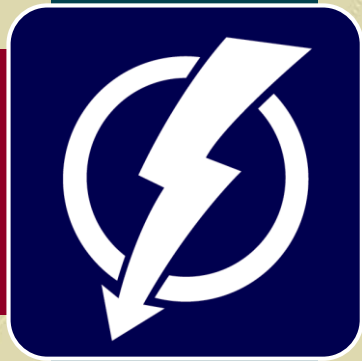
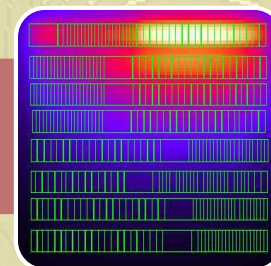
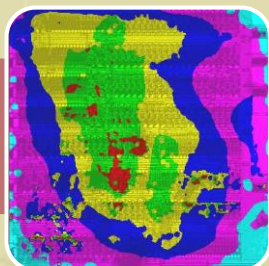




Budapesti Műszaki és  
Gazdaságtudományi  
Egyetem

## Elektronikus Eszközök Tanszéke

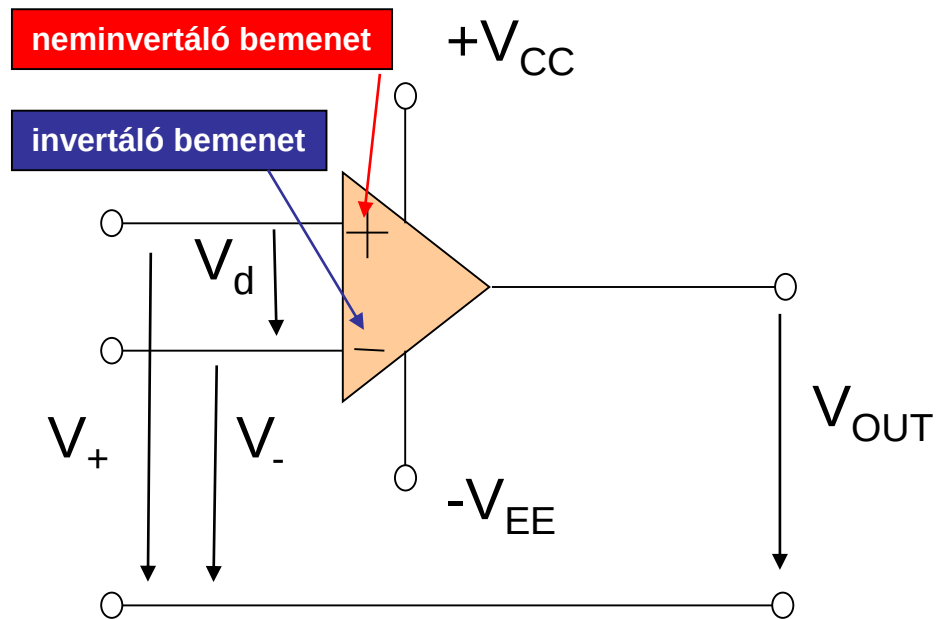
### Műveleti erősítő



# A műveleti erősítő

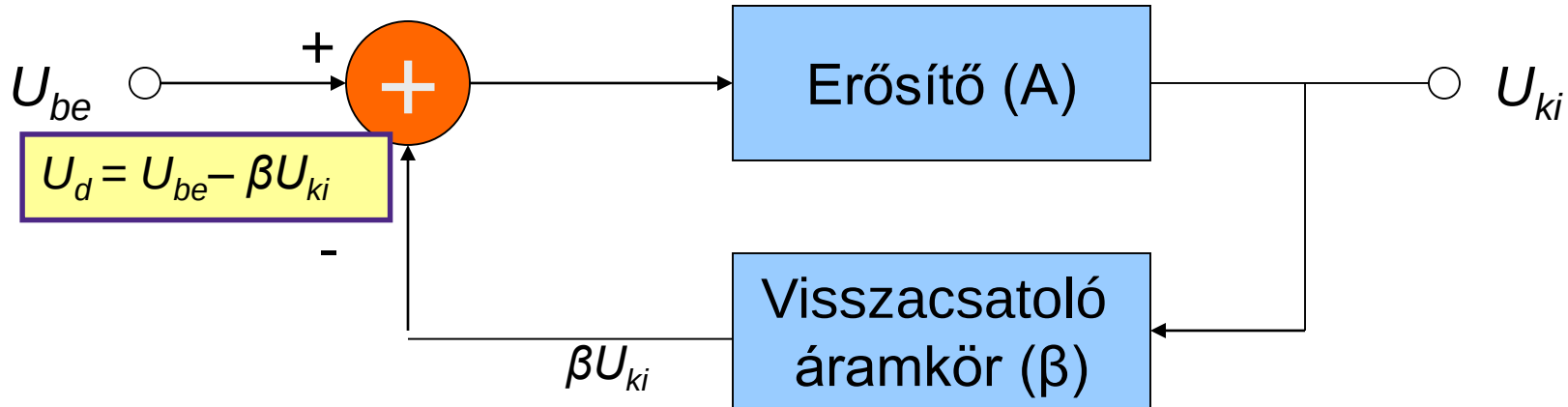
- ▶ A hagyományos erősítő tulajdonságait a belső felépítése határozza meg, **a műveleti erősítővel (operational amplifier) épült áramkörök működését a külső negatív visszacsatolás** határozza meg.
- ▶ **Közel ideális tulajdonságokkal rendelkezik,**
  - méretben, árban alig tér el a tranzisztoroktól, alkalmazása pedig jóval egyszerűbb.

Bemenete **differenciálerősítő**:  
2 bemenete van, az ezek közötti feszültségkülönbséget erősíti, ez az ún. **differenciális feszültség erősítés**.



$$V_{OUT} = A_d (V_+ - V_-)$$

# A negatív visszacsatolás



A kimeneti jel egy részét a visszacsatoló hálózaton keresztül visszavezetjük a bemenetre, és kivonjuk a bemeneten lévő jelből.

Stabil állapotban:

átrendezve:

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

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

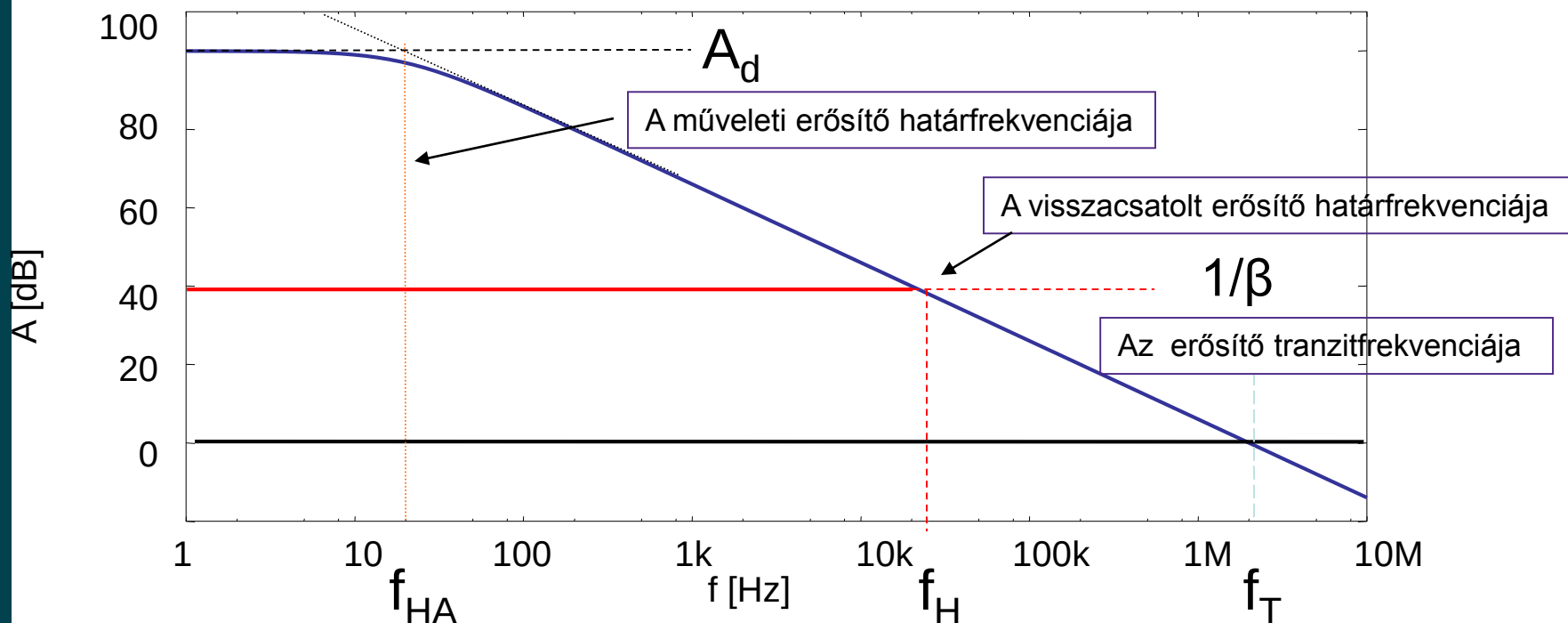
Ha  $\beta A \gg 1$ , akkor

Az erősítést a visszacsatolás határozza meg!

$$A_v \approx \frac{1}{\beta}$$

# A visszacsatolt erősítő frekvenciamenete

(ohmikus elemeket tartalmazó visszacsatoló hálózat esetén)



$$f_H \cdot A_V = f_{HA} \cdot A = f_T = GBW$$

**A negatívan visszacsatolt erősítő erősítés-sávszélesség szorzata egyenlő az erősítő tranzitfrekvenciájával.**

# Az ideális műveleti erősítő

$$A_d \rightarrow \infty, r_d \rightarrow \infty, r_{ki} \rightarrow 0$$

ahol  $r_d$  a **differenciális bemeneti ellenállás**,  
 $r_{ki}$  a **kimenő ellenállás**.

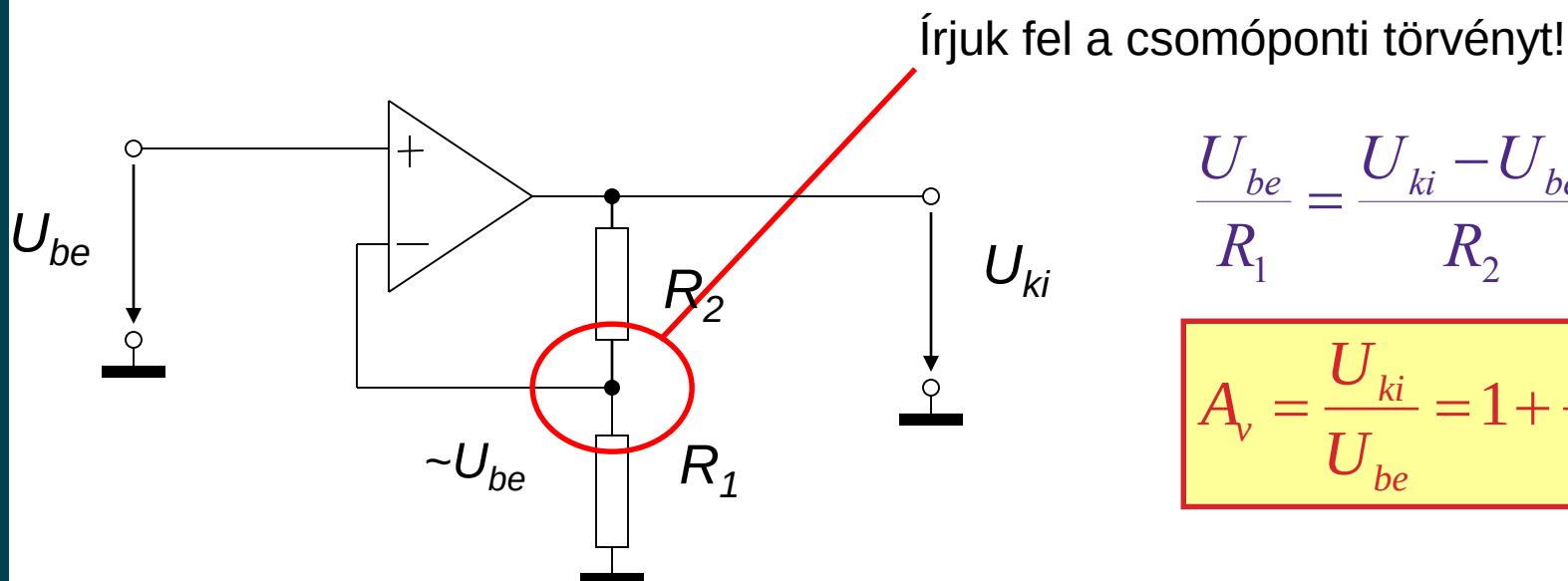
Egy valódi, általános célú (olcsó) műveleti erősítő paramétereit (µA741)  $A = 2 \cdot 10^5$ ,  $r_d = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $r_{ki} = 75 \Omega$

→ a legtöbb alkalmazásban a műveleti erősítő ideálisnak tekinthető

# A számítások elve

- ▶ Mivel a műveleti erősítő **differentiális erősítése a végtelenhez tart**, nem követünk el nagy hibát, ha **feltételezzük, hogy**
  - (1) a két bemenet azonos potenciálon van,  $V_+ = V_-$ .
  - (2) és bemenő árama = 0.
- ▶ Ezek után a hálózat már lineáris, tehát a szokásos hálózatszámítási eljárásokkal számítható.
- ▶ A számítás sokat egyszerűsödik az alapkapcsolások ismeretében, és a szuperpozíció tétel alkalmazásával
- ▶ De a Kirchhoff huroktörvény alkalmazása is viszonylag egyszerű.

# Fázist nem fordító (neminvertáló) alkapcsolás



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

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Másik megoldás:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

mivel ez egy feszültségosztó:

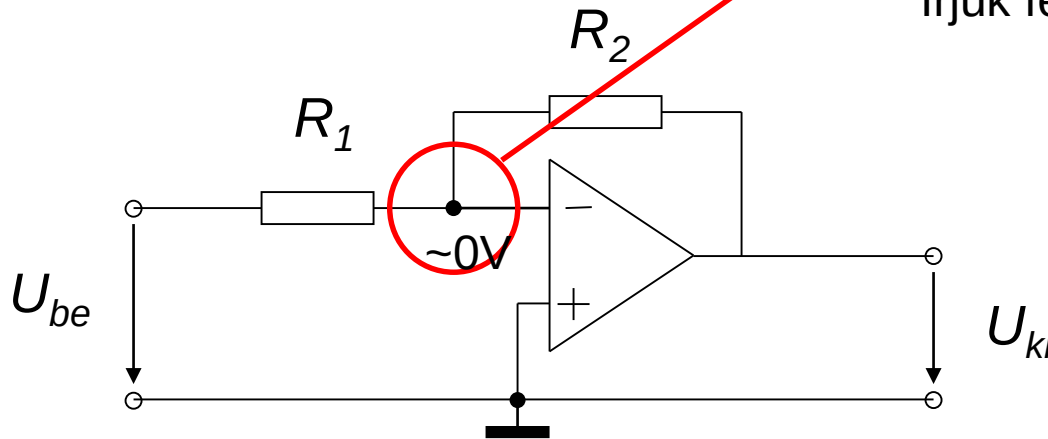
$$A_v \approx \frac{1}{\beta}$$

# Fázisfordító (invertáló) alapkapcsolás

## Fázisfordító erősítő

A neminvertáló bemenet feszültsége 0V

Írjuk fel a csomóponti törvényt!



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

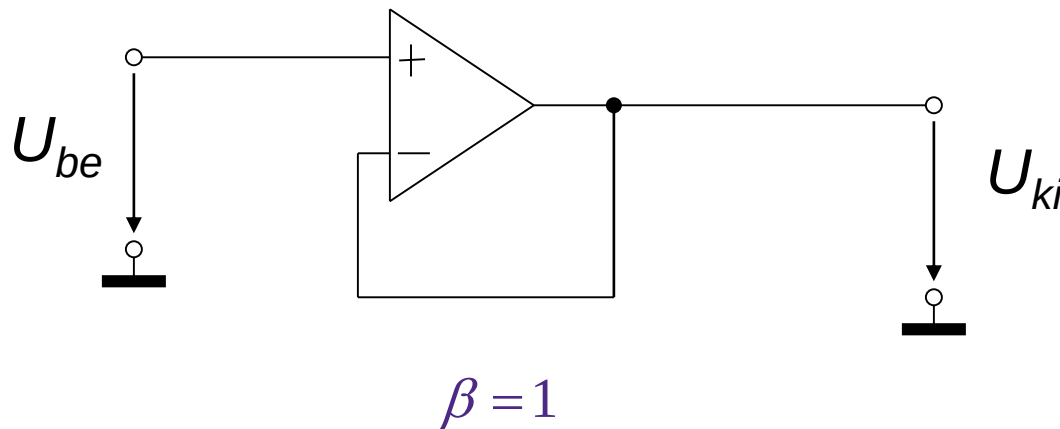
$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}$$



# Feszültségkövető

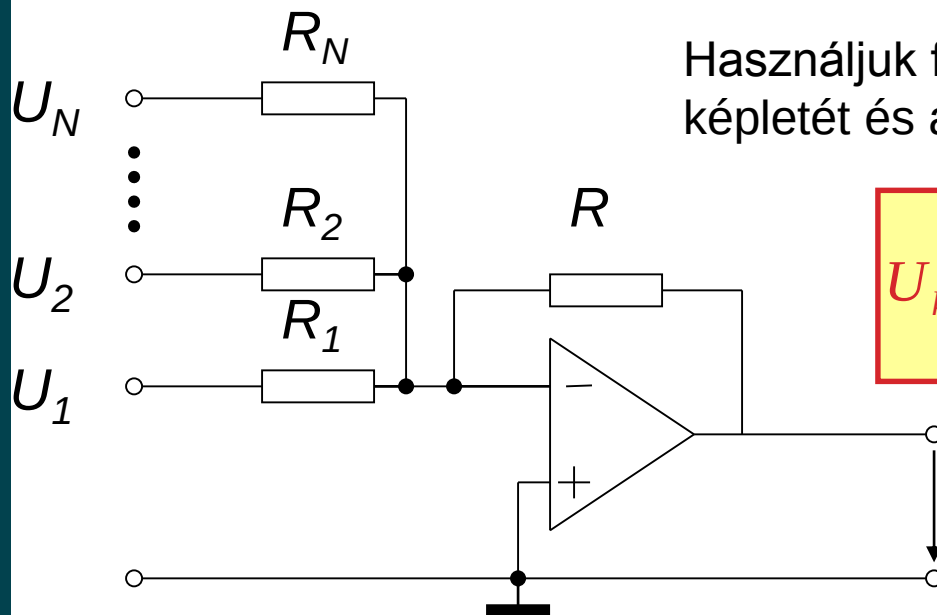
## Feszültségkövető

Az  $U_{be}$  forrást minimálisan terheli, a kimeneti ellenállás kicsi, ún. **impedanciaváltó**. ( $r_{in} \rightarrow \infty$ ,  $r_{out} \rightarrow 0$ )



$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = 1$$

# Összeadó erősítő

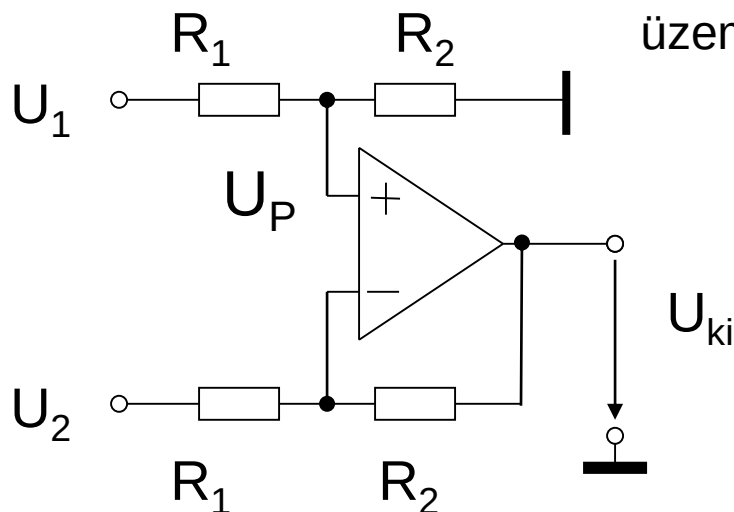


Használjuk fel a fázisfordító erősítő erősítésének képletét és a szuperpozíció elvét...

$$U_{ki} = - \left( \frac{R}{R_1} U_1 + \frac{R}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R}{R_N} U_N \right)$$

# Kivonó (differenciál) erősítő

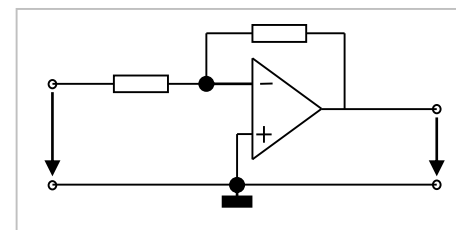
## Kivonó áramkör



**A szuperpozíció elvét alkalmazzuk**

Ha  $U_1 = 0$ , akkor **fázisfordító erősítőként** üzemel a kapcsolás:

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



Ha  $U_2 = 0$ , akkor **fázist nem fordító erősítőként** üzemel a kapcsolás:

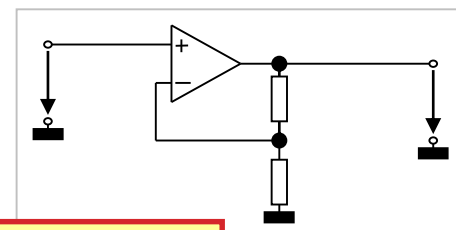
$$U_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1$$

A fázist nem fordító erősítő kapcsolás erősítése:

$$\frac{U_{ki}}{U_p} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{így} \quad U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} U_1$$

A megoldás a két eredmény összegzésével:

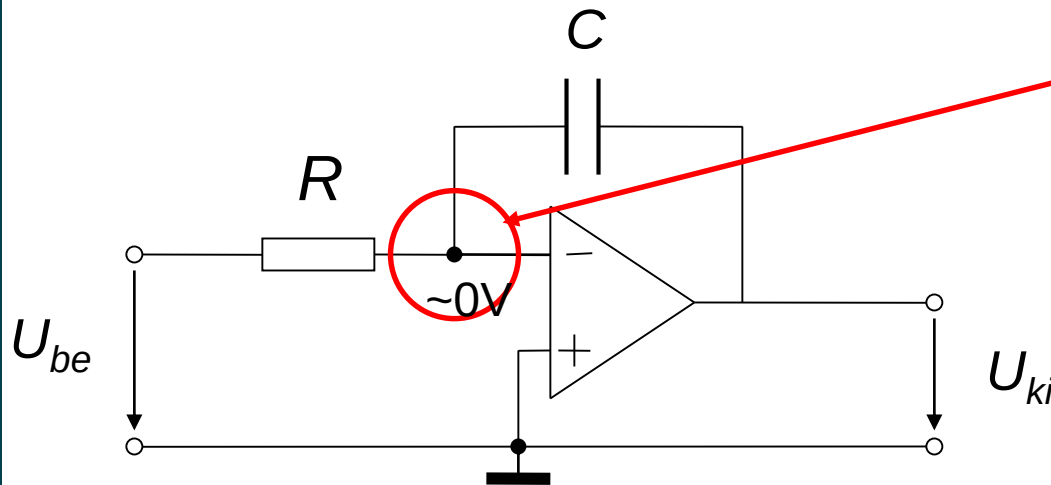
$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_2)$$



# Integrátor

Az integrátorok általában az

$$u_{ki}(t) = K \int u_{be}(t) dt + u_{ki}(t=0)$$
 kifejezést valósítják meg.



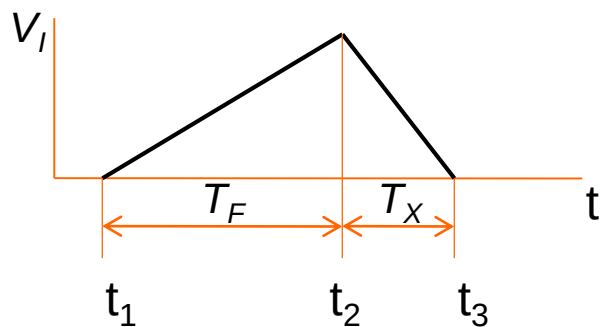
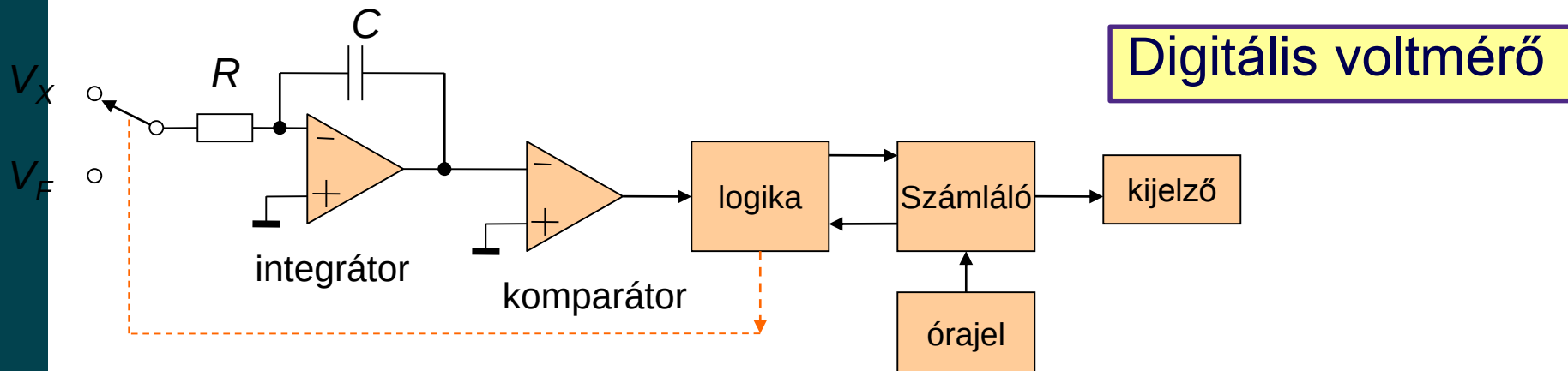
Az áram törvényből:

$$\frac{u_{be}}{R} + C \frac{du_{ki}}{dt} = 0$$

Megoldva:

$$u_{ki} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{be}(t) dt + u_{ki}(0)$$

# Példa integrátor alkalmazására

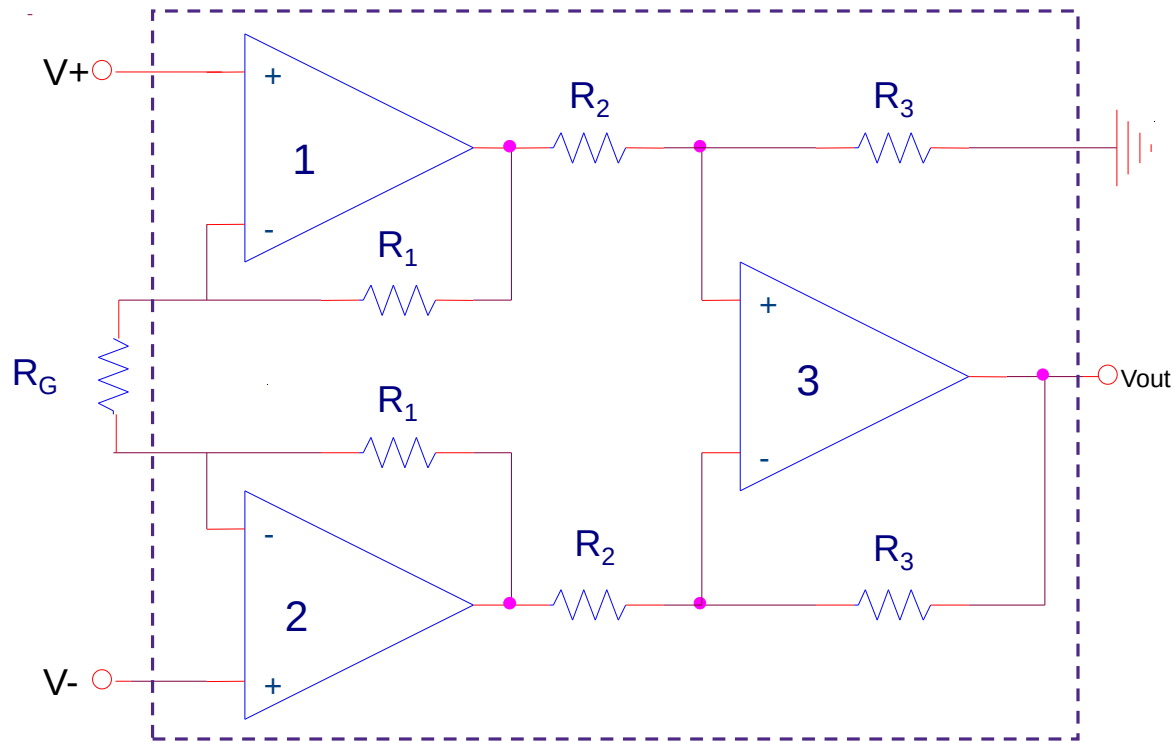


$$Q = \frac{V_X}{R} T_F = \frac{V_F}{R} T_X \rightarrow U_X = U_F \frac{T_X}{T_F}$$

- (1)  $t_1$  időpillanatban a mérendő jelet rákapcsoljuk az integrátorra és  $T_F$  fix ideig integráljuk.
- (2)  $t_2$  pillanatban átkapcsolunk egy negatív referenciafeszültségre és kisütjük a kapacitást.
- (3) A számlálóval mérjük a  $T_X$  időt.

# Mérőerősítő

## Instrumentation amplifier



- ▶ Egy integrált áramköri kapcsolás, az ellenállások értékét nagyon pontosan állítják be.
- ▶ Differenciál erősítő, a pontos erősítést a kívülről kapcsolt  $R_G$  ellenállás állítja be, általában kb.  $1..1000\times$

# A mérőerősítő erősítése

- ▶ A bekeretezett rész egy kivonó erősítőkapcsolás

$$U_{ki} = \frac{R_3}{R_2} (U_1 - U_2)$$

- ▶ Ideális műveleti erősítőket feltételezünk, így a két bemenet között nincs feszültség különbség

- ▶ Az  $R_G$  ellenállás árama tehát:

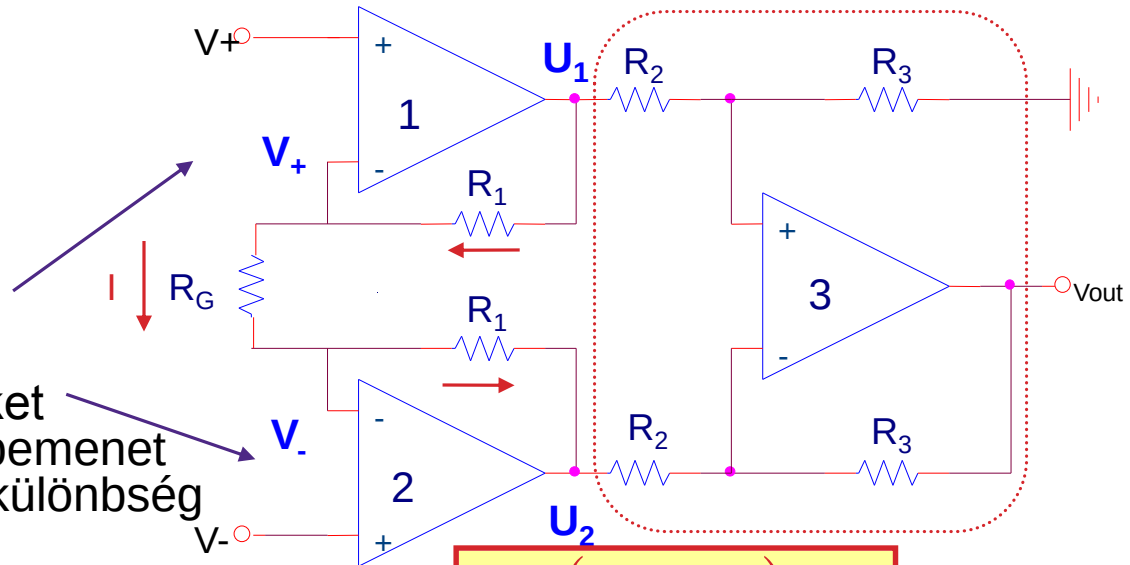
$$I = (V_+ - V_-) / R_G$$

- ▶ Mivel a műveleti erősítő bemeneti ellenállása végtelen, az áram az  $R_1$  ellenállások irányában halad, tehát a műveleti erősítők kimeneti feszültségének különbsége:

$$U_1 - U_2 = I(R_G + 2R_1)$$

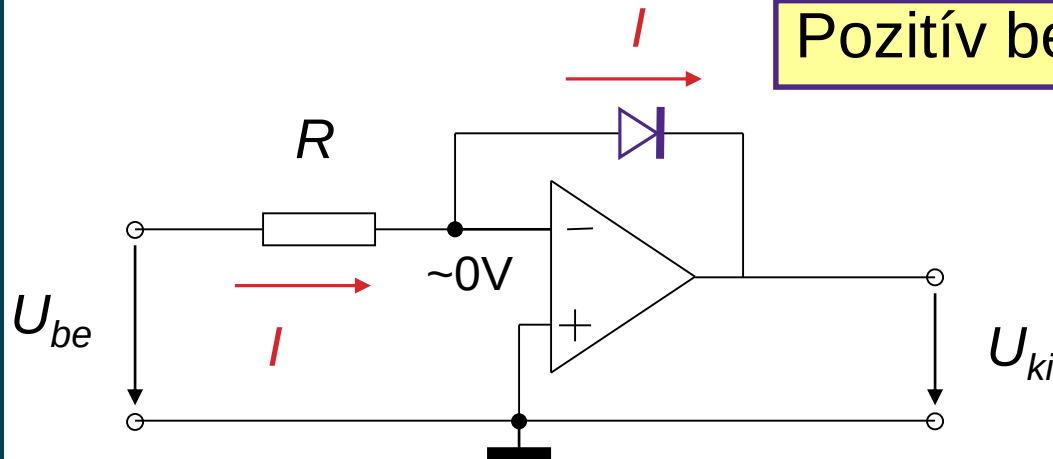
Azaz:

$$U_{ki} = \frac{R_3}{R_2} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) (V_+ - V_-)$$



# Logaritmáló erősítő

Pozitív bemeneti feszültségekre



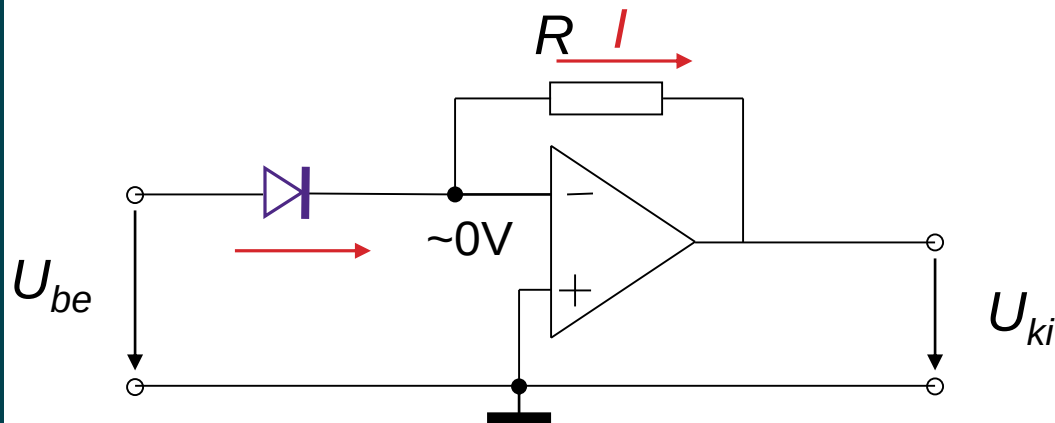
- ▶ Az ellenállás és a dióda árama megegyezik.
- ▶ A dióda feszültsége a kimeneti feszültség ellentettje
- ▶ Azaz:

$$\frac{U_{be}}{R} = I_0 \left( e^{-U_{ki}/mU_T} - 1 \right)$$

$$U_{ki} = -mU_T \ln \frac{U_{be}}{I_0 R}$$



# Exponenciális erősítő

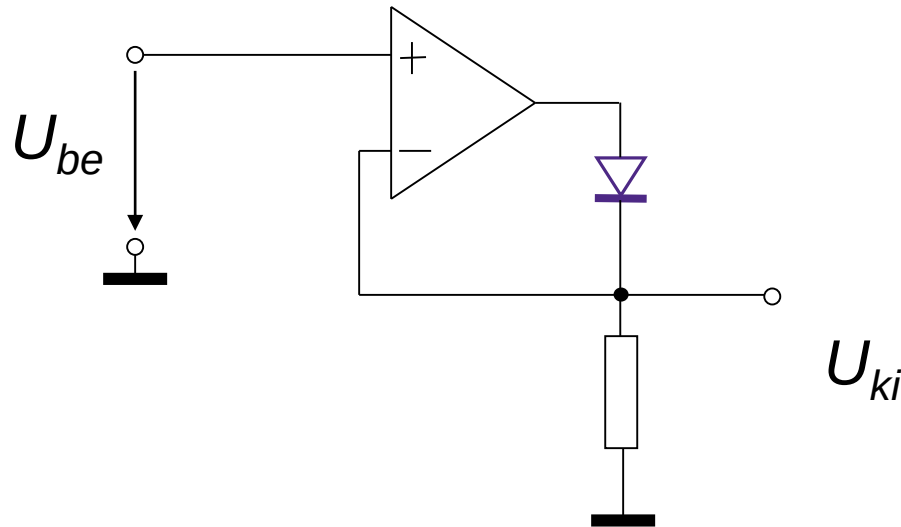


- ▶ Az ellenállás és a dióda árama megegyezik.
- ▶ Azaz:

$$-\frac{U_{ki}}{R} = I_0 \left( e^{U_{be}/mU_T} - 1 \right)$$

$$U_{ki} \approx -I_0 R e^{U_{be}/mU_T}$$

# Egyenirányító (szuperdióda)

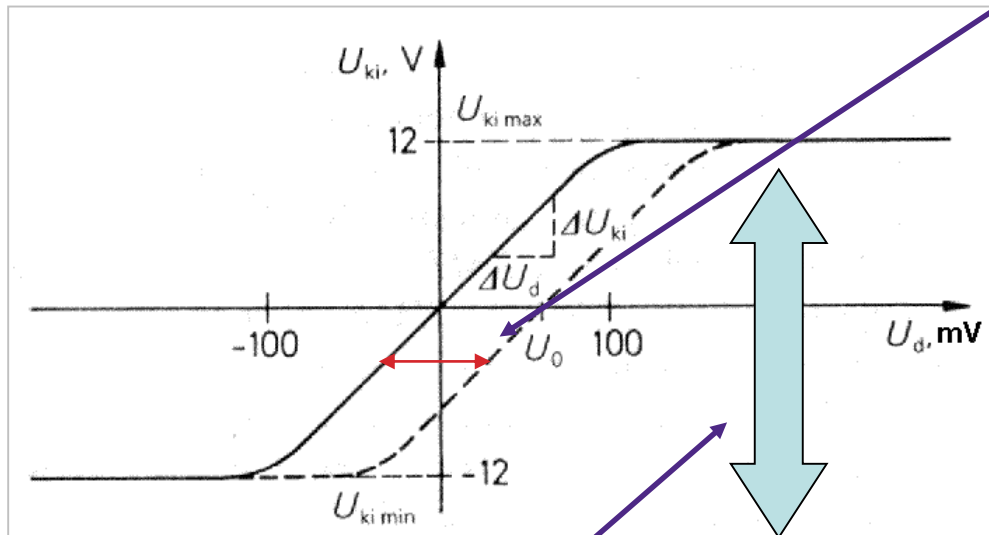


$$U_{ki} = U_{be}, \text{ ha } U_{be} > 0$$

$$U_{ki} = 0, \text{ egyébként}$$

# Valós műveleti erősítők paraméterei 1.

## Valós műveleti erősítő transzfer karakterisztikája



## Offset feszültség

A bemenetre valamekkora feszültségkülönbséget kell adni ahhoz, hogy a kimenet 0 legyen. Ez az ún. **bemenetre redukált offset feszültség**, néhány mV nagyságrendű.

## Maximális jelváltozási sebesség (slew rate)

A kimeneten a jel véges sebességgel változhat meg.  
 **$SR = dU_{ki} / dt$  maximuma.**

## Kivezérelhetőségi határ

**Amin túl az erősítő kimeneti feszültsége nem fog növekedni,**

- ▶ általában a tápfeszültség – néhány V,
- ▶ léteznek olyan műveleti erősítők is amelyek a tápfeszültségekig vezérelhetők (rail-to-rail működés)

# Valós műveleti erősítők paraméterei 2.

## Közös módusú erősítés

Ha a két bemenetre ugyanazt az  $U_k$  feszültséget kapcsoljuk, a kimenetnek ideális esetben 0-nak kellene lenni.

**A valóságban az erősítő kimeneti feszültsége függ az  $U_k$  feszültségtől, ez az ún. közös módusú erősítés.**

Legyen  $U_m = U_k - U_d / 2$  és  $U_p = U_k + U_d / 2$   
Ekkor a differenciális feszültségerősítés:

$$A_d = \frac{\partial U_{ki}}{\partial U_d}$$

a közös módusú  
feszültségerősítés:

$$A_k = \frac{\partial U_{ki}}{\partial U_k}$$

$$A_k \ll A_d$$

A katalógusok általában a **közös módusú feszültség elnyomást** adják meg

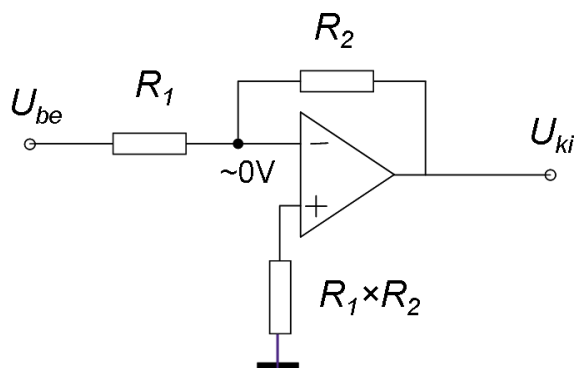
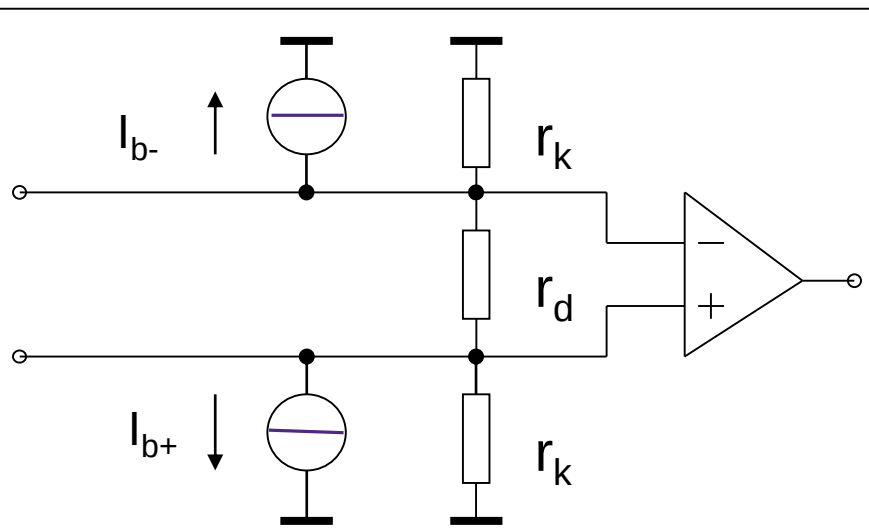
(Common Mode Rejection

$$CMRR = \frac{A_d}{A_k}$$

értéke  $10^4$  körül van.

# Valós műveleti erősítők paraméterei 3.

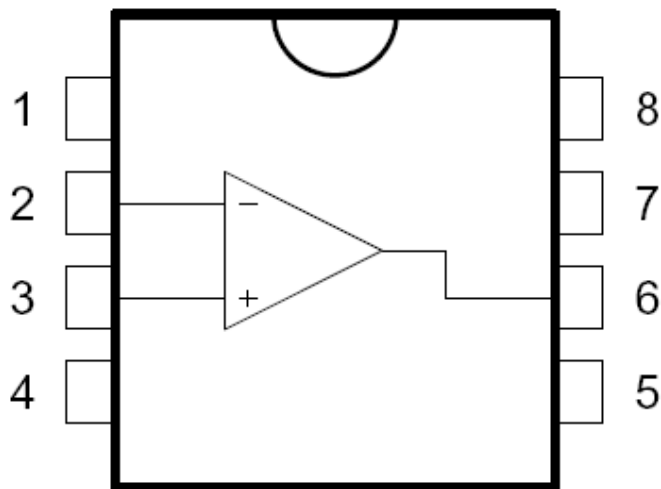
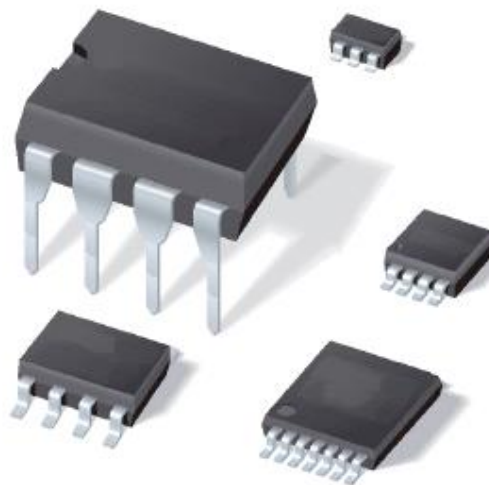
## Valós műveleti erősítő bemenetének modellje



$r_k$  közös módusú (GΩ),  $r_d$  (MΩ)  
 differenciális bemeneti ellenállás.  
 $I_{b+}$   $I_{b-}$  a bemenetek állandó  
 munkaponti áramai

|       | μA741 (bipoláris) | TL081 (JFET)     |
|-------|-------------------|------------------|
| $A_d$ | $2 \cdot 10^5$    | $2 \cdot 10^5$   |
| CMRR  | 90dB              | 86dB             |
| GBW   | 1 MHz             | 4 MHz            |
| $r_d$ | 2MΩ               | $10^{12} \Omega$ |
| $r_c$ | $10^9 \Omega$     | $10^{14} \Omega$ |
| $I_b$ | 80 nA             | 20 nA            |
| $U_0$ | 1 mV              | 3mV              |
| SR    | 0,5 V/μs          | 16 V/μs          |
| $r_o$ | 75Ω               | 100 Ω            |

# Műveleti erősítő tokozása



- 1 - Offset null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 -  $V_{CC}^-$
- 5 - Offset null 2
- 6 - Output
- 7 -  $V_{CC}^+$
- 8 - N.C.