



# Sveprisutno računarstvo

## 2. Ulaz

1. Upravljanje u otvorenom i zatvorenom krugu
2. Osjetila
3. Informacije, oblici informacija
4. D/A pretvorba (1. dio)
5. A/D pretvorba
6. Principi rada A/D pretvornika

# Creative Commons



[Sveprisutno računarstvo](#) by Hrvoje Mlinarić & Igor Čavrak, FER  
is licensed under [CC BY-NC-SA 4.0](#)

## **Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)**

This license requires that reusers give credit to the creator.

It allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, for noncommercial purposes only.

If others modify or adapt the material, they must license the modified material under identical terms.

**BY:** Credit must be given to you, the creator.

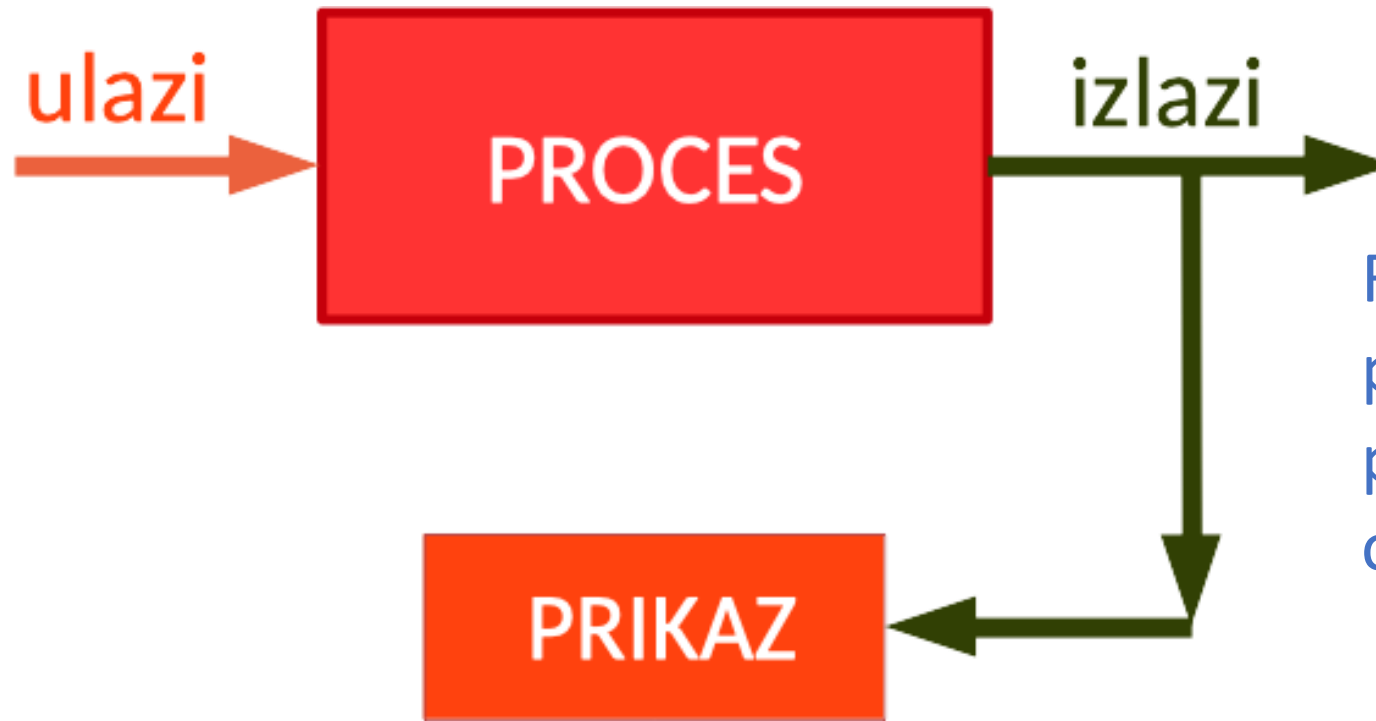
**NC:** Only noncommercial use of your work is permitted.

**SA:** Adaptations must be shared under the same terms.



## 2.1 Upravljanje u otvorenom i zatvorenom krugu

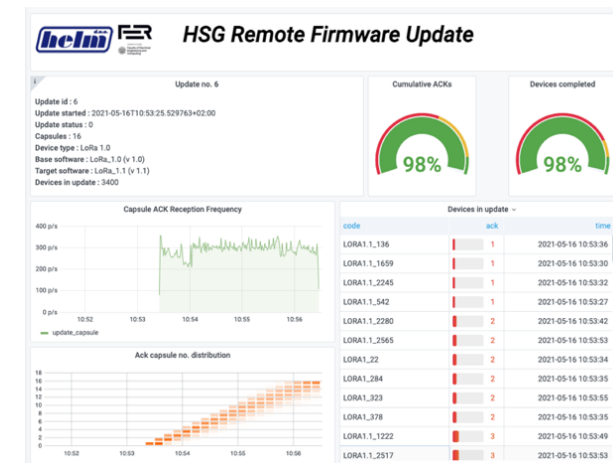
# Upravljanje procesima (I)



praćenje (nadzor)

★ EUROPA: Liga Prvaka - Playoff					
☆	75	Bayern	5	(4)	
		Salzburg	1	(0)	
☆	70	Liverpool	0	(0)	
		Inter	1	(0)	

Računalo ne upravlja procesom, samo služi za prikaz (pohranu ...) informacija o izlazu procesa/objekta



# Upravljanje procesima (II)

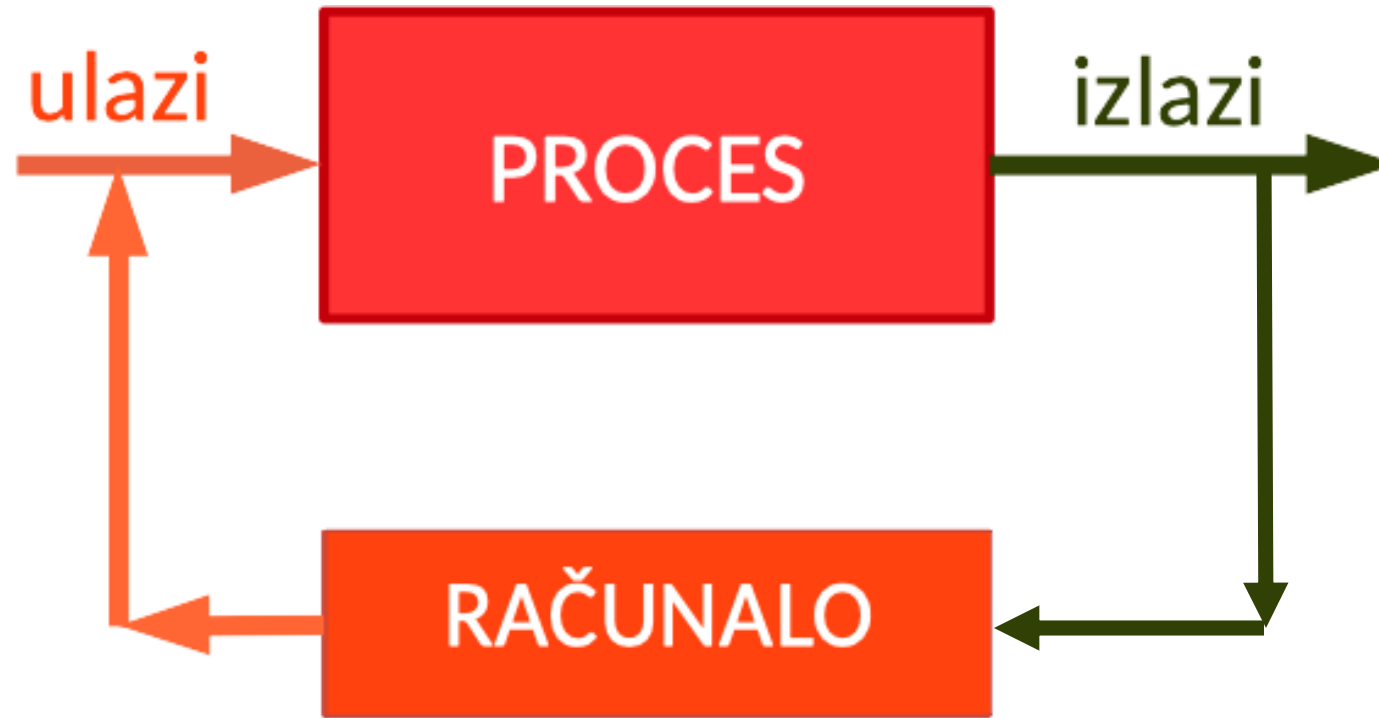


Upravljanje od strane računala  
neovisno o izlazu (upravljanog  
procesa/objekta)

$ulazi \neq f(izlazi)$

upravljanje u otvorenom krugu

# Upravljanje procesima (III)



**povratna veza, upravljanje u zatvorenom krugu**



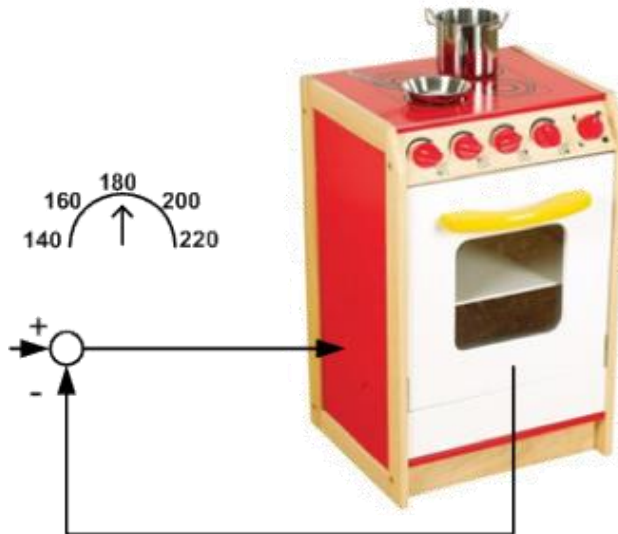
Računalo upravlja procesom / objektom na osnovu njegova stanja (+ informacije o željenom stanju)

$$\text{ulazi} = f(\text{izlazi})$$

# Primjer upravljanja u otvorenom i zatvorenom krugu

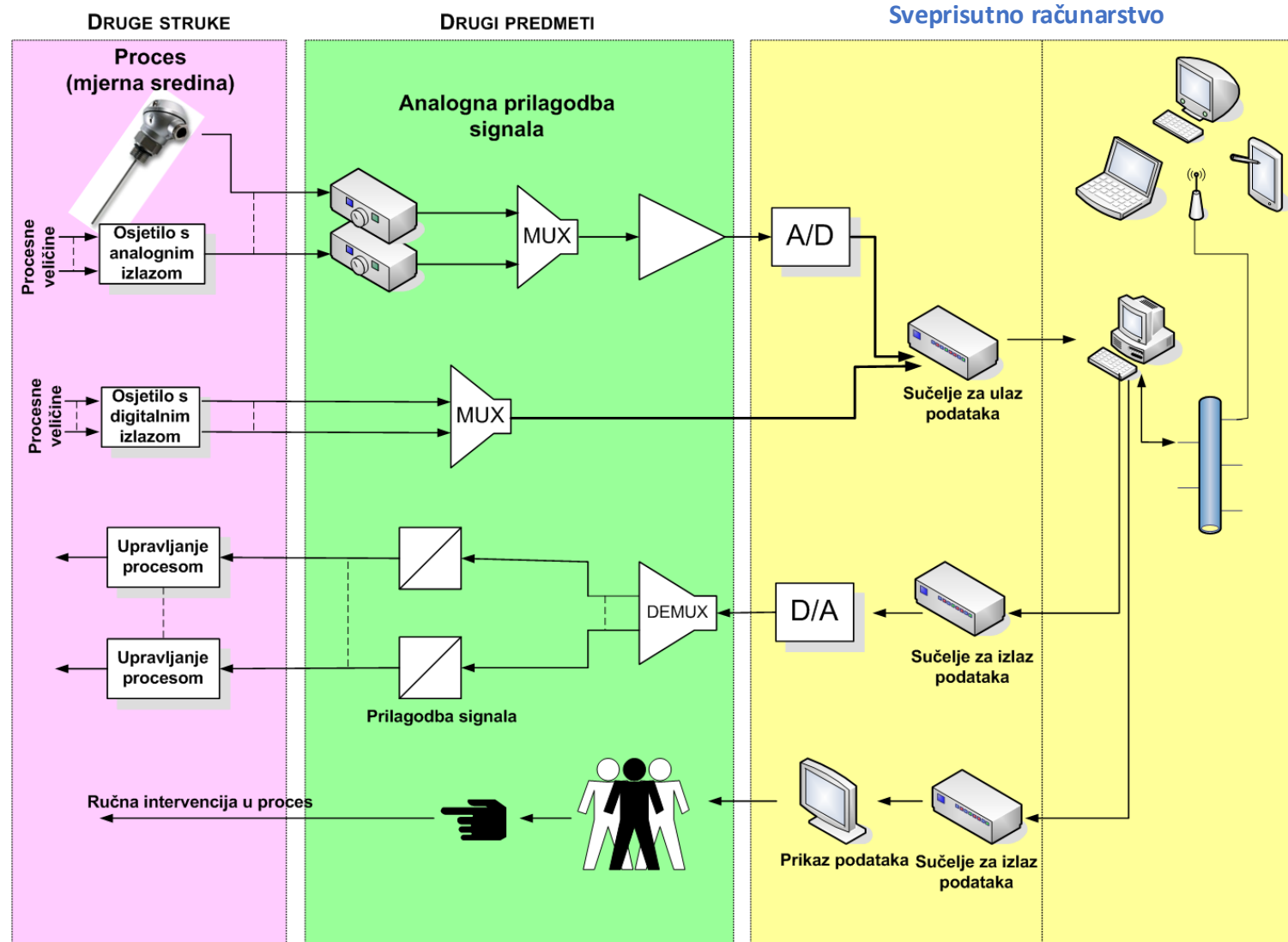
## otvoreni krug

upravljamo duljinom kuhanja, temperatura ploče ovisna o temperaturi okoline, sadržaju lonca, itd.



## zatvoreni krug

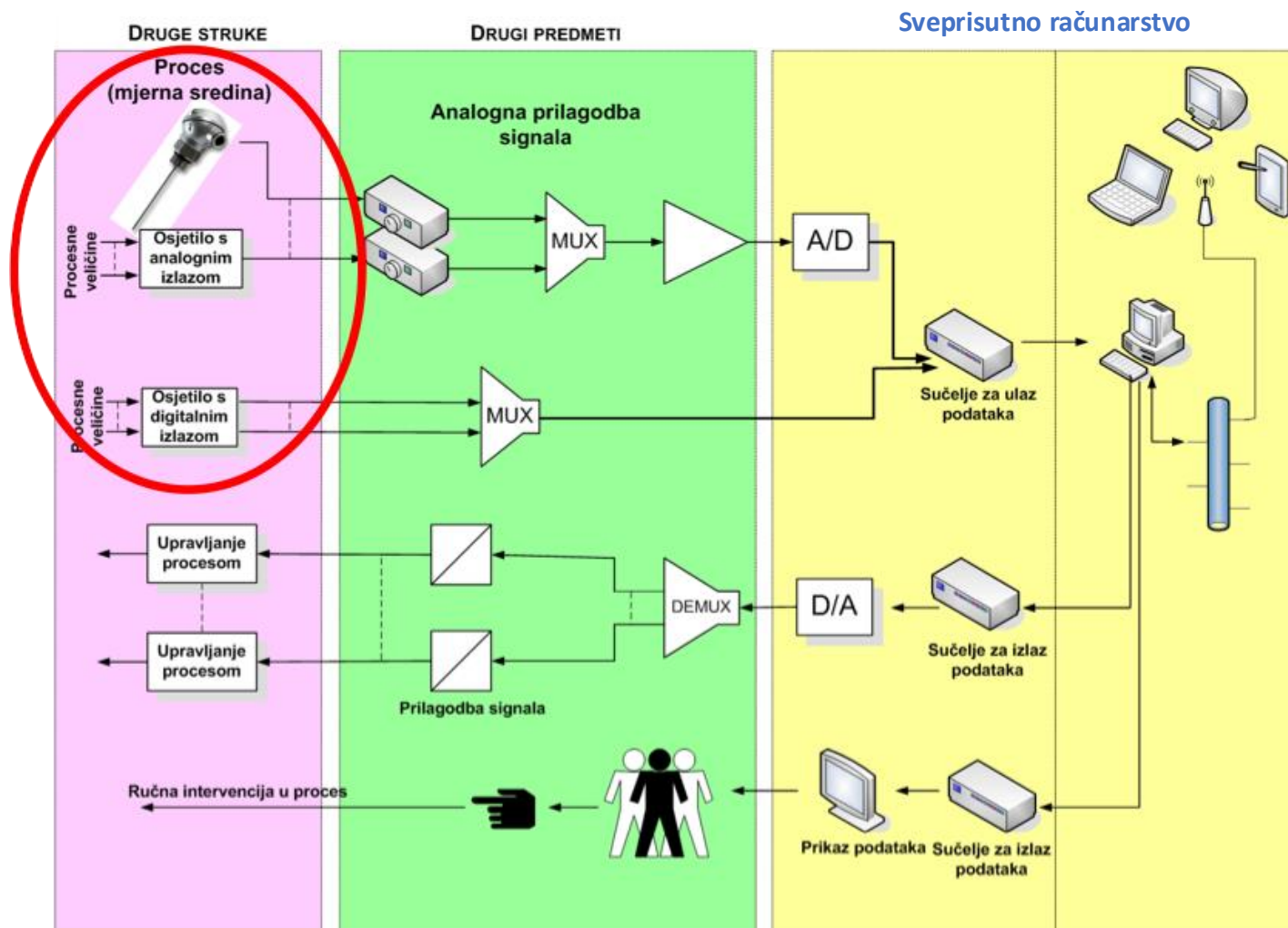
temperatura se mjeri i regulira (automatski)







## 2.2 Osjetila



# Prikupljanje informacija iz procesa

- Mjerenjem
  - objektivni postupci, subjektivni postupci
- Problem ne električnih veličina
- Problem složenih postupaka dobivanja informacije
  - opravdanost postupka (cijena, posljedice,...)
    - npr. da li su svi odresci u velikom restoranu pečeni s obzirom na zahtjeve gostiju i što ako nisu
- Informacije unutar sustava
  - osjetila (npr. brzina vjetra)
  - neposredno (RTC i temperatura)
- Informacije iz okoline sustava
  - posredno preko osjetila (npr. val i giro-kompas na brodu, protok vode u šumskom potoku,...)

# Osjetila

- Definicija osjetila (*uža*)

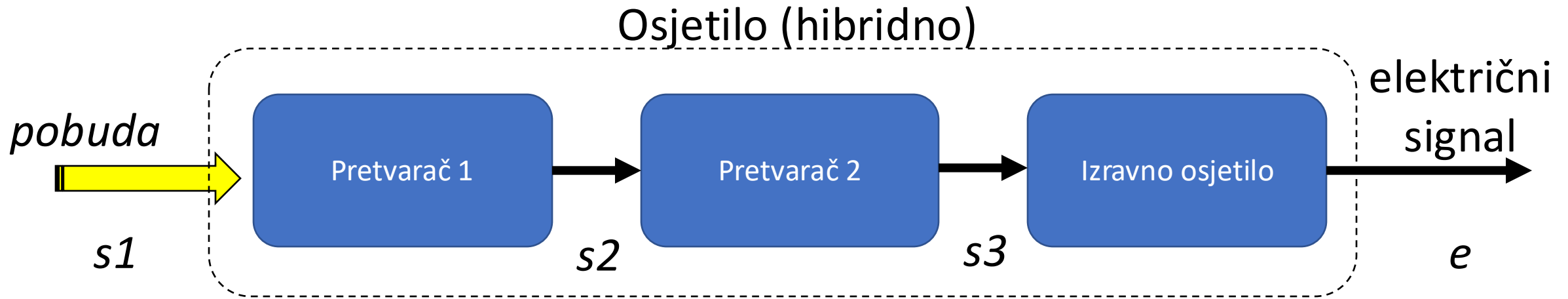
Osjetilo je uređaj koji prima pobudu i odgovara *električnim signalom*

- Osjetilo transformira neelektričnu vrijednost u električnu vrijednost

- Osjetilo je pretvornik energije

- Termopar (Seebeckov / termoelektrični efekt):

- tok energije od mjerenog objekta prema osjetilu (objekt topliji od osjetila) -> + napon na izlazu
    - tok energije od osjetila prema mjerenom objektu (osjetilo toplije od objekta) -> - napon na izlazu
    - ne postoji tok energije (i osjetilo i objekt iste temperature) -> nema napona na izlazu



- Pretvarač (engl. *transducer*) – pretvorba jedne vrste energije u drugu
  - Npr. egzotermna kemijska reakcija u toplinu -> toplina u električnu veličinu
- Izravno osjetilo – pretvorba energije u električni signal ili promjena vanjski dobavljenog električnog signala
  - Npr. Seebeckov efekt, fotoefekt ...

# Osjetila

- Osjetila po mjestu lociranja u sustavu: vanjska ili interna
  - Vanjska – praćenje parametra promatranog procesa ili objekta
  - Interna – praćenje parametara samog sustava
    - Npr. RTC - praćenje temperature, kompenzacija promjene frekvencije oscilatora
- Osjetila s obzirom na udaljenost od promatranog procesa / objekta:
  - kontaktna (npr. termistor)
  - beskontaktna (npr. PIR osjetilo, kamera ...)
- Osjetila s obzirom na potrebnu za dodatnim izvorom energije i/ili ekscitacijskim signalom:
  - pasivna (npr. termopar, fotodioda) – ujedno su i izravna osjetila
  - aktivna (npr. termistor, NDIR CO<sub>2</sub> osjetilo)

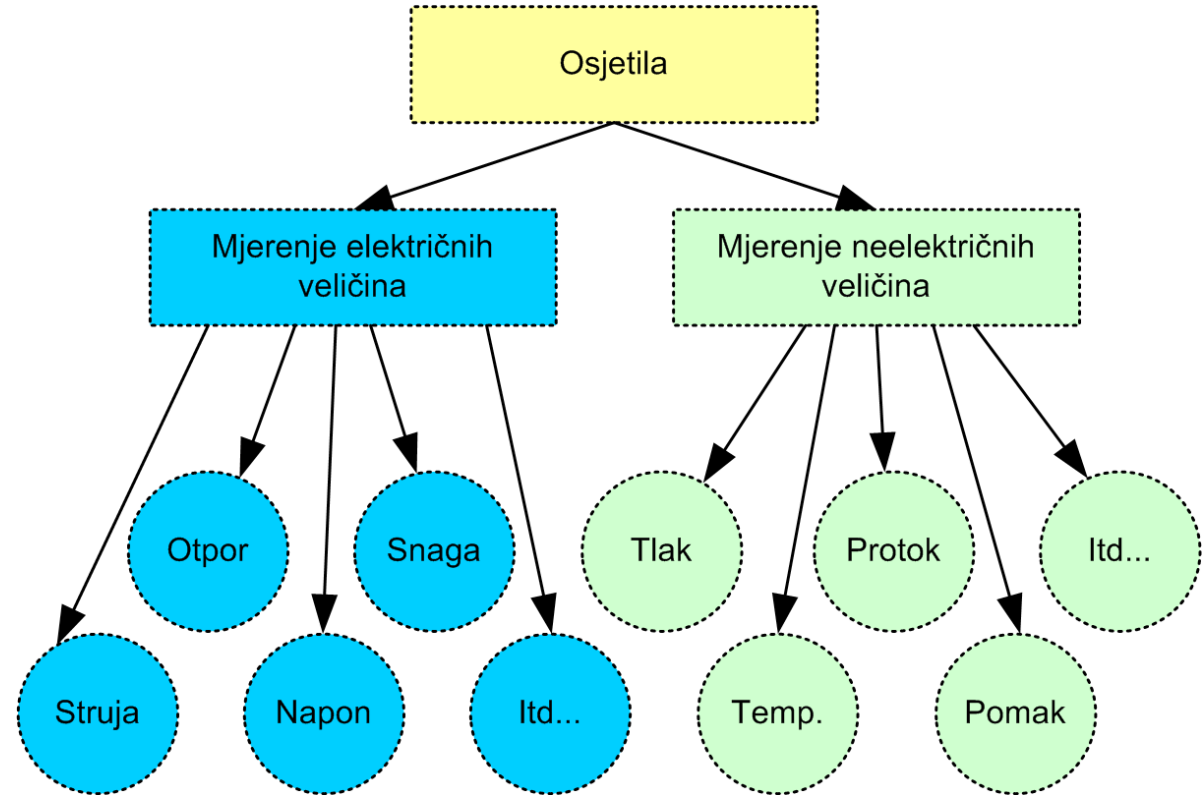
# Osjetila

- Svaki **podražaj** (tip parametra promatranog procesa) --> posebna vrsta osjetila
- Fizikalni princip rada (na čemu se temelji)
- Više od 900 različitih vrsta:
  - za **temperaturu** (termopar), vlagu (bole kosti :-), pritisak, napon, **potres**, **protok**...
  - za čistoću vode (pijavice)
  - za pijanstvo (boja)
  - za zračenje (G.M. brojači)
  - ....
  - za **svjetlo** (foto otpornik, svjetlomjer)
  - za **mine** (... , pas,...)
  - za **miris** (ugljikovi spojevi, NOS)!!,
  - .....

# Podjele i svojstva osjetila

- Osnovna svojstva osjetila su:

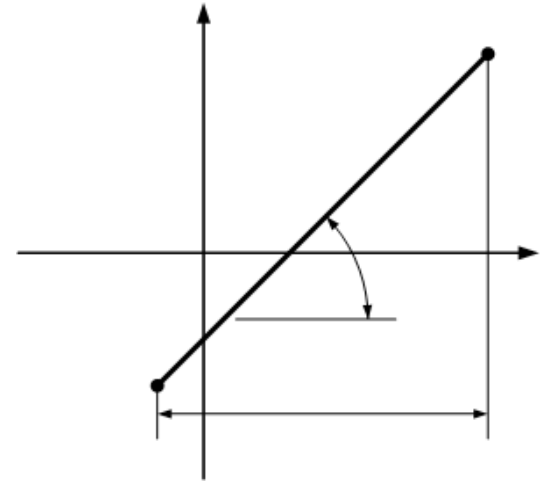
- osjetljivost
- raspon
- preciznost
- točnost
- rezolucija
- pomak (offset)
- linearnost
- histereza
- vrijeme odziva
- dinamička linearnost





- Osjetljivost

- Apsolutna vrijednost
- Koliko se mora promijeniti ulazna veličina da bi osjetilo dalo mjerljivu promjenu odziva?
- Matematički – nagib (derivacija) krivulje karakteristike odziva



- Raspon

- Dozvoljeni minimumi i maksimumi ulaznih veličina za koje je osjetilo namijenjeno
- Ne moraju biti jednaki
  - npr. -100 do +100 mmHg, ali i -50 do +100 °C

# Svojstva

- **Preciznost**

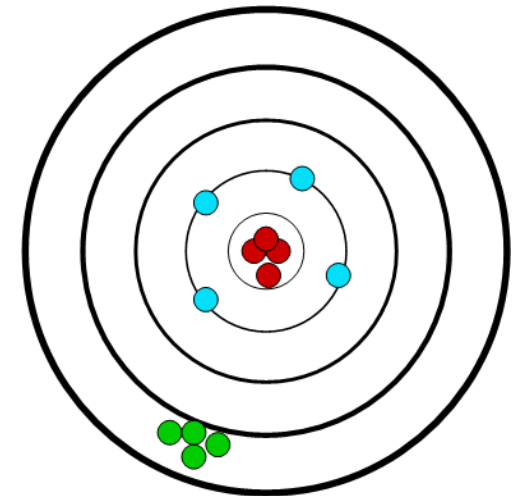
- Koliko se razlikuje odziv osjetila za istu vrijednost ulazne veličine?
- Ako ne mijenjamo ulaznu veličinu, idealno osjetilo daje potpuno istu vrijednost svaki put

- **Točnost**

- Koliko se razlikuje odziv osjetila od onog kojeg daje idealno (odnosno referentno) osjetilo?

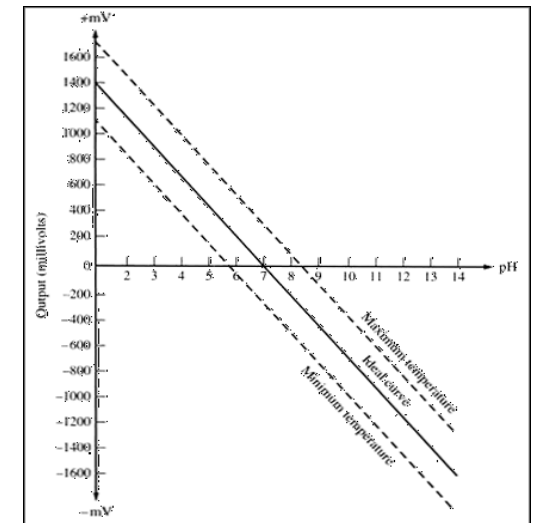
- **Koji od pogodaka na slici su**

- Točni? Precizni? Oboje?



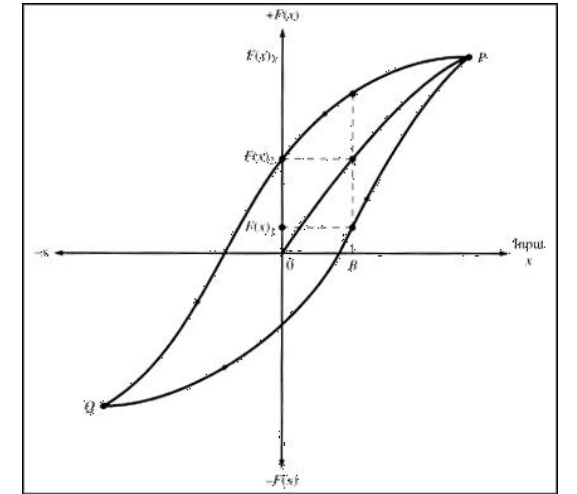
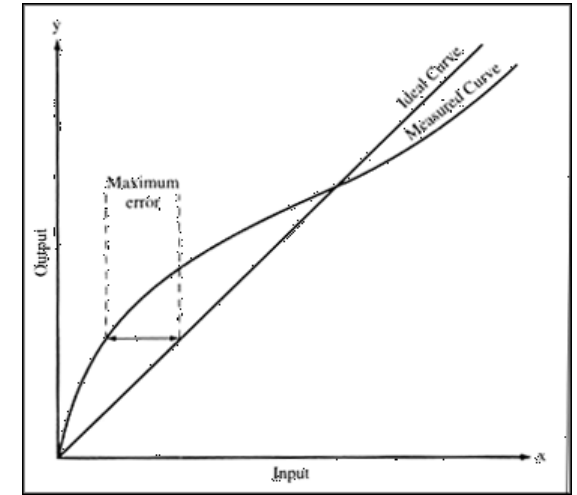
# Svojstva

- Rezolucija
  - Relativna vrijednost
  - Najmanja promjena ulazne veličine koja izaziva promjenu odziva
- Pomak
  - Pomak odziva u odnosu na idealni, pod određenim uvjetima (npr. zbog razlike temperature u odnosu na sobnu)



# Svojstva

- Linearnost
  - Sličnost krivulje odziva osjetila pravcu
- Histereza
  - Nelinearnost odziva ovisna o smjeru promjene ulazne veličine

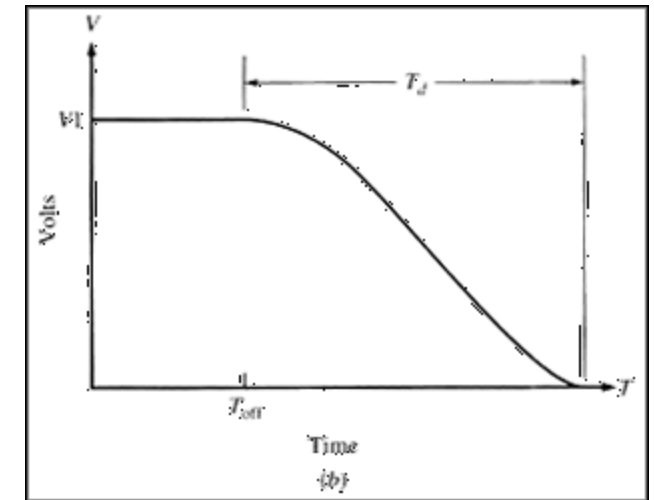


- Vrijeme odziva

- Vrijeme koje je potrebno da na promjenu ulazne veličine osjetilo poprimi promijenjenu vrijednost odziva
  - Analogno nabijanju kondenzatora
- Trajanja prijelazne pojave u osjetilu

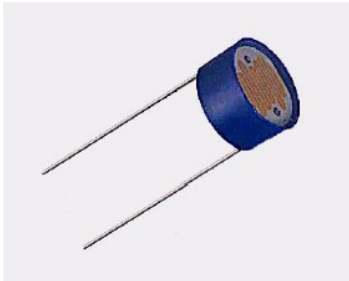
- Dinamička linearnost

- Sposobnost osjetila da prati brze promjene ulazne veličine



Izvor: J.J. Carr, *Sensors and Circuits*, Prentice Hall

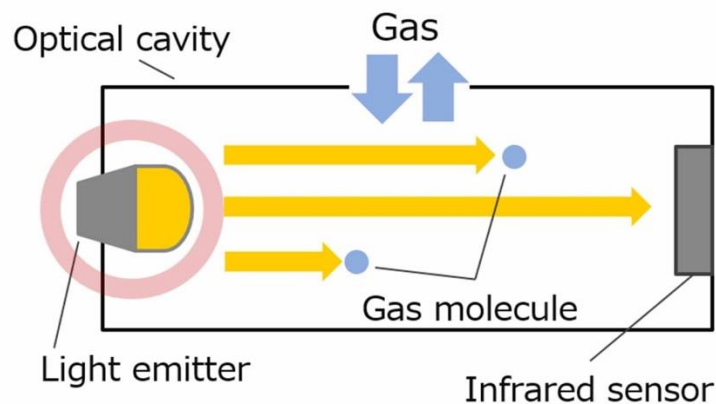
# Primjeri osjetila



Osnovni element kojega ćemo upotrijebiti je kadmij-sulfidni fotootpornik **NORP12** sa spektralnim odzivom sličnim onome kod ljudskog oka. Otpor ćelije pada eksponencijalno s povećanjem osvjetljenja, kako prikazuje **Slika 3**. Iako spada u skuplje u svojoj kategoriji (oko 22 kn), NORP12 je daleko od vojne izvedbe i stvarna karakteristika može odstupati od one navedene u dokumentaciji. Za primjenu kod točnijih mjerenja potrebno je za svaki element ponaosob izvršiti svjetlosnu i temperaturnu kalibraciju.



# Primjeri osjetila



## NDIR (non-dispersive infrared) CO2 osjetila

CO2 molekule upijaju određene valne duljine svjetlosti

Dug životni vijek

Selektivna osjetljivost samo na CO2

Radi dobro u uobičajenom rasponu koncentracija CO2

Niska cijena

Troši dosta energije (zagrijavanje ...)

Osjetljiv na temperaturu i vlažnost



## Elektrokemijska CO2 osjetila

Vodljivost varira s obzirom na koncentraciju CO2

Neosjetljivost na temperaturu i vlažnost

Ne traži dugotrajno napajanje

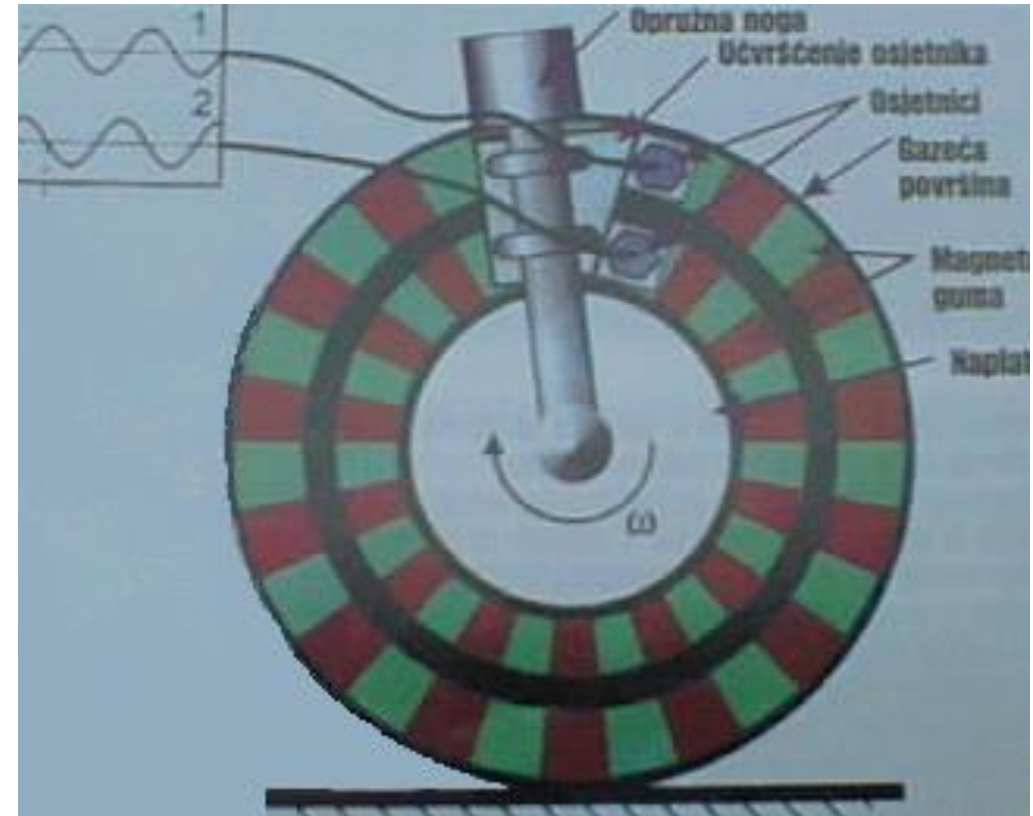
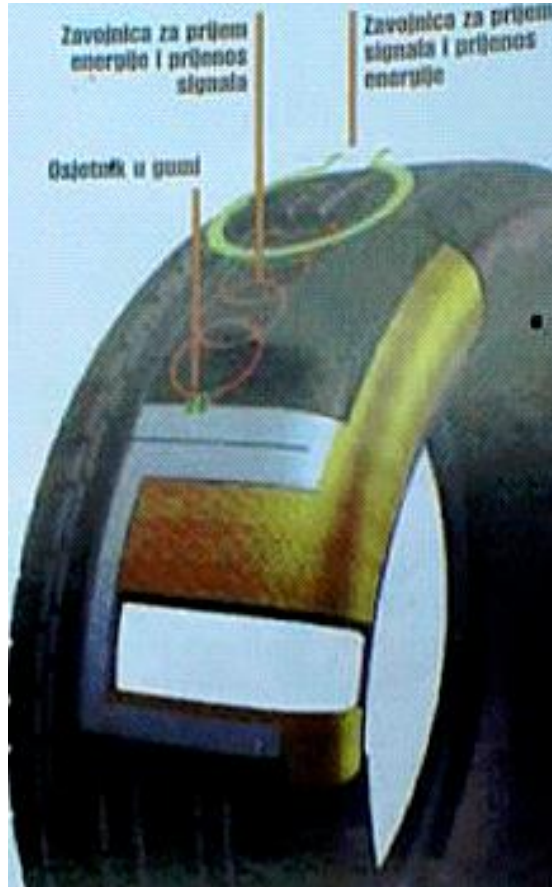
Kratak životni vijek

Slaba selektivnost (utjecaj drugih tvari)

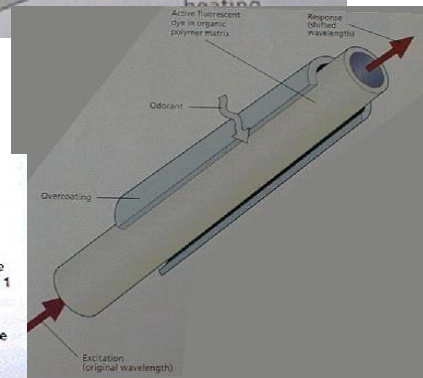
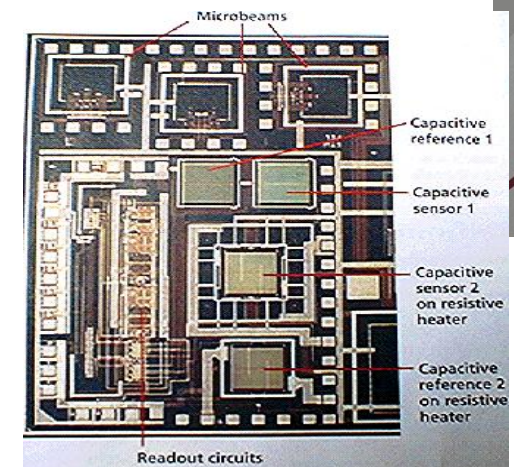
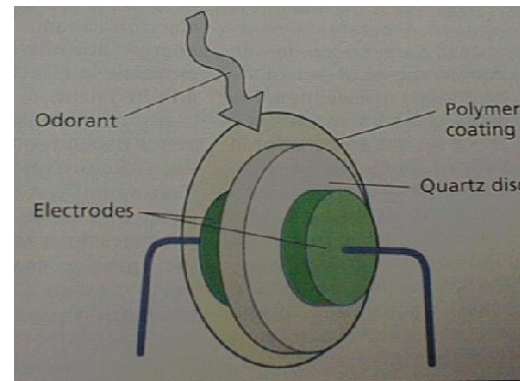
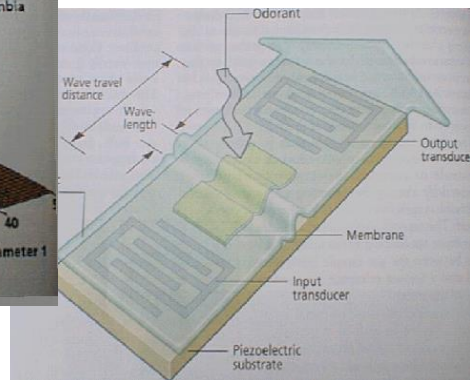
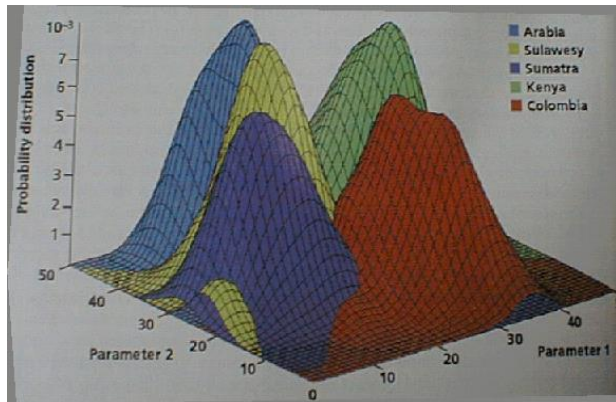
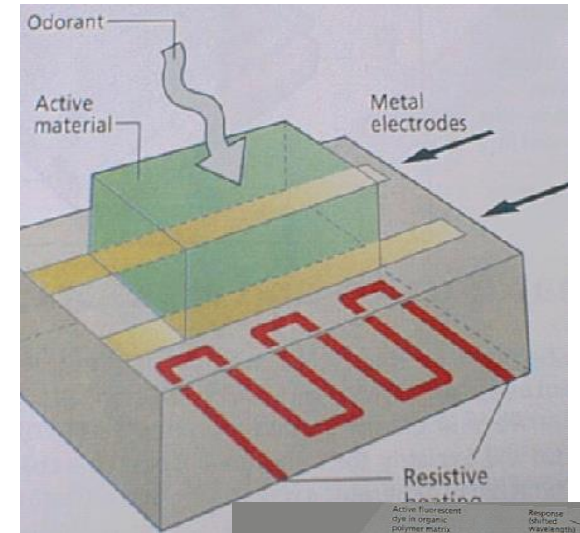
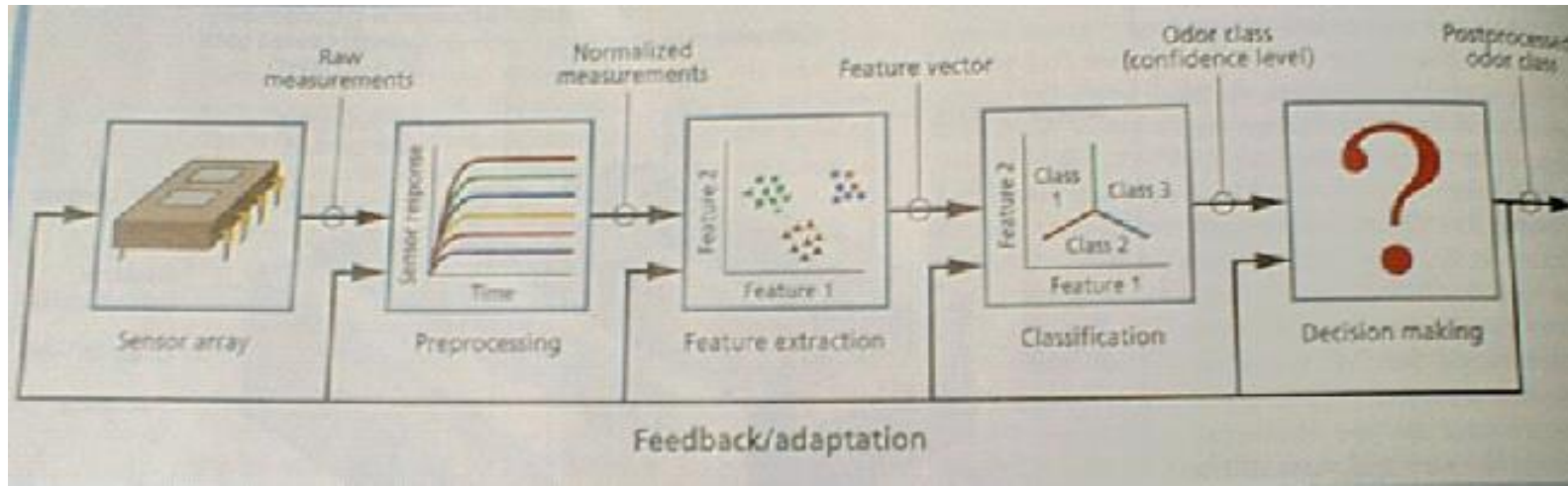
Skupi



# Primjeri osjetila







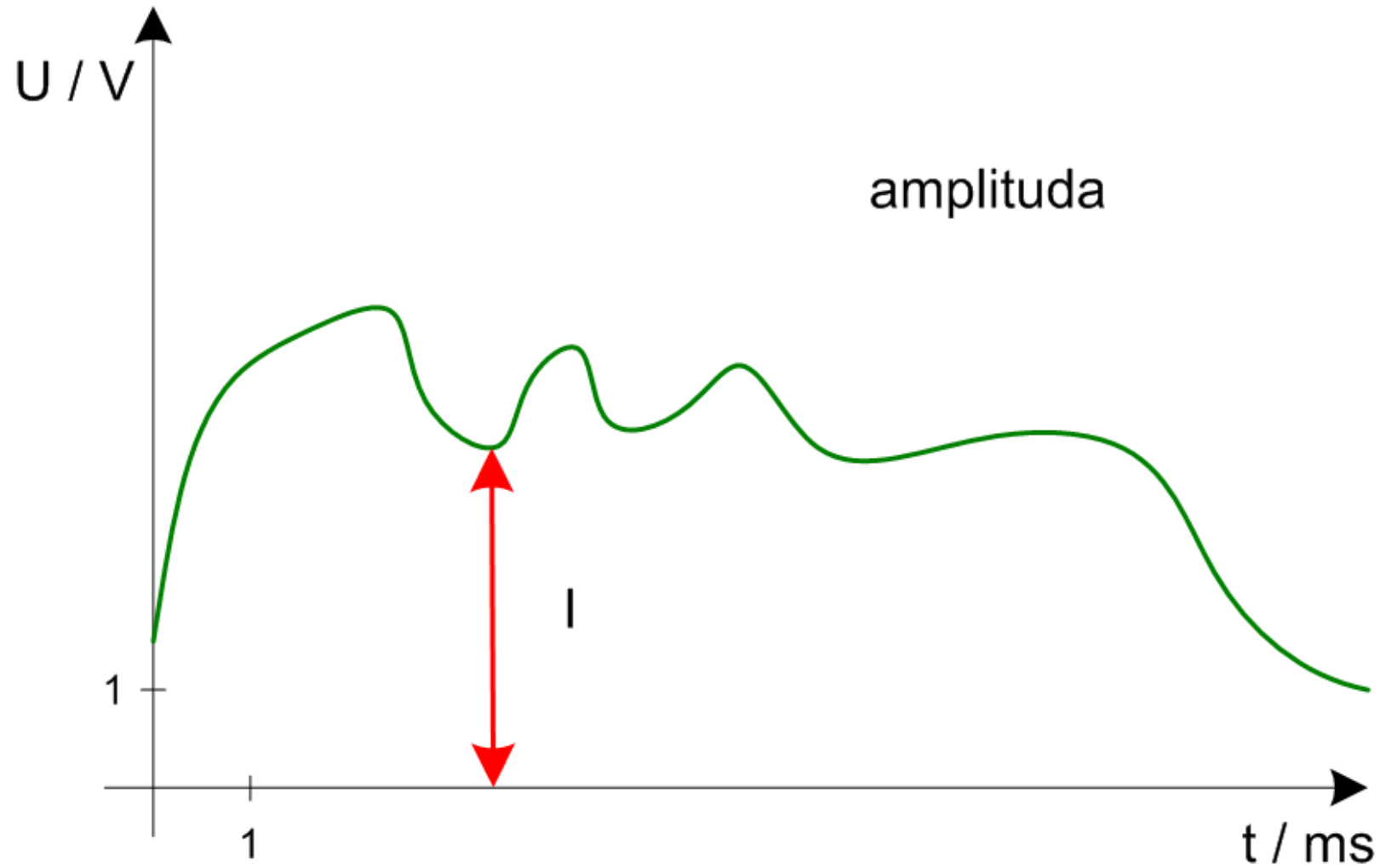


## 2.3 Informacije, oblici informacija

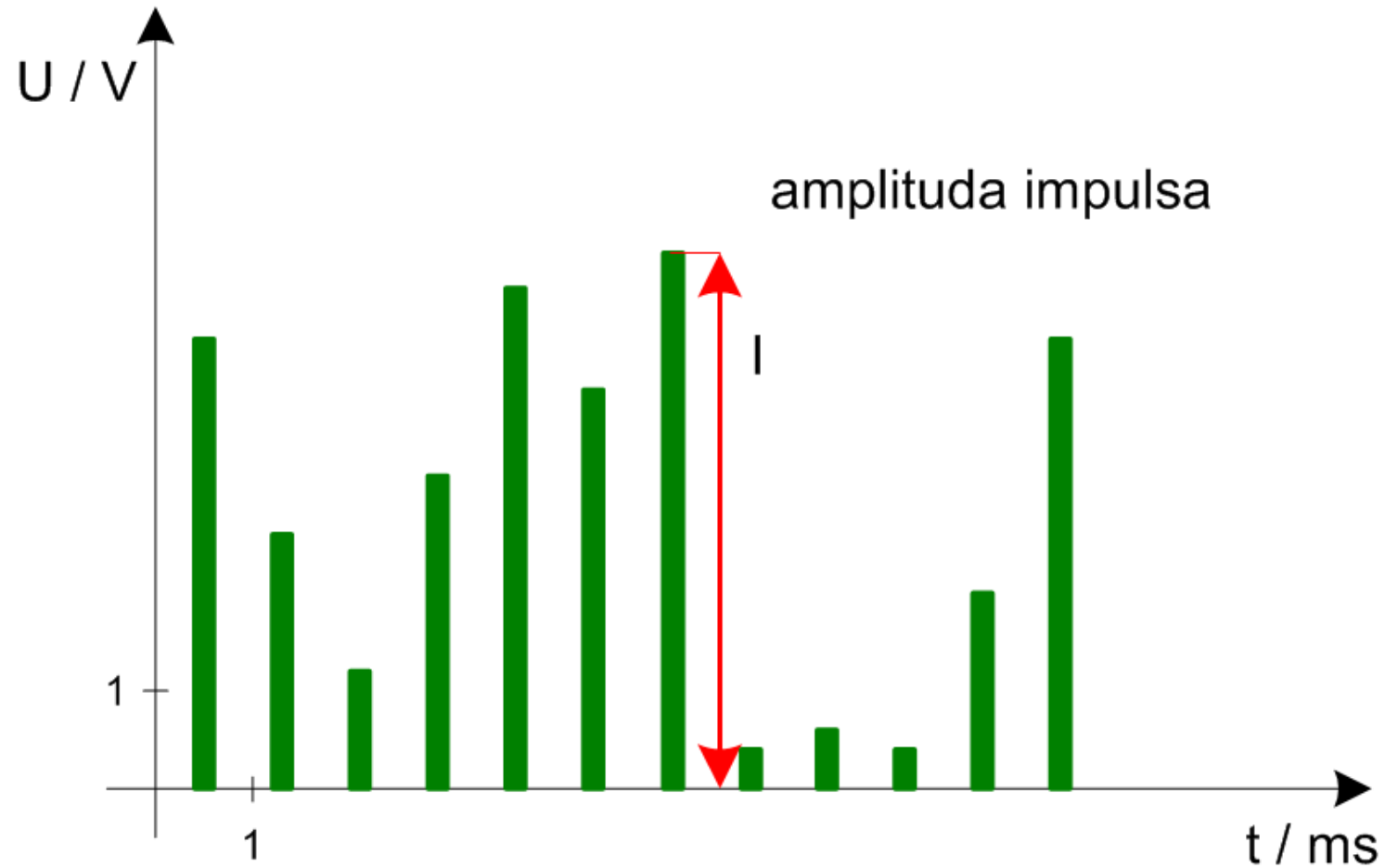
# Oblici analogne i digitalne informacije

- amplituda napona (struje)
- amplituda impulsa
- frekvencija
- binarni signal
- broj impulsa u vremenu
- ...

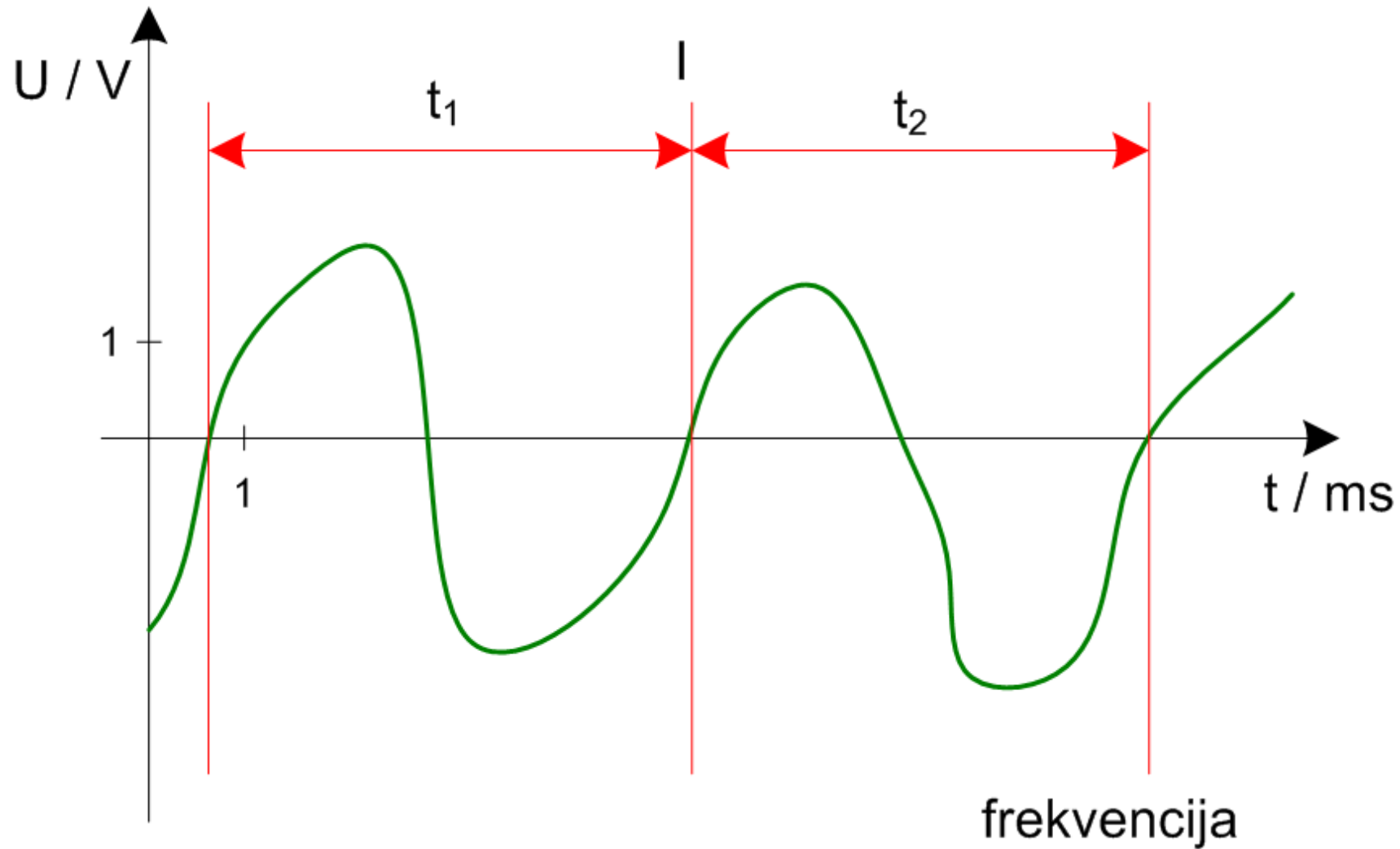
# Amplituda kontinuiranog signala



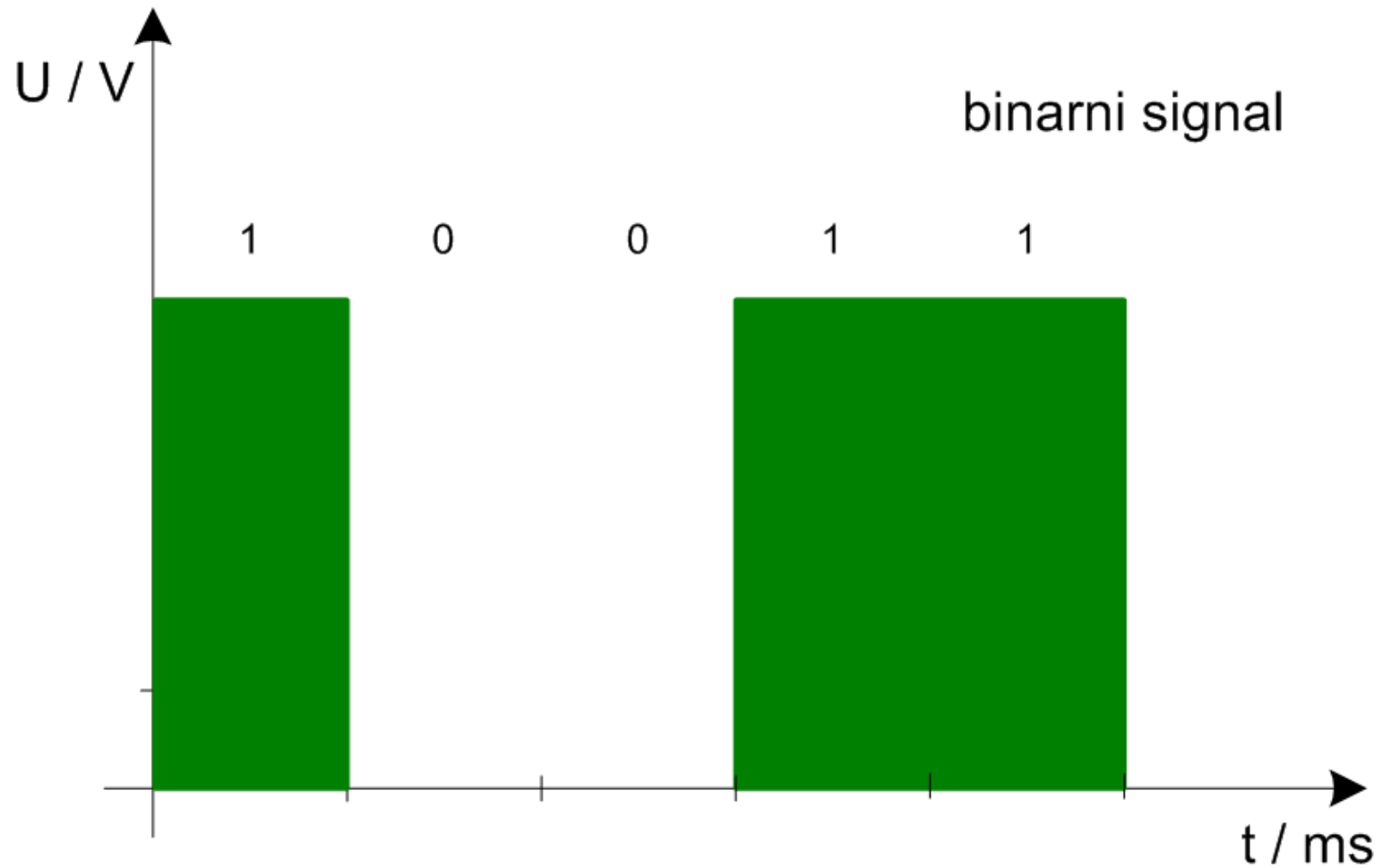
# Amplituda impulsa



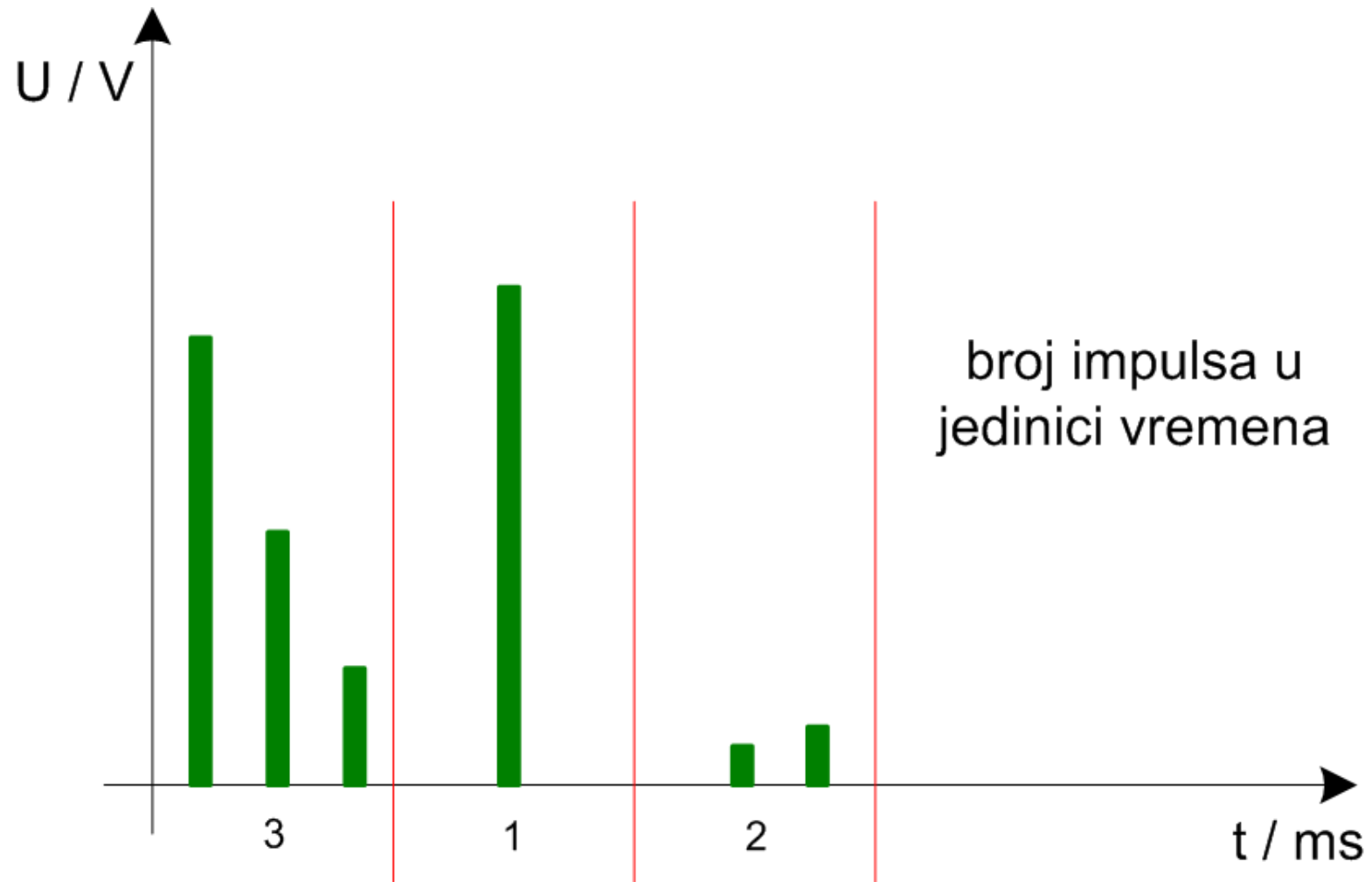
# Frekvencija analognog signala



# Binarni signal (ima, nema)



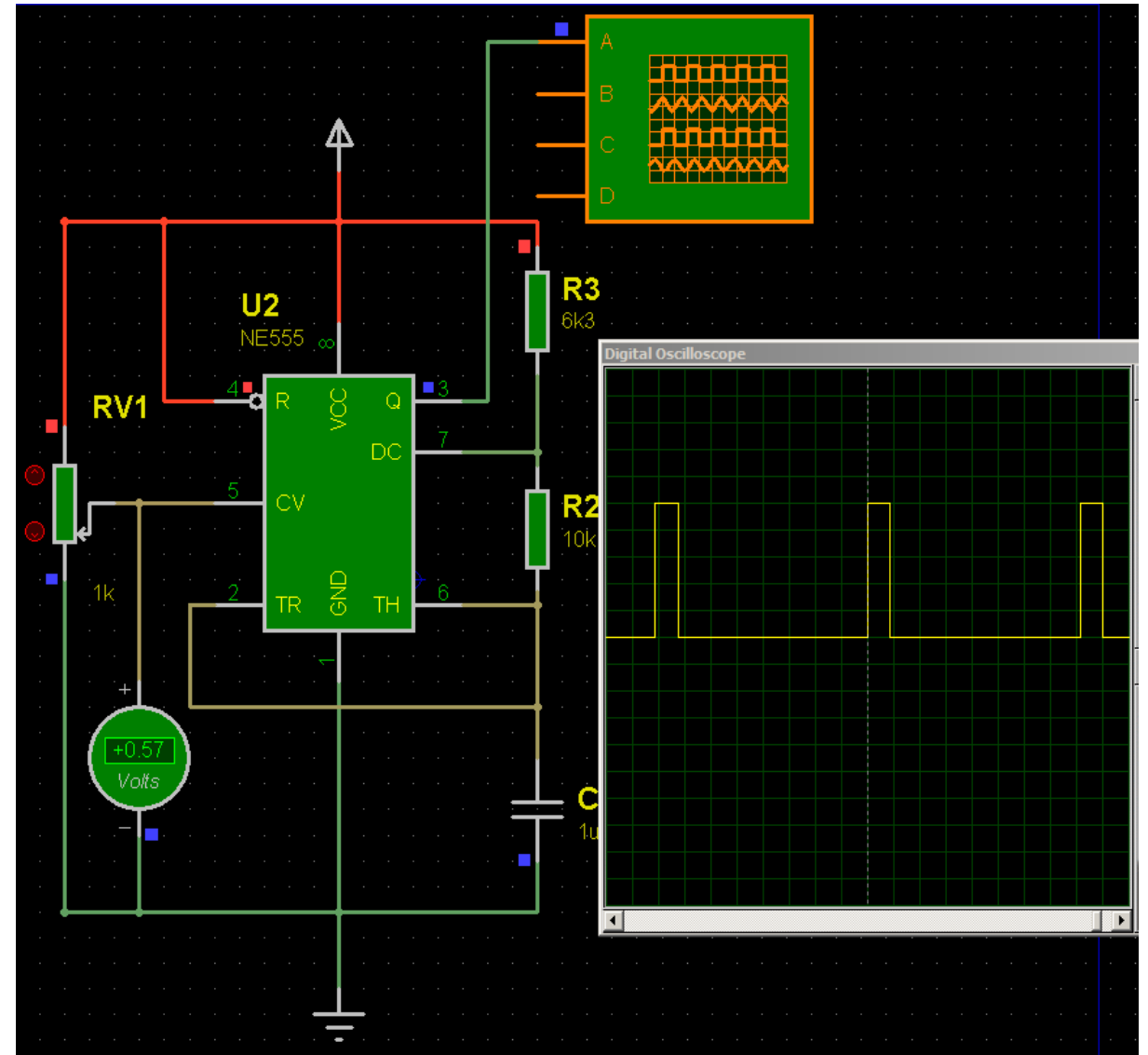
# Broj impulsa u jedinici vremena





# Primjer: napon u frekvenciju

- pretvaranje naponskog signala (amplitudnog) u niz impulsa
- frekvencija impulsa proporcionalna naponu



# Predobrada signala

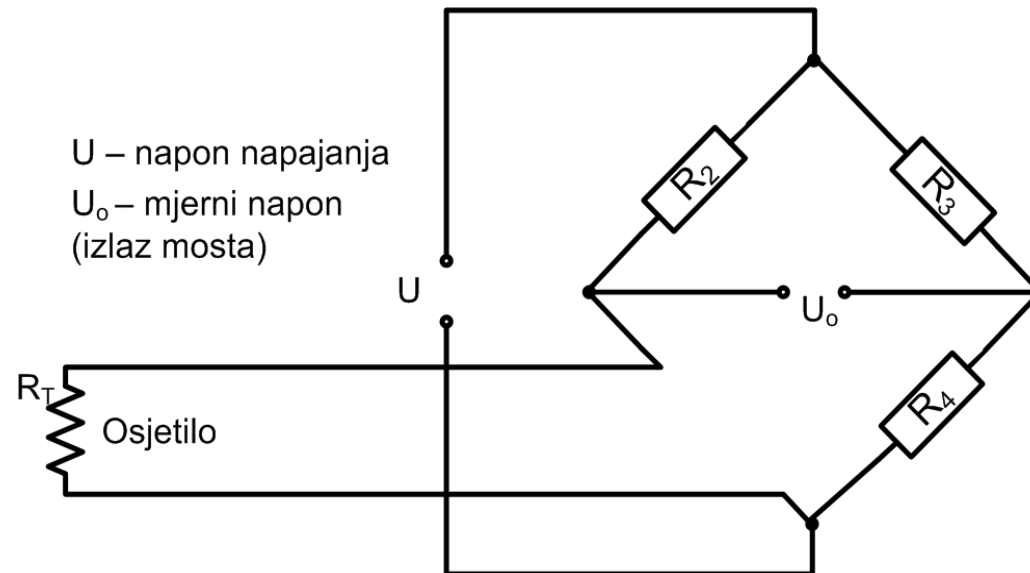
- Analogno oblikovanje/obrada signala
- Pretvaranje izlaznog signala mjernog osjetila u oblik prikladan za daljnju obradu
- Priprema za A/D pretvorbu i unošenje u računalo
- Ne smije se promijeniti informaciju o mjernom parametru, ali signal se mora prirediti za daljnju obradu
- Digitalni podatak teško je pokvariti

# Primjeri predobrada

- **Primjeri predobrada:**
  - mosni spoj ili
  - pojačalo
  - prilagodba opterećenja
  - linearizacija
  - filtriranje
  - dovođenje u standardno područje (0-5V, 0-10V, 4-20mA i sl.)

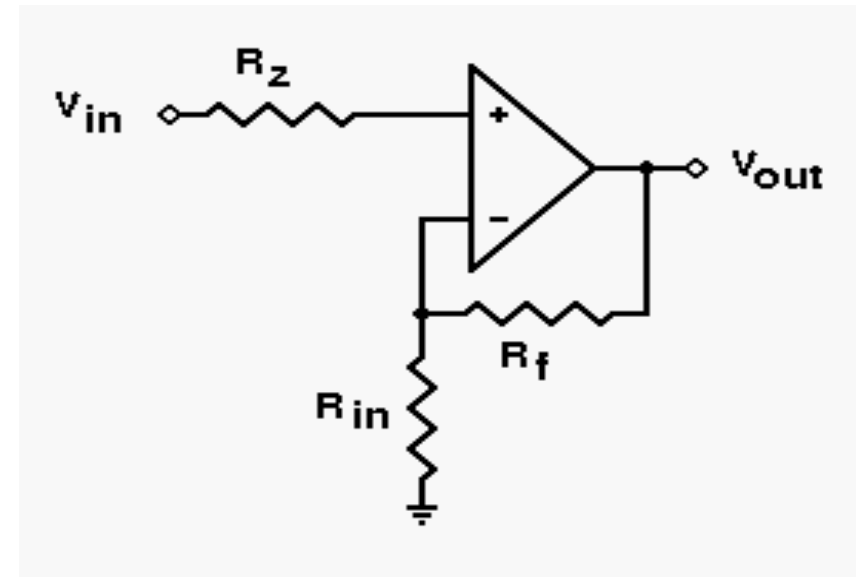
# Mostni spoj

- Za pretvorbu izlaza iz otporničkih, kapacitivnih i induktivnih osjetila
- Pretvornik sadrži 4 elementa, od koji je jedan osjetilo (reagira na vanjske podražaje)
- Izlaz: naponski signal



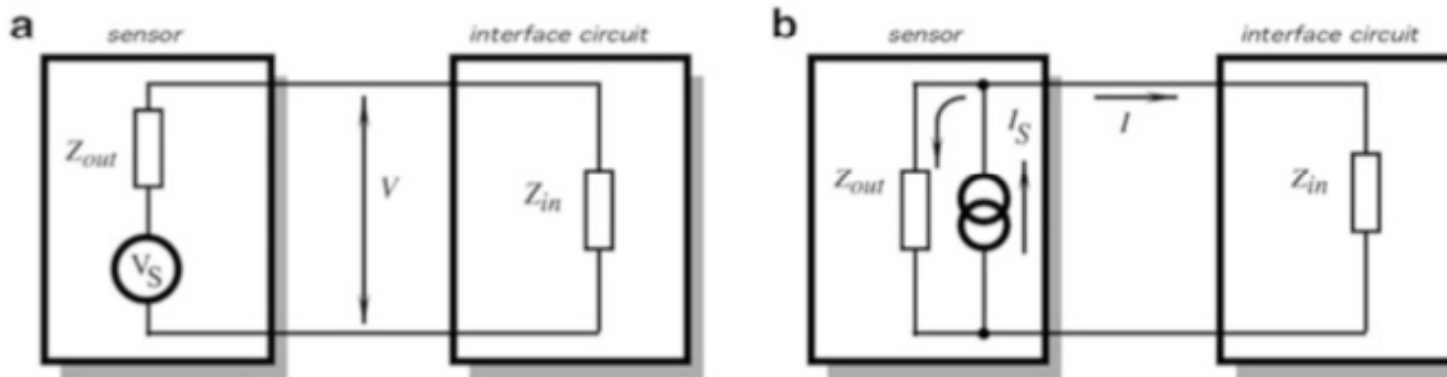
# Pojačalo

- Slabi signal iz osjetila treba pojačati na vrijednost prikladnu za daljnju obradu
- Integrirana operacijska pojačala u različitim spojevima



# Prilagodba opterećenja

- Ulazne karakteristike sklopa za obradu signala moraju odgovarati izlaznim karakteristikama osjetila
  - u suprotnom sklop utječe na karakteristike osjetila (opterećuje ga strujno ili naponski)



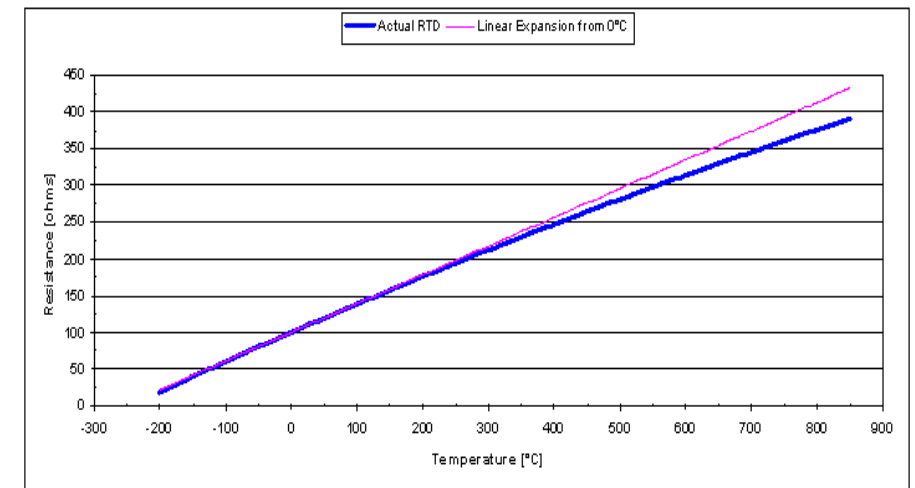
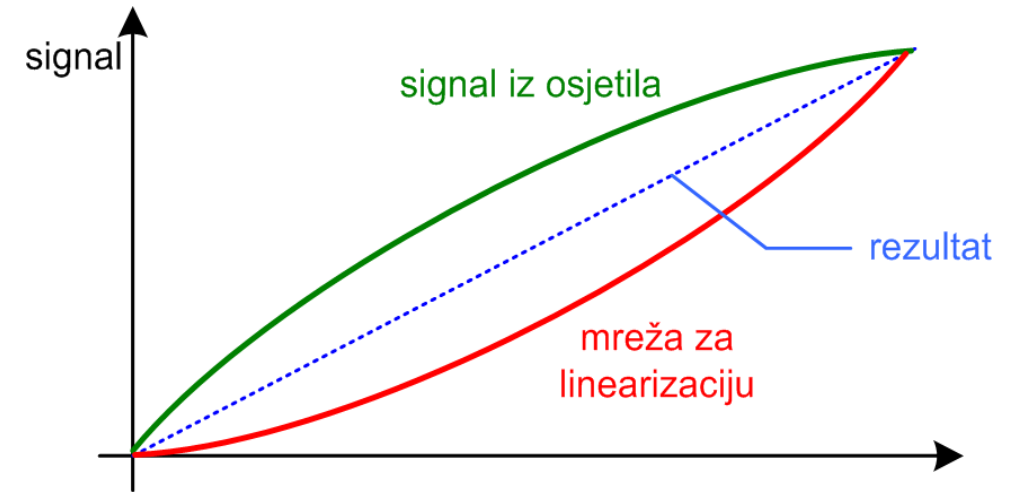
# Linearizacija

- Pt100

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

- Linearizacija funkcija – ovisnost temperature o otporu:

- matematika uključena
  - jednolinearna aproksimacija
  - višelinearna aproksimacija
  - (potrebne *look-up* tablice)



# Filtriranje

- Šum se pojavljuje kod osjetila
  - toplinski šum - iznutra
  - interferencijski šum – izvana
- Smanjuje se:
  - fizičkim udaljavanjem
  - uplitanjem mjernih vodova
  - oklapanjem mjernih vodova
    - uzemljiti oklop samo na jednom kraju!
  - filtriranjem

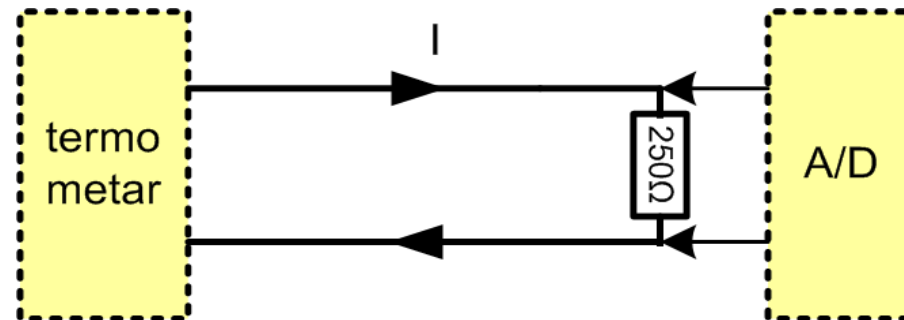


# Standardno područje

- Standardni signali:
  - naponski:
    - 0-5 V
    - 1-5 V
    - 0-10 V
    - 2-10 V
  - strujni:
    - 1-5 mA
    - 0-20 mA
    - 4-20 mA
    - 10-50 mA
- Npr. termometar s naponskim izlazom  $0^{\circ}\text{C} = 0\text{V}$ ,  $100^{\circ}\text{C} = 5\text{V}$ 
  - očitanje 0 V, da li je stvarno  $0^{\circ}\text{C}$  ili je pretvornik odspojen/neispravan?
- Rješenje – promijeniti raspon izlaznog signala na 1–5 V
  - 'povišena nula'
  - očitanje 0 V = kvar opreme
- Naponski izlaz = jednostavno rješenje, ali ima mane:
  - utjecaj ulazne impedancije utječe na točnost
  - elektromagnetske smetnje mogu utjecati na napon

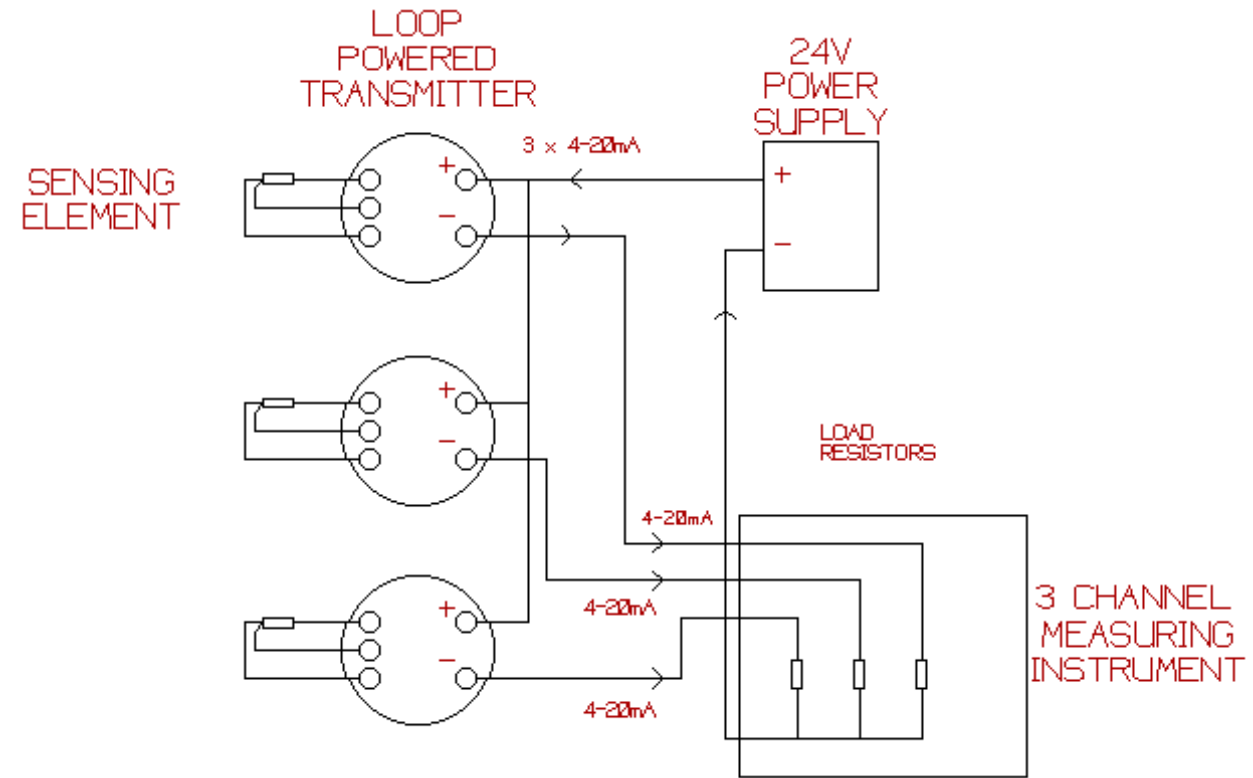
# Standardno područje

- Rješenje – termometar sa strujnim izlazom, 0-20mA predstavlja 0-100°C, A/D mjeri napon na otporu
  - $100^{\circ}\text{C} = 20\text{ mA}$ ,  $20\text{ mA} * 250\Omega = 5\text{V}$
  - prednosti?
- Promjena otpora prijenosnih vodova ne utječe na signal
  - prienos signala na velike udaljenosti bez gubitka točnosti
- Otpornost na smetnje
  - inducirani naponi u vodičima se poništavaju



# Standardno područje

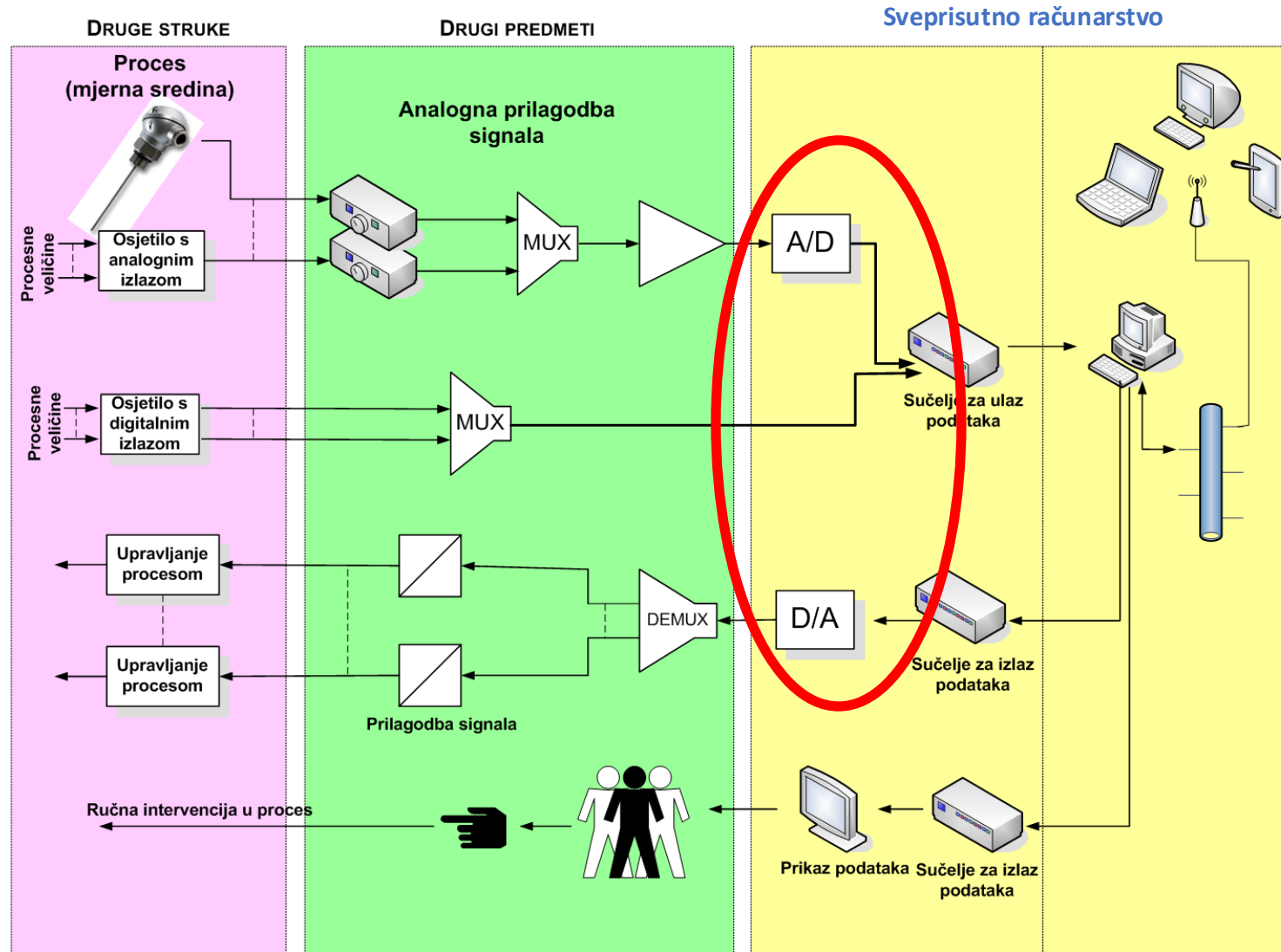
- prednost signala 4-20mA?
  - povišena nula, detekcija kvara
  - u strujnom krugu uvijek imamo struju od 4mA – ako termometar troši manje od 4mA struje, možemo ga spojiti samo s dvije žice (ne trebaju nam posebni vodovi za napajanje)
- strujna petlja





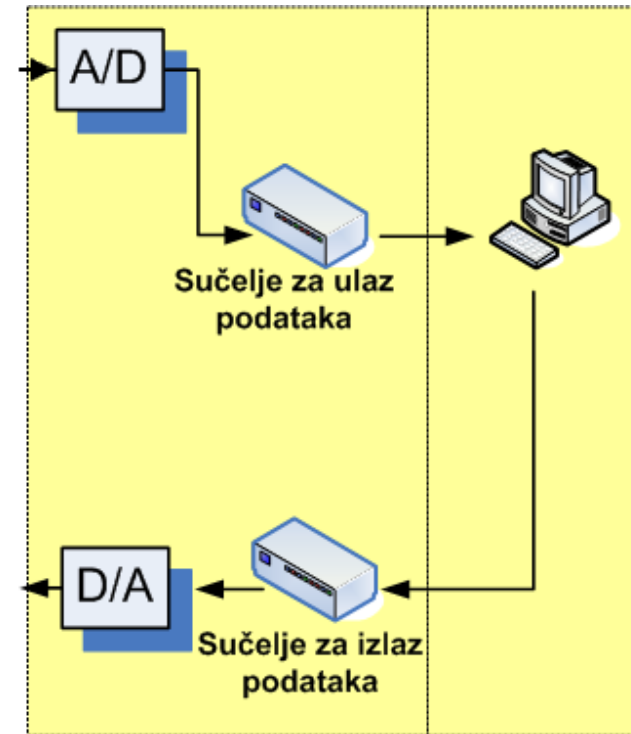
## 2.4 Digitalno – analogna pretvorba (1.dio)

# Most između analognog i digitalnog svijeta



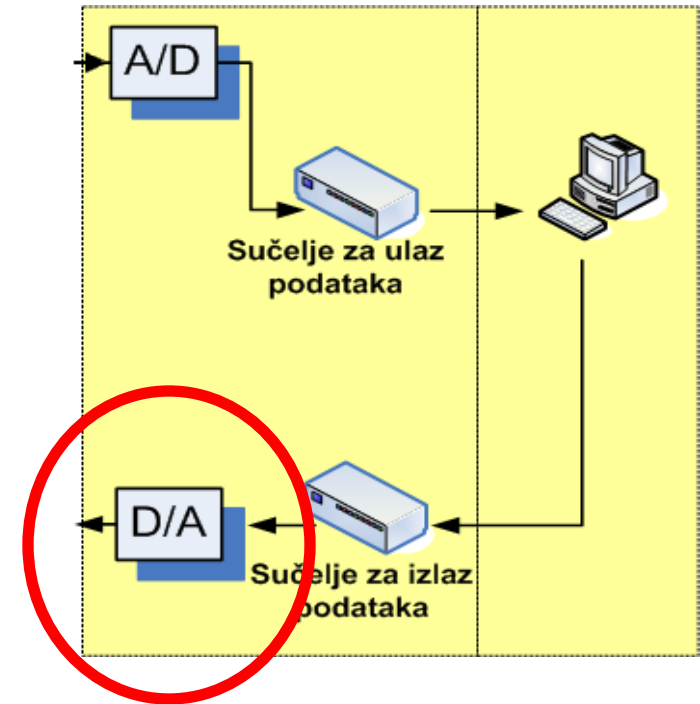
# Interakcija s analognim svijetom

- Ulaz u mikroračunalni sustav
  - analogni signal treba pripremiti, dovesti u opseg, te
  - pretvoriti u digitalnu informaciju
- Izlaz
  - treba djelovati na analogni izvršni član
    - motor, svjetlo, ventil, itd.



# D/A pretvorba

- Pretvorba binarne vrijednosti u analogni signal (struja, napon)
- Ulazni (digitalni) podatak dolazi iz računala
- Analogna vrijednost (ekvivalentna digitalnom podatku iz računala) na izlazu D/A pretvornika
- D/A pretvornici jednostavniji od A/D pretvornika



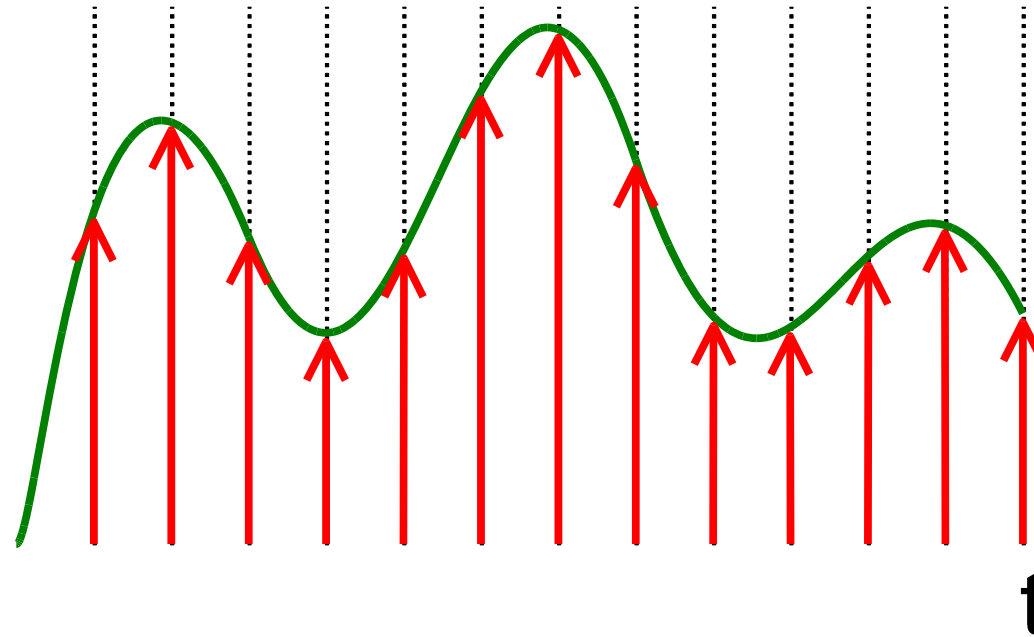
# Karakteristike D/A pretvornika

- **rezolucija** - broj različitih izlaznih razina koje D/A pretvornik (DAP) može reproducirati
- **frekvencija** – maksimalna frekvencija na kojoj DAP može raditi
- **ukupno harmoničko izobličenje** izlaznog signala (Total Harmonic Distortion - THD) – mjera šuma koji DAP unosi u generirani signal
- **dinamički raspon** (dB) – razlika između najvećeg i najmanjeg signala koji DAP može generirati



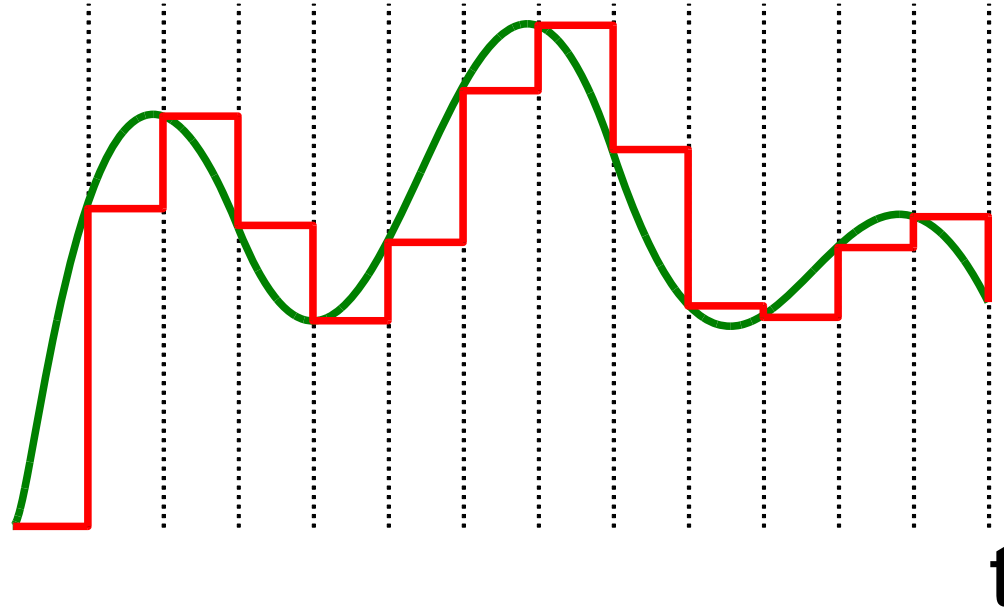
# Idealni D/A pretvornik

- Generira niz impulsa
- Filtrira signal rekonstrukcijskim filterom
  - diskretne razine se interpoliraju



# Realni D/A pretvornik

- Analogni signal osvježava se u diskretnim intervalima
- Naglim prijelazom iz jedne diskretne razine na drugu razinu generiraju se neželjeni viši harmonici

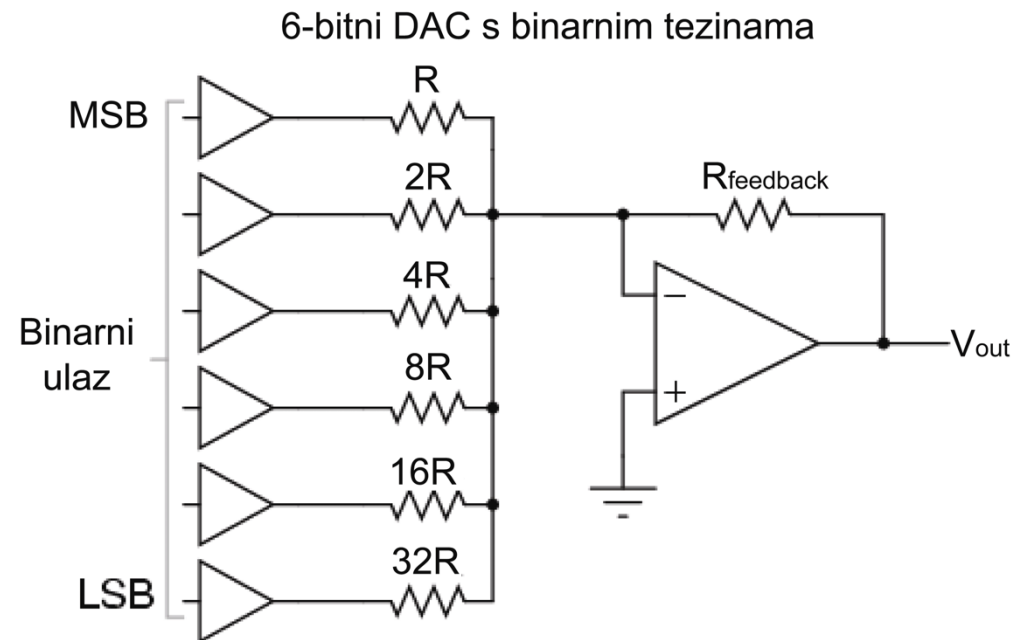


# Tipovi D/A pretvornika

- težinski ( $R/2R$ ) pretvornik
- $R/2R$  pretvornik
- D/A pretvornik s pulsno širinskom modulacijom (PWM jedinicom) i filterom
- Delta sigma  $\Delta\Sigma$  D/A pretvornik
- itd ...

# R/2R pretvornik

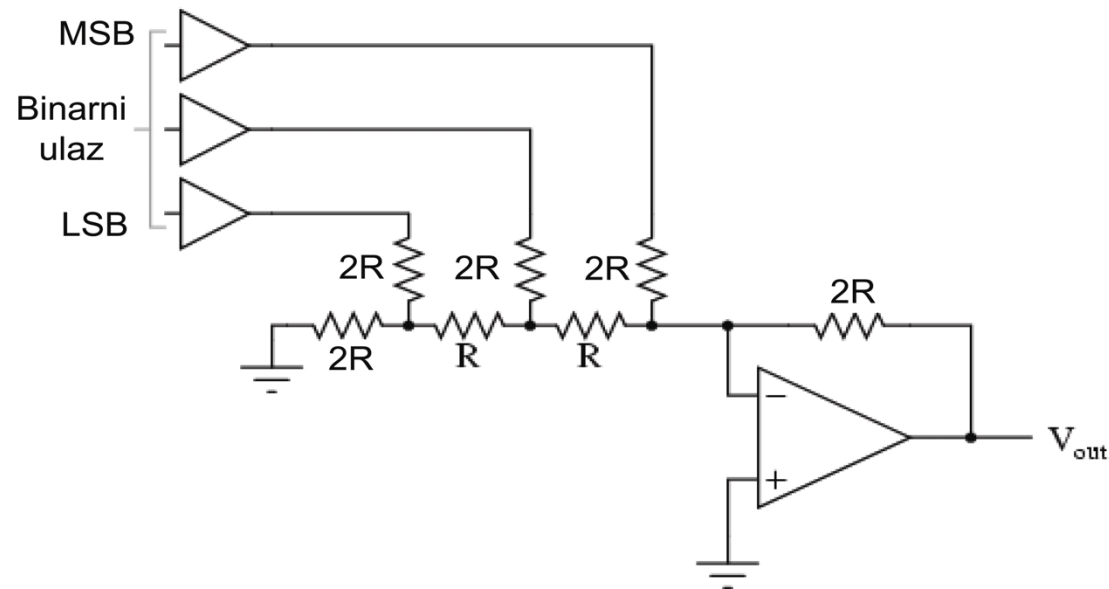
- Invertirajuće operacijsko zbrajalo
- Težinu pojedine grane određuju otpornici
  - odgovaraju težinama znamenaka u binarnom brojevnom sustavu



# R/2R pretvornik

- Koristi dvije različite vrijednosti otpornika uz povećanje njihovog broja
- Samo dvije vrijednosti otpora
- Mijenjamo jedan oblik složenosti drugim

R/2R "stepenicasti" D/A pretvornik

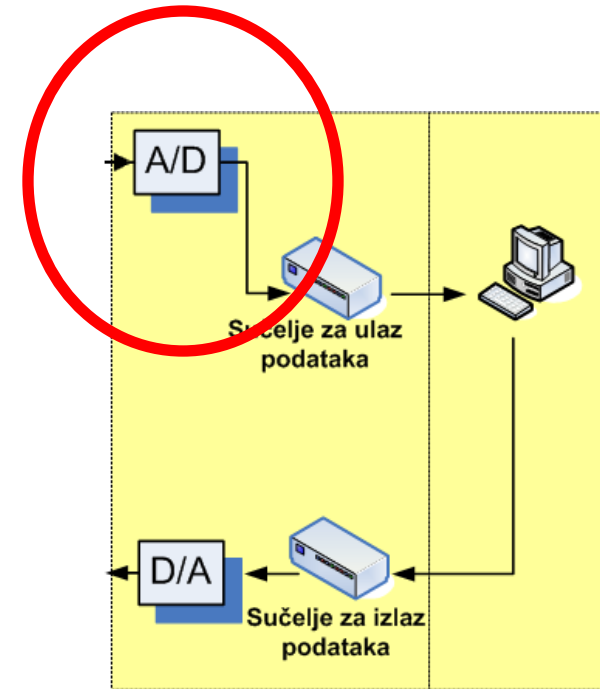




## 2.5 Analogno – digitalna pretvorba

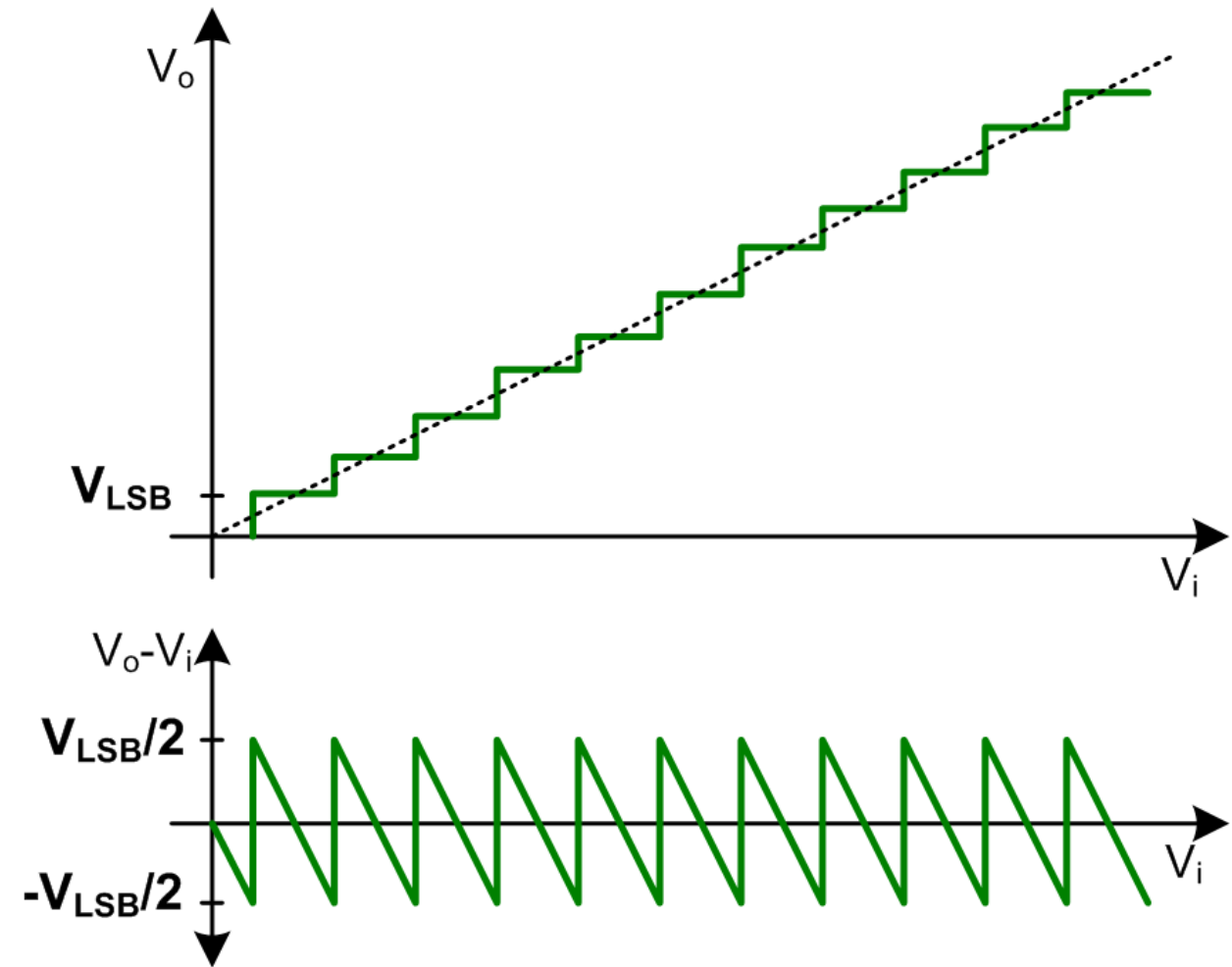
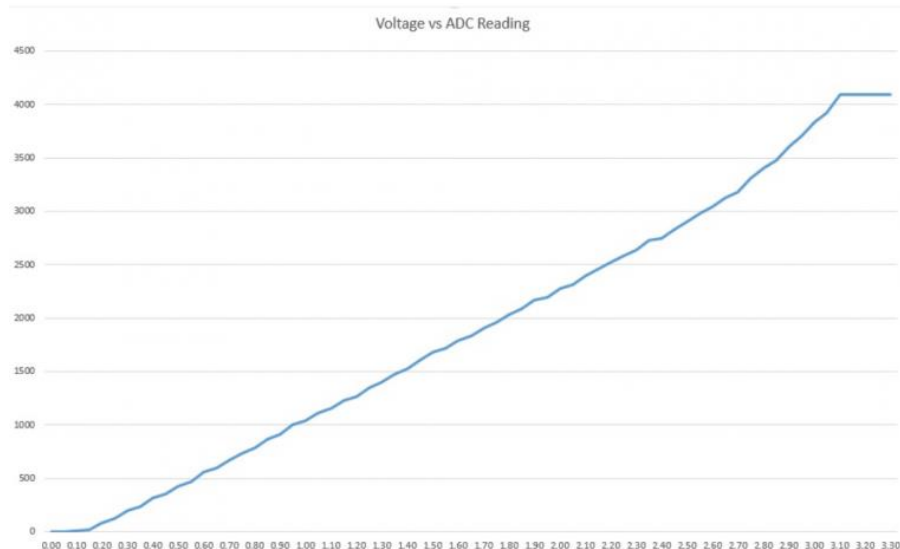
# A/D pretvorba

- A/D pretvornici pretvaraju analognu veličinu (napon) u ekvivalentnu digitalnu vrijednost
  - Ulazni napon u intervalu  $[0, V]$  pretvara se u digitalnu vrijednost  $[0, 2^N - 1]$ , gdje je  $N$  razlučivost (rezolucija) pretvornika
- Osnovni parametri A/D pretvornika su
  - razlučivost (broj bitova pretvornika)
  - brzina pretvorbe (broj uzoraka/s – sps)
- Brzina pretvorbe treba biti najmanje dvostruko veća od najviše frekvencije prisutne u signalu
  - Nyquistov kriterij



# Prijenosna funkcija A/D pretvornika

- $V_i$  - ulazni analogni napon
- $V_o$  - izlazni napon A/D pretvornika
- $V_{\text{LSB}}$  - osjetljivost





# Proces A/D pretvorbe

- Uzorkovanje (otipkavanje, *sampling*)
  - Uzimanje uzoraka ulaznog signala određenom *frekvencijom uzorkovanja*
- Kvantizacija
  - Određivanje amplitude uzorka
  - Svakoj amplitudi se pridjeljuje neka od  $N$  diskretnih kvantizacijskih razina
- Kodiranje
  - Pridjeljivanje kôda svakoj kvantizacijskoj razini
  - Najčešće prirodni binarni brojevi (kôdovi)

# A/D pretvorba

- Najvažnija svojstva A/D pretvornika su:
  - razlučivost (rezolucija)
  - točnost
  - stopa uzorkovanja
  - *aliasing*
  - zamućivanje (*dithering*)
  - *oversampling*

# Svojstva - rezolucija

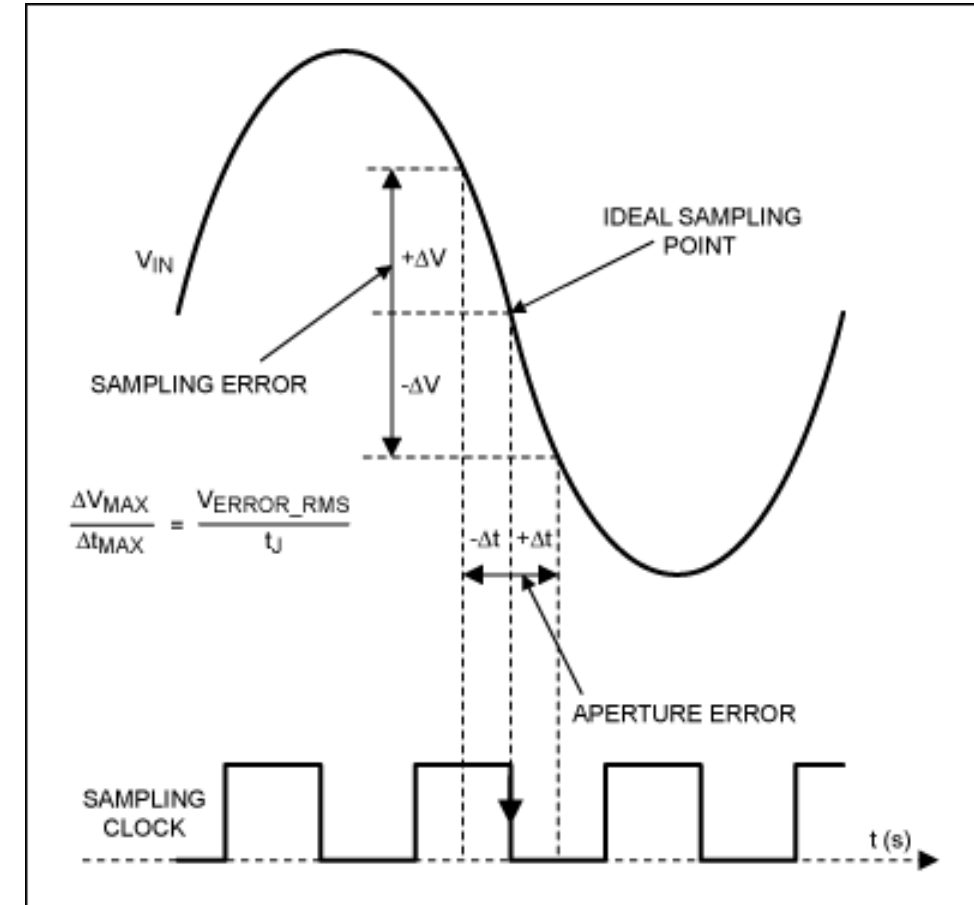
- Razlučivost (rezolucija)
  - Broj diskretnih vrijednosti (kôdova, simbola) koje pretvornik generira za raspon analognog signala
- Rezultat binarni, rezolucija se obično izražava brojem bitova
  - Rezolucija (u širem, općenitom smislu) =  $2^{\text{broj bitova}}$
  - Rezolucija (u užem, mjernom smislu) = najmanja promjena analognog signala koja uzrokuje promjenu 1 bita digitalne vrijednosti
  - Na primjer:
    - Ulazni signal: -5 do 10V (raspon = 15V)
    - Rezolucija: 12 bita (4096 vrijednosti)
    - Rezolucija:  $15\text{V} / 4096 \approx 0,00366 \text{ V/vrijednosti} = 0,00366 \text{ V/bit}$

# Svojstva - točnost

- Točnost

- Prilikom procesa kvantizacije dolazi do grešaka
- Greška kvantizacije
  - Zbog kvantizacijskog šuma
- Greška otvora (*aperture error*)
  - Uzimamo uzorke u određenim vremenskim trenucima
  - Signal takta koji vodi uzorkovanje mora biti **precizan**
  - Nepreciznost takta (*jitter*) uzrokuje grešku
  - Za uzorkovanje signala frekvencije 1 MHz u 8 bita trebamo *jitter* manji od 1.24ns!

$$\Delta t < \frac{1}{2^{\text{brojbitova}} \cdot \pi \cdot f_{\text{ulazno}}}$$

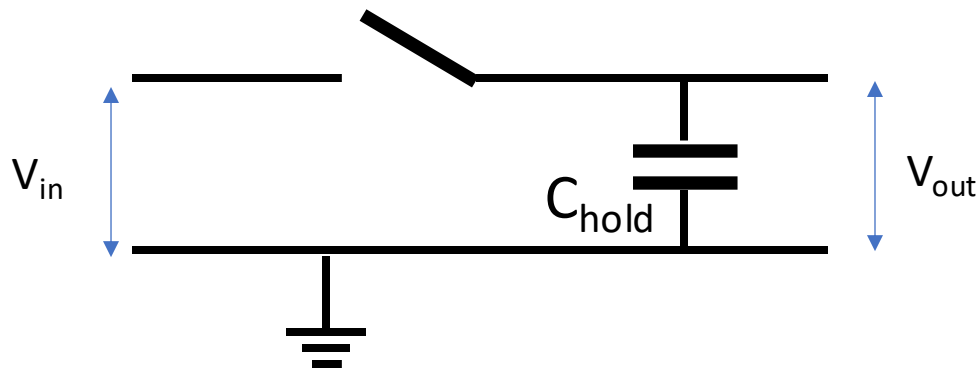


Izvor: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/4/4466.html>

# Svojstva – stopa uzorkovanja

- Stopa uzorkovanja

- Frekvencija kojom pretvornik otipkava (uzorkuje) analogni signal
- Proces uzorkovanja traje neko vrijeme (vrijeme uzorkovanja)
  - U slučaju brzih promjena analogne veličine, potrebno je na neki način *snimiti* ulaznu vrijednost da bi se onda *u miru* uzorkovala
  - **Sample and Hold (S+H)** sklop – kondenzator se nabije na napon ulazne veličine i zadržava je

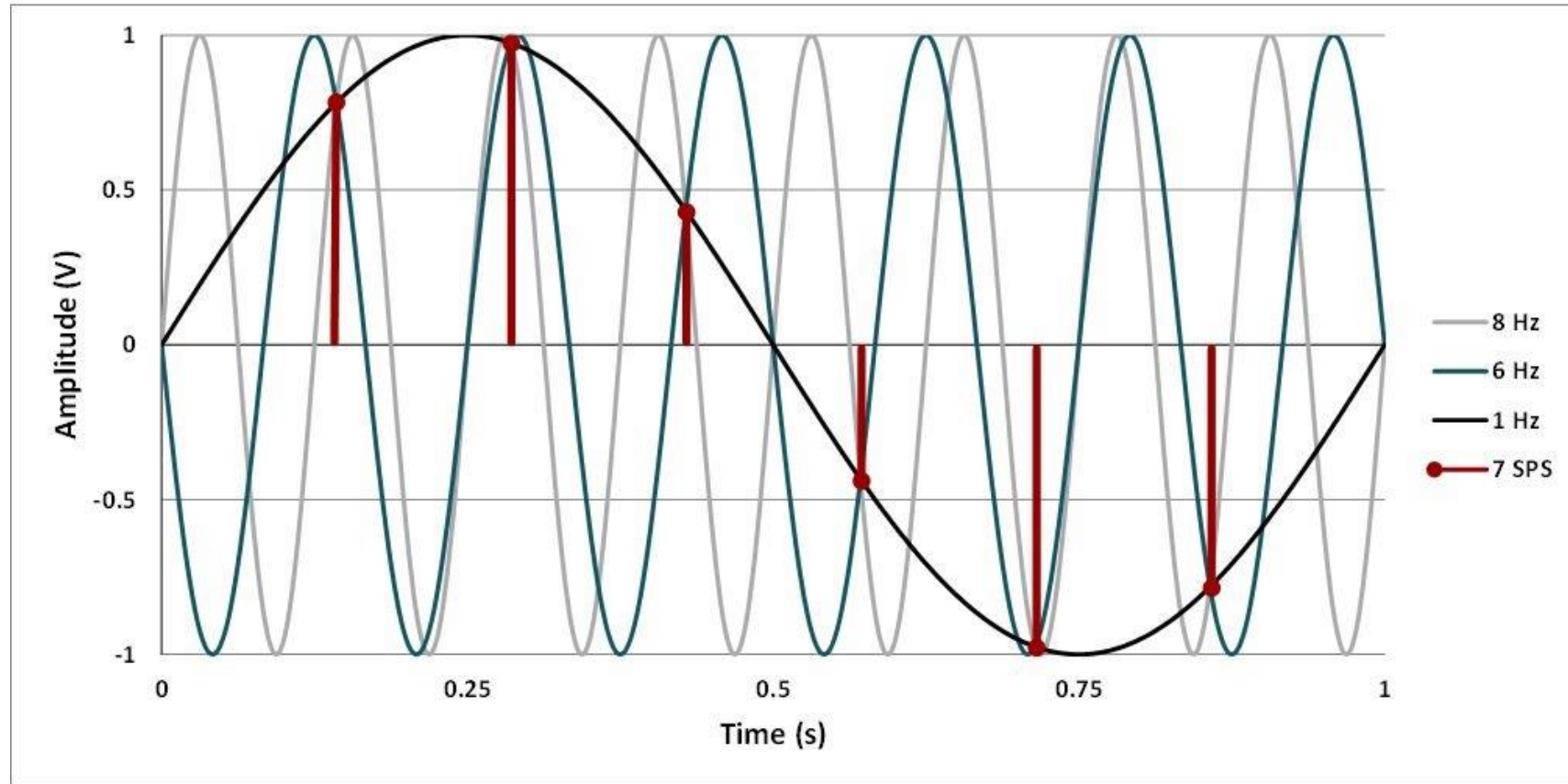


# Svojstva - aliasing

- Aliasing
  - Frekvencija uzorkovanja mora biti barem dvostruko veća od najviše frekvencije koja se može pojaviti u signalu koji se uzorkuje (Shannon, Nyquist)
- Ako ovo nije slučaj dolazi do *aliasinga*
  - U rezultatu se pojavljuju frekvencije koje ne postoje u originalnom signalu
    - Harmonici
- Signal se propušta kroz niskopropusni filter koji uklanja sve frekvencije  $> 2 * f$



# Nyquistov kriterij



Izvor: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/archives/b/precisionhub/posts/aliasing-in-adcs-not-all-signals-are-what-they-appear-to-be](https://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/precisionhub/posts/aliasing-in-adcs-not-all-signals-are-what-they-appear-to-be)

# Svojstva - zamućivanje

- Zamućivanje (*dithering*)
  - Namjerno dodavanje bijelog šuma niske amplitude u ulazni signal kako bi se izbjegao *aliasing*
  - Amplituda šuma oko polovice razine koja je potrebna za promjenu jednog bita izlaza
    - Rezultat izgleda prirodnije



# Svojstva - oversampling

- *Oversampling*

- Uzimanje uzoraka većom frekvencijom od potrebne kako bi se postigla veća točnost ili olakšala izvedba pretvornika
  - Zbog izvedbe pretvornika lakše je uzorkovati većom frekvencijom, a manjim pojasom
  - Dobiveni rezultat se kasnije digitalno obrađuje (jeftinije)



## 2.6 Principi rada A/D pretvornika

# Principi rada A/D pretvornika

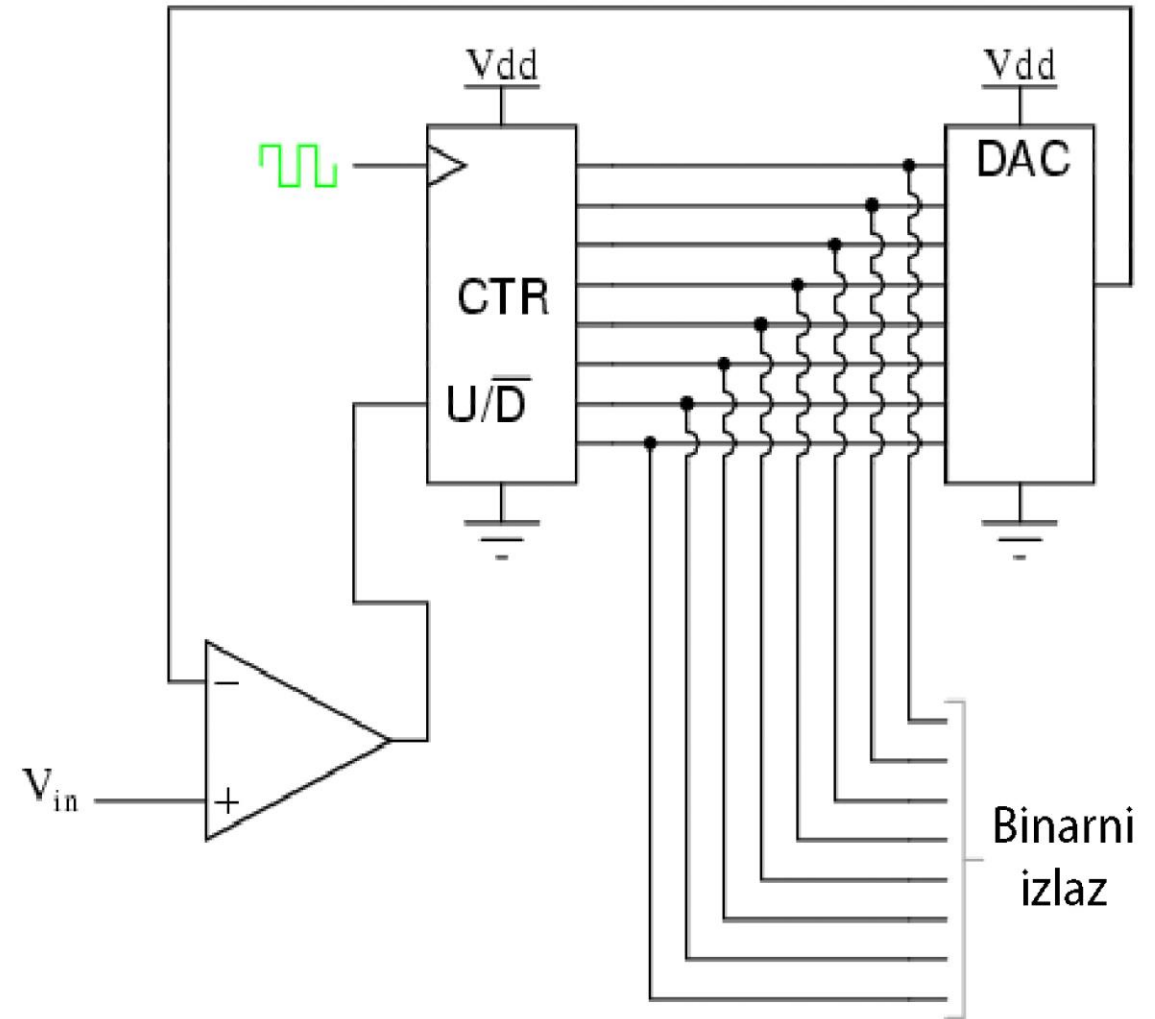
- Tri karakteristične metode pretvorbe:
  - sukcesivna aproksimacija (eng. successive approximation)
  - integracija (eng. integration)
  - neposredna usporedba (eng. direct comparison)
- osim toga, postoje i:
  - cjevovodni (pipeline) pretvornici
  - sigma – delta pretvornici
  - itd.

# A/D pretvorba

- Najčešće korištene izvedbe uključuju brojilo
  - dinamičke metode pretvorbe
  - karakteristična petlja povratne veze i naponski komparator
    - pretvorba usporedbom generiranog napona  $U_d$  (proporcionalnog digitalnoj vrijednosti  $N$ ) i ulaznog analognog napona
    - za generiranje napona  $U_d$  koristi se D/A pretvornik
  - u tu skupinu pripadaju prateći A/D, A/D pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom, integracijski A/D
- Izvedbe bez brojila – za zahtjevnije primjene, skupe

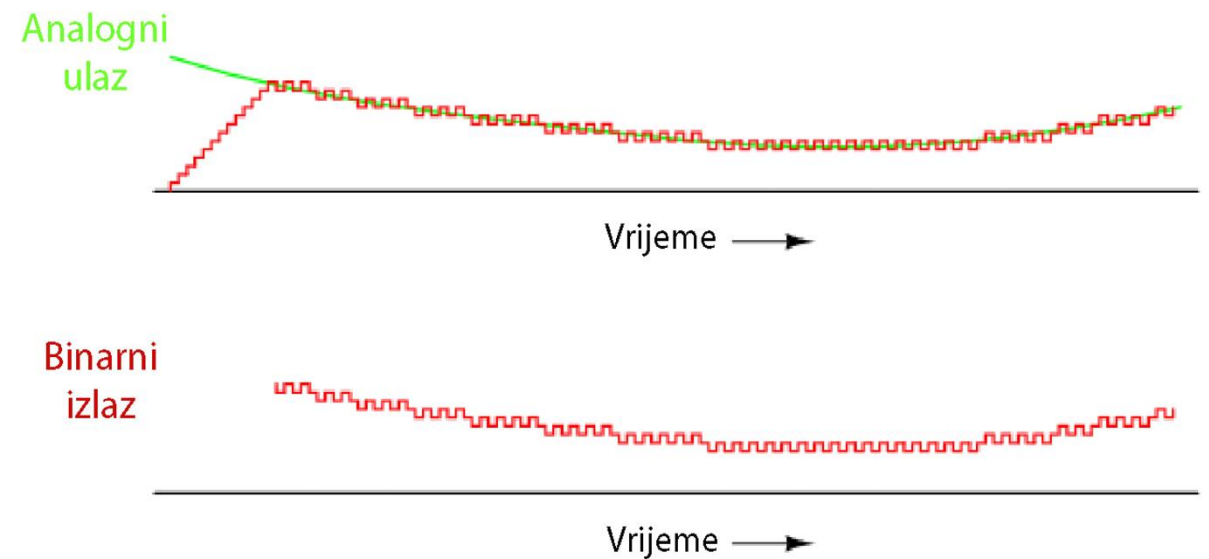
# Prateći A/D pretvornik (I)

- Koristi brojilo "naprijed/natrag"
- Ako je analogni ulaz veći od izlaza D/A pretvornika
  - brojilo broji unaprijed
- Ako je analogni ulaz manji od izlaza D/A pretvornika
  - brojilo broji unatrag



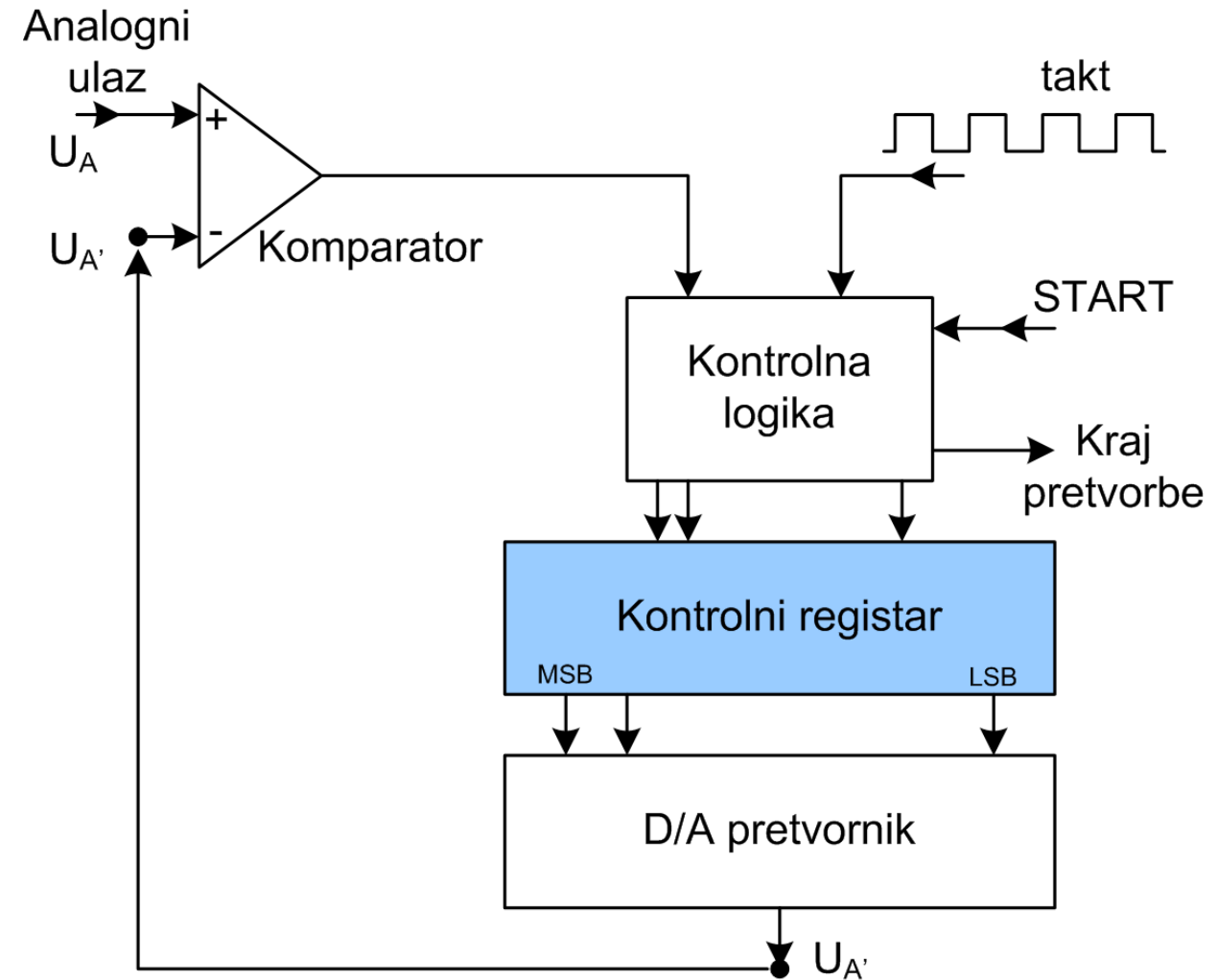
# Prateći A/D pretvornik (II)

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



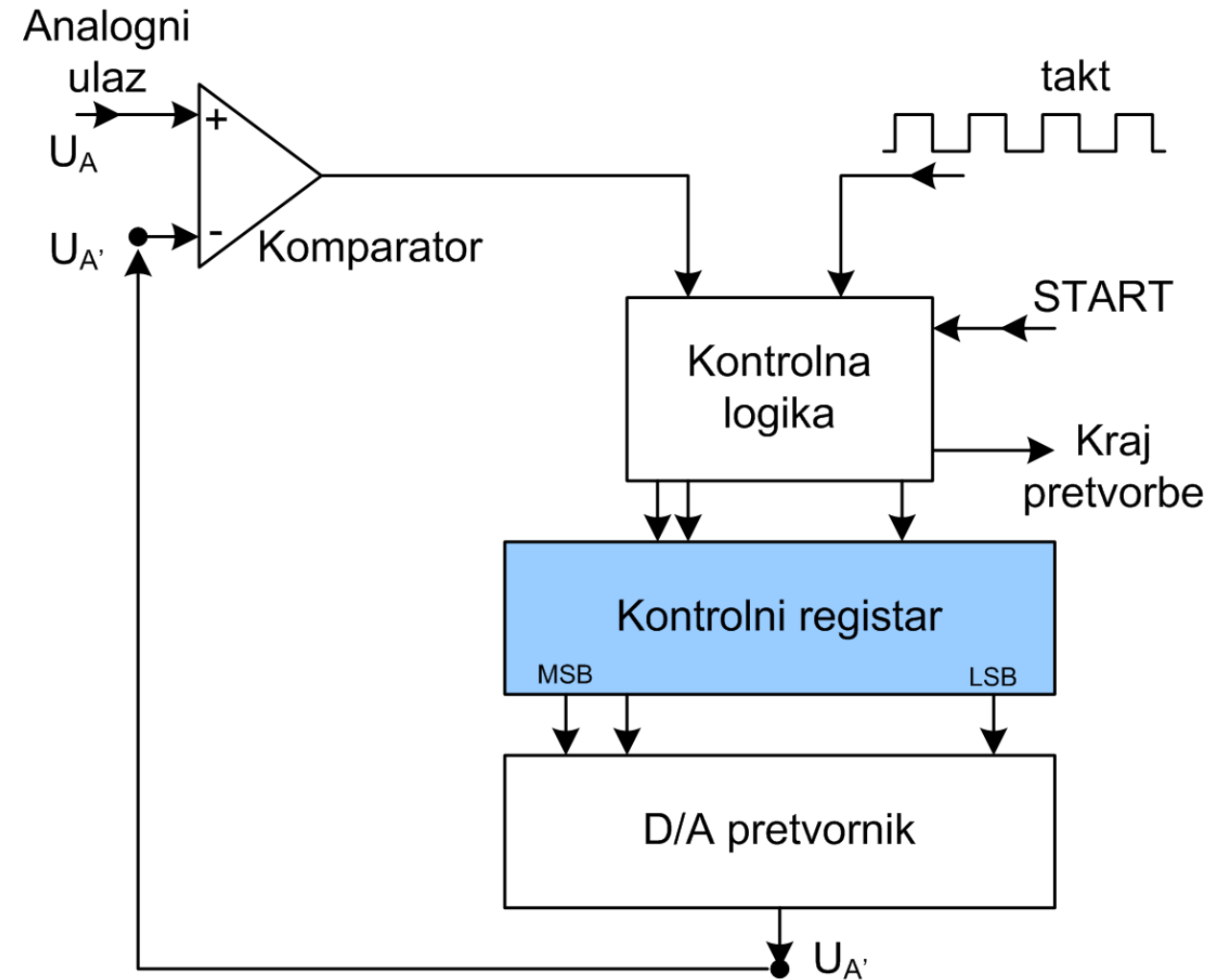
# Sukcesivna aproksimacija

- Najčešće korištena metoda
- Vrijeme pretvorbe je konstantno
- Pretvorba se obavlja u koracima



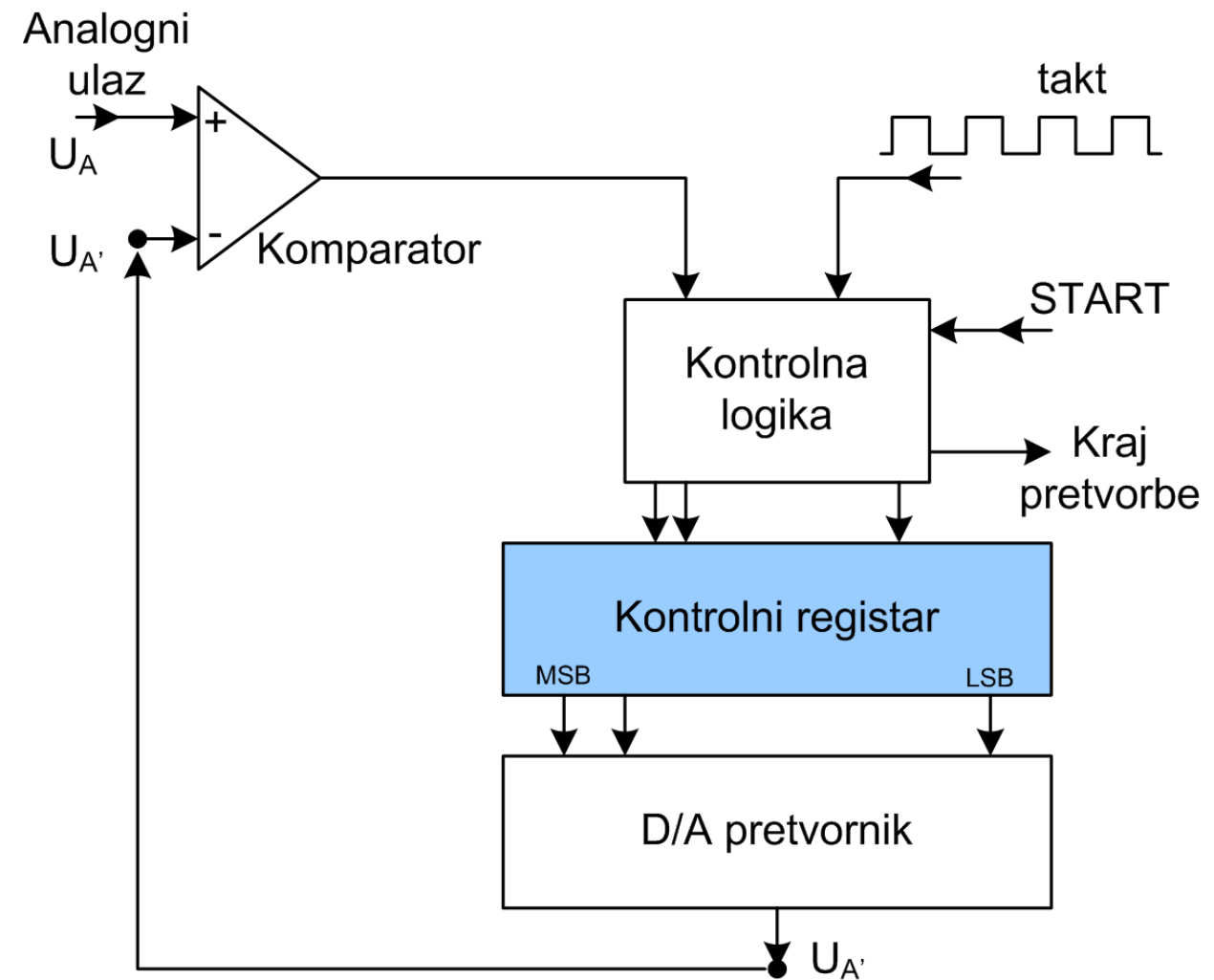
# SA – korak 1

- **1. korak:** kontrolna logika postavlja najviši bit kontrolnog registra. D/A pretvornik generira odgovarajući napon. Ako je taj napon ( $U_{A'}$ ) veći od ulaznog napona ( $U_A$ ), komparator prelazi u nisku razinu i kontrolna logika spušta najviši bit, inače ostaje postavljen

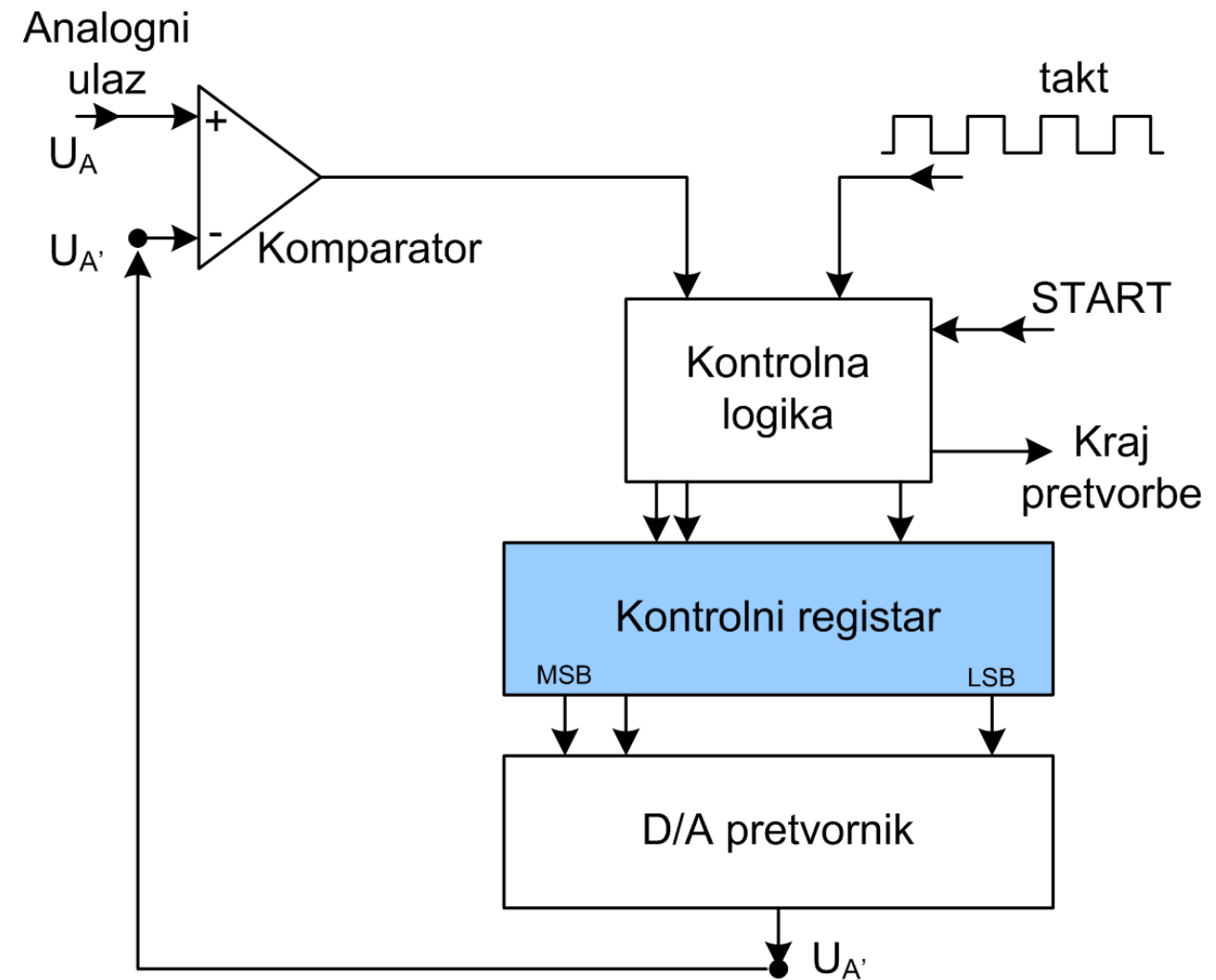




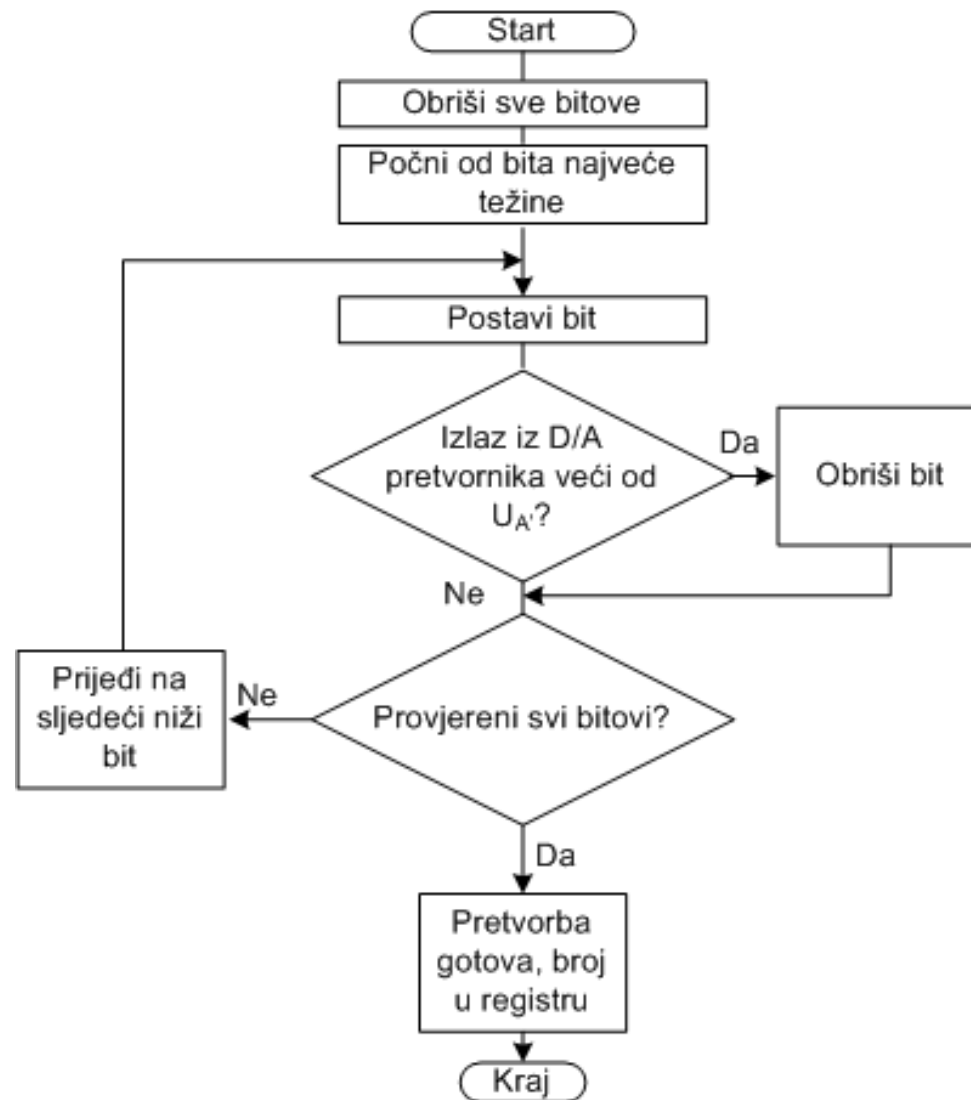
- **2. korak:** kontrolna logika postavlja sljedeći bit kontrolnog registra. D/A pretvornik generira novu vrijednost napona. Ako je taj napon ( $U_{A'}$ ) veći od ulaznog napona ( $U_A$ ), komparator prelazi u nisku razinu i kontrolna logika spušta trenutni bit, inače ostaje postavljen



- **3. korak:** Proces se nastavlja za svaki bit kontrolnog registra. Proces traženja zahtijeva jedan period takta za jedan period. Nakon što su svi bitovi isprobani, u kontrolnom registru je digitalni zapis ulazne veličine

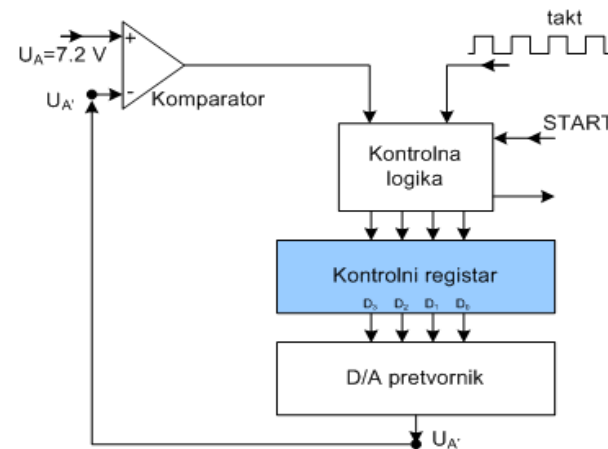


# SA – općeniti algoritam

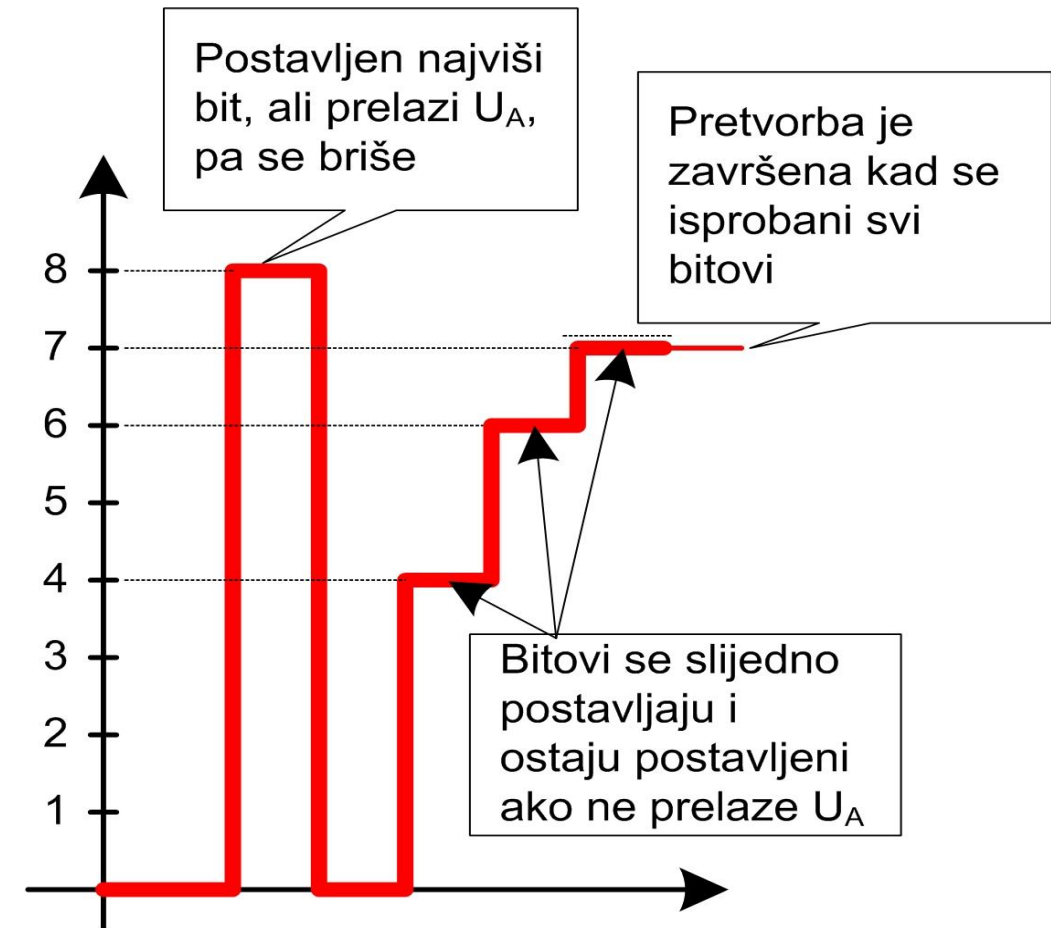


# Primjer rada sukcesivne aproksimacije

- Neka je kontrolni registar 4-bitni, razlučivost pretvornika 1 V, ulazni analogni napon  $U_A = 7.2 \text{ V}$

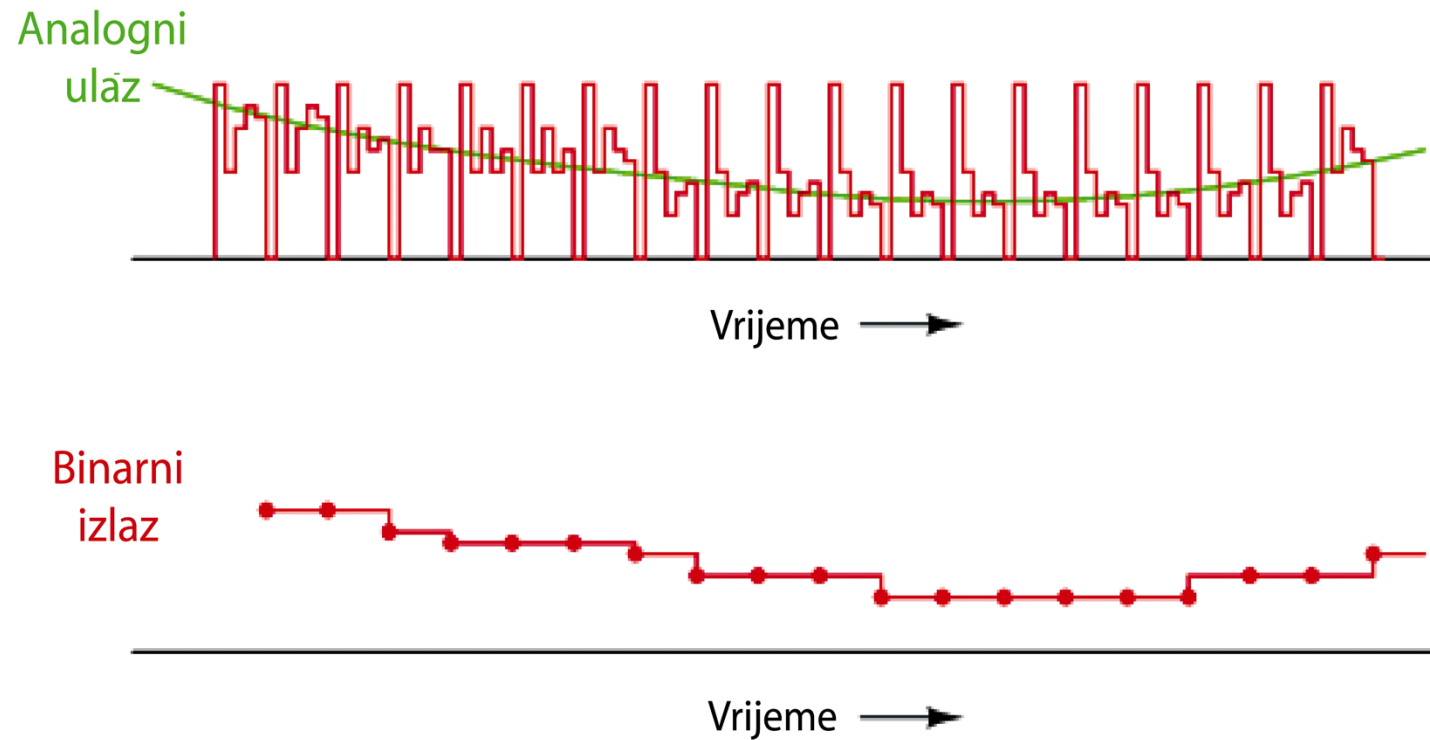


- Krajnja vrijednost je 7
  - manja je od ulaznog analognog napona, što je karakteristika metode SA-e
- Vrijeme pretvorbe je konstantno
  - N bitni pretvornik trebati će N ciklusa takta za pretvorbu, neovisno o vrijednosti ulaznog analognog napona.
- Postupak se naziva i binarno pretraživanje
  - postupak obilaska binarnog stabla po dubini (preorder traversal)

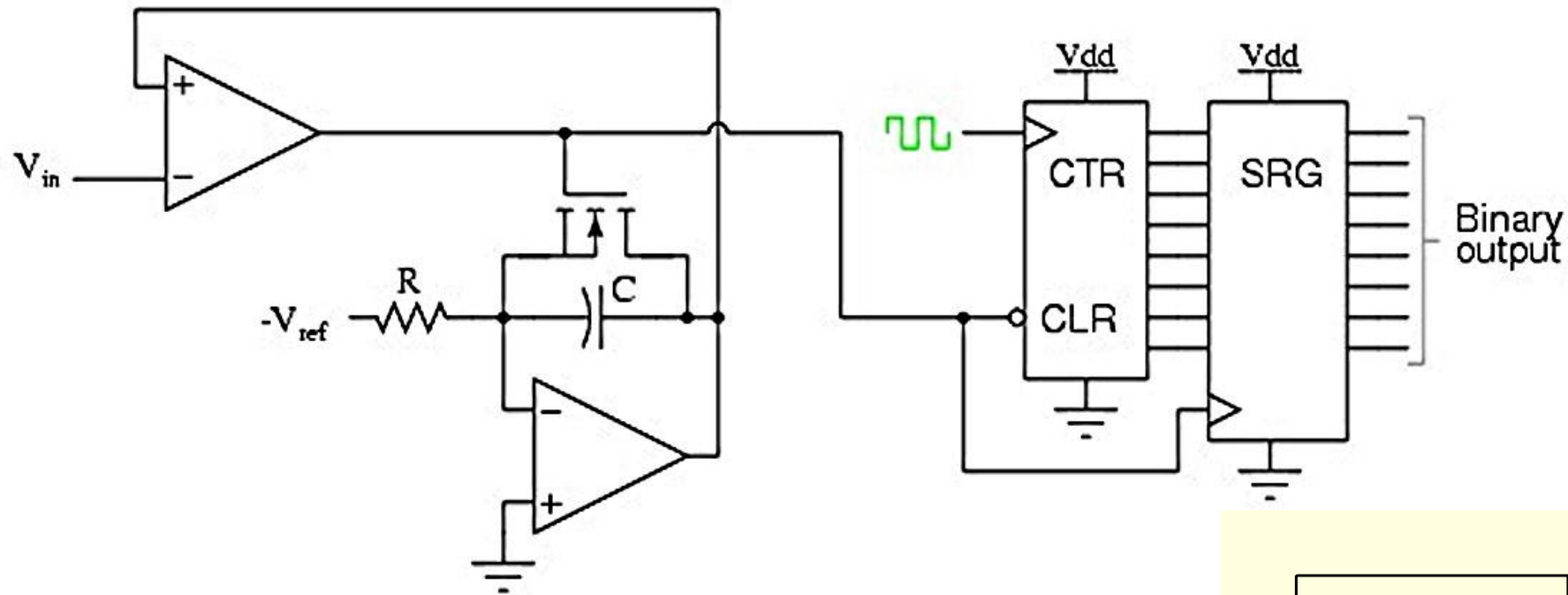


# Brzina sukcesivne aproksimacije

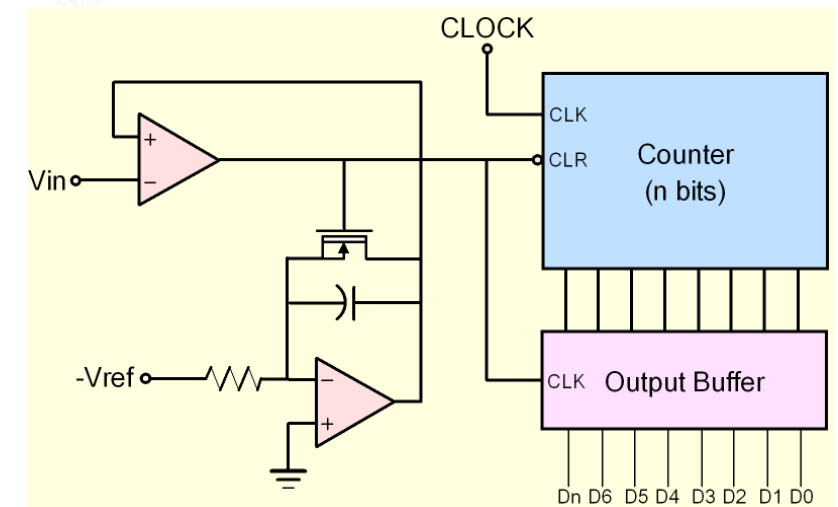
- Brzina pretvorbe do 5 Msps, razlučivost 8-16 bita.



# Metoda integracije (single slope)

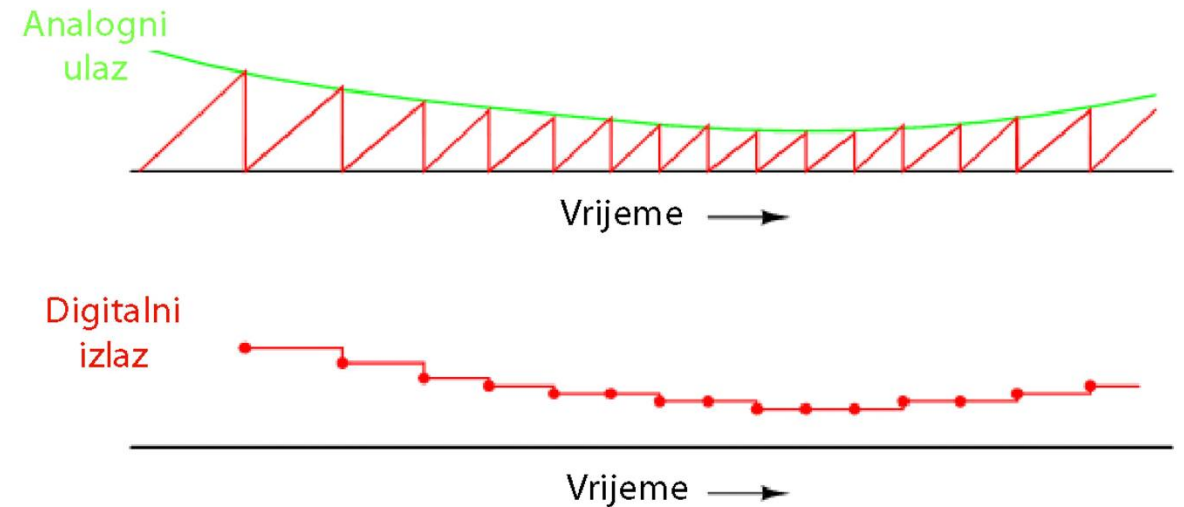


- Jednostavnija od *dual slope*
- Problem točne frekvencije,  $R$ ,  $C$



# Integrirajući A/D pretvornik

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



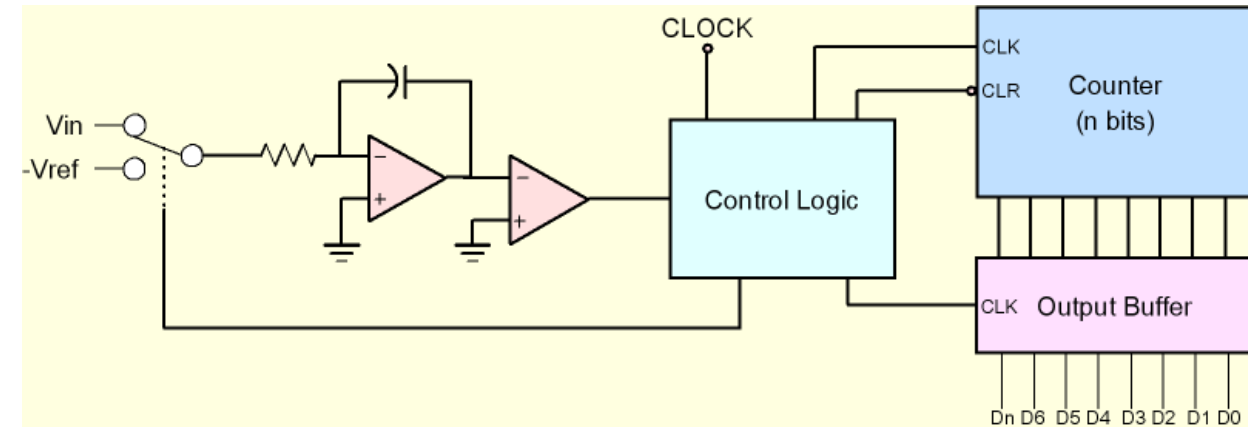
# Integrirajući A/D pretvornik

- Operacijsko pojačalo – integrator – proizvodnja pilastog valnog oblika
- Dvo-kosinski pretvornik
  - Integrator je vođen pozitivnim analognim ulaznim signalom koji stvara pozitivnu kosinu
  - S određenim referentnim naponom na ulazu stvara se negativna kosina, a vrijeme se mjeri istim brojiлом
  - 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»



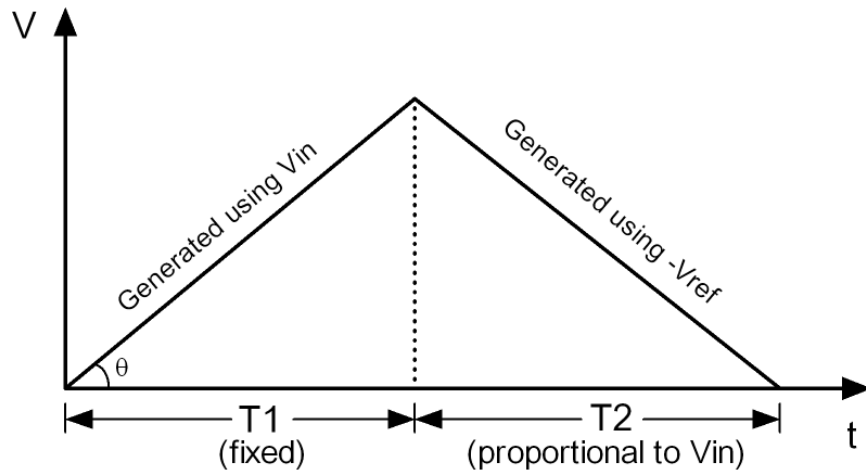
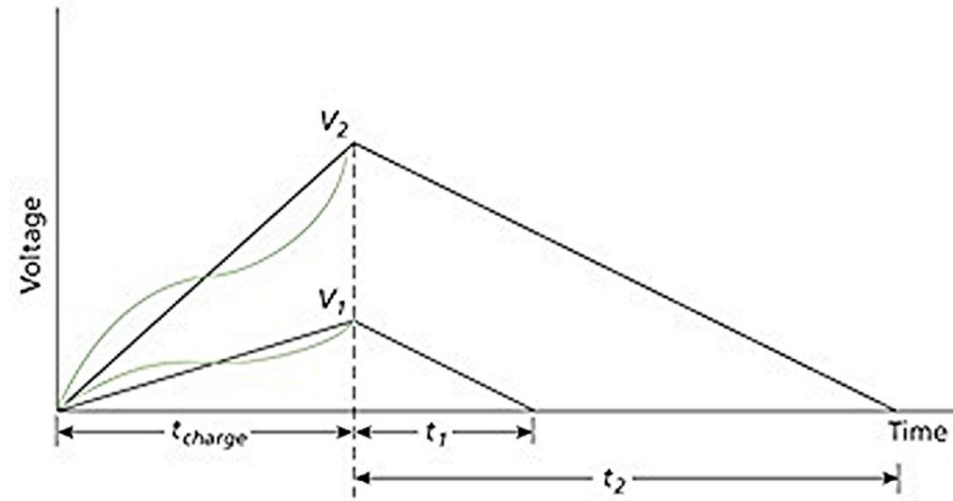
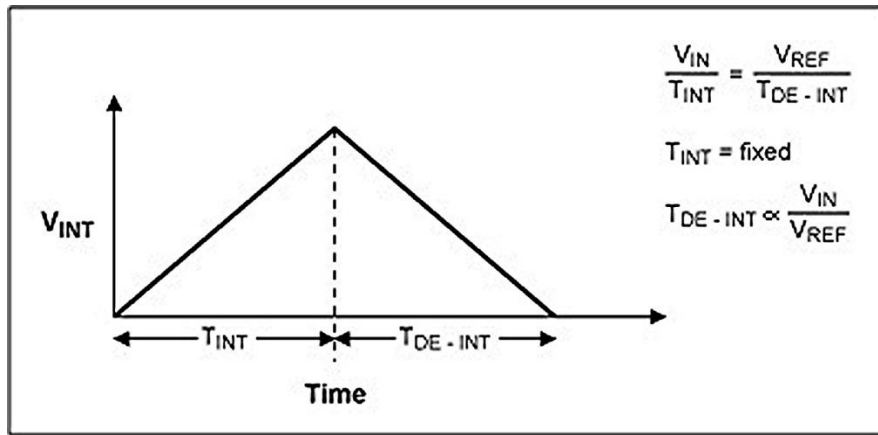
# Metoda integracije (dual slope)

- Analogna 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



Gabriel Torres, How Analog-to-Digital Converter (ADC) Works, Hardware Secrets, Tutorials, 2006.

# Metoda integracije (dual slope)



$$T_2 = T_1 \times V_{IN} / V_{REF}$$

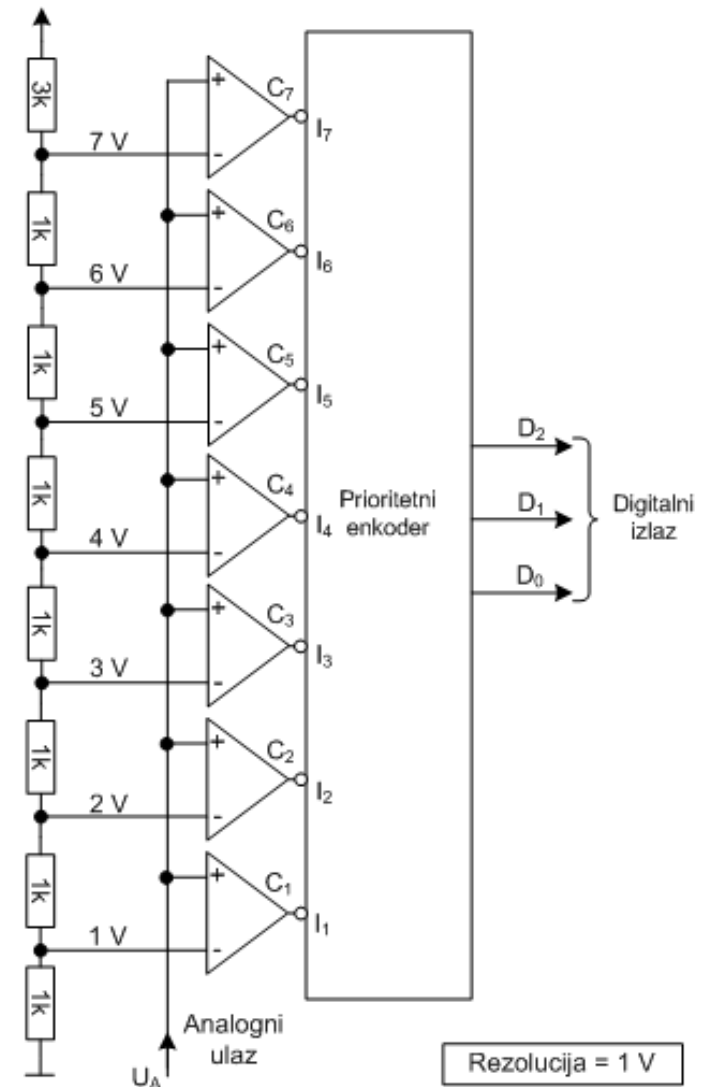
# Metoda paralelne pretvorbe (*flash*)

- Najbrža metoda pretvorbe
- Paralelna pretvorba = neposredna usporedba
- Zahtjeva puno više sklopovlja od ostalih metoda
  - 6 – bitni pretvornik zahtjeva 63 analogna komparatora, 8-bitni 255, 10 bitni 1023 -> N bitni pretvornik zahtjeva  $2^N - 1$  analognih komparatora

# Primjer 3-bitnog *flash* pretvornika

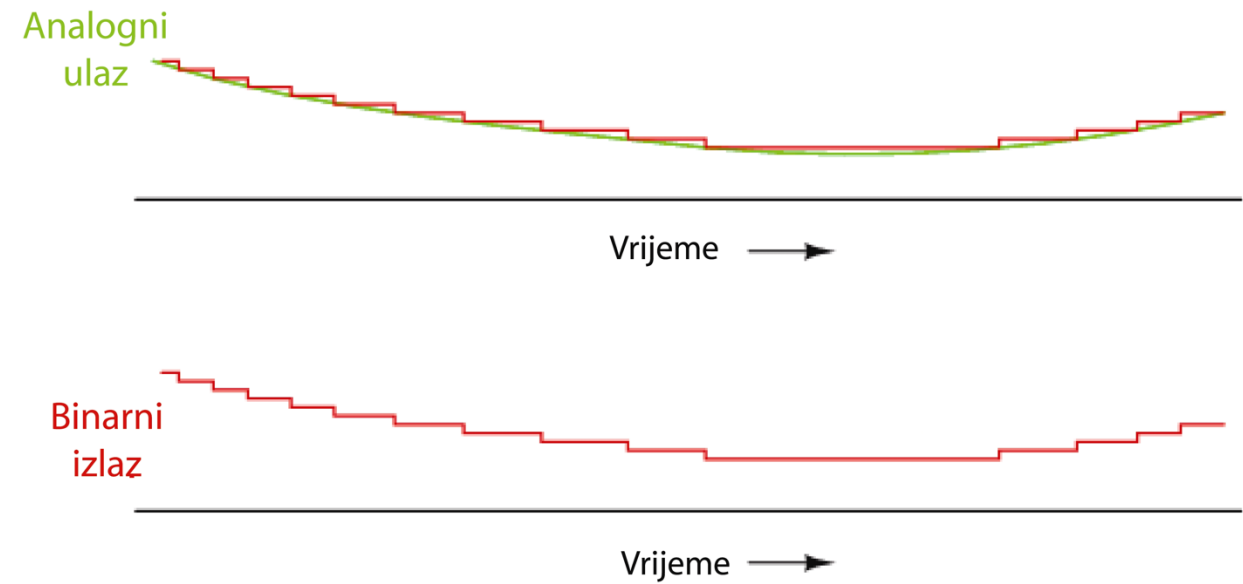
- Naponsko djelilo postavlja referentnu razinu za svaki komparator
- Sedam razina, prva = 1 V, druga = 2 V, itd.
- Analogni ulaz spojen je na ulaz svakog komparatora

- Npr. ako je  $3\text{ V} < U_A < 4\text{ V}$ , izlazi  $C_1$ ,  $C_2$  i  $C_3$  komparatora biti će u niskoj razini, ostali u visokoj
- Enkoder će reagirati samo na nisku razinu na  $C_3$ , i na izlazu dati 011

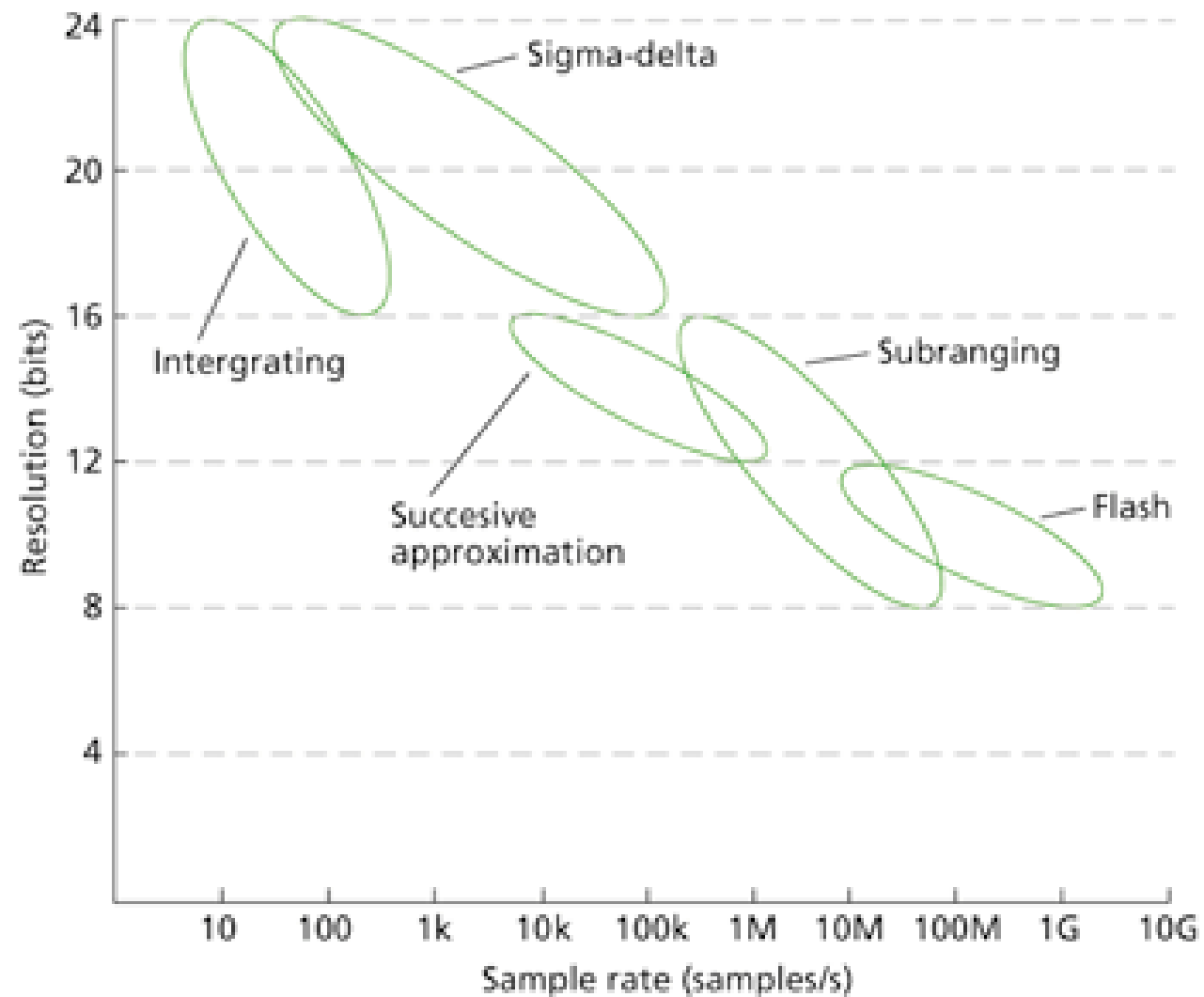


# Brzina *flash* pretvornika

- Nema signala vremenskog vođenja
- Pretvorba započinje čim se pojavi napon na ulazu
- Trajanje pretvorbe ograničeno jedino vremenom propagacije signala (tipično nanosekunde) – velike brzine pretvorbe (1 Gsps)

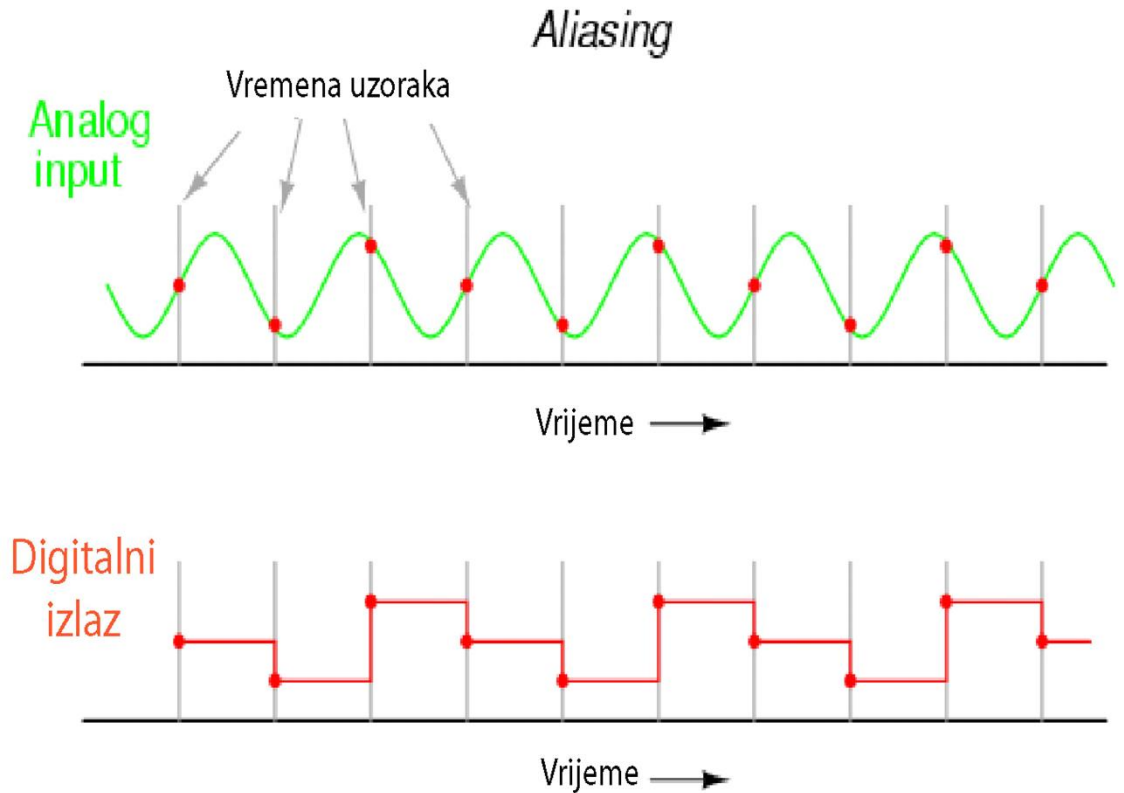


# Usporedba karakteristika A/D pretvornika



# Usporedba karakteristika A/D pretvornika

- 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



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

# Usporedba karakteristika A/D pretvornika

- *Step recovery*

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

- 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

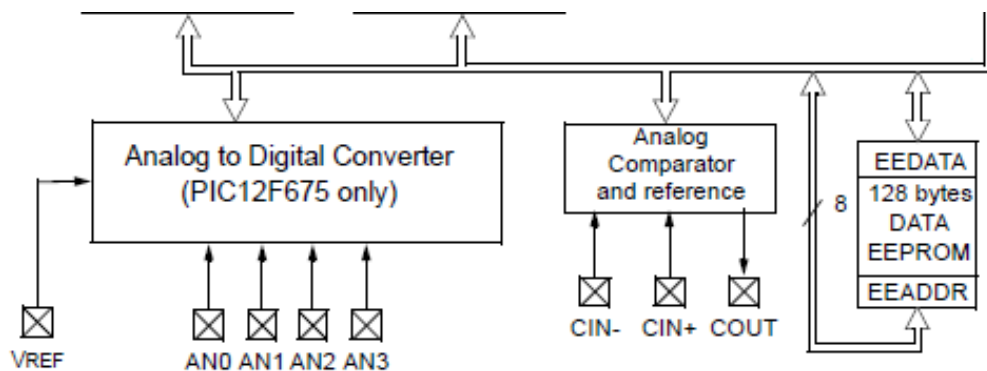
- *Step recovery*

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

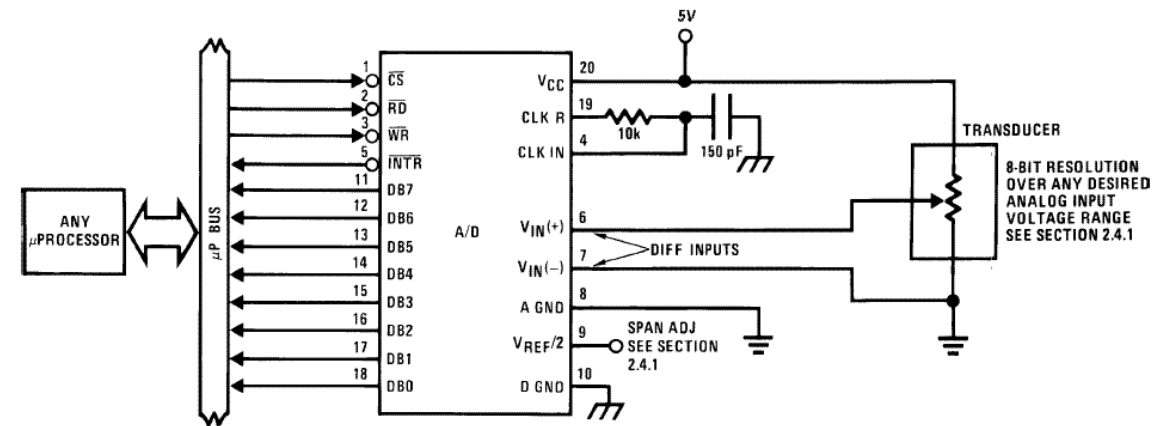


# Ugrađeni ili vanjski A/D pretvornik

- A/D pretvornik ugrađen u mikrokontroler
  - Prednosti: manji broj komponenata 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

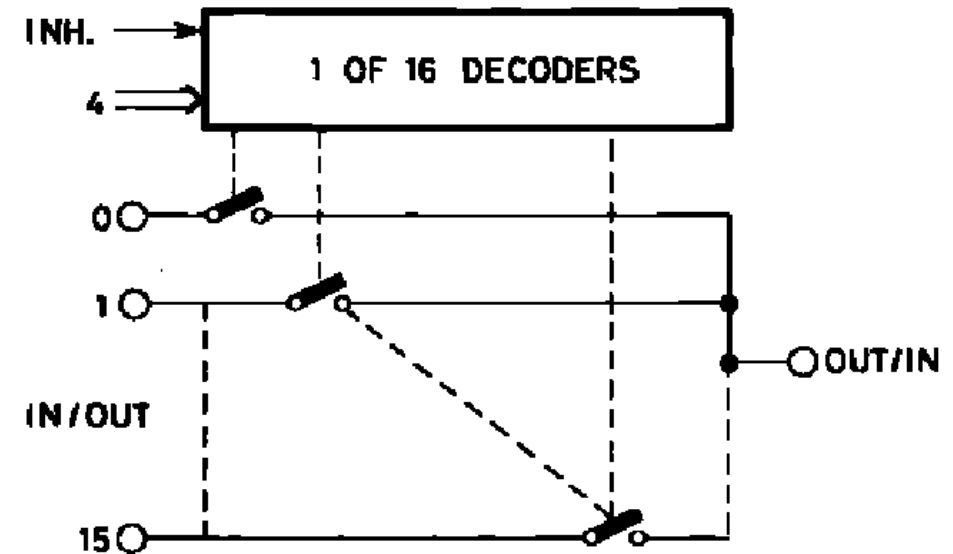


- A/D pretvornik vezan na sabirnicu mikroprocesora
  - Prednosti: nema ograničenja na vrstu pretvornika, brzinu i razlučivost.
  - Nedostaci: Potrebno je koristiti vanjsku sabirnicu.



# Analogno multipleksiranje

- Analogno multipleksiranje:
  - Omogućuje korištenje jednog A/D pretvornika 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



# A/D pretvorba u ESP32

- ESP32 ima ugrađena dva A/D pretvornika
  - ADC1: 8 kanala
  - ADC2: 10 kanala
- Metoda: sukcesivna aproksimacija
- Rezolucija: 12 bita

