

# Elektronika alapjai

## 6. előadás

### Analóg jelformálás és erősítés



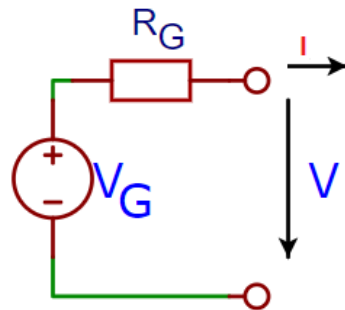
# Analóg jelfeldolgozás

- **Erősítés – a jel teljesítményének növelése**
- **Csillapítás - csökkentés**
- A jel frekvenciamenetének megváltoztatása
  - Szűrés
    - Aluláteresztő (low pass), feluláteresztő (high pass), sávszűrő (band pass), sávzáró (band reject)
- **Összegzés, különbségképzés, integrálás**
- Szorzás (keverés) – a váltakozó jel frekvenciájának megváltoztatása.
- Az analóg jelfeldolgozás leggyakrabban a digitális jelfeldolgozás „előszobája”
  - Bizonyos jelfeldolgozás jóval hatékonyabban végezhető el digitálisan.
  - (tulajdonképpen az összes modern moduláció ilyen..., WiFi, DTV, GSM stb.)



## A valós feszültségforrás

- Az elektronikában az analóg jel általában feszültség, ami egy feszültségforrással modellezhető
- A pontosabb modellezésnél azonban figyelembe kell venni, hogy a feszültségforrás feszültsége lecsökken, ha áramot ad ki.
- Ezt legegyszerűbben egy ellenállás sorbakapcsolásával oldhatjuk meg, így egy ideális feszültségforrással ( $V_G$  illetve egy belső ellenállással  $R_G$  tudjuk modellezni)
- A kapcsolokon mért feszültség a kifolyó áram függvényében:
- $V = V_G - IR_G$

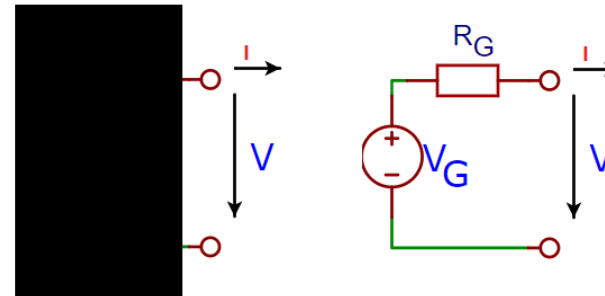


## A Thévenin tétel

- Bármely lineáris hálózat két pólus felől helyettesíthető egy valós feszültséggenerátorral.

- A meghatározás módja:

- Mivel két pont meghatároz egy egyenest, megmérjük, vagy meghatározzuk a kimenet feszültségét pl. terheletlenül, illetve egy adott áramnál.



- *(Mérés esetén óvatosan, betartva az előírt teljesítményhatárokat)*
- Számoláshoz viszont az  $I=0$ , azaz a terheletlen feszültség (üresjárási feszültség) illetve a  $V=0$ , azaz a kimeneti rövidzár esetén mért  $I_S$  áram meghatározása a legegyszerűbb. Ebben az esetben a modell belső ellenállása:
  - $R_G = V_G / I_S$



- Határozzuk meg egy feszültségosztó Thévenin helyettesítő képét!

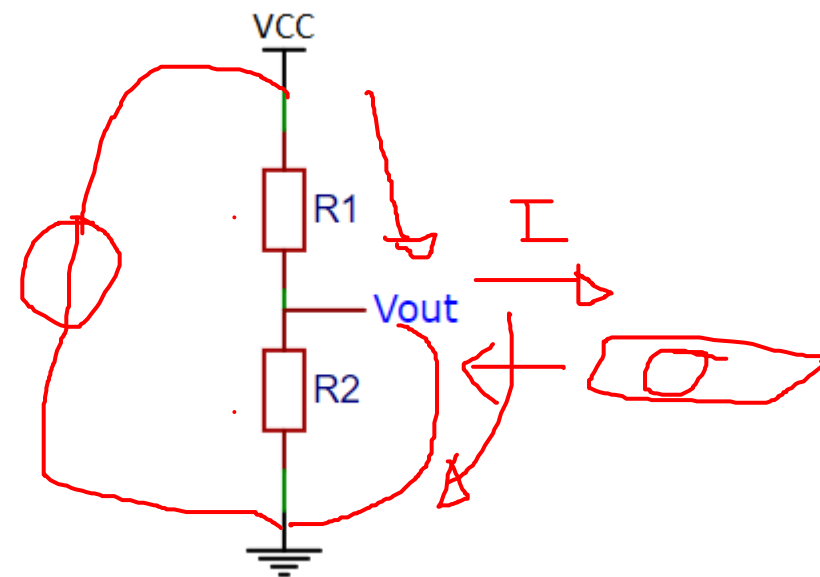
- Az üresjárási feszültség: (feszültségosztásból számolva)  $V_{OUT} = \frac{R_2}{(R_1+R_2)} V_{CC}$

- A rövidzárási áram:  $I_S = \frac{V_{CC}}{R_1}$

- Így a belső ellenállás:

- $R_G = \frac{V_G}{I_S} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

- (látható, hogy a két ellenállás párhuzamos eredője)



# Erősítő

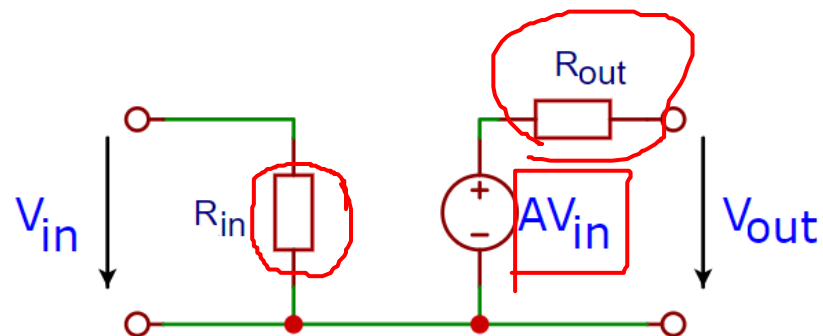
- Aktív eszköz, teljesítményt erősít

- A transzformátor pl. nem erősítő, hiszen a szekunder oldali teljesítmény kisebb, mint a betáplált (a veszteségek miatt)

- A feszültségerősítő

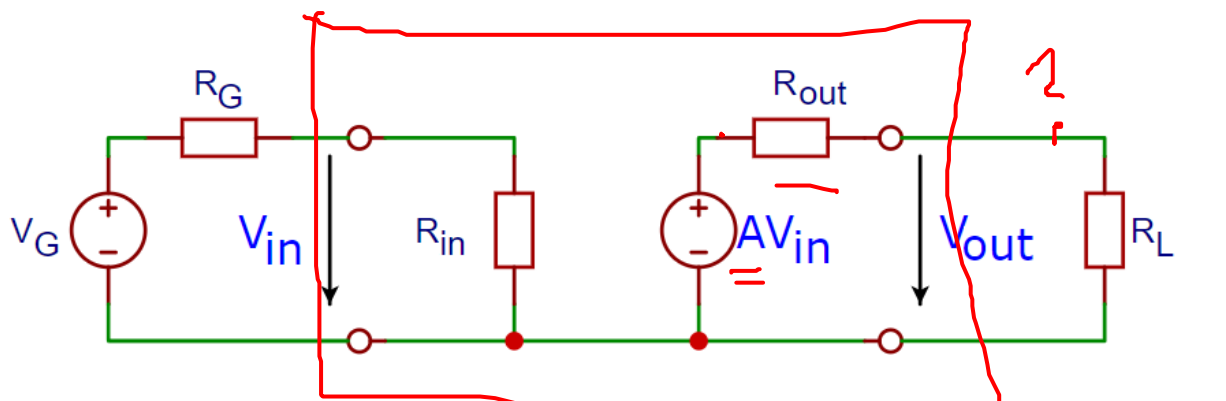
$$A = V_{OUT}/V_{IN}$$

Azaz az erősítő a bemenetére kerülő feszültséget A-szorosára erősíti. Egy valós erősítő bemenetén áram folyik, kimenetének feszültsége pedig függ a terhelésétől. (azaz a kimenetén folyó áramtól) Ezt a legegyszerűbben, hasonlóan a valós feszültségforráshoz, egy-egy ellenállás figyelembe vételével modellezhetjük.



## A valós erősítő

- Hajtsuk meg az erősítőt egy valós feszültséggenerátorral és terheljük a kimenetet!



- Az erősítő bementén a generátor feszültség megoszlik a belső ellenállások között.
- Ezt a feszültséget erősíti az erősítő A-szorosára
- Majd ez a feszültség szintén megoszlik a kimeneti ellenállás és a terhelés között.
- Azaz:

$$V_L = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_G} \cdot V_G \cdot A \cdot \frac{R_L}{R_{OUT} + R_L}$$

A cél az, hogy a terhelésen a feszültség minél nagyobb legyen. Ehhez az kell, hogy

$$\underline{R_{IN} \rightarrow \infty, R_{OUT} \rightarrow 0}$$



## A dB (decibel)

- A jelfeldolgozás során célszerű, ha az erősítés (csillapítás) mértékét logaritmikus egységben fejezzük ki.
  - A feldolgozandó teljesítmények a nW-kW nagyságrendben helyezkednek el
  - Jól kezelhető, egyszerűsíti a számításokat
- A dB egy arány, dimenzió nélküli mennyiség
- Eredetileg teljesítmény-arány kifejezésére használták.
- Néha megadjuk, mire vonatkozik. Nagyon gyakran használt a dBm, ahol az *m* a mW-jelöli

$$P \Big|_{dBm} = 10 \cdot \lg P / 1mW$$

Példa:  $-50dBm = 10^{-5}mW = 10nW$





## A dB feszültségekre

- A teljesítmény egy ellenálláson a feszültség négyzetével arányos
- Így feszültségarányra (pontosabban annak abszolút értékére) ugyanígy használt.

$$A|_{dB} = 10 \cdot \lg V_2^2 / V_1^2, \text{ azaz } A|_{dB} = 20 \cdot \lg |V_2 / V_1|$$

Példák:

- 100× erősítés: 40dB / -3dB: 1/v2 –rész, kb. 71% / 6dB: kétszeres erősítés
- Néha megadjuk, mire vonatkozik, pl. dBmV, 1mV-ra.
- Példa:

Csatorna	Frekvencia (Hz)	Jelszint (dBmV)	SNR (dB)	Moduláció	Csatorna azonosító
1	426000000	8	38	256qam	10

Ezen a csatornán a jel effektív értéke kb. 2,5mV, a hasznos jel pedig kb. 80× a zaj effektív értékének.



# Erősítés aktív eszközökkel

Bemutató, nem vizsgaanyag



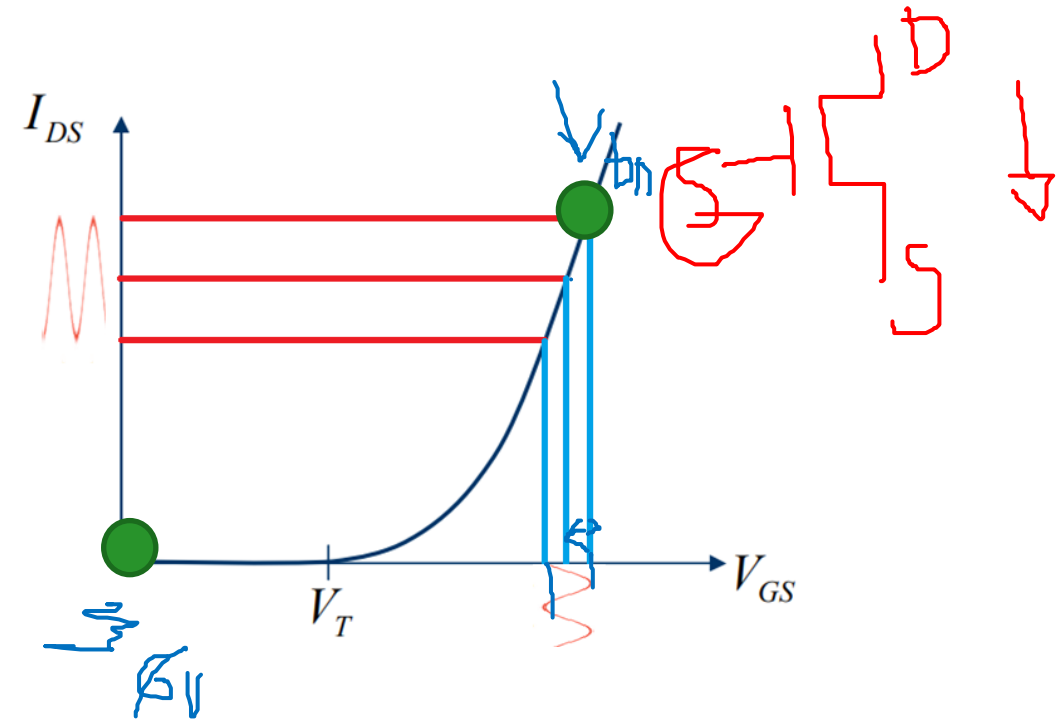
# Erősítés

- A teljesítmény erősítéshez aktív eszköz kell, amely egy feszültségforrás energiáját használja fel.
- Az erre szolgáló aktív alkatrész a TRANZISZTOR.
  - Régészeknek és HiFi whitefülüeknek az elektroncső (trióda)
- Ezeket eddig a digitális áramkörökben *kapcsolásra* ismertük meg.
  - Valójában kapcsolásra a *két szélső állapotot* használtuk fel
  - *Nem vezet/ nagy árammal vezet*
- A két állapot között viszont a tranzisztorok úgy működnek, hogy a vezérlő bemenet feszültségének megváltozására az áramuk megváltozik.



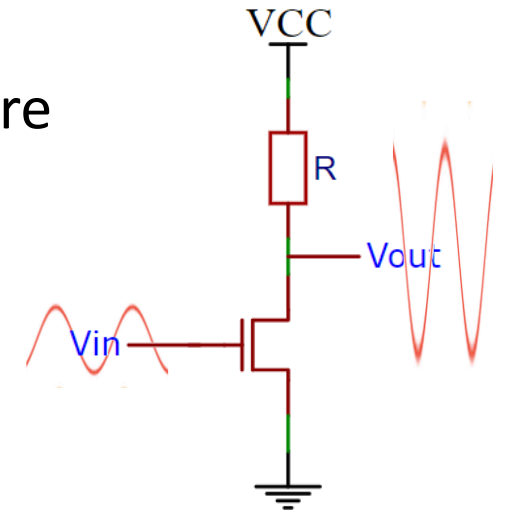
## MOS tranzisztor árama

- Az áram a küszöbfeszültség eléréséig 0, utána pedig a feszültséggel növekszik.
  - (a legegyszerűbb közelítésben négyzetesen, de ezt most nem tárgyaljuk részletesen)
  - Zölddel jelölve a két digitális logikában kapcsolásra használt „sarokpont”
  - Most vizsgáljuk meg mi történik „közötte”
  - Ha a vezérlő feszültség egy adott egyenfeszültség körül váltakozik, akkor az áram is megváltozik
  - Közelítsük a megváltozást a legegyszerűbben, elsőfokúan!
  - Ekkor az áramváltozás:  $\Delta I_{DS} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \Delta V_{GS} = g_m \Delta V_{GS}$
  - Tehát a tranzisztor a vezérlésre arányos áramváltozással reagál. Ezt kell valahogy feszültségváltozássá alakítani.



## Erősítés MOS tranzisztorral

- (az elv tulajdonképpen tetszőleges tranzisztorra – illetve elektroncsőre is igaz)
  - A gate-re egy egyenfeszültség körül váltakozó feszültséget teszünk. Ezt fogjuk erősíteni.
  - Növekvő bemeneti feszültségre növekvő áram folyik.
  - $\Delta I \approx g_m \Delta V_{IN}$  (lineáris közelítéssel)
  - A növekvő áram hatására a R ellenálláson nagyobb feszültség lesz. Emiatt a kimenet feszültsége lecsökken, pont annyival, amennyivel megnő az ellenállás feszültsége, azaz
  - $\Delta V_{OUT} = -g_m R \Delta V_{IN}$
  - Az erősítés tehát a váltakozó feszültségre:  $A = -g_m R$
  - <http://tinyurl.com/uaxa3qf>
  - (érdeemes kísérletezgetni, nézni a torzítást, túlvezérlést stb.)





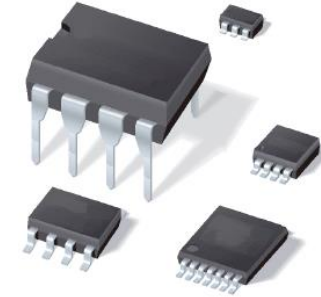
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

## A műveleti erősítő



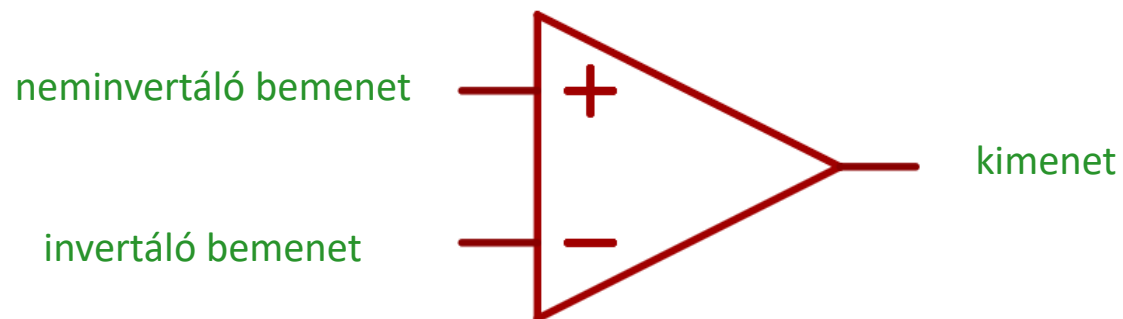
## A műveleti erősítő / Operation Amplifier (opamp)

- Manapság néhányszor tíz tranzisztorból felépített *integrált áramkör*
- Egy új koncepciót jelentett: a feszültségerősítés nagyon nagy, ezért nem önmagában, hanem külső negatív visszacsatolással használjuk.
  - (Negatív visszacsatolás: a kimenetet egy visszacsatoló hálózaton keresztül visszavezetjük és a bemeneti jelből kivonjuk, majd a különbséget erősítjük – ld. később)
- Közel ideális tulajdonságokkal rendelkezik
  - Olyanannyira, hogy saját szimbólumot is kapott a hálózatelméletben
- Méretben, árban alig tér a tranzisztoroktól, alkalmazása pedig jóval egyszerűbb.
  - Emiatt szinte egyeduralkodó a jelformáló kapcsolásokban. Legalábbis kisebb frekvencián.



# A műveleti erősítő

- Differenciálerősítő
  - Két bemenete közötti feszültségkülönbséget erősíti, ez az ún. differenciális feszültségerősítés
- $V_{OUT} = A_D (V_+ - V_-)$
- Rajzjele

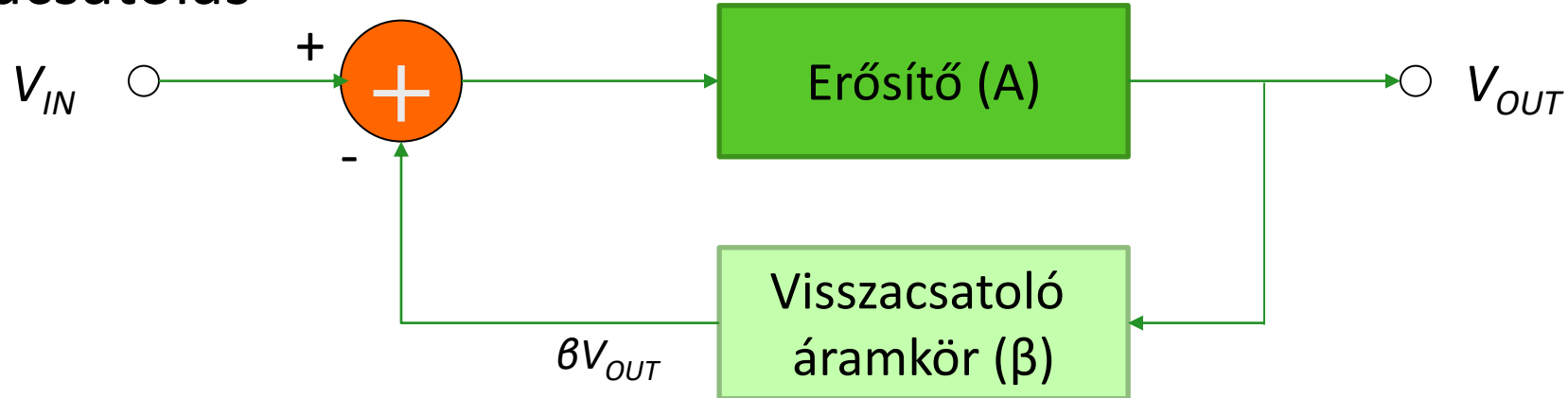


*Az ábrán az egyszerűsített, ideális műveleti erősítő rajzjele szerepel. A valódi műveleti erősítő rajzjele majd a következő előadáson kerül elő.*





## Negatív visszacsatolás



- A kimeneti jel egy részét a visszacsatoló hálózaton keresztül visszavezetjük a bemenetre és kivonjuk a bemenő jelből.
  - Stabil állapotban:  $V_{OUT} = A(V_{IN} - \beta V_{OUT})$
  - Átrendezve a teljes rendszer erősítésére (itt az erősítés definíció szerint a kimeneti és bemeneti feszültség hányadosa) és **feltételezzük** azt, hogy  $\beta A \gg 1$ , ebben az esetben
  - $A^* = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \frac{1}{\beta}$
- Azaz az erősítést a visszacsatolás határozza meg!



## Műveleti erősítővel megvalósított negatív visszacsatolás

- Számítsuk ki a visszacsatoló hálózat átvitelét, azaz mi kerül a differenciál erősítő invertáló bemenetére!

- Ez egy feszültségosztó, azaz  $V_- = V_{OUT} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

- Azaz a visszacsatoló hálózat átvitele,  $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

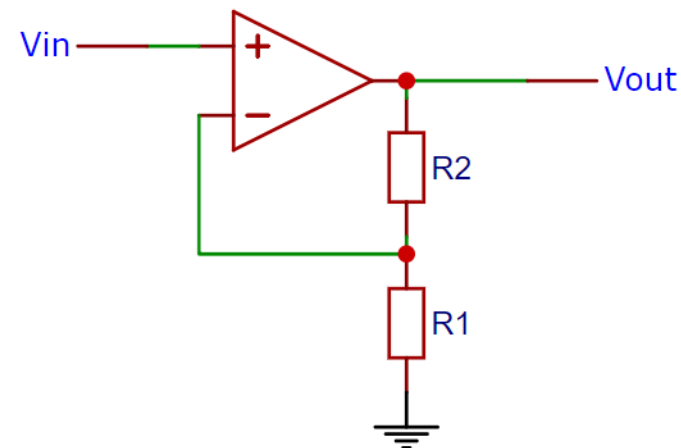
- Így az erősítés, ha  $\beta A \gg 1$

- $A^* = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

- Azaz **itt** a visszacsatolt erősítő erősítését (ha az erősítő erősítése jó nagy) két ellenállás aránya határozza meg.

- Ha pl.  $R_1 = 1\text{k}\Omega$  és  $R_2 = 10\text{k}\Omega$ , az erősítés jó közelítéssel  $11\times$

- A gyakorlatban tehát **nem számít** az erősítő erősítésének pontos értéke, szórása, hőmérsékletfüggése stb.



## Az ideális műveleti erősítő

- Az előző példában ha az erősítő erősítése 1000, akkor a rendszer erősítése 10,88x, ha 10 000, akkor 10,99x
- A  $\mu A741$ , egy általános célú, 1970 (!) óta gyártott műveleti erősítőnek az erősítése 200 000.  **$\mu A741$**
- Érdemes definiálni az ideális műveleti erősítőt SLOS094G – NOVEMBER 1970 – REVISED JANUARY 2018

$$A_D = \infty, R_{IN} = \infty, R_{OUT} = 0$$

- Azaz a  **feszültségerősítése végtelen**, a **bemeneten áram nem folyik** és a **kimeneti feszültség független a kimeneti áramtól**.
- Nyilvánvalóan ezt csak megközelíteni lehet, de pl. a  $\mu A741$ -re  $A_D = 200\,000$ ,  $R_{IN} = 2\,M\Omega$ ,  $R_{OUT} = 75\Omega$ , így a legtöbb alkalmazásban ideálisnak tekinthető.
  - Rengeteg fajta létezik, pl. egy nagy gyártónál kb. 1500 típus, kezdőár 4 cent...



## Számítások ideális műveleti erősítővel

- Mivel a differenciális feszültségerősítés végtelen:
  - A két bemenet feszültségkülönbsége 0, azaz ugyanazon a feszültségen van.
- Mivel a bemenő ellenállás végtelen:
  - A bemenő áram 0.
- Ezek után a hálózat lineáris, a szokásos hálózatszámítási eljárásokkal számítható
- Sokat egyszerűsíthetünk az *alapkapcsolások* ismeretével és a szuperpozíció alkalmazásával.
  - Nem túl bonyolultak és egyszerűen levezethetők
  - De valójában a Kirchhoff törvény alkalmazása is egyszerű



## Neminvertáló alapkioscsolás

- Már láttuk, most számítsuk ki másképp.
- A két bemenet azonos feszültségen van, azaz  $V_+ = V_- = V_{IN}$

Írjuk fel a Kirchhoff törvény az invertáló bemenetre

$$\frac{V_{IN}}{R_1} = \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{R_2}$$

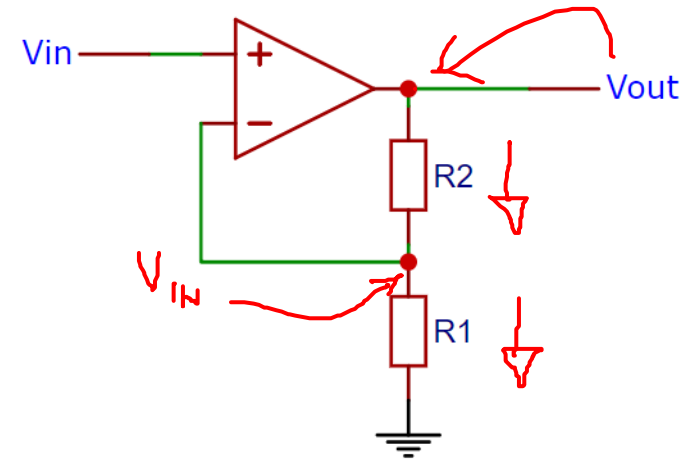
Átrendezve:

$$V_{IN}R_2 = (V_{OUT} - V_{IN})R_1 \quad \checkmark$$

Azaz:

$$A = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

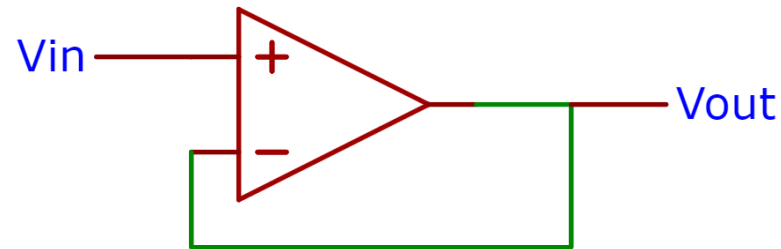
**Megjegyzés:** a képletet nem így érdemes megjegyezni, hanem úgy, hogy a számlálóban a visszacsatoló, a nevezőben a „másik” ellenállás van.



## Neminvertáló alkapcsolás tulajdonságai

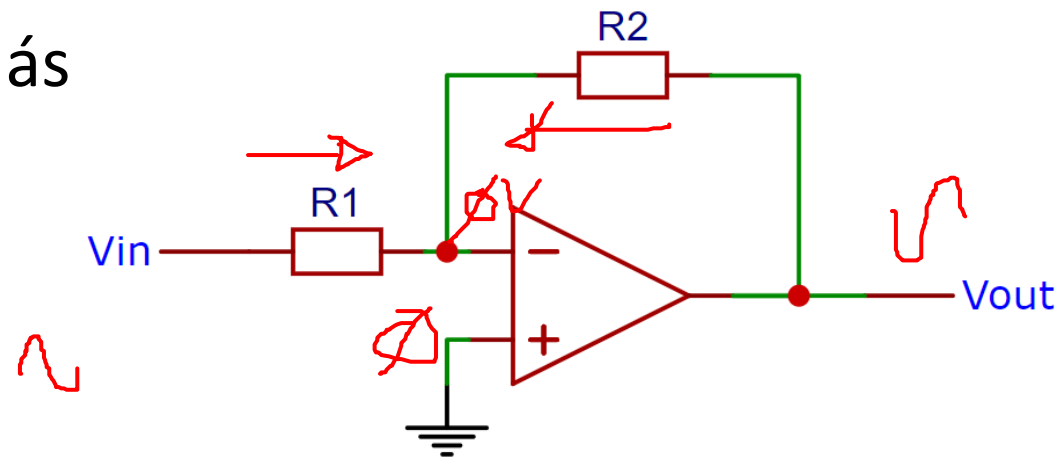
- Bemenő ellenállás  $\rightarrow \infty$
- Kimenő ellenállás  $\rightarrow 0$ 
  - (a visszacsatolás miatt töredéke az erősítő kimenő ellenállásának)
- Az erősítés: min. 1

Elfajuló eset  $A=1$ , ez ellenállásokat sem igényel.



Ez az ún. követő erősítő vagy impedanciaváltó. A kimenet követi a bemenetet, de onnan áramot szinte nem vesz fel.

## Invertáló alkapcsolás



- Az ideális műveleti erősítő két bemenete között nincs feszültségkülönbség.
  - Azaz  $V_- = 0V$
- Írjuk fel a Kirchhoff törvényt az invertáló bemenetre!

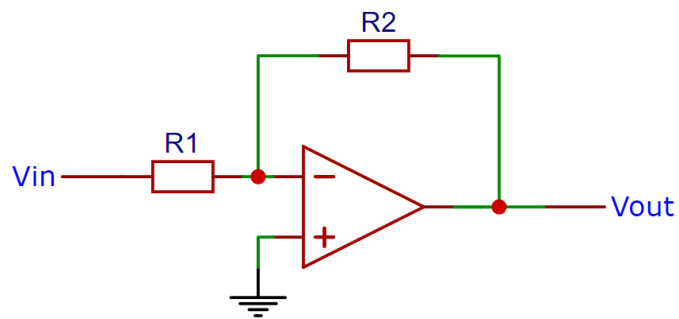
$$\frac{V_{IN}}{R_1} + \frac{V_{OUT}}{R_2} = 0$$

Átrendezve:

$$A = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_2}{R_1}$$



# Invertáló alkapcsolás tulajdonságai



- Bemenő ellenállás =  $R_1$ 
  - Ez nem olyan kedvező, mint a neminvertáló alkapcsolásban.
- Kimenő ellenállás  $\rightarrow 0$
- Az erősítés mindig negatív





## Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [Földelt source-ú erősítő](#)
- [A műveleti erősítő története](#)
- [Elektroncsöves erősítő](#) (érdemes megnézni a feszültség szinteket!)
- [Műveleti erősítők keresése \(egy gyártó.. 735 típus\)](#)
- [Invertáló alapkapcsolás](#)
- [Neminvertáló alapkapcsolás](#)

