ Schmitt-trigger és RC visszacsatolás
- ▶ Működés
 - ▶ Ha U_{ki} pozitív, tölti a kondenzátort
 - ▶ Ha U_- eléri a küszöbszintet, U_{ki} ugrásszerűen a minimumát veszi fel
 - ▶ Megkezdődik a kondenzátor kisütése
 - ▶ Ha U_- eléri az alsó küszöbszintet, U_{ki} ugrásszerűen a minimumát veszi fel
 - ▶ Megkezdődik a kondenzátor töltése
- ▶ Negatív tápfeszültség szükséges



Oscillátor, négyzögjel generálása

▶ A küszöbszintek U_{+} -on jelennek meg:

▶ $U_{+,H} = U_{ki,H} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$ és

$U_{+,L} = U_{ki,L} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$

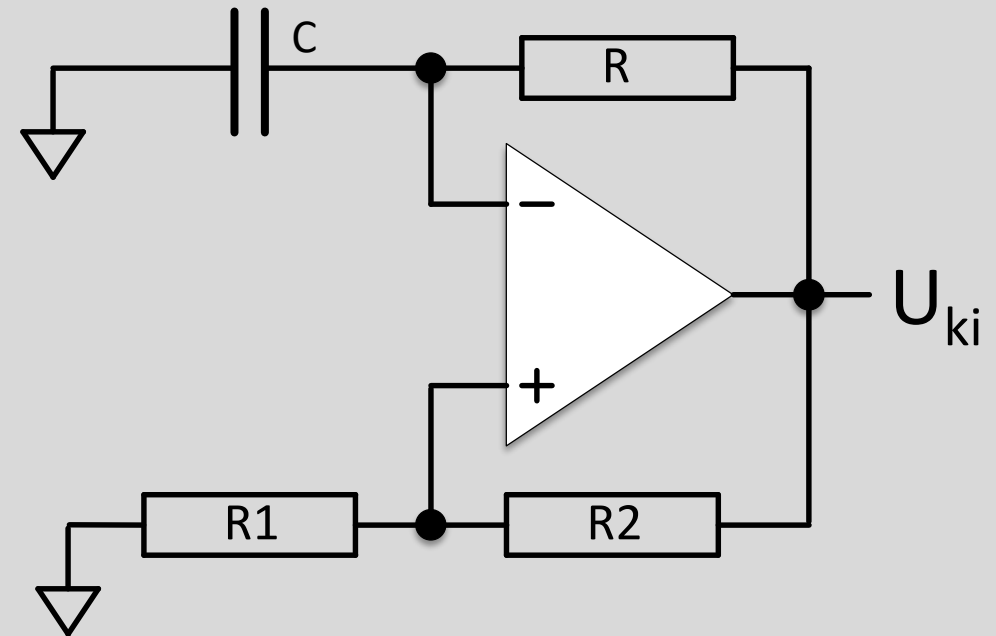
▶ A feltöltődési idő:

▶ $U_{ki,H}$ és $U_{+,L}$ különbsége tölti a kondenzátort a felső küszöbig

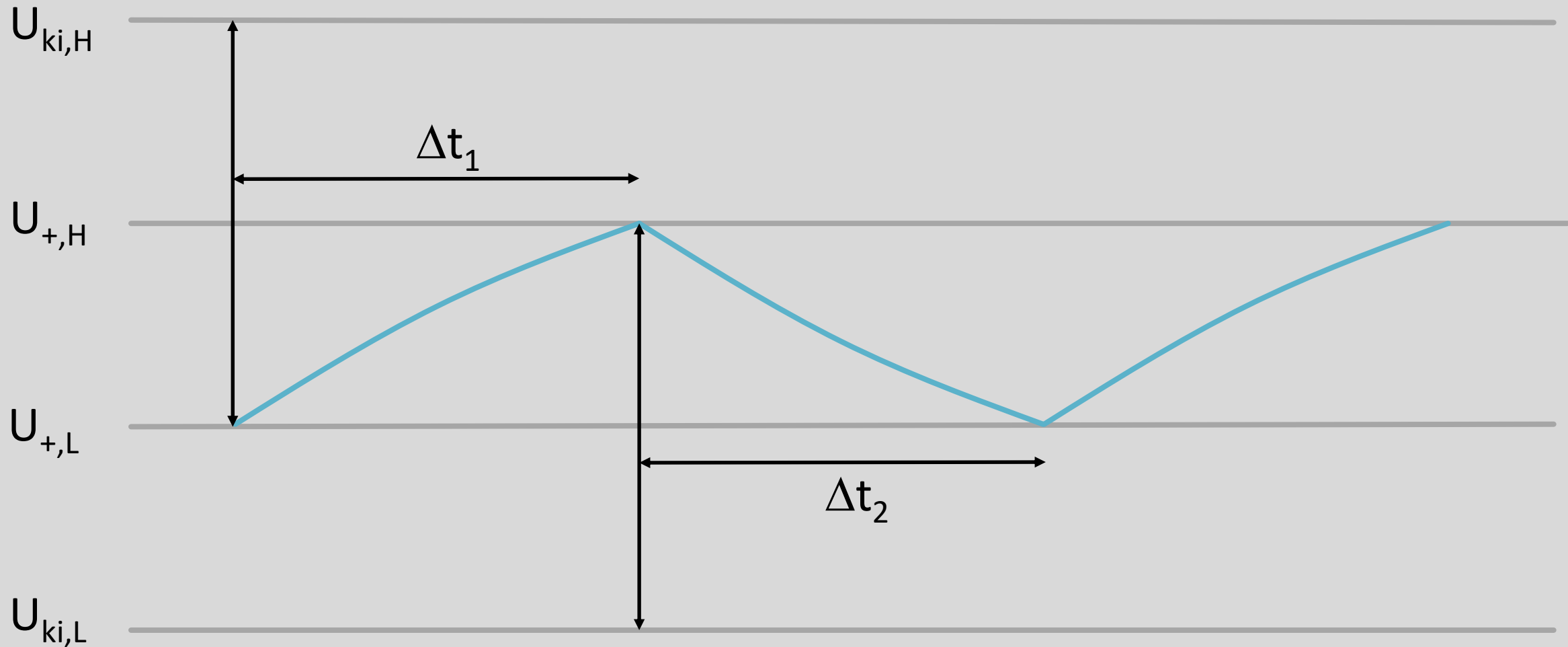
▶ A kisülési idő:

▶ $U_{ki,L}$ és $U_{+,H}$ különbsége sűti ki a kondenzátort az alsó küszöbig

▶ Periódusidő a kettő összege



Ismétlődő töltés és kisütés két szint között



Mennyi a töltési és kisülési fázis időtartama?

TÖLTÉSI SZAKASZ

$$\frac{U_{+,L} - U_{ki,H}}{U_{+,H} - U_{ki,H}} = e^{\frac{\Delta t_1}{R \cdot C}}$$

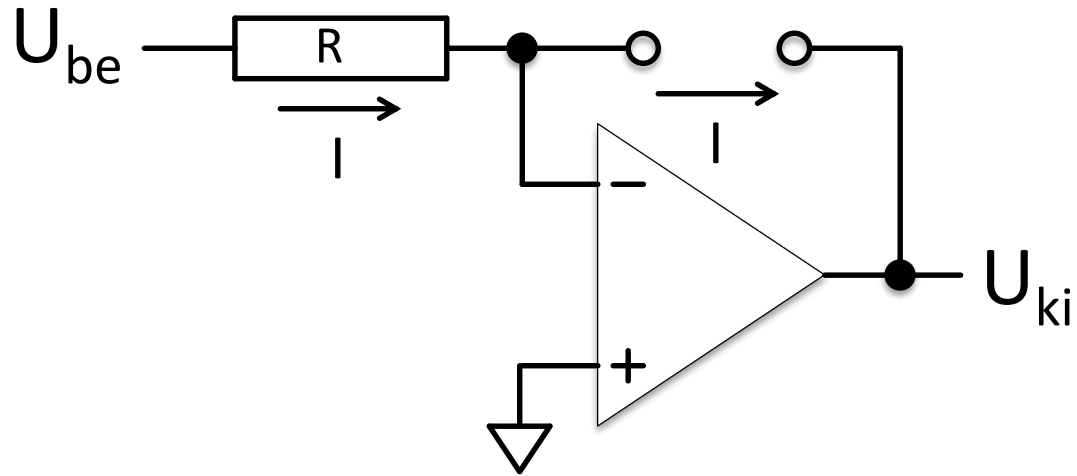
$$\Delta t_1 = R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{U_{+,L} - U_{ki,H}}{U_{+,H} - U_{ki,H}} \right)$$

KISÜLÉSI SZAKASZ

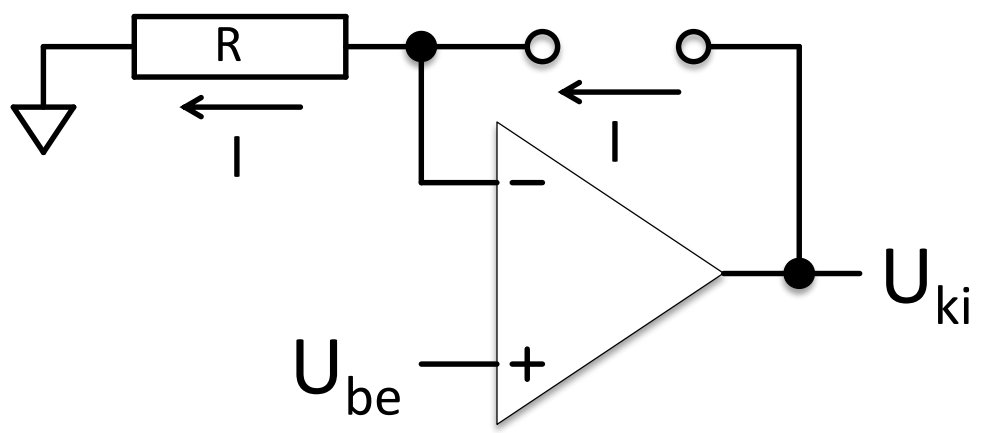
$$\frac{U_{+,H} - U_{ki,L}}{U_{+,L} - U_{ki,L}} = e^{\frac{\Delta t_2}{R \cdot C}}$$

$$\Delta t_2 = R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{U_{+,H} - U_{ki,L}}{U_{+,L} - U_{ki,L}} \right)$$

Áramgenerátor a visszacsatolóköri alkatrésze

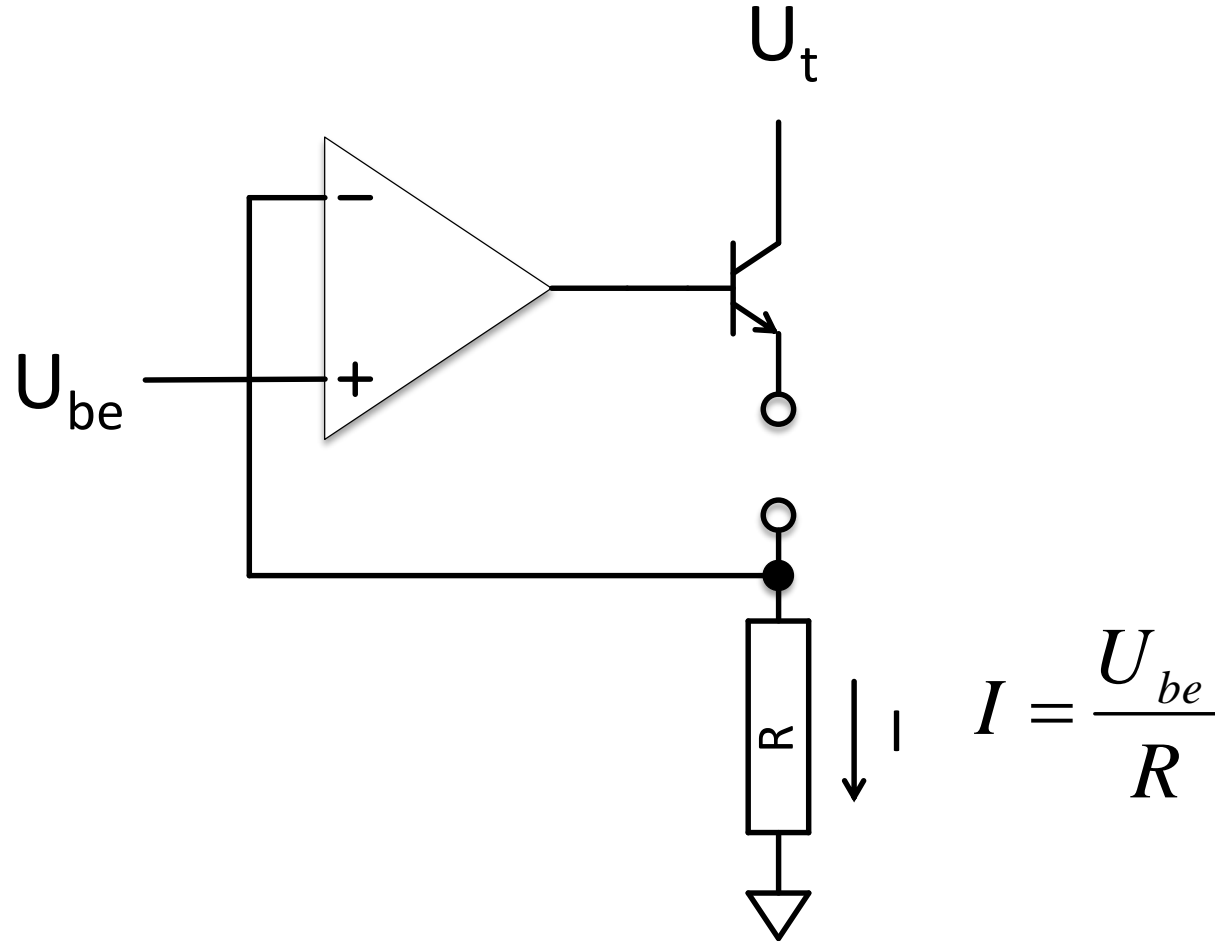


$$I = \frac{U_{be}}{R}$$



$$I = \frac{U_{be}}{R}$$

Nagyáramú áramgenerátor



Nagyáramú áramgenerátor

