

## Analóg és digitális mérések

Pl. időmérés:

analóg mérés: homokóra, rövid időtartam

digitális:

pontos időalap (pl. inga) + periódusok leszámlálása (fogaskerék!) :  
hosszú időtartamokat is pontosan lehet mérni a

## Analog és digitális mérések összehasonlítása

Analog mérések: nem egészen analog folyamatok (súrlódás, nemlinearitások)

pl. mutatós műszer:  $+1 e^-/s$  valószínűleg nem mozdítja meg a mutatót!

Digitális mérés: mérési kvantum a felbontás határa

Pl. a hétköznapi méréseknél az áram folytonosnak tekintjük.

(Léteznek-e valódi analog jelek - kvantált-e a világ vagy sem?)

## Digitális mérőátalakító

Bemeneti jelből digitális jel

Legegyszerűbb átalakító: kapcsoló

Komparátor:

bemeneti feszültség kisebb vagy nagyobb egy adott feszültségnél

## Mechanikai pozíciómérés

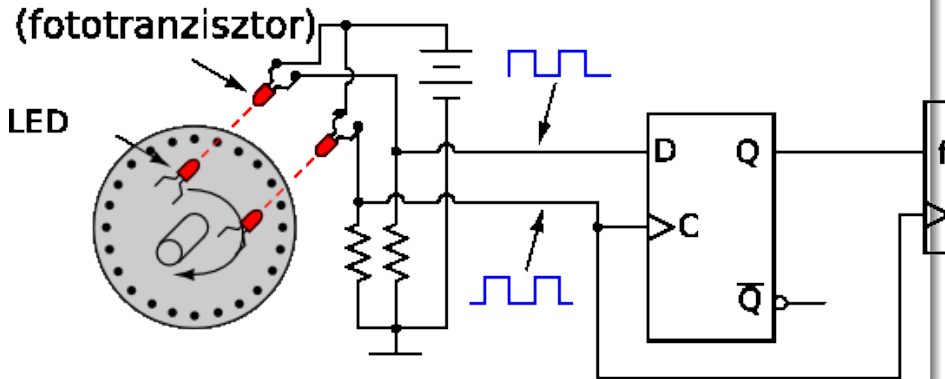
kódtárcsás mérőátalakító

elforgó tárcsa fogazata két fénysugár útját szakítja meg:

intenzitásának változás - diszkriminátor - digitális kimenőjel

**fényérzékelő**

**(fototranzisztor)**



## Az impulzusok megszámlálása:

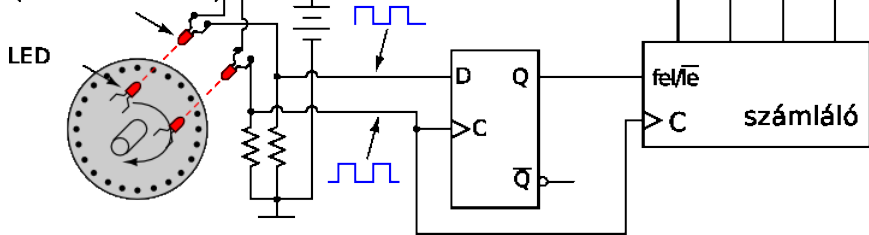
az elfordulás mérése digitálisan

egyik érzékelő kimenete az órajel bemeneten

De: ellenkező irányú mozgás is ugyanolyan jelet ad!

**fényérzékelő**

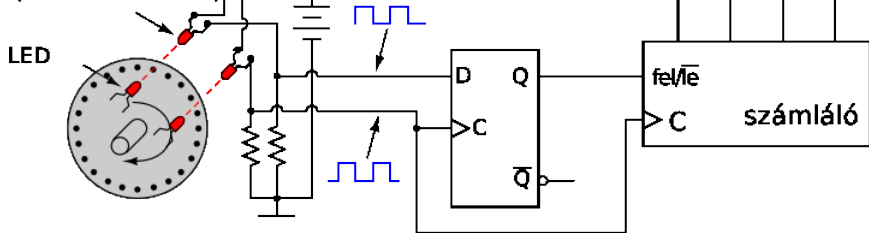
(fototranzisztor)



## Érzékelők mechanikai elrendezése:

fényérzékelő

(fototranzisztor)



## Fázis detektálása:

forgásirány: a két érzékelő 90 fokos fázisban

Fázisdetektor: pl. egy D típusú flip-flop

Óramutató járásának megfelelően forgás:

$D$  megelőzi a  $C$ -t,  $D = 1$ , ha  $C$  felfut  $\rightarrow Q = 1$ .

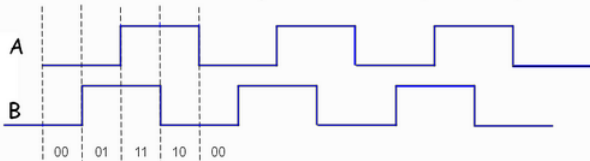
Fordítva:  $D = 0$ , amikor a  $C$  felfut,  $Q = 0$ .

$Q$  kimenet: számláló fel/le bemenete!

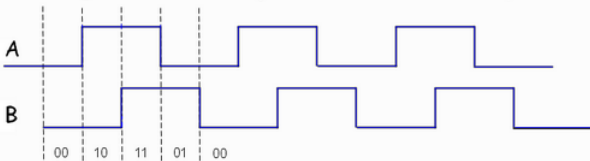
## Forgatógomb:



Forgatás óramutató járásával megegyező irányba



Forgatás óramutató járásával ellentétes irányba



„Kiegyenesített” tárcsa: kódszalag, pl. inkjet nyomtatóknál.

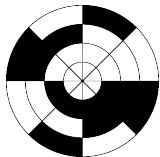
Relatív mérés: az abszolút pozíció hibája!

Megoldás pl.: törlés/reset induláskor, szalag végén.

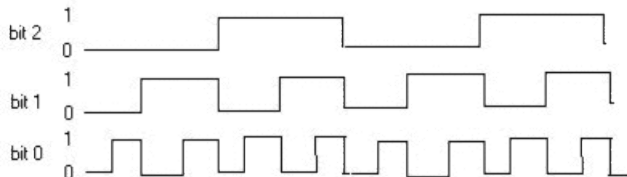
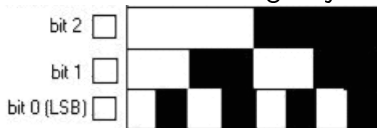


## Abszolút pozíciómérés:

bináris kódolású kódtárcsa. Pl. 1/8 fordulat 3 érzékelő:



A bináris kódolás működési diagramja:



A kódtárca kimenete nem robosztus!

Pl. kimeneten 000 + visszafele forog a tárcsa  
Következő 111 lesz.

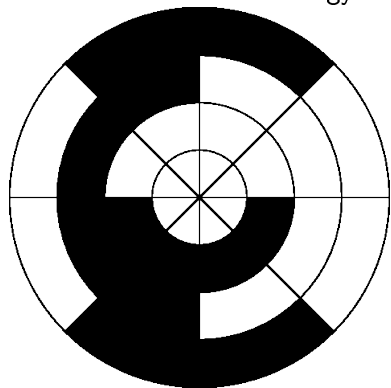
Mechanikai pontatlanságok: nem biztos, hogy az átmenet időben egyszerre történik !

pl. 111-011-010-000 sorrend is lehet (hasonló aszinkron számláló problémájához!)

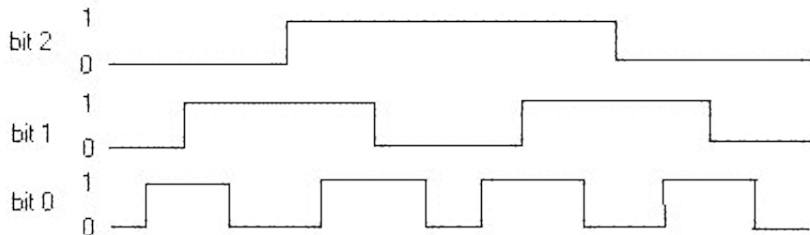
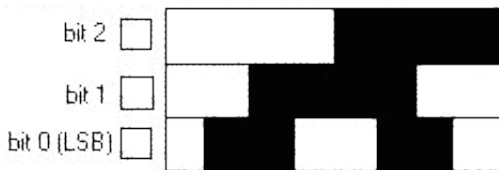
Bizonyos pozíciókban (szektorok határán) rossz érték!

## Gray kódolású kódtárcsa

A szektorhatárokon csak egy bit változzon: ez az ún. Gray-kód.



## Gray kódolás működése:



## Gray kód:

egymás utáni értékek csak egyetlen bitben különböznek!

Szomszédos szektor határán csak vagy az egyik, vagy a másik értéket jelenik meg

A kódoló kimenetét át kell alakítani bináris skálára!

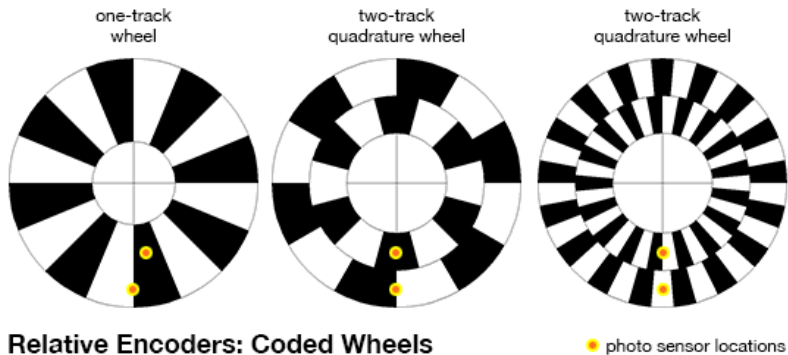
## Felhasználás:

Mechanikus forgásérzékelők (pl. mechanikus egér, robotok, körbeforgatható szabályozógombok)

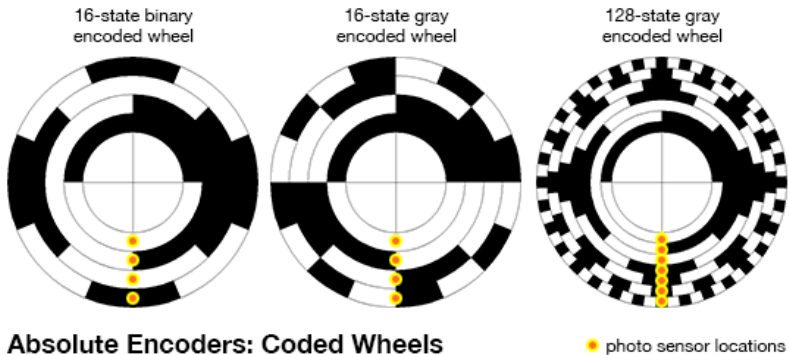
Maximum kb. 14 bites Gray kódoló (16384 állapot,  $\approx 0.022$  fok/lépés)

Tárcsa „kiegyenesítése”: kódszalag, pl. egy robot távolságérzékelése.

## Érzékelők mechanikai elrendezése:



## Érzékelők mechanikai elrendezése:



## Digitális és analóg jelek átalakítása

Digitális külső érzékelők:

szint illesztése a számítógéphez (pl. kapcsolók, relék és kódtárcsák).

Mérések:

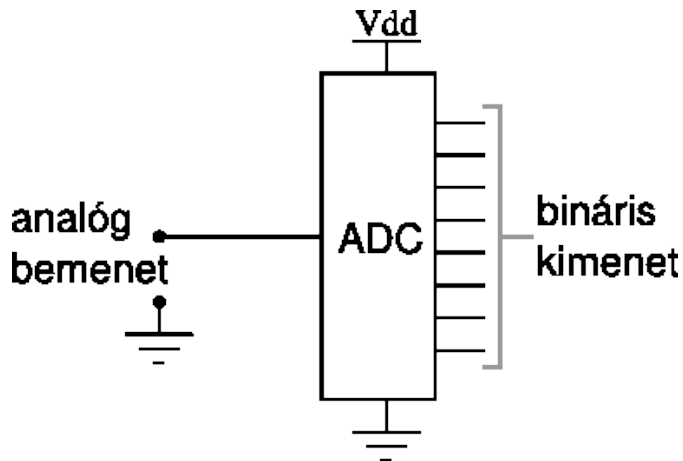
általában analóg jel, amit folytonosnak tekintünk (de: diszkrét elektronok - pl. a csillagászati CCD-k képalkotása).

Vezérlés és mérés:

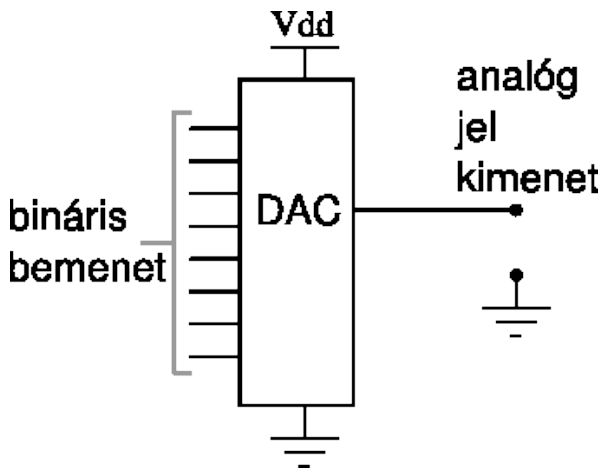
két irány: digitális-analóg és analóg-digitális átalakító



## Analóg-digitális átalakító (Analog Digital Converter, ADC)



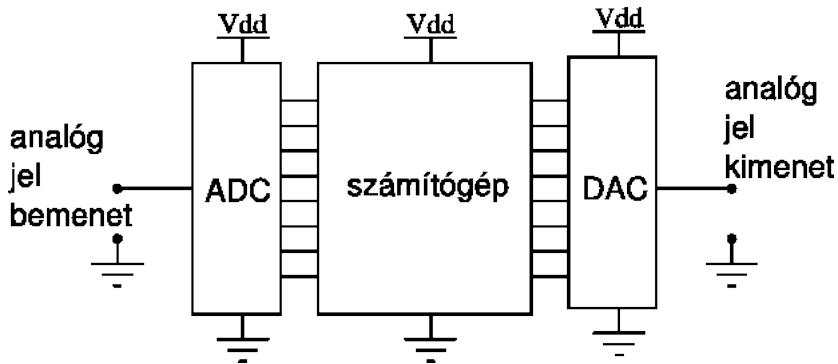
## Digitális-analóg átalakító (Digital Analog Converter, DAC)



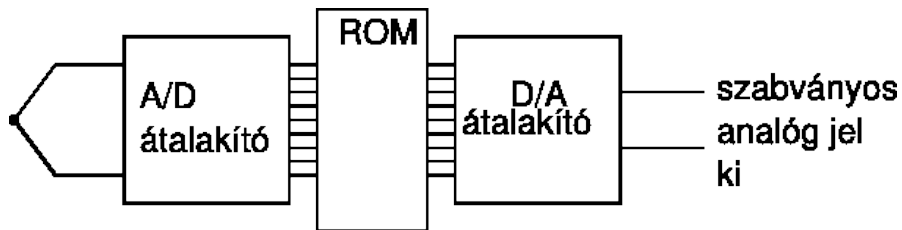
Általános digitális szűrő / általános mérő-vezérlőeszköz:

a szűrési ill. vezérlési feladatokat program végzi:

### Digitális szűrés és vezérlés



PI. hőelem linearizálása:



Hőelem: termoelektromos feszültség, magas hőmérsékletig használható, a hőmérséklet-feszültség függvény nemlineáris.

Linearizálás: ADC átalakítóval digitalizálás + memória a lineáris értékekkel (jel a címvezetéken) + memória kimenetén DAC

Szabványosítható az érzékelő!

## PC hangkártya:

Általában 2 ADC és 2 DAC (sztereó működés)

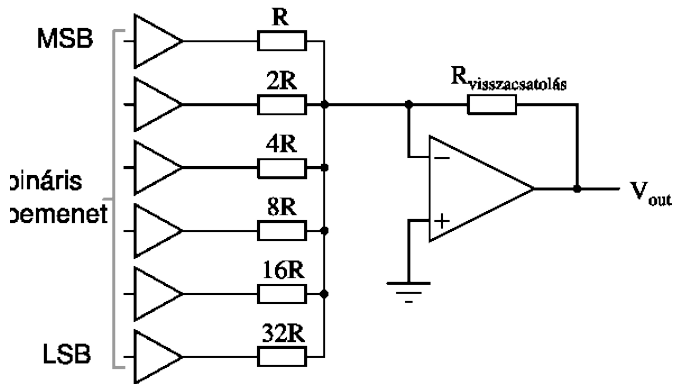
általában az ADC és DAC egyidőben is működhet

hangfrekvenciás (kb. 20Hz-48kHz közötti) jelek, egyenfeszültségű jellel nem tud dolgozni.

$R/2^n R$  digitális-analog konverter:

műveleti erősítő összegző áramkör.

Pl. 6 bites DAC:

*6 bites bináris súlyozású ADC*

(LSB: Least Significant Bit, legkisebb helyiérték, MSB: Most Significant Bit, legnagyobb helyiérték):

$R/2^n R$  digitális-analog konverter:

$R_i$  ellenállások: nagyságuk az egyes bitek helyiértékével arányos

A biteknek megfelelő  $I_i$  áramok súlyozódnak

Műveleti erősítő bemenete: virtuális földpont

Kimenet:

$$U = -R_{feedback} \sum_i I_i$$

Kimeneti tartomány:

$R_{feedback}$  határozza meg.

Pl. 0001000 bemenet: -4 V

Fele akkora  $R_{feedback}$  ellenállás: kimeneti feszültség is felére csökken

$R/2^nR$  digitális-analog konverter:

DAC felbontásának növelése:  
további bináris bemenetek hozzáadásával

$V_i$  bit bemenő feszültség:

- digitális kapuk kimenetei
- értékük közel 0 vagy az  $U_T$
- a kapuk kimenő feszültségének a DAC felbontásán belül meg kell egyeznie, máskülönben az átalakítás nem pontos.

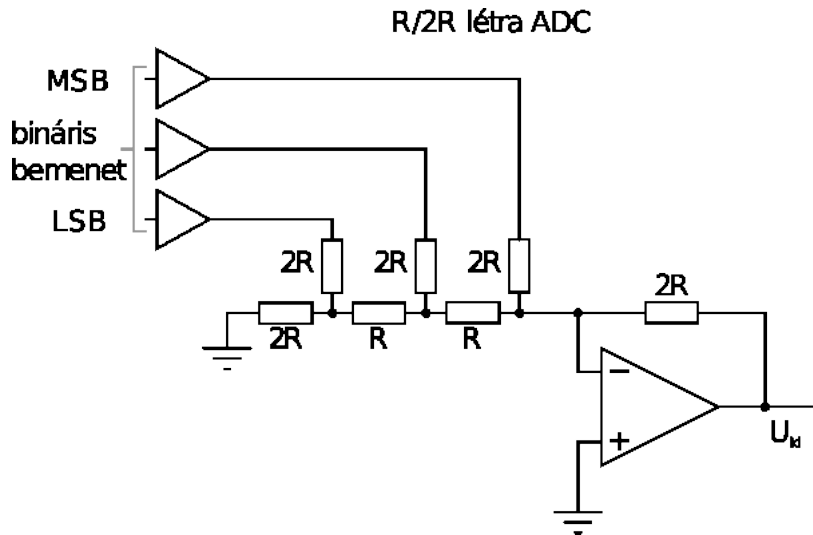
Magas bitszám:

$R/2^nR$  különleges és pontos ellenállásokat igényel, ezért drága



## R-2R létra

csak kétfajta ellenállás:



Műveleti erősítő bemenete:  
virtuális földpont , a létraáramkör összegezése

Bitszám növelése: létraáramkör bővítése

Limitáló tényező a digitális kapuk kimenetének pontossága!

## Analog-digitál konverterek

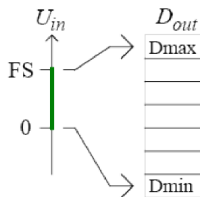
Az AD konverter: bemenet általában csak pozitív (vagy csak negatív)

Méréshatár (Full Scale, FS): a referencia-feszültségtől függ.

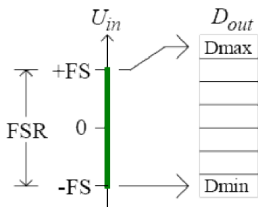
AD átalakítók általában lineáris karakterisztikájúak: kvantálási konstans.

### Bipoláris pozitív-negatív AD:

általában valamilyen szinteltolás a bemeneten.



a) unipoláris bemenet



b) bipoláris bemenet

A mérhető jeltartomány közrefogja a nulla értéket, általában szimmetrikus (FSR = Full Scale Range).

## AD bemenet:

általában ún. nagyszintű analóg jelek (az átalakító elektronika relatív hibája nagyobb jelszinteknél kisebb).

Szokásos jeltartományok pl.:

$-10V \dots +10V$ ,  $0 \dots +10V$ ,  $-5V \dots +5V$ ,  $0 \dots +5V$ ,  $-1V \dots +1V$ .

Kicsi (pl. mV) mérendő jeleknél külön erősítő a bemeneten (kicsi offset, kicsi zaj) .

## ADC kimenet:

digitális adatok párhuzamos és/vagy soros formában

## Párhuzamos kimenet:

egyszerűbb illesztés a digitális rendszerekhez

## Soros kimenet:

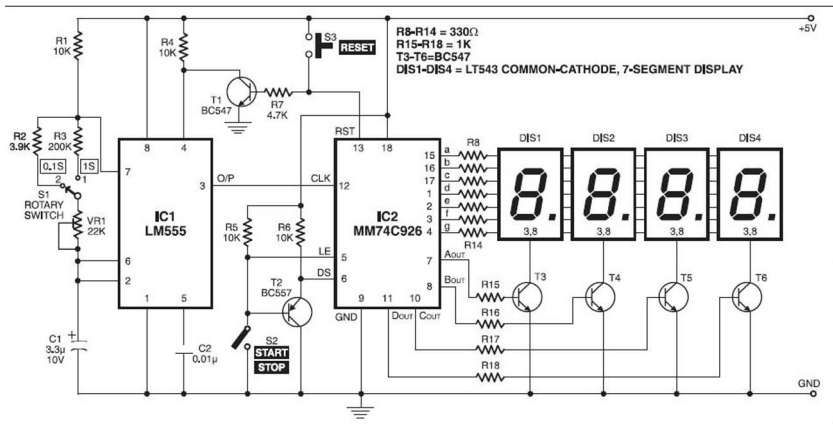
kisebb kivezetés-számú tokozás, mikrovezérlőkhöz könnyebben illeszthető, egyszerű galvanikus elválasztás (pl. orvosi műszerek)

## Digitális műszerek, voltmérők:

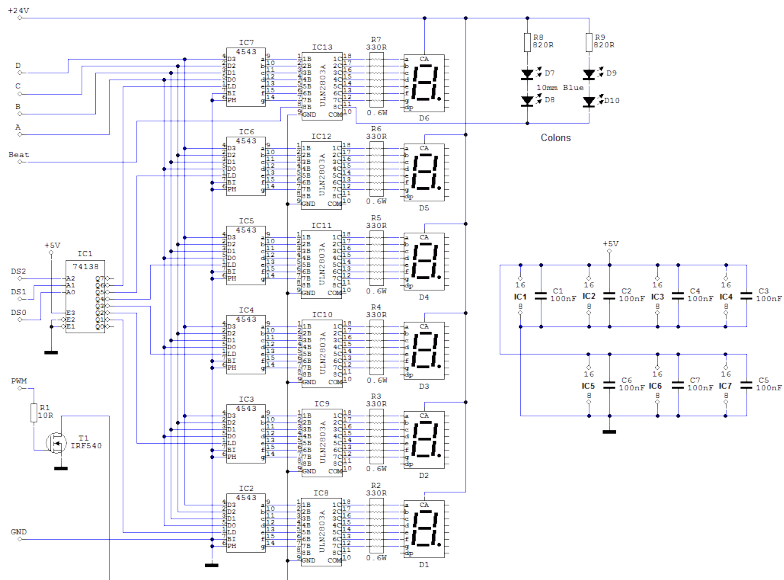
AD átalakítók kimenete decimális kódolású

Számjegyenként soros kimenet: multiplexelt LED vagy LCD kijelző

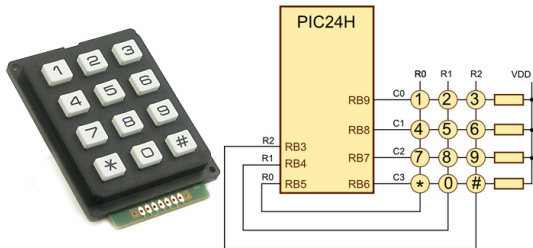
## Nincs multiplexing



# Multiplexing



## Multiplexelt billentyűzet:





## ADC felbontóképessége:

analog jelváltozás, ahol a kimenet vált  
a változás megkülönböztethető a digitális kimeneten

$n$  bites bináris kódolás felbontóképessége: maximálisan  $q = FSR/2^n$   
kvantum

Pl. 8, 10, 12, 16 bites ADC:

8 bites ADC  $2^8 = 256$ ,

14 bites ADC  $2^{14} = 16384$  szintet különböztet meg

## Változatos technikai adatok:

Konverzió időtartama:

függ a felbontástól, általában  $1 \mu\text{s}$  -  $1 \text{ sec}$

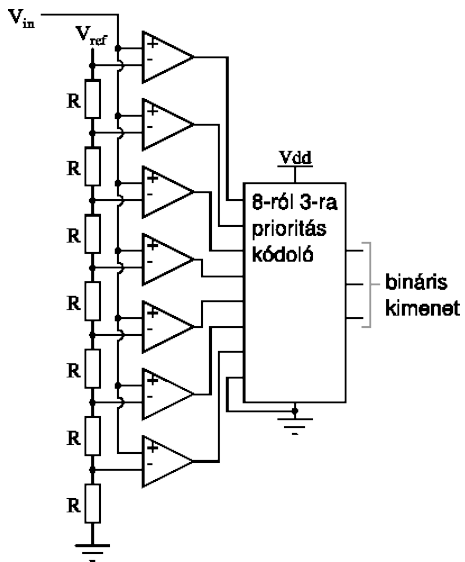
Extrém gyors flash konverterek (néhány nsec környéke): drágák

Kisebb pontosságú, lassabban chipek egészen olcsók (pl. digitális multimétereket, digitális lázmérők)

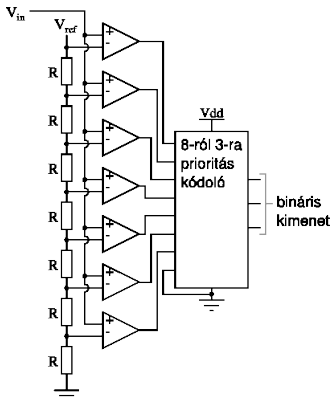
## Flash (párhuzamos ) AD konverter

- legegyszerűbb
- leggyorsabb
- legdrágább (legtöbb alkatrészt igénylő)

## 3 bites párhuzamos ADC:



## 3 bites párhuzamos ADC:

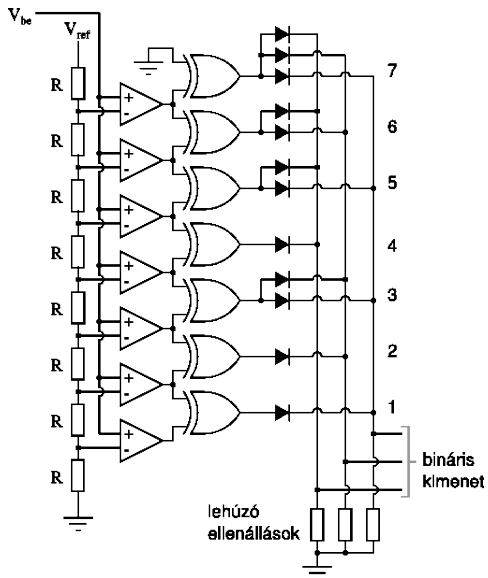


Bemenő jel a komparátorokon

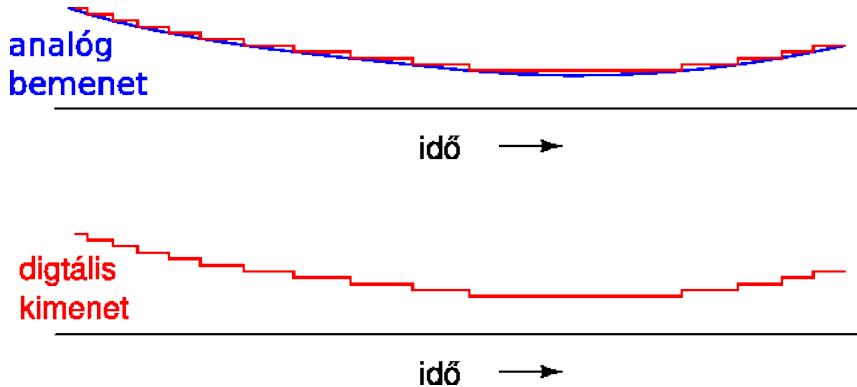
Ellenálláslánc  $V_{ref}$  referenciafeszültség

Komparátorok kimenete: kódoló áramkör

## 3 bites párhuzamos ADC kódoló áramkör:



3 bites párhuzamos ADC működés:



### 3 bites párhuzamos ADC működés:

Átalakítás egy órajel alatt (nincs is szükség órajelre)

Sebesség: csak a komparátorok és a kódoló áramkör késleltése számít, nagyon nagy ( $\approx 300$  megaminta/s) is lehet

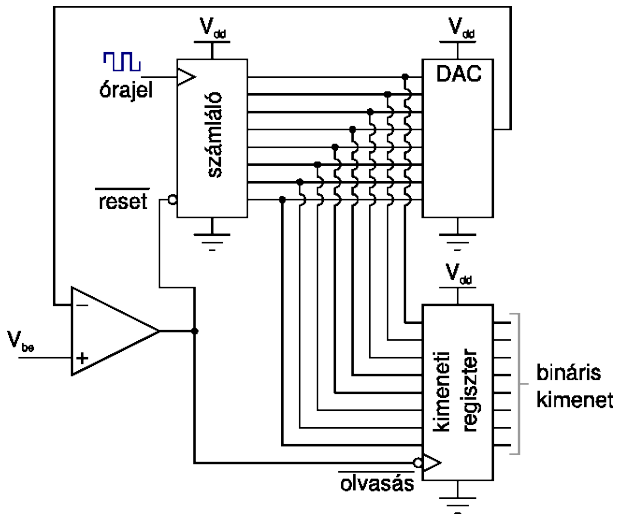
Pl.: videojelek digitalizálása, tárolós digitális oszcilloszkópok

Digitalizálási szintek:

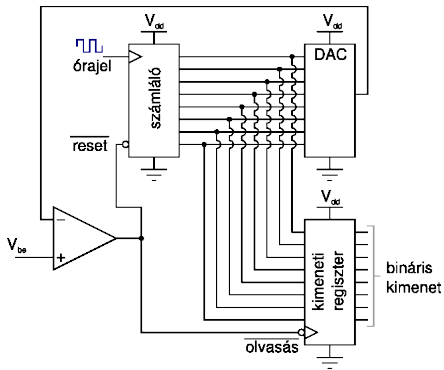
csak az ellenálláslánctól függenek, lehet nem-lineáris skálát is használni!



## Számláló AD konverter



Számláló kimenete: DA konverter ( $U_{ref}$ )



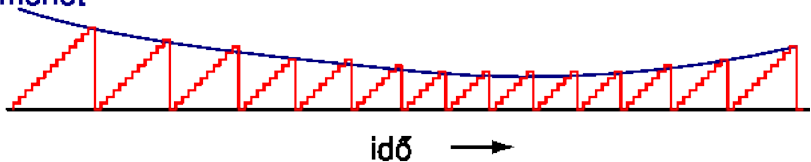
## Komparátor áramkör:

$V_{in}$  bemenő jel + DA kimenet összehasonlítása  
Ha a DAC kimenő feszültsége eléri a  $V_{in}$ -t:

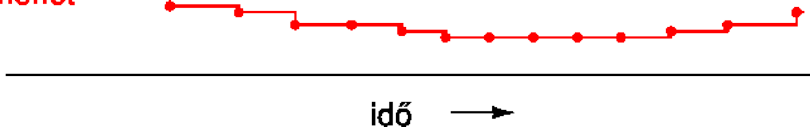
- komparátor átbillen,
- beírja a számláló értékét a kimeneti (pl. D) regiszterbe
- nullázza a számlálót.

Impulzus száma: arányos a mérendő értékkel

analóg  
bemenet

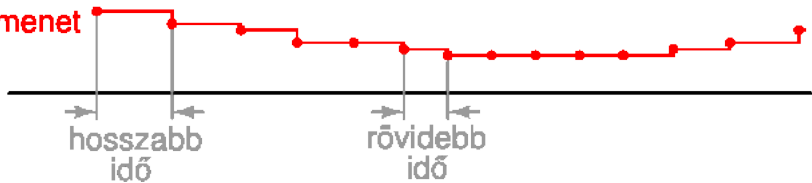


digitális  
kimenet



A mérési idő függ a mérendő feszültségtől!

digitális  
kimenet



## Szukcesszív approximációs ADC

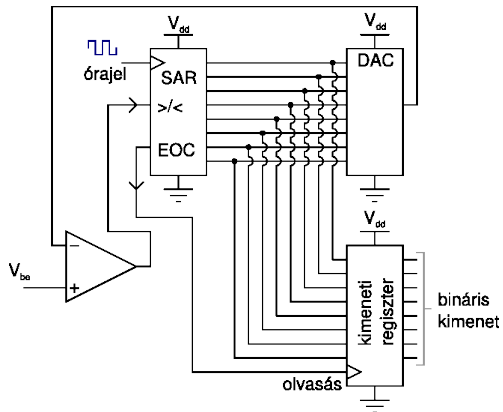
Javítja a számláló AD eljárását:

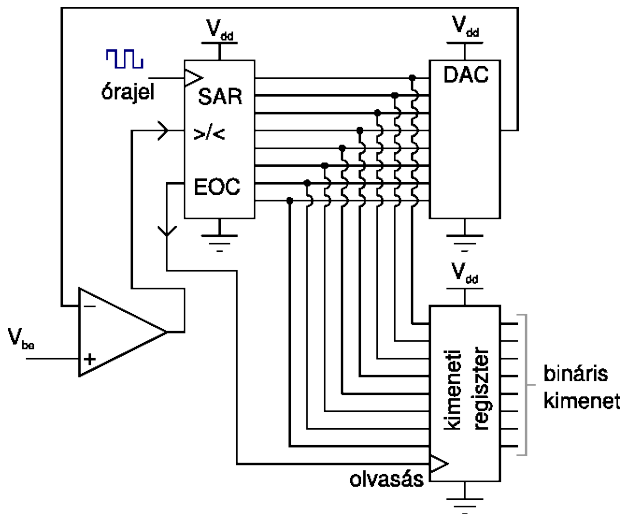
gyors mérési (átalakítási) idő

a mérendő feszültségtől független a mérési idő

Egyszerű felépítés, pontosság és sebesség:

az egyik legelterjedtebb AD átalakító.





Nem lineárisan növekvő komparáló feszültség!  
 $n$  bit esetén  $2^n$  részre osztott méréstartomány

## Szukcesszív approximációs ADC működés:

- Az átalakítást a SAR törlésével indul, a konverzió végét az EOC, End Of Conversion jelzi.
- Lépésenként felezi az éppen vizsgált tartományt: optimális stratégiával barkochbázó automata.
- SAR (szukcesszív approximációs regiszter) az MSB-től (legnagyobb helyiértékű bittől) indul

első lépés:

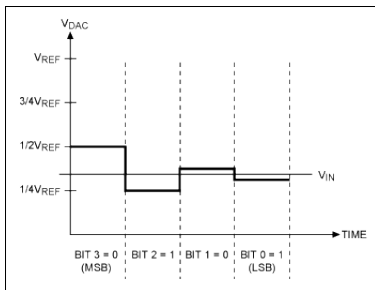
- mérendő mennyiség kisebb, vagy nagyobb-e, mint a mérési tartomány fele?
- bit beállítása:
  - ha a minta nagyobb, mint az analóg jel, a SAR a bit 0,
  - ha a minta kisebb az analóg jelnél, akkor a bit 1.

Nincs számlálás!

## Szukcesszív approximációs ADC működés:

További csökkenő helyértékű biteknél megismétlődik az eljárás:

- a bit felezi a vizsgált tartományt,
- a komparátor megvizsgálja, hogy a mérendő mennyiség kisebb, vagy nagyobb-e, mint aktuális mérési tartomány fele:
- a SAR bit értéke ennek megfelelően áll be.



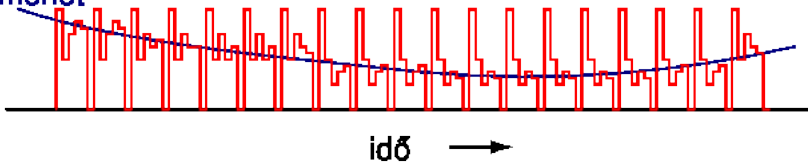
Mérési idő: SAR regiszter bitszámától (mérési pontosságtól) függ.



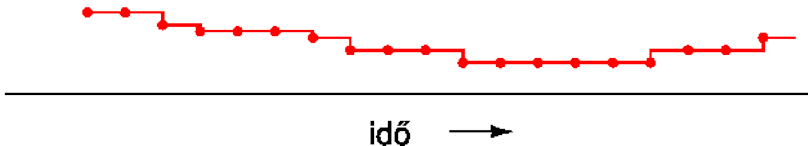
Pl. 8 bit:

8 ciklus kell a teljes méréshez

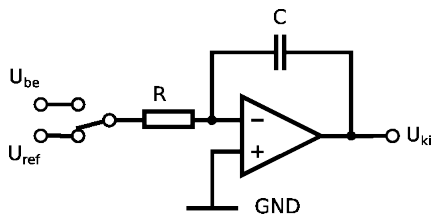
analóg  
bemenet



digitális  
kimenet



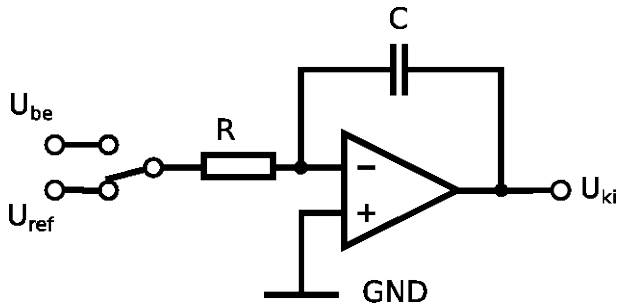
## Kettős meredekségű / kétszeresen integráló / Dual slope AD átalakító



- egyszerű felépítésű
- robusztus ADC
- akár nagy pontosságú (11-12 bites) átalakítás is!
- mérsékelt sebesség

Felhasználás pl. mérőműszerekben

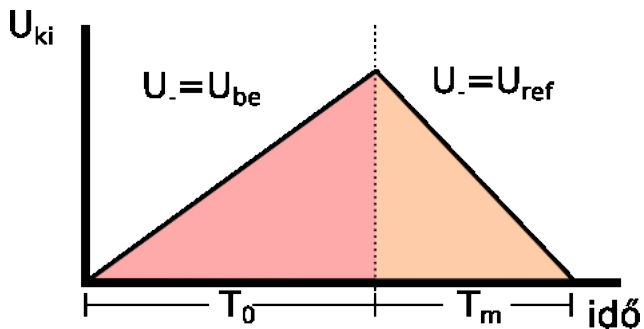
## Dual Slope AD átalakító működés:



Mérendő  $U_{be}$ : integráló áramkör bemenetén megadott  $T_0$  idő után (precíziós, fix frekvenciájú (pl. kvarc) oszcillátor impulzusainak számlálása): az integrátor bemenetére negatív  $U_{ref}$  feszültség, az integrátort kisütik.

## Dual Slope AD átalakító működés:

$T_m$  kisülési idő (kimenet eléri a 0-t): számlálóval mérik



## Dual Slope AD átalakító működés:

Integrátoron az össztöltés 0:

$$T_0 U_{be} / R = -T_m U_{ref} / R$$

$$T_m = -U_{be} T_0 / U_{ref}$$

a  $T_m$  idő ( $\approx$ impulzusok száma) arányos az  $U_{be}$  bemenő jellel.

Mérés pontossága nagy,

ha az oszcillátor frekvenciája nem változik egy konverzió alatt

Konvertálási idő: függ a mérendő feszültségtől

A bemenő jel változásra kevésbé érzékeny, mint a szukcesszív approximációs konverter!

## Gyorsan változó jelek:

- magas AD átalakítási frekvencia (conversion rate,  $f_{cr}$ )
- általában magas jel mintavételi frekvencia ( $f_m$ )
- rövid a mintavételi periódusidő ( $T_m$ )

## Mintavétel/konverzió:

Általában: mintavétel gyorsabb, mint a konverzió.

(Nagysebességű, pipe-line párhuzamos (flash) átalakít (pl. digitális oszcilloszkóp) mintavételi idő rövidebb is lehet a konverziós időnél!)

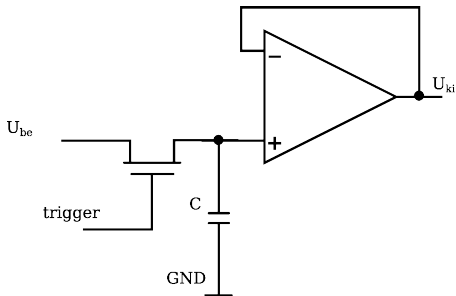
## Pl. szukcesszív approximációs ADC:

nagyon érzékeny a bemenet változására a konverzió alatt

konverzió legalább néhány órajel, ki kell egészíteni:

- mintavevő áramkör  
a bemenő jelből nagyon rövid idő alatt mintát vesz  
általában diódás vagy tranzisztoros (FET) analóg kapcsolóáramkör
- jelnyújtó áramkör  
az értéket tárolja, megnyújtja  
általában valamilyen kondenzátor tárolja a feszültséget

## Mintavevő és jelnyújtó (Sample and Hold) áramkör:



FET kapcsolása a trigger bemeneten

Nyitott állapot:  $U_{be}$ -re tölti  $C$ -t

Jel nyújtása: nagyon nagy bemenő ellenállású, feszültségkövetőként használt műveleti erősítő

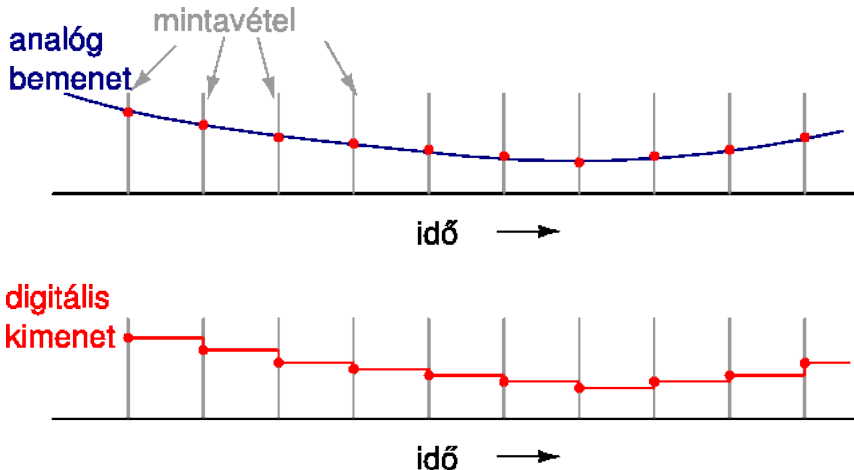
Mintavételezési idő: FET ellenállása + a kapacitás  $RC$  időállandója!



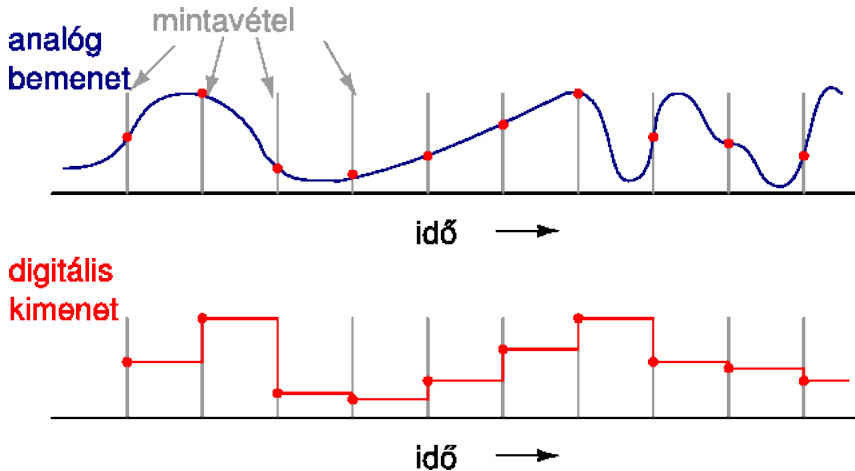
## ADC szakaszos működés:

a bemenő jel nem változhat a  $T_m$  mintavételi időnél gyorsabban.

Lassú jeleknél:



Gyorsan változó jelek esetén torzul a mérés:



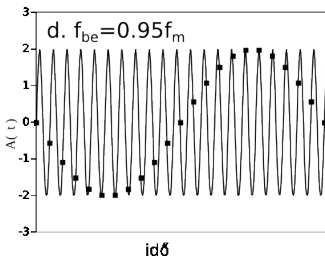
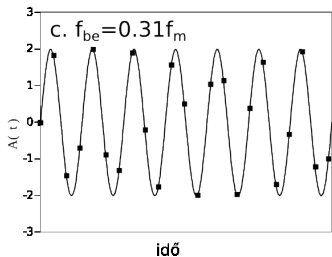
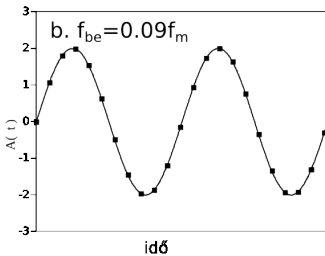
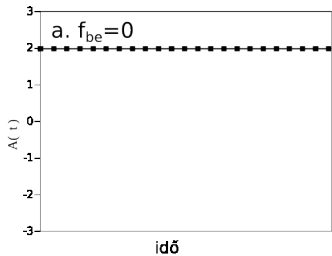
## Mintavételi törvény:

a bemeneten a jel legmagasabb frekvenciájú összetevőjéből is periódusonként legalább két mintát kell venni!  
(pl. szinusz és koszinusz jelek szétválasztása)

$$2f_{max} \leq f_m$$

Ha sérül, a lebegés (aliasing) miatt a gyors jelek visszaállítása nem lehetséges a kevés pontból.

## Aliasing:



*d* eset: sérül a mintavételi törvény,  $f_m - f_{be}$  különbségi jelet mérjük!

## Mintavétel:

mérendő  $f_{be}$  jel szorozva egy  $f_m$  frekvenciájú impulzussorozattal.

Az impulzusokat amplitúdó-moduláljuk!

Amplitúdó-modulálás: frekvenciák összege és különbsége!

A kisebb abszolút értékű frekvencia jelenik meg látszólag a kimeneten.

$f_{max}$  frekvencia (a legnagyobb, még a mintavételezett adatsorból visszaállítható frekvencia): Nyquist frekvencia

### Mintavételi törvény:

azonos a Nyquist-Shannon tétellel:

egy olyan függvényt, ami nem tartalmaz egy adott  $f_{max}$  feletti frekvenciakomponenst,

egyértelműen meghatároz a egy olyan számsor,

amely a függvény értéke a  $2f_{max}$  frekvenciájú pontokban ( $1/(2f_{max})$  időközönként) mérve.