

# Elektronika alapjai

## 7. előadás

### Jelfeldolgozás műveleti erősítővel



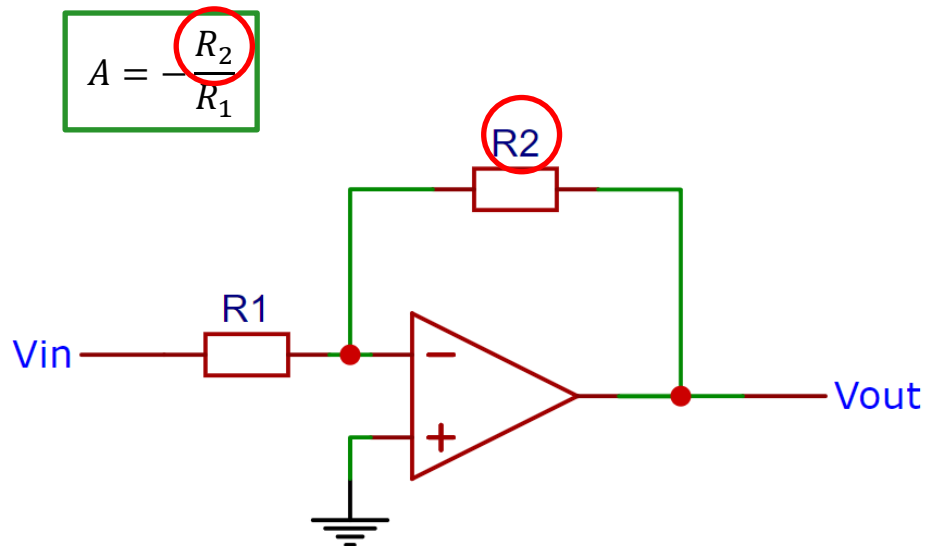
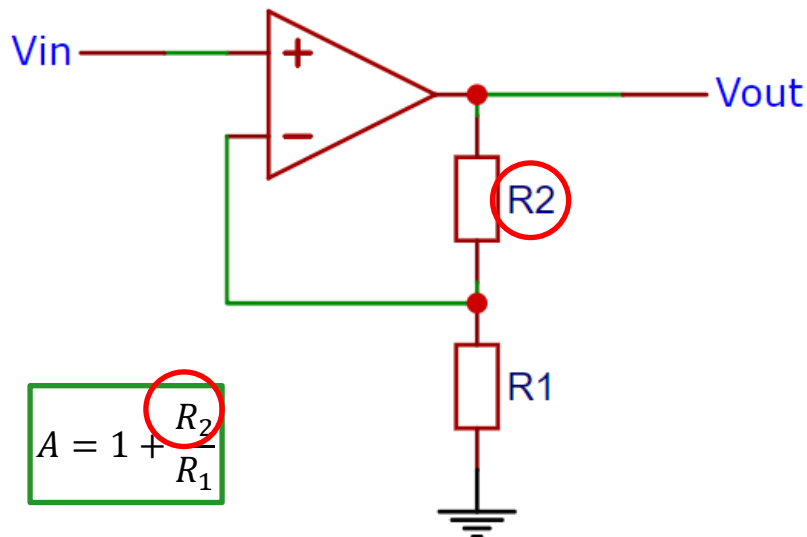
# Műveleti erősítő

- Mitől lesz műveleti?
- Lehetőséget ad
  - Jelek összedására, kivonására
  - Szorzás
  - Integrálására
  - (deriválás)
  - Egyéb... (logaritmus, exponenciális stb.)
  - Analóg számítógép
    - Differenciálegyenletrendszerek megoldása.
    - (amíg a digitális számítógépek sebessége ilyen feladatokra kevésnek bizonyult)
    - Időnként előkerül az ötlet integrált áramkörökön (neurális hálózatok, gépi tanulás stb.) gyorsításra és/vagy energiahatékonyság növelésére.

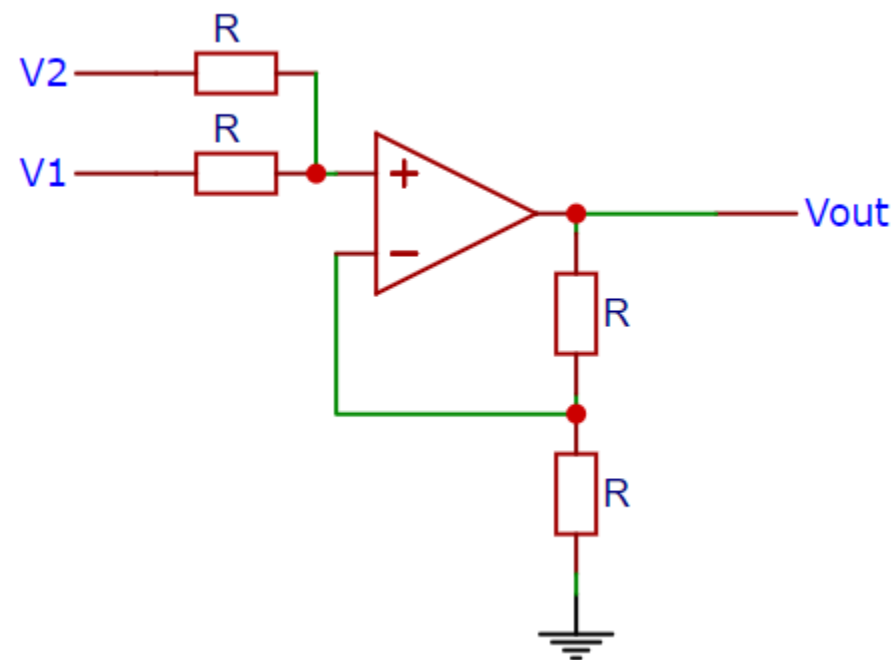


## Emlékeztető

- Ideális műveleti erősítő erősítése végtelen, bemenetén áram nem folyik.
  - Ebből következően két bemenete között a feszültségkülönbség 0
- A hálózat lineáris
  - A szuperpozíció tétel igaz. Azaz a rendszer válasza az egyes gerjesztésekre adott válasz összege
  - Az alkapcsolások erősítésének ismerete meggyorsítja a számítást.



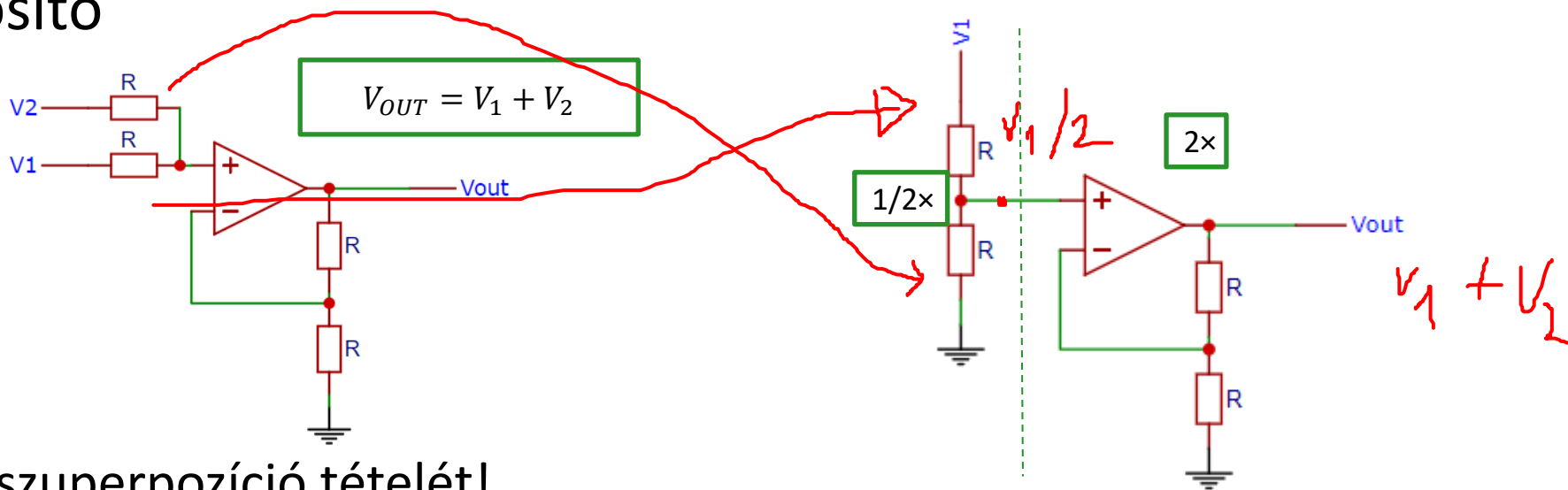
# Összeadó erősítő 1.



- Összeadó erősítő
- $V_{OUT} = V_1 + V_2$ 
  - A kimenet a bemenetek feszültségeinek összege, ha az R ellenállások egyformák.



# Összeadó erősítő



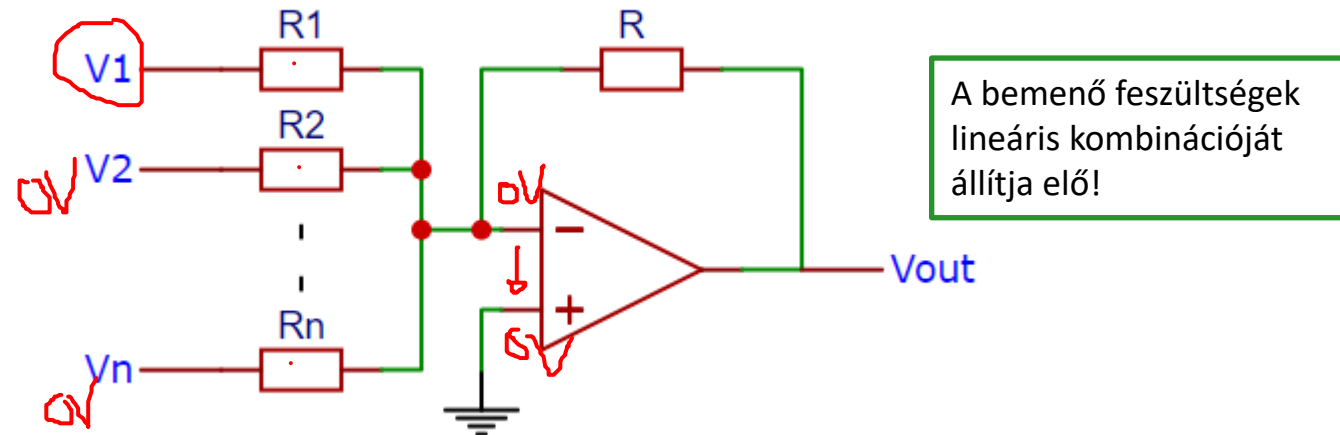
## ■ Használjuk a szuperpozíció tételét!

- Számoljuk ki először  $V_1$ -re. Ilyenkor a  $V_2$  forrás inaktívvá tesszük, azaz 0V-al helyettesítjük. Ezt látjuk a jobboldali ábrán.
- A műveleti erősítő bemenetére a  $V_1$  forrás jele az ellenállásosztón keresztül felére leosztva kerül.
- Ezt a jelet a neminvertáló alkapcsolás követi, így a kimenet:  

$$V_{out} = V_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 = V_1$$
- Ugyanígy eljárva a  $V_2$  forrás esetén megkapjuk a bizonyítandó eredményt.



# Invertáló összeadó erősítő



## ■ Használjuk ismét a szuperpozíció tételét!

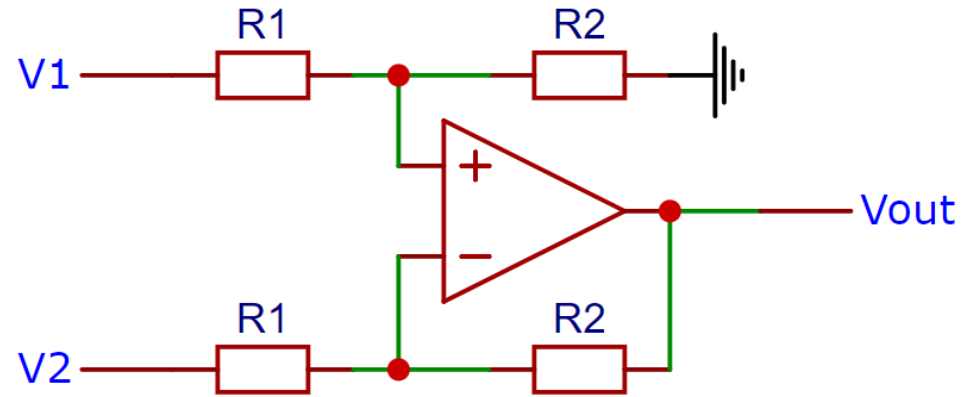
- $V_1$ -re egy invertáló erősítő, melynek erősítése  $A = -\frac{R}{R_1}$ .
  - (A többi ellenállás az invertáló bemenet és föld közé kapcsolódik, de az invertáló bemenet is 0V-on van ideális műveleti erősítő esetén, azaz ezeken áram nem folyik)

## ■ Így összegezve az eredményeket:

$$V_{OUT} = - \sum_{i=1}^n \frac{R}{R_i} V_i$$



## Kivonó (differenciál) erősítő

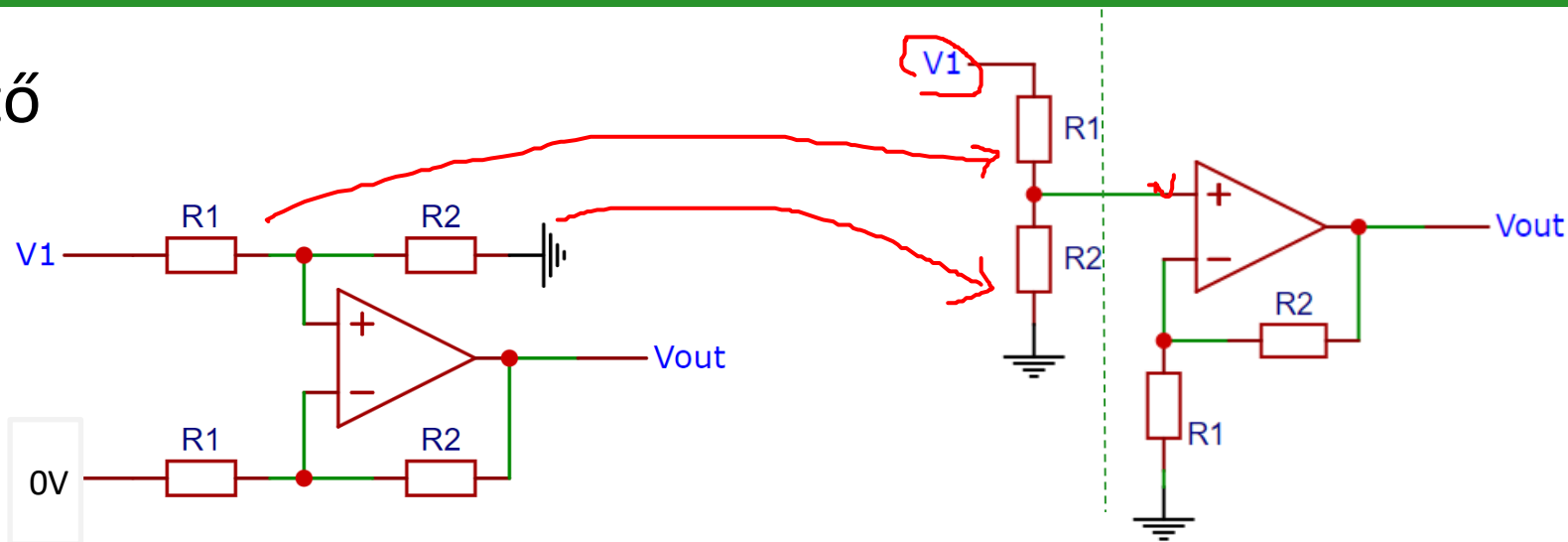


$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

- Itt nagyon fontos, hogy az ellenállások pontosak legyenek.
- Integrált áramkör formában az ellenállásokat egyedileg (minden egyes áramkörre) gyártáskor értékbeállítják.



## Kivonó erősítő



- Használjuk a szuperpozíciót! Számoljunk először az 1. feszültségforrásra!

- Ilyenkor a második feszültségforrás 0, egy picit átrajzolva és beforgatva a kapcsolási rajzot, ezt kapjuk.

- A neminvertáló erősítő bemenetére a  $V_1$  ellenállásosztó leosztott feszültsége kerül:  $V_+ = \frac{R_2}{(R_1+R_2)} V_1$ .

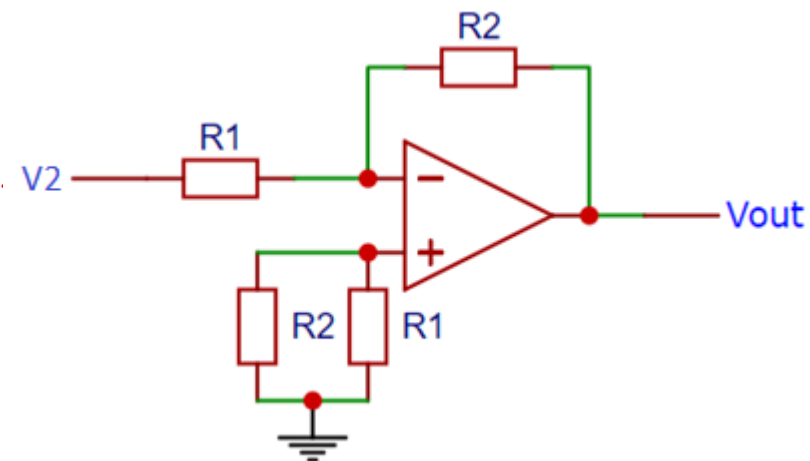
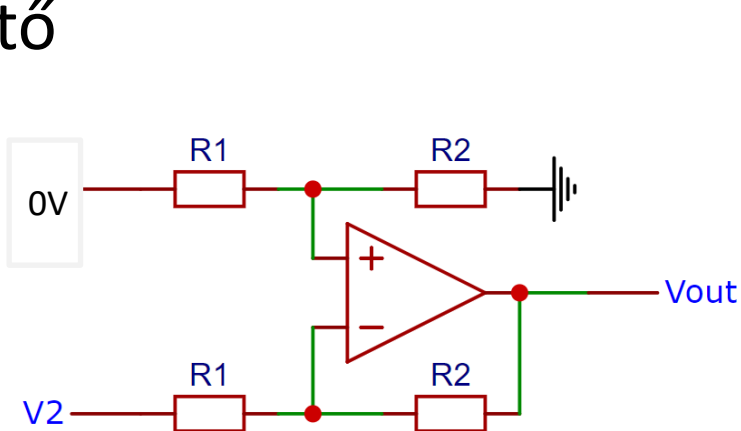
Ezt erősíti az erősítő  $A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$  szeresére. Azaz

- $$V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_1 \frac{(R_1+R_2)}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} V_1$$





## Kivonó erősítő



- Átrajzolva könnyen észreveszük, hogy ez egy invertáló erősítő.

- (a neminvertáló pontra kapcsolódó R1, R2 ellenálláson áram nem folyik)

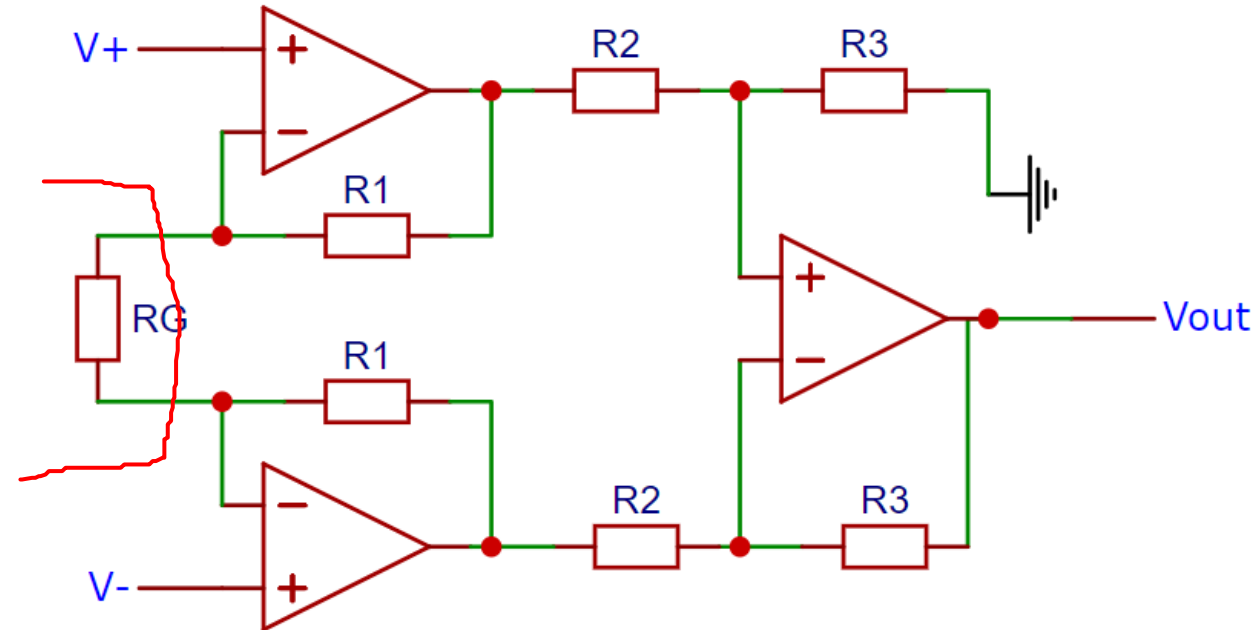
- $V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_2$

- A megoldás a két eset összegzésével:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$



# Mérőerősítő



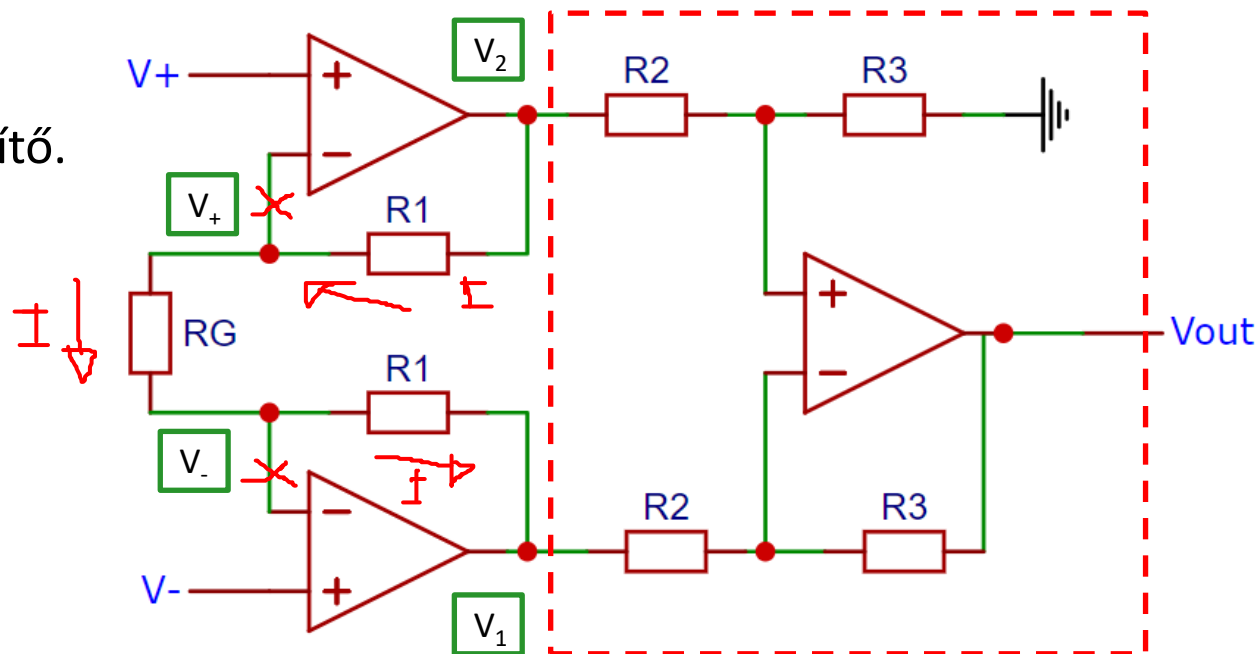
- Három műveleti erősítőt tartalmazó integrált áramkör.
  - Differenciálerősítő:  $V_{OUT} = \underline{A}(V_+ - V_-)$
  - Az erősítést a külső  $R_G$  ellenállás állítja be.
  - Az ellenállás értékeket pontosra állítják be. (trimmelik)
  - Emiatt (mivel ez egyedi művelet) nem olcsó.



## Mérőerősítő

- A bekeretezett rész egy kivonó erősítő.

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2} (V_2 - V_1)$$

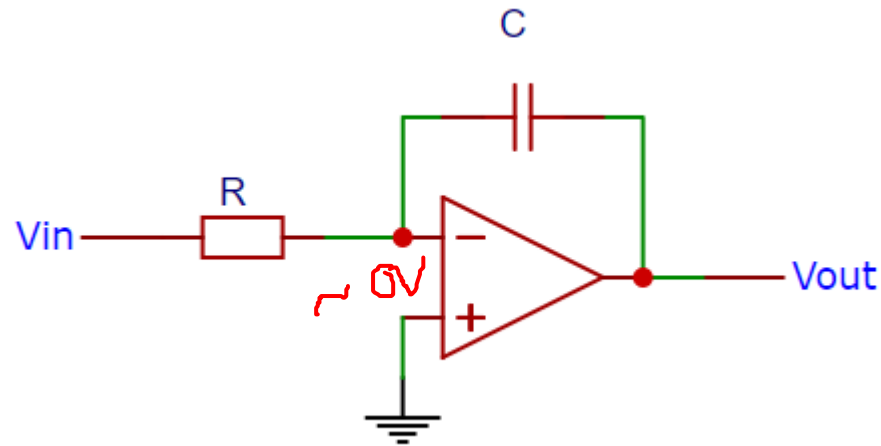


- A műveleti erősítőket ideálisnak feltételezzük, ekkor a bemenetük feszültsége megegyezik. Így az  $R_G$  ellenállás árama  $I = \frac{V_+ - V_-}{R_G}$ .
- Ez az áram keresztülfolyik mindkét  $R_1$  ellenálláson, így a kivonó erősítő bemenetére  $(V_2 - V_1) = I(2R_1 + R_G)$  kerül. Behelyettesítve:

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



# Integrátor



- Írjuk fel a Kirchhoff áramtörvényt az invertáló bemenetre:

$$\frac{V_{in}}{R} + C \frac{dV_{out}}{dt} = 0$$

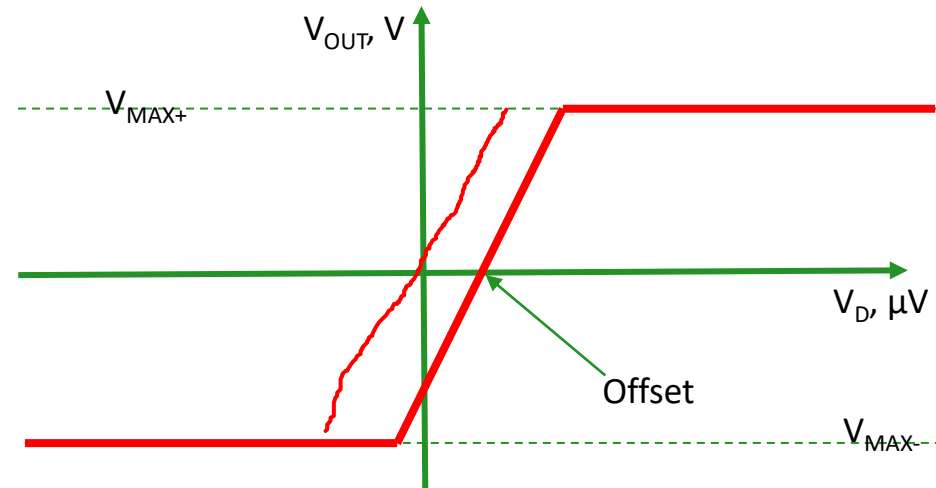
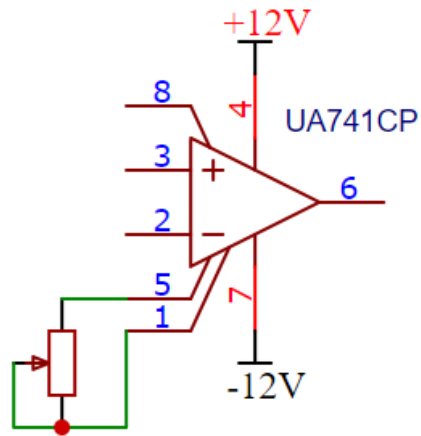
- Integrálva:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in}(\tau) d\tau + V_{out}(0)$$

- Praktikus alkalmazáskor egy kapcsolóval (MOS tranzisztorral) az integrálás megkezdése előtt rövidrezárható a kapacitás.



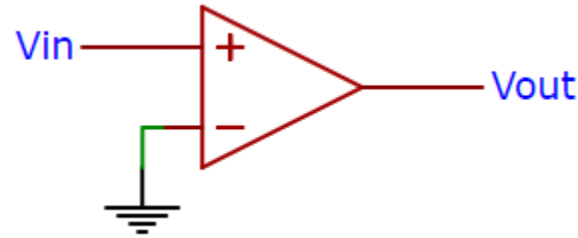
# Valós műveleti erősítő



- Tápfeszültséget igényel.
- A kimeneti feszültsége korlátozott
  - általában a tápfeszültségnél 1-2V-al kisebb, de van tápfeszültségekig kivezélhető változat is (rail-to-rail)
- A karakterisztika nem az origón megy keresztül.
  - A bemeneten valamekkora feszültségkülönbség kell, hogy a kimenet 0 legyen, ez az ún. (bemenetre redukált) **OFFSET FESZÜLTÉS**.
    - (oka: nem teljesen szimmetrikus az integrált áramkör – egy változtatható ellenállással csökkenthető ez a különbség – ez az offset kompenzáció!)



# A komparátor

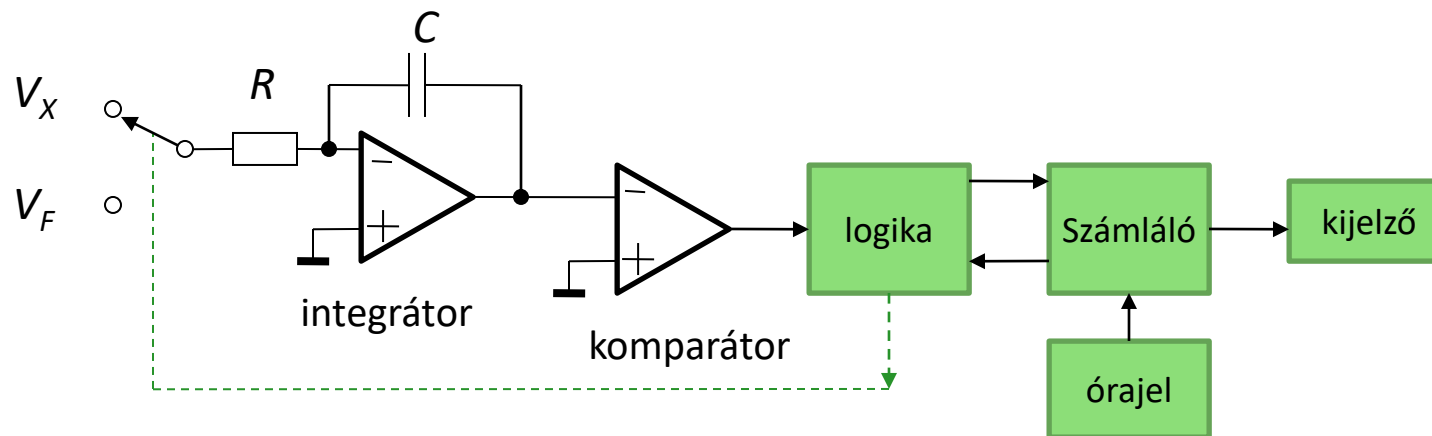


$$V_{out} = \begin{cases} +V_{MAX}, & \text{ha } V_{in} > 0 \\ -V_{MIN}, & \text{ha } V_{in} < 0 \end{cases}$$

- A műveleti erősítő karakterisztika alkalmas arra, hogy feszültségeket hasonlítsunk össze.
  - Mivel a differenciális feszültségerősítés nagy, a bemeneten kis feszültségkülönbség elegendő ahhoz, hogy az erősítő valamelyik szélső állapotba kerüljön. Azaz össze lehet hasonlítani egy adott feszültséget egy referencia feszültséggel.
  - Minden műveleti erősítő komparátor is egyben, de az erre fejlesztett integrált áramkörök jobbak.



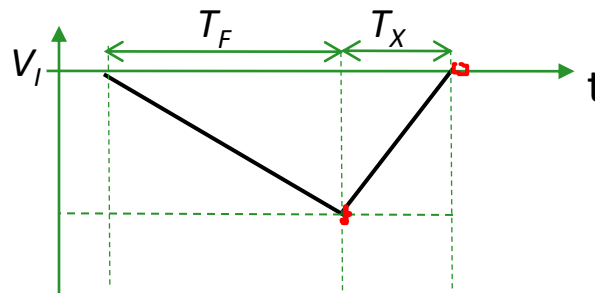
## Példa: voltmérő (az ún. dual – slope konverter)



- A mérés kezdete előtt az integrátor kapacitását rövidre zárják.
  - Ekkor teljesen 0-ról indul az integrálás
- Ezután adott  $T_F$  ideig (órajelig) integrálják az ismeretlen  $V_X$  feszültséget.
- A feszültség  $V_I(T_F) = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_F} V_X(t) dt$ 
  - (vegyük észre, hogyha az integrálási időt a zaj/zavar periódusidejének többszörösére állítjuk, az a zaj komponens kiesik. Pl. 50Hz esetén 20ms)



## Példa: voltmérő (az ún. dual – slope konverter)



- Ezután a mérendő feszültséget leválasztjuk, és egy negatív referencia (ismert) feszültséget kapcsolunk az integrátor bemenetre.
  - A komparátor akkor állítja le az integrálást, amikor a 0-t elértük.
  - Ebben az esetben, mivel:  $V_X T_F = |V_{REF}| T_X$
  - $V_X = |V_{REF}| \cdot T_X / T_F$

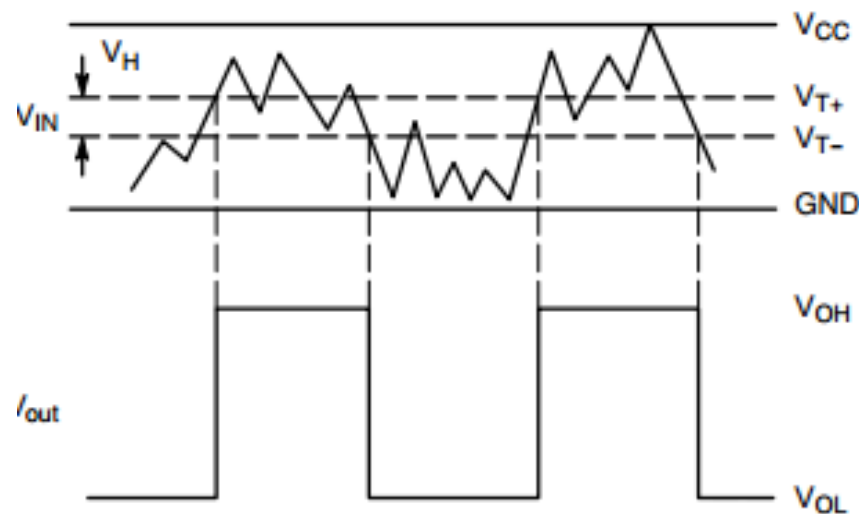
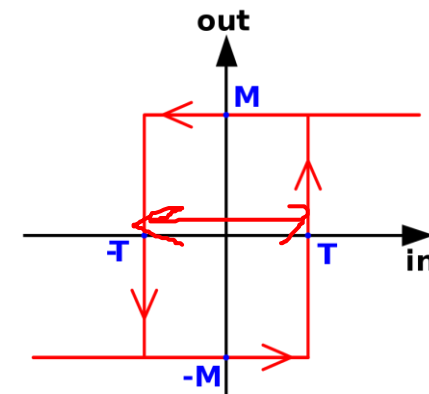
Azaz a feszültségmérést időmérésre vezettük vissza





## A hiszterézis

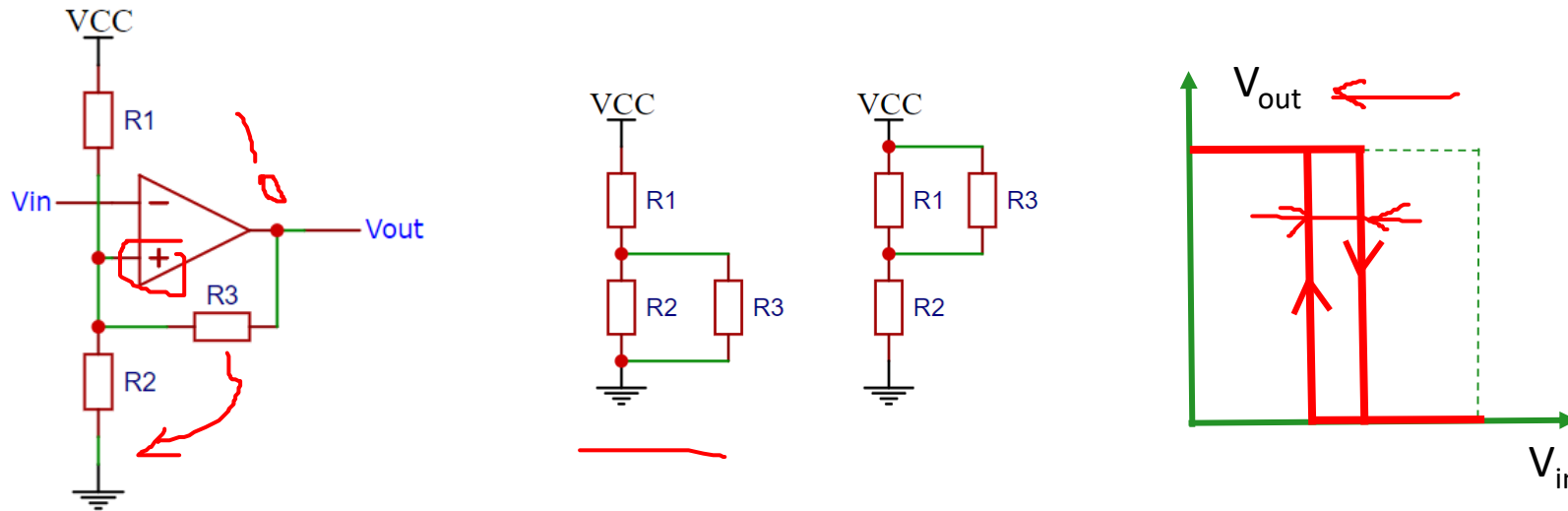
- A komparátor komparálási feszültsége függ a komparátor kimenetétől.
  - Attól függően, hogy melyik „irányban” haladunk, változik a komparálási feszültség.
  - Ez önmagában nagyon hasznos. Digitális rendszerek esetén zajszűrésre alkalmas.
    - A komparálási feszültség környékén történő működés zajként jelentkezne.
  - Pl. a fűtésrendszer esetén szintén hiszterézist alkalmaznak. Ha pl.  $21^{\circ}\text{C}$  a célhőmérséklet, akkor  $22^{\circ}\text{C}$ -nál kapcsolnak ki,  $20^{\circ}\text{C}$ -nál kapcsolnak be.



(b) A Schmitt-Trigger Offers Maximum Noise Immunity



## A hiszterézises komparátor (Schmitt-trigger)



- Tételezzünk fel egy tápfeszültséges, rail-to-rail működést.
  - Ha  $V_{in} > V_{REF}$  a kimenet 0V, ha  $V_{in} < V_{REF}$  a kimenet tápfeszültség.
- A komparálási szint attól függ, mi volt a kimenet.
  - Ha a kimenet 0V volt, akkor az  $R1, R2 \times R3$ , ellenálláson osztott feszültség
  - Ha a kimenet tápfeszültség volt, akkor az  $R1 \times R3, R2$  ellenállás által osztott tápfeszültség.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# Oscillátorok



# Oscillátorok

## ■ Oscillátor

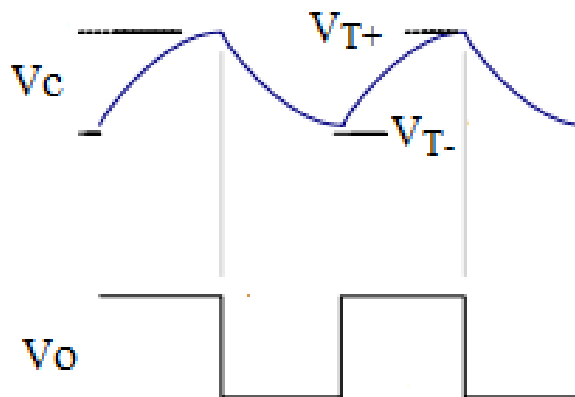
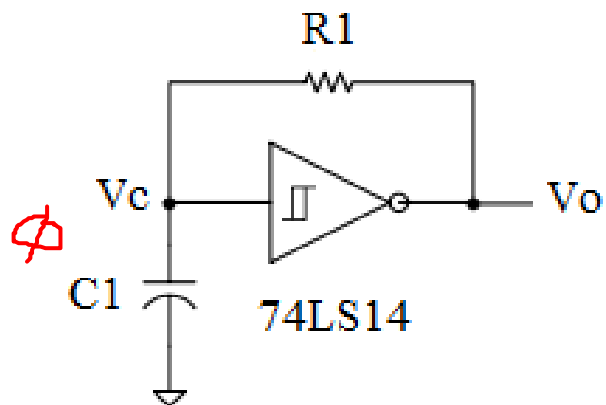
- Nincs stabil állapota, periodikus jelet állít elő.

## ■ RC oszcillátor

- A rezgési frekvenciát ellenállások és kapacitások határozzák meg.
- Integrált áramkörön belül nem lesz pontos, bár sokat javít a pontosságon a kalibráció. (gyártáskor vagy akár rendszer működése közben)
- A pontosság nagyjából: 0,01%-1% (ez nem túl jó – és ráadásul nagyon hőmérsékletfüggő)
- Gyors indulás
- (addig nem szabad a rendszert elindítani, amíg az oszcillátor nem működik megfelelőképpen, hiszen nincs órajel...)
- Belső RC-ről indítunk, ha van, megvárjuk, amíg a pontosabb pl. kristályoszcillátor stabil nem lesz, majd átkapcsolunk.



## Egy egyszerű RC oszcillátor



- Schmitt triggerrel (histerézises komparátorral) felépített kapcsolás.
  - Feltételezzük, hogy kezdetben C1 feszültsége 0V
  - Ekkor az inverter kimenete tápfeszültség, ami az R1 ellenálláson keresztül tölti a kapacitást.
  - Ha C1 feszültsége a felső komparálási szintet meghaladja, az inverter átkapcsol, innentől kezdve C1 kapacitás R1 ellenálláson kisül.
  - Egészen az alsó komparálási szintig, amikor a kimenet újra logikai 1 lesz.



## Rezonátorok (kristályoszillátorok)

- Kristály (kvarc) vagy kerámiarezonátor
- Piezoelektromos tulajdonságú
  - Mechanikai deformációra (nyomás, hajlítás, nyírás) töltések jelennek meg, illetve elektromos erőterben deformálódik.
  - Ha váltakozó erőterbe helyezünk, rezgésbe jön, ami maximális amplitúdójú a mechanikai rendszer sajátfrekvenciája esetén.
  - Ez utóbbi miatt alkalmas pontos frekvencia előállítására.
- A frekvencia a mechanikai méretekkel állítható, általában
  - $\pm 10..100$  ppm (parts per million)
  - pl. 4MHz-es kristály 10ppm esetén 3 999 960 – 4 000 040Hz közötti frekvenciájú.
  - A hőmérsékletfüggés kicsi, 1..10ppm /°C
  - (néha ez sem megengedhető, ezért a kristályt fűtéssel állandó hőfokon tartják – OCXO)

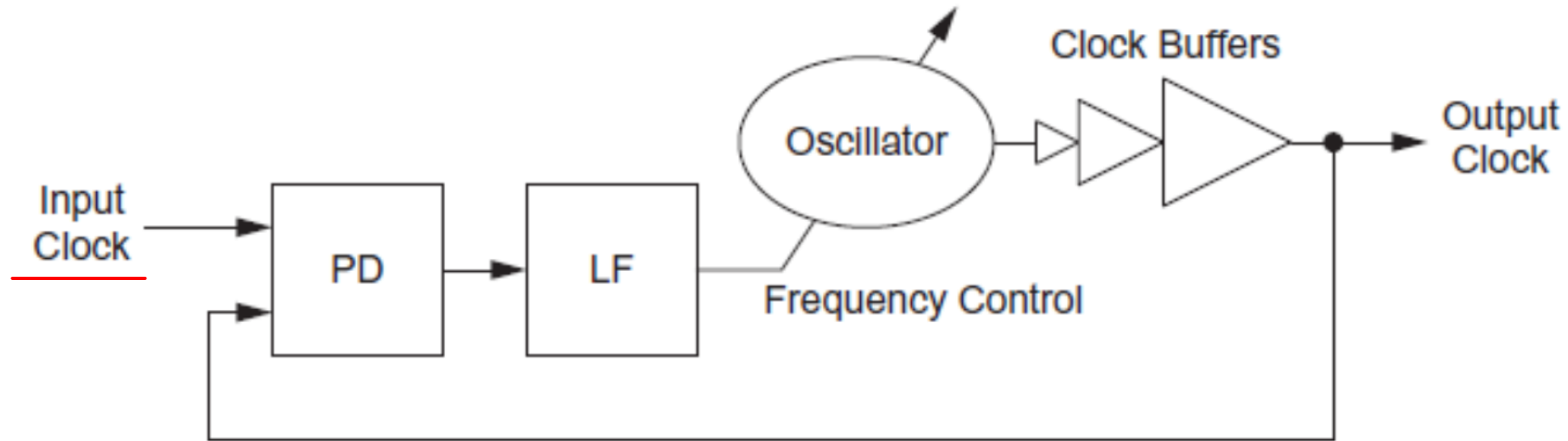


## Szokásos kristályfrekvenciák

- Nagyon sok fajta van, a leglényegesebbek:
  - 32,768kHz – az összes RTC (real time clock) áramkör frekvenciája
  - 8MHz, 10MHz, 20MHz, 25MHz – általános célokra
  - 12MHz – USB, CAN
  - 27MHz – PAL, NTSC televíziótechnika...
  - Stb.
- Valójában egy adott frekvenciájú pontos forrás elegendő
  - A kevésbé pontos oszcillátorokat hozzá tudjuk igazítani
  - Racionális számszorosát elő tudjuk állítani.
  - Erre szolgálnak az ún. PLL-ek.



## A fáziszárt hurok (PLL)

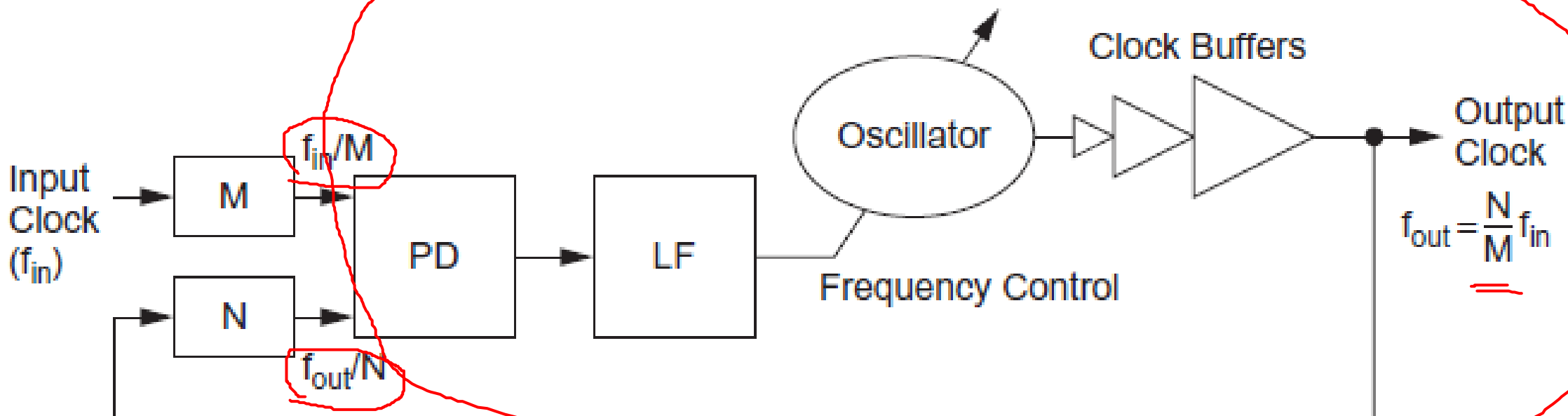


- Egy szabályozókör, ami a bemenetével megegyező frekvenciájú jelet állít elő.
- Alapelemei:
  - Fázisdetektor és aluláteresztő szűrő: a frekvenciaeltéréssel arányos vezérlő feszültséget állít elő.
  - Feszültségvezérelt oszcillátor – egy egyenfeszültséggel változtatható a frekvencia.





## PLL – frekvencia szintézis



- Azaz az alapfrekvencia tetszőleges számszorosa előállítható.
  - Így működnek a szorzók
  - Így állítják elő a vezetékes vagy vezeték nélküli kommunikációhoz szükséges pontos csatorna frekvenciákat.



## Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [Analog Engineer's Circuit: Op Amps](#)
- [Differenciál erősítő](#)
- [Integrátor](#)
- [Schmitt trigger](#)