

ጠቅናሯ ማህጻን



የጠቅናሯ ማህጻን ወ ማህጻን

የጠቅናሯ ማህጻን ማህጻን

የጠቅናሯ ማህጻን

(ጠቅናሯ)

የጠቅናሯ ማህጻን

ጠቅናሯ

የጠቅናሯ ማህጻን

Mario Žagar

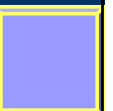


Sveučilište u Zagrebu

**Fakultet elektrotehnike i računarstva  
(FER)**

# RAČUNALA I PROCESI

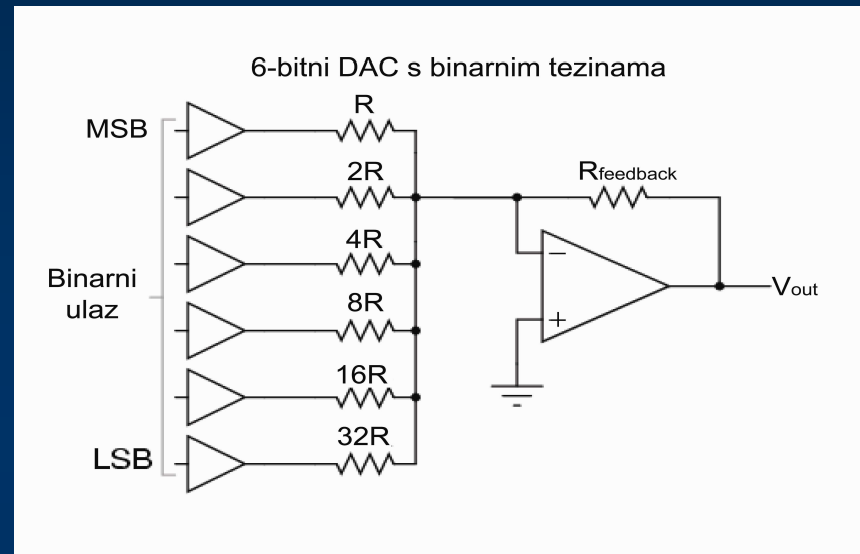
## 3. Analogno-digitalna pretvorba



# Digitalno-analogna pretvorba



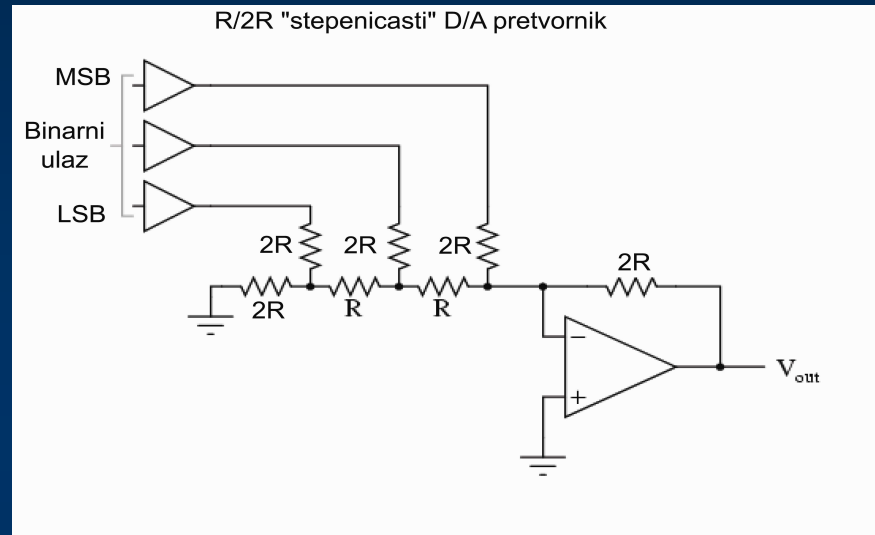
# $R/2^nR$ pretvornik



- Invertirajuće operacijsko zbrajalo
- Težinu pojedine grane određuju otpornici (odgovaraju težinama znamenaka u binarnom brojevnom sustavu)



# R/2R D/A pretvornik



- Koristi dvije različite vrijednosti otpornika uz neznatno povećanje njihovog broja
- Mjenja jedan oblik složenosti drugim

# Analogno-digitalna pretvorba



# UVOD

- A/D pretvarači pretvaraju analognu veličinu (napon) u ekvivalentnu digitalnu vrijednost. Ulazni napon u intervalu  $[0, V_{REF}]$  pretvara se u digitalnu vrijednost  $[0, 2^N - 1]$ , gdje je  $N$  razlučivost pretvarača.
- Osnovni parametri A/D pretvarača su razlučivost (broj bitova) i brzina pretvorbe (broj uzoraka/s – *sps*).
- Brzina pretvorbe treba biti najmanje dvostruko veća od najviše frekvencije prisutne u signalu – Niquistov kriterij
- Prema načinu rada razlikujemo sljedeće vrste pretvarača:
  - pretvarači sa sukcesivnom aproksimacijom
  - integracijski pretvarači
  - paralelni (*flash*) pretvarači
  - cjevovodni (*pipeline*) pretvarači
  - sigma – delta pretvarači



# Pretvorba A/D

3 karakteristične metode pretvorbe:

- ☞ sukcesivna aproksimacija (eng. successive approximation)
- ☞ integracija (eng. integration)
- ☞ neposredna usporedba (eng. direct comparison)

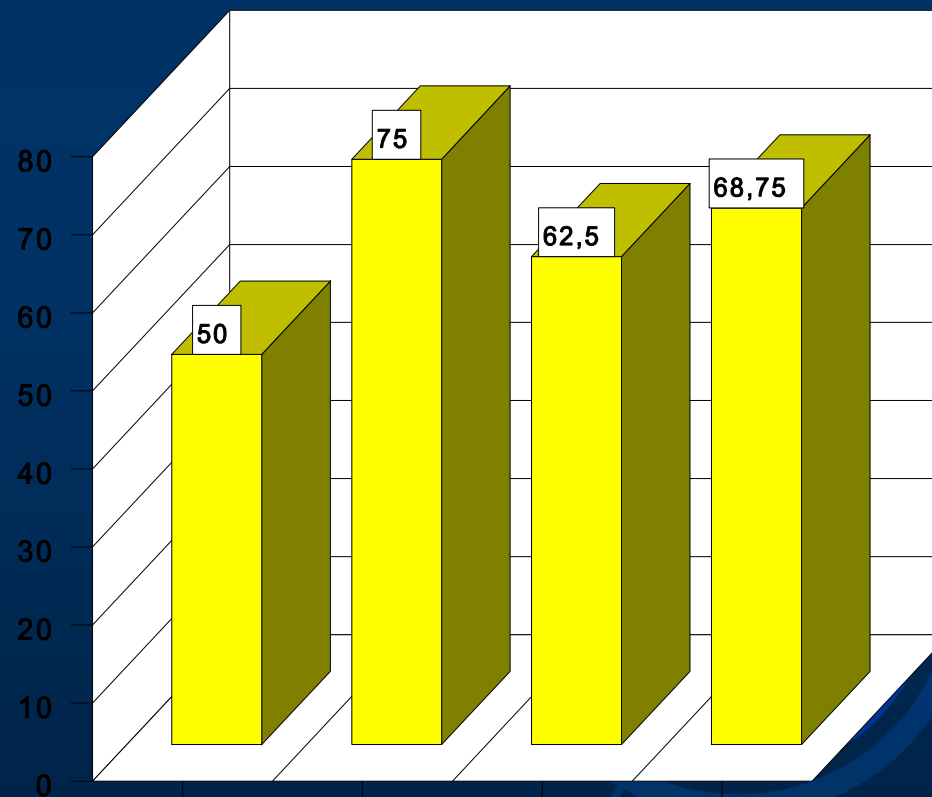
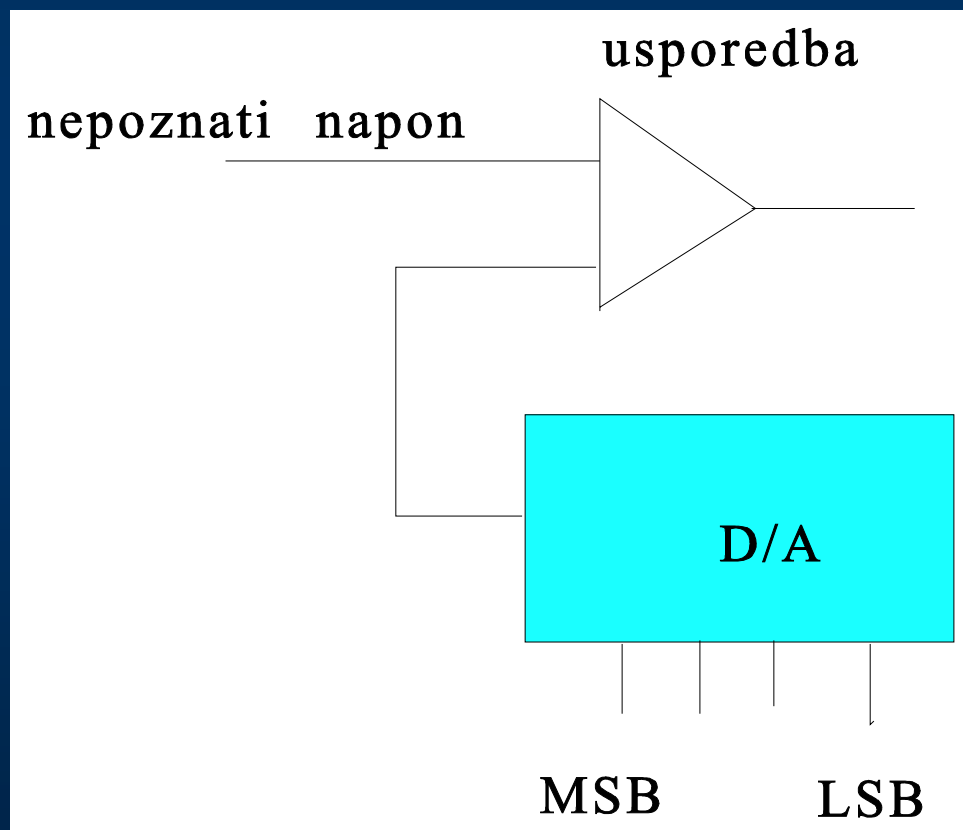




- ☞ uzimanje uzoraka (sampling),
- ☞ uzorkovanje barem dvostruko od najviše frekvencije,
- ☞ uzorkovanje mora biti  $\sim 10x$  brže od prosječne frekvencije

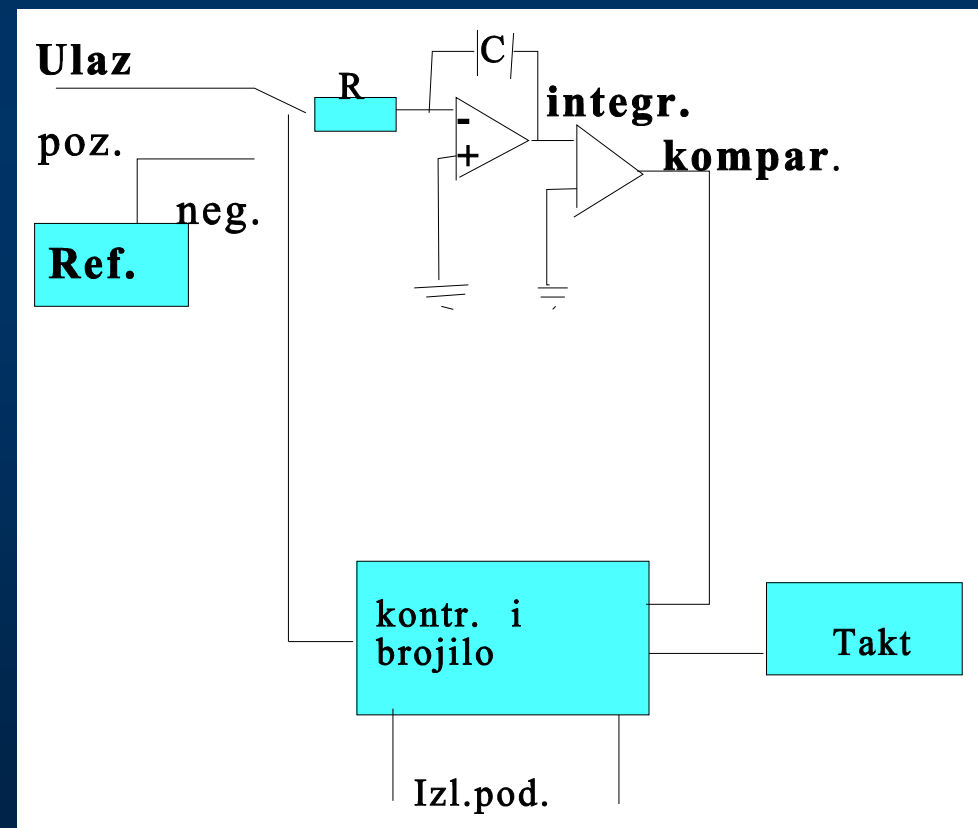
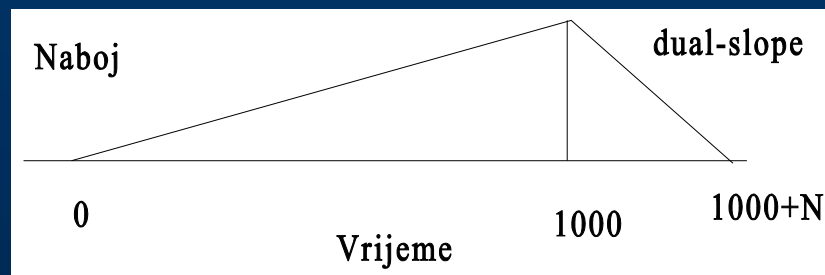


# Sukcesivna aproksimacija



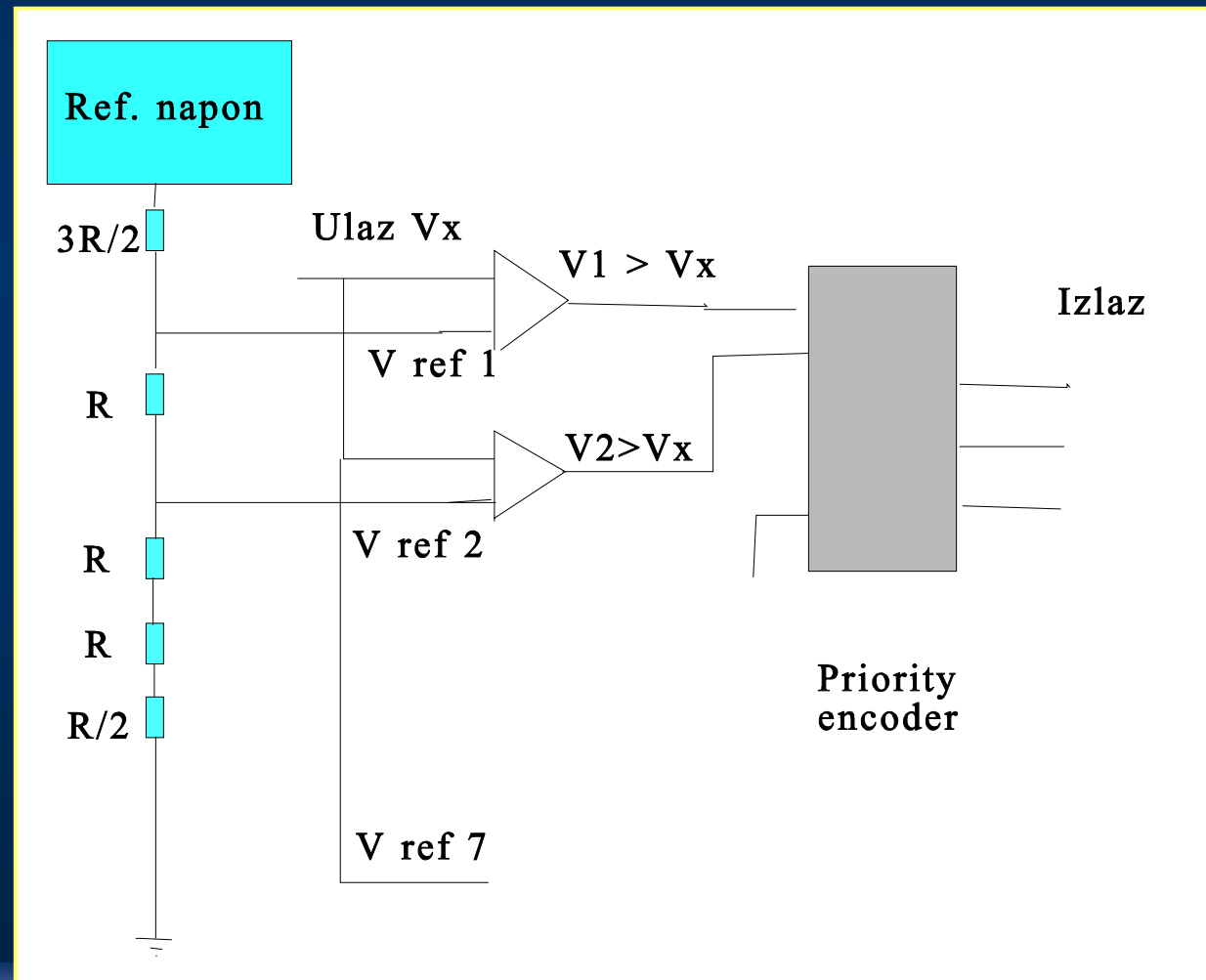
# 2. Integracija

- Analogni integracija, mjerenje vremena da se kondenzator nabije od nepoznatog napona, a isprazni od poznatog napona.
- **Omjer vremena je omjer napona!**
- Vrlo precizna ali jako spora:



# 3. Neposredna usporedba

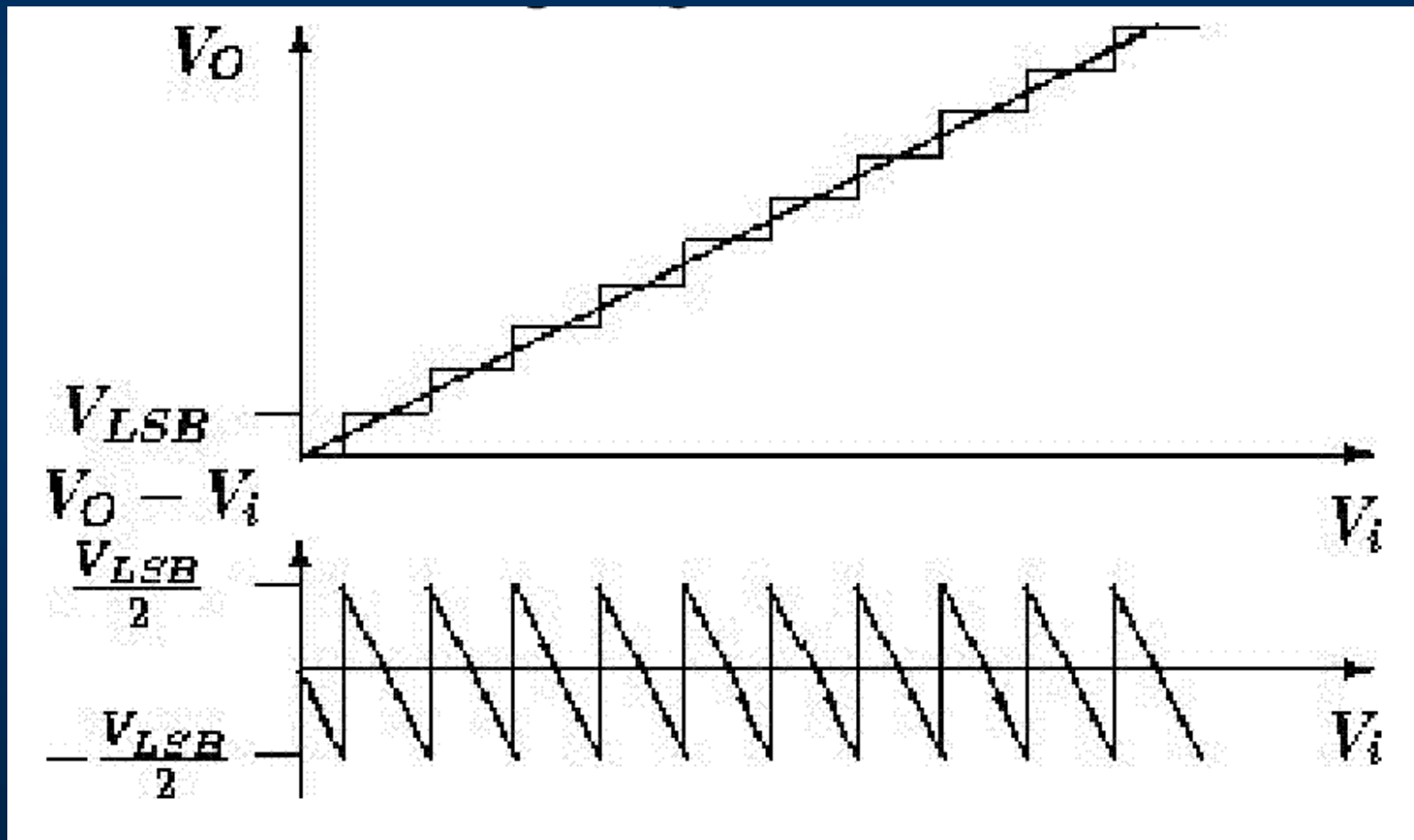
- ➔ Najbrža, ali zato  $2^n - 1$  komparatora (n je željeni broj bitova na izlazu)



# Primjer:

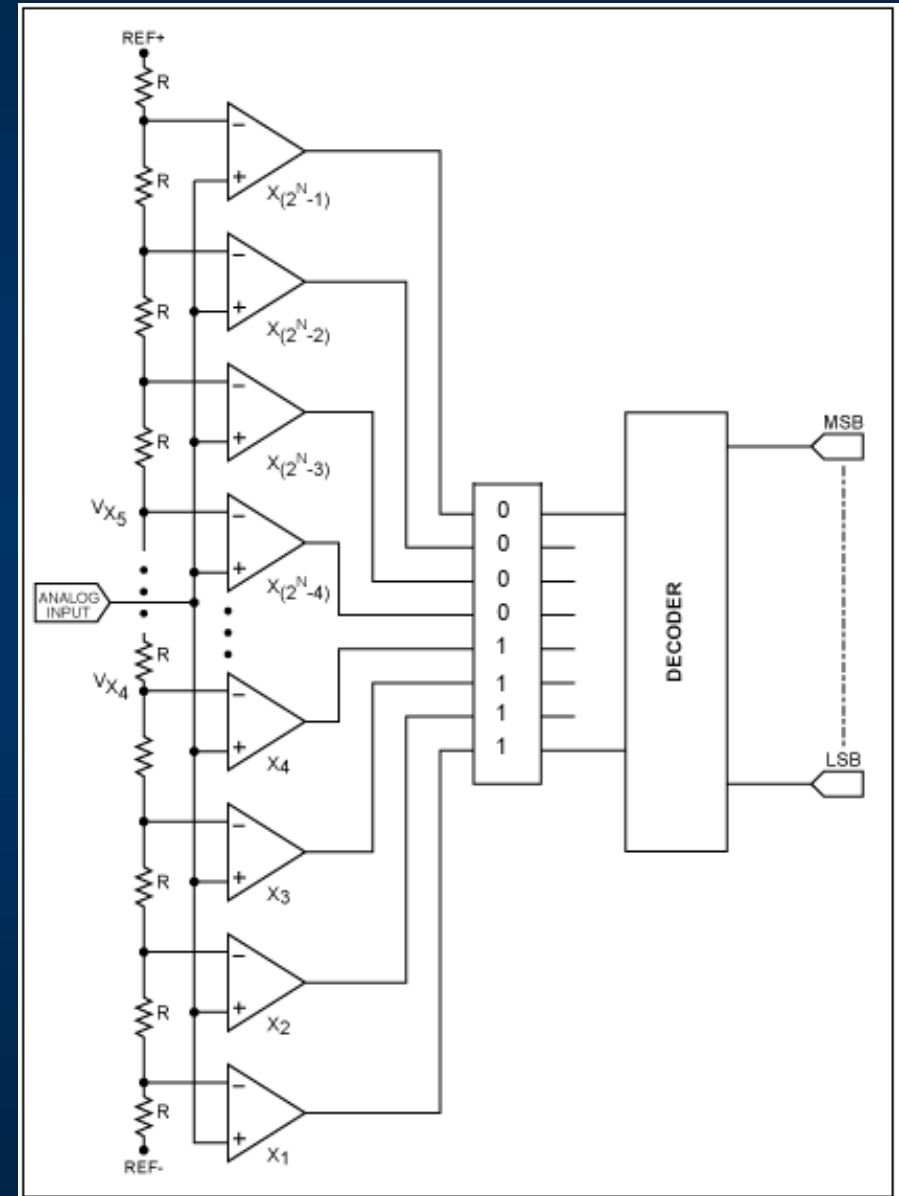
tvrtka	rezol.	brzina	tip	cijena
Nat.	8	40us	sa	\$10
An.Dev.	10	18us	sa	\$70
An.Dev.	13	40ms	integr.	\$25
AMD	4	50ns	kompar.	\$50

➔ Prijenosna funkcija A/D pretvarača:



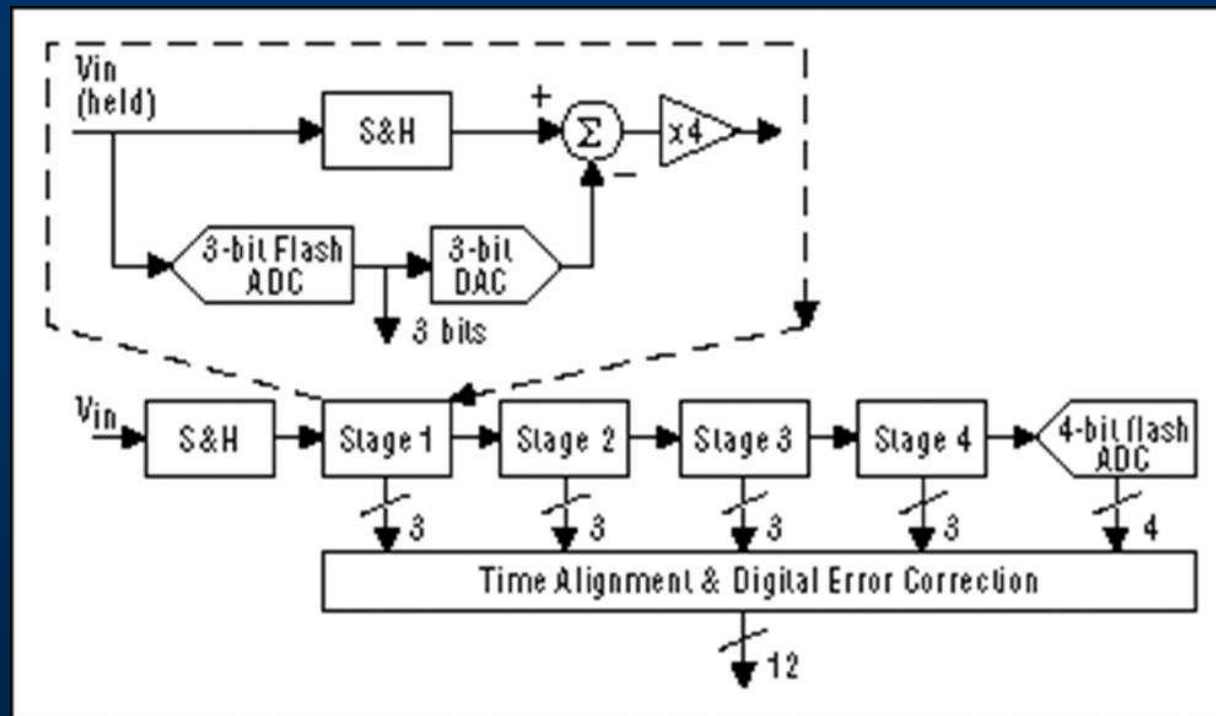
# Paralelni (flash) pretvarači

- Velika brzina pretvorbe (veća od 1Gsp/s), mala razlučivost (do 8 bita)
- Pretvorba se obavlja u jednom koraku.
- Pretvarač sadrži  $2^N - 1$  komparatora.
- Naponsko djelilo sa  $2^N$  otpornika generira referentne napone s kojima se uspoređuje ulazni napon



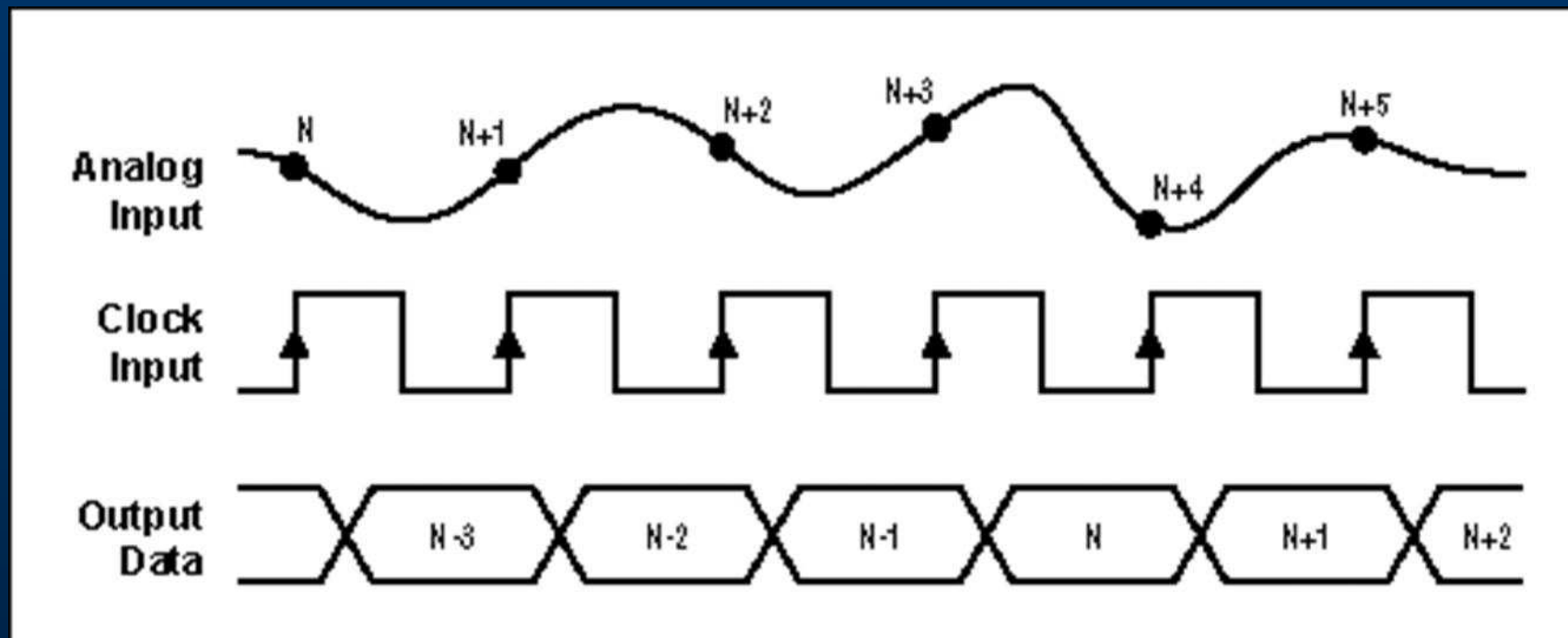
# Cjevovodni (pipelined) pretvarači

- Kompromis između brzine pretvorbe (~200MSps), razlučivosti (8-16 bita) i složenosti izvedbe.
- Nakon završetka pretvorbe na određenom stupnju ostatak uzorka signala se prenosi dalje a taj stupanj je slobodan za sljedeći uzorak



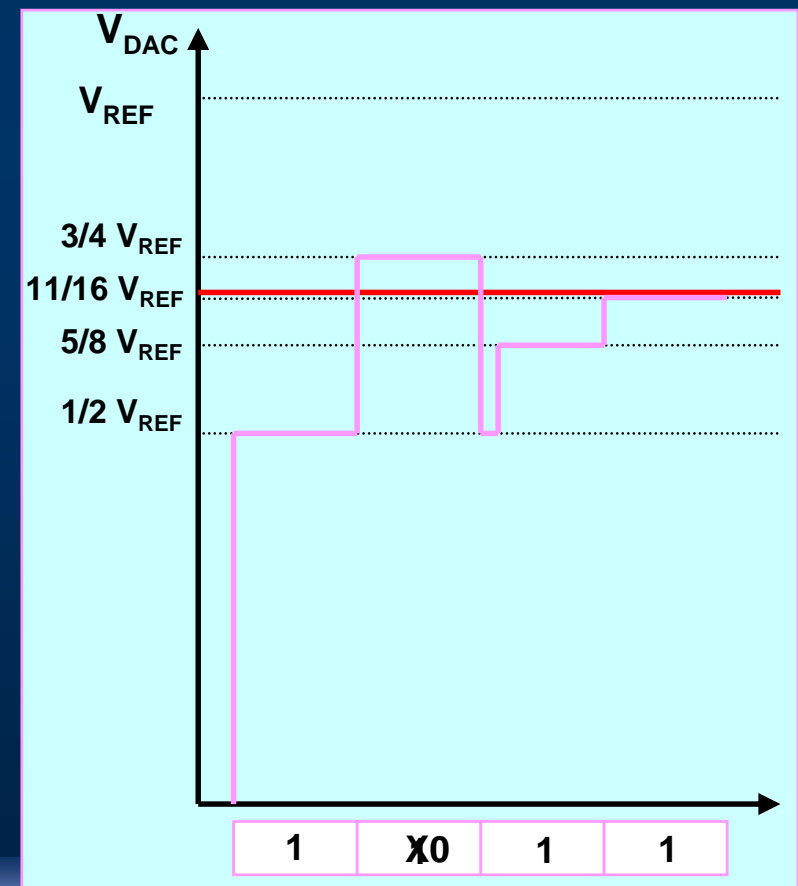
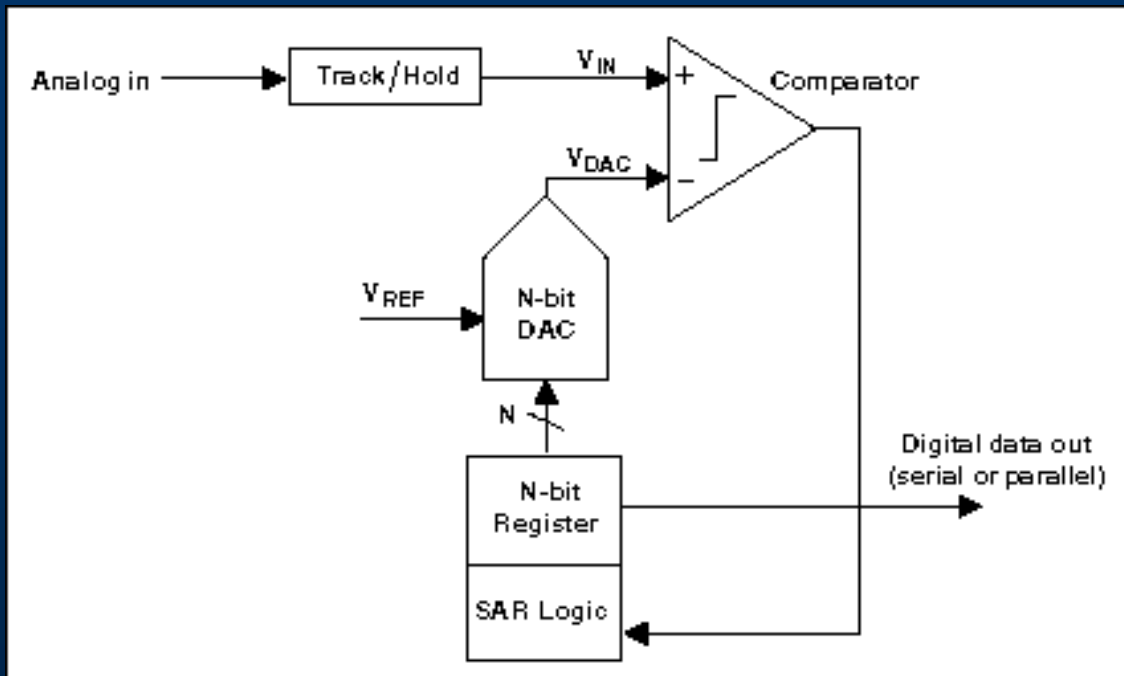


☞ Kašnjenje (*latency*) kod cjevovodnih pretvarača:



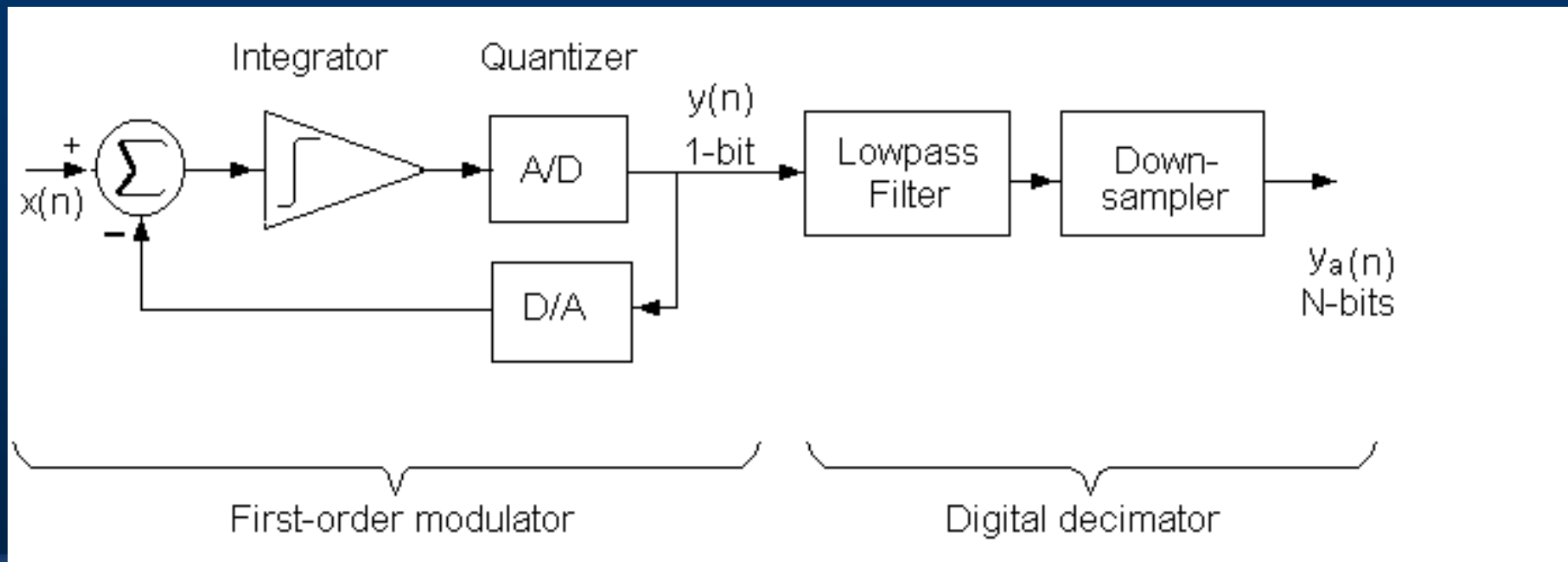
# Pretvarači sa sukcesivnom aproksimacijom

- Brzina pretvorbe do 5 Msp/s, razlučivost 8-16 bita.
- Pretvorba se obavlja postupkom binarnog pretraživanja.



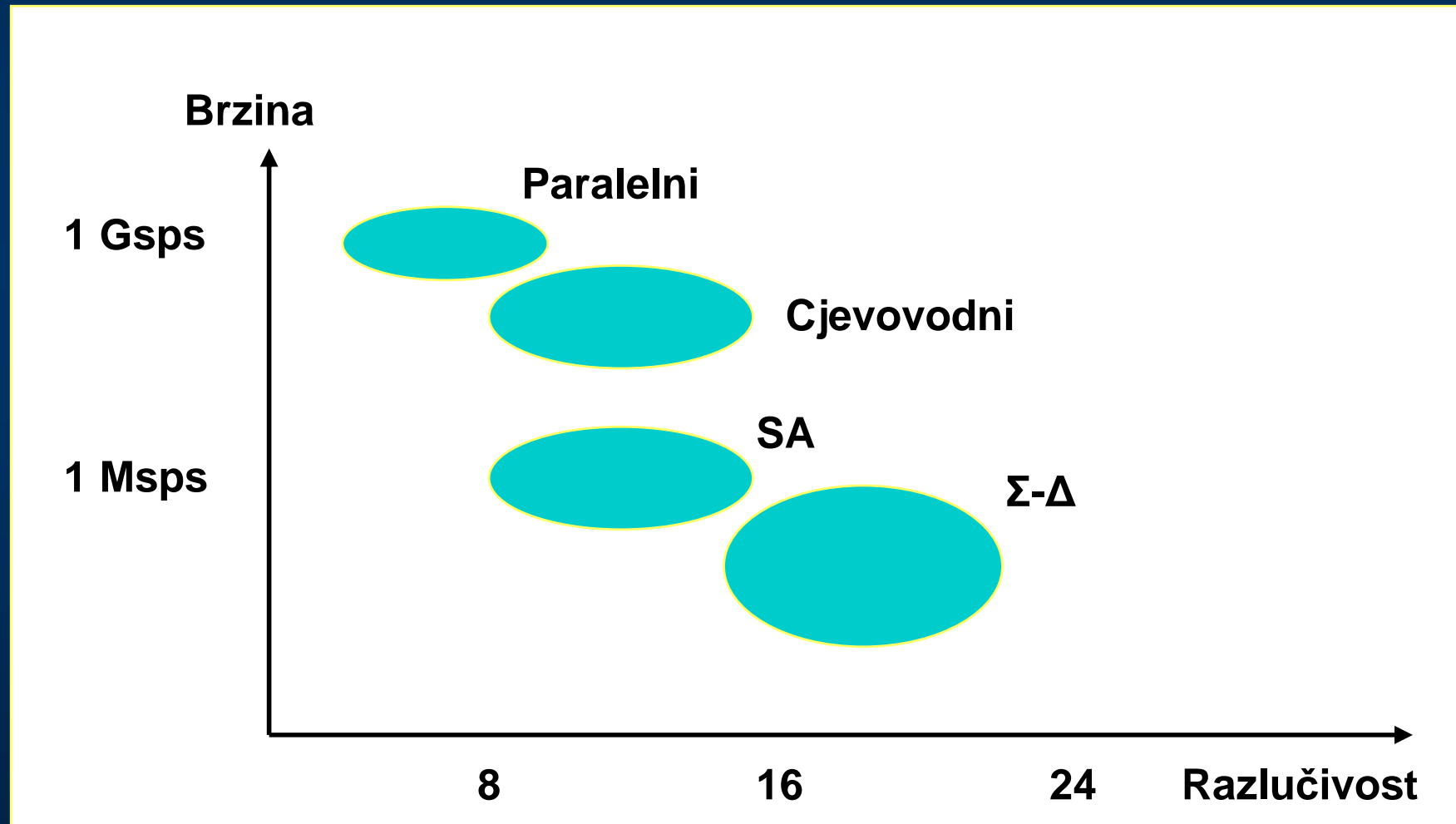
# Sigma – delta pretvarači

- Brzina pretvorbe do 1 Msps (tipično 0,1 Msps), razlučivost 14-20 bita).
- Ulazni signal se kompenzira u povratnoj vezi preko 1-bit A/D i D/A pretvarača frekvencijom višestruko većom od osnovne frekvencije A/D pretvarača. Gustoća logičkih jedinica u signalu  $y(n)$  proporcionalna je vrijednosti ulaznog signala.

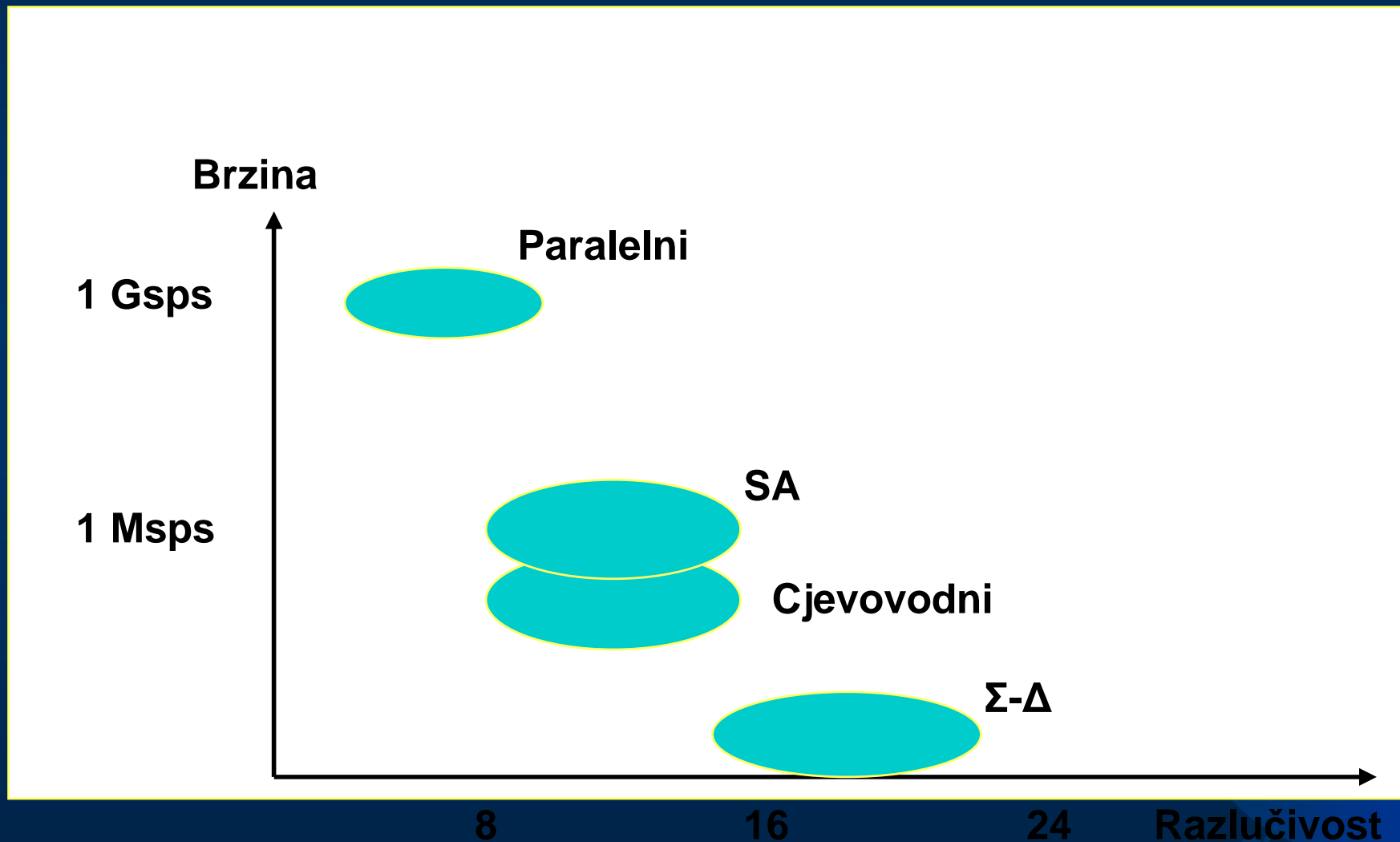


# Usporedba A/D pretvarača

➤ Kontinuirana pretvorba jednog analognog signala:



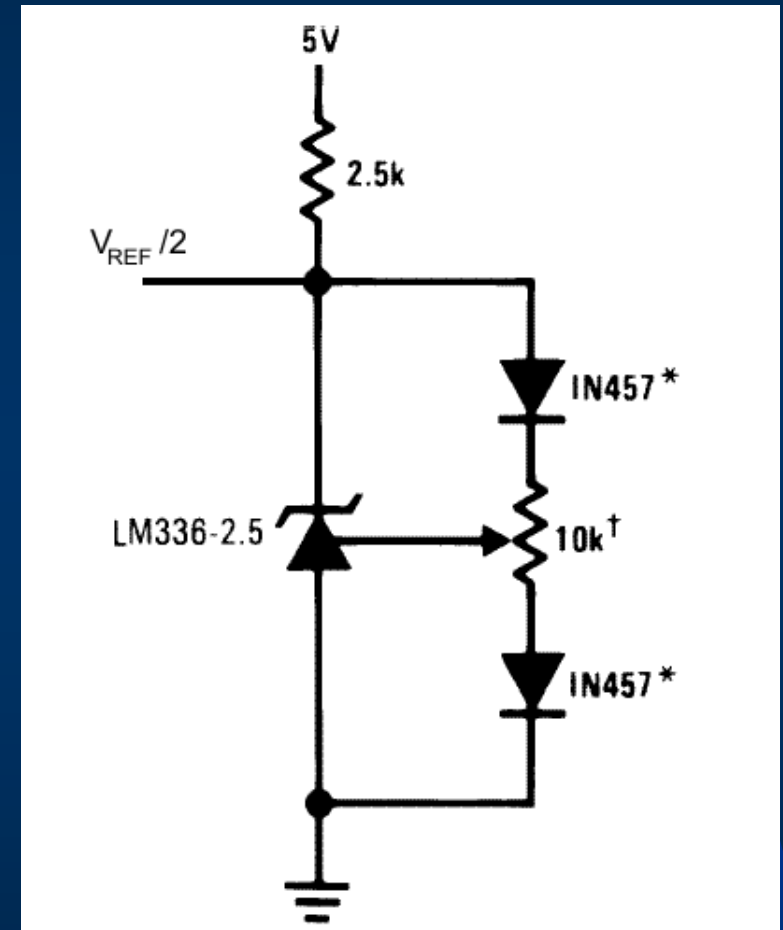
- Pretvorba više analognih signala (multipleksiranje):



# Praktična rješenja - analogni dio

## ➔ Generiranje referentnog napona:

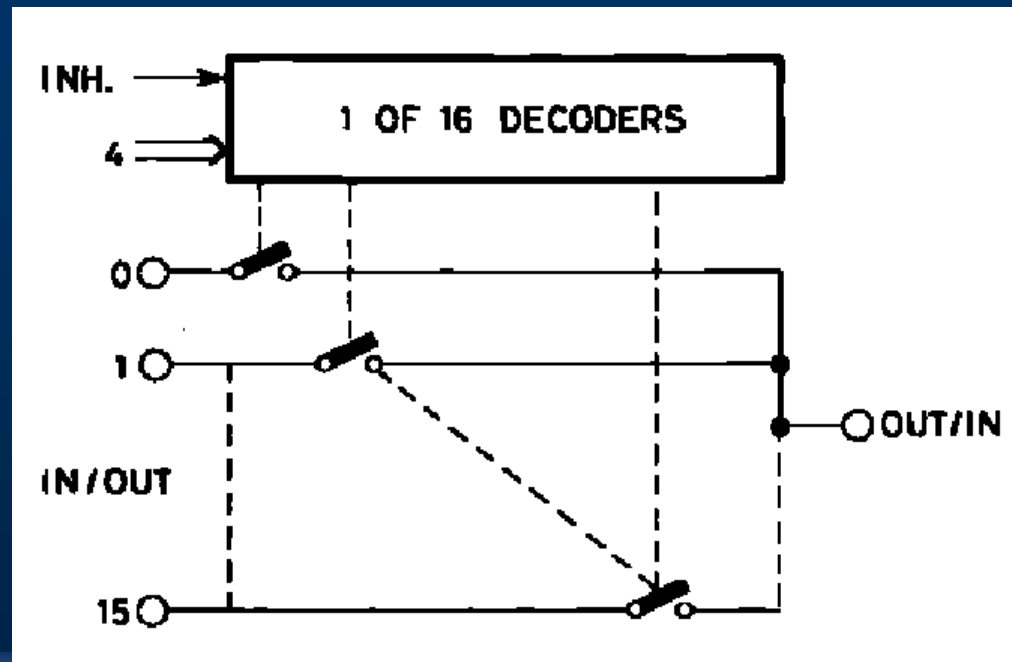
- A/D pretvarači u pravilu imaju ulazni signal  $V_{REF}/2$  koji određuje polovinu opsega ulaznog signala A/D pretvarača
- Prikazana izvedba omogućuje precizno podešavanje referentnog napona uz temperaturnu kompenzaciju.
- Stabilnost referentnog napona uz kompenzaciju ili kontrolu temperature je bolja od 20 ppm.



# Praktična rješenja - analogni dio

## ➔ Analogno multipleksiranje:

- Omogućuje korištenje jednog A/D pretvarača za pretvorbu više analognih signala. Ukupan broj uzoraka koji je moguće pretvoriti u jedinici vremena dijeli se na više kanala.
- Nedostatak je što nije moguće dobiti uzorke svih signala u istom trenutku.
- Primjer - 4067B:

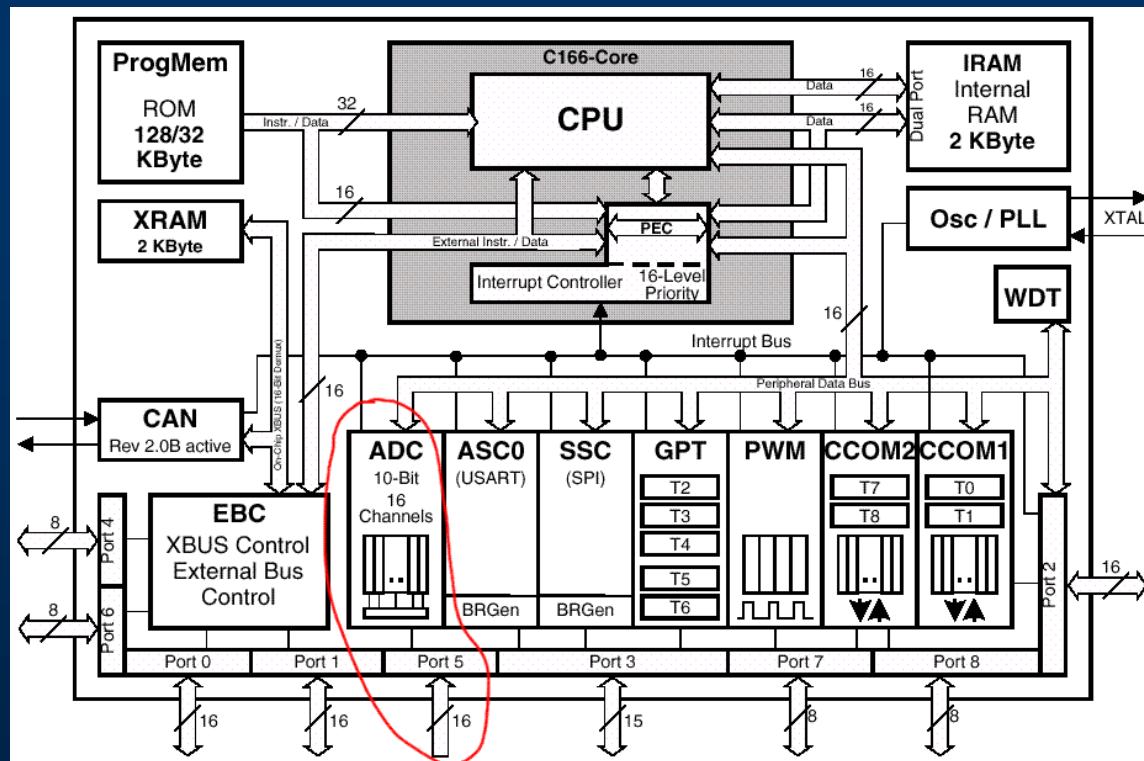


# Praktična rješenja - povezivanje s procesorom

## 1. A/D pretvarač ugrađen u mikrokontroler

- Prednosti: manji broj komponenti u sustavu, ne troše se U/I linije mikrokontrolera za komunikaciju s A/D-om
- Nedostaci: razlučivost ograničena na 10 bita, a način pretvorbe na sukcesivnu aproksimaciju

[www.siemens.com](http://www.siemens.com)

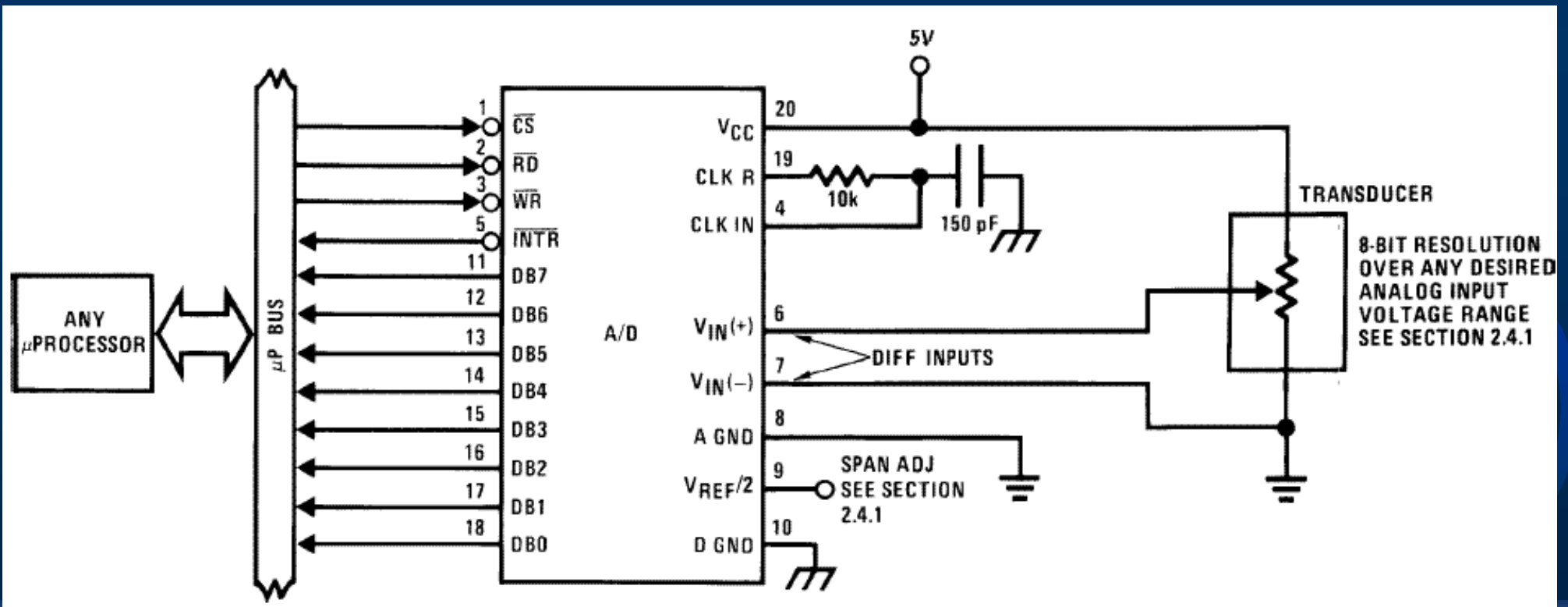




# Praktična rješenja - povezivanje s procesorom

## 2. A/D pretvarač vezan na sabirnicu mikroprocesora

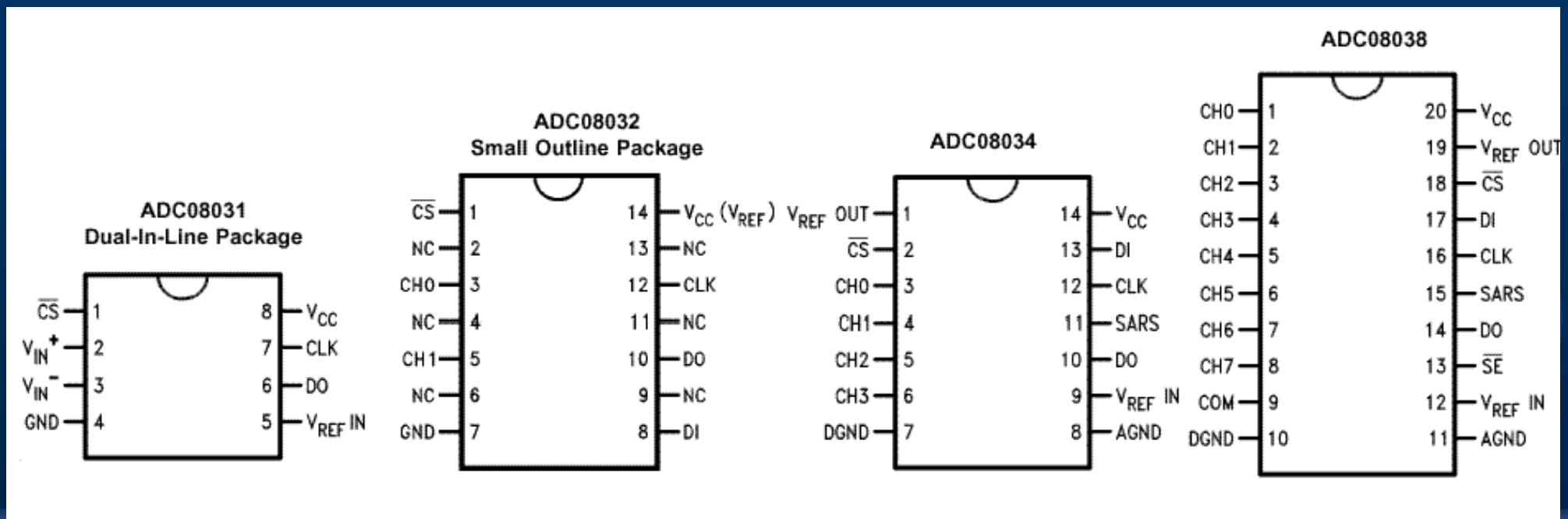
- Prednosti: nema ograničenja na vrstu pretvarača, brzinu i razlučivost.
- Nedostaci: Potrebno je koristiti vanjsku sabirnicu.
- Primjer – ADC0804 (8 bita, 10 ksps). Izvor: [www.national.com](http://www.national.com)



# Praktična rješenja - povezivanje s procesorom

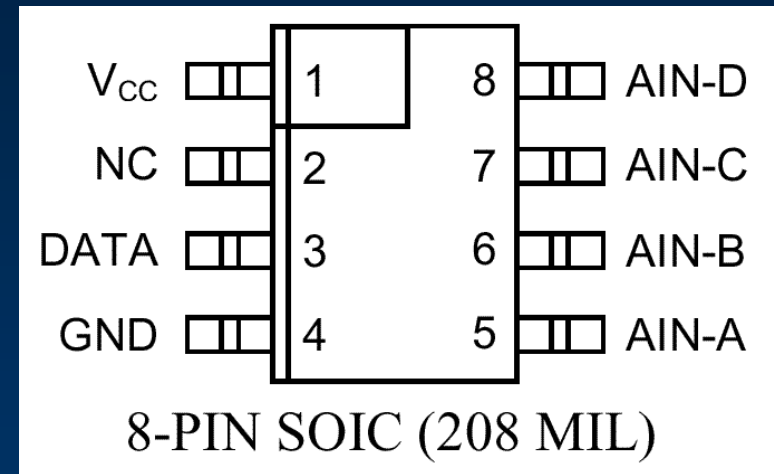
## 3. A/D pretvarač vezan serijski

- Prednosti: potreban mali broj signalnih linija (1-3), pretvarač može biti udaljen od procesora (npr. uz senzor).
- Nedostaci: Ograničena brzina prijenosa podataka.
- Primjer – ADC08031-ADC08038 (sukcesivna aproksimacija, 1-8 analognih ulaza, 8 bita, 0,1 Msp/s, sinkrona serijska komunikacija do 1 Mbit/s). Izvor: [www.national.com](http://www.national.com)



## ☞ Primjer: Dallas DS2450

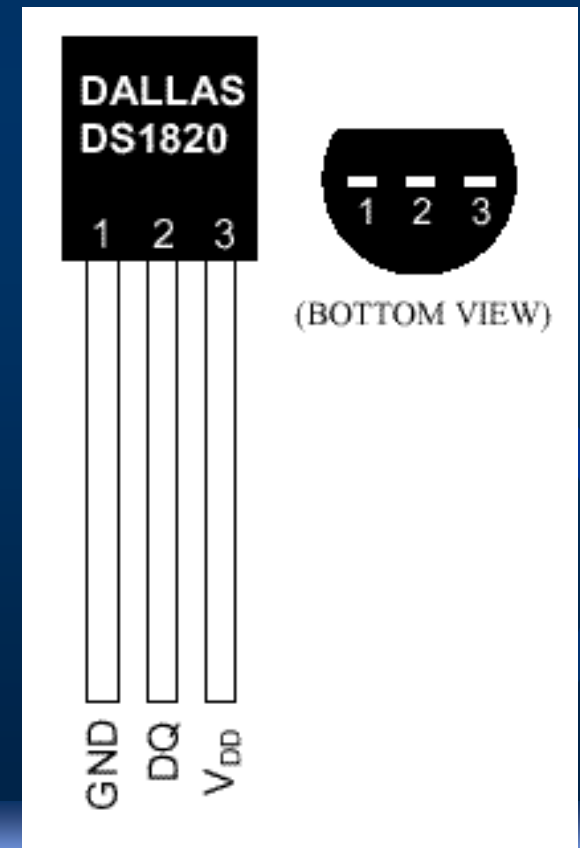
- Sukcesivna aproksimacija, 4 analogna ulaza, programabilna razlučivost 8-16 bita (garantirana točnost 8 bita), cca. 1 ksp/s, 1-Wire komunikacija 16.3 kbps ili ubrzana do 142 kbps.
- Neiskorištene analogne ulaze moguće je koristiti kao digitalne izlaze.
- Moguće napajanje preko DATA linije.



## • Primjer: Dallas DS18S20 digitalni senzor temperature

- Razlučivost 9 bita (1 bit = 0,5°C), vrijeme pretvorbe max. 750 ms, 1-Wire komunikacija 16.3 kbps.
- Nema A/D pretvorbe – mjerenje se obavlja usporedbom frekvencija termostabilnog i termoosjetljivog oscilatora.
- Mjerenje temperature u opsegu –55 do +125°C.
- Moguće napajanje preko DQ linije.

Izvor: [www.dalsemi.com](http://www.dalsemi.com)





Sveučilište u

Zagrebu

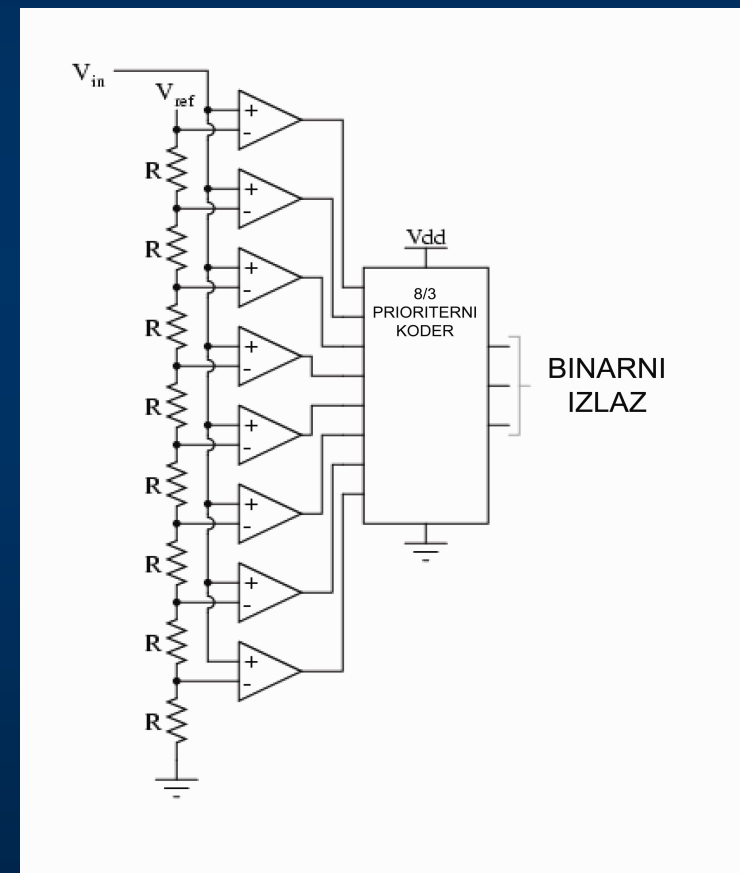
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
(FER)

# RAČUNALA I PROCESI

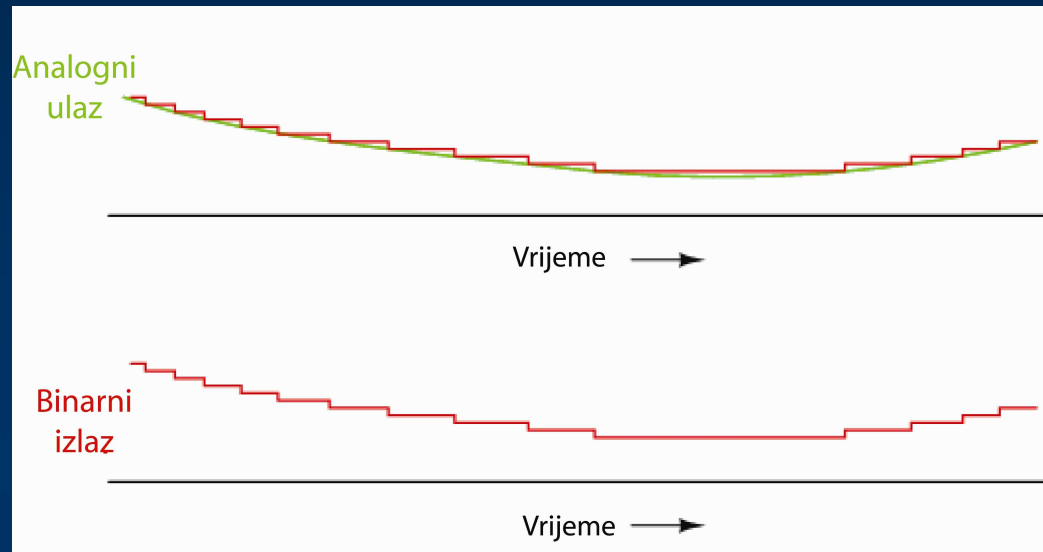
(A/D i D/A pretvorba)

# Paralelni A/D pretvornik

- Otpornicima se dijeli  $V_{ref}$
- Kako analogni ulazni napon premašuje referentni napon na svakom komparatoru, izlaz iz komparatora će postupno preći u «visoko» stanje
- Encoder



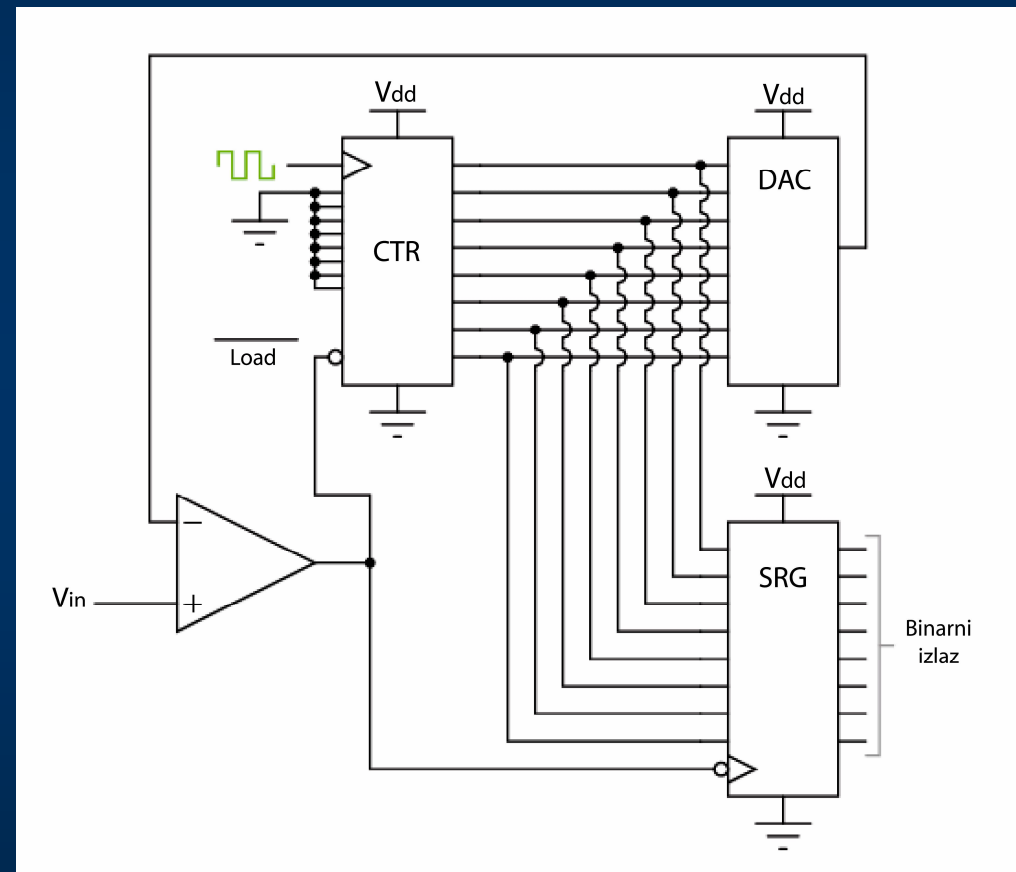
# Analogno-digitalna pretvorba



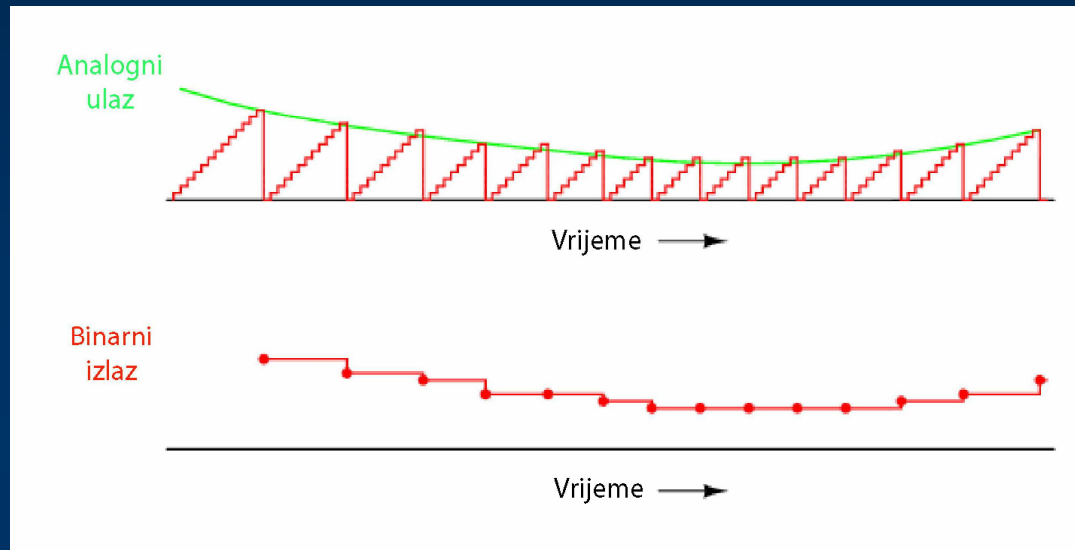
- Najbrži i najjednostavniji pretvornik
- Mana je broj potrebnih komparatora. Za  $n$ -bitovni pretvornik potrebno  $2^n$  komparatora

# Digitalna rampa

- Spajanje izlaza slobodnog binarnog brojila na ulaz D/A pretvornika
- Usporedba analognog izlaza D/A pretvornika s ulaznim signalom
- Izlaz komparatora upotrebljava se za zaustavljanje brojila i njegovo resetiranje



# Digitalna rampa

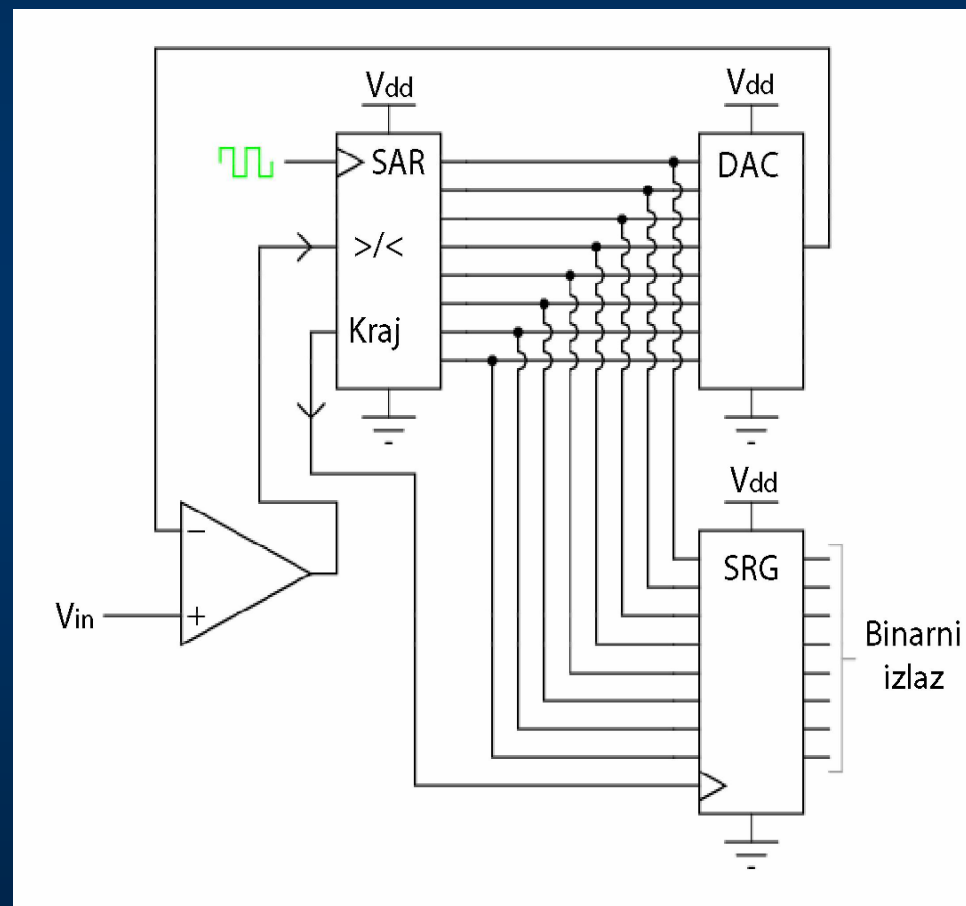


- Broji od nule na početku svakog ciklusa
- Mijenjanje frekvencije ažuriranja neprihvatljivo
- Sporo uzorkovanje analognog signala

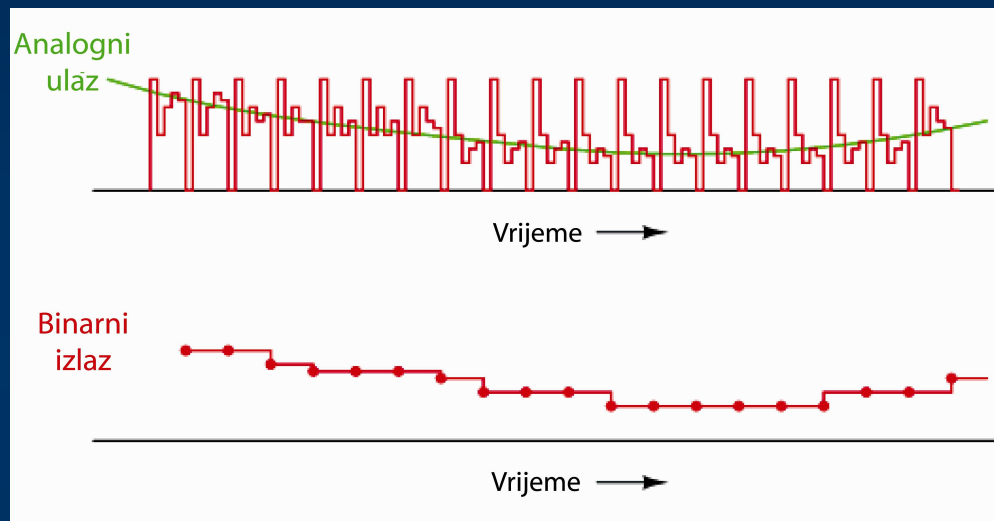


# A/D pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom

- Registar sa sukcesivnom aproksimacijom
- Registar motri izlaz komparatora namještajući izlazne bitove s obzirom na to da li je binarni zbroj veći ili manji od analognog ulaza



# A/D pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom

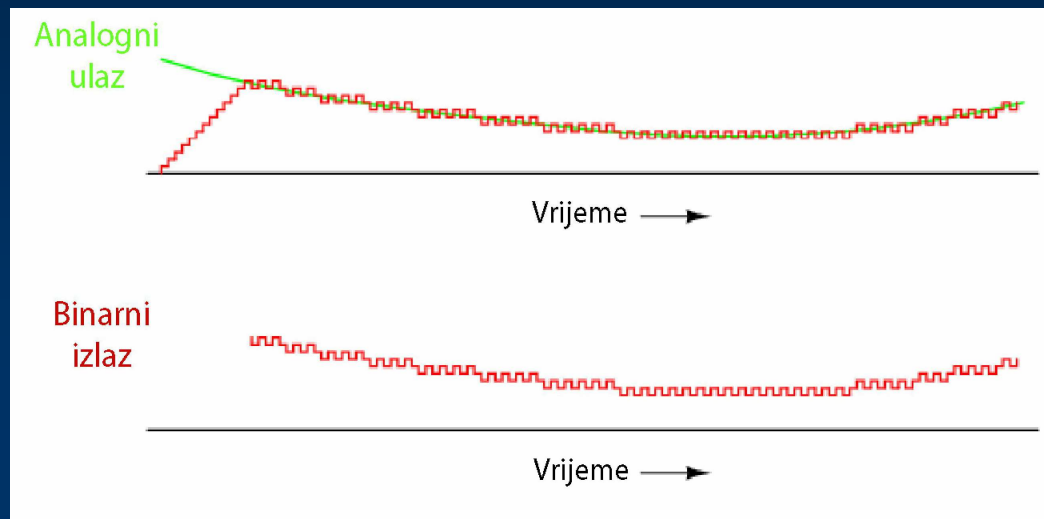


- Ažuriranje se događa u pravilnim intervalima
- Konvergira analognom signalu u mnogo većim koracima





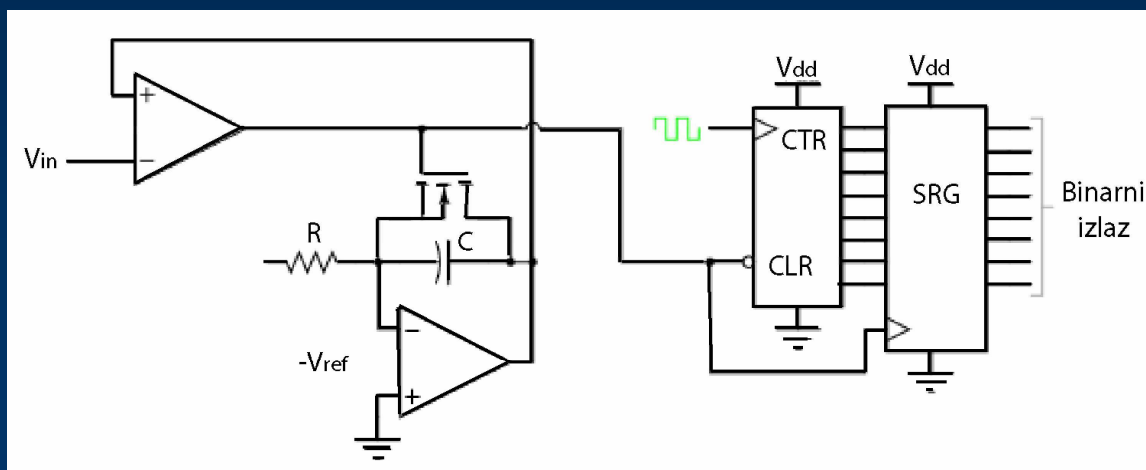
# Prateći A/D pretvornik



- Mnogo manje vrijeme ažuriranja
- Brojilo se nikad ne resetira
- Izlaz se mijenja sa svakim taktom signala vremenskog vođenja (*bit bobble*)

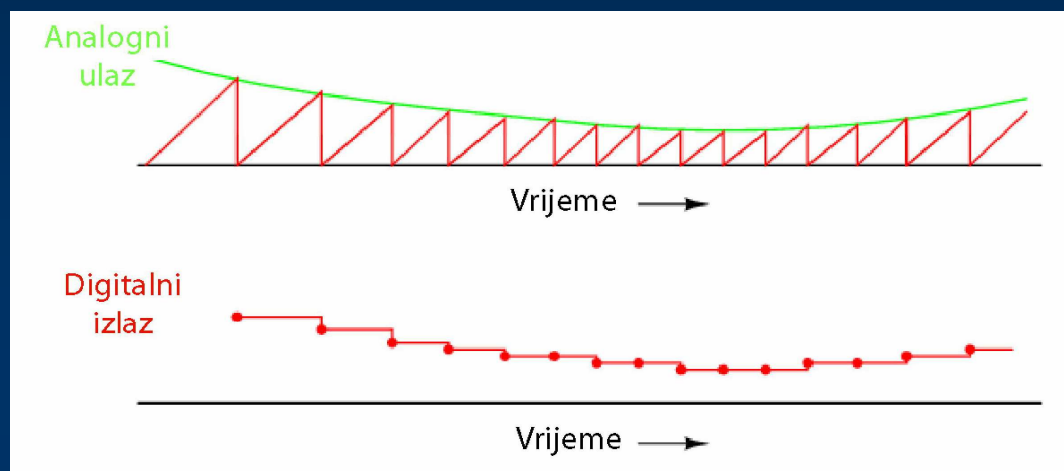


# Integrirajući A/D pretvornik



- Operacijsko pojačalo – integrator – proizvodnja pilastog valnog oblika
- Vrijeme potrebno pilastom naponu da dosegne naponski nivo ulaznog signala mjeri se digitalnim brojom sa frekvencijski preciznim pravokutnim signalom

# Integrirajući A/D pretvornik



- Ima sve nedostatke digitalne rampe
- Calibration drift
  - Mjera integracije i mjera broila nezavisne su jedne o drugoj (varijacija je neizbježna tokom godina)



# Integrirajući A/D pretvornik

## ● Dvo-kosinski pretvornik

- Integrator je vođen pozitivnim analognim ulaznim signalom koji stvara negativnu kosinu
- S određenim referentnim naponom na ulazu stvara se pozitivna kosina a vrijeme se mjeri istim brojiлом



# Integrirajući A/D pretvornik

## ● Dvo-kosinski pretvornik

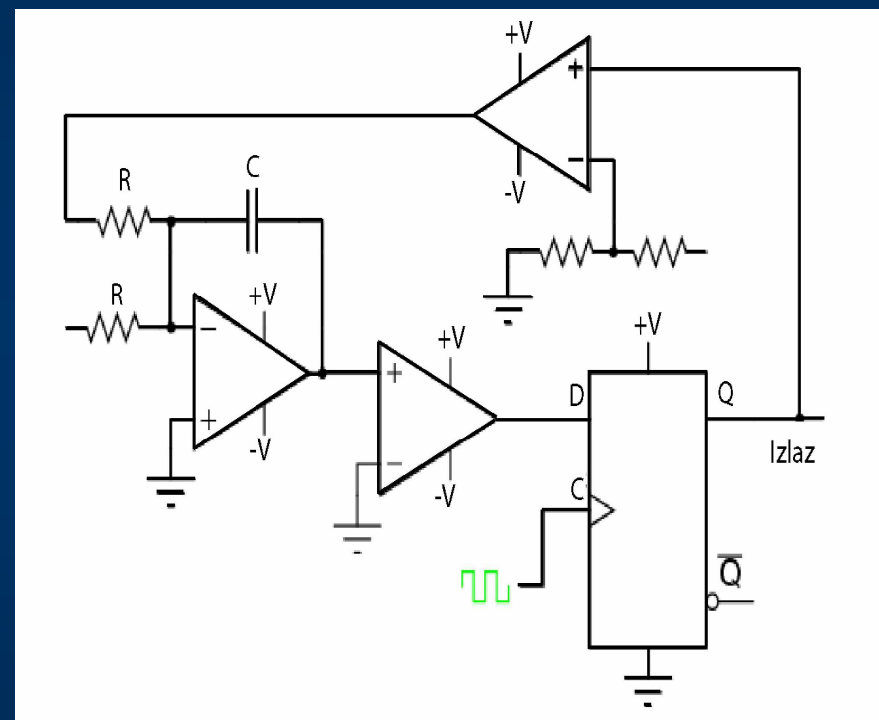
- Rješenje calibration drifta
  - Da se brzina brojača iznenadno poveća, to bi smanjilo period u kojem se integrator «zamotava» (rezultira sa manje napona akumuliranog u integratoru), ali to znači da će brojati brže i dok se integrator «odmotava»
- Računa prosječnu vrijednost stvarnog ulaznog signala





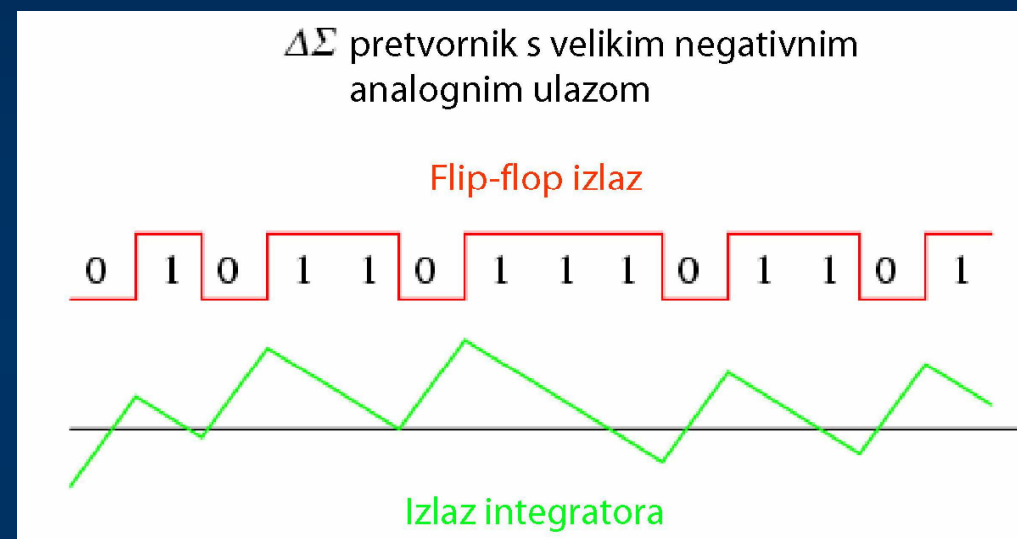
# Delta sigma $\Delta\Sigma$ A/D pretvornik

- Prvi komparator osjeti razliku ( $\Delta$ ) između izlaza integratora i 0 V
- Integrator sumira ( $\Sigma$ ) izlaz komparatora s ulaznim analognim signalom



# Delta sigma $\Delta\Sigma$ A/D pretvornik

- Što je ulaz negativniji povratni sistem mora proizvesti više jedinica da dovede izlaz integratora na 0 V



- Oversampling
  - Uzimanje više uzoraka istog analognog signala
  - Izlaz je prosječna vrijednost
  - Krajnji rezultat je porast broja bitova dobivenih iz signala

# Procjena performansi

## ● Rezolucija

- Broj bitova koji su izlaz iz pretvornika

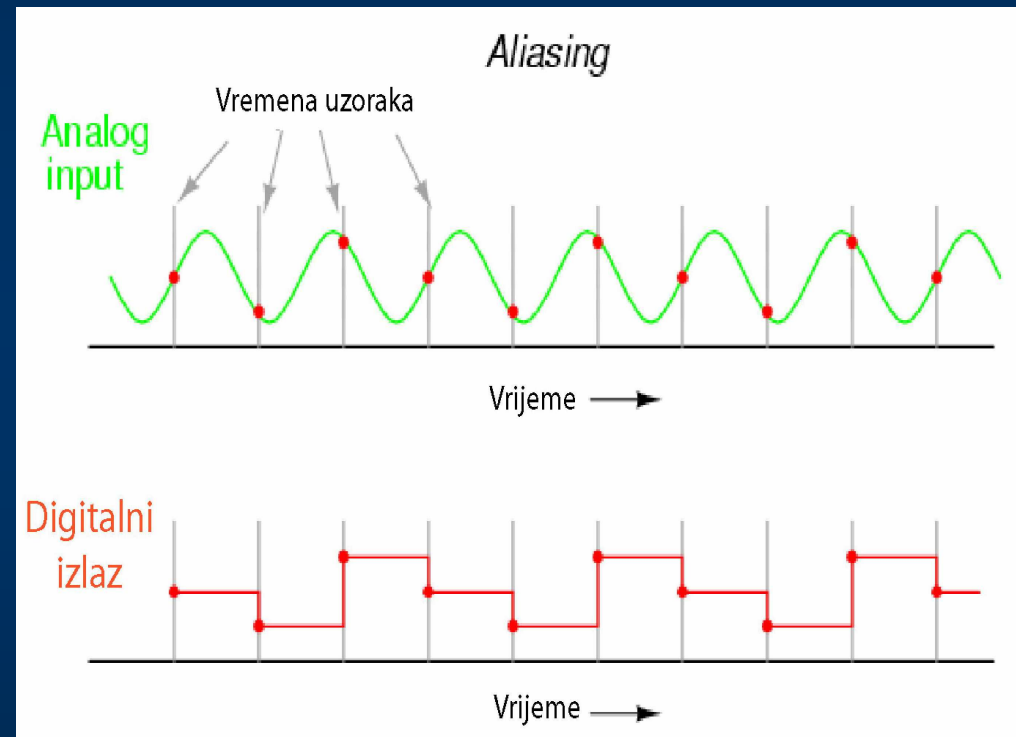
## ● Brzina (frekvencija uzorkovanja)

- Brzina kojom pretvornik daje novi binarni broj
- Nyquistova frekvencija -  $\frac{1}{2}$  frekvencije uzorkovanja
- Aliasing – pretvorba analognog signala čije frekvencije prelaze Nyquistovu frekvenciju



# Procjena performansi

- Period izlaznog signala mnogo duži (sporiji) nego je period ulaznog signala
- Oblici ova dva signala nisu ni slični



# Procjena performansi

- Step recovery
  - Brzina promjene izlaza prema velikoj, iznenadnoj promjeni na ulazu
  - Prateći pretvornik – spor step recovery



# Procjena performansi

## ● Rezolucija

- Integracijski ADC, dvo-kosinski ADC, Tracking ADC, ADC sa sukcesivnom aproksimacijom, Flash ADC

## ● Brzina

- Flash ADC, Track ADC, ADC sa sukcesivnom aproksimacijom, integrirajući ADC, dvo-kosinski ADC

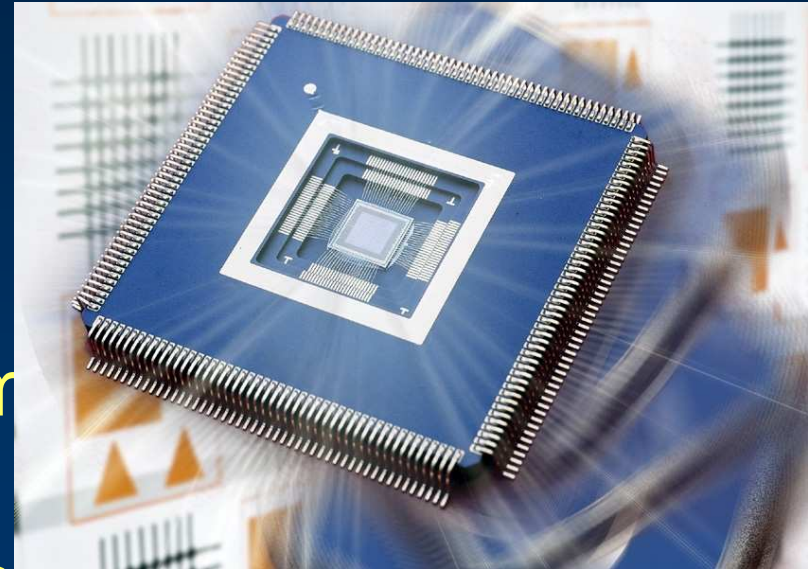
## ● Step recovery

- Flash ADC, ADC sa sukcesivnom aproksimacijom, integrirajući ADC, dvo-kosinski ADC, Track ADC



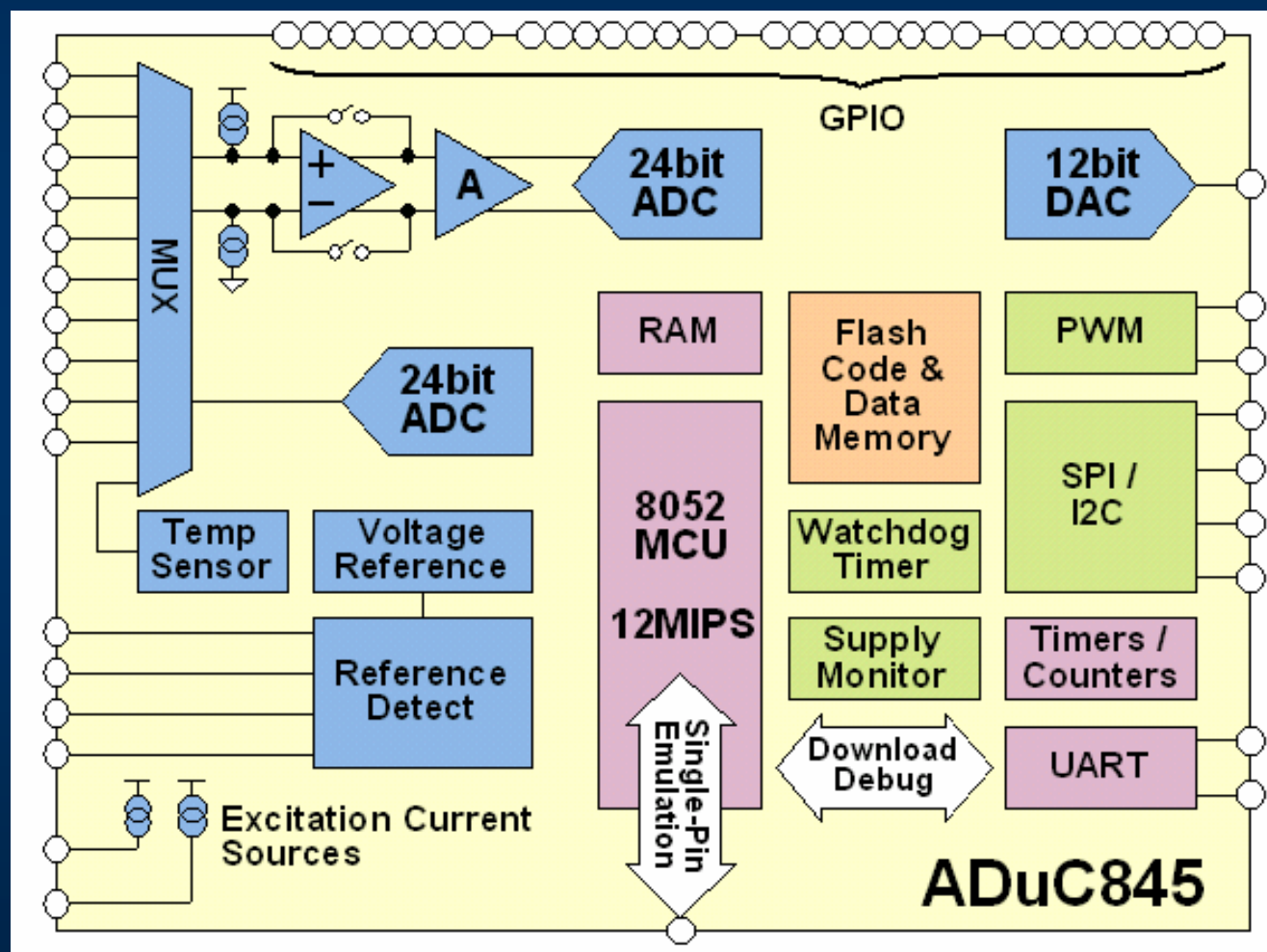
# Mikrokontroleri

- Prvi mikrokontroler:
  - tvrtka *Intel* s oznakom 8022 krajem sedamdesetih godina
- Danas
  - Cijena manje od \$1.00
  - Dizajnira ih se 5 bilijuna godišnje



# Primjeri mikrokontrolera

- ADuC845

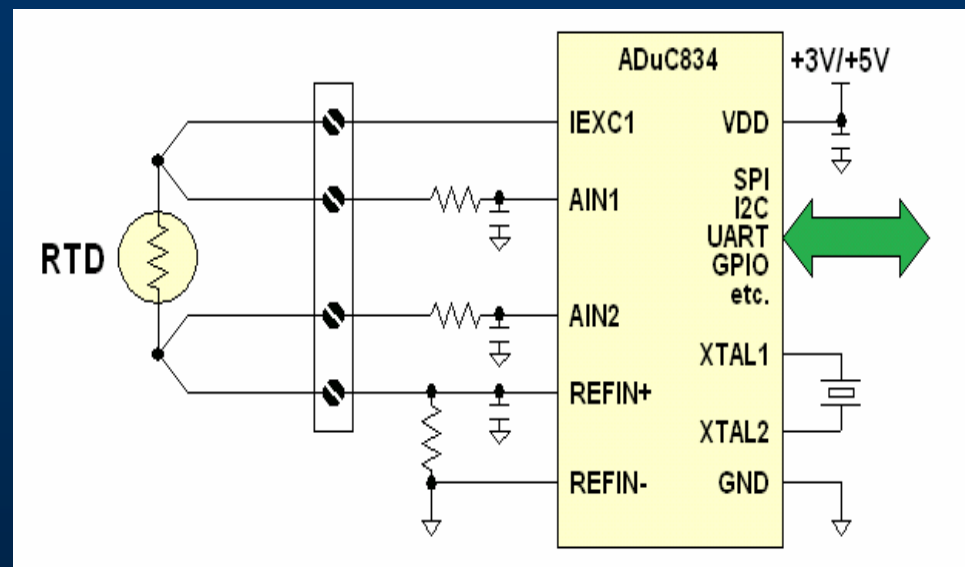
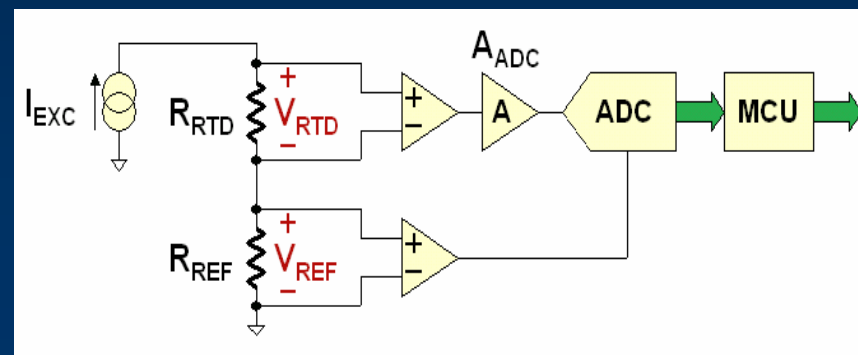




# Senzori - Otpornički temperaturni detektor

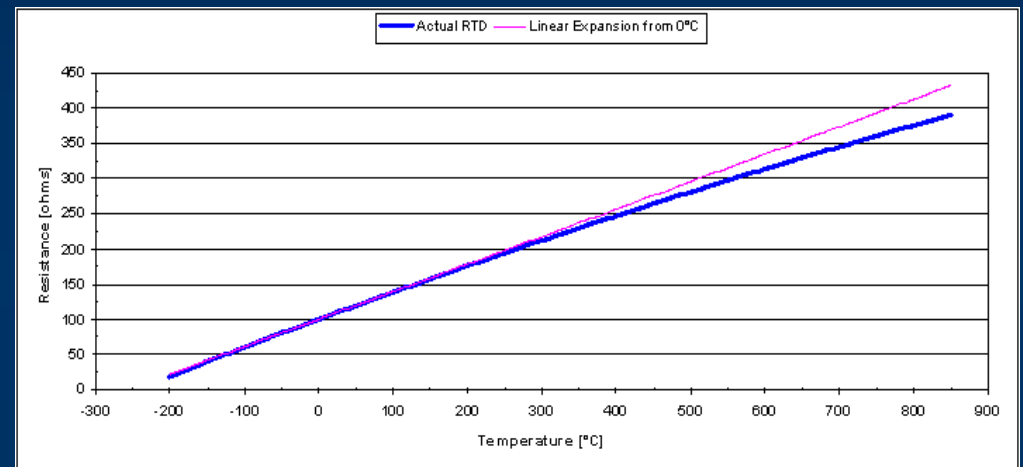
## Otpornički temperaturni detektor

- Mjenjanje otpora u ovisnost o temperaturi
- $-200^{\circ}\text{C}$  do  $+850^{\circ}\text{C}$
- Mjerenje napona na  $R_{\text{RTD}}$  – precizan strujni izvor
- Sa A/D pretvornikom i referentnim naponom – precizan otpornik  $R_{\text{REF}}$



# Senzori

- $R_{RTD}(t) = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100^\circ\text{C})t^3]$   
za  $t < 0^\circ\text{C}$
- $R_{RTD}(t) = R_0 [1 + At + Bt^2]$   
za  $t \geq 0^\circ\text{C}$



- Linearizacija funkcija – ovisnost temperature o otporu
  - Matematički
  - Jednolinearna aproksimacija
  - Višelinearna aproksimacija (potrebne look up-tablice)

# Senzori

- Programsko rješenje linearizacije
- Look-up tablice za linearizaciju

```
C:\ADuC\coefRTD.exe

COEFFICIENT GENERATOR FOR PLATINUM RTDs
September 2003, Analog Devices Inc.

enter minimum temperature 'TMIN' in degC (-200..+850): -200
enter maximum temperature 'TMAX' in degC (-200..+850): 850
enter table size (i.e. # of linear sections) (1..255): 99

generating lookup table...done.
optimizing lookup table...done.
determining overall resultant error band...done.

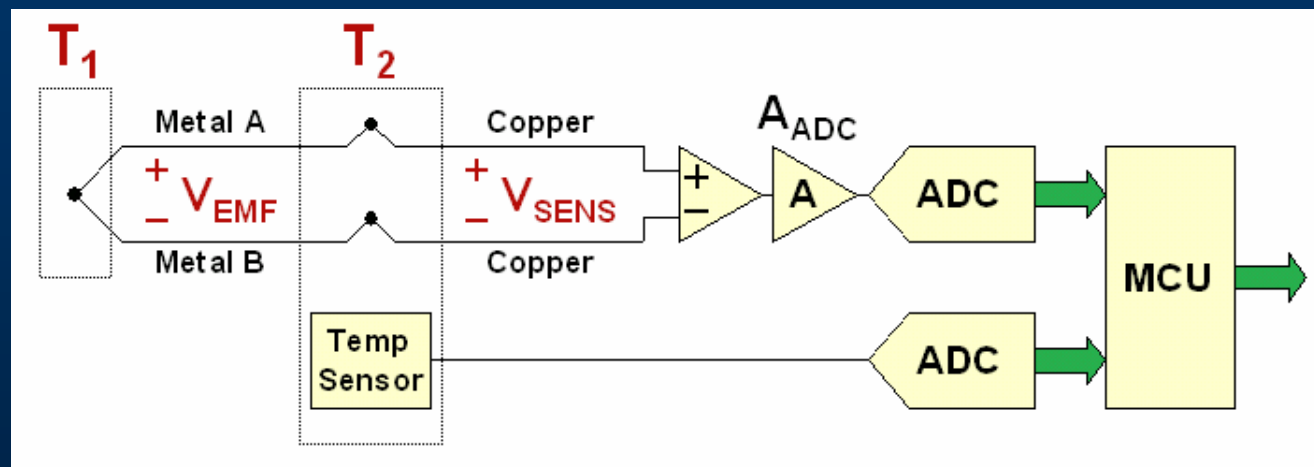
piecewise linear approximation.
linearization routine error band: -0.00401783degC .. 0.00403925degC
lookup table size:
= 99 linear sections
= 100 coefficients
= 400 bytes (4 bytes per floating point coefficient)

generate 8051 C code 'RTDpwl0.c' (y/n)? : y
generating 'RTDpwl0.c'...done
generate error analysis table file 'errRTD.txt' (y/n)? : y
generating 'errRTD.txt'...done
```

# Senzori

- Termopar

- Na spoju dva različita metala - elektromotorni napon ovisan o temperaturi spoja
- temperaturni opseg od 500°C, mali je i relativno jeftin
- Hladni spoj – T2
- Mikrokontrolerom se  $V_{sens}$  i T2 pretvaraju u digitalni oblik, a potom se temperatura izračunava programski



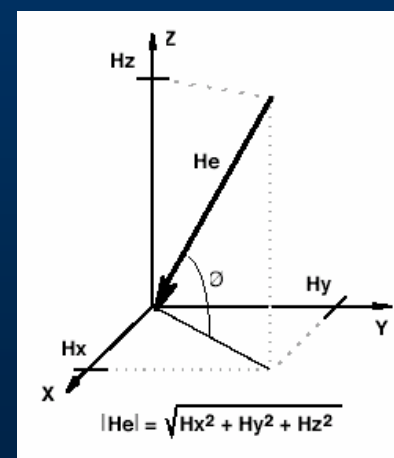
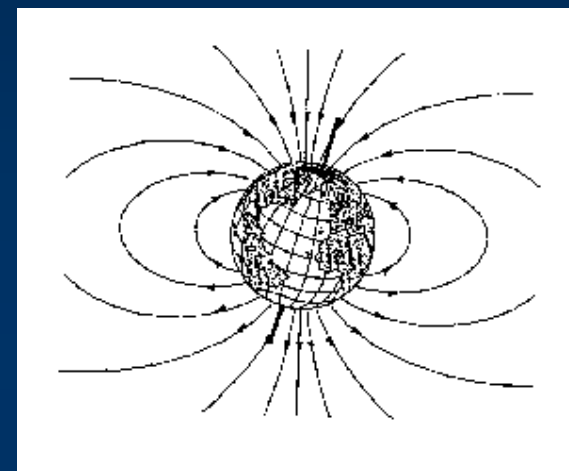
# Primjena

(Digitalni kompas,  
automobilska industrija,  
medicina)



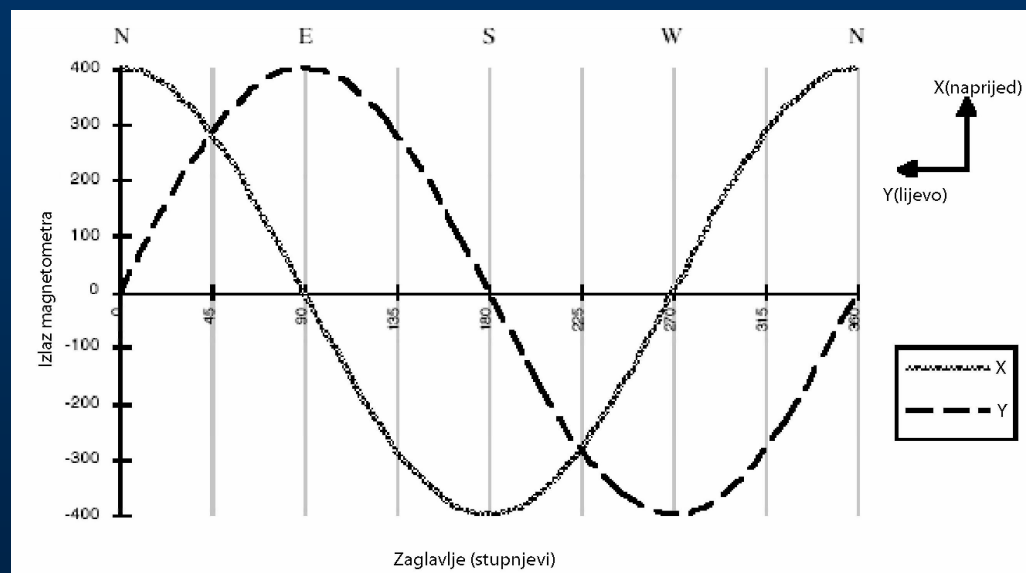
# Digitalni kompas

- Lord Kelvin, 1856.g.
- Magnetorezistivni efekt na feromagnetskom materijalu
- Mijenja se otpor za 2-3% kad se nalaze u magnetskom polju.
- Magnetske silnice
  - Određivanje samo dvije komponente  $H_x$  i  $H_y$  s tim da se kompas drži horizontalno



# Digitalni kompas

- Okretanje oko osi – vrijednosti
  - Smjer ( $y > 0$ ) =  $90 - [\text{arcTAN}(x/y)] * 180$
  - Smjer ( $y < 0$ ) =  $270 - [\text{arcTAN}(x/y)] * 180$
  - Smjer ( $y = 0, x < 0$ ) =  $180.0$
  - Smjer ( $y = 0, x > 0$ ) =  $0.0$

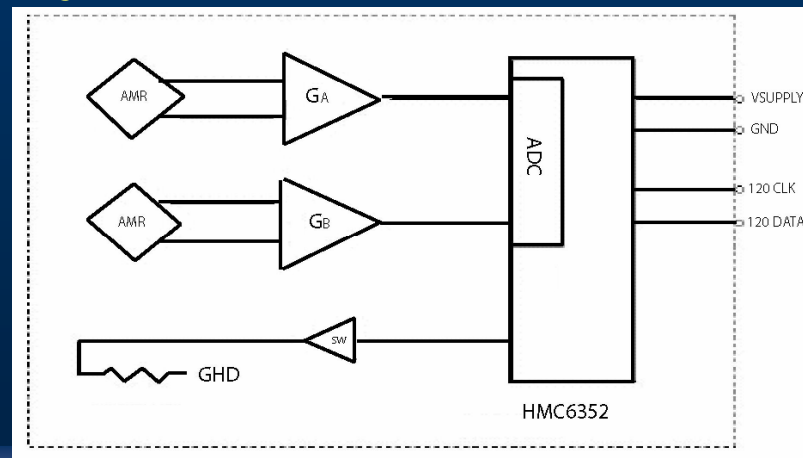
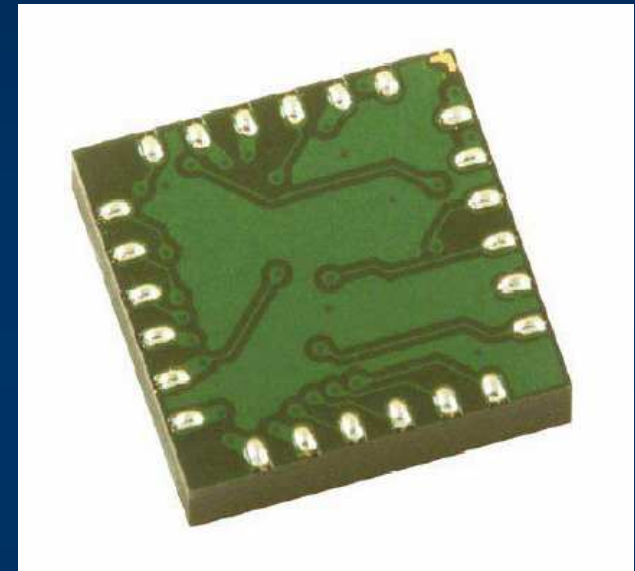


# Digitalni kompas

- Honeywellov HMC6352, dvo-osni integrirani digitalni kompas

- Dva senzora s A/D pretvornicima i integrirani krug za potrebna izračunavanja

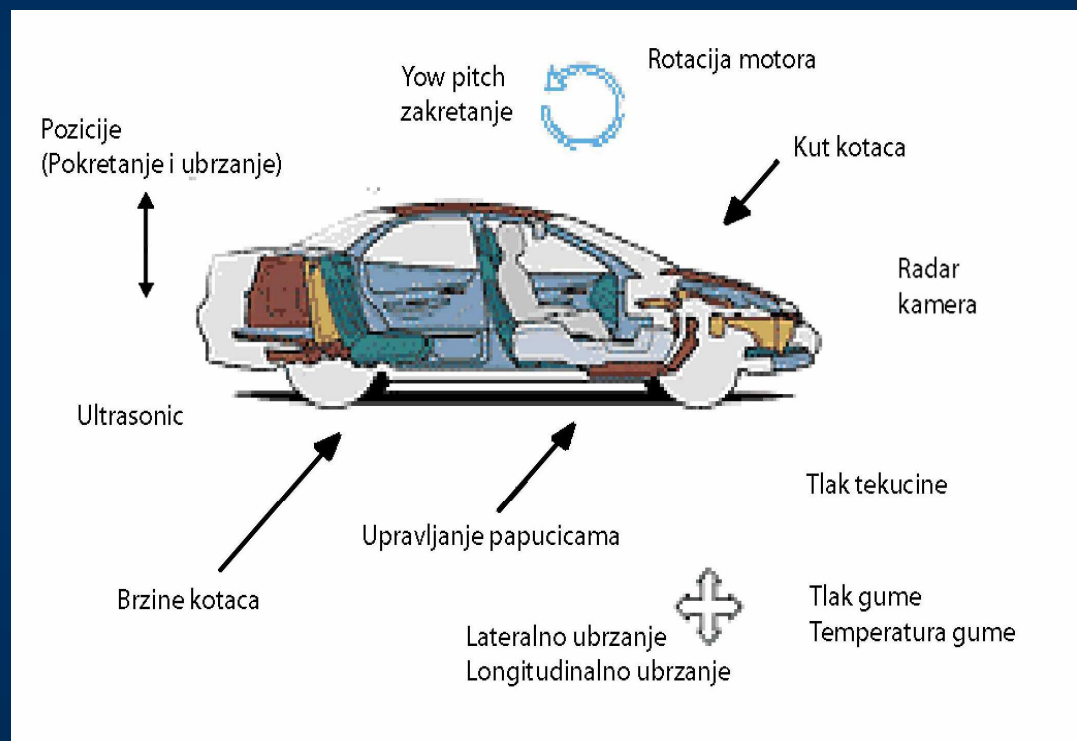
- 6.5 mm<sup>2</sup>
- Jeftin





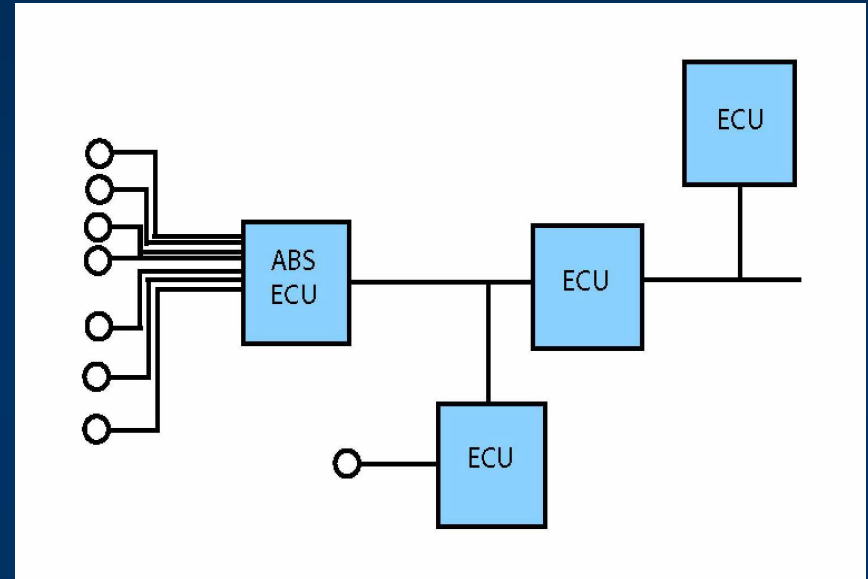
# Automobilska industrija

- Pобољшanje performansi i sigurnosti
- Veća cijena
- Povećanje složenosti



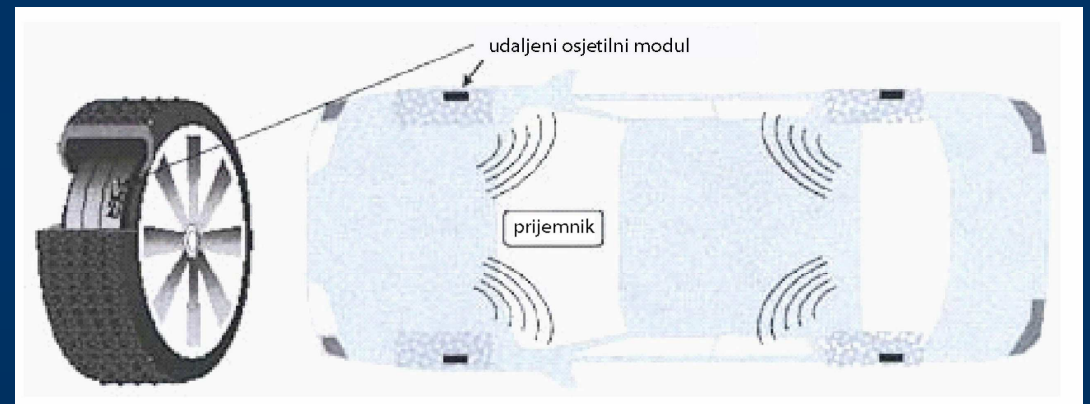
# Anti-lock braking system (ABS)

- Jedan senzor u svakom kotaču
- Izračunava se brzina vozila
- Pomoću brzine se računa pomak svakog kotača
- Postizanje optimalne moći kočenja
- Bočna stabilnost i kontrola okretaja
  - Senzor kuta upravljanja, senzor stope promjene smjera, bočni akcelerator



# Mjerenje tlaka guma

- Senzor u gumi mjeri unutrašnji tlak zraka
- Osjetilni modul
  - Senzor za tlak
  - Signalni procesor
  - Temperaturni senzor
  - RF odašiljač
  - Baterija

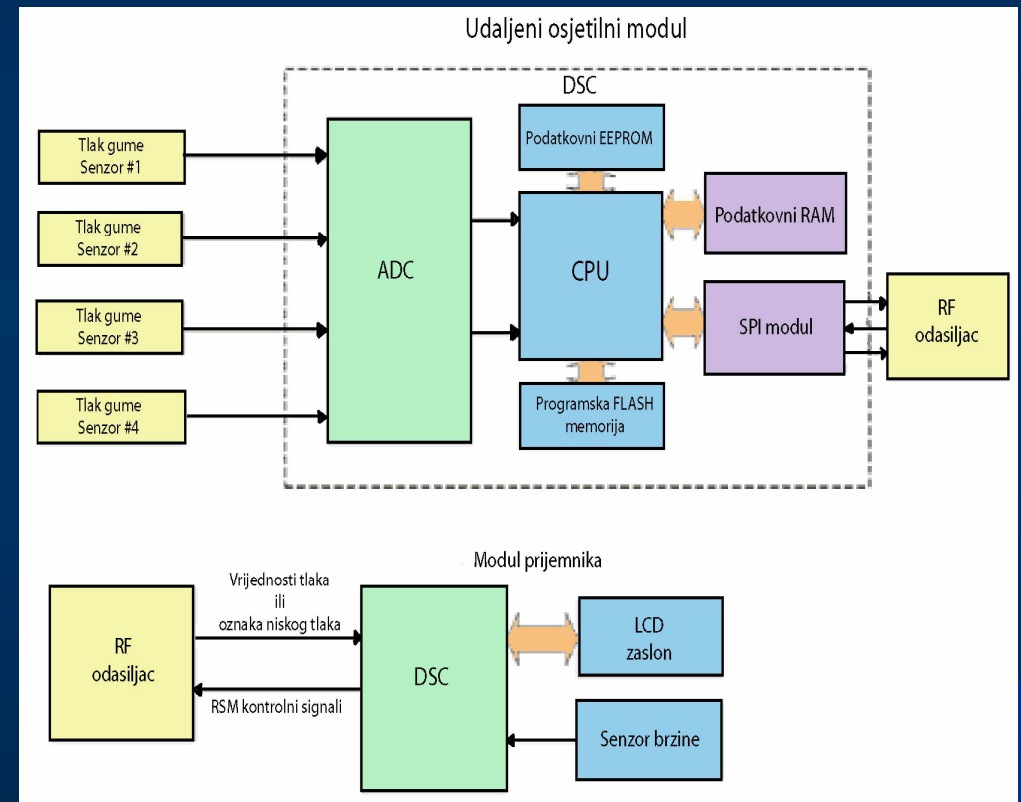


# Mjerenje tlaka guma

## • Senzor radi u četiri načina

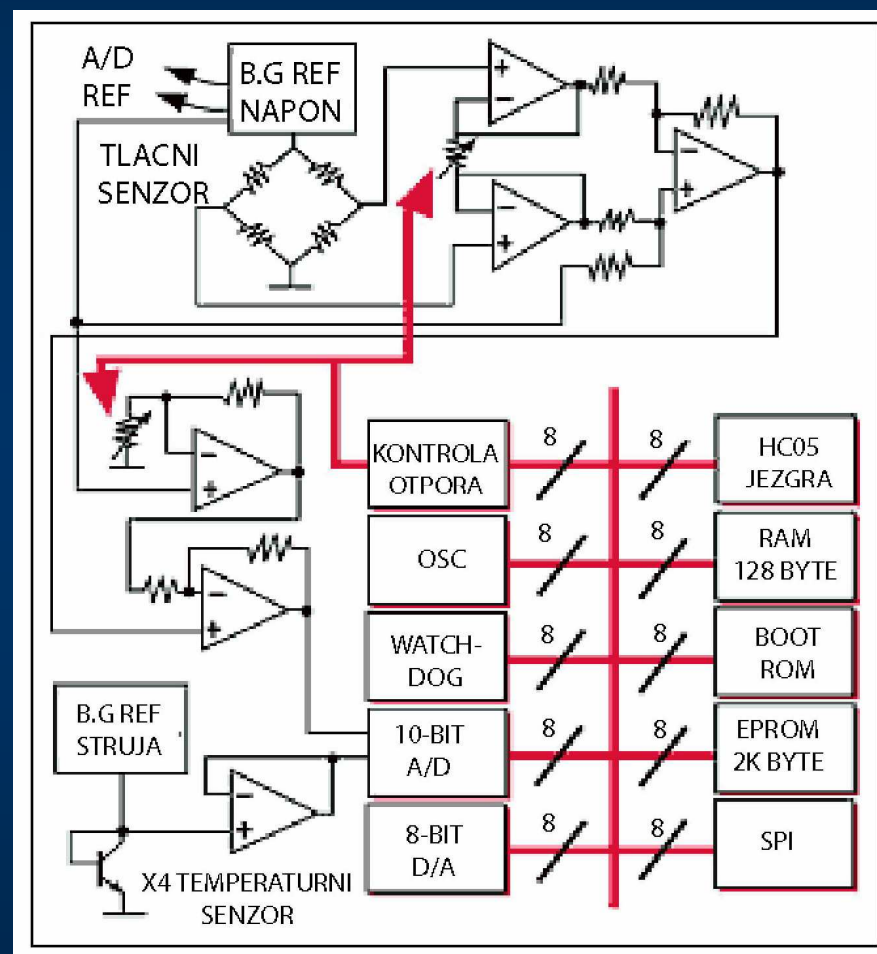
- Standby
- Mjerenje tlaka
- Mjerenje temperature
- Čitanje

## • Načini kodirani kroz ulazne nožice kontrolirane mikrokontrolerom



# Senzori za detekciju sudara

- Senzor pritiska unutar ploče vrata
- Detekcija promjene pritiska prilikom udarca
- Senzor integriran u mikrokontroler
- Očitanje senzora pomoću A/D pretvornika



# Senzor za detekciju sudara

- Izlaz pretvornika tlaka uvjetovan je promjenjivim gainom i offsetom pojačala na ulazu
- Kontrolira ga program pohranjen u mikrokontroleru
- Za postizanje maksimalne točnosti odabran A/D pretvornik rezolucije 10 bita



# Uporaba u medicini

- Danas medicinska pomagala prikladna za kućnu uporabu, mala, lagana, jednostavna za korištenje
- Senzori za pretvorbu različitih tipova podražaja u električni oblik



# Uređaj za kontrolu inkontinencije

- Mikroelektronički mišićni i živčani stimulator
- Dizajniran za potkožnu uporabu
- *Zooming A/D* pretvornik integriran u mikrokontroleru





# Uređaj za kontrolu inkontinencije

- A/D pretvornik pojačava ulazni signal prije pretvorbe u 16-bitni kod
- Mikrokontrolerom postižu se precizna namještanja offseta i gaina
- Omogućeno mjerenje malog signala s velikim offsetom

