



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elektronika alapjai

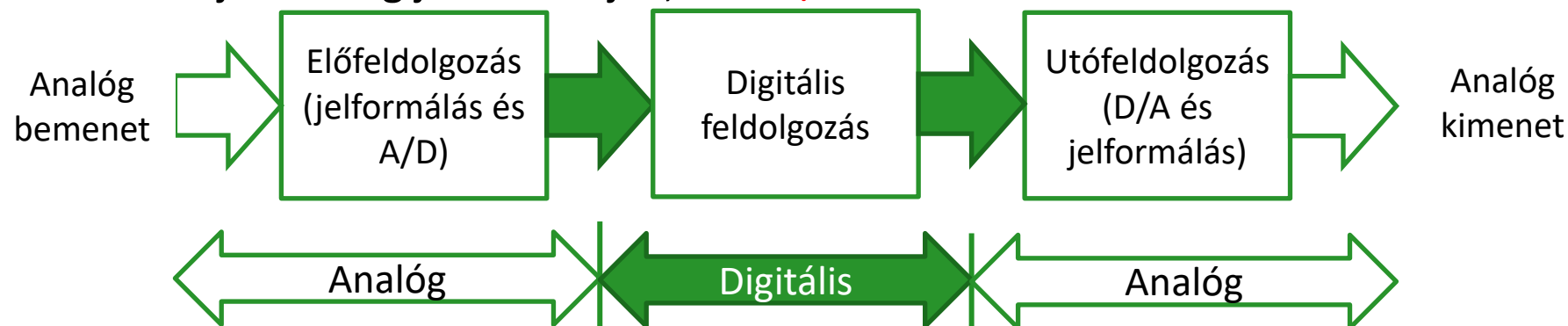
9. előadás

AD/DA konverzió

- Alapfogalmak
- A/D konverterek
 - Flash
 - szukcesszív approximációs,
 - szigma-delta
- D/A konverterek
 - Direkt
 - Létrahálózatos
 - Töltésmegosztáson alapuló
 - Kapcsolt áramok
 - PWM
- Az egyes architektúrák részletei (kapcsolási rajz, pontos működés stb. illusztráció, nem része a zárthelyi anyagnak!)

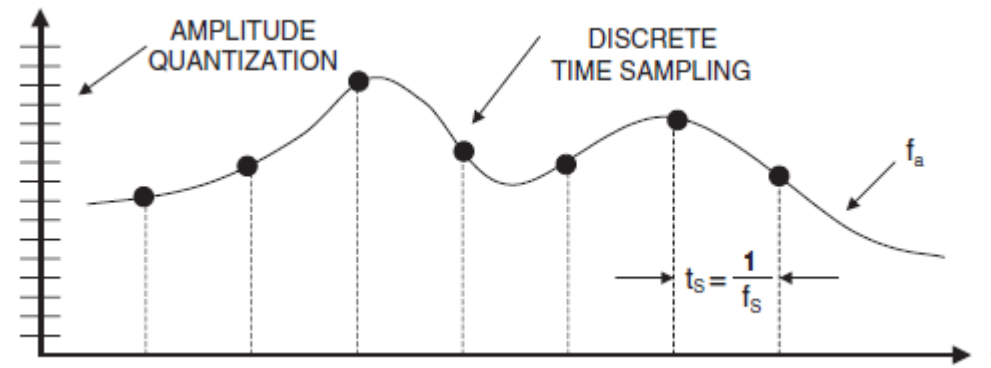
A/D és D/A átalakítók

- Minden szenzor és aktuátor analóg, a jelfeldolgozás viszont digitális.
 - (a legtöbb esetben a digitális jelfeldolgozás egyszerűbb és minden tekintetben /energia, költség stb./ hatékonyabb, más esetekben csak digitális módon oldható meg.)
- Az analóg és a digitális „világ” közötti kapcsolattartáshoz A/D illetve D/A átalakításra van szükség.
 - A bemeneti jelet egy analóg előfeldolgozás után (konverzió, erősítés, szűrés stb.) digitalizáljuk. Ez az **A/D konverzió**
 - A digitális jelet feldolgozzuk, szabályozást készítünk stb.
 - Majd a kimeneten újra analóg jellé alakítjuk, ez a **D/A konverzió**.



Mintavételezés

EMLÉKEZTETŐ



- Egy folytonos jel diszkrét jelek sorozatává alakítható
 - ha $t_i = k T_s$ egyenlő időközönként mintát veszünk a bemenetről.
 - A kapott lépcsős függvény annál jobban közelíti az eredeti jelet, minél nagyobb az $f_s = 1/T_s$ mintavételi frekvencia.
- Nyquist – Shannon tétel
 - Ha a bemeneti jel spektruma egy adott f_{MAX} frekvencia felett nem tartalmaz érdelemleges összetevőket, akkor
 - $f_s \geq 2 f_{MAX}$ esetén a mintavételezett jelből az eredeti jel regenerálható.
 - (a gyakorlatban a maximális frekvencia kétszeresénél nagyobb mintavételezést használunk)

Az analóg jel

▪ Limitált

- Maximális és minimális feszültség (a továbbiakban feszültségre szorítkozunk, de áramra is ugyanezek vonatkoznak)
- Sávkorlátozott (azaz az időbeli megváltozási sebessége korlátozott)

▪ Folytonos

- Elméletileg végtelen felbontású, de felbontás korlátja a
- Jel/Zaj viszony (Signal-to-noise ratio)

- $SNR = \frac{P_{SIGNAL}}{P_{NOISE}} = V_{SIGNAL}^2 / V_{NOISE}^2$

- Logaritmikus skálán, dB-ben szokás megadni.

- $SNR(dB) = 10 \lg \frac{P_{SIGNAL}}{P_{NOISE}} = 20 \lg \frac{V_{SIGNAL}}{V_{NOISE}}$

▪ Ezzel szemben a digitális jel **kvantált**

- Példa: telefonbeszélgetés: 300-3400Hz.
- Mintavételezés: 8kHz, 8 bit (logaritmikus kvantálás)

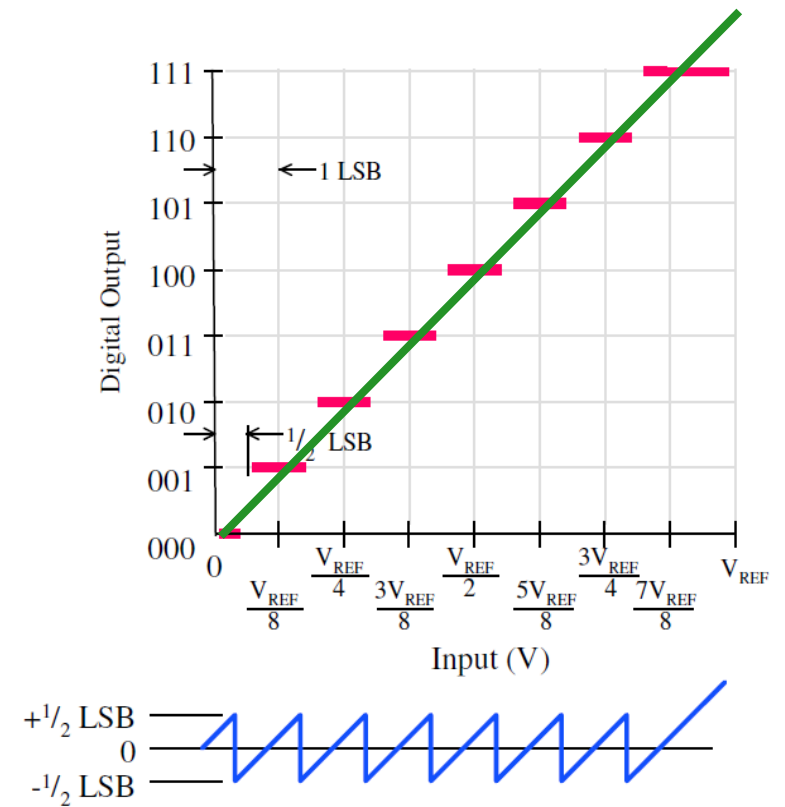
Az A/D konverter

- Vegyes jelű eszköz
 - Bemenete analóg, kimenete digitális
- Tulajdonképpen egy mérést végez
 - A bemeneti feszültség hányad része a referencia feszültségnek?
$$\text{Output}(\text{bit}) = 2^N G V_{IN}/V_{REF}$$
 - N – az átalakító felbontása
 - G – az átalakító erősítése (általában 1)
 - V_{IN} – a bemeneti feszültség
 - V_{REF} – a referencia feszültség
- A digitális output lehet előjel nélküli, ebben az esetben az átalakító **unipoláris**.
 - $\left[0 \dots \frac{2^N-1}{2^N} V_{REF}\right]$
- Vagy előjeles, ebben az esetben az átalakító **bipoláris**.
 - $\left[-V_{REF} \dots \frac{2^{N-1}-1}{2^{N-1}} V_{REF}\right]$

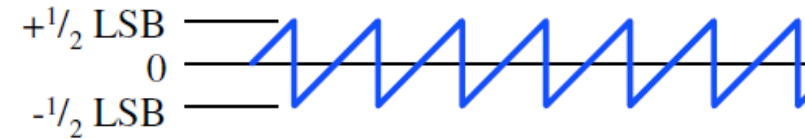
A referencia feszültség

- A mérés pontosságát ez fogja meghatározni!
- Pontosnak és mindenfajta külső körülménytől függetlennek kell lennie
 - Hőmérsékletfüggetlen
 - Tápfeszültség változására érzéketlen
 - Hosszú távon stabil
 - Nagyon kis zajú
 - Az abszolút pontosság kalibrációval kezelhető
- Általában szokott lenni belső (A/D, uC-en belüli referencia) vagy külső, külön IC
 - A külső pontosabb, mivel független az AD/mikrokontroller működési körülményeitől (hőmérséklet, zaj, tápfeszültség változás)
- Sokfajta feszültségre, különböző tulajdonságokkal kapható
 - Pl. egy nagy disztribútornál 3000 fajta ilyen integrált áramkör rendelhető
- Szokásosan pl. 5V, 3V stb.
- Gyakran (millivoltban) kettőhatványra értékbeállított, pl. 4,096V.

- Egy lépcsőfüggvény
- **LSB** – a legkisebb helyiértékű bitnek megfelelő feszültségváltozás
- **FS** – (full scale)
 - A legnagyobb és a legkisebb feszültség különbsége
 - (azaz a legnagyobb és a legkisebb digitális kódhoz tartozó feszültségek különbsége)
- Példa:
 - 3 bites A/D átalakító, referencia feszültsége legyen 1V
 - $LSB = 1/2^3 = 125\text{mV}$
 - $FS = 7/8 - 0 = 875\text{mV}$



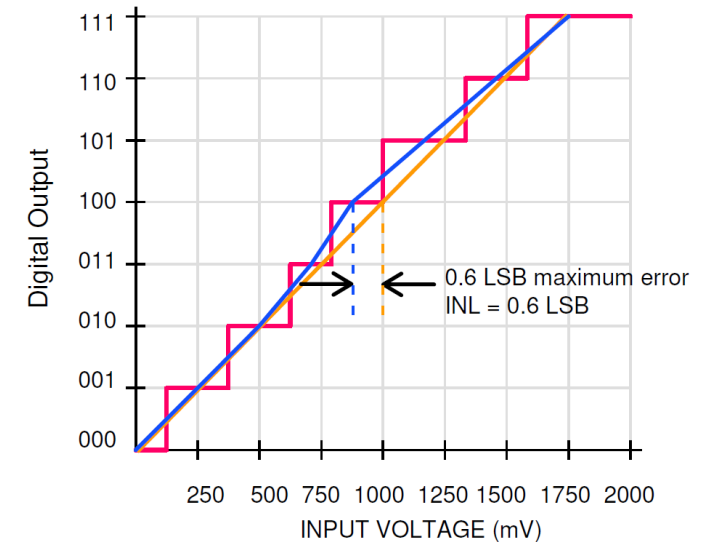
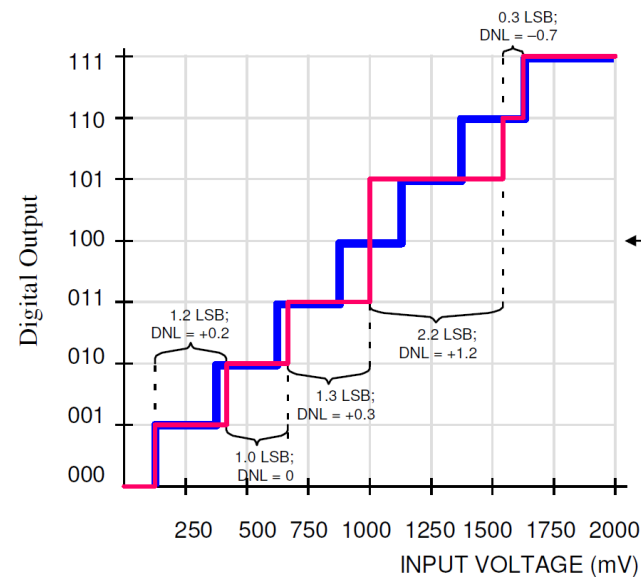
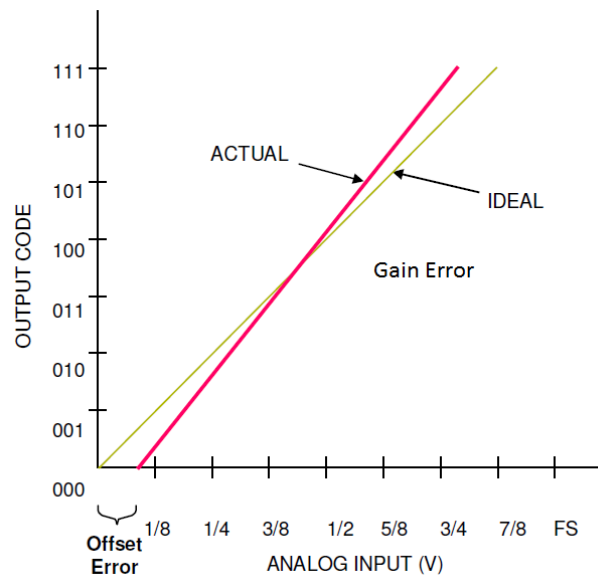
A kvantálási zaj



- A bemenet folytonos, a digitális kimenet viszont kvantált.
- Egyenletes kvantálásnál, ideális A/D konvertert tekintve:
- $SNR|_{dB} = 1,76 + 6,02N \cong 6N$
 - hogyan jön ki? Határozzuk meg a kvantálási hiba effektív értékét!

$$V_Q = \sqrt{1/V_{LSB} \int_{-\frac{V_{LSB}}{2}}^{\frac{V_{LSB}}{2}} V^2 dV} = V_{LSB}/\sqrt{12}$$

- A maximális szinuszos kivezérlés amplitúdója pedig: $2^{N-1}V_{LSB}$, az effektív értéke tehát $\frac{2^{N-1}}{\sqrt{2}}V_{LSB}$
- $SNR = 20 \lg(2^{N-1}\sqrt{6})$
- Példa: mekkora a 16 bites „CD minőség” elméleti jel zaj viszonya?
 - $SNR > 6 \cdot 16 = 96\text{dB}$



- Offsethiba – a lépcsőfüggvény eltolódik az ideálistól
- Erősítéshiba – a lépcsőfüggvény meredeksége eltér
 - Kezelése: kalibráció, majd egyenesítés!
- Differenciális nemlinearitás: a lépcsők szélessége eltér az ideálistól
 - Szélsőséges esete: hiányzik egy kód
- Integrális nemlinearitás: eltérés az illesztett egyenestől

- A nemideális kvantálás miatti torzítást is be kell számolni a jel-zaj arányba.
- Ez az ún. SINAD (Signal-to-Noise and Distortion Ratio)
 - $SINAD = \frac{P_{signal} + P_{noise} + P_{distortion}}{P_{noise} + P_{distortion}}$ (ez kisebb lesz, mint az ideális)
- Ezzel ekvivalens fogalom az **effektív bitszám** (ENOB – Effective Number of Bits)
- A SINAD értékből számolható bit felbontás, ami megmutatja, hogy az átalakító hány bites ideális átalakítónak felel meg.
 - $SINAD = 6,02 ENOB + 1,76$
 - Frekvenciától és kivezérléstől függ

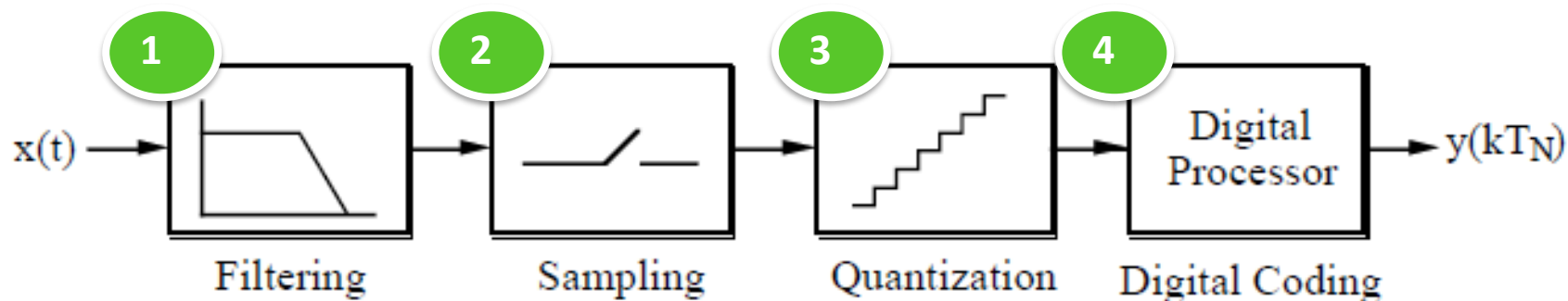
- 12 bites unipoláris A/D konverter, referencia feszültsége 4,096V, SINAD=66dB(@10MHz)
 - $LSB = 4,096V / 2^{12} = 1mV$, $FS = 4,095V$
 - Bemeneti feszültségtartomány: 0..4,095V.
 - Effektív bitszám: $\frac{(66-1,76)}{6.02} = 10,67bit$
 - Azaz hiába 12 bites az átalakító, a pontossága egy **kicsit jobb csak, mint egy 10 bites** ideális átalakítóé!
- *Bipoláris esetben ugyanezekkel a paraméterekkel*
 - Bemeneti feszültségtartomány: -4,096..4,094V
 - $LSB = 2mV$



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

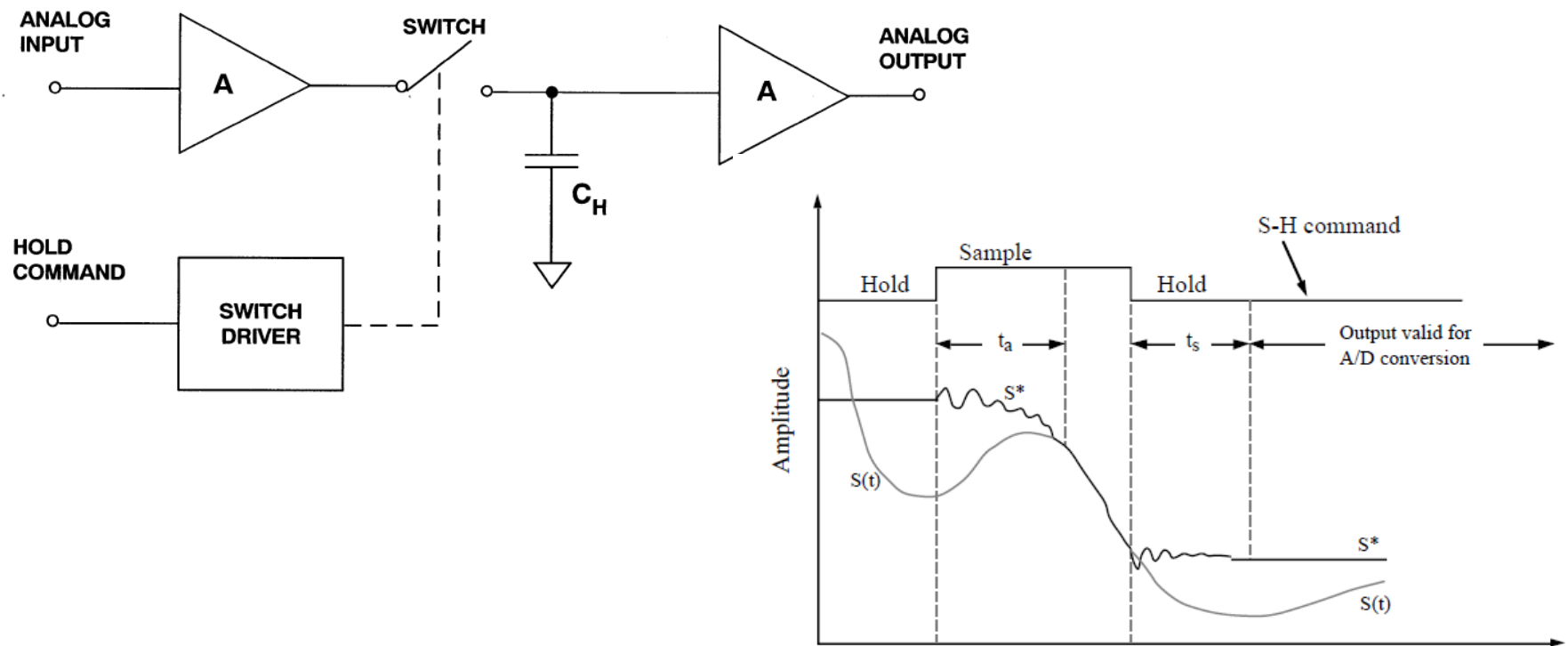
A/D konverzió

Az A/D átalakítás folyamata



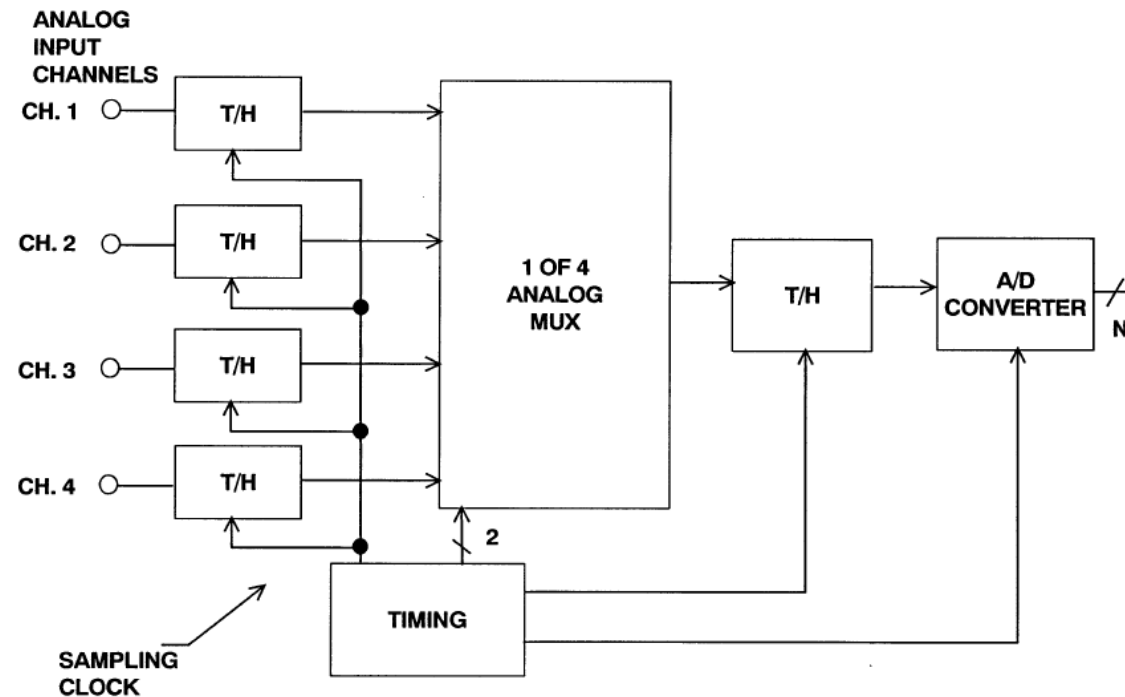
1. **Anti aliasing szűrő:** aluláteresztő szűrő. Feladata a jelből eltávolítani az esetlegesen jelenlévő nagyfrekvenciás komponenseket.
2. **Mintavételező és tartó:** (sample & hold) egy adott pillanatban mintát kell venni a bemenő jelből és ezt tartani az átalakítás befejezéséig. Ez tehát egy **analóg memória**
3. Kvantáló: az analóg jel értékkészletét diszkrét értékekké alakítja. A kvantáló lehet lineáris vagy nemlineáris (pl. logaritmikus)
4. Digitális kódolás

Mintavevő és tartó erősítő



- A kapcsoló elem zárásakor (SAMPLE) a kimenet egy átmeneti idő után követni fogja a bemenetet.
- A kapcsoló elem nyitása után (HOLD) az utolsó feszültséget tartja, ameddig az átalakítás folyik.

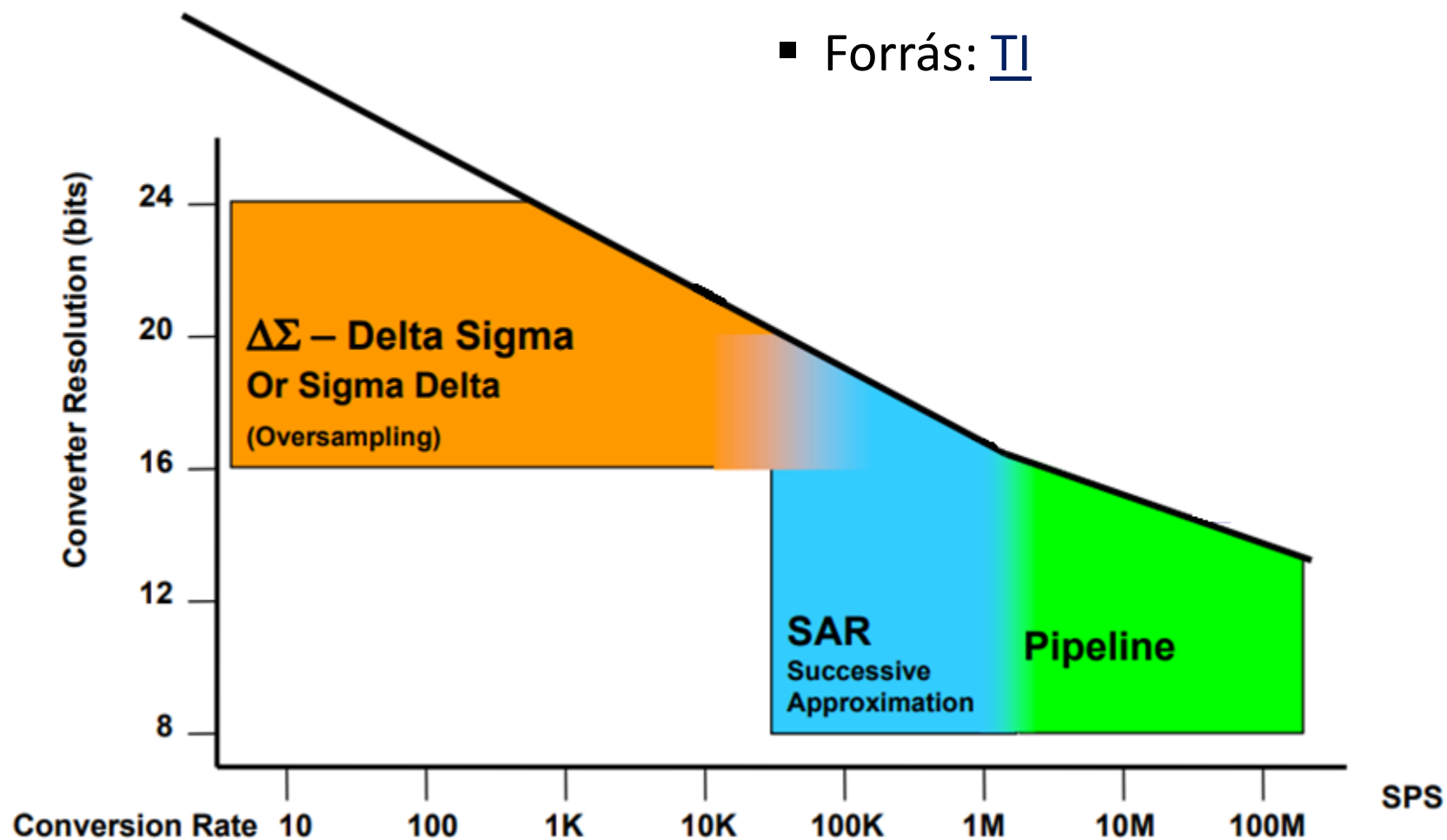
Több csatorna egyidejű mintavételezése



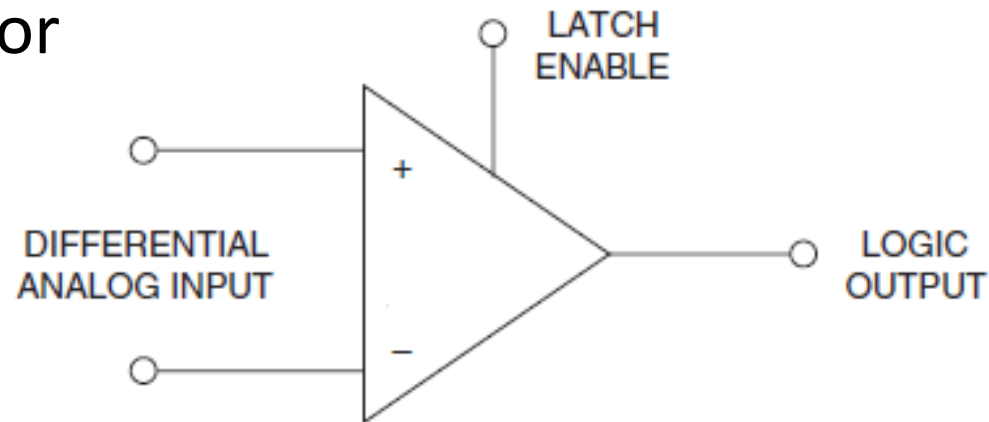
- A mintavevő és tartó áramkört többszörözik meg.
 - Így a mintavétel egyidejűleg történik meg, majd egy analóg multiplexerrel választják ki az A/D konverter bemenetére kerülő jelet, egymás után.
 - Tipikusan: akár X MHz SPS, n csatornán – ez úgy értendő, hogy ha több csatornát használunk, a mintavételezési sebességünk oszódik.

ADC Technologies

■ Forrás: [TI](#)



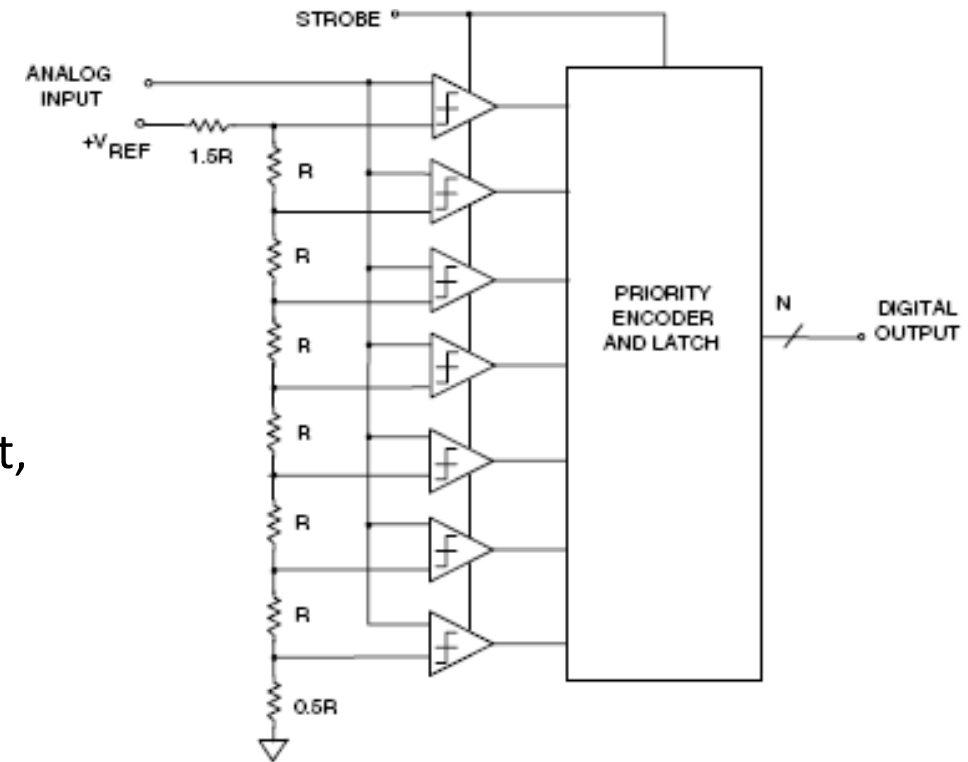
Emlékeztető: a komparátor



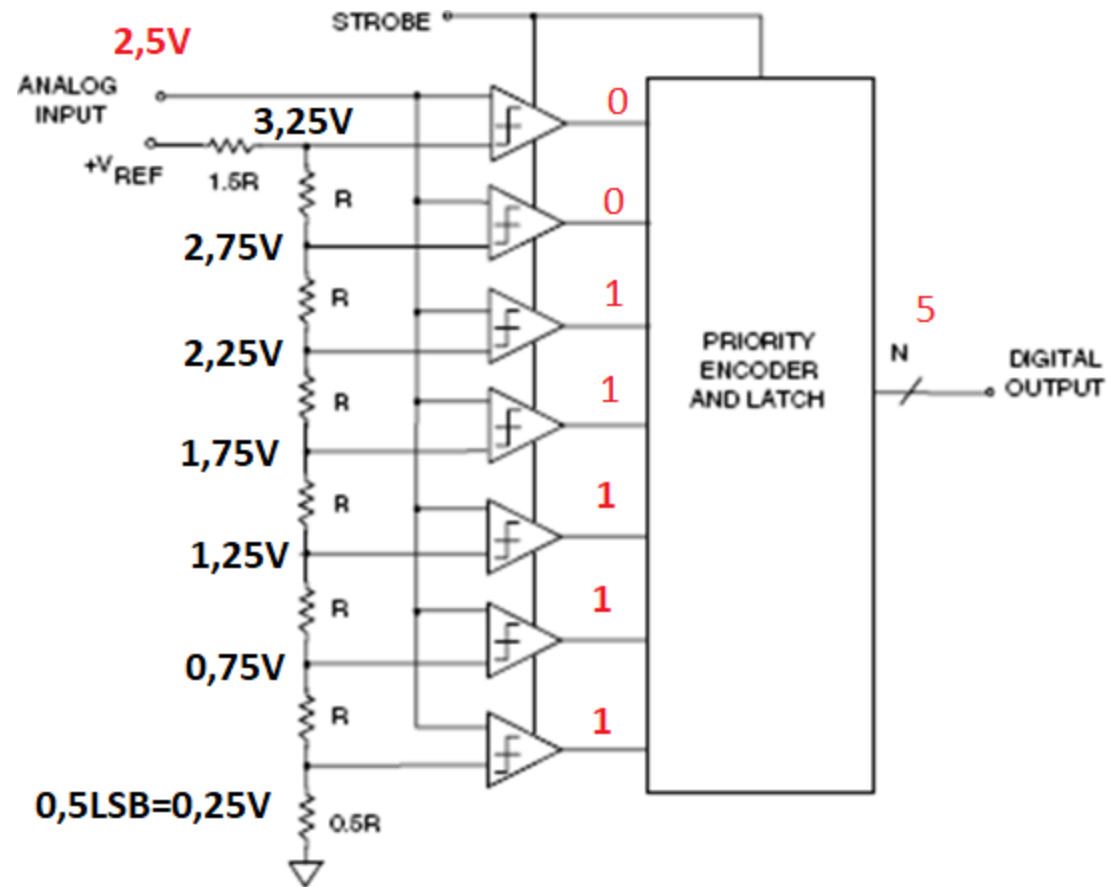
- Speciális analóg áramkör.
- A két bemenete között lévő feszültségkülönbség előjelétől függően logikai 1 vagy 0-t ad.
 - A komparátor segítségével lehet egy adott feszültséget egy másikhoz hasonlítani.
 - Tehát egy nagyobb-e (kisebb-e) kérdés eldöntésére való.

Flash A/D konverter

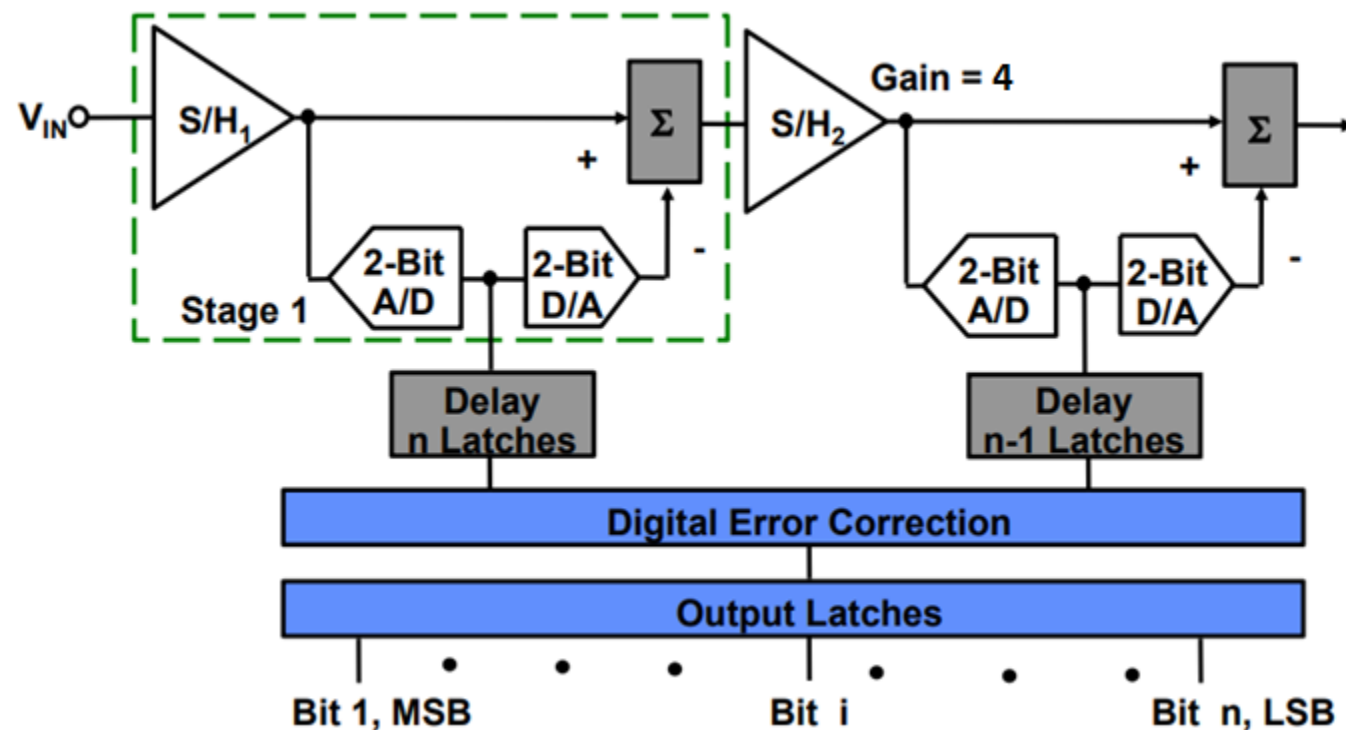
- Az átalakítás egy lépésben történik
- Gyors, több GSPS sebességű is lehet.
- A referencia feszültséget egy feszültségosztó **ellenállás lánc**tal egyenlő közökre osztjuk.
 - A bemenő feszültséget **komparátorokkal** (kimenete logikai szint, attól függően, hogy $V_{REF} > V_{in}$) hasonlítjuk össze a felosztott referencia feszültségekkel.



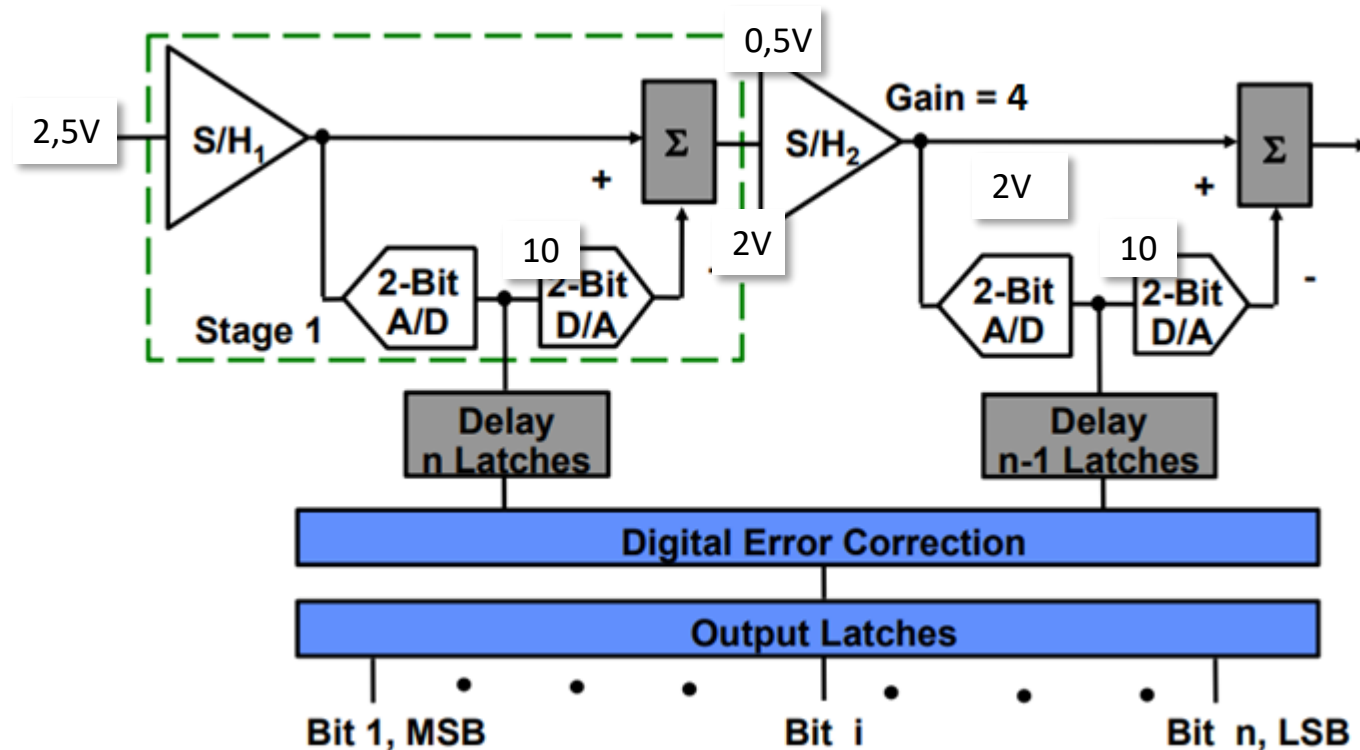
- A komparátorok kimenete egy ún. **thermometrikus kód**, ezt binárisá kell transzformálni.
- **N bites felbontáshoz $2^N - 1$ komparátor kell**
- Nagy chip területhez és fogyasztáshoz vezet, emiatt flash konverter kb. max. 8-9 bites felbontással készül.



- Legyen a referencia feszültség 4V, a bemeneti feszültség 2,5V, az A/D pedig 3 bites (LSB = 0,5V)
 - Az eredő ellenállás 8R, így R ellenálláson $4/8 = 0,5\text{V}$ (LSB) esik.

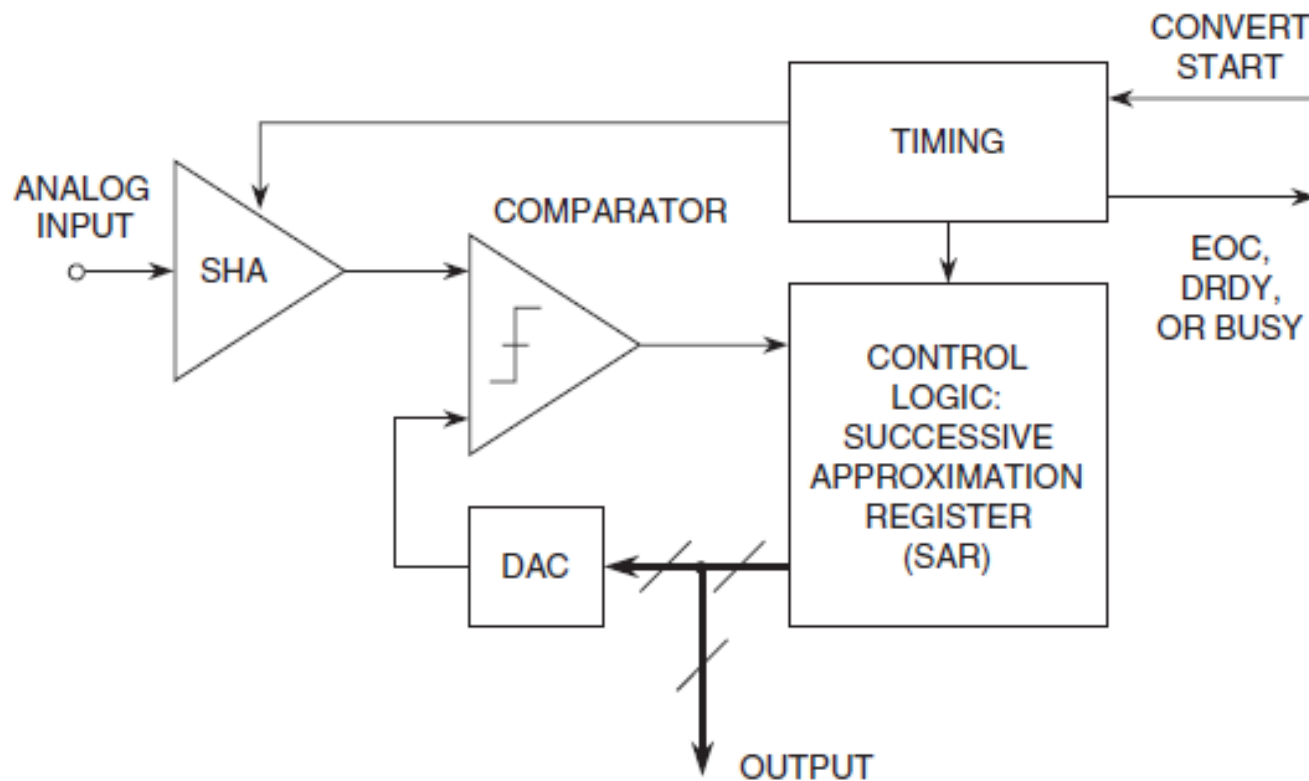


- Minden egyes fokozat 2-3-4 bitet alakít át. Ehhez viszonylag kisméretű flash A/D szükséges, ez könnyen kezelhető, a komparátorok száma kézbentartható.
- A maradék feszültséget erősítik, majd a következő fokozattal alakítják át.
- Pipeline-ban működik, tehát van késleltetése (latency), de az átbocsátóképesség (throughput) nagy!
 - A megelőző fokozat már el tudja kezdeni a következő minta feldolgozását.



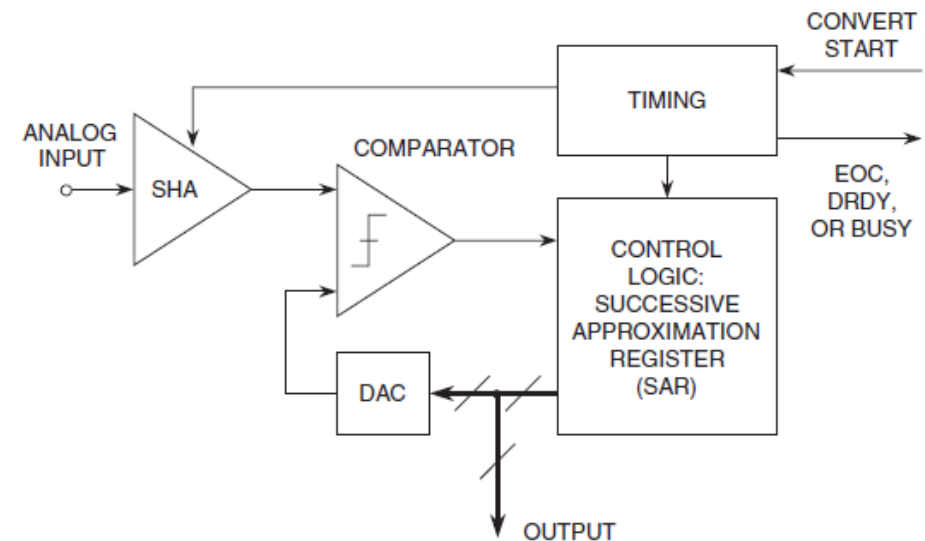
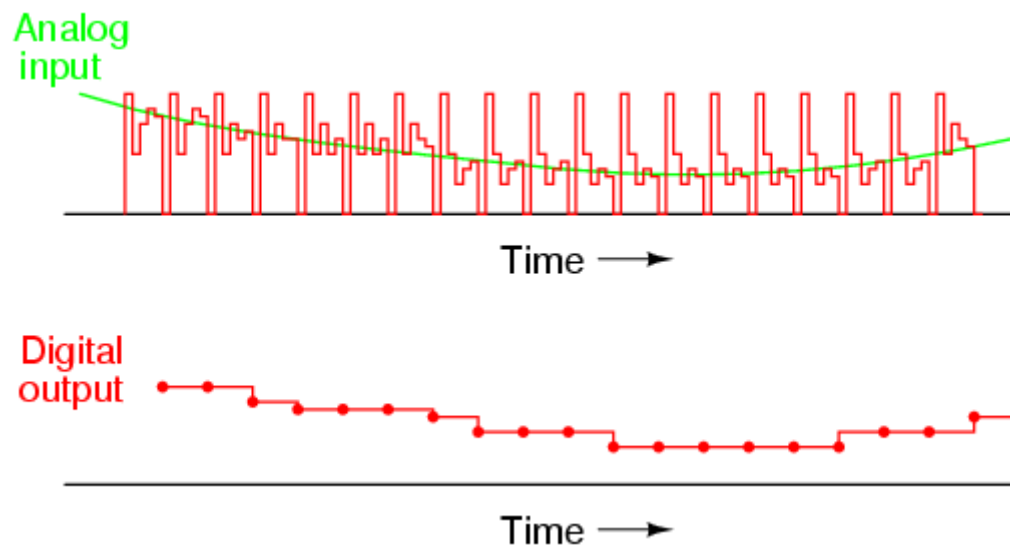
- Legyen a referencia feszültség 4V, a bemeneti feszültség 2,5V, az A/D pedig 4 bites (két fokozatú)
 - Az első fokozat digitális kimenete $10_{(2)}=2$, mivel az LSB 1V.
 - A maradék $2,5V-2V=0,5V$
 - A 2. fokozatnak $0,5 \times 4=2V$ -ot kell átalakítania, ez szintén $10_{(2)}$
 - Az eredmény tehát $1010_{(2)}$, azaz 10.

Szukcesszív approximációs A/D



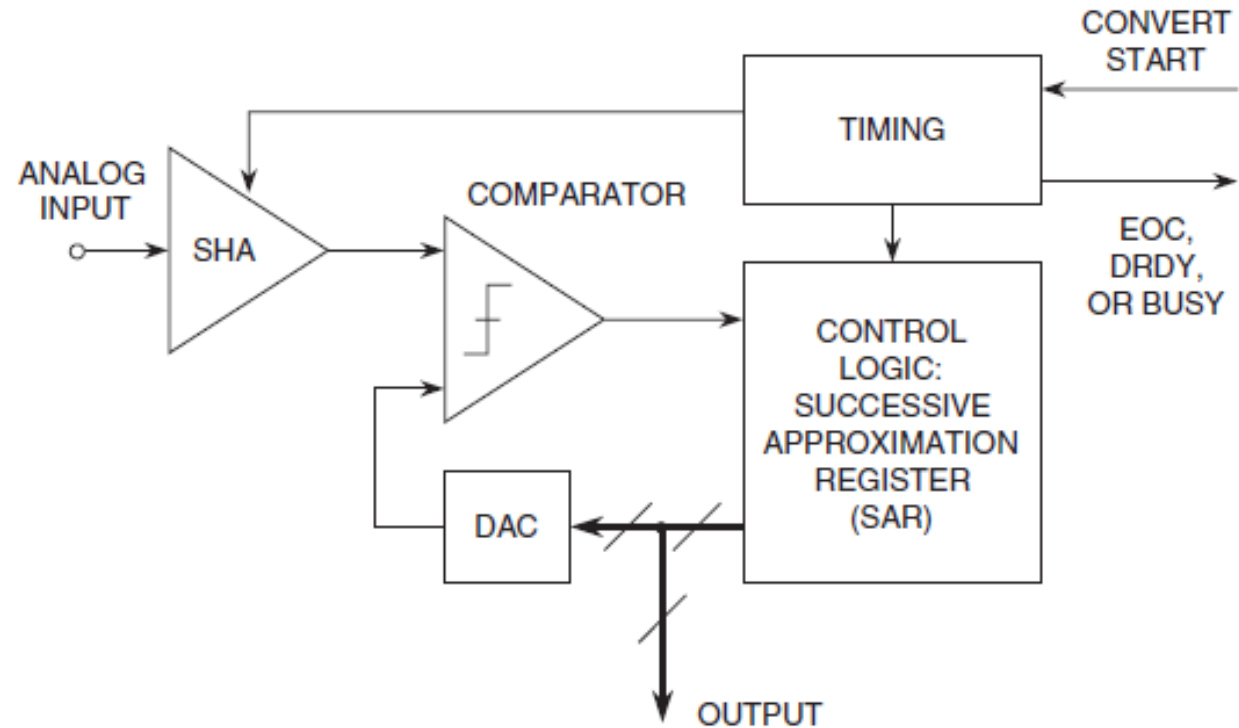
- Egy n bites konverter n lépésben végzi az átalakítást, szukcesszív approximációval

- Az átalakítás kezdetekor a legfelső bit 1, a többi 0.
- A D/A átalakítóval visszaalakított feszültséget összehasonlítjuk a bemenő jellel, ha nagyobb, a bitet töröljük.
- Ezt **minden bitre** sorban elvégezzük.
 - Így egyre pontosabban közelítjük a mintavételezett feszültséget.
 - átalakítási idő: $N \cdot T_{\text{step}}$
 - Közepes sebességű.



Szukcesszív approximációs A/D

SAR	DAC	KOMP.
100	2V	1
110	3V	0
101	2,5	1



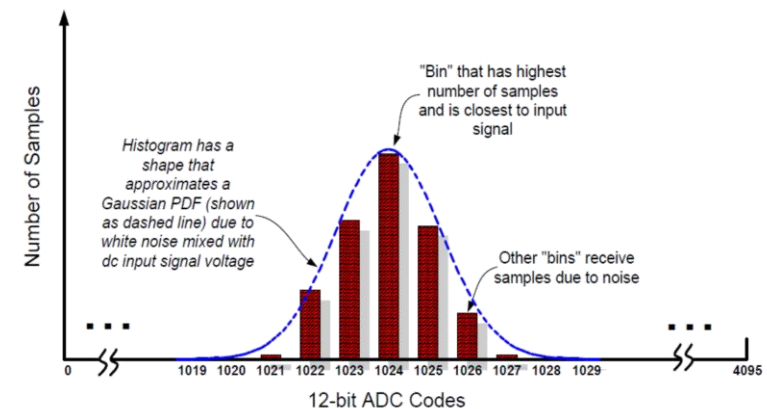
- Legyen a referencia feszültség 4V, a bemeneti feszültség 2,55V, az A/D pedig 3 bites
- 2,5V-ot mértünk így

Szigma- delta átalakítók

- A név magyarázata
 - Szigma – minden lépésben integrálást végez.
 - Delta – minden lépésben különbséget képez.
- A működés alapja a túlmintavételezés (oversampling)
 - $OSR = f_S / f_N$
 - Ahol f_N a Nyquist frekvencia, azaz a maximális jelfrekvencia kétszerese. Tehát az OSR azt adja meg, hogy az elméleti minimumnál hányszor nagyobb frekvenciával mintavételezünk.
 - A túlmintavételezés hatására nő a jel-zaj viszony:
 - $SNR = 6,02N + 1,76 + 10 \lg(OSR)$
 - Miért is? Egyenletek helyett csak annyit mondunk: most ugyanaz a kvantálási zaj nagyobb frekvenciatartományon oszlik el.
 - Ez önmagában is hasznos. Túlmintavételezéssel és átlagolással csökkenteni lehet a zajt. (más szóval növelni a felbontást)

Túlmintavételezés

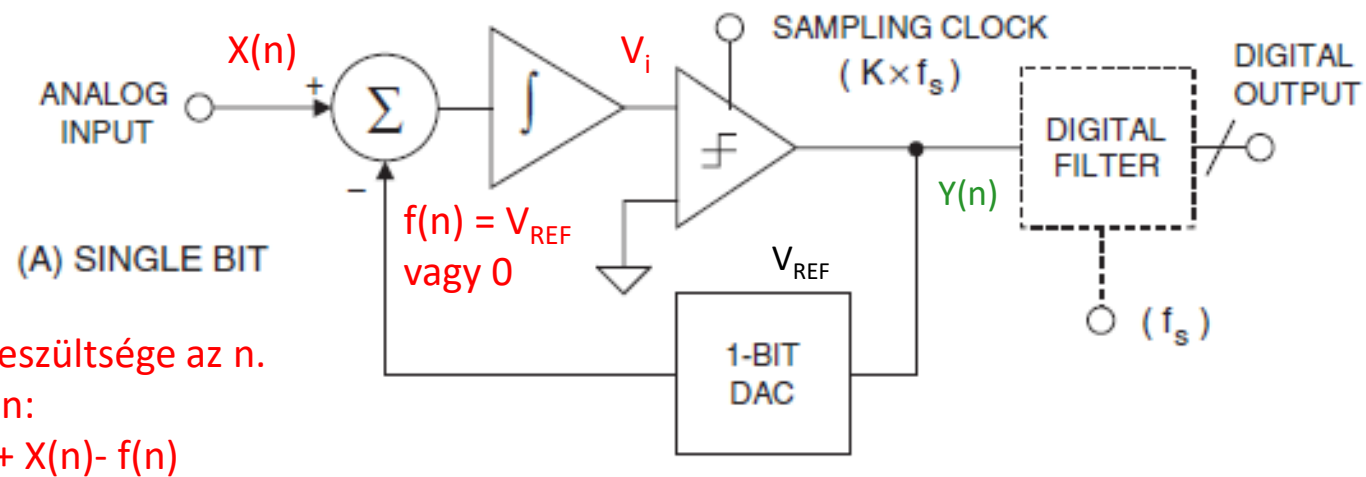
- Egy bit effektív felbontás javításhoz négyszeres túlmintavételezés tartozik. ($10 \lg 4 = 6,02$)
- Ezt nyilván a végtelenségig nem lehet csinálni, de „lassú” jelek mintavételezésekor hasznos.
- Ha lehetséges, mindig érdemes átlagolni.
 - N mintát átlagolva a zaj \sqrt{N} -ed részére csökken
 - A leggyakoribb elektromos zavar, a hálózati 50/60Hz kiszűrhető, ha a periódus egész számszorosát mintavételezzük.
- Csak akkor működik, ha a jel lévő zaj fehér.
 - Fehérzaj: spektruma egyenletes.
 - Ekkor a mért értékek GAUSS eloszlásúak



Σ–Δ (Sigma-Delta) A/D konverterek

■ Túlmintavételezett A/D konverter

- Valójában egy impulzus sorozatot állít elő.
- A digitális impulzus-sorozat kitöltési tényezője (azaz egy adott időben a logikai 1 és logika 0 aránya) arányos a bemeneti mintavételezett jellel
- Így a kvantálást tulajdonképpen kitöltési tényező mérésé egyszerűsíti
 - Ez digitális integrált áramkörökkel könnyen megvalósítható
 - Alkatrészek tűrésére meglehetősen érzéketlen
 - Pl. egy 12 bites flash konverterben az ellenállások relatív pontossága jobb kellene, hogy legyen 0,2‰ –nél, amit egyedi értékbeállítás nélkül nehéz megvalósítani
- Mivel az architektúra egyszerű, digitális áramkörön alapú, ezért a túlmintavételezés nagy lehet
 - Nagy effektív bitszám érhető el.



■ Bonyolultnak tűnik, de nem az!

- Egészen addig, amíg a stabilitást és a jel-zaj viszonyt nem vizsgáljuk a matematika eszköztárával 😊
- Az analóg feldolgozó rész különbséget képez a bemenő jel és a D/A kimenete között, majd ezt a különbséget integrálja.
- A komparátor az integráló kimenetétől függően vagy ad logikai 1-et vagy 0-t.
- Az 1 bites D/A konverter a referencia feszültséget vagy a földet kapcsolgatja a kimenetére
 - Ez CMOS-ban igen egyszerű és ismerjük a kapcsolási rajzot is – a buffer.
- A decimátor szűrő állítja elő a több bites kimenet egy adott intervallum alapján.

- Legyen a referencia feszültség 5V és a bemenet feszültsége pedig 3,3V.

órajel	$V_i(n)$	F(n)	Bit
0	0	0	0
1	3.3	5	1
2	1.6	5	1
3	-0.1	0	0
4	3.2	5	1
5	1.5	5	1
6	-0.2	0	0
7	3.1	5	1
8	1.4	5	1

- Legyen a decimátor 3 bites.

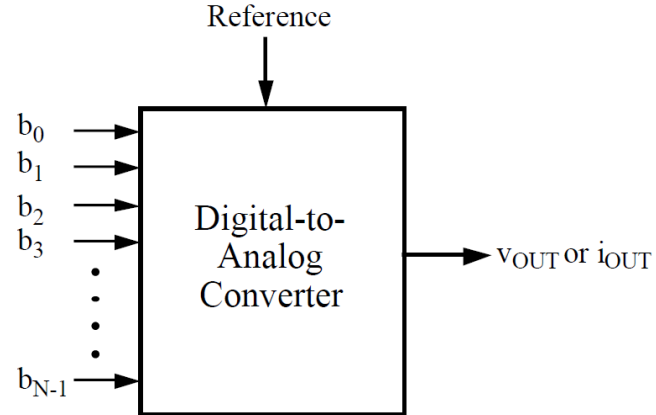
- Ekkor a mért érték bit-> az egyesek száma egy 8 hosszú sorozatban.
- Azaz 5.
- A mért feszültség pedig
- $V_X = V_{REF} \cdot \frac{5}{8} = 3,125V$



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

D/A konverzió

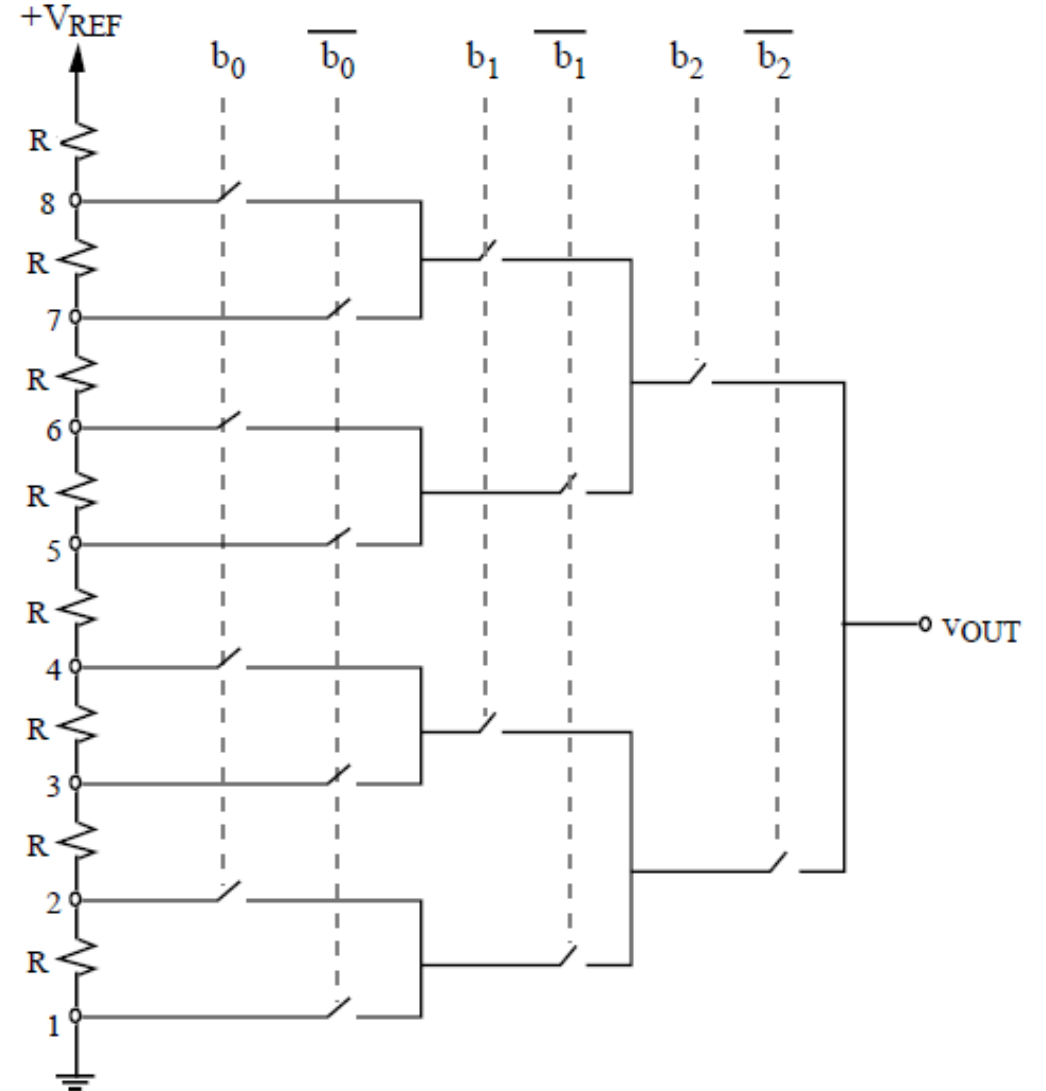
D/A konverzió



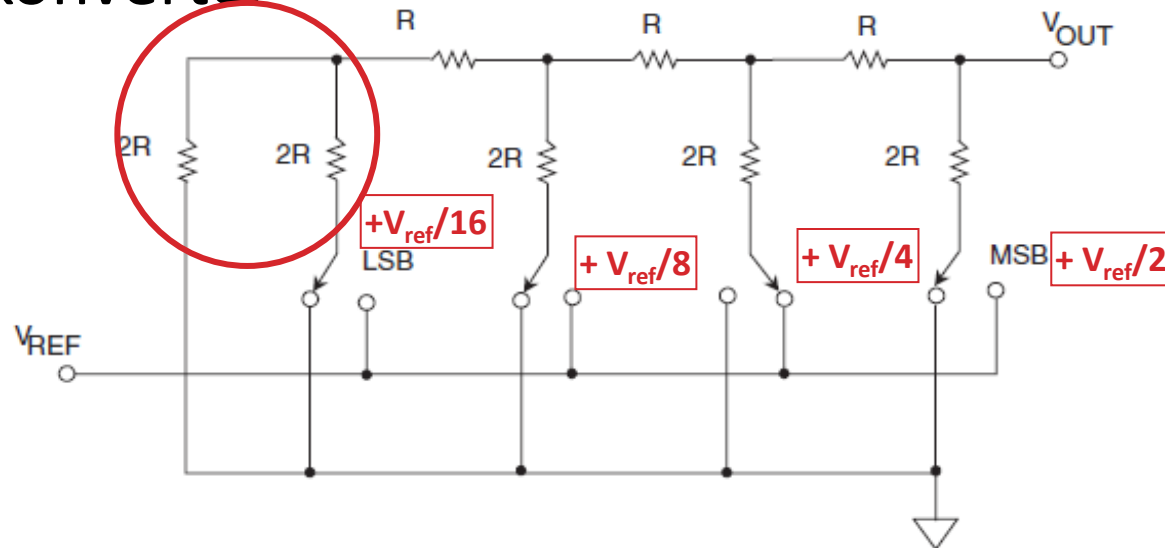
- A bináris értékkel egyenesen arányos feszültséget állít elő.
- $$V_{OUT} = \frac{V_{REF}}{2^n} B = V_{LSB} B$$
- Az A/D konverternél megismert alapfogalmak
 - Full scale
 - Offszet és erősítéshiba
 - INL, DNL
 - jel/zaj viszony
- Ugyanúgy értelmezettek

Párhuzamos (direkt) átalakítás

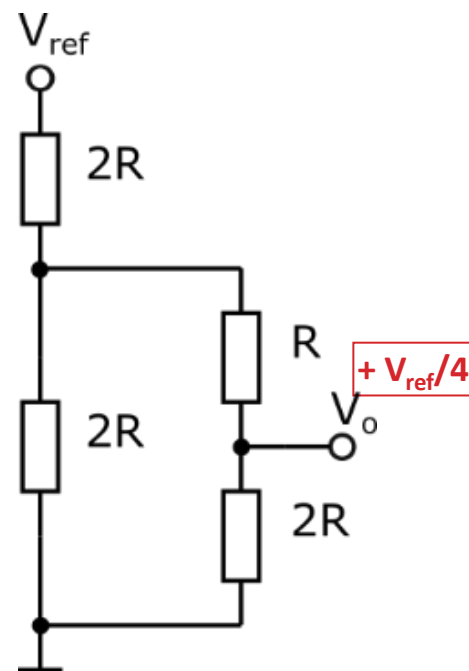
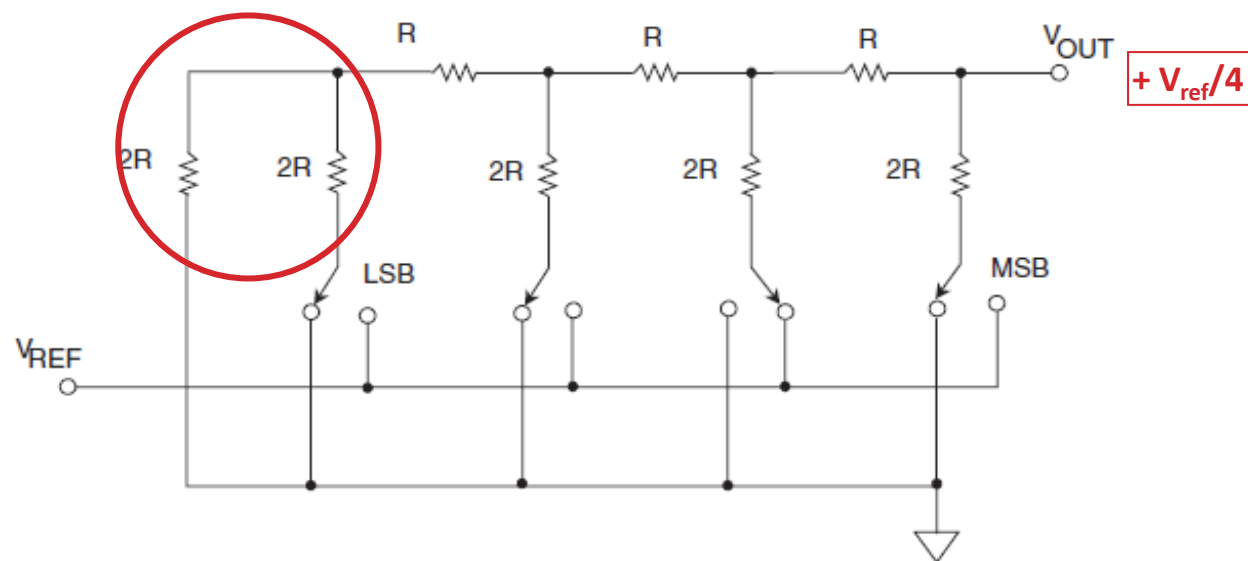
- A referencia feszültséget egy ellenállás láncsal osztjuk.
 - Az analóg kapcsolókon keresztül az átalakítandó számnak megfelelő érték kerül a kimenetre.
 - (analóg multiplexer – a kapcsoló CMOS tranzszer kapu)
 - Egyforma ellenállásokat igényel, N bithez 2^N db. ellenállást.
 - A felépítésből eredően szigorúan monoton



Létrahálózatos D/A konverter



- A szuperpozíció tétellel könnyen belátható, hogy egy adott kapcsoló zárásakor a bináris súlynak megfelelő feszültség kerül a **kimenetre**.
- Előnye: IC-kben pontos ellenállások nehezen valósíthatóak meg, viszont megfelelő relatív pontosság érhető el.
- Csak R ellenállásokat tartalmaz (a $2R$ ellenállás helyettesíthető két sorbakapcsolt R ellenállással), N bithez $3N+1$ ellenállás szükséges.
- Sehol nem használtuk ki, hogy a referencia feszültség állandó lenne, változhat időben. Ez az ún. szorzó típusú (multiplying DAC)

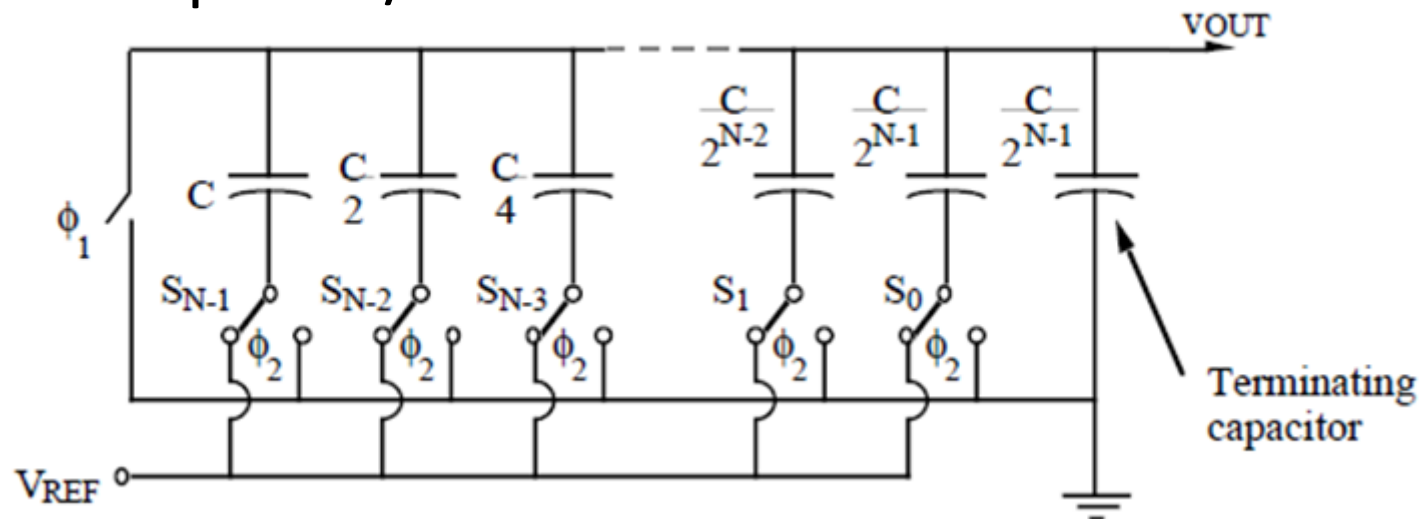


■ Vizsgáljuk meg az ábrán látható 0100b kód esetét!

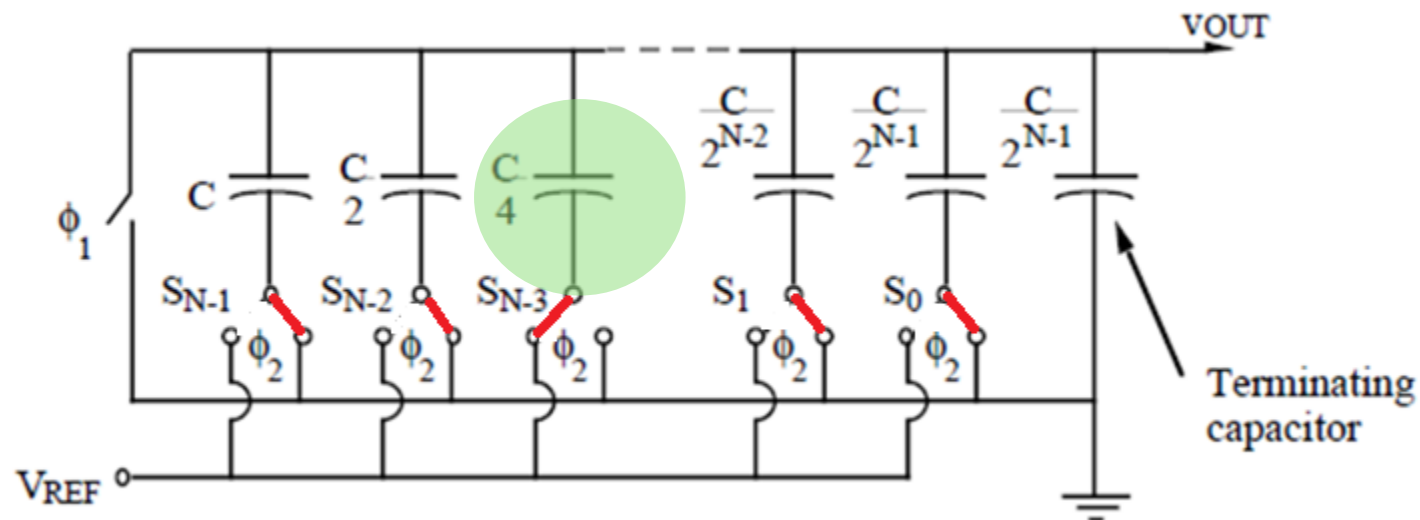
- A piros körrel jelölt két ellenállás párhuzamos eredője R . Ehhez hozzáadva a sorbakapcsolt R ellenállást, újra $2R$ ellenállást kapunk, ami sorba van párhuzamosan van kapcsolva ismét egy $2R$ ellenállással stb.
- A V_{REF} -re kapcsolt $2R$ ellenállástól balra tehát $2R$ az eredő ellenállás, jobbra pedig $3R$.
- A kimenő feszültség a jobboldali $3R$ ellenálláson eső feszültség kétharmada

$$V_O = \frac{6/5}{16/5} \frac{2}{3} V_{REF} = 1/4 V_{REF}$$

Töltésmegosztáson alapuló D/A

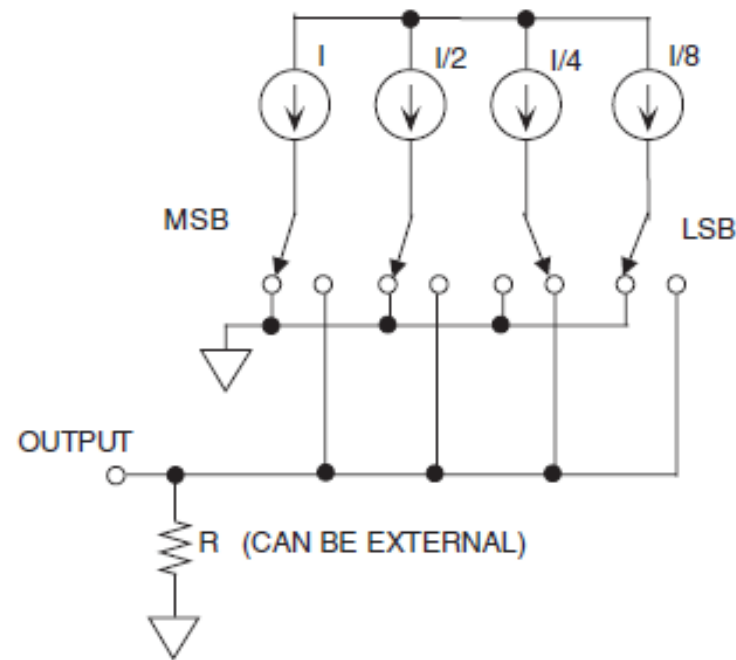


- Φ_1 fázisban az összes kapacitás kisül
- Φ_2 fázisban ha bináris érték 1, a referencia feszültséget, ha a bináris érték 0, a földet kapcsoljuk a súlyozott kondenzátorra
- A szuperpozíció tétel segítségével bizonyítható.
 - Párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok kapacitása összeadódik
 - Sorbakapcsolt kondenzátorokon a feszültség a kapacitások reciprokának arányában oszlik meg.
- Egyforma kapacitásokat könnyű készíteni.
 - (a nagyobb kapacitásokat párhuzamosan kapcsolt egységkapacitásokból állítják elő)



- Számítsuk ki a kimenet feszültségét, ha $C/4$ kapacitást aktiváltuk.
 - Balra $3/2 C$, jobbra pedig $1/4 C$ kapacitás van, a földre kapcsolva. (az LSB kapacitásból kettő van!) Ennek eredője – mivel párhuzamosan vannak kapcsolva $7/4C$
 - Tehát a referencia feszültség az $1/4C$, $7/4C$ kapacitáson oszlik meg
 - Azaz $V_{OUT} = \frac{4/7}{4+4/7} V_{REF} = \frac{1}{8} V_{REF}$

Kapcsolt áramok

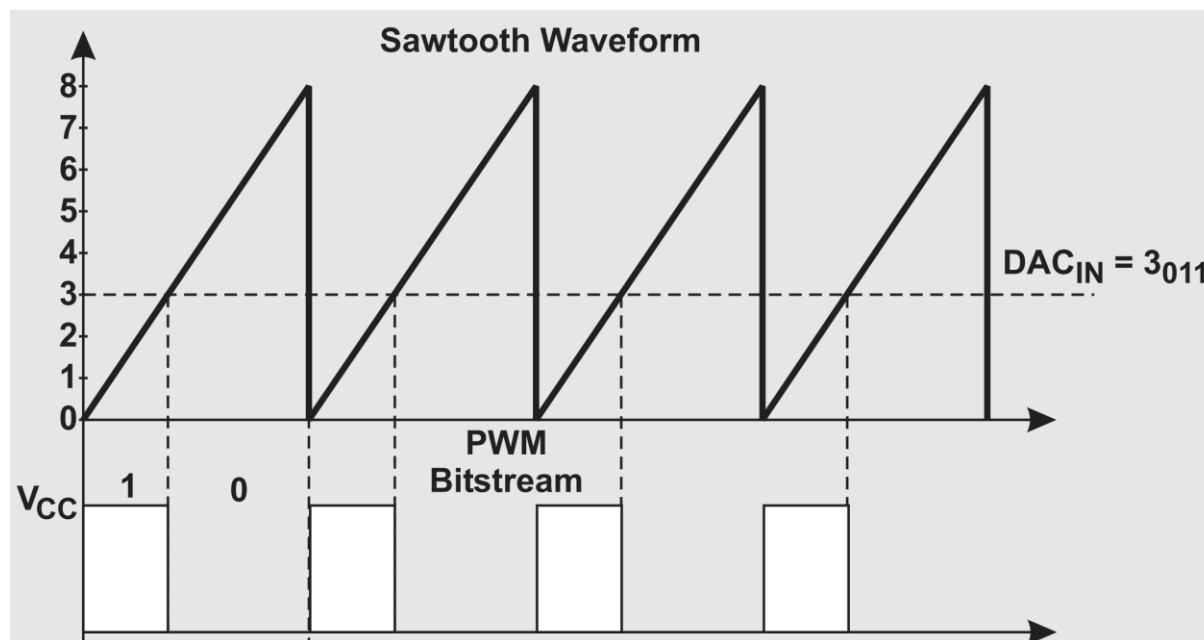


- A bináris súlynak megfelelő áramgenerátorokat kapcsolnak be/ki.
- A legnagyobb sebesség így érthető el.
- A kimenet áram
 - (könnyen feszültséggé alakítható)
- IC-ben könnyű egyforma áramgenerátorokat készíteni.

Számláló típusú D/A (PWM)

■ Pulzusszélesség moduláció

- Nagyon gyakori periféria mikrokontrollerekben.
- A pulzus kitöltési tényezője megfelel a D/A értéknek.
- Egy aluláteresztő szűrő eltávolítja a magasabb frekvenciájú komponenseket.



Példa

- Olcsó mikrokontrollerünkben (gyerekjáték) 2MHz-es órajellel hány bites felbontású D/A-t tudunk készíteni, ha a mintavételezési frekvencia 8kHz? (telefon minőség)
 - A periódusidő $125\mu\text{s}$, azaz az $0,5\mu\text{s}$ órajellel a számlálón 250-es érték.
 - Ez azt jelenti, hogy 250 különböző kitöltési tényezőt tudunk előállítani,
 - Azaz a felbontásunk majdnem 8 bit.

Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- Choose the right A/D converter for your application (TI)
- Szimulációk
 - Flash A/D konverter
 - Direkt D/A átalakító
 - Létrahálózatos D/A átalakító