



Sveprisutno računarstvo

1. Uvod

- Primjeri sveprisutnih računalnih sustava
- Što je to sveprisutno računarstvo ?
- Svojstva sveprisutnih računalnih sustava

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.



Primjeri sveprisutnih računalnih sustava

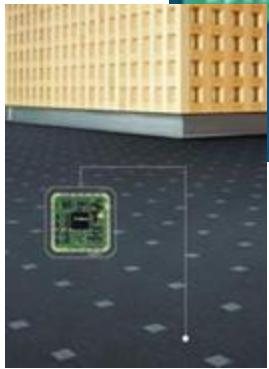


Pristupi proučavanju računala

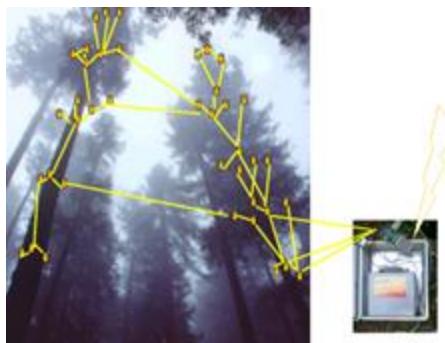
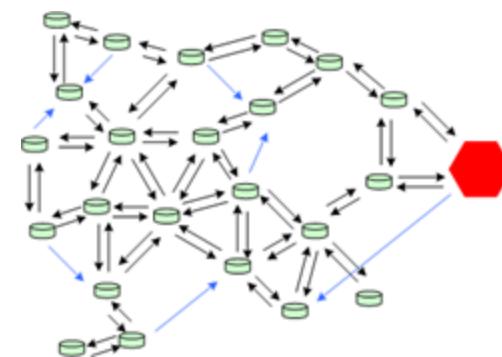
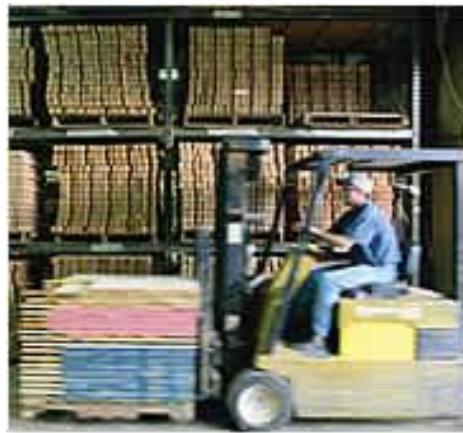
1. Računalo je alat
2. Računalo kao objekt promatranja
3. Računalo u okolini



Primjeri ...



Primjeri ...



Primjeri ...

Upravljanje procesima

- brzina
- sigurnost

Spori proces (termocentrala)



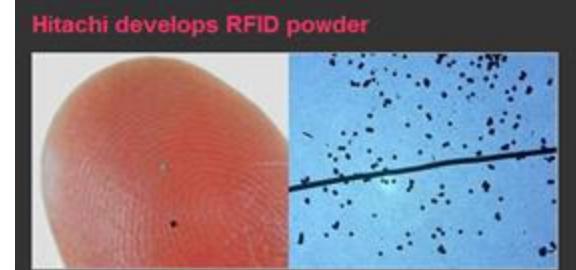
Brzi proces (prometna sredstva)



Primjeri ...



Hitachi develops RFID powder



Hitachi's new RFID chips (pictured on right, next to a human hair) are 64 times smaller than their mu-chips (left)

RFID keeps getting smaller. On February 13, Hitachi unveiled a tiny, new "powder" type RFID chip measuring $0.05 \times 0.05 \text{ mm}$ — the smallest yet — which they aim to begin marketing in 2 to 3 years.

By relying on semiconductor miniaturization technology and using electron beams to write data on the chip substrates, Hitachi was able to create RFID chips 64 times smaller than their currently available $0.4 \times 0.4 \text{ mm}$ mu-chips. Like mu-chips, which have been used as an anti-counterfeit measure in admission tickets, the new chips have a 128-bit ROM for storing a unique 38-digit ID number.

The new chips are also 9 times smaller than the prototype chips Hitachi unveiled last year, which measure $0.15 \times 0.15 \text{ mm}$.

At 5 microns thick, the RFID chips can more easily be embedded in sheets of paper, meaning they can be used in paper currency, gift certificates and identification. But since existing tags are already small enough to embed in paper, it leads one to wonder what new applications the developers have in mind.

Primjeri ...





Sveprisutno računarstvo

Sveprisutno računarstvo – vaše viđenje



Sveprisutno računarstvo

Mark Weiser: The Computer for the 21st Century (1991*)

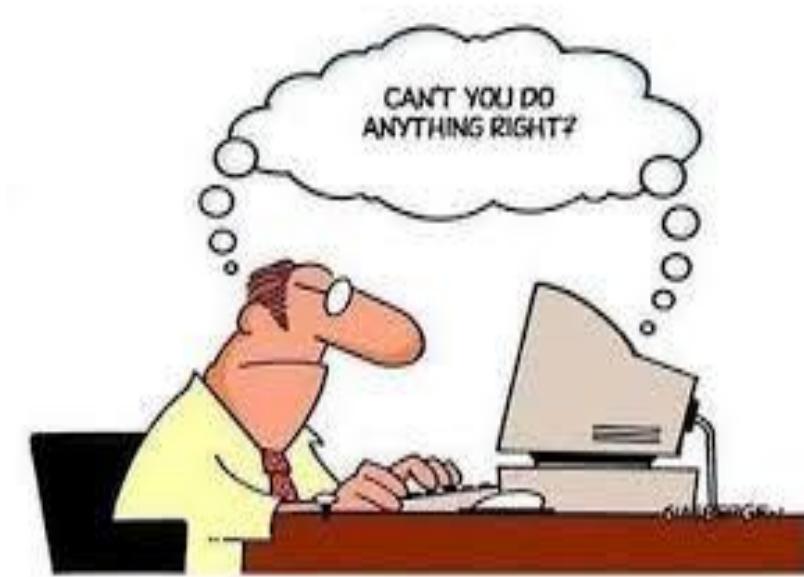
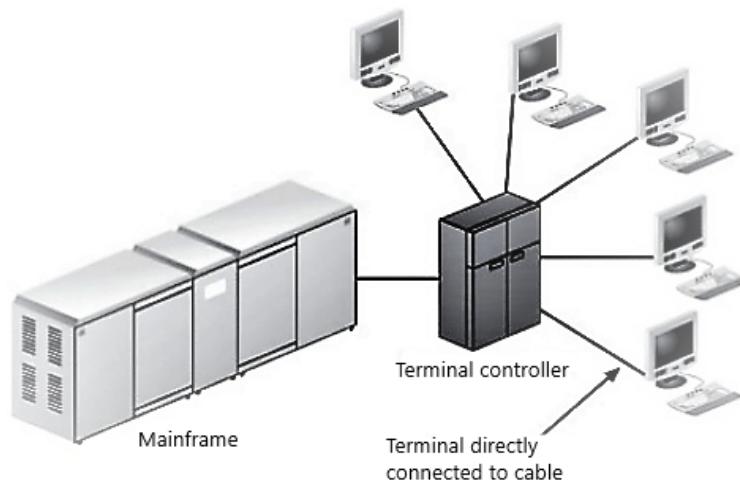
The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it.

* - sam termin ubiquitous computing nastao cca. 1988. tijekom njegovog boravka u XEROX PARC

Sveprisutno računarstvo

- **Odnos čovjek - računalo**

1. generacija: *mainframes*, računalni centri (ljudi vs računalo) [SRCE ☺]
2. generacija: osobna računala (čovjek vs njegovo računalo)
3. generacija: sveprisutno računarstvo (**računala uokolo i za čovjeka**)



Principi sveprisutnog računarstva

- **Principi sveprisutnog računarstva (Weiser):**

- Računalo je tu da vam pomogne nešto napraviti (a ne da se bavite računalom)
- Najbolje računalo je ono koje ne primjećujete
- Služenje računalom mora biti intuitivno
- Tehnologija mora pružati *smirenje*

Aspekti sveprisutnog računarstva

Raspodijeljeni sustavi

Ugradbeni sustavi

Programska potpora

Sustavi za rad u
stvarnom vremenu

Pokretni sustavi

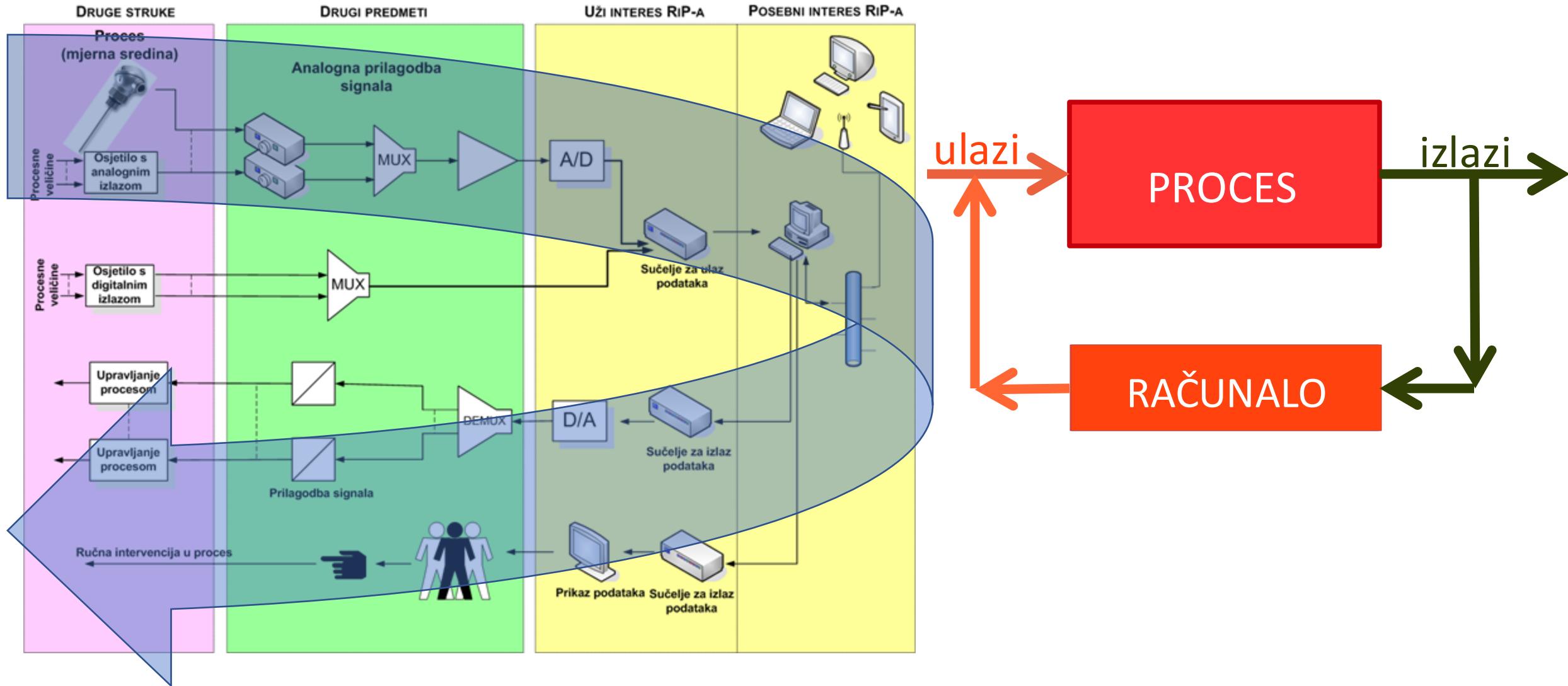
Svjesnost
konteksta

Sučelje čovjek - računalo

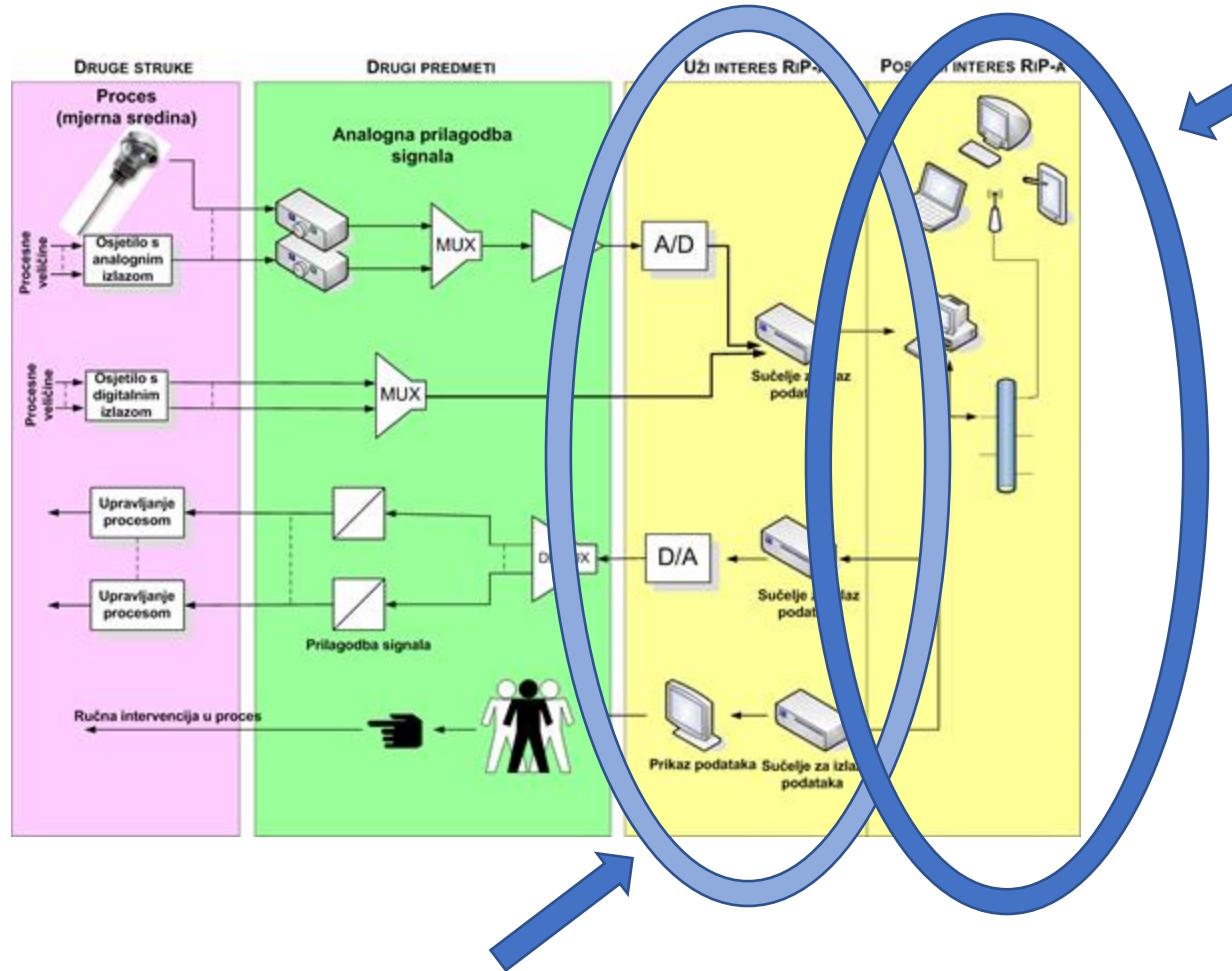
Umreženi sustavi i
komunikacijski
protokoli

Umjetna inteligencija

Velika slika (računala i procesi)



Razlika – UbiComp i RIP



O sustavu

O korisniku i interakciji
sa sustavom

O računalu

Odnos UbiComp i IoT

- Sveprisutno računarstvo = prožimajuće računarstvo (engl. pervasive computing)
 - filozofsko pitanje ...
 - Pervasive computing - više tehnički pristup?
- Sveprisutno računarstvo ⊂ Internet stvari
- Sveprisutno računarstvo ⊃ Kiberbetsko fizički sustavi



Svojstva sveprisutnih računalnih sustava

Svojstva

- Sveprisutni sustavi, kao posljedica okoline i zahtjeva, razlikuju se po svojim svojstvima od klasičnih računalnih sustava po slijedećim svojstvima:
- Reaktivnost (engl. *reactive computation*)
 - Klasično računarstvo – ulaz -> transformacija -> izlaz
 - Opis ponašanja sustava – funkcija transformacije ulaza u izlaz
 - Reaktivni sustavi – trajna interakcija sustava s okolinom
 - Opis ponašanja sustava – slijed (engl. *sequence*) parova ulaz, izlaz
- Konkurentnost (engl. *concurrency*)
 - Na razini pojedine komponente sveprisutnog sustava (više procesa i/ili dretvi)
 - Na razini svih komponenti (raspodijeljenog) sustava

Svojstva

- Interakcija s fizičkim svijetom (engl. *feedback control*)
 - Povratna veza upravljačke petlje: osjetila -> obrada -> aktuacija
 - Poznavanje fizičkog svijeta, predviđanje posljedica aktuacije
- Računanje u stvarnom vremenu (eng. *real-time computation*)
 - Implementacija sustava koji zadovoljava vremenska ograničenja na odziv
 - Prediktivnost brzine odziva (reakcije) sustava s obzirom na događaje u okolini i unutar sustava, upravljanje resursima sustava
- Sigurnost (eng. *safety*)
 - Sigurnosno kritični sustavi – sigurnost u oblikovanju i u implementaciji
 - Formalno verificiranje svojstva sigurnosti sustava

Svojstva

- Energetska efikasnost (engl. *energy efficiency*)
 - Izvori energije potrebne za rad
 - Prilagođavanje dostupnosti energije
- Interakcija s korisnicima (engl. *human-computer interaction*)
 - Modaliteti interakcije čovjek – računalo
 - Izravno / neizravno (izdavanje naredbi / sustav sam zaključuje)
 - Fizička akcija, gesta / glas / ...
 - Interakcija s pojedinom komponentom / čitavim sustavom
 - Čovjek u krugu / čovjek van kruga
- Svjesnost konteksta (engl. *context awareness*)
 - Fizičkog – okoline (temperatura, vrijeme, gibanje ...), lokacije, vremena ...
 - Korisničkog – preferencije korisnika, stanje korisnika ...
 - Virtualnog – internog stanja uređaja, sustava, okoline – dostupnih usluga ...

Svojstva

- Autonomnost i adaptivnost (engl. *autonomy and adaptivity*)
 - Upravljanje sustava svojim akcijama, bez interakcije s čovjekom
 - Reakcija na događaje u okolini, prilagodba sustava promjenama konteksta



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.

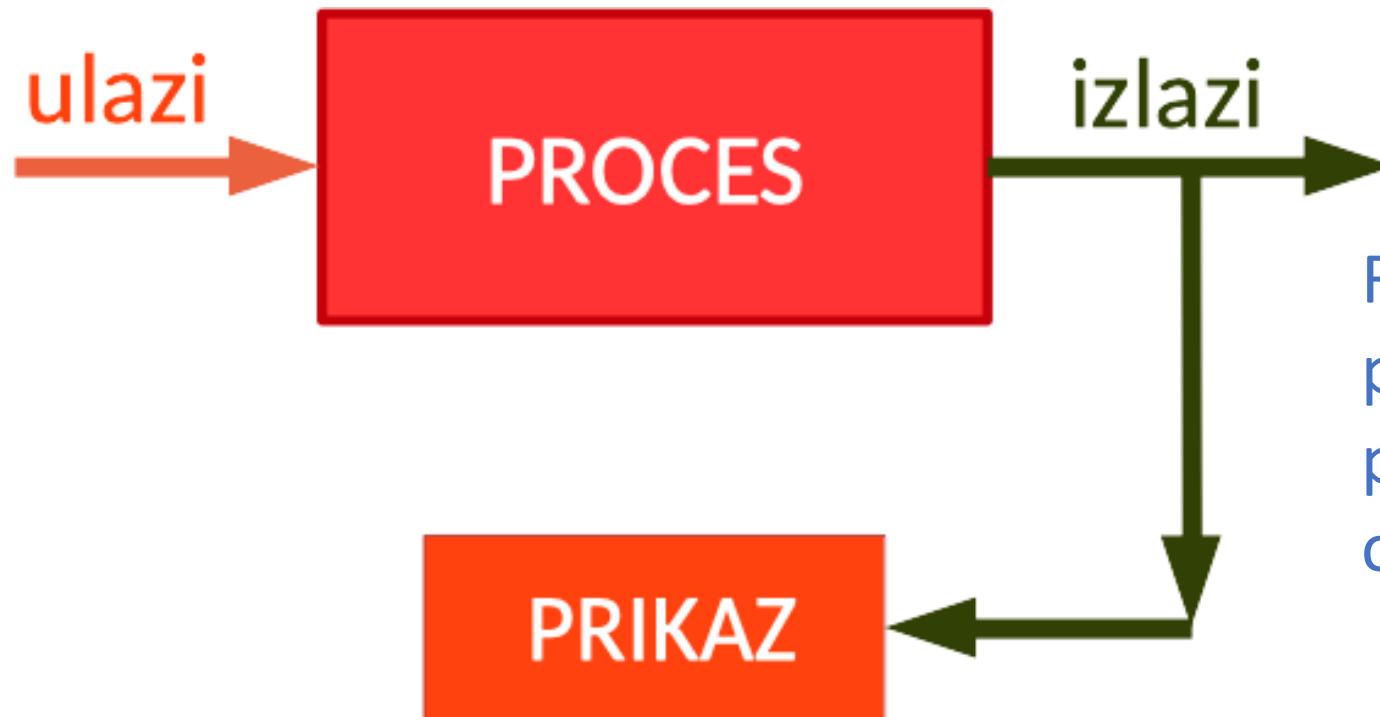
NC: Only noncommercial use of your work is permitted.

SA: Adaptations must be shared under the same terms.



2.1 Upravljanje u otvorenom i zatvorenom krugu

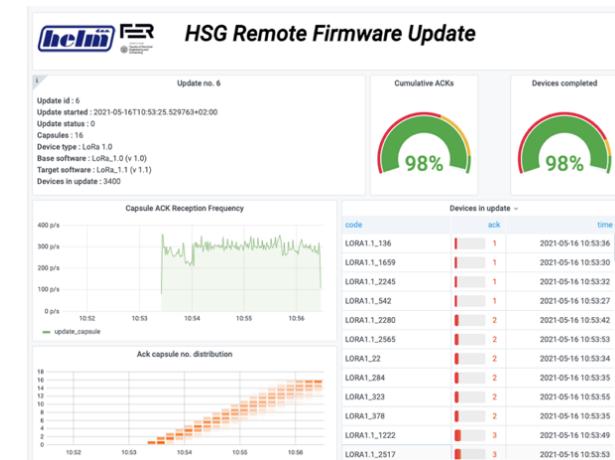
Upravljanje procesima (I)



praćenje (nadzor)



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



Upravljanje procesima (II)

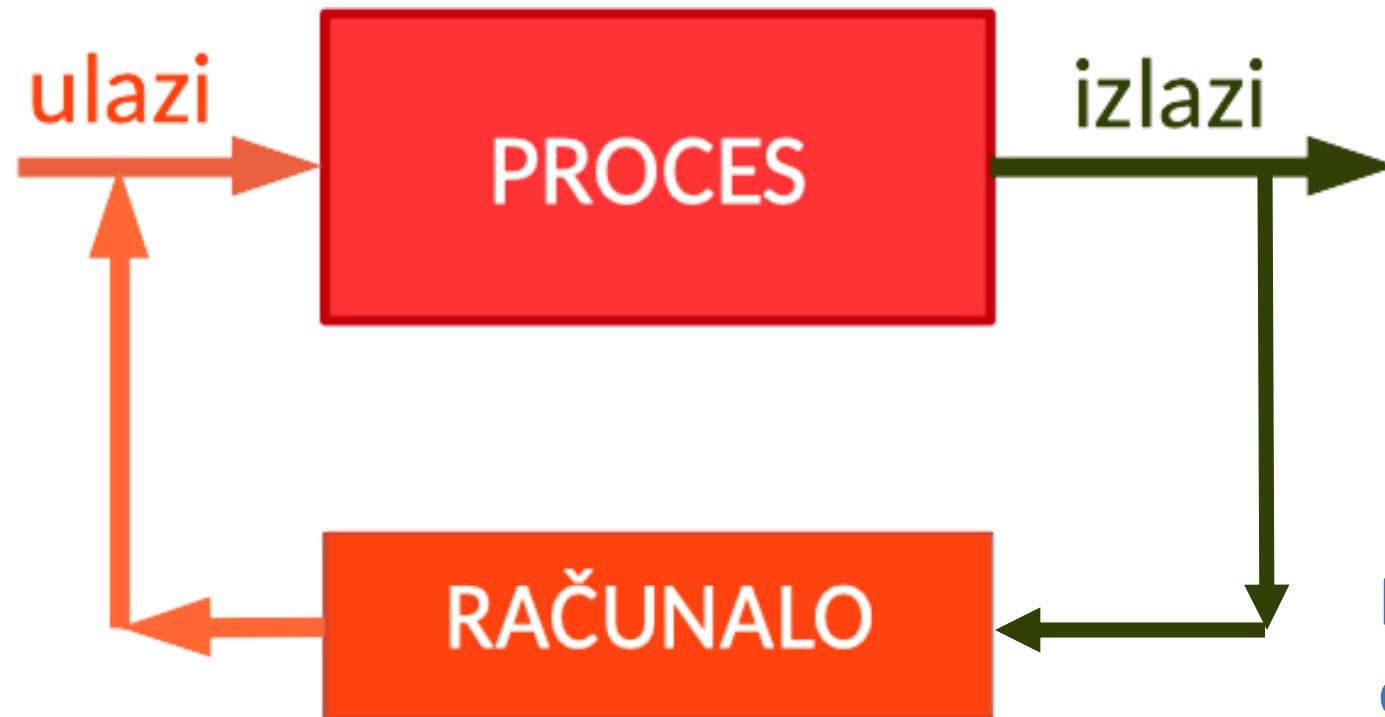


Upravljanje od strane računala
neovisno o izlazu (upravljanog
procesa/objekta)

$ulazi \neq f(izlazi)$

upravljanje u otvorenom krugu

Upravljanje procesima (III)



povratna veza, upravljanje u zatvorenom krugu



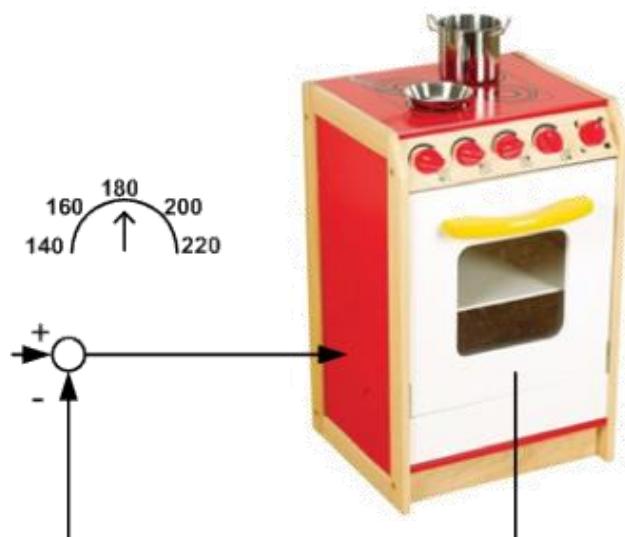
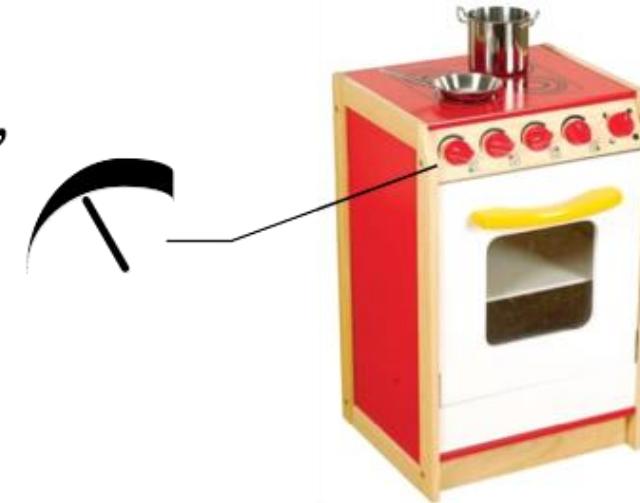
Računalo upravlja procesom / objektom na osnovu njegova stanja (+ informacije o željenom stanju)

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

Primjer upravljanja u otvorenom i zatvorenom krugu

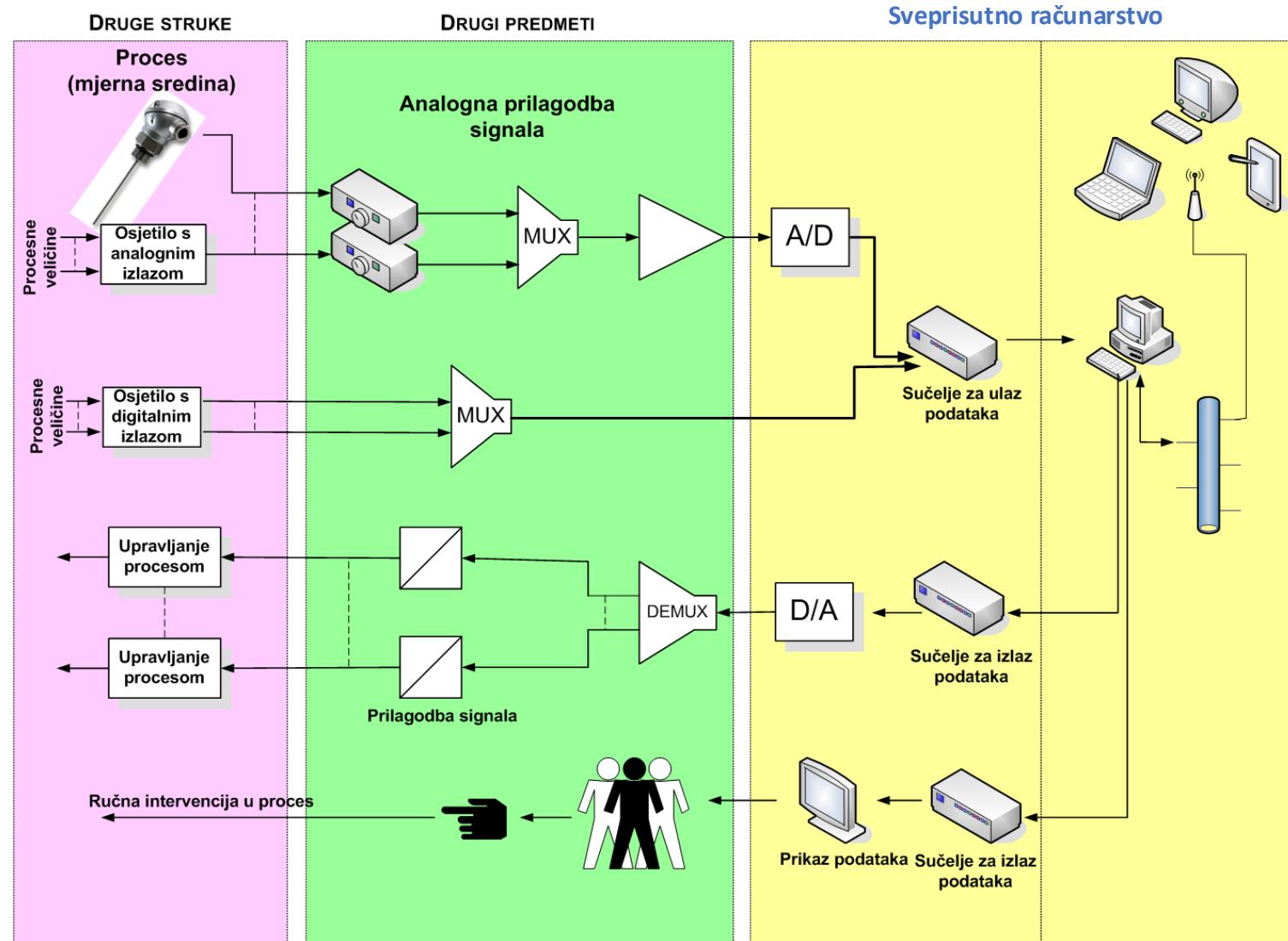
otvoreni krug

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



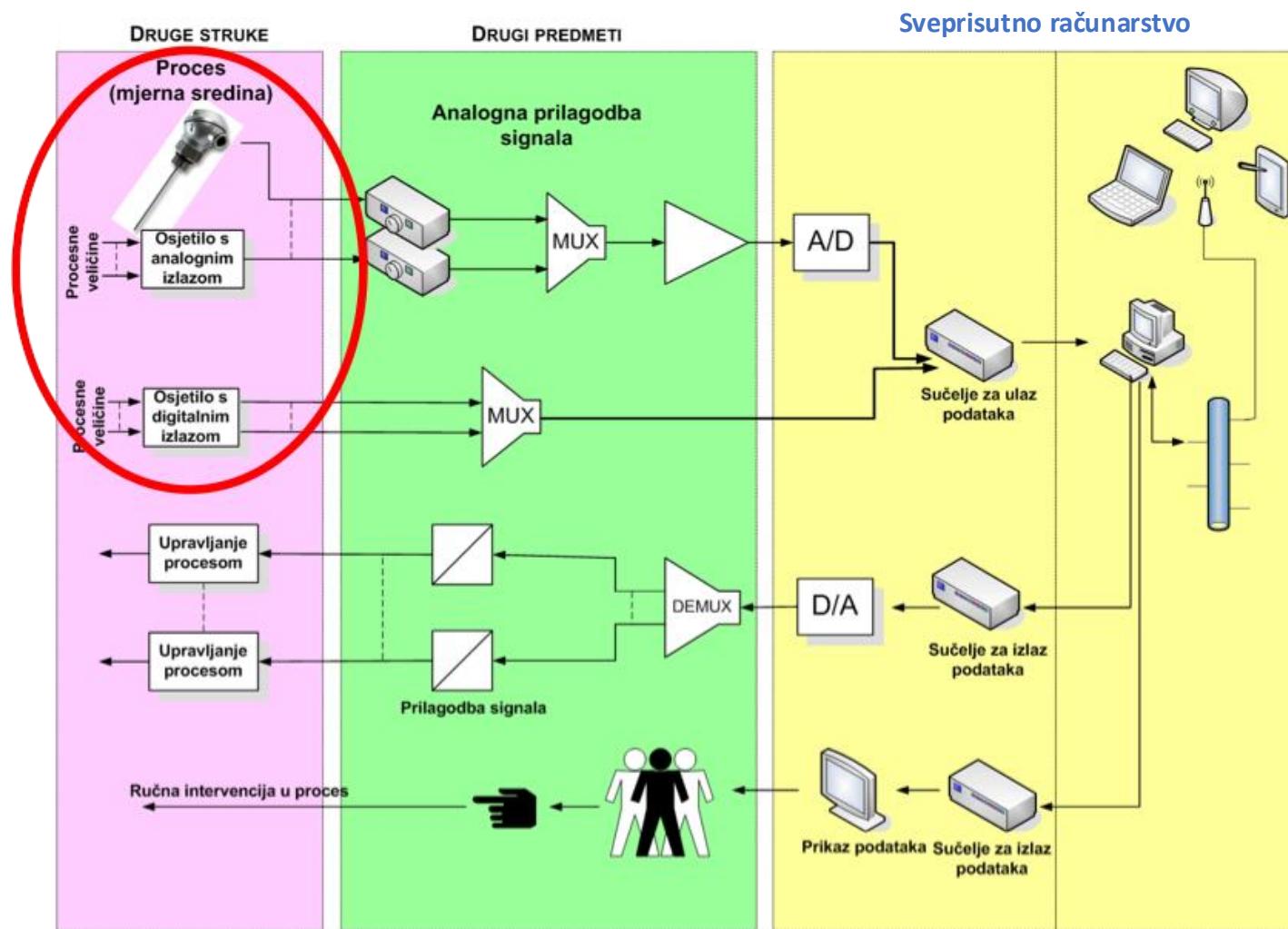
zatvoren krug

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

Osjetila



- 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 CO₂ osjetilo)

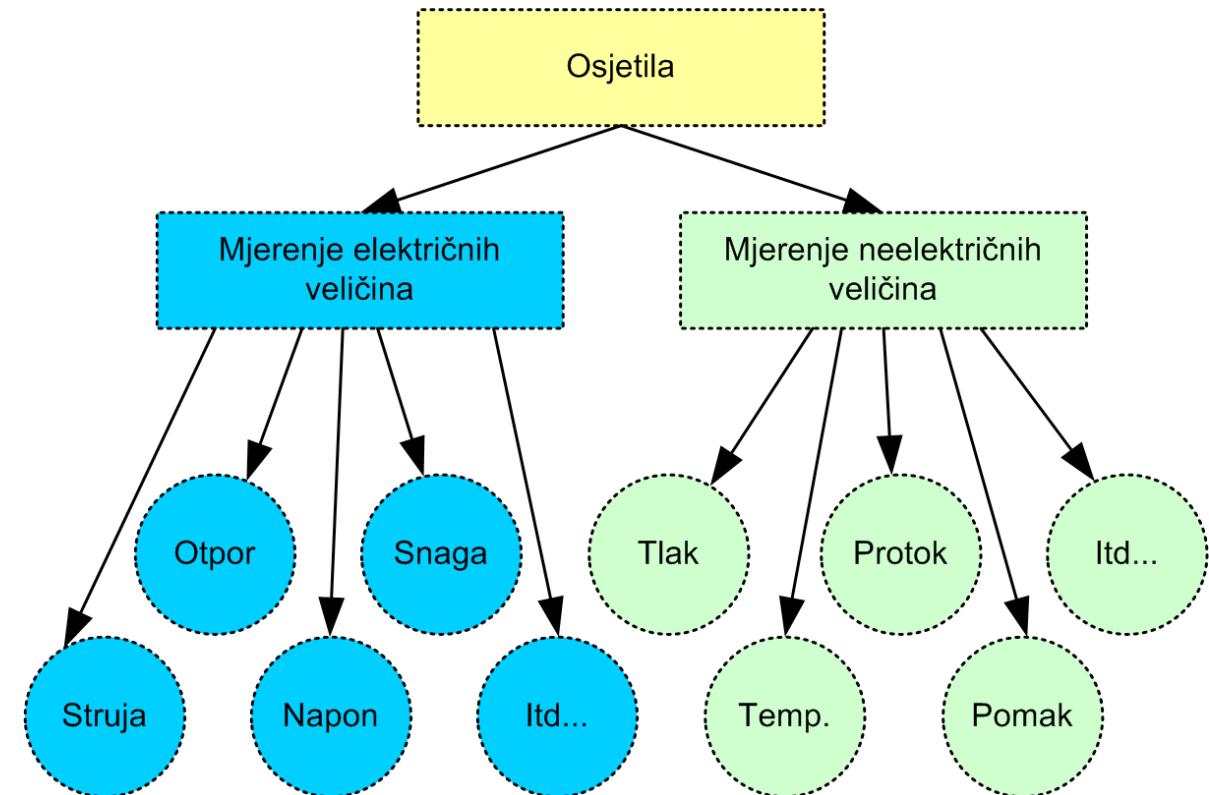
Osjetila

- 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

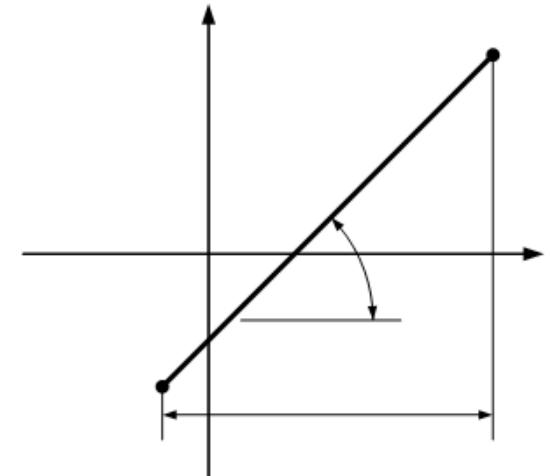
- Osnovna svojstva osjetila su:

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



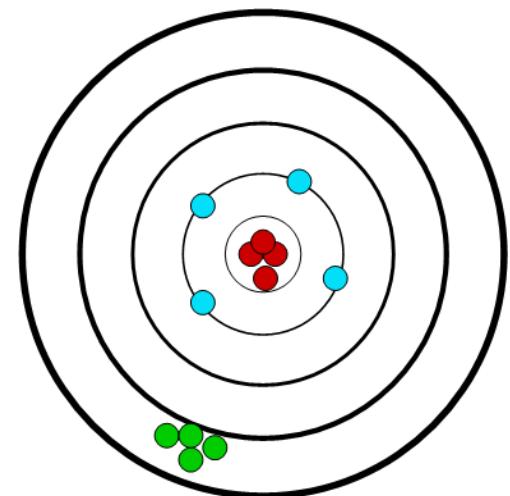
Svojstva

- 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



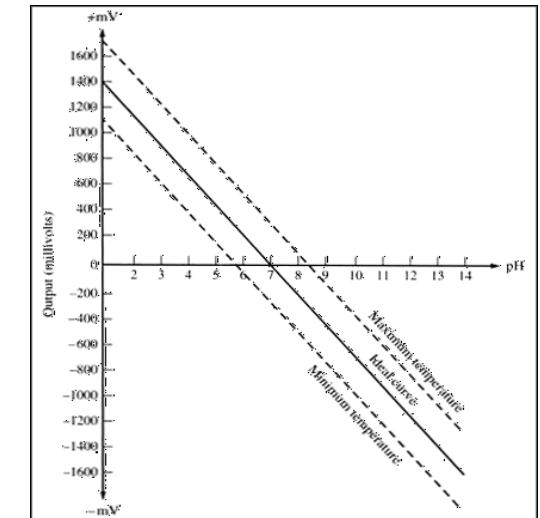
Svojstva

- 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?



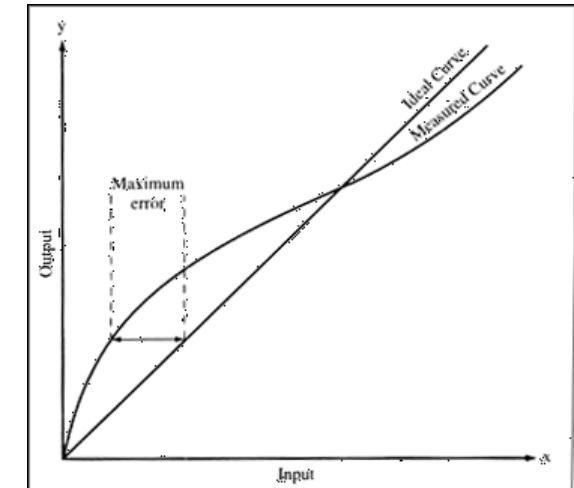
Svojstva

- 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)

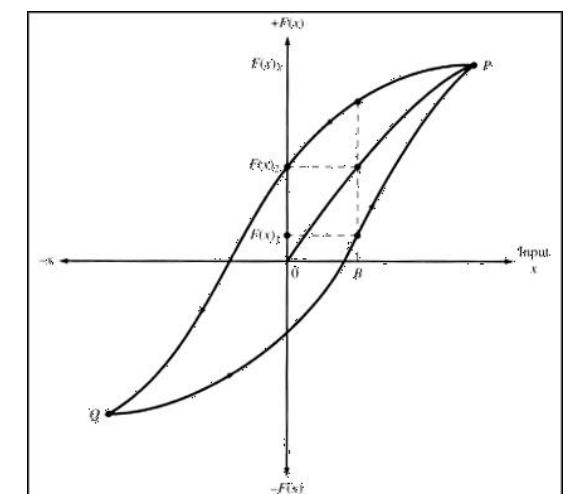


Svojstva

- Linearnost
 - Sličnost krivulje odziva osjetila pravcu



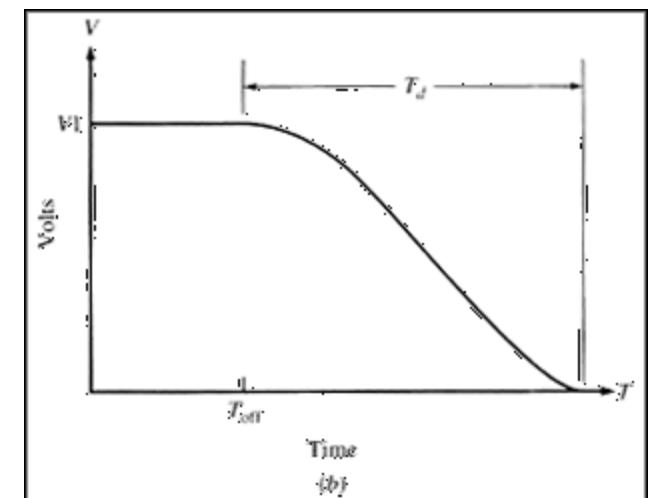
- Histereza
 - Nelinearnost odziva ovisna o smjeru promjene ulazne veličine



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

Svojstva

- **Vrijeme odziva**
 - Vrijeme koje je potrebno da na promjeni 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

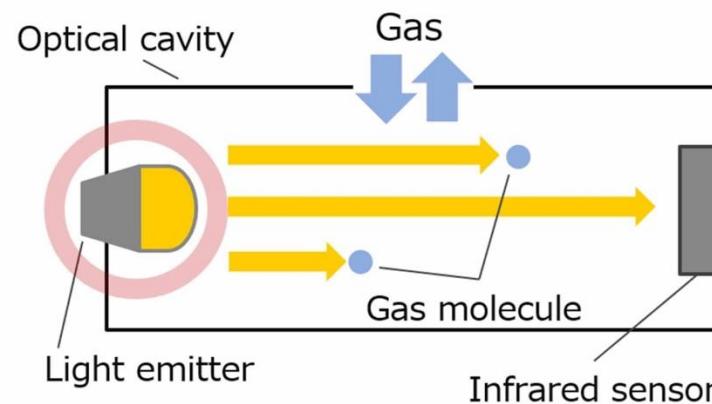
Primjeri osjetila



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 mjerena 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

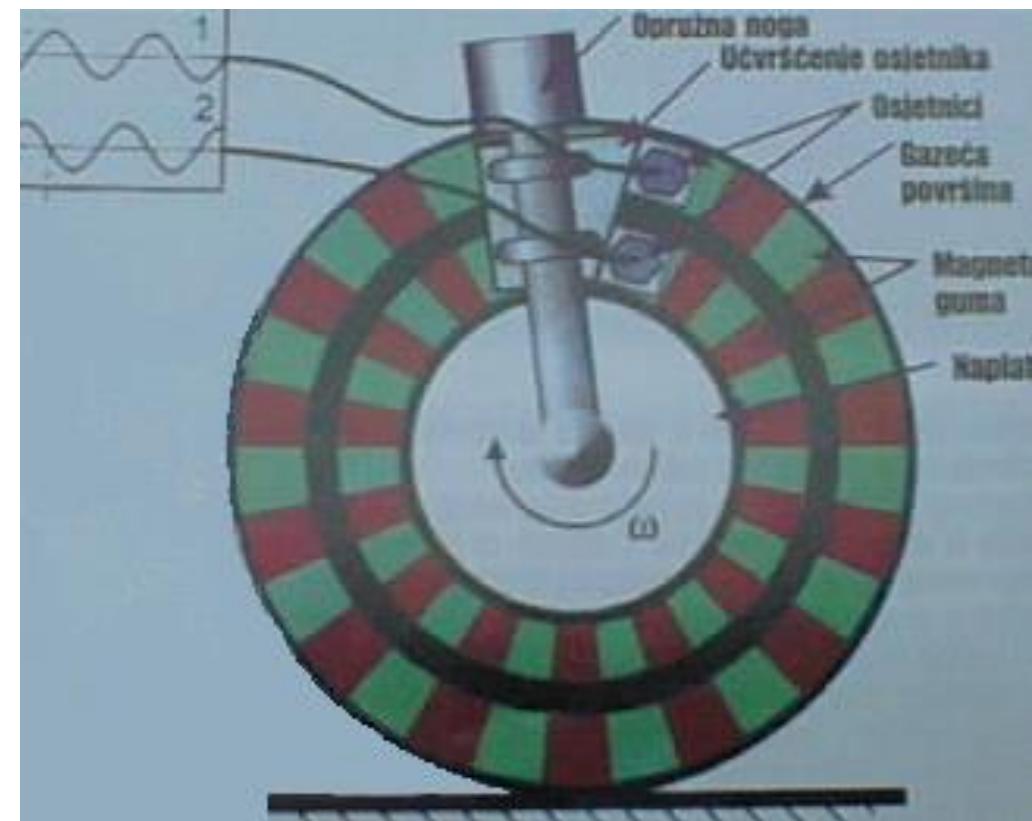
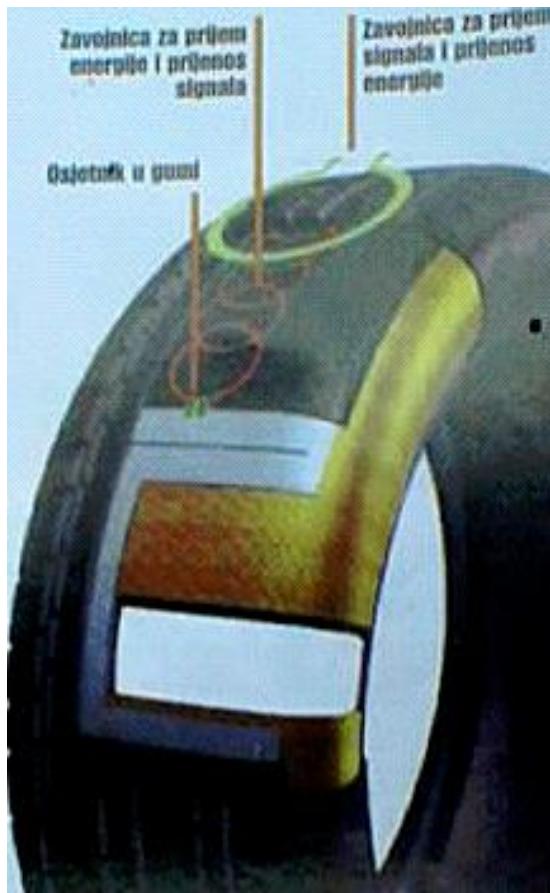
Ne traži dugotrajno napajanje

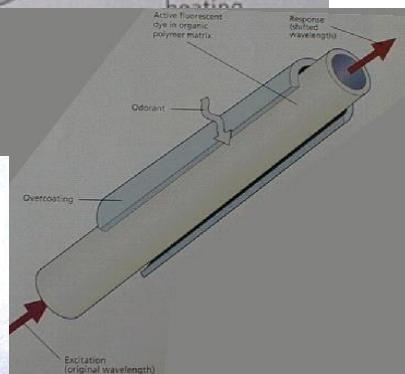
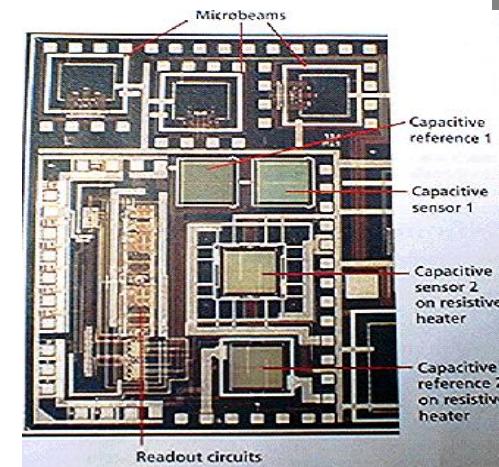
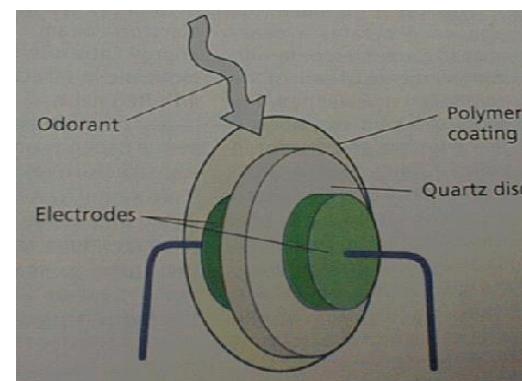
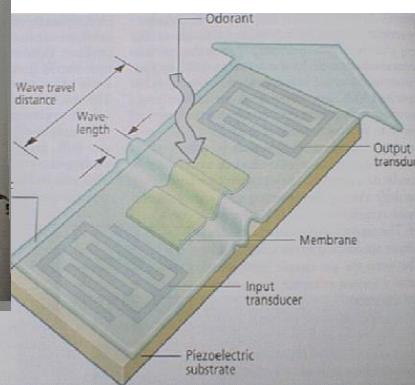
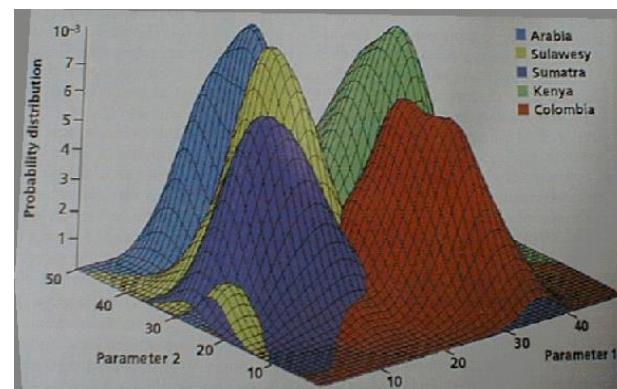
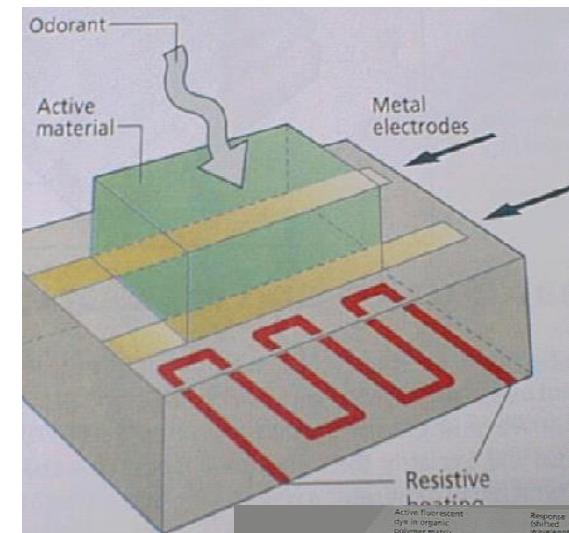
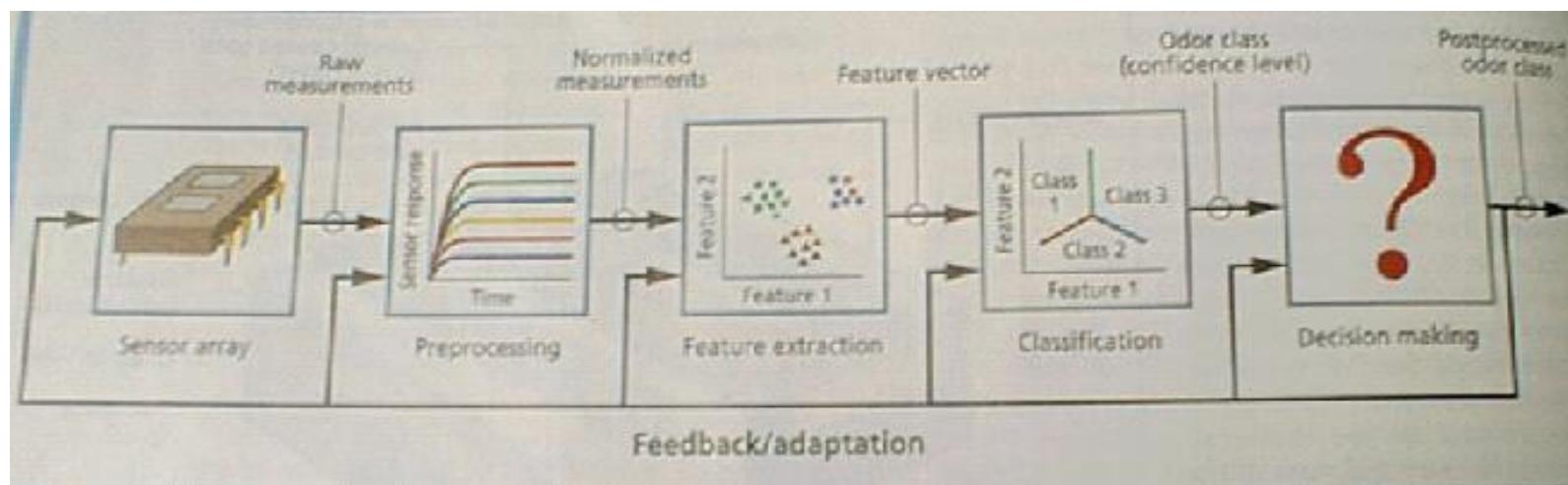
Kratak životni vijek

Slaba selektivnost (utjecaj drugih tvari)

Skupi

Primjeri osjetila





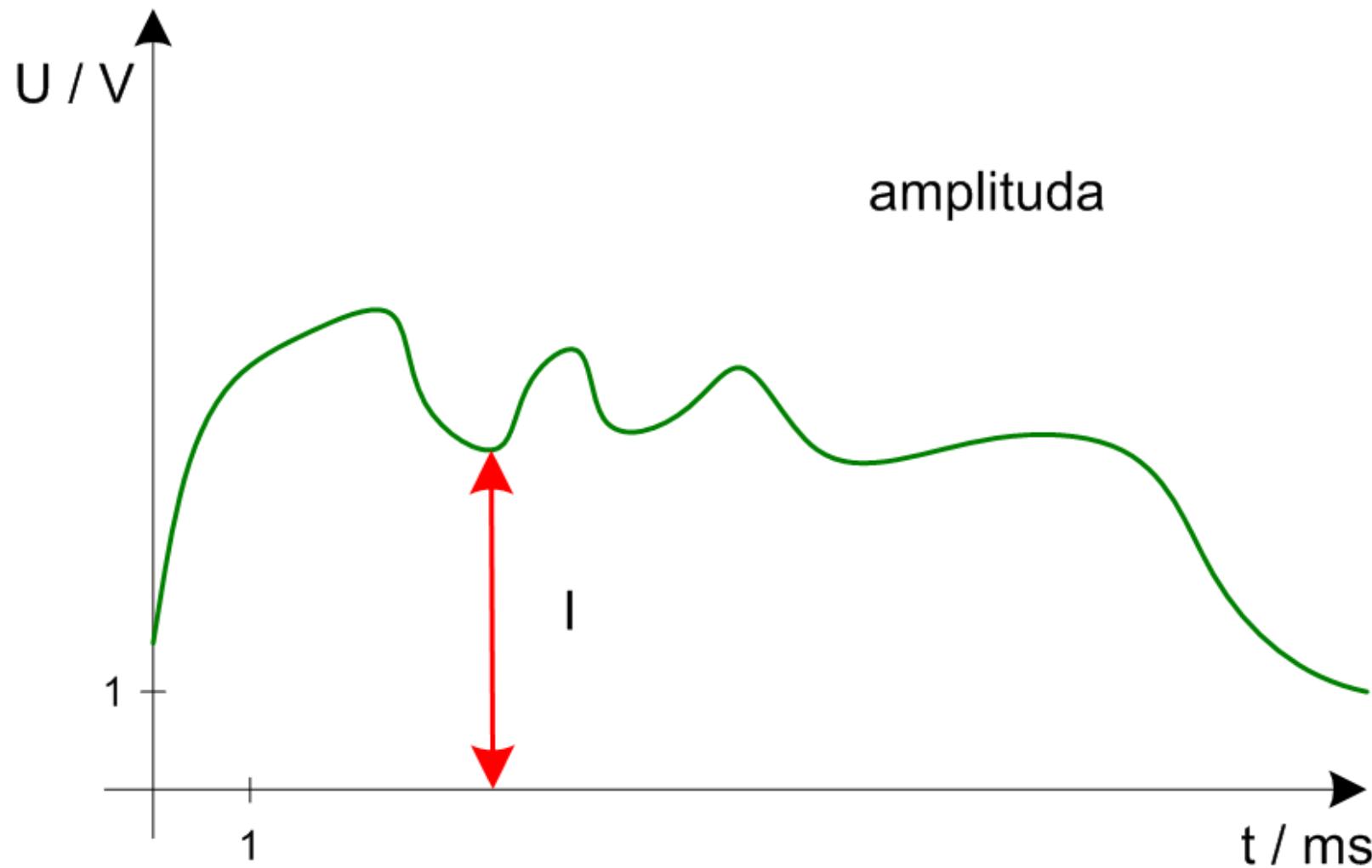


2.3 Informacije, oblici informacija

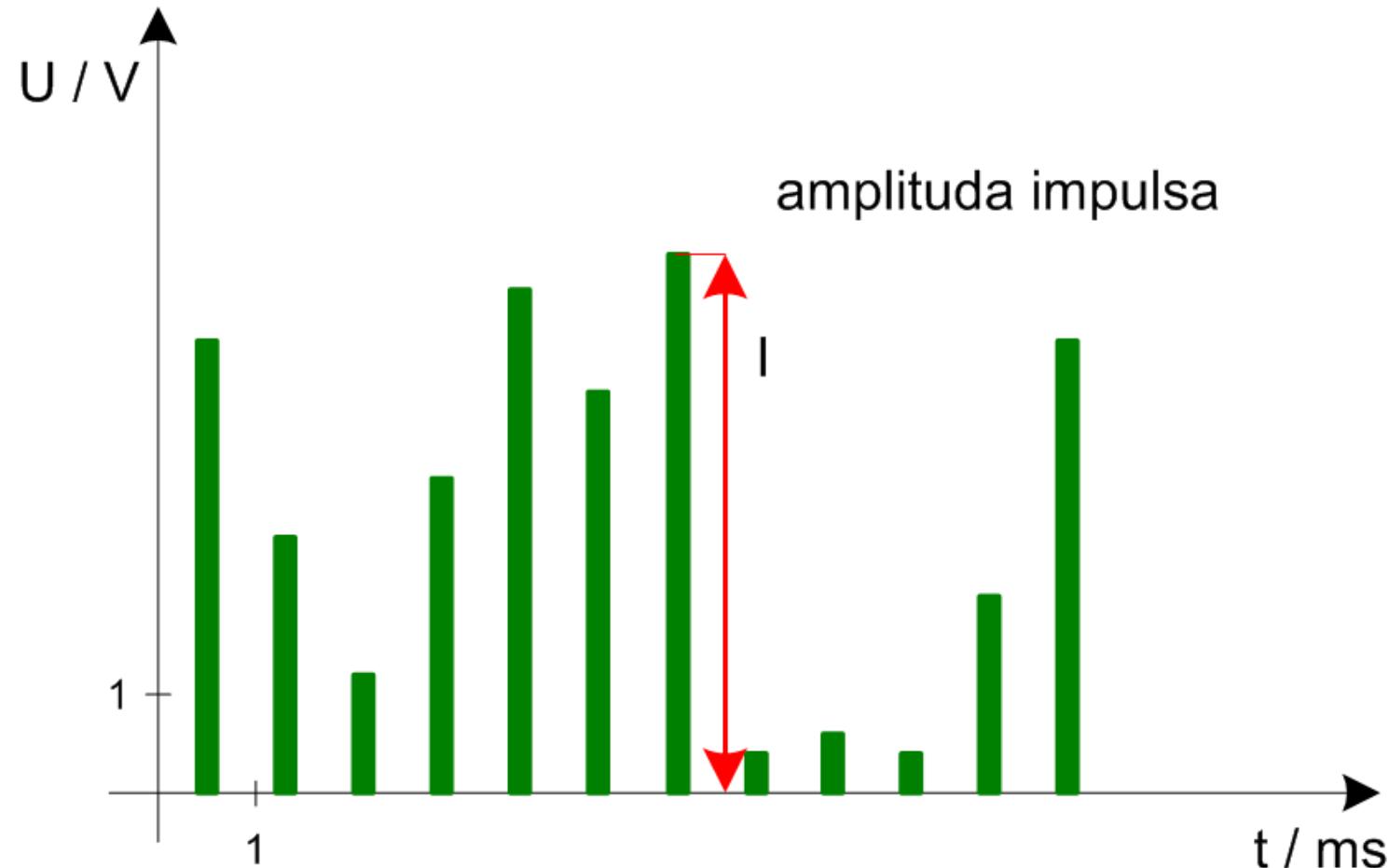
Oblici analogue i digitalne informacije

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

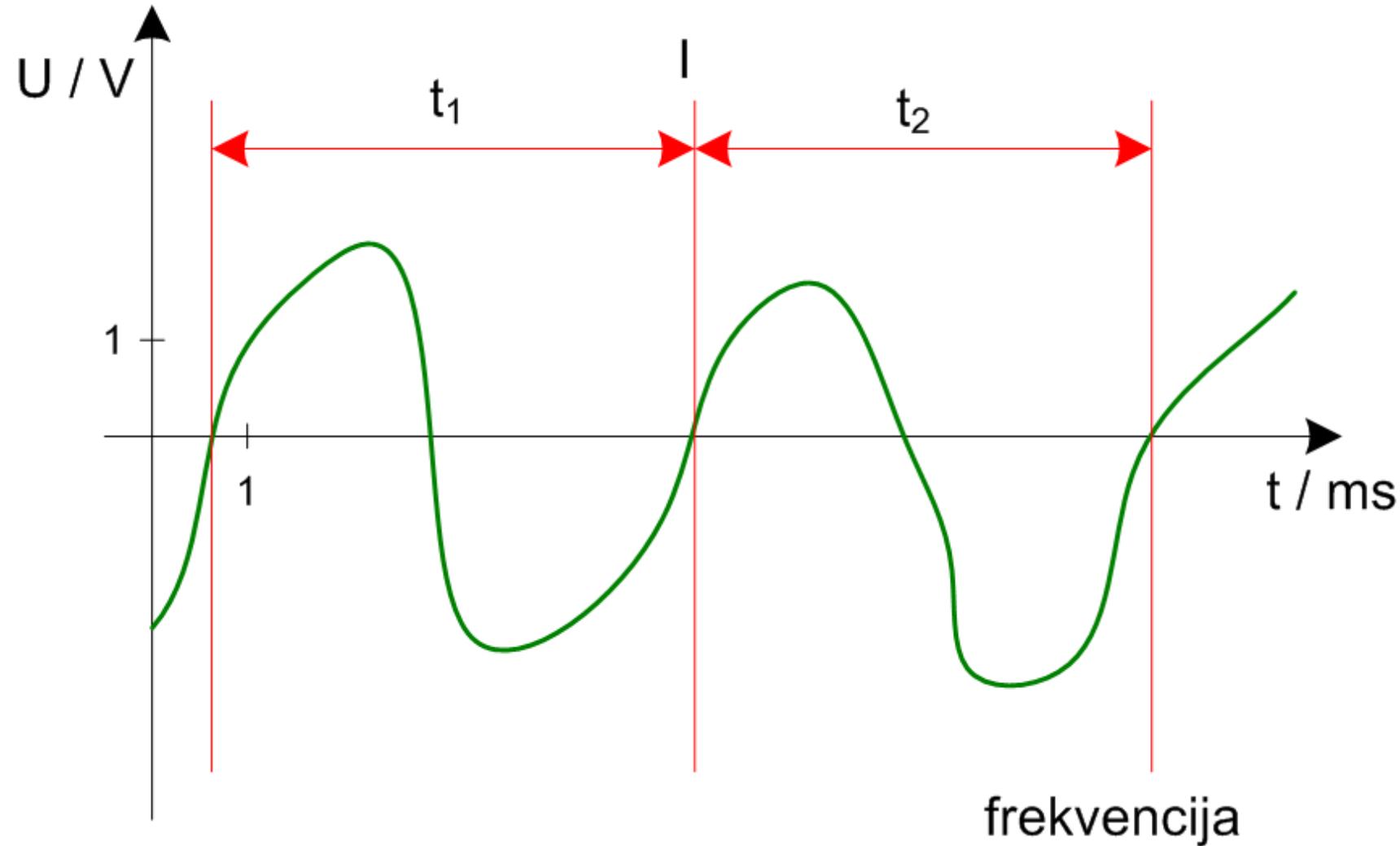
Amplituda kontinuiranog signala



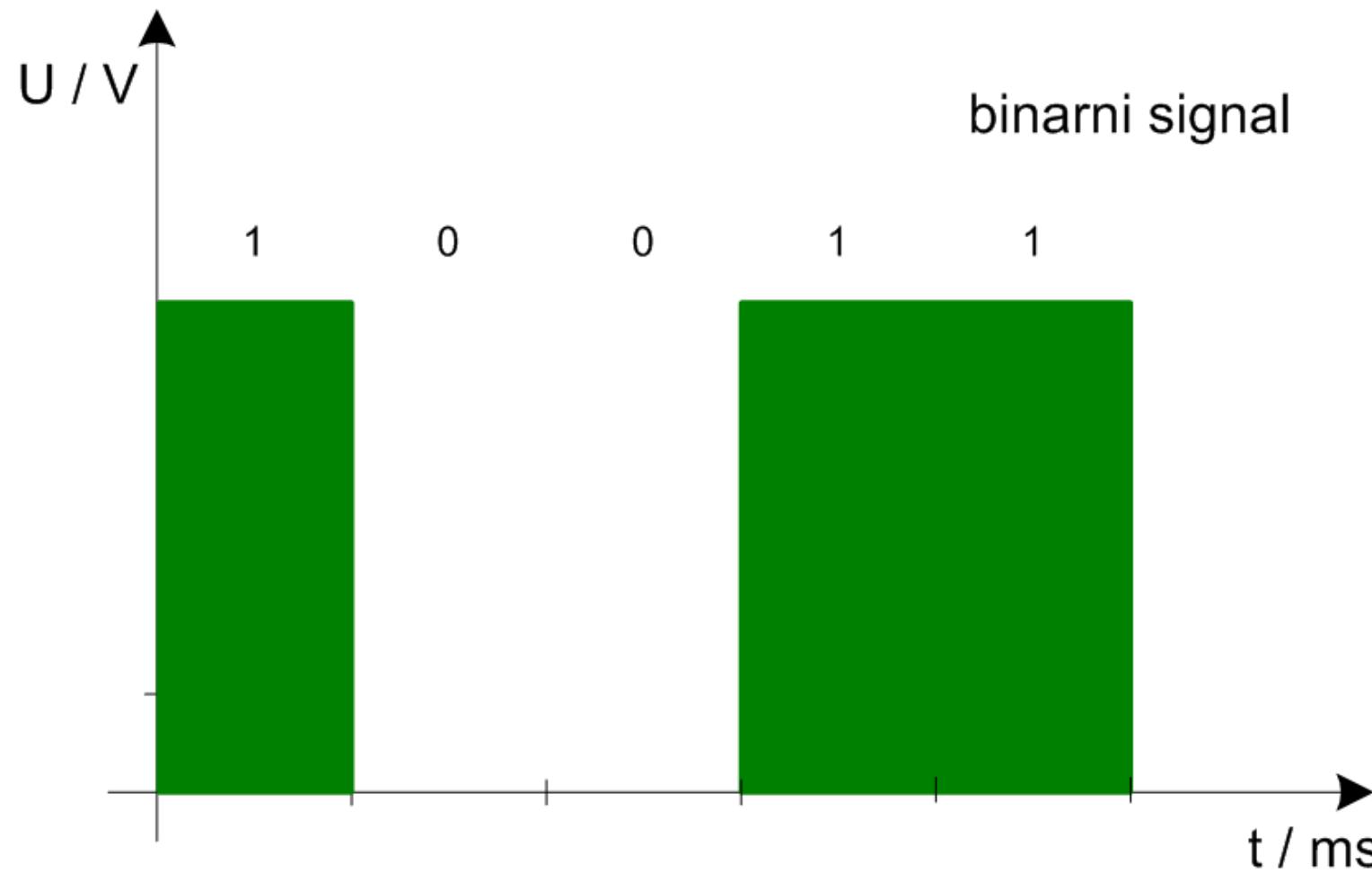
Amplitud impulsa



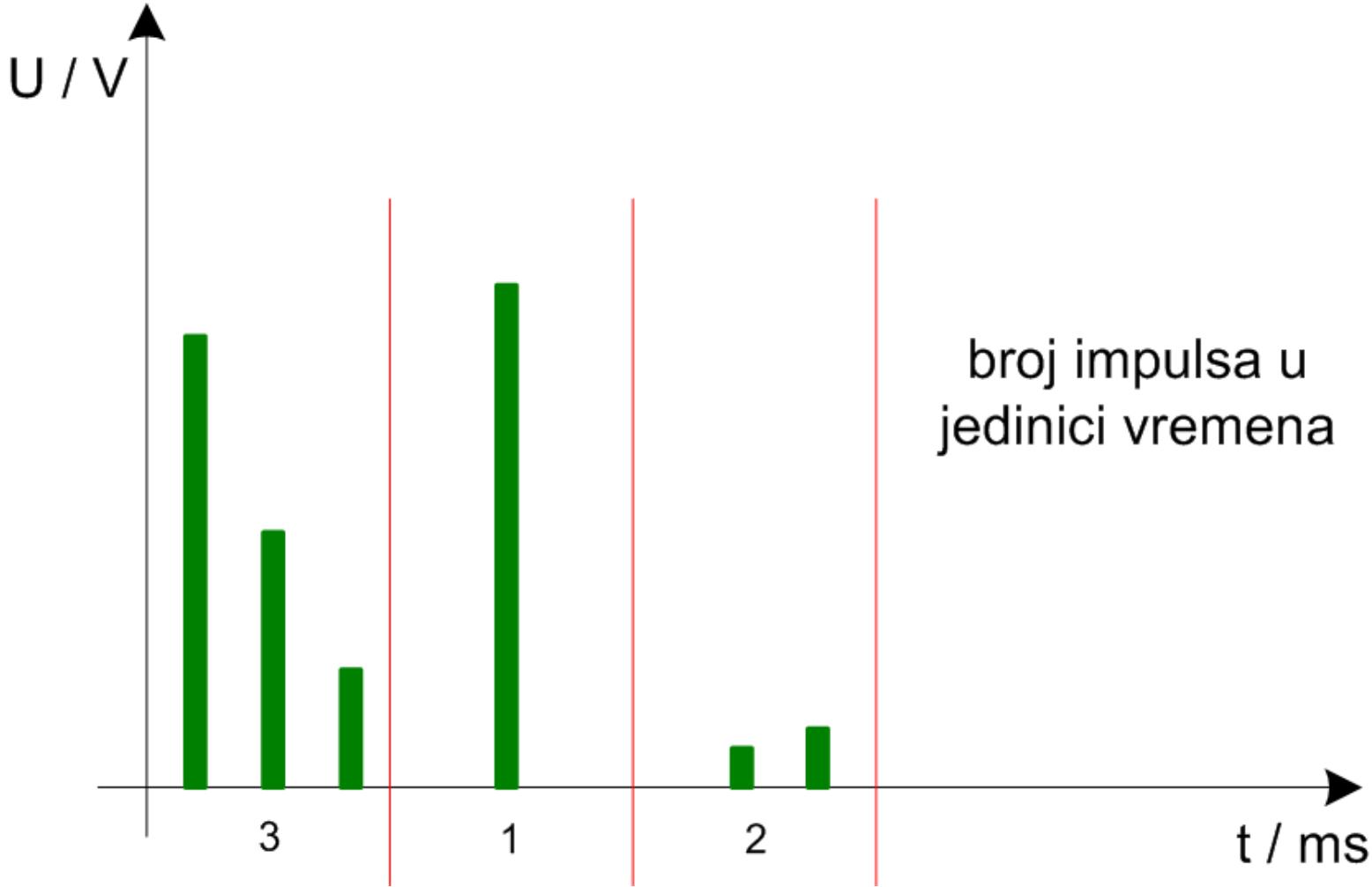
Frekvencija analognog signala



Binarni signal (ima, nema)

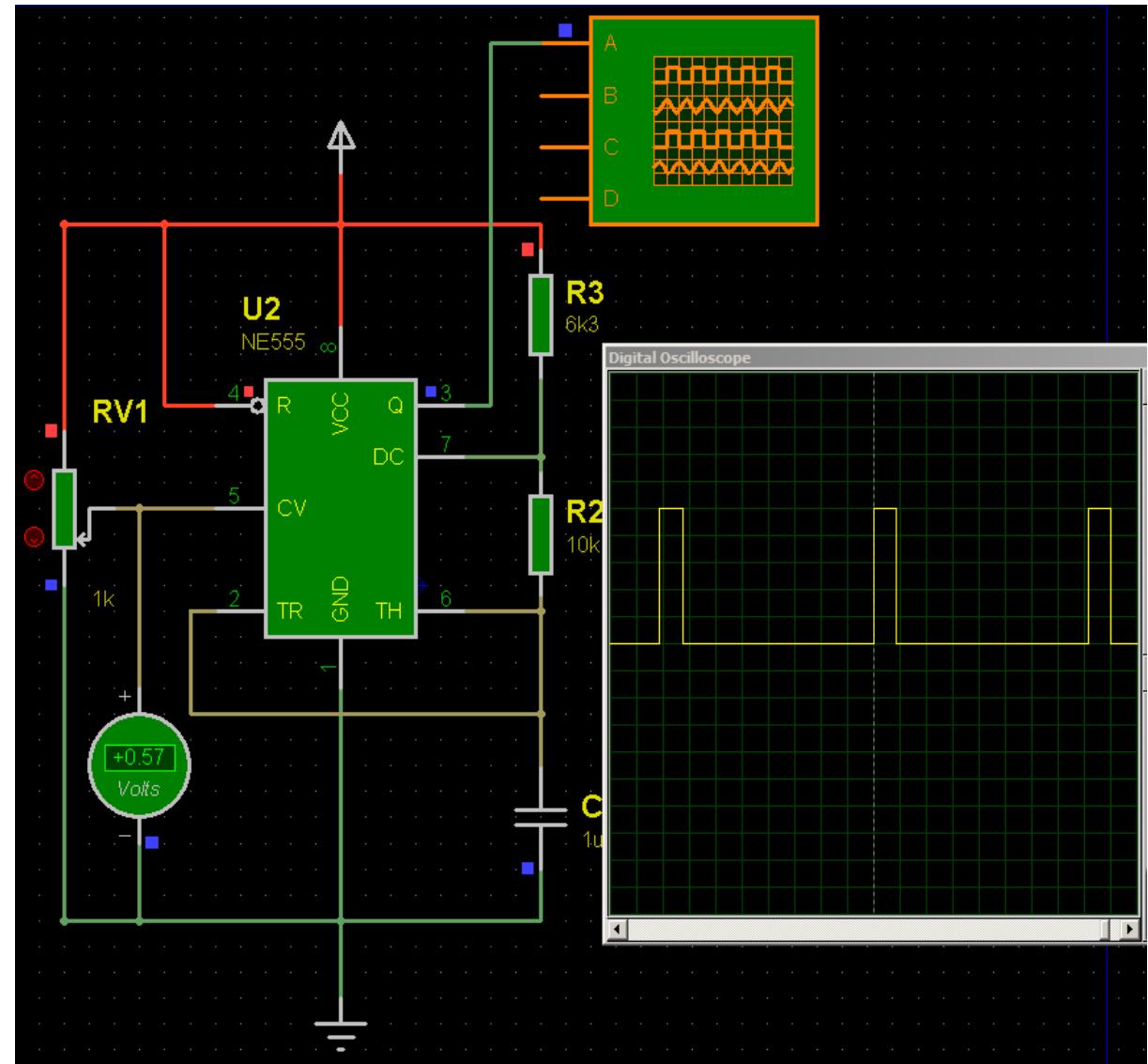


Broj impulsa u jedinici vremena



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

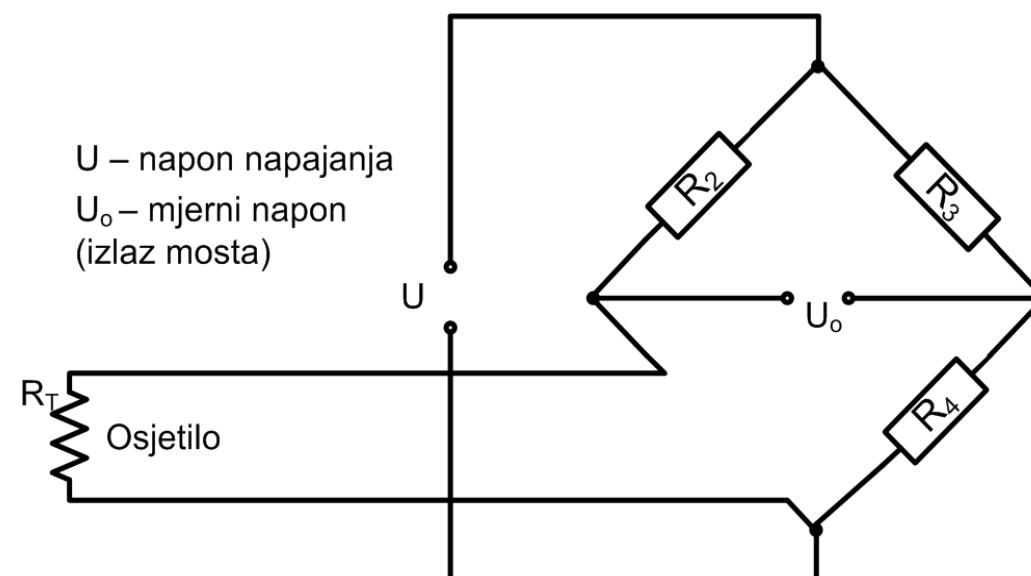
Primjeri predobrada

- Primjeri predobrada:

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

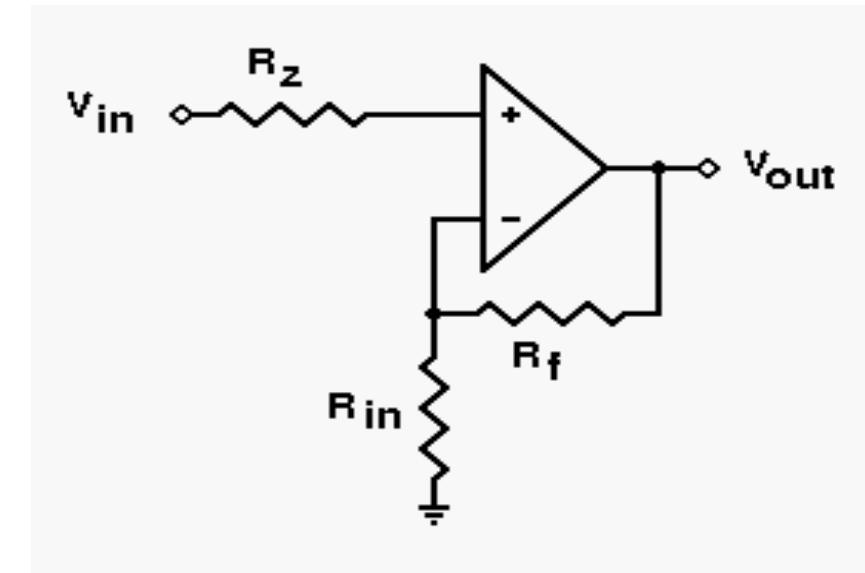
Mostni spoj

- 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



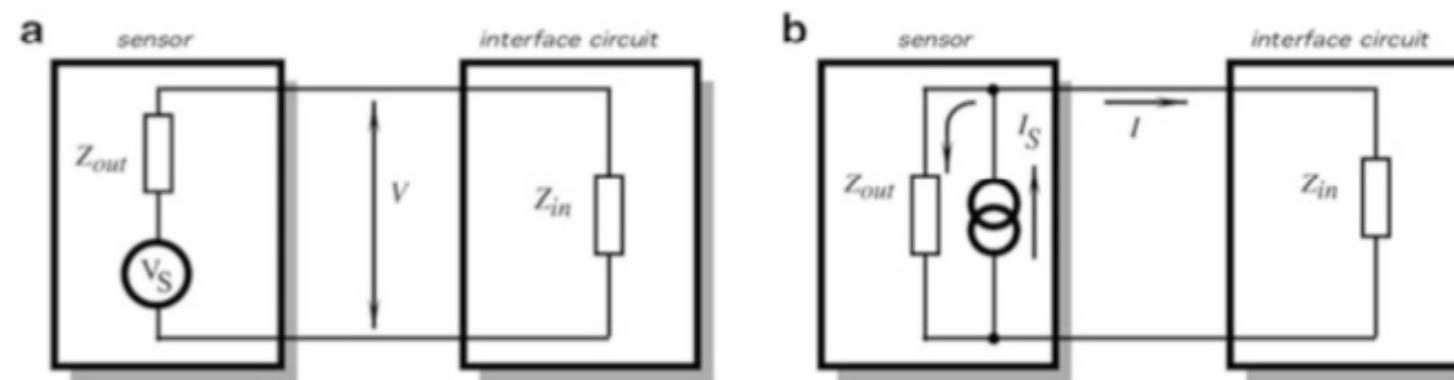
Pojačalo

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



Prilagodba opterećenja

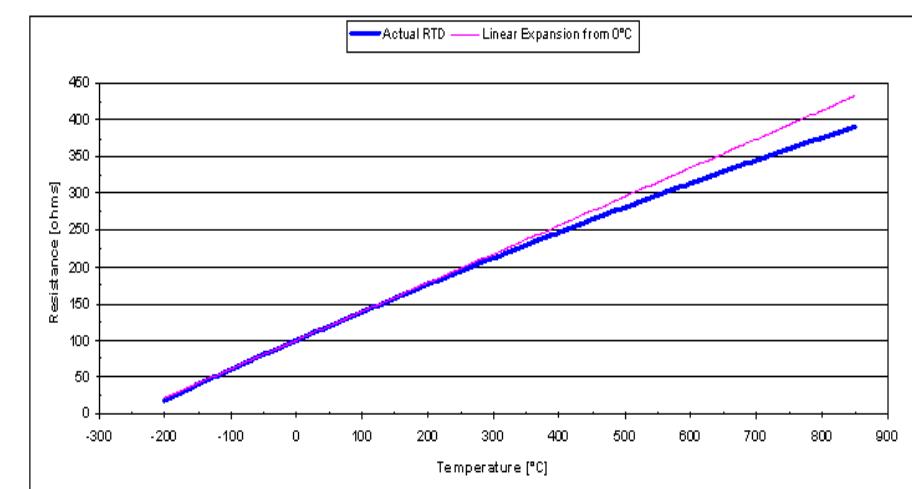
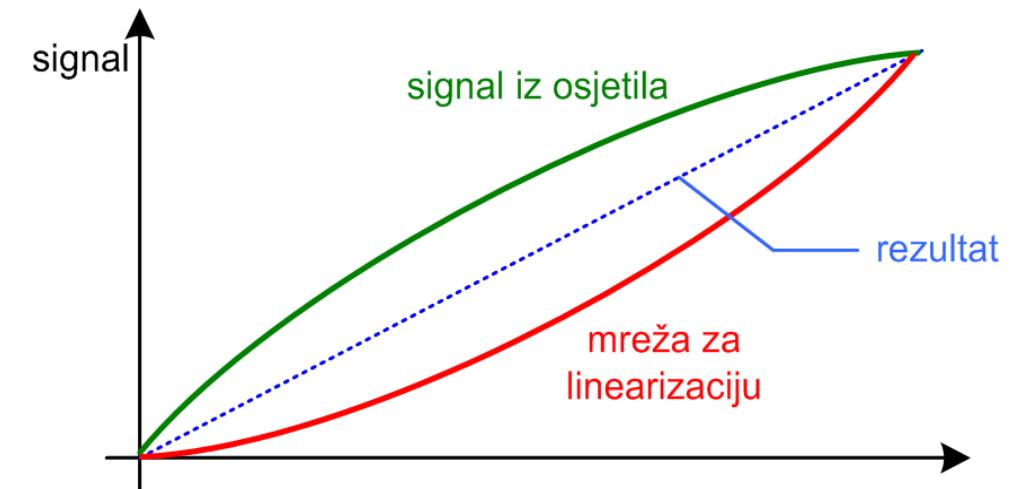
- Ulazne karakteristike sklopa za obradu signala moraju odgovarati izlaznim karakteristikama osjetila
 - u suprotnom sklop utječe na karakteristike osjetila (opterećuje ga strujno ili naponski)



Izvor: Jacob Fraden, Handbook of Modern Sensors, Springer

Linearizacija

- Pt100
 - $R(t) = R [1 + At + Bt + C(t-100^\circ\text{C})t]$ (za $t < 0^\circ\text{C}$)
 - $R(t) = R [1 + At + Bt]$ (za $t \geq 0^\circ\text{C}$)
- Linearizacija funkcija – ovisnost temperature o otporu:
 - matematika uključena
 - jednolinearna aproksimacija
 - višelinearna aproksimacija
 - (potrebne *look-up* tablice)



Filtriranje

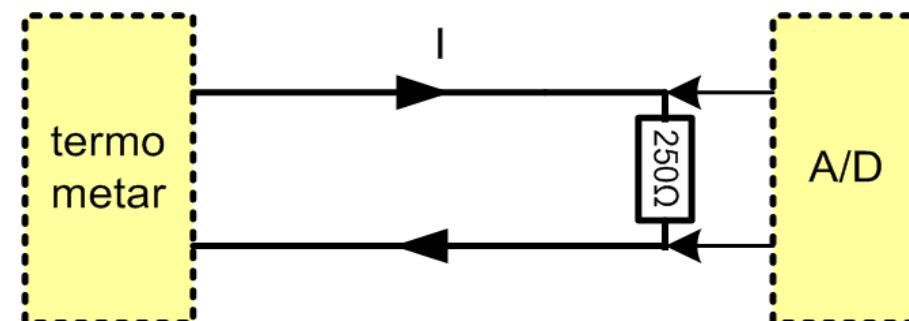
- Šum se pojavljuje kod osjetila
 - toplinski šum - iznutra
 - interferencijski šum – izvana
- Smanjuje se:
 - fizičkim udaljavanjem
 - uplitanjem mjernih vodova
 - oklapanjem mjernih vodova
 - uzemljiti oklop samo na jednom kraju!
 - filtriranjem

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°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

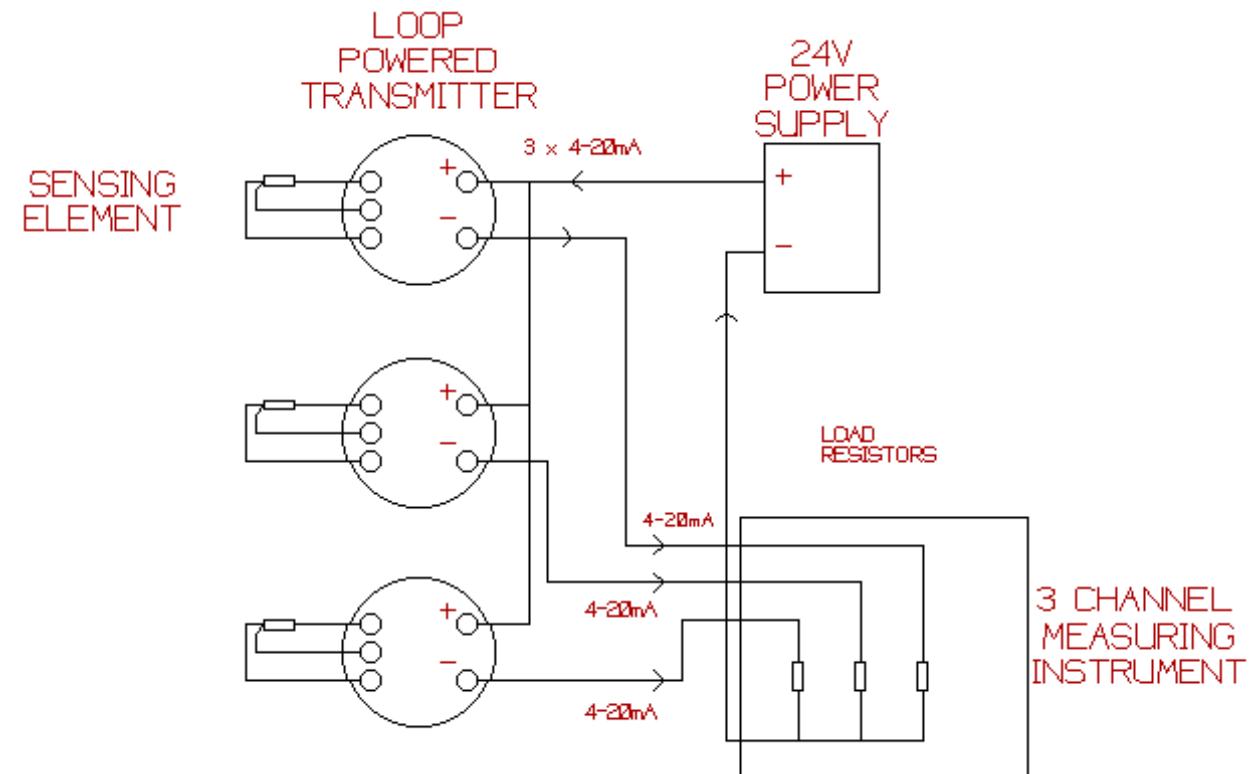
Standardno područje

- 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
 - prijenos signala na velike udaljenosti bez gubitka točnosti
- Otpornost na smetnje
 - inducirani naponi u vodičima se poništavaju



Standardno područje

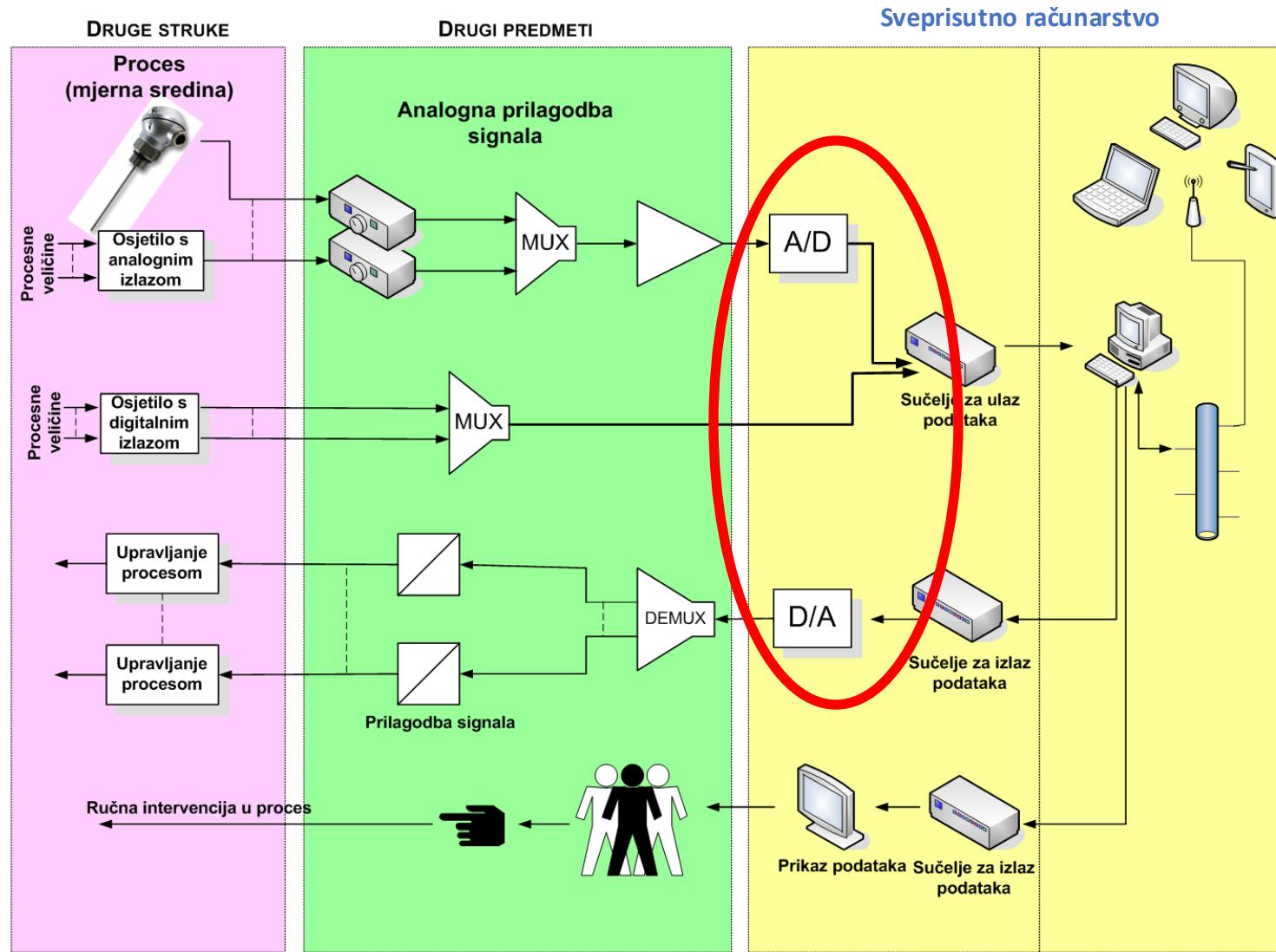
- prednost signala 4-20mA?
 - povišena nula, detekcija kvara
 - u strujnom krugu uvijek imamo struju od 4mA – ako termometar troši manje od 4mA struje, možemo ga spojiti samo s dvije žice (ne trebaju nam posebni vodovi za napajanje)
- strujna petlja





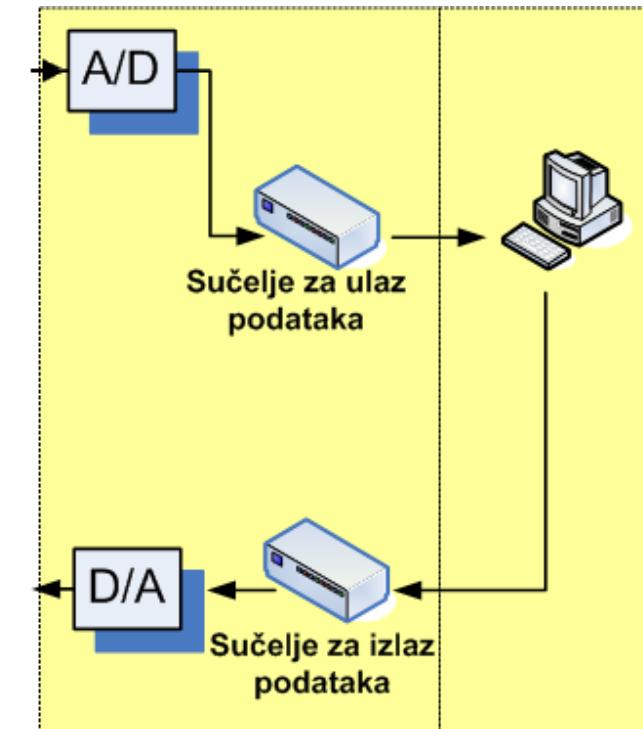
2.4 Digitalno – analogna pretvorba (1.dio)

Most između analognog i digitalnog svijeta



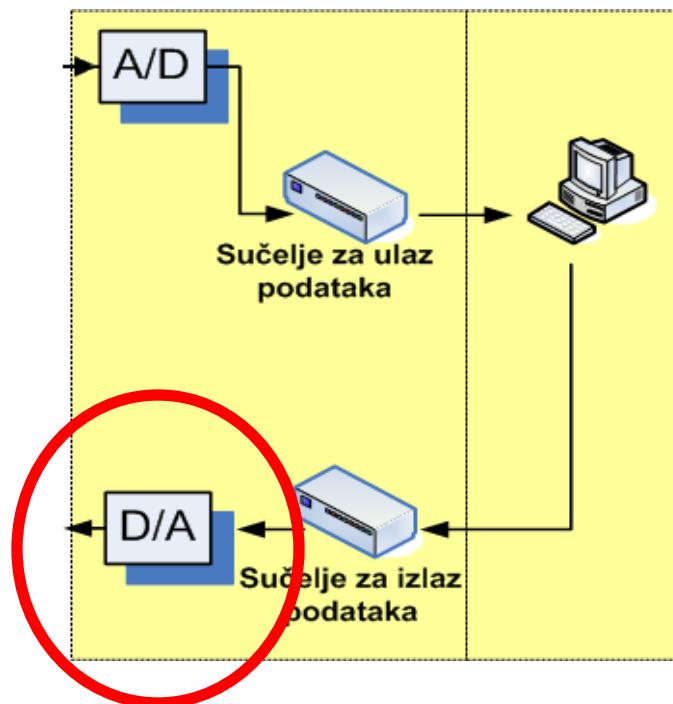
Interakcija s analognim svjetom

- 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

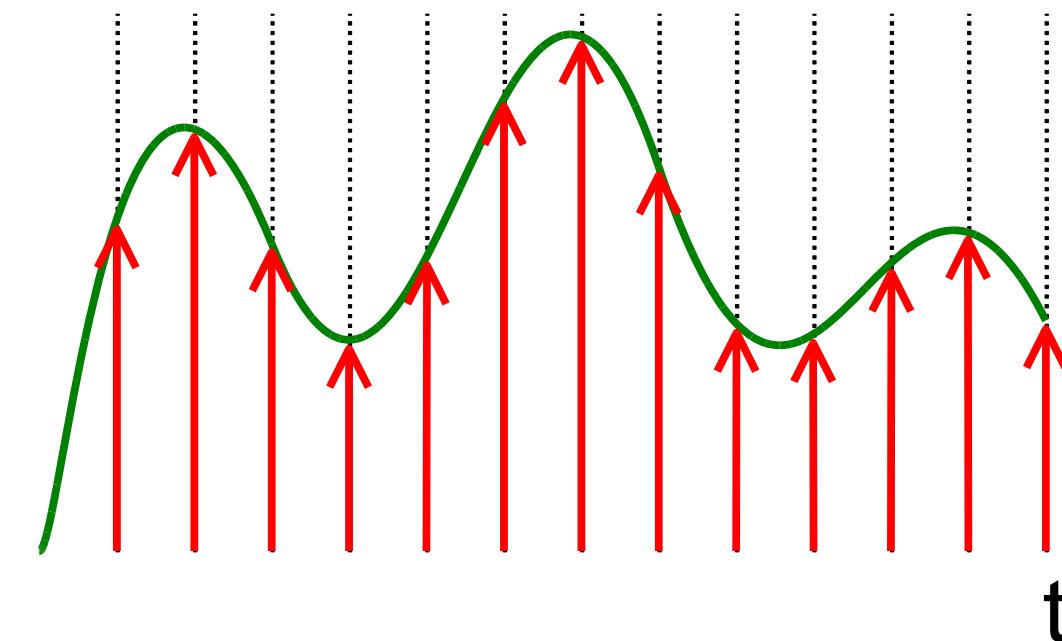


Karakteristike D/A pretvornika

- **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

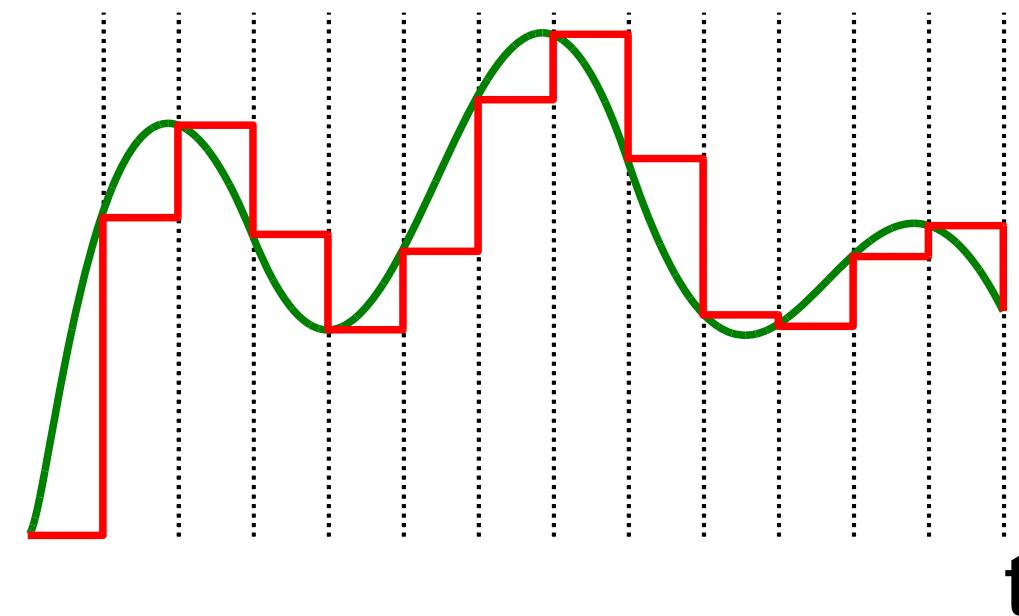
Idealni D/A pretvornik

- 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

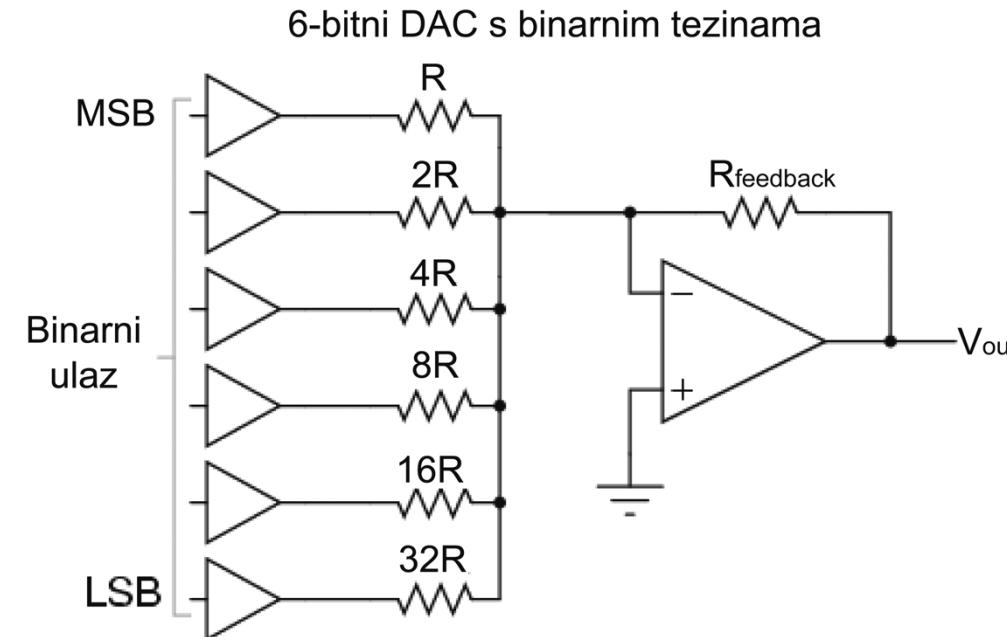


Tipovi D/A pretvornika

- 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 ...

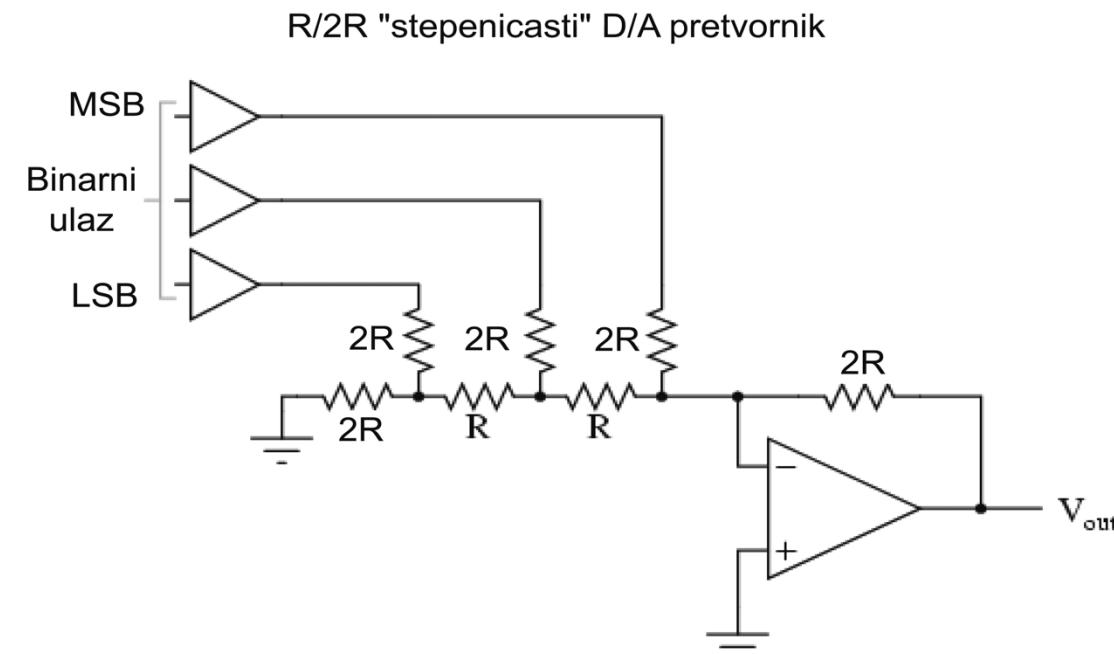
R/2R pretvornik

- 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

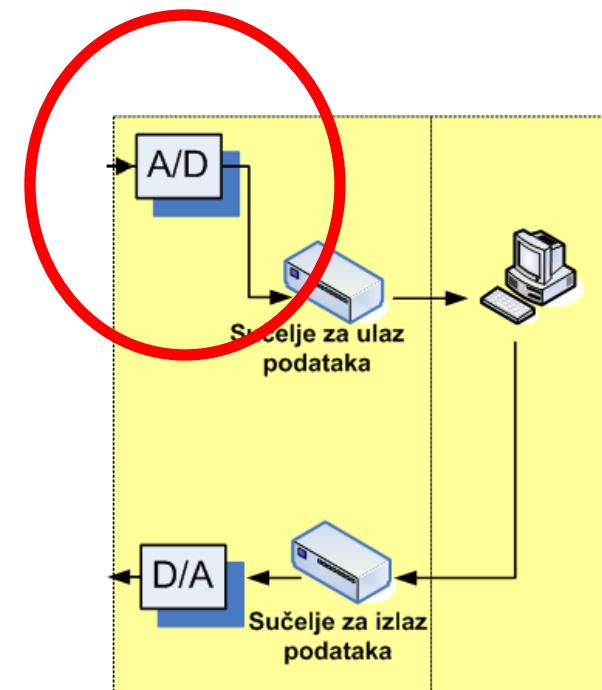




2.5 Analogno – digitalna pretvorba

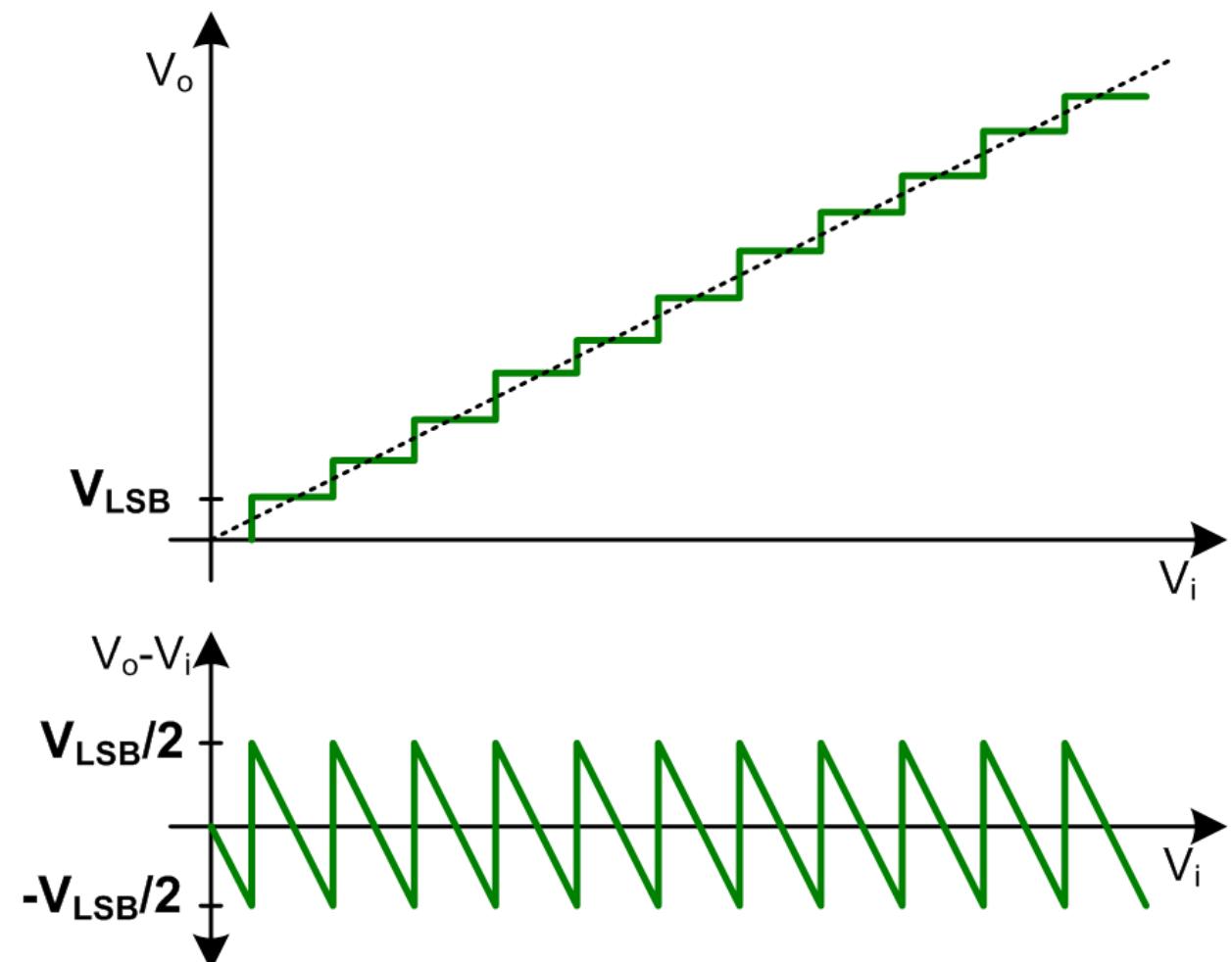
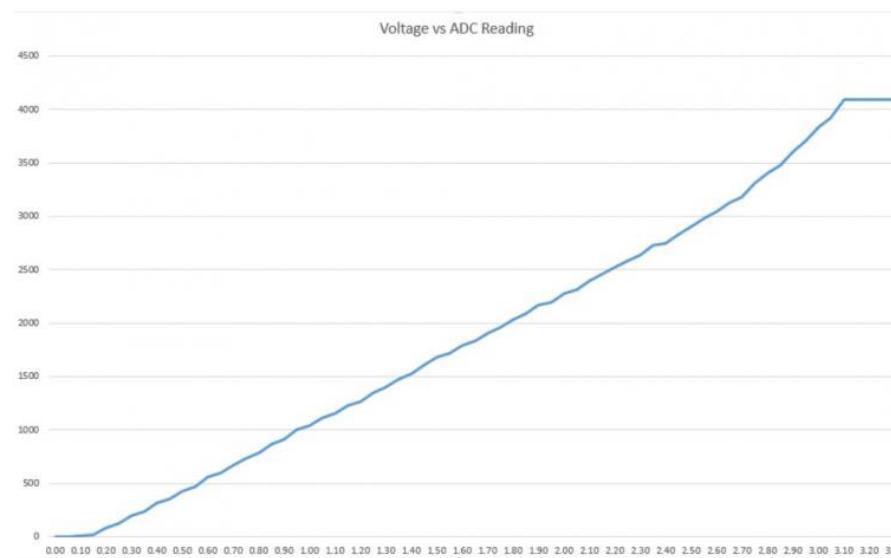
A/D pretvorba

- 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_{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

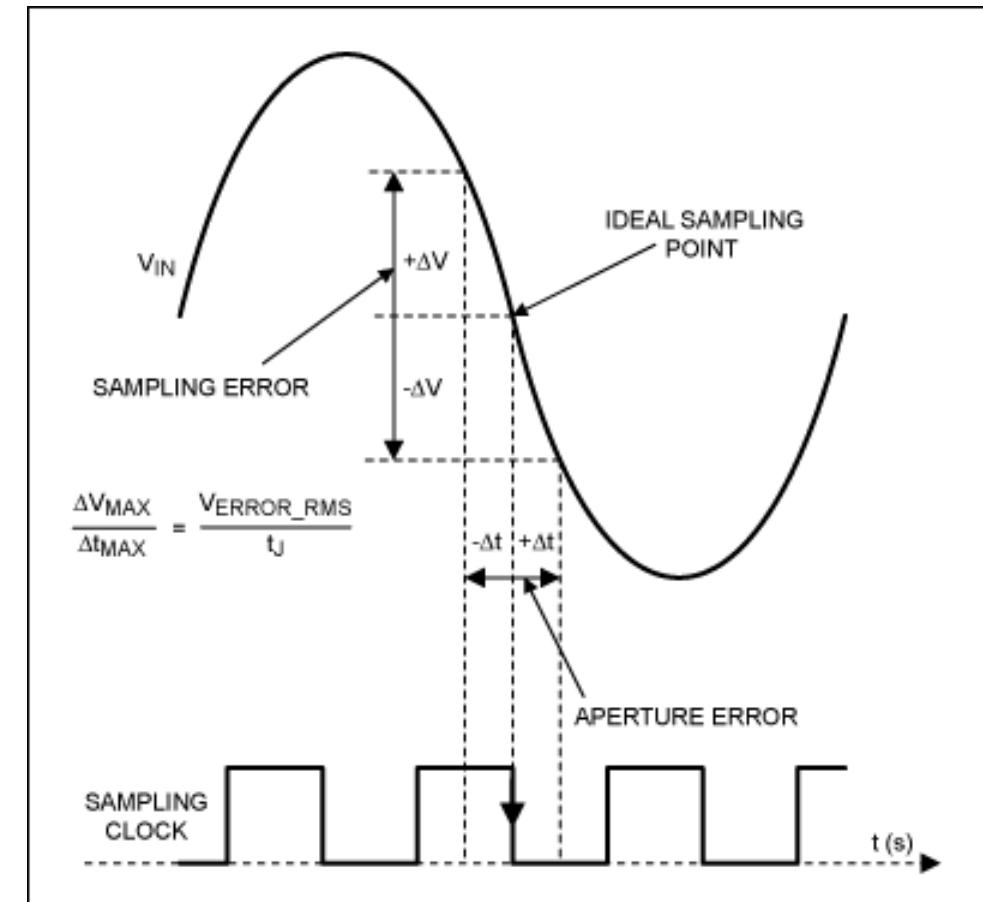
- Razlučivost (rezolucija)
 - Broj diskretnih vrijednosti (kôdova, simbola) koje pretvornik generira za raspon analognog signala
 - Rezultat binarni, rezolucija se obično izražava brojem bitova
 - Rezolucija (u širem, općenitom smislu)= $2^{\text{broj bitova}}$
 - Rezolucija (u užem, mjernom smislu) = 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: $15V / 4096 \approx 0,00366 V/\text{vrijednosti} = 0,00366 V/\text{bit}$

Svojstva - točnost

Točnost

- Prilikom procesa kvantizacije dolazi do grešaka
- Greška kvantizacije
 - Zbog kvantizacijskog šuma
- Greška otvora (*aperture error*)
 - Uzimamo uzorke u određenim vremenskim trenutcima
 - 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!

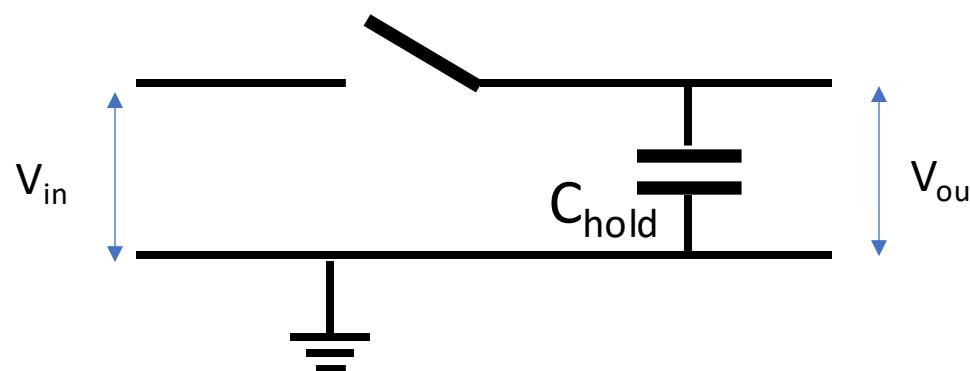
$$\Delta t < \frac{1}{2^{\text{broj bitova}} \cdot \pi \cdot f_{\text{ulazno}}}$$



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

Svojstva – stopa uzorkovanja

- Stopa uzorkovanja
 - Frekvencija kojom pretvornik otiskava (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

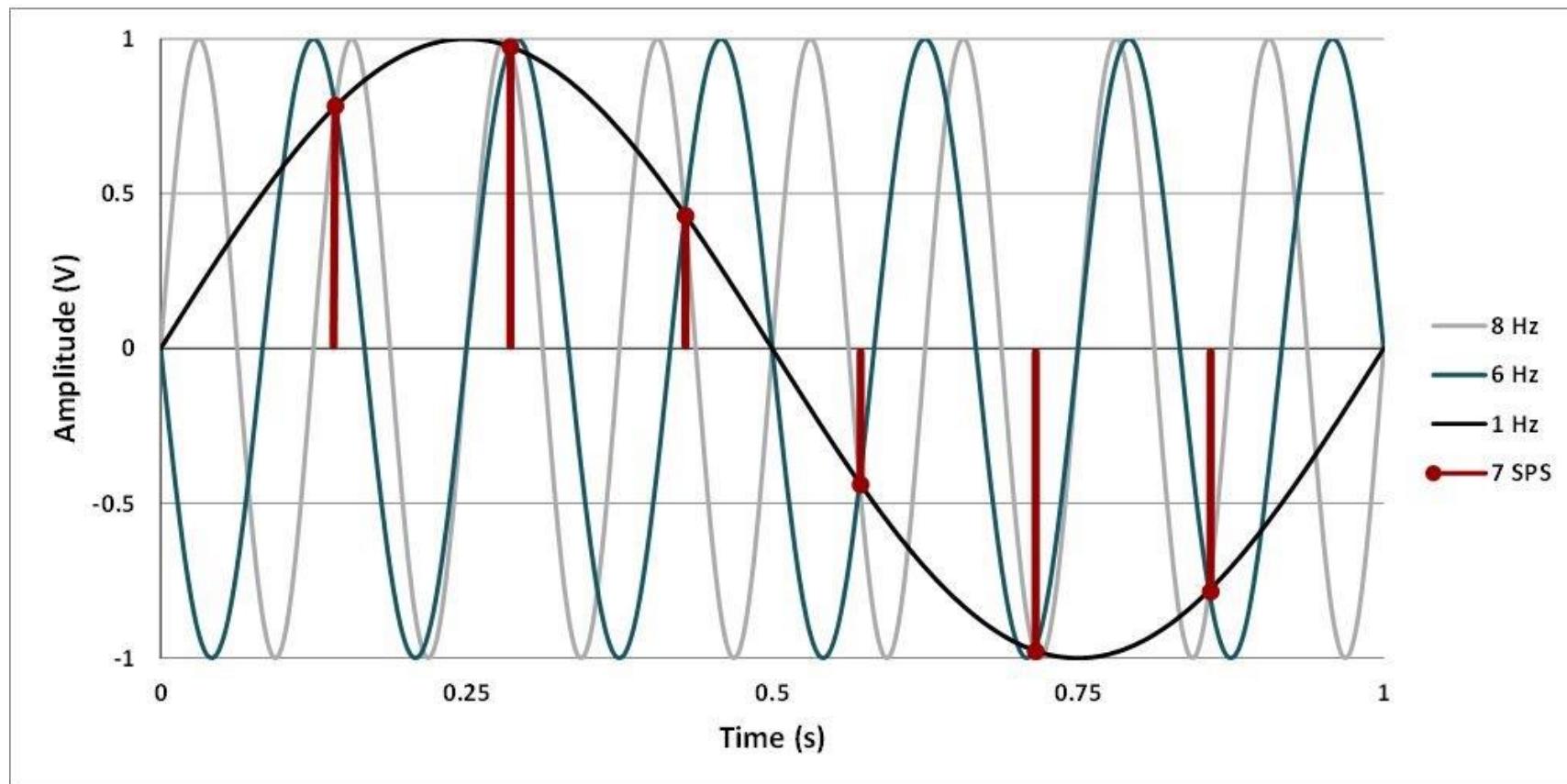


Svojstva - aliasing

- **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

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

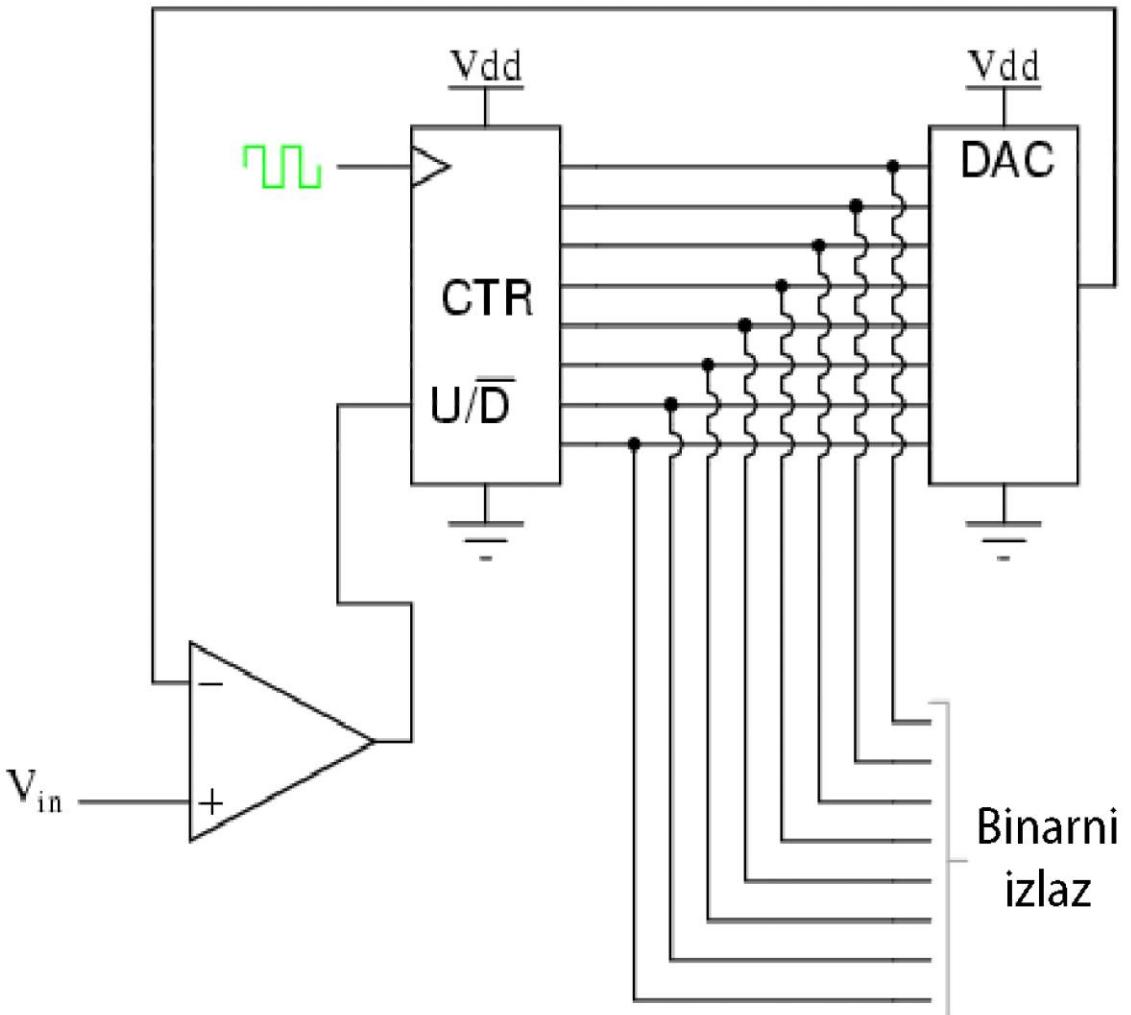
- Tri karakteristične metode pretvorbe:
 - sukcesivna aproksimacija (eng. successive approximation)
 - integracija (eng. integration)
 - neposredna usporedba (eng. direct comparison)
- osim toga, postoje i:
 - cjevovodni (pipeline) pretvornici
 - sigma – delta pretvornici
 - itd.

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

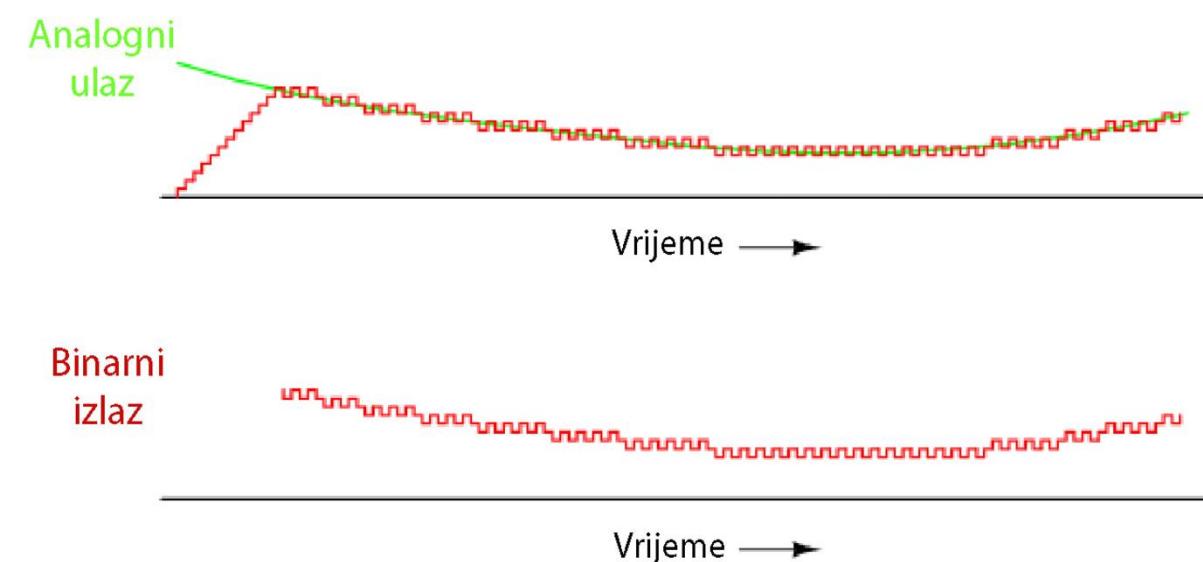
Prateći A/D pretvornik (I)

- 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



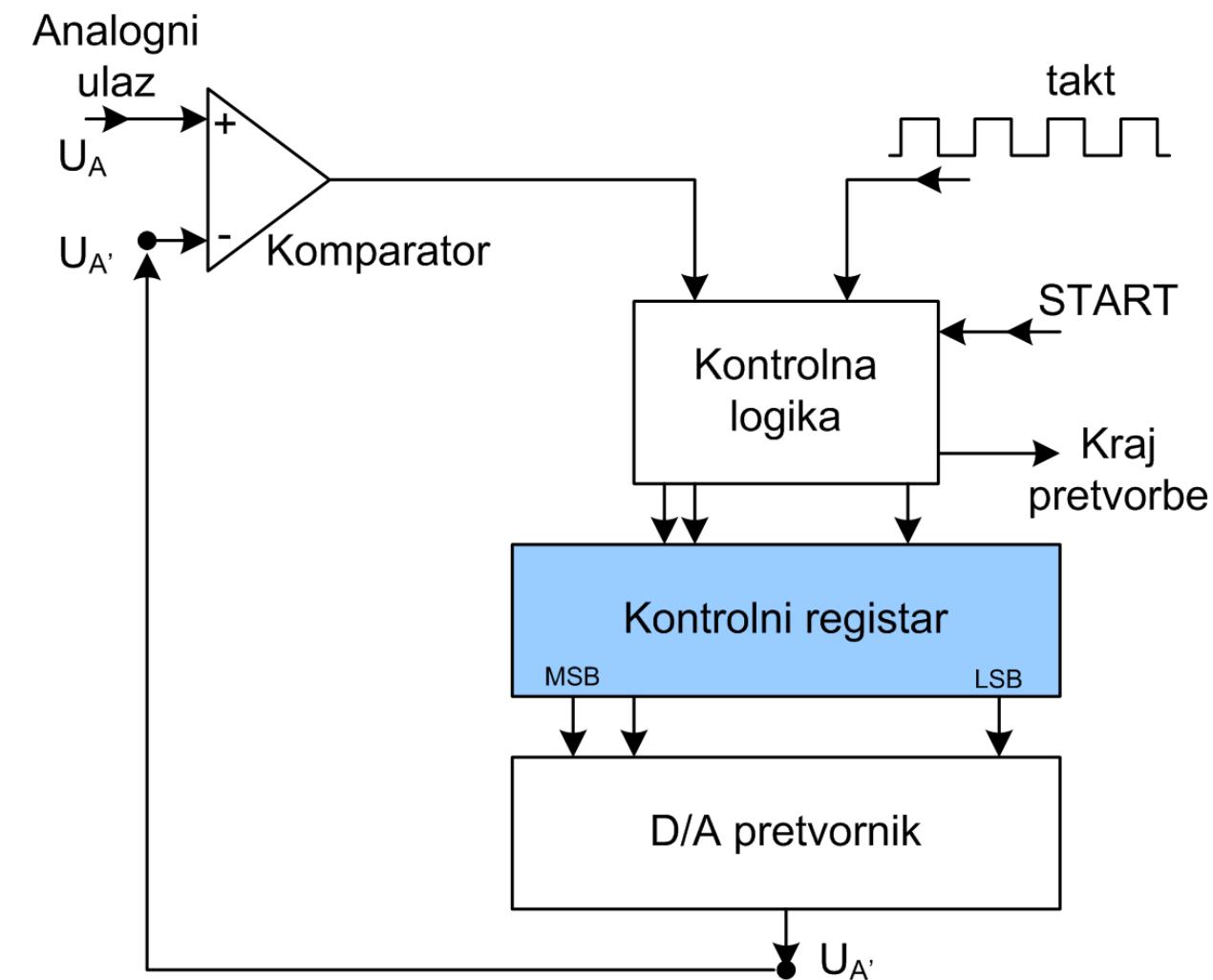
Prateći A/D pretvornik (II)

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



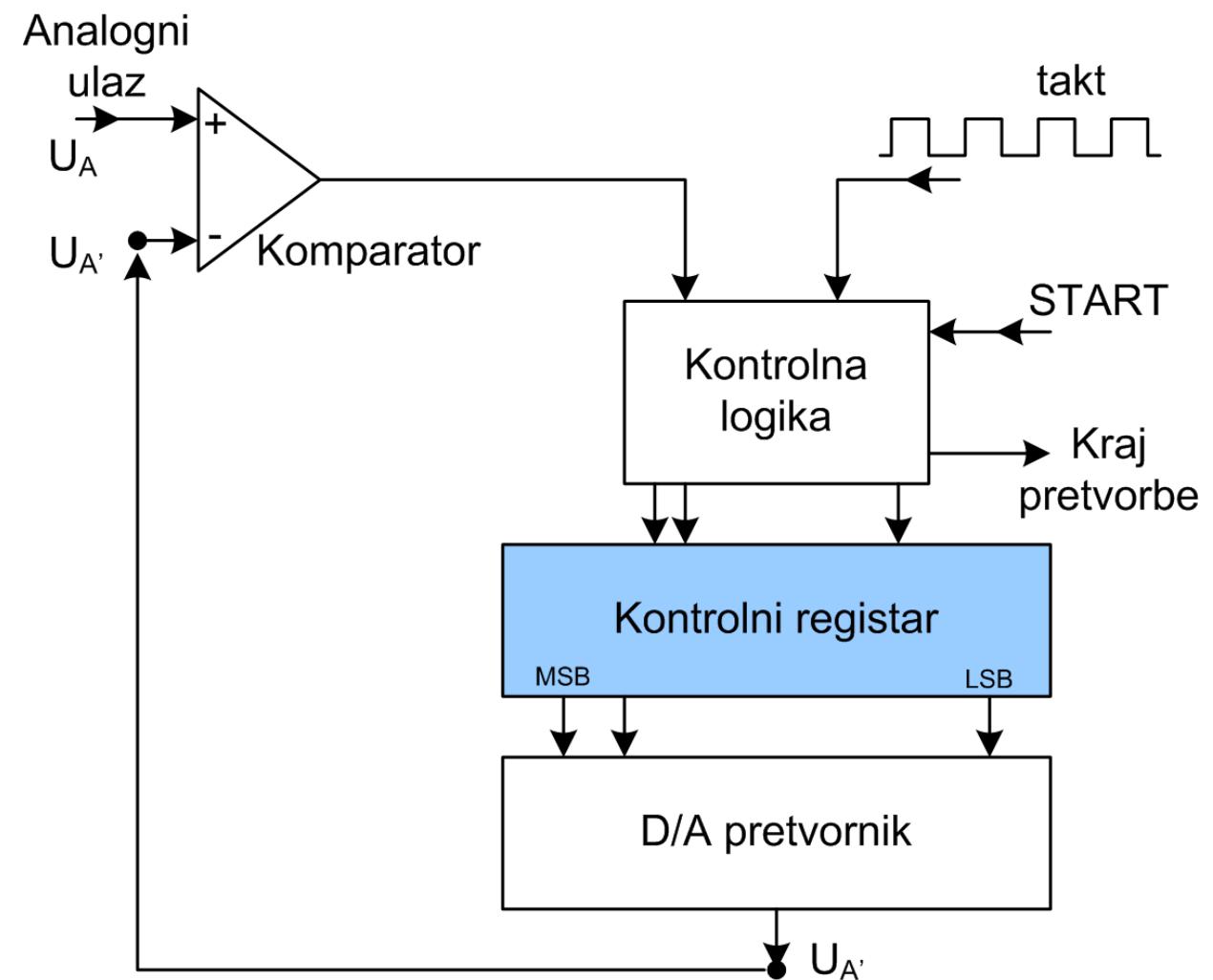
Sukcesivna aproksimacija

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



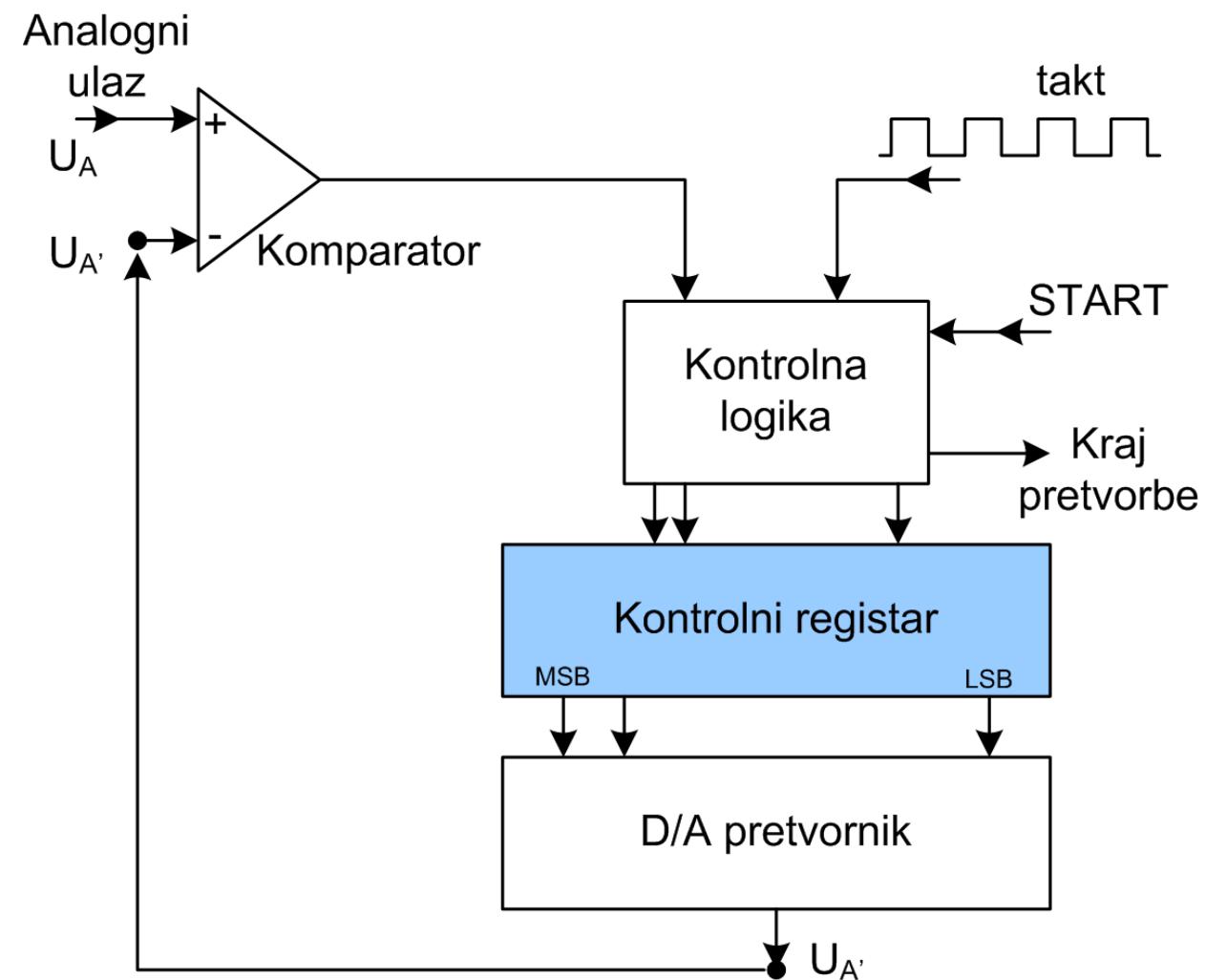
SA – korak 1

- **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 razine i kontrolna logika spušta najviši bit, inače ostaje postavljen



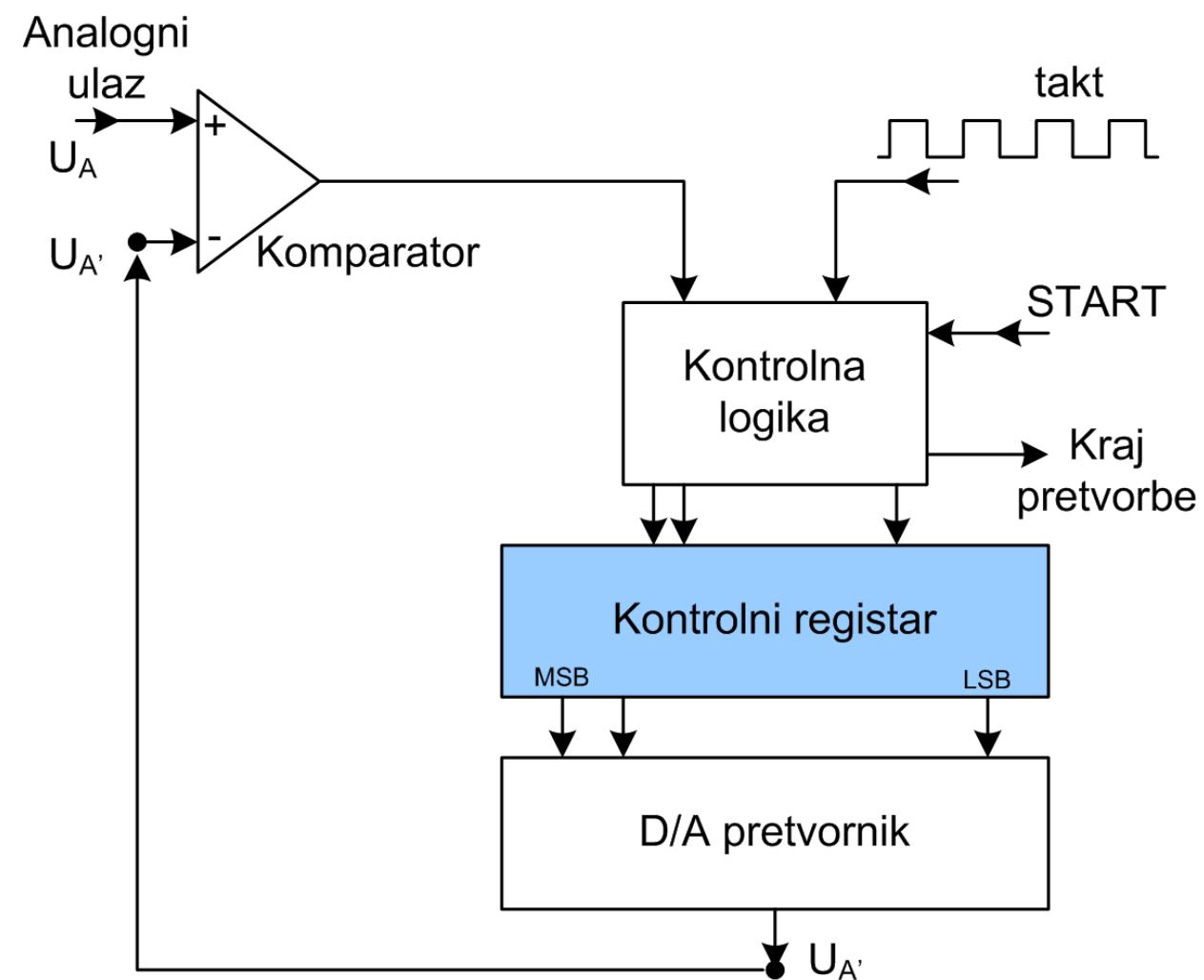
SA – korak 2

- **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

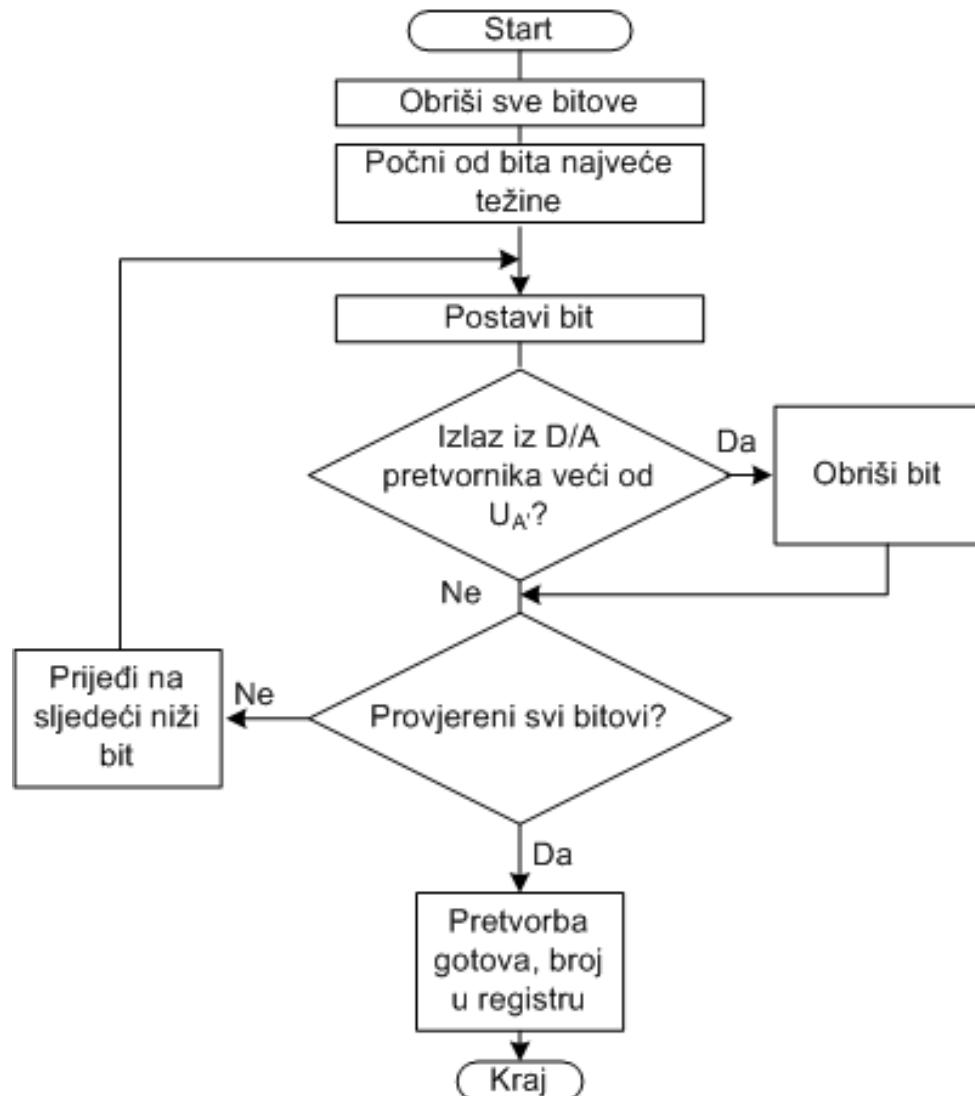


SA – korak 3

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

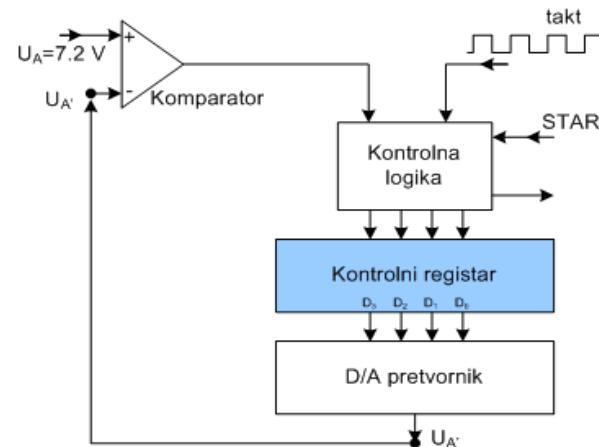


SA – općeniti algoritam

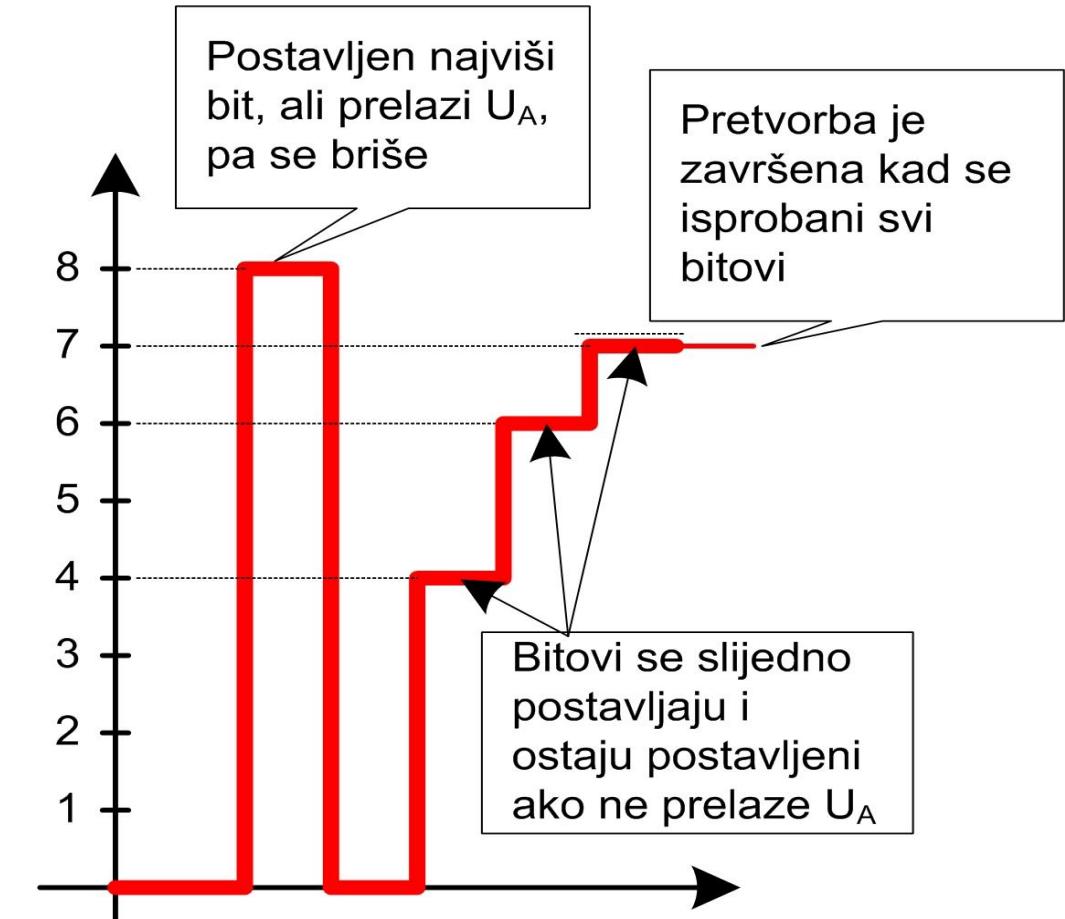


Primjer rada sukcesivne aproksimacije

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

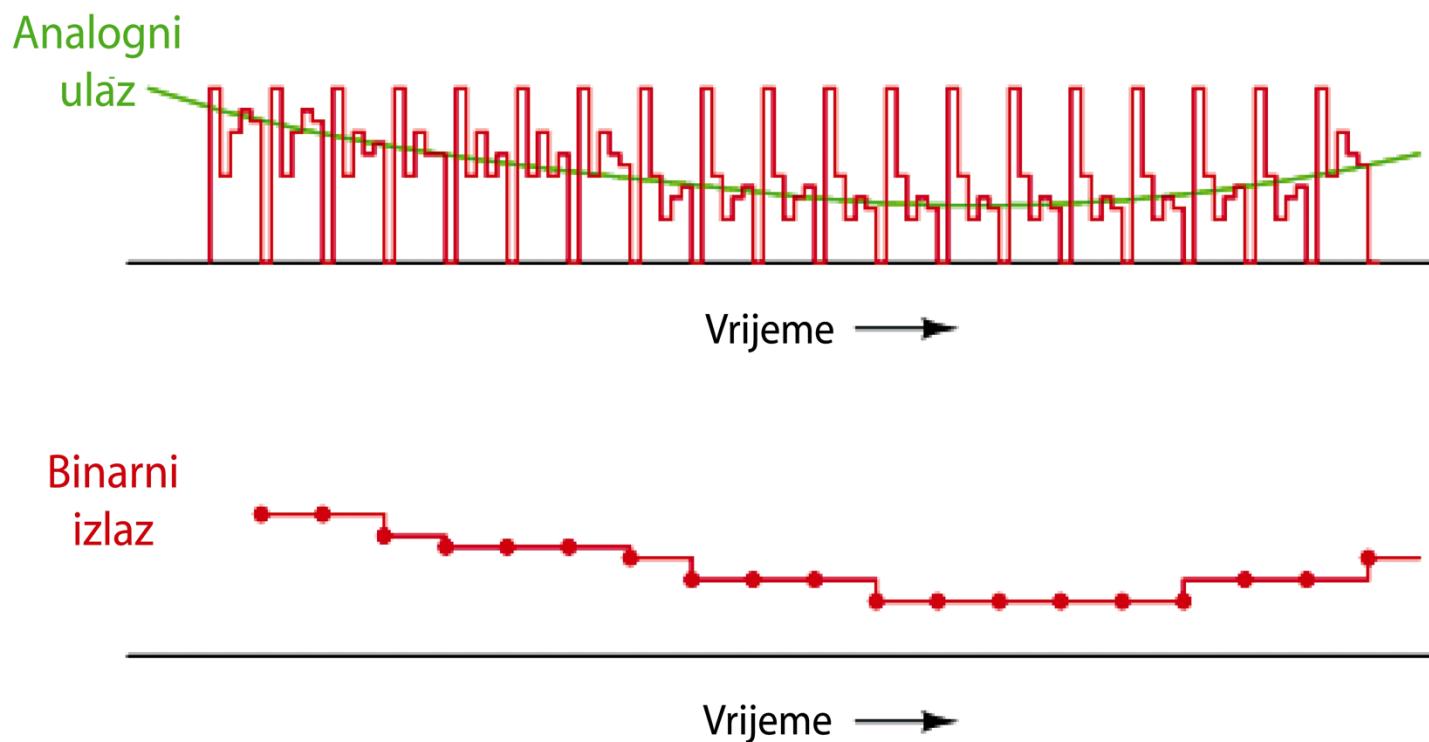


- Krajnja vrijednost je 7
 - manja je od ulaznog analognog napona, što je karakteristika metode SA-e
- Vrijeme pretvorbe je konstantno
 - N bitni pretvornik trebati će N ciklusa takta za pretvorbu, neovisno o vrijednosti ulaznog analognog napona.
- Postupak se naziva i binarno pretraživanje
 - postupak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

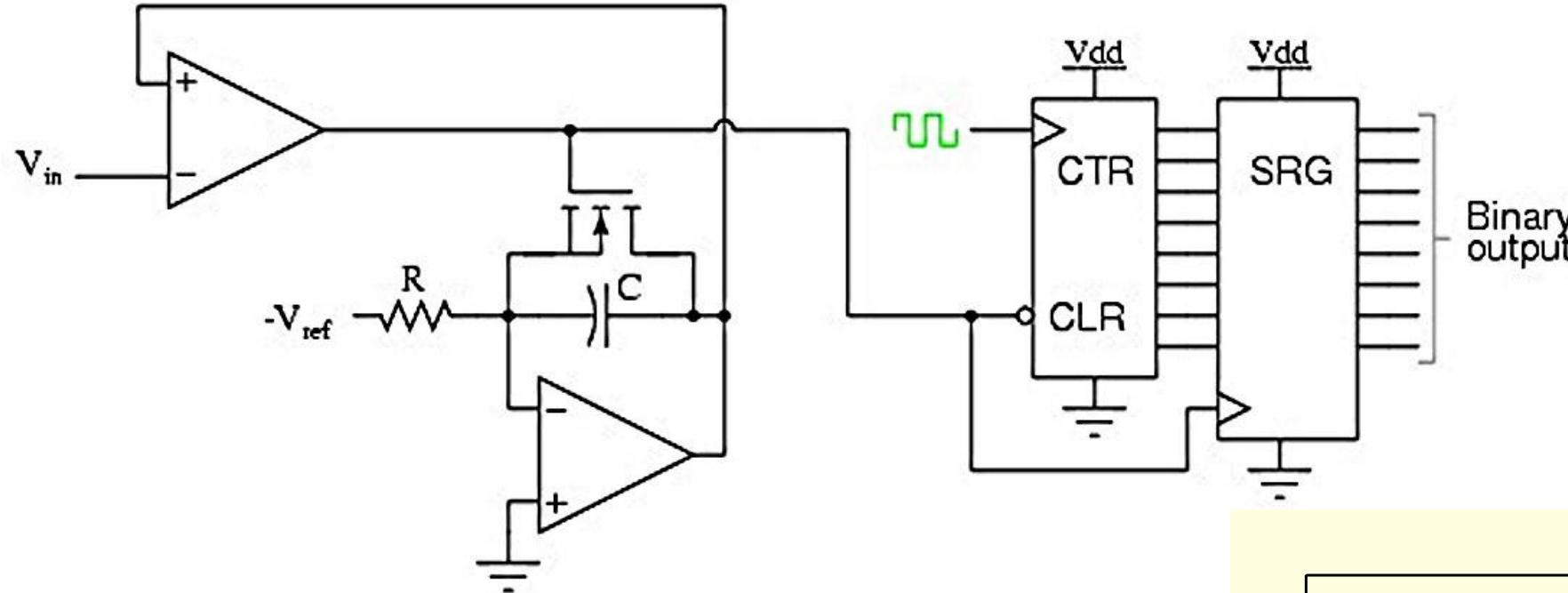


Brzina sukcesivne aproksimacije

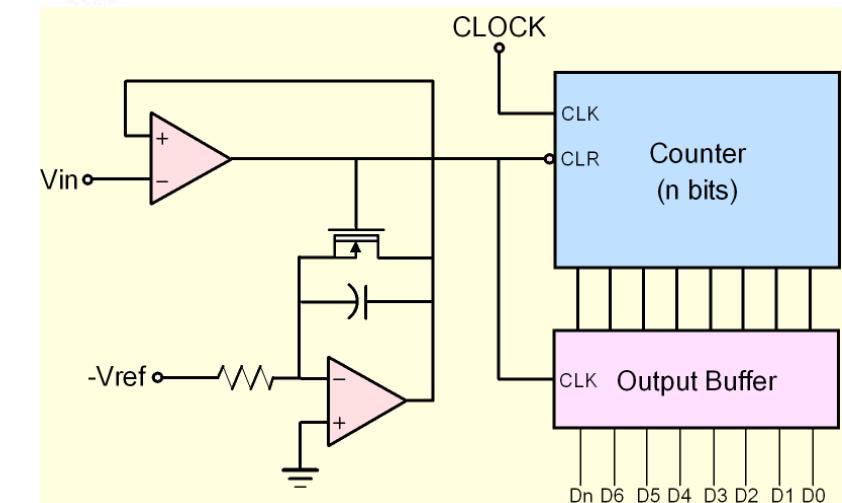
- Brzina pretvorbe do 5 Msps, razlučivost 8-16 bita.



Metoda integracije (single slope)

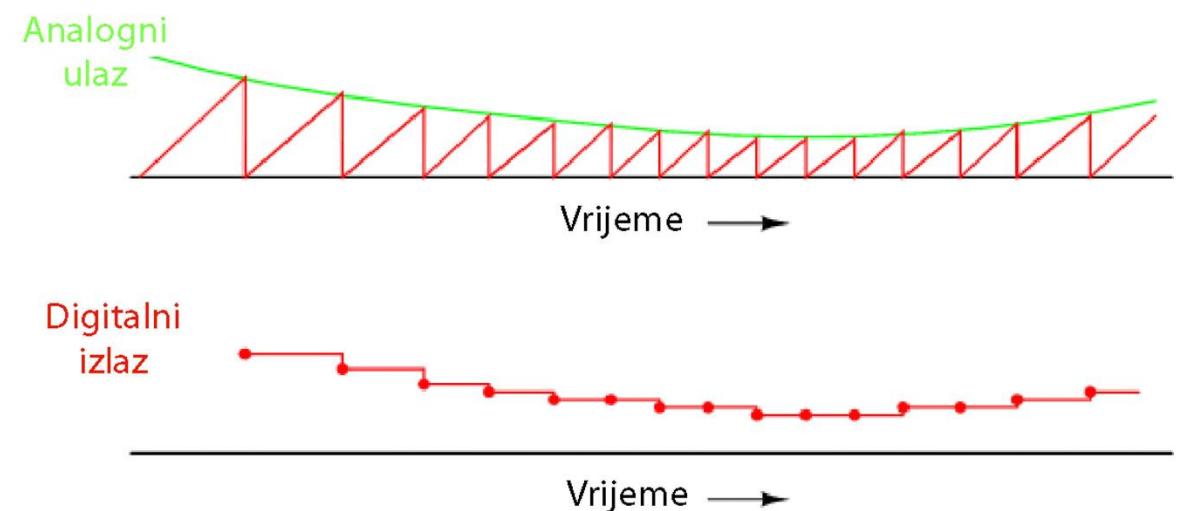


- Jednostavnija od *dual slope*
- Problem točne frekvencije, R, C



Integrirajući A/D pretvornik

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

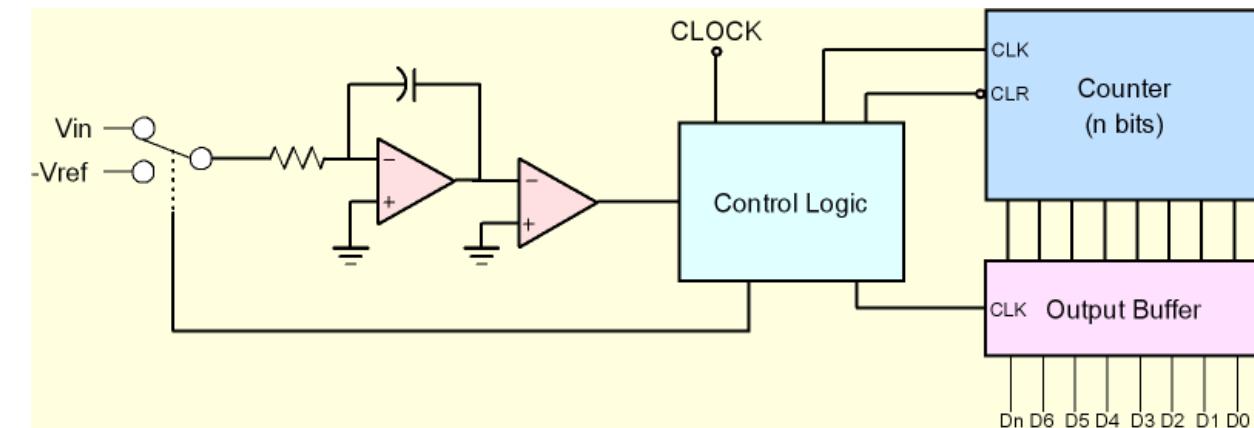


Integrirajući A/D pretvornik

- 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 brojilom
 - 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»

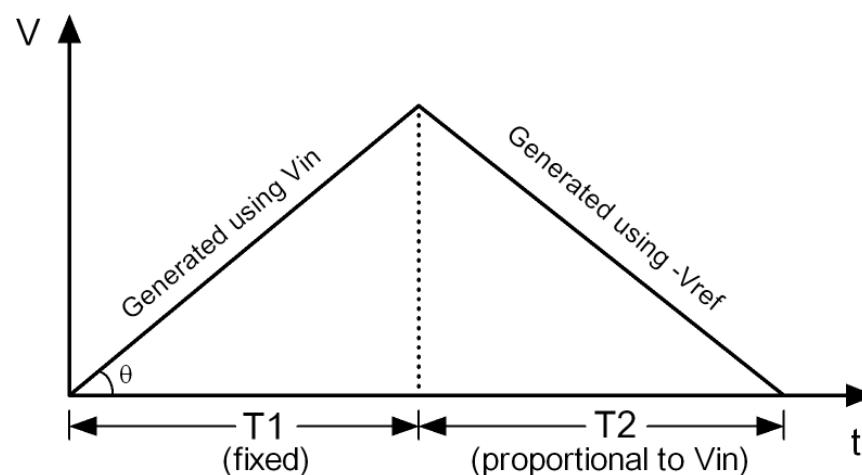
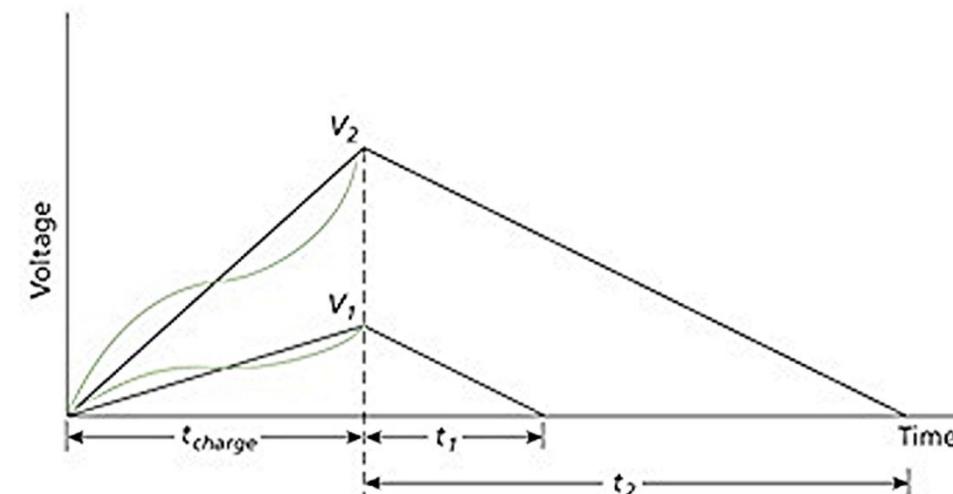
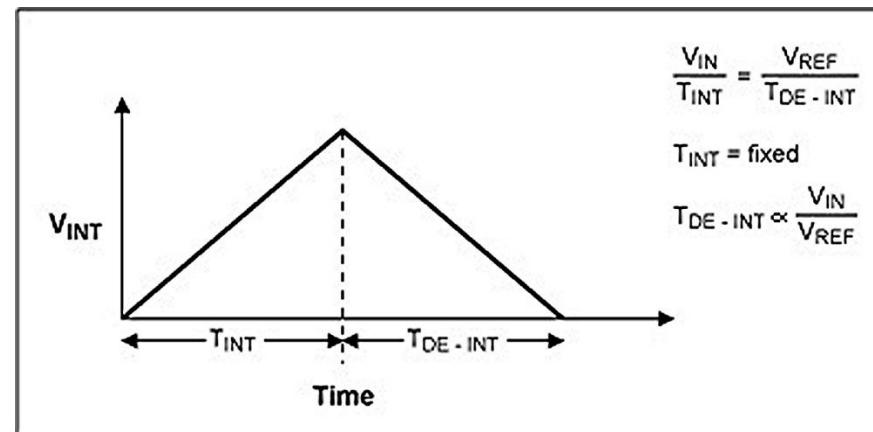
Metoda integracije (dual slope)

- Analogna integracija, mjerjenje 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)



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

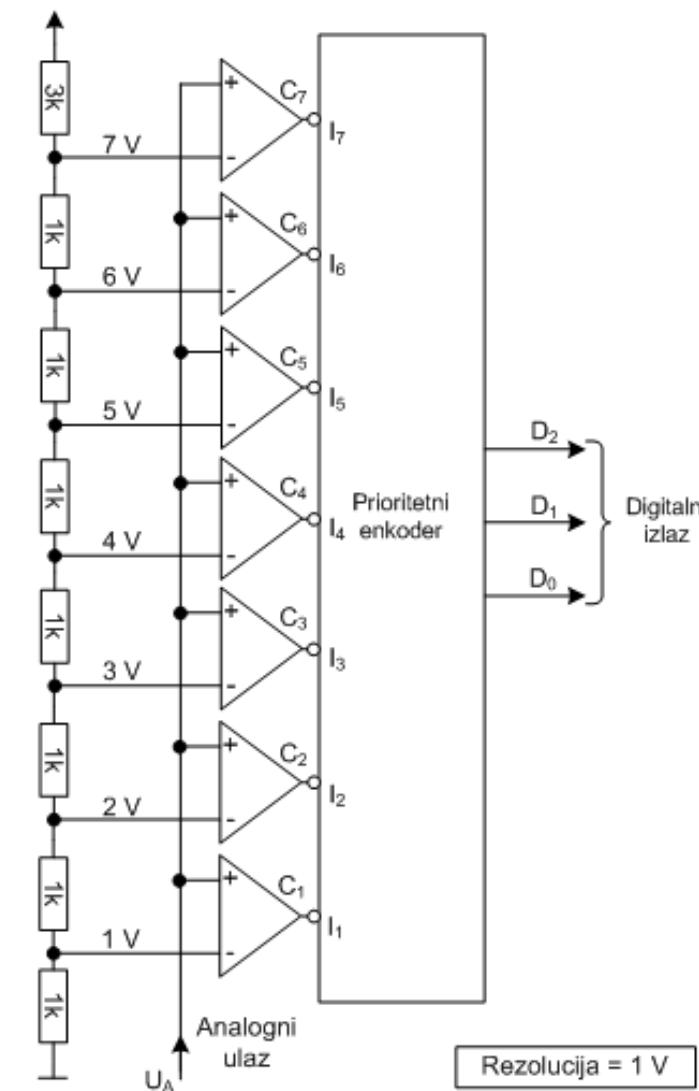
Metoda paralelne pretvorbe (*flash*)

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

Primjer 3-bitnog *flash* pretvornika

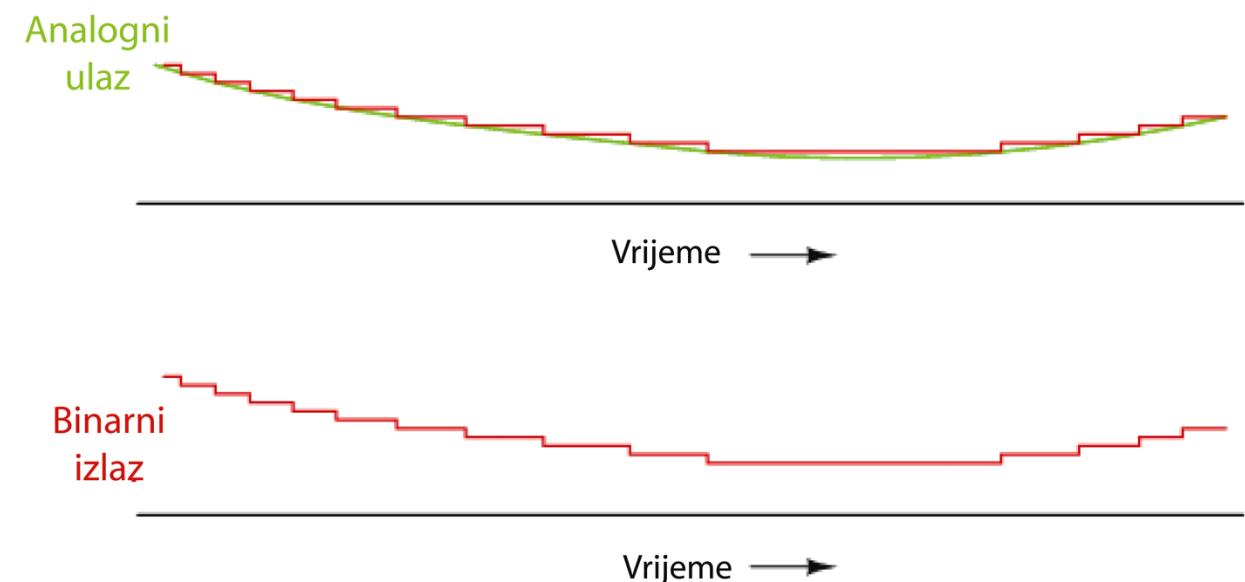
- Naponsko djelilo postavlja referentnu razinu za svaki komparator
- Sedam razina, prva = 1 V, druga = 2 V, itd.
- Analogni ulaz spojen je na ulaz svakog komparatora

- 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

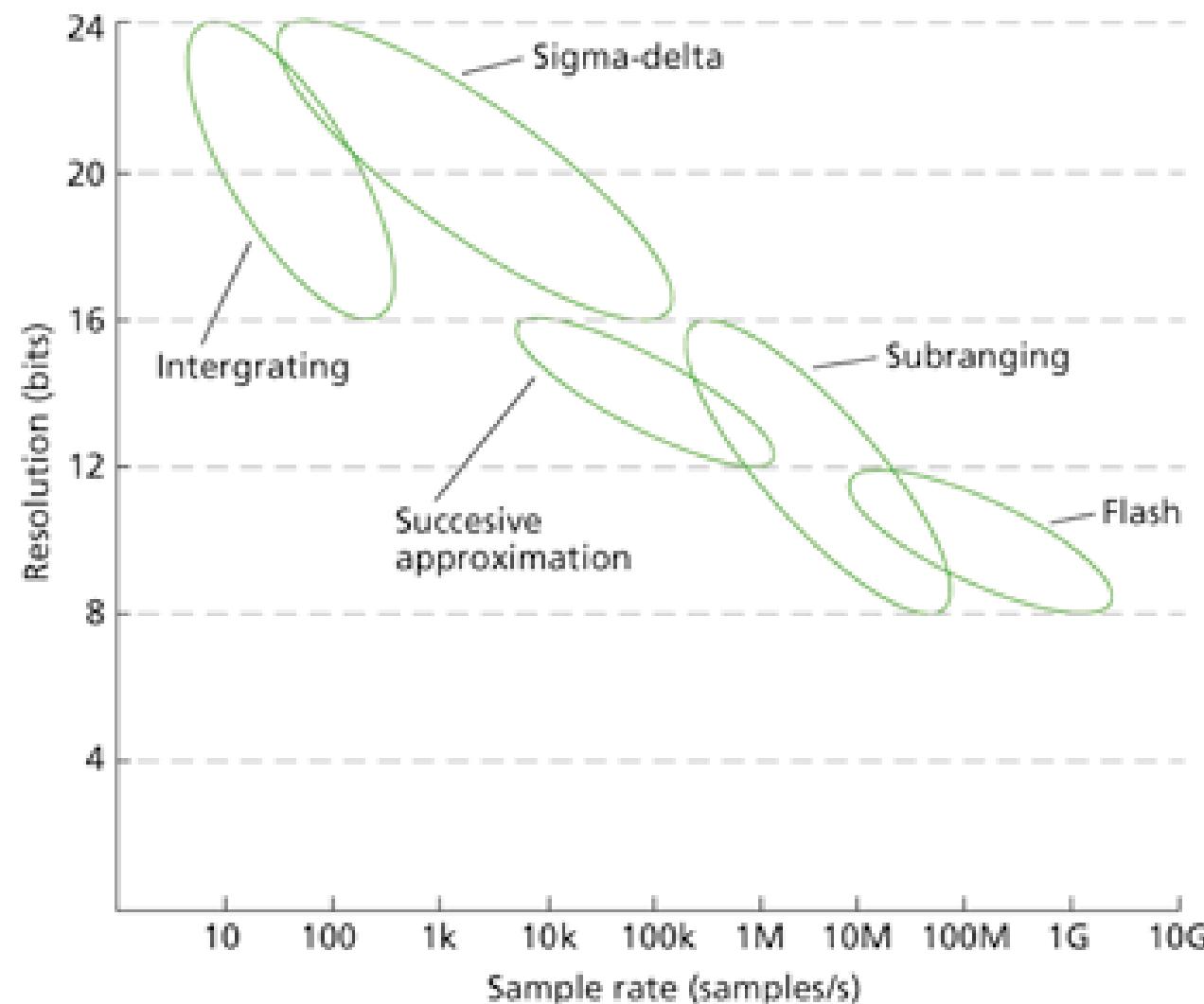


Brzina flash pretvornika

- 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 Gps)

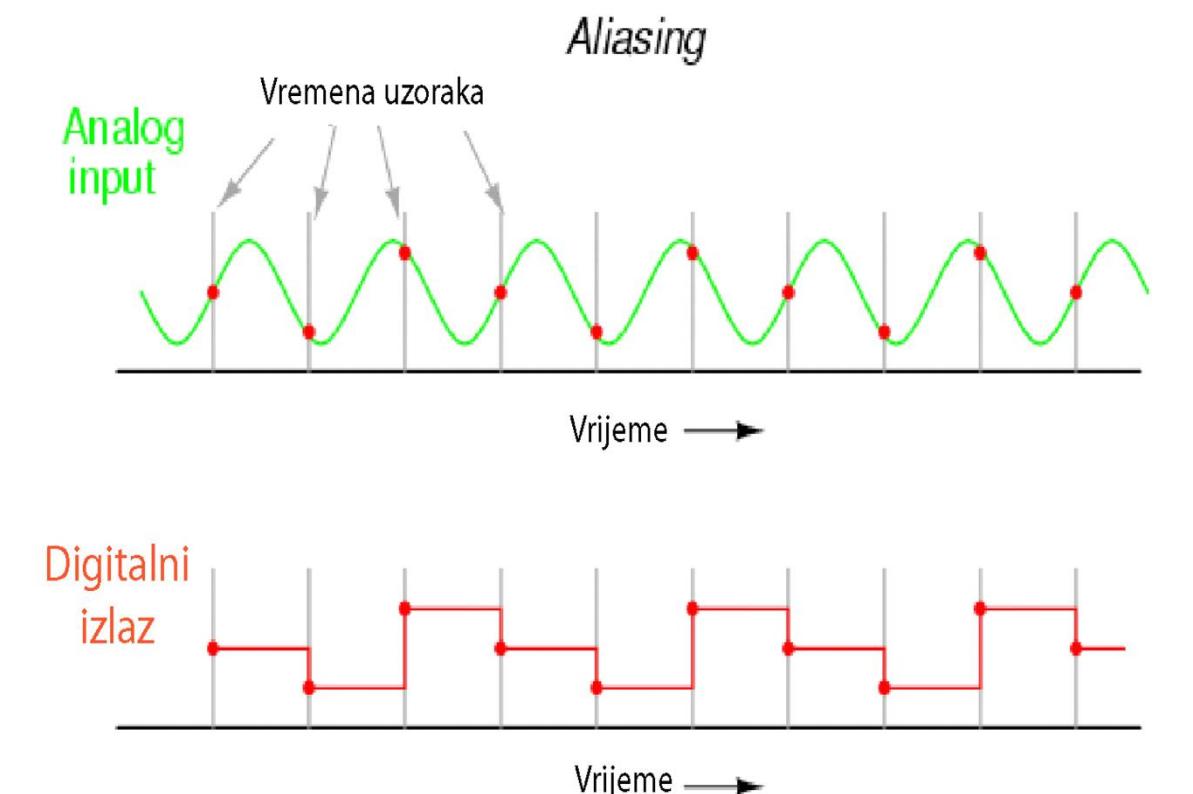


Usporedba karakteristika A/D pretvornika



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



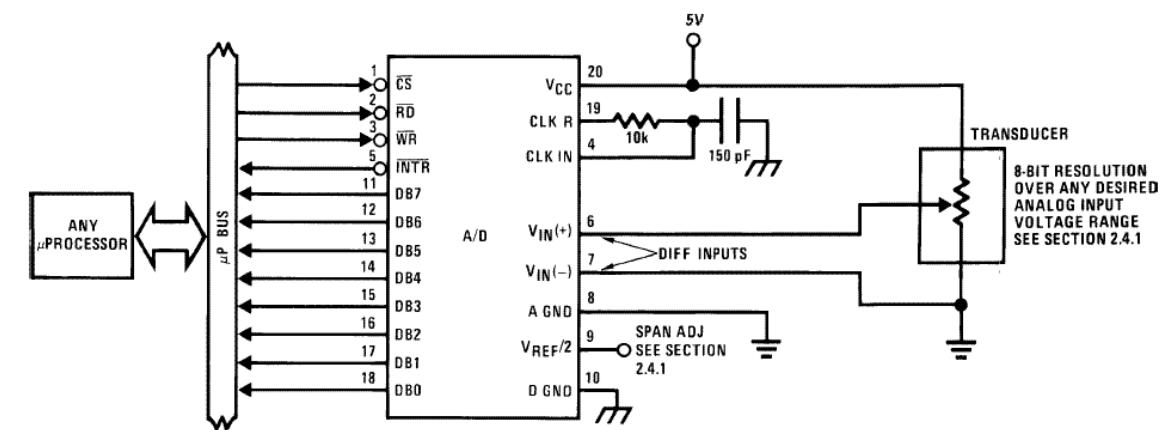
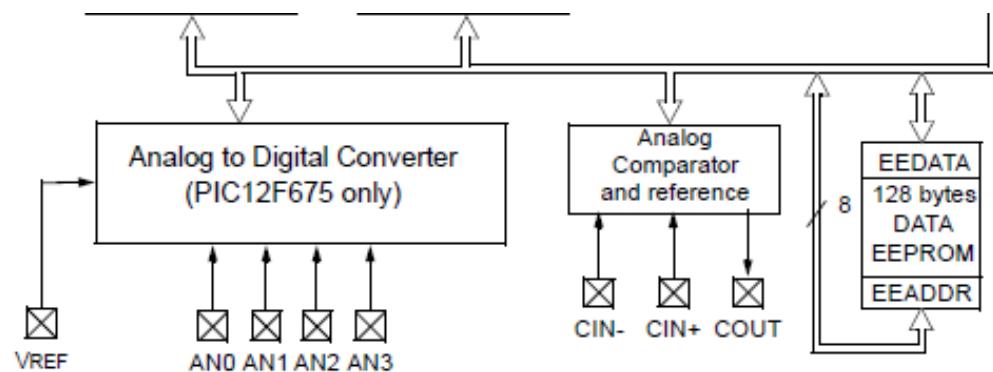
- Period izlaznog signala mnogo duži (sporiji) nego je period ulaznog signala
- Oblici ova dva signala nisu ni slični

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

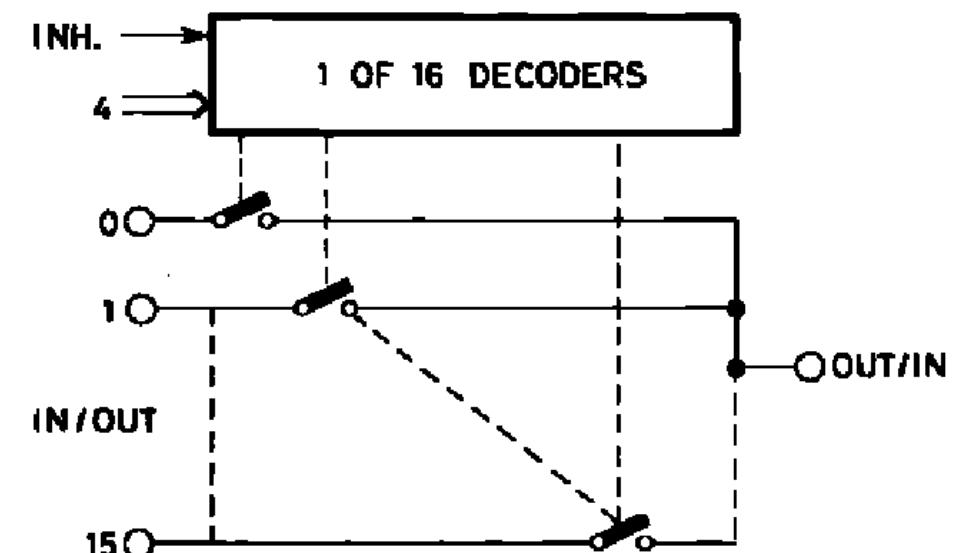
Ugrađeni ili vanjski A/D pretvornik

- 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.



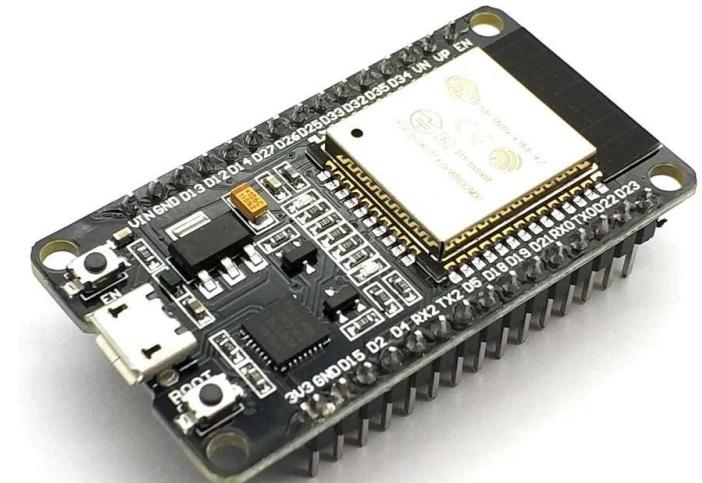
Analogno multipleksiranje

- 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





Sveprisutno računarstvo

3. Izlaz

- Ulazno-izlazni pinovi
- PWM
- PID upravljač

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.

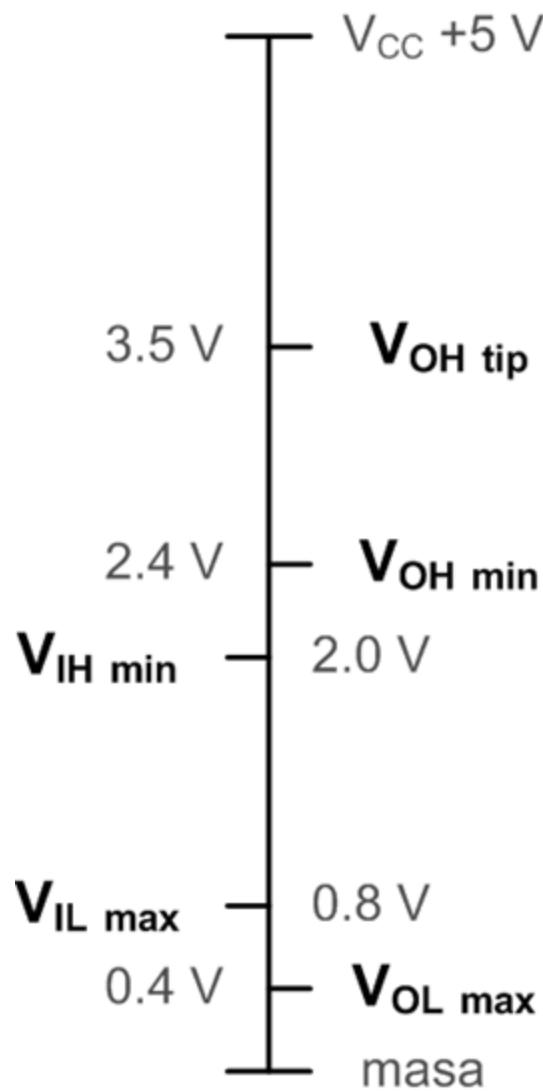
NC: Only noncommercial use of your work is permitted.

SA: Adaptations must be shared under the same terms.



Ulazno-izlazni pinovi

- Naziv TTL često se koristi dvojako:
 - označava klasu integriranih sklopova
 - označava naponske razine (kompatibilne s TTL logičkim razinama) sklopova koji nisu TTL
- Nekad – gradivni blok procesora
- Danas – povezni sklopovi (*glue logic*) visoko integriranih komponenata
- Razvoj od početka 60-ih do danas
 - zadnje poboljšanje 1985-e
 - 74AS/ALS (Advanced Schottky)
 - čak i danas dostupne i starije inačice
- Obitelj Texas Instruments 7400 je industrijska norma:
 - drugi proizvođači proizvode kompatibilne sklopove
 - proizvode se kompatibilni sklopovi ostvareni pomoću drugih tehnologija
 - npr. serija 74HCT00 je CMOS zamjena za 7400

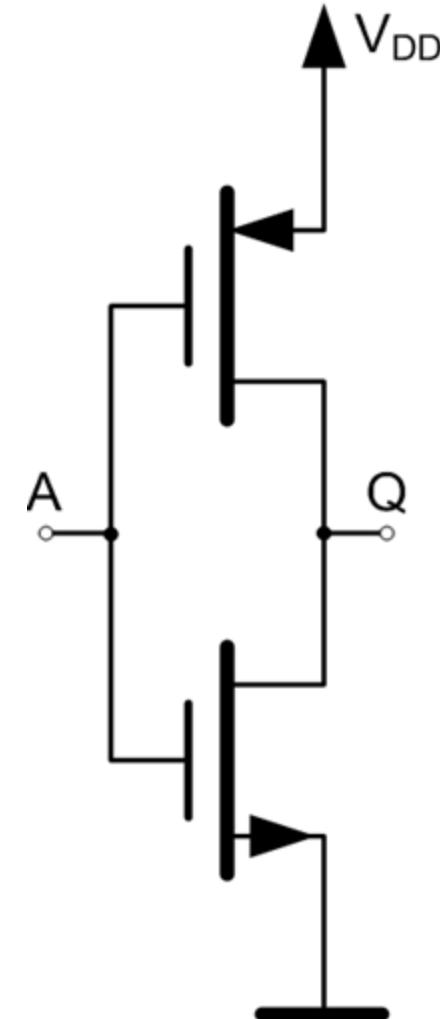


- $V_{OH \text{ min}}$ = minimalni izlazni napon visoke logičke razine
 - sklop mora dati visoku razinu od najmanje 2.4 V uz struju od 0.4 mA
- $V_{OL \text{ max}}$ = maksimalni izlazni napon niske logičke razine
 - sklop ne smije dati više od 0.4 V na izlazu uz opterećenje do 16 mA
- $V_{IH \text{ min}}$ = minimalni ulazni napon visoke logičke razine
 - sklop mora prepoznati 2.0 ili više volti kao visoku logičku razinu, i ne vući struju višu od 0.04 mA
- $V_{IL \text{ max}}$ = maksimalni ulazni napon niske logičke razine
 - sklop mora prepoznati 0.8 V kao nisku logičku razinu i ne vući struju višu od 1.6 mA

- Napajanje = 5 V
- Uvijek teče mala struja nužna za održavanje ispravne logičke razine
 - donja granica minimalne potrošnje – visoka!
- Potrošnja ne raste tako brzo s frekvencijom kao kod CMOS-a

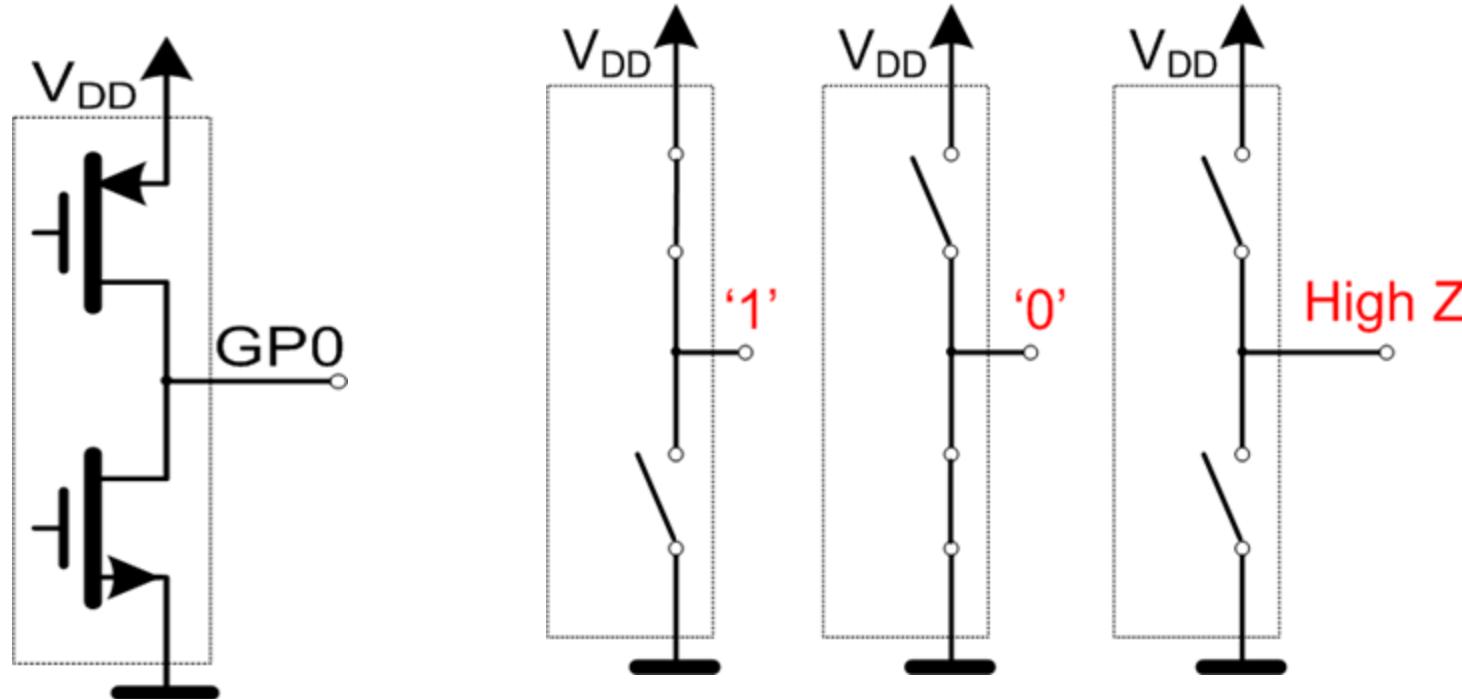
CMOS

- Povijest – novi tip tranzistora je jeftiniji za izradu i lakši za integraciju (od bipolarnih)
 - P-MOS
 - N-MOS
- Brzi razvoj mikroprocesora potiče razvoj MOSFET-a
- Osnovni razlog uspjeha MOSFET-a je CMOS logika
 - C-MOS
- Upareni komplementarni i simetrični p- i n-kanalni MOSFE tranzistori
- Prednosti
 - otpornost na smetnje
 - brzi simetričan odziv
 - mala statička potrošnja
 - struja teče jedino pri promjeni stanja
 - manje zagrijavanje
 - brzina



Tri stanja

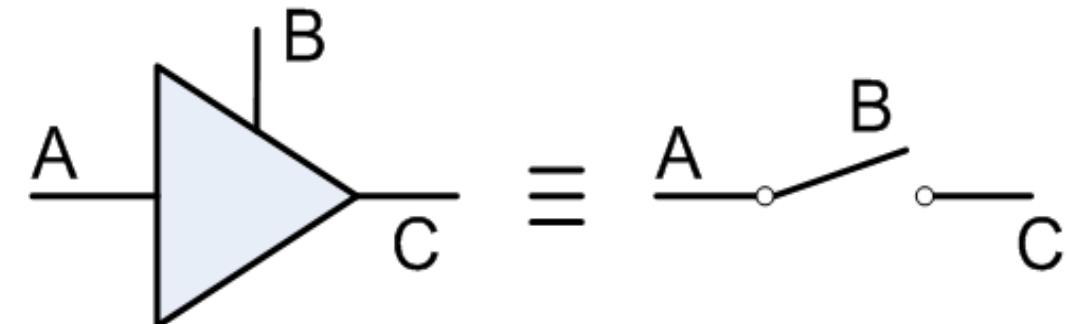
- Jeden pin ulazno-izlaznog porta mikrokontrolera možemo pojednostavljeno predstaviti:



- "Sklopke" mogu spojiti pin na visoku razinu, nisku razinu ili ga držati odspojenim - u visokoj impedanciji

Međusklop s tri stanja

- Međusklop s tri stanja
- Omogućuje komunikaciju zajedničkom sabirnicom
 - neaktivan uređaj postavlja svoj izlaz u stanje visoke impedancije



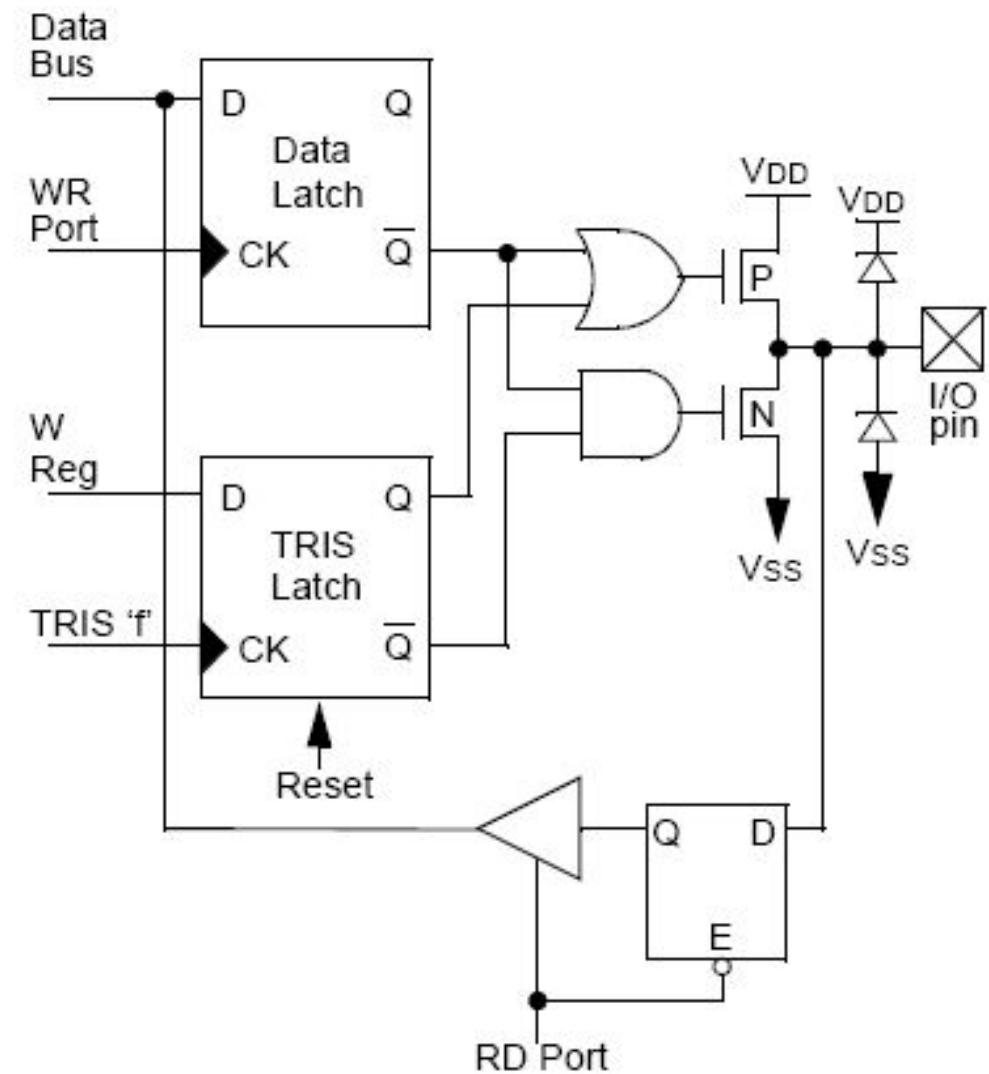
ulaz		izlaz
A	B	C
0	0	Z
0	1	0
1	0	Z
1	1	1

GPIO pinovi – ulazno/izlazni

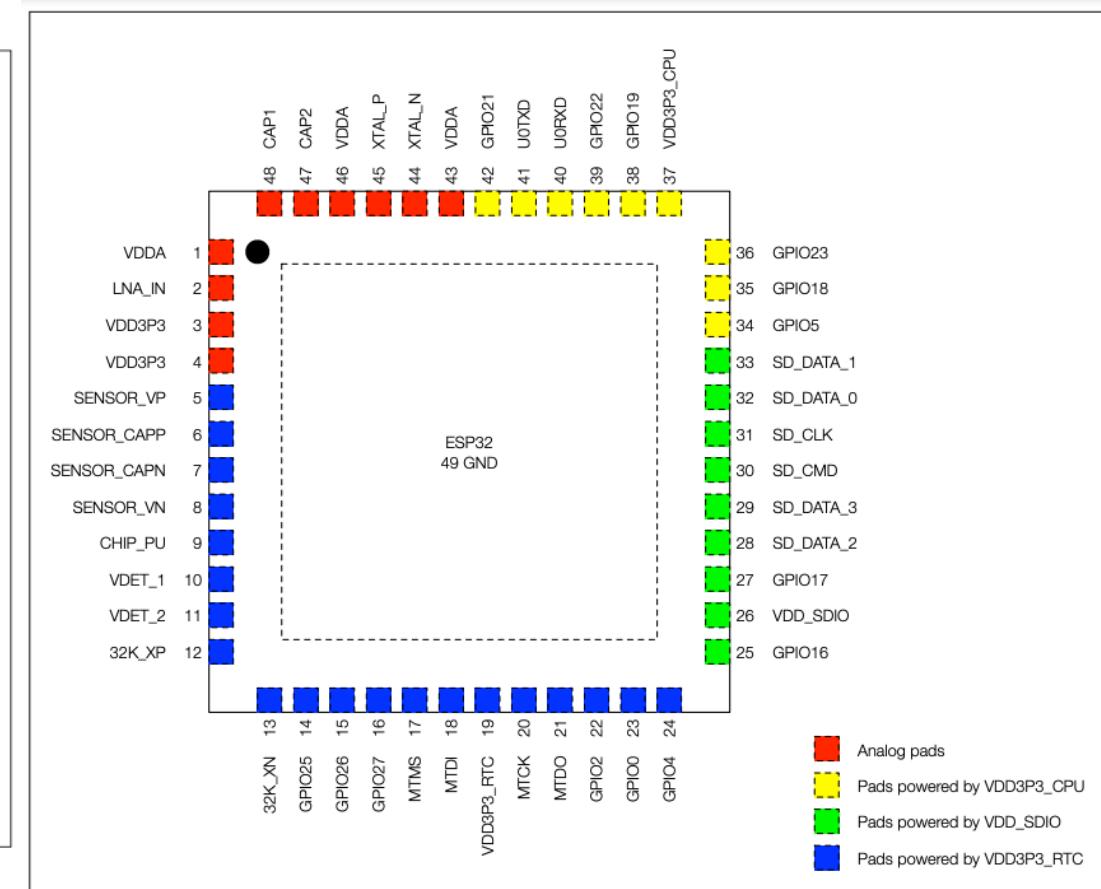
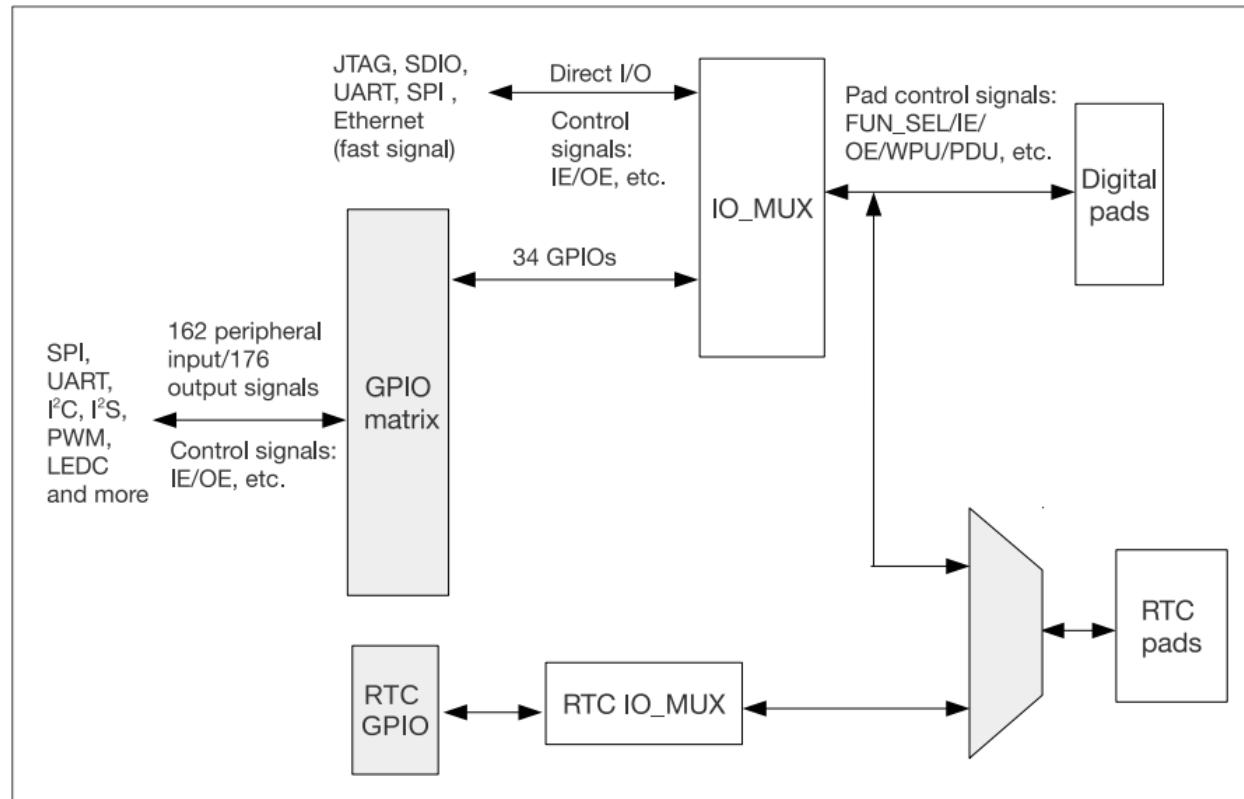
- Primjer PIC18 GPIO pina

- Ograničenja:

- 25mA po pinu
- 125mA po GPIO portu



GPIO ESP32 - multipleksiranje



▪ Ograničenja:

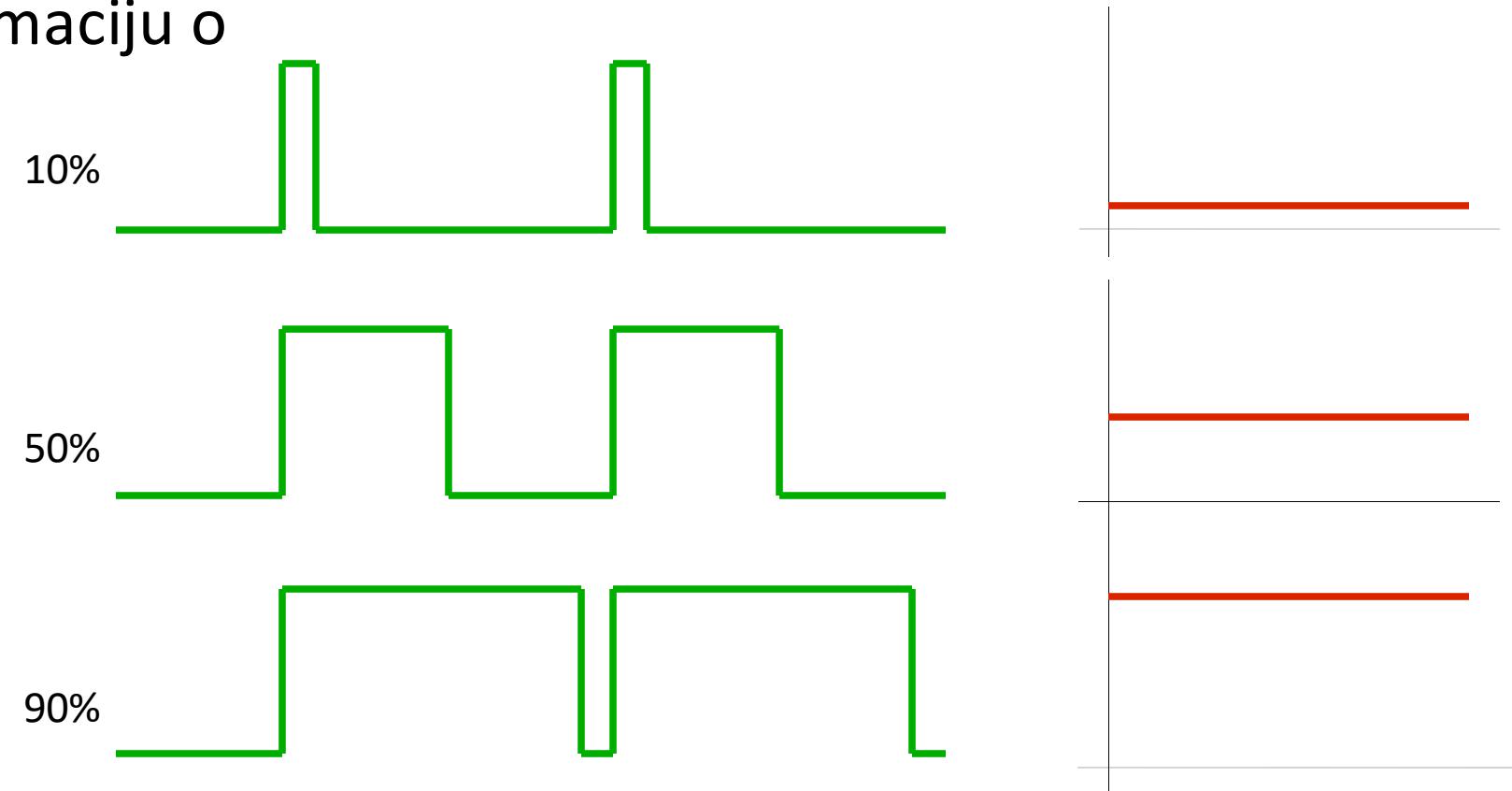
- 40mA izlazna po pinu (*source*)
- 28mA ulazna po pinu (*sink*)
- 1200mA za čitavi ESP32
- Uobičajeni napon: 3.3V



Pulsno-širinska modulacija

Pulsno-širinska modulacija (PŠM)

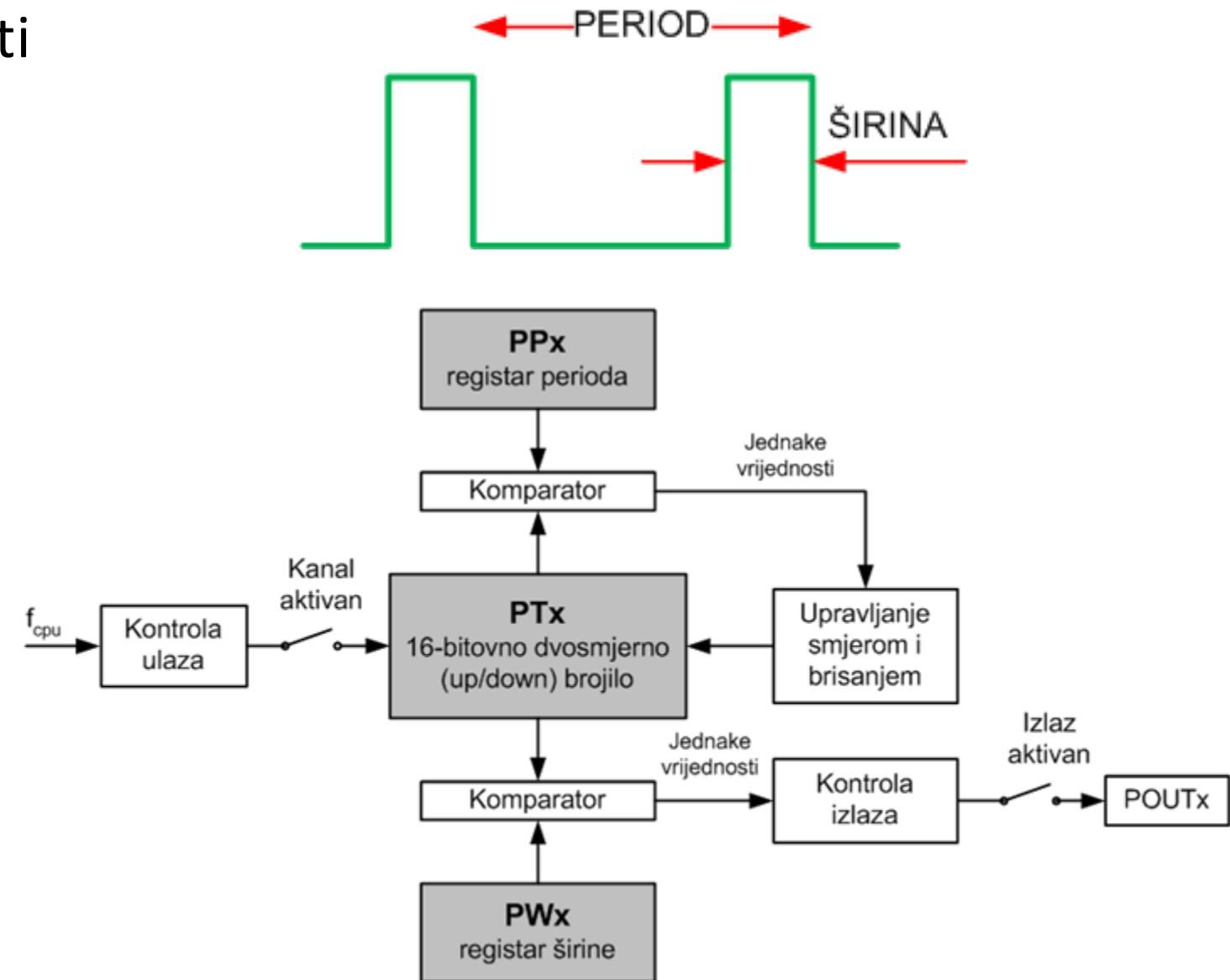
- Pulse Width Modulation (PWM)
- Širina impulsa sadrži informaciju o amplitudi izlaznog signala



Građa PWM-a

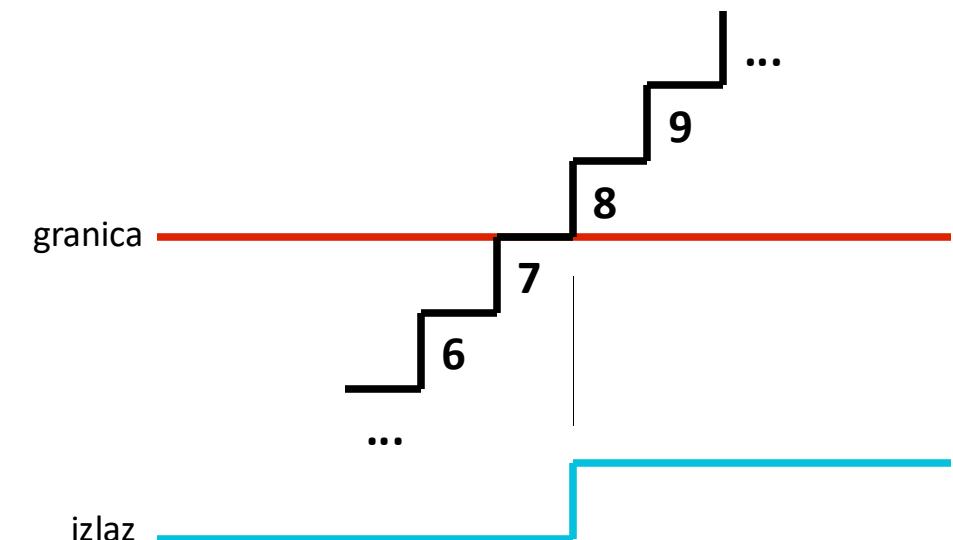
- Primjer: FRISC - osnovni elementi

- Brojilo
- Komparatori
- Registri
 - Period signala
 - Širina signala



Osnovni način rada PWM-a

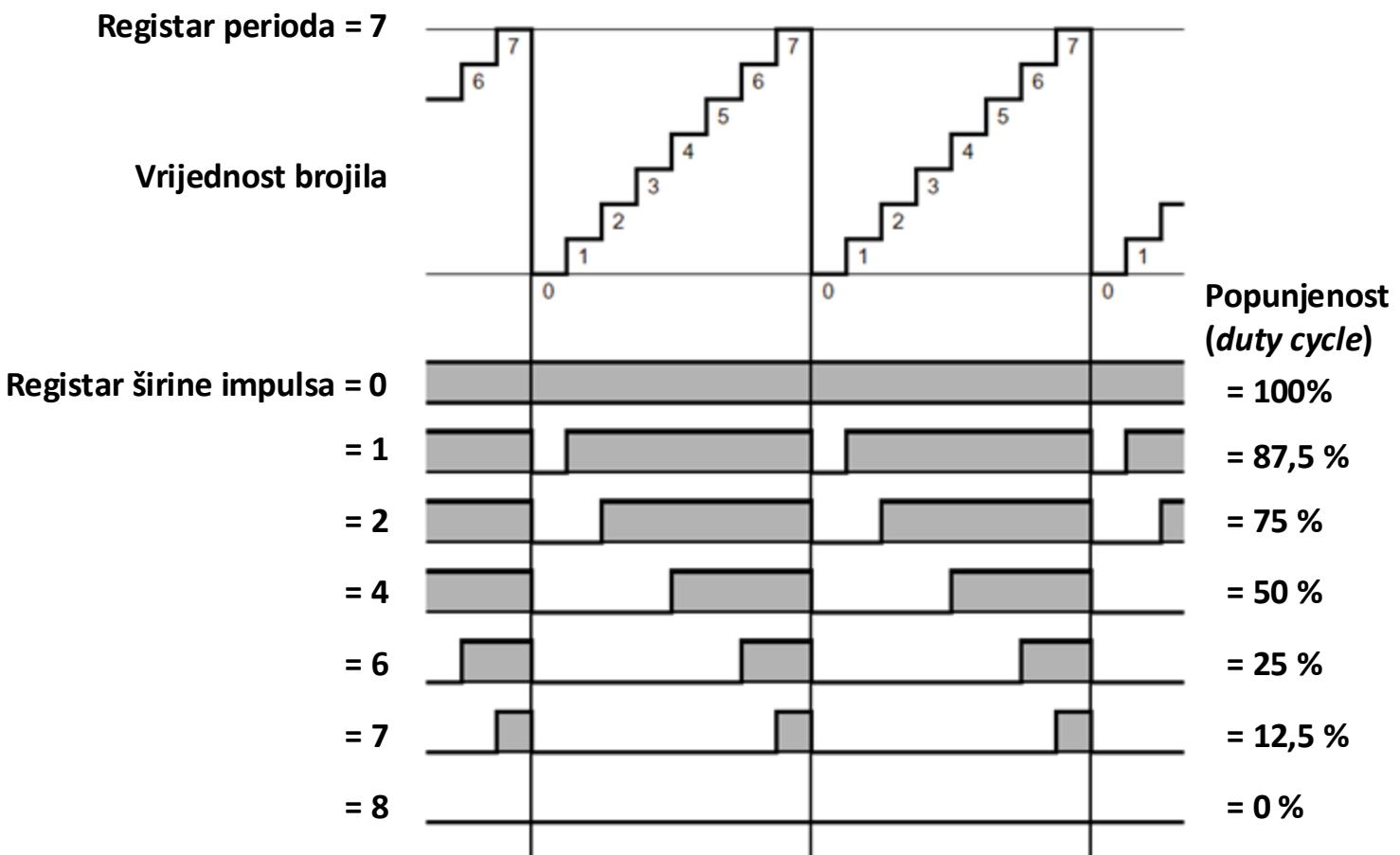
- Brojilo broji impulse prema gore ili dolje
- Komparator uspoređuje vrijednost brojila i vrijednost registra širine
 - Usporedba može biti = , \geq , $>$
- Komparator određuje treba li uključiti izlaz modulatora
- Vrijednost registra širine je granična vrijednost brojila koja uključuje izlaz



PWM signal - asimetričan

▪ Asimetrični signal

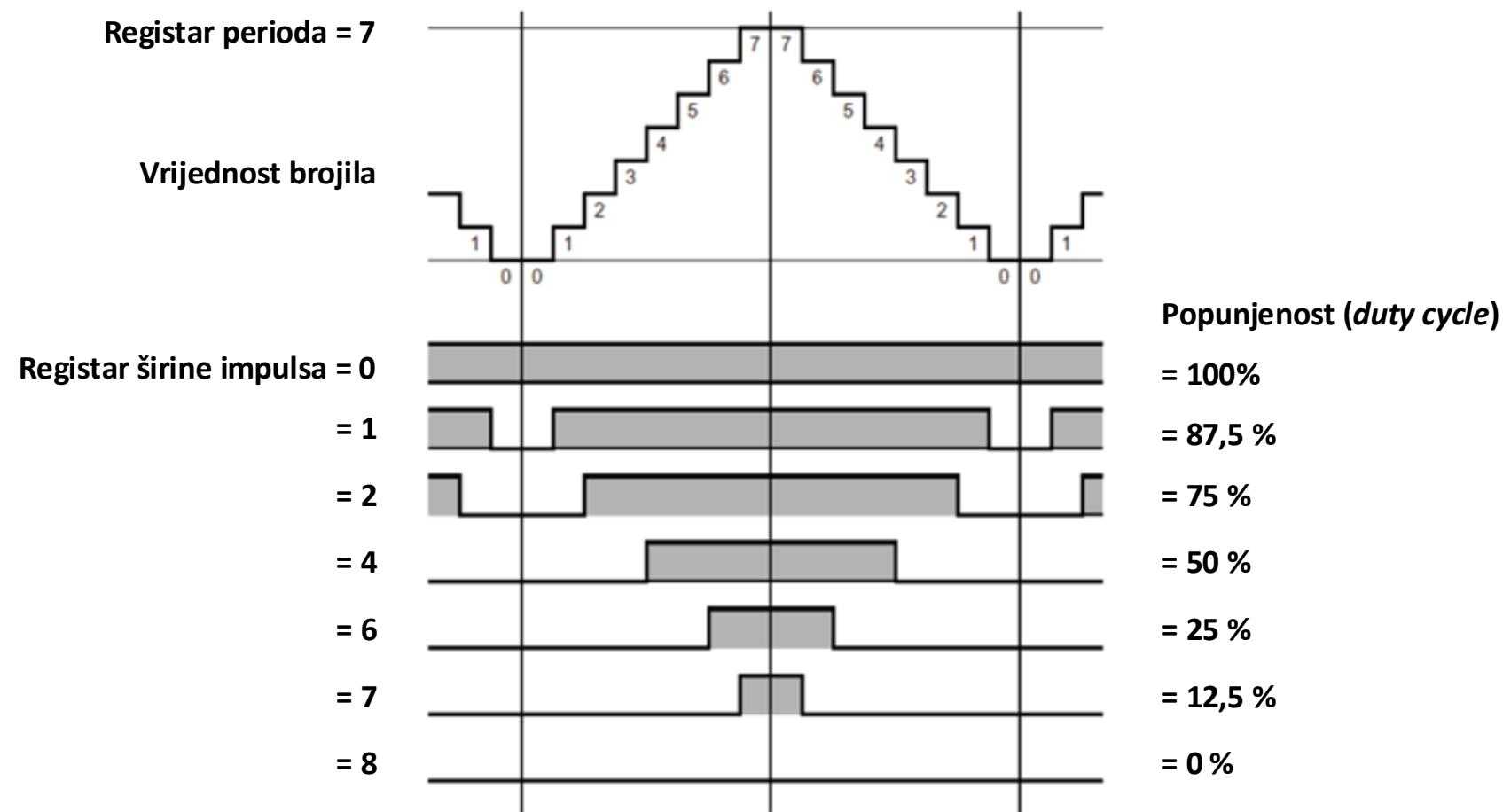
- Brojilo broji prema gore, kad izbroji, kreće od nule



PWM signal - simetričan

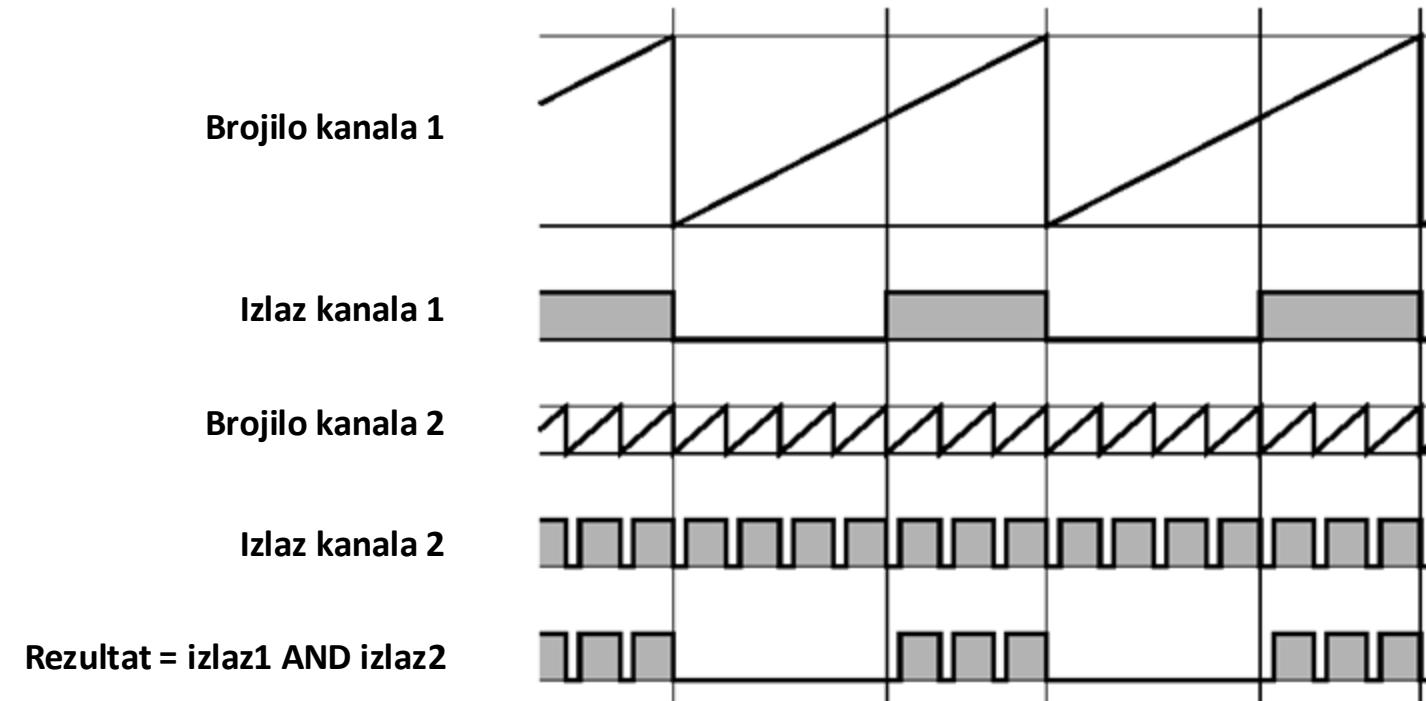
- Simetrični signal

- Brojilo broji prema gore, kad izbroji, nastavlja prema dolje (prema nuli)



PWM signal - kombinirani

- Neki uređaji imaju mogućnost kombinacije više PWM-signala
- Kombiniranje najčešće logičkom operacijom I (AND)
 - Ekvivalentno *množenju* dvaju signala



Izvor: Siemens C167 manual

Primjena PWM signala

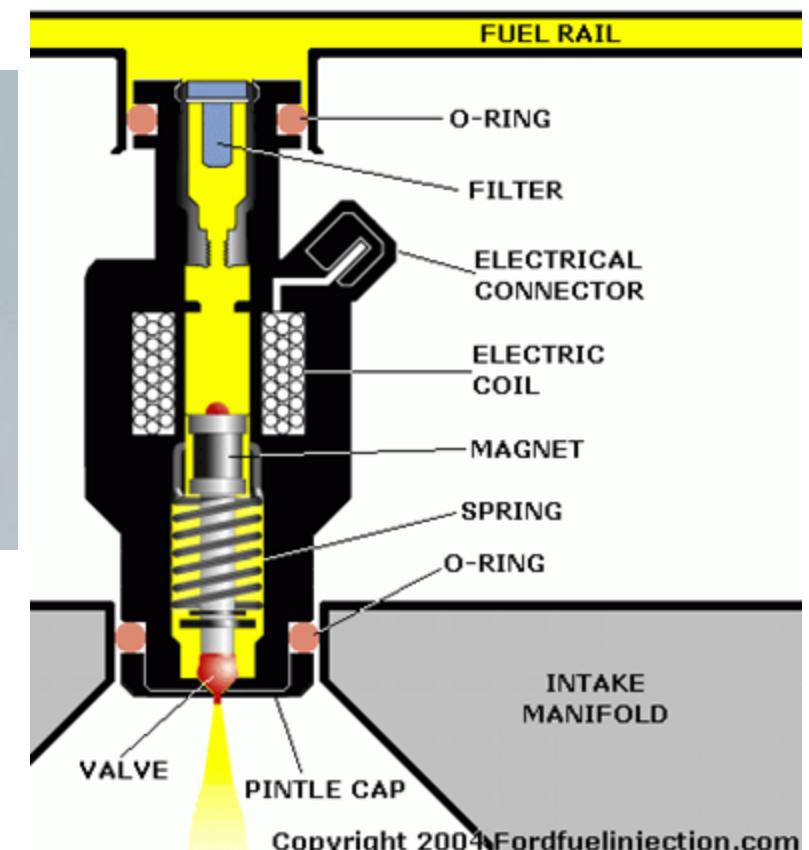
- Vrlo jednostavna izvedba D/A pretvornika
- Izlazni signal je pravokutni
 - Sadrži neparne harmonike

$$x(t) \simeq \sin(\omega t) + \sin(3\omega t) + \sin(5\omega t) + \dots$$

- Filtrima možemo dobiti odgovarajući harmonik
- Integriranjem izlaznog signala (kondenzator) dobijemo srednju vrijednost signala (snagu)
 - Izravno ovisi o faktoru popunjenoosti (*duty cycle*)
 - Iskoristivo za upravljanje sustavima čiji učinak ovisi o srednjoj vrijednosti ulaza (snazi)
 - žarulje, dimmeri, istosmjerni motori, zvučnici, ...

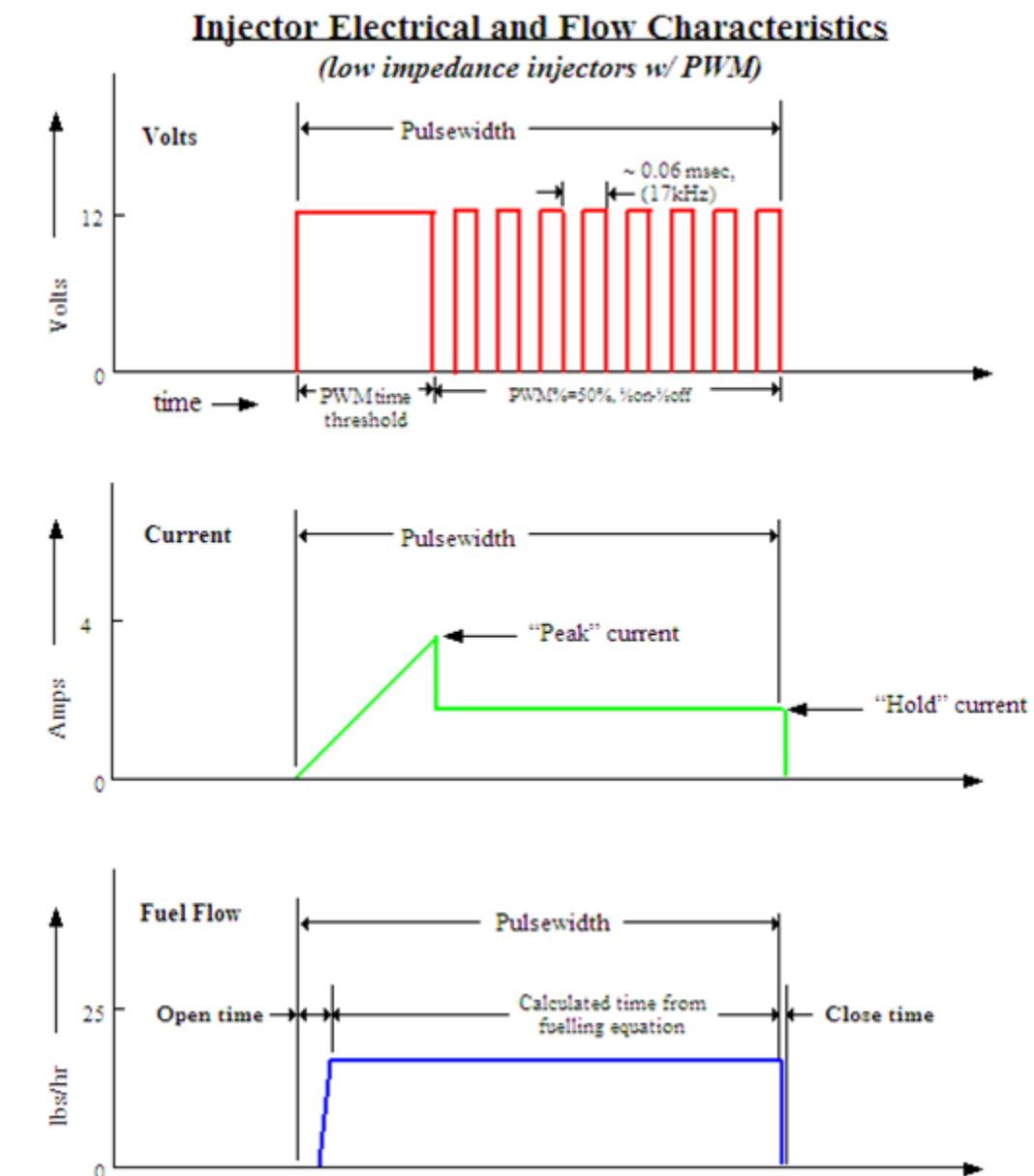
Primjena PWM signala

- npr. brizgaljka goriva (fuel injector) u motoru s unutarnjim sagorijevanjem
 - elektroventil
 - normalno zatvoren, u aktivnom stanju zavojnica povuče ventil i gorivo izlazi
- Svojstva:
 - regulacijom struje kroz zavojnicu regulira se stupanj otvorenosti – protok goriva
 - vrijeme otvaranja tipično 1 ms, otpor manji od $3\ \Omega$
- Zahtjevi:
 - čim preciznija regulacija trajanja i stupnja otvorenosti
- Mane:
 - tromost (pogotovo pri otvaranju)
 - mali otpor → potrebna velika struja za upravljanje
→ zagrijavanje zavojnice brizgaljke i tranzistora koji upravljaju ventilom
- Koji D/A upotrijebiti?



Primjena PWM signala

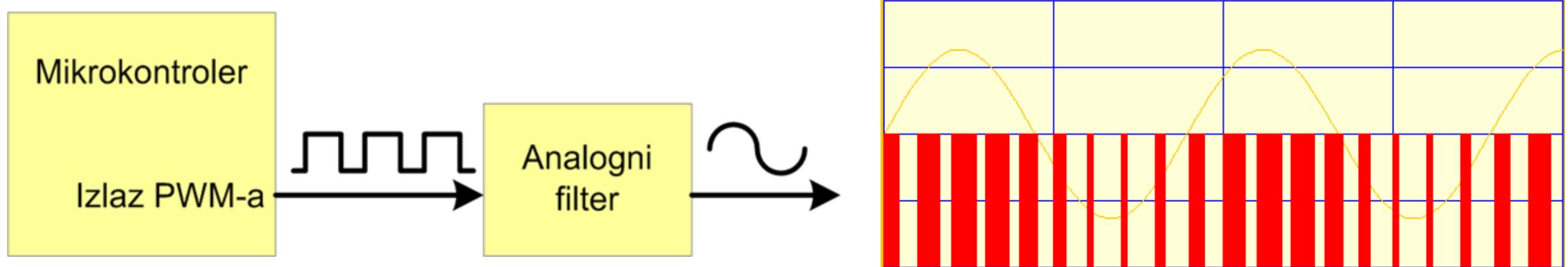
- Koji D/A? – Nijedan!
- Iskoristiti tromost ventila
 - pulsno širinska modulacija
 - "peak and hold"
 - maksimalna struja za čim brže otvaranje
 - regulacija otvorenosti popunjenošću PWM signala
- Prednosti:
 - manja potrošnja i zagrijavanje



Megamanual: Injectors and fuel system, <http://www.megamanual.com/v22manual/minj.htm>

D/A pretvorba pomoću PWM

- Pulsno-širinska modulacija (*pulse-width modulation, PWM*)
 - najjednostavniji način D/A pretvorbe
- PWM generira pravokutni signal stalne frekvencije i promjenjive popunjenoosti
 - Ideja - ako generiramo prikladan PWM signal, i filtriramo neželjene frekvencije, možemo dobiti različite valne oblike





PID upravljač

Spori proces i upravljanje

- Izravno digitalno upravljanje

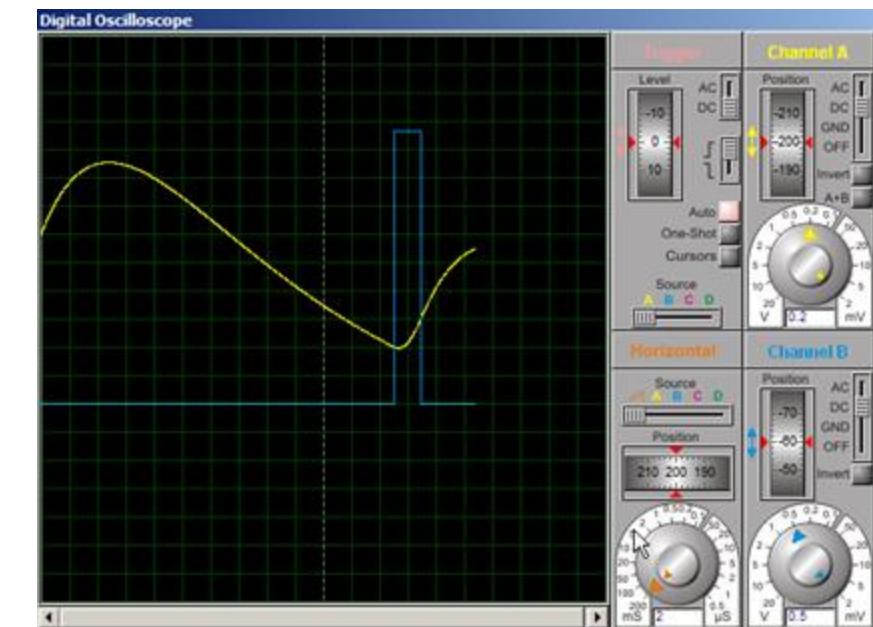
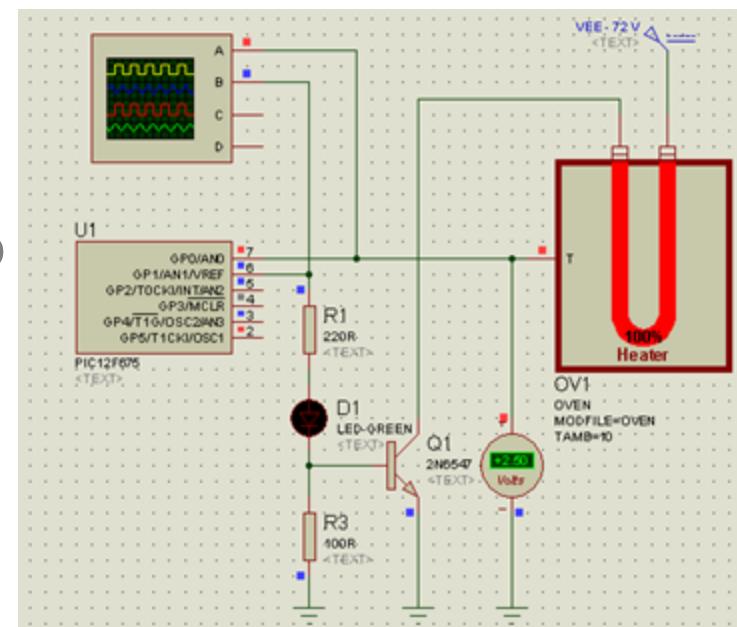
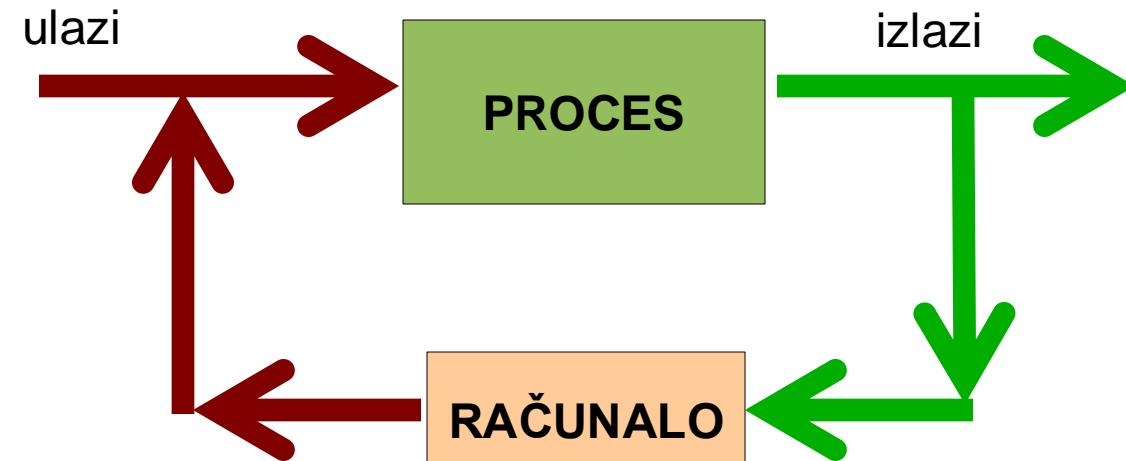
- Primjer 1: peć

- Senzor ne reagira trenutno na promjenu mjerene veličine

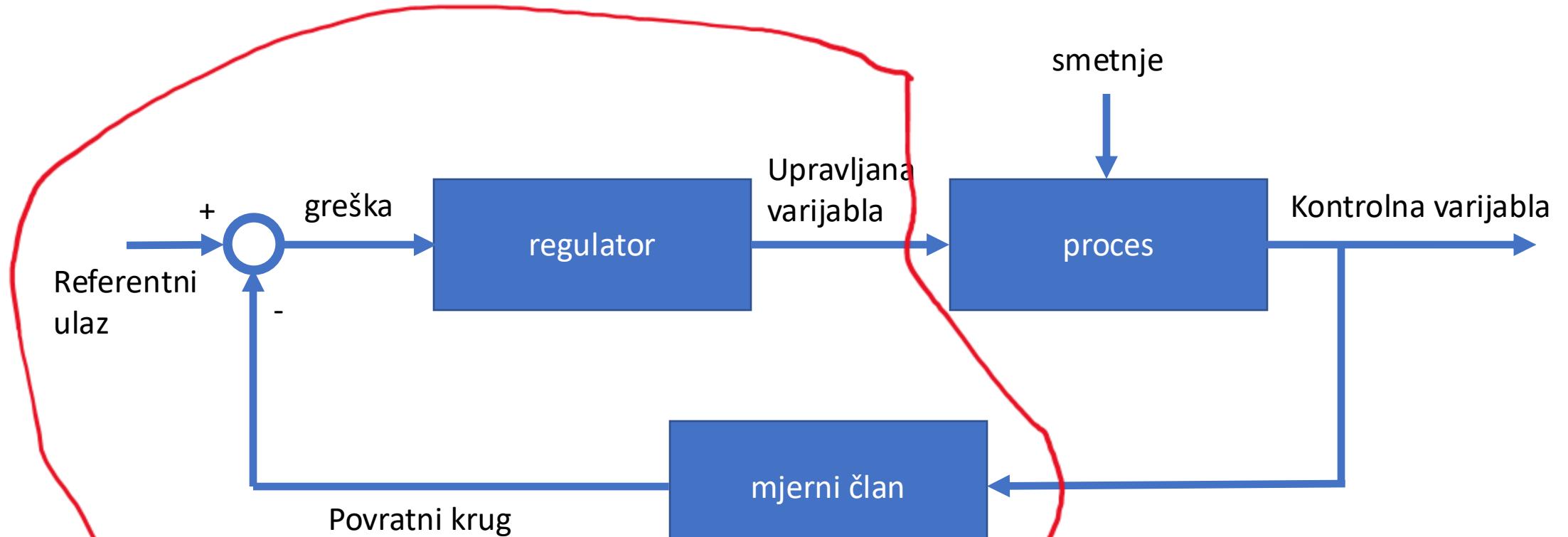
- unosi dodatno kašnjenje

- Proces ne reagira trenutno na ulaz

- npr. toplinski procesi su obično vrlo spori



Upravljanje u zatvorenom krugu

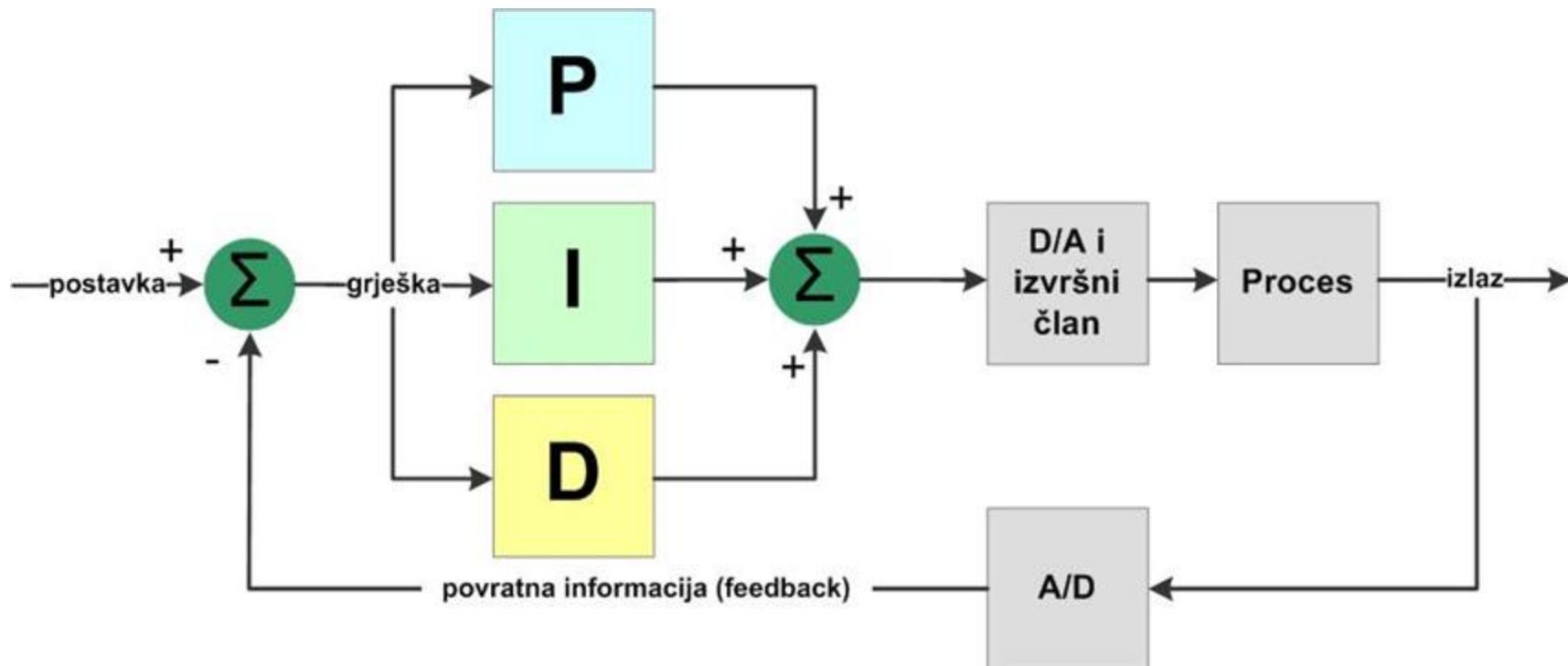


Računalo?

Primjer 2: tempomat u vozilu?

PID regulator

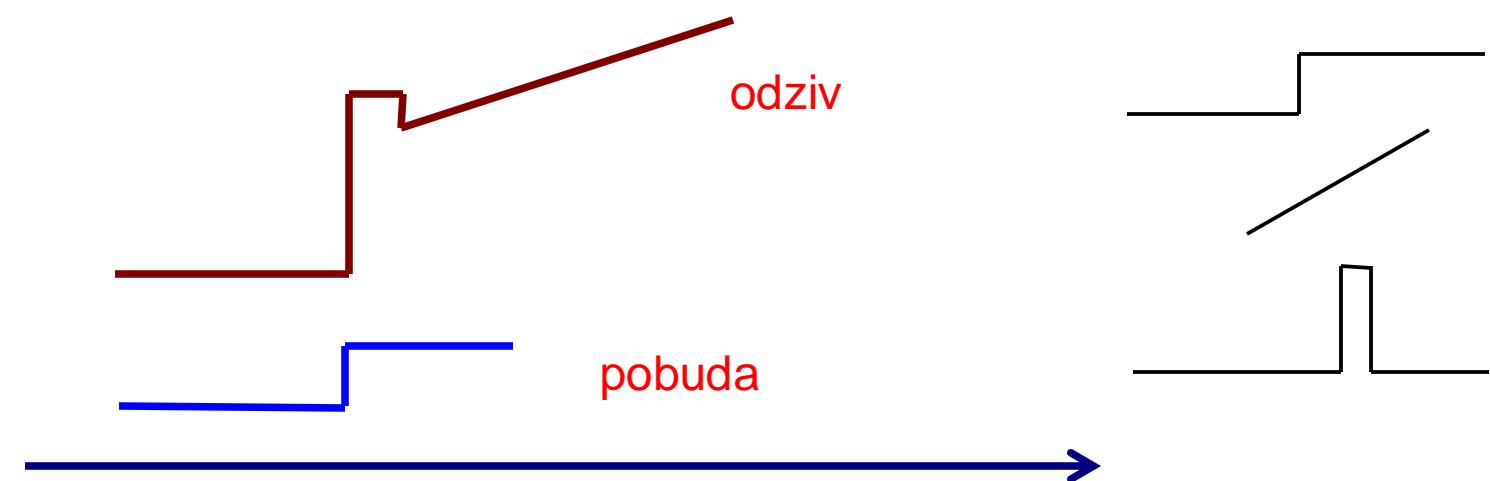
- Ulaz u regulator je signal pogreške - **razlika između postavljene (željene) i izmjerene vrijednosti** veličine koju reguliramo



PID regulator

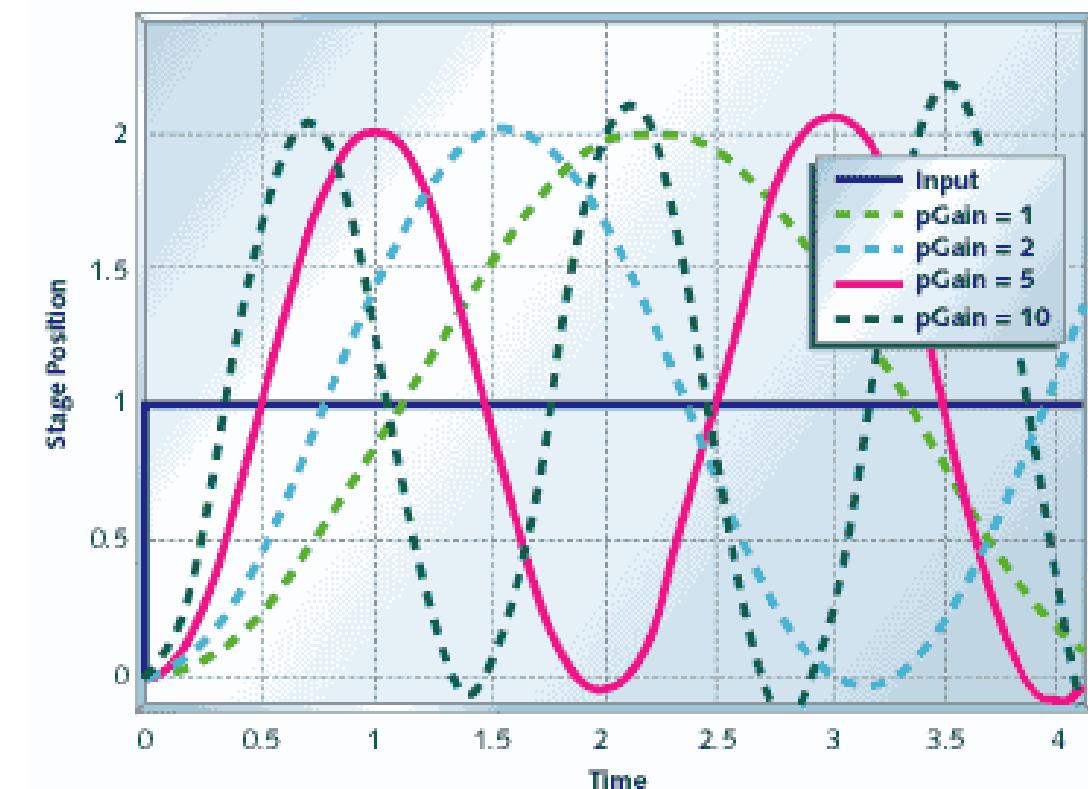
- Proporcionalno, Integracijsko i Derivacijsko djelovanje
- Regulator može imati samo jednu ili kombinaciju komponenata:

- P
- I
- PI
- PD
- PID



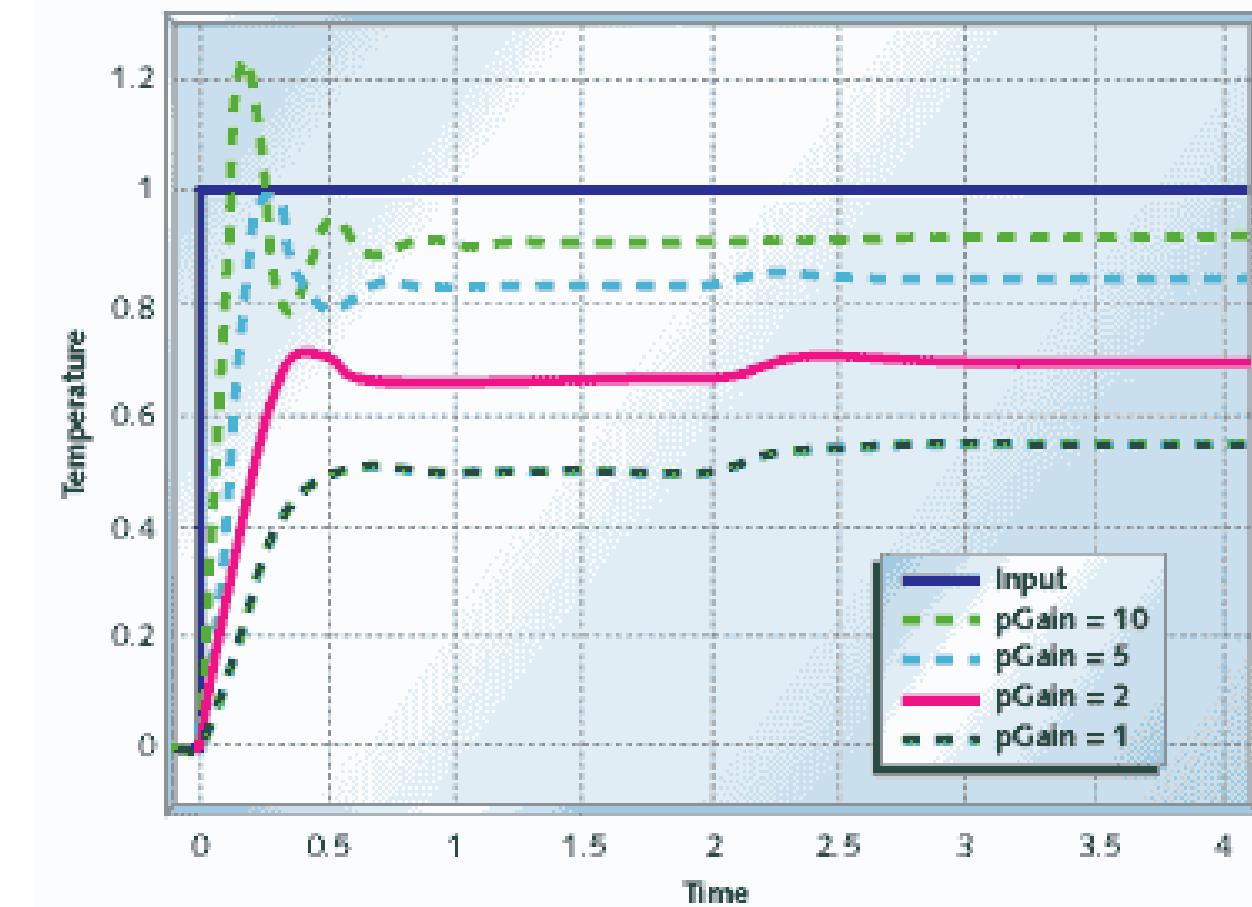
Proporcionalno djelovanje

- Utječe na brzinu odziva sustava
- Signal greške pomnožen konstantom:
 $P_{dio} = \text{grješka} * P_{konstanta}(pGain)$
- proporcionalno djelovanje ispravlja trenutnu pogrešku
- brzi sustav (npr. naša simulirana peć) reguliran P regulatorom oscilira oko željene temperature



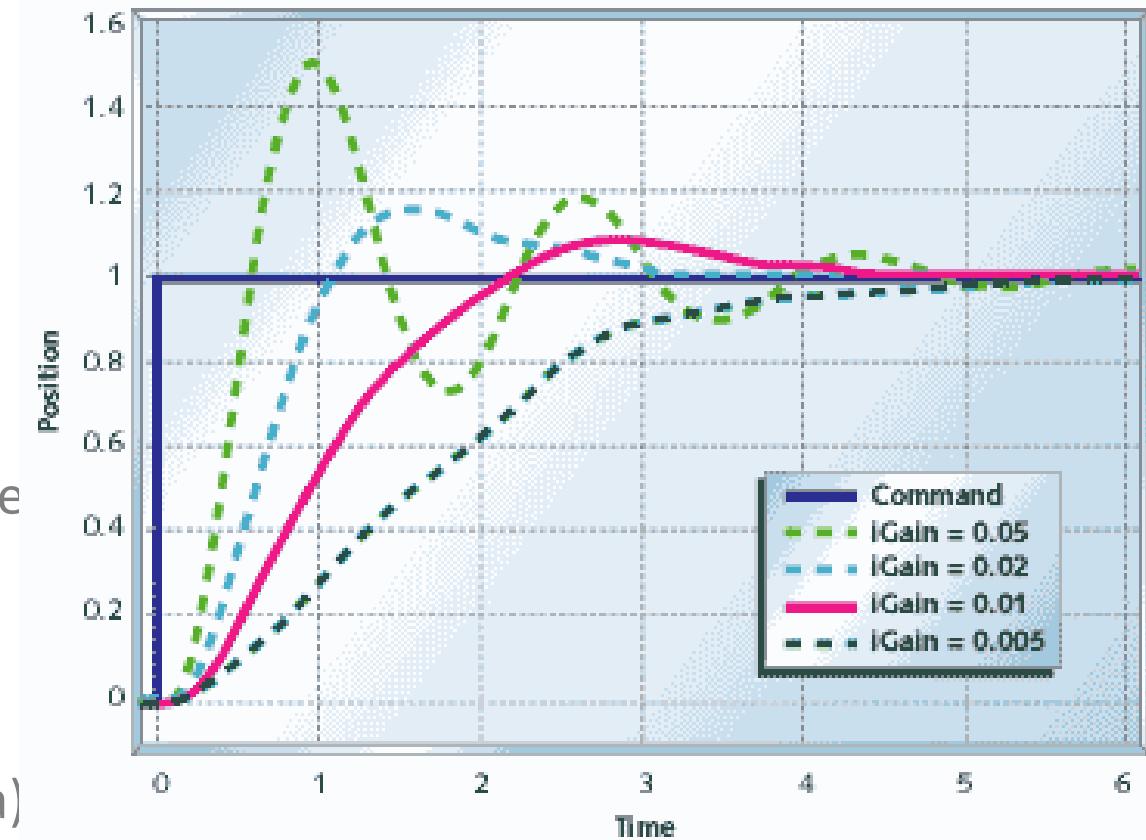
Proporcionalno djelovanje

- Spori sustav reguliran P regulatorom ne dostiže postavljenu vrijednost
- Povećanje konstante pomaže, ali uzrokuje i nadvišenje (overshoot)



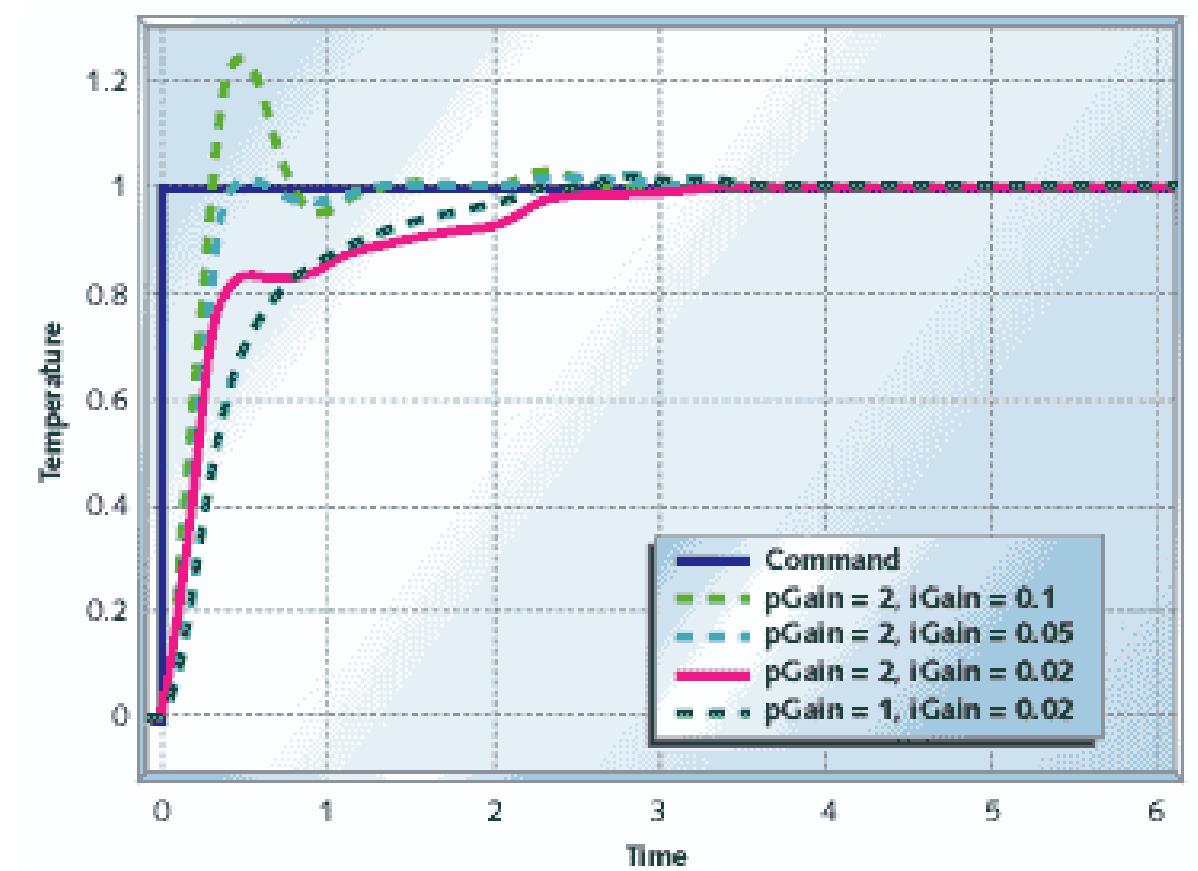
Integracijsko djelovanje

- Utječe na pogrešku u statičkom stanju
- Suma svih prethodnih pogrešaka
 - $I_suma += \text{grješka}$
 - $I_dio = I_suma * I_konstanta(iGain)$
- Donosi informaciju o prošlosti sustava
 - integracijsko djelovanje ispravlja pogrešku koja se dogodila prije
- Regulator pamti prethodno stanje sustava
 - dugotrajno odstupanje nije moguće (kao u prethodnom primjeru proporcionalnog djelovanja)
- Prijelazna pojava traje dulje nego kod P djelovanja, ali je stacionarno stanje točno



PI djelovanje

- Kombinacija proporcionalnog i integracijskog djelovanja
- Sustav dolazi u **točno** stacionarno stanje **brže** nego kod I djelovanja



Derivativno djelovanje

- Djeluje na kvalitetu prijelaznog procesa
- Koristi prošlo stanje sustava:

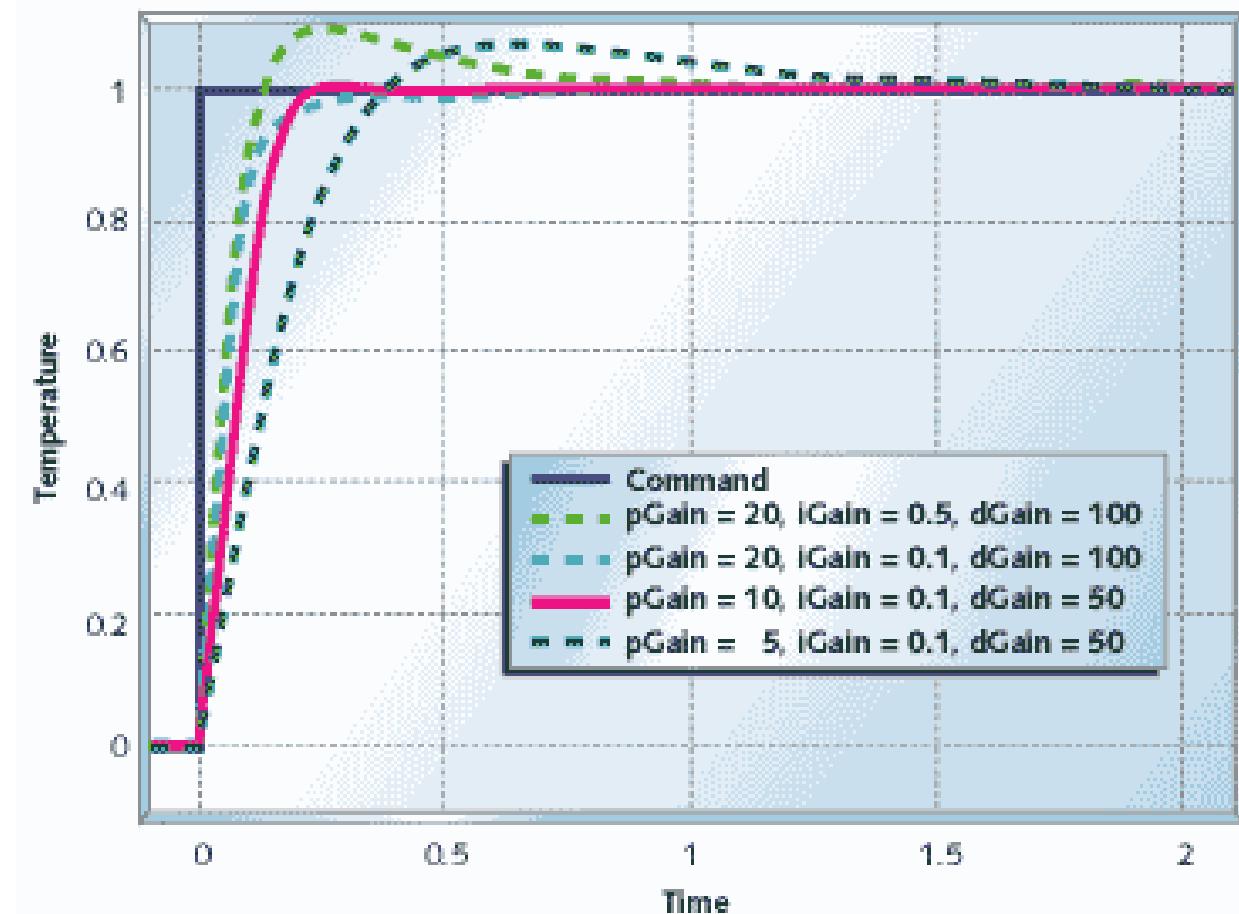
$$D_{\text{dio}} = (grješka - D_{\text{stanje}}) * D_{\text{konstanta}}(dGain)$$

$$D_{\text{stanje}} = grješka$$

- ... da bi se procijenila brzina promjene (promjena veličine/vrijeme) i time predvidjela nova vrijednost regulirane veličine

PID djelovanje

- Uz podešene parametre, kombiniranim PID djelovanjem sustav postiže željenu vrijednost brzo i bez nadvišenja (*overshoota*)
- D djelovanje skraćuje prelazno vrijeme smanjuje nadvišenje (*overshoot*)



PID algoritam

- Algoritam uključuje sva tri proračuna:

```
P_dio = grješka * P_konstanta(pGain)
```

```
I_suma += grješka
```

```
I_dio = I_suma * I_konstanta(iGain)
```

```
D_dio = (grješka - D_stanje) * D_konstanta(dGain)
```

```
D_stanje = grješka
```

- Izlaz:

```
izlaz = P_dio + I_dio + D_dio
```

- ... ukupno 4 operacije zbrajanja i 3 množenja

PID algoritam i vrijeme

- Ciklus upravljanja korištenjem mikroračunala uključuje:
 - A/D pretvorbu, formatiranje rezultata
 - računanje
 - deformatiranje i D/A pretvorbu
- Npr. za Z80 na 2MHz – 12 ms
 - dovoljno brzo za peć? A za Boeing?
- Na što sve treba paziti?
 - Vrijeme izvođenja pojedine operacije?
 - Vrijeme izvođenja čitavog ciklusa?
 - Rezolucija, točnost, ...



Sveprisutno računarstvo

4. Vrijeme

- Uloga vremena u računalnom sustavu
- Signal vremenskog vođenja
- Vremenski sklopovi
- Rad u stvarnom vremenu

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.

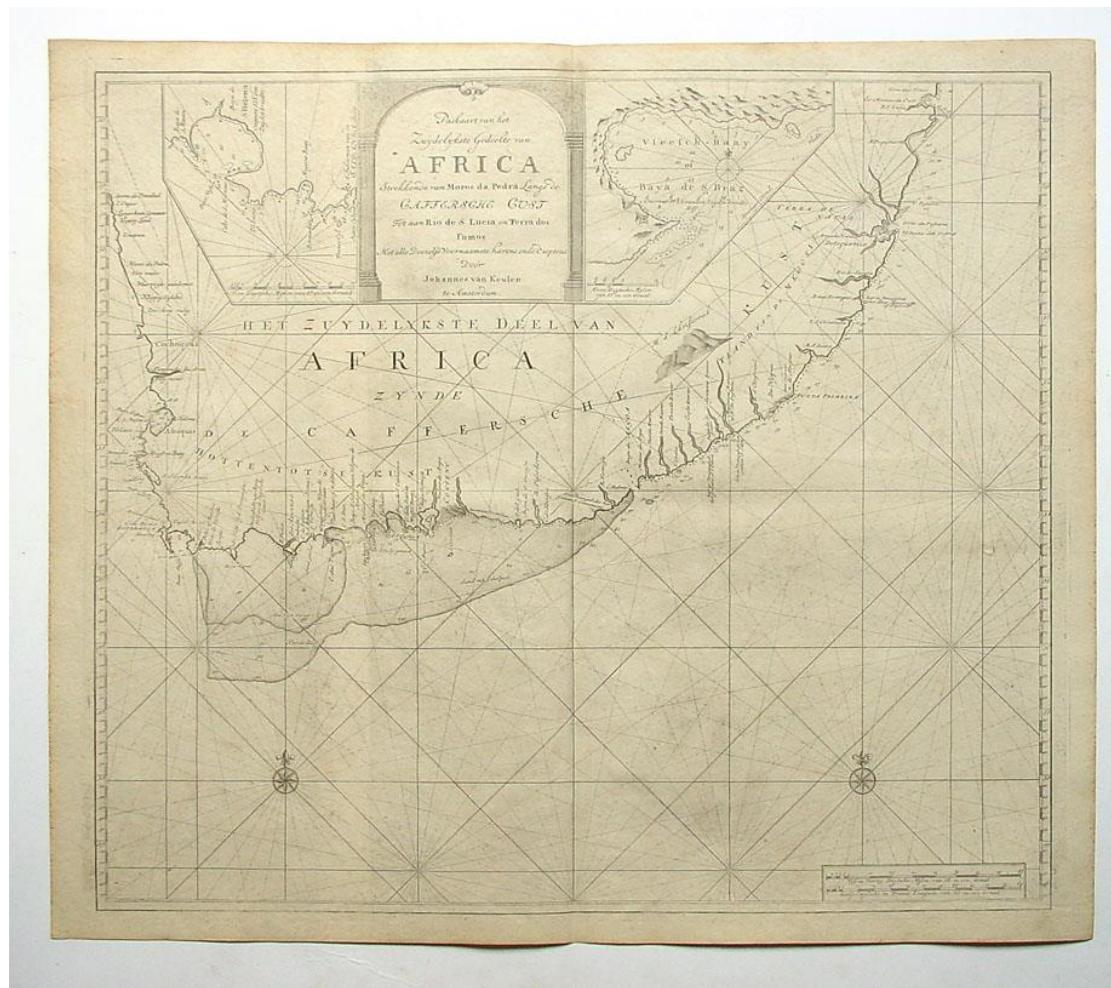
NC: Only noncommercial use of your work is permitted.

SA: Adaptations must be shared under the same terms.



Uloga vremena u računalnom sistemu

Značenje mjerenja vremena



Vrijeme u (sveprisutnom) računalnom sustavu

- Signal vremenskog vođenja – sinkronizacija rada komponenti sustava
- Mjerenje protoka vremena u sustavu (i okolini)
- Obavljanje zadataka u ograničenom vremenu, diktiranom od okoline



Signal vremenskog vođenja

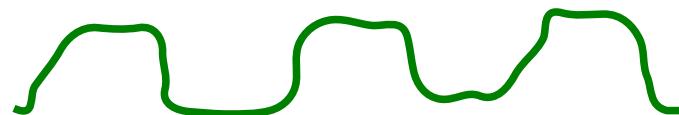
Takt

- **Signal takta (vremenskog vođenja)**

- Koristi se za sinkroniziranje rada sklopova
 - Izvođenje operacija točno određenim redoslijedom

- Interni signal takta ne mora odgovarati vanjskom

- Takt se prilagođava potrebi
 - Frekvencija se množi, dijeli
 - Mijenja se odnos aktivne i neaktivne poluperiode (popunjenoš)
 - Mijenja se valni oblik (najčešće ipak pravokutni signal)



- Moguće su i složene strukture bez signala takta

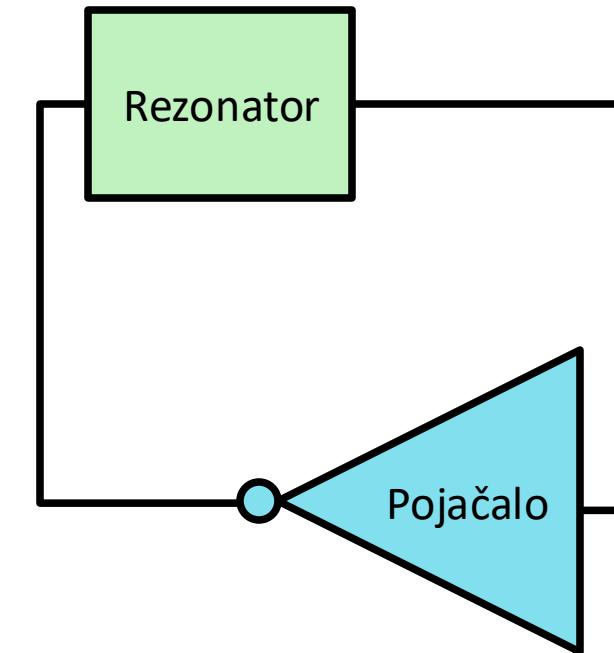
- Procesorske jezgre, veze između njih, ...

- Sinkronizacija taktom prevladava

Osnovni sklopovi

- Generator signala takta

- Stvara signal takta (vremenskog vođenja)
- Osnovni dijelovi oscilatora
 - Rezonator
 - Pojačalo



- Sklopovi za razvođenje signala takta

- Problem kašnjenja signala po linijama

Rezonator

- Sklop koji može *titrati* ako mu se dovodi energija
- U kombinaciji s pojačalom tvori oscilator
 - Pojačalo ostvaruje povratnu vezu kako bi se održale oscilacije
 - Pojam *faktora dobrote (quality factor, Q-factor)*
 - Omjer pohranjene i izgubljene energije u svakom ciklusu
- Mogući su analogni i digitalni oscilatori
 - Analogni
 - Fizikalni princip njihala
 - Energija pohranjena u dva krajnja stanja njihala
 - Digitalni
 - Oscilator mijenja stanje između '0' i '1'



Rezonatori i oscilatori

- Analogni

- (R)LC
- RC
- Keramički rezonator
- Kristal
- Atomski rezonator (rubidij, cezij)

- Digitalni

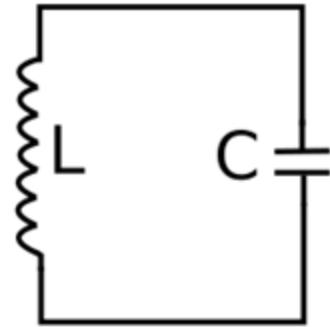
- XOR
- Prstenasti oscilator

- Oscilatori (kao komponente)

- Stabilizirani elektronički oscilator
- PLL (*Phase-locked loop*)

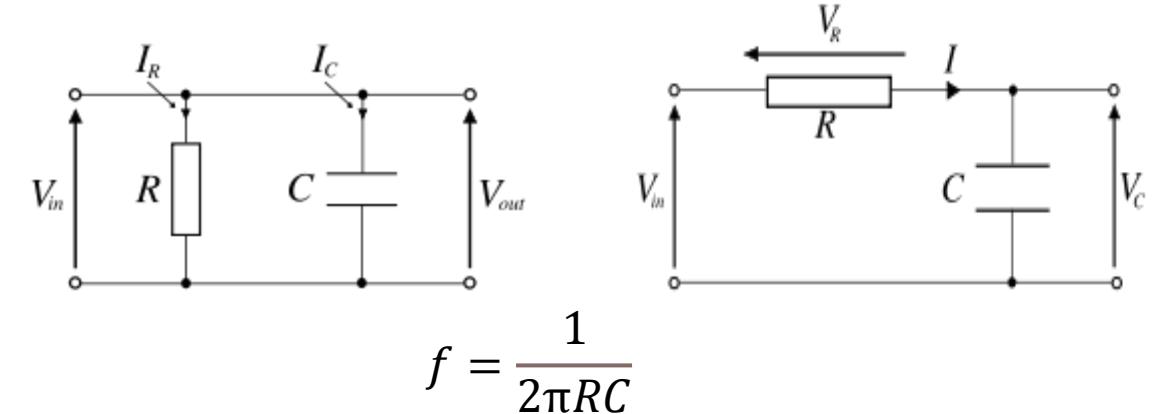


LC i RC skloovi



$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- Jednostavan sklop, sastoji se od zavojnice i kondenzatora
- Energija u dva krajnja stanja
 - Električno polje u kondenzatoru
 - Magnetsko polje u zavojnici



$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

- Sastoji se od otpora R i kondenzatora C
- Energija pohranjena
 - Električno polje u kondenzatoru
 - Struja/napon na otporniku (ovisno o izvedbi)
 - Sinusoidni i ne-sinusoidni valni oblici



Keramički i kvarcni rezonatori

- Piezo-električni rezonatori

- Nekih materijali uslijed mehaničkog pritiska proizvode električni naboј
 - Kristali, neke vrste keramike, kosti, ...

- Frekvencijske karakteristike ovise o mehaničkim

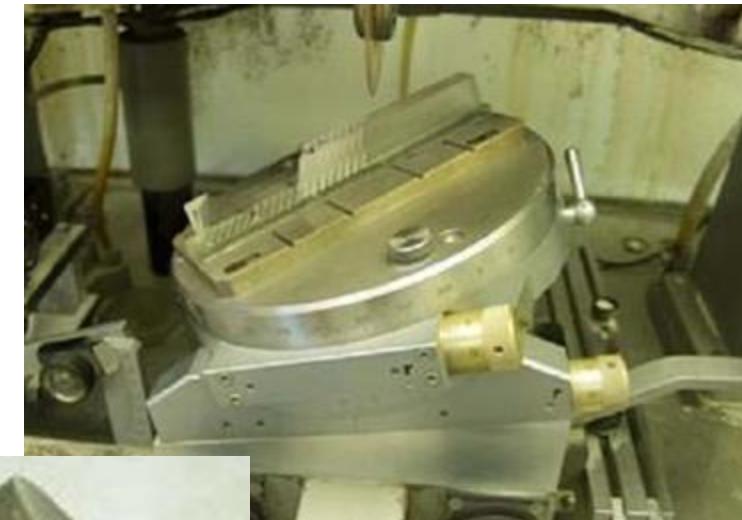
- Rezonantna frekvencija se može odrediti načinom rezanja kristala
 - Ovisi o veličini, obliku, elastičnosti, temperaturi i starenju
 - Kvarc
 - Stabilne karakteristike za većinu primjena

Kristalni rezonatori

$$f \approx \frac{1}{debljina}$$

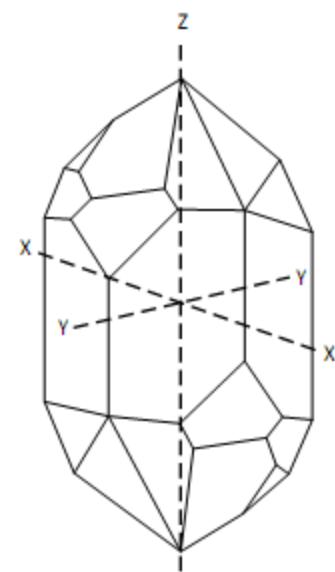
- Kristal kvarca

- Čišćenje
- Rezanje po kristalnim osima
- Oblikovanje
- Starenje
- Zatvaranje u kućište
- Testiranje



- Frekvencija

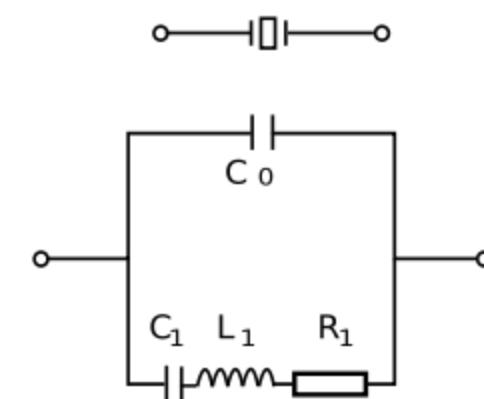
$$f \approx \frac{1}{debljina}$$





Piezoelektrična svojstva kristala

- Dovođenje napona
 - Kristal se izobliči
- Uklanjanje napona
 - Kristal se vraća u prvobitno stanje
 - Stvara električno polje – napon
- Ponašanje kao RLC-krug vrlo precizne rezonantne frekvencije
- Kristal ima serijsku i paralelnu rezonanciju
 - Može raditi u više načina rada
 - Primjenjiv za razne obitelji sklopova

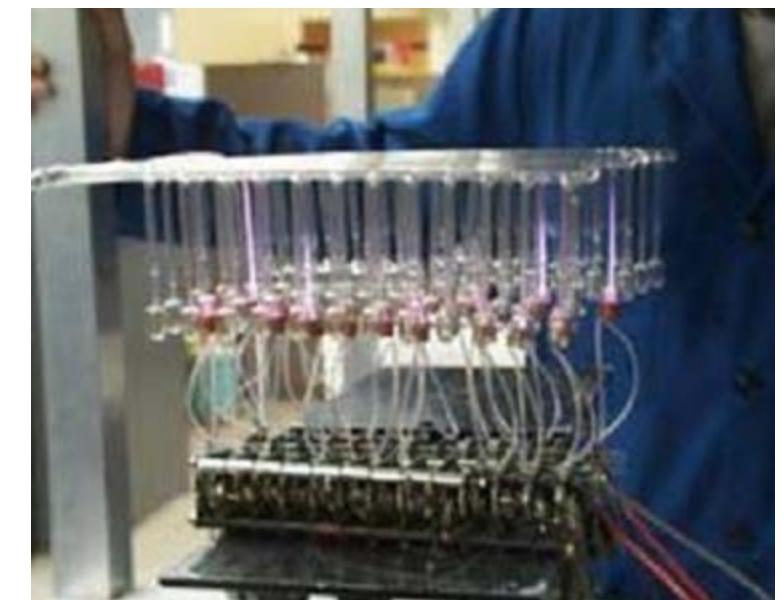


Izvor: Wikipedia



Atomski rezonatori

- Visoka stabilnost frekvencije
- Atom prelazi iz stanja više u stanje niže energije
- Svojstvo atoma, ne materijala
 - Fizikalna konstanta
- Problem
 - Atomi nisu slobodni
 - Sudari, električna i magnetna polja
 - Atomi se kreću
 - Toplinski šum
 - Promatranjem atoma utječemo na njihovo stanje

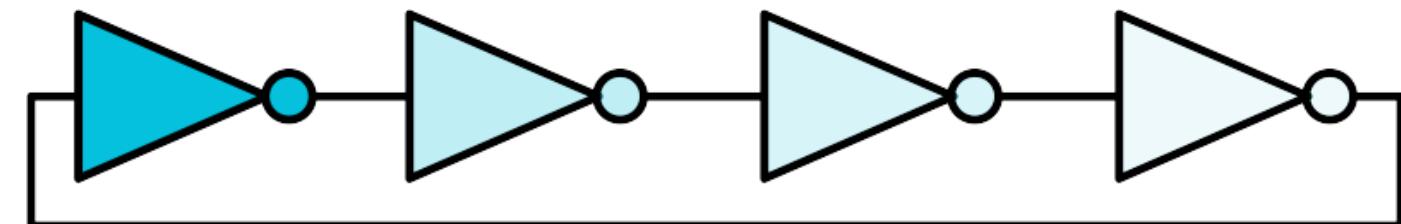


Izvor: Frequency Electronics, 2004.



Digitalni rezonatori

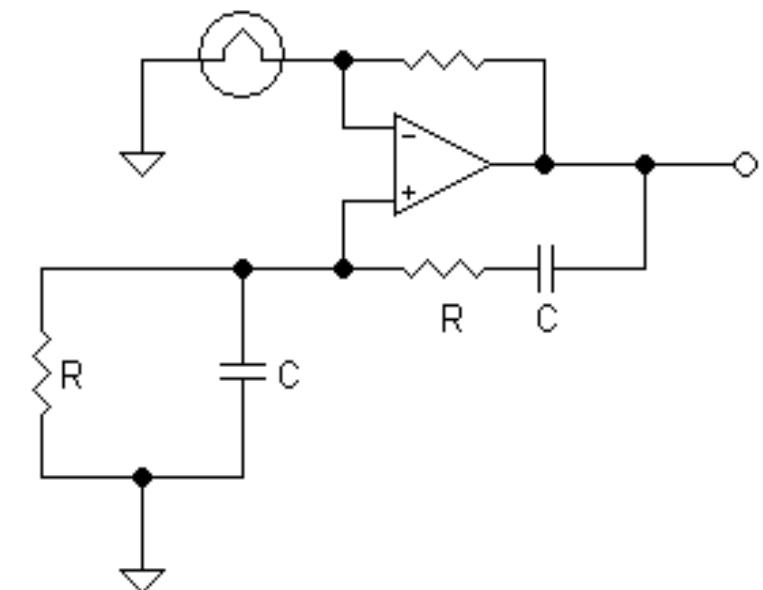
- XOR sklop
- Prstenasti rezonator (oscilator)
 - Niz NOT sklopova spojenih u prsten (paran broj NOT)
 - Svaki sklop se sastoji od n- ili p- MOSFET tranzistora
 - Promjena stanja traje neko vrijeme (kapacitet MOSFET-a)
 - Efekt osciliranja - zbog kašnjenja u propagaciji signala
 - Potrebno dodatno pojačalo
 - Osnovni sklop za testiranje karakteristika poluvodičkog procesa





Izvedbe oscilatora

- Najjednostavniji oscilatori – RC
- RC kao dio mosta
- Najčešće izvedbe sinusoidnih RC oscilatora
 - Wien-ov most
 - "Twin-T"
- Wienov most :
 - 3 otpornika, 2 kapaciteta i operacijsko pojačalo



Izvor: Wikipedia



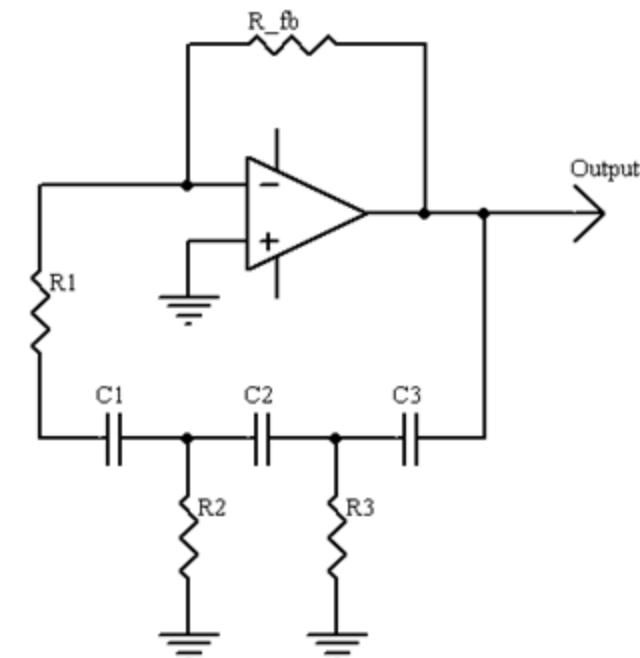
RC - oscilatori

- "Twin-T" oscilator

- Dva "T"-RC (R-C-R) kruga spojena paralelno
- Zajedno tvore most koji se može ugoditi na željenu frekvenciju oscilacije

- Oscilator s faznim pomakom

- Invertirajuće pojačalo i povratni filter za pomak faze za 180° na frekvenciji osciliranja



Izvor: Wikipedia



RC - oscilatori

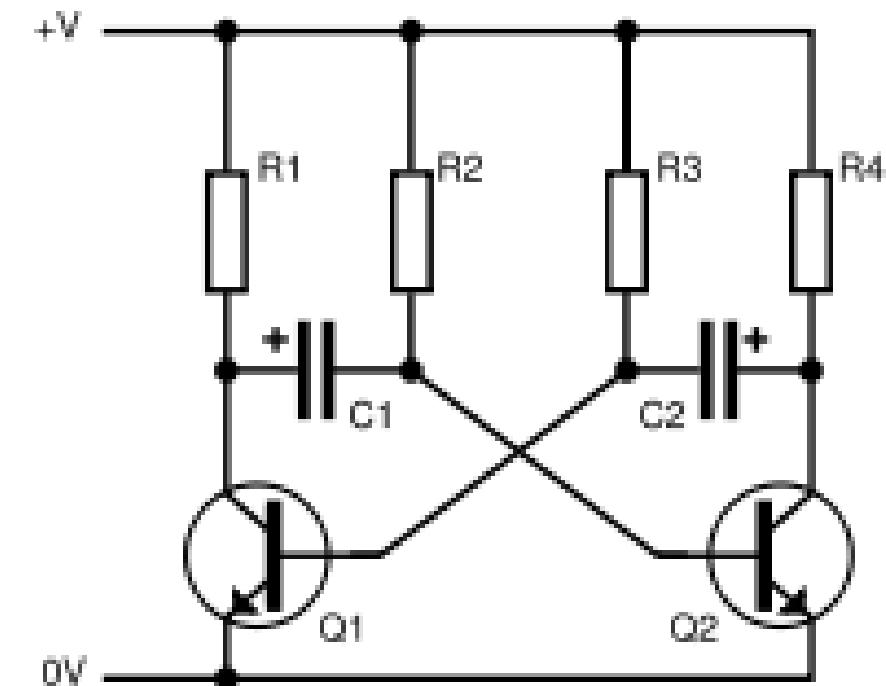
- Ne-sinusoidni valni oblik

- Najčešće kvadratni valni oblik
- Multivibratorski sklopovi

- Multivibratorski sklopovi

- Astabil

 - Nema stabilnog stanja
 - Sklop oscilira između dva stanja



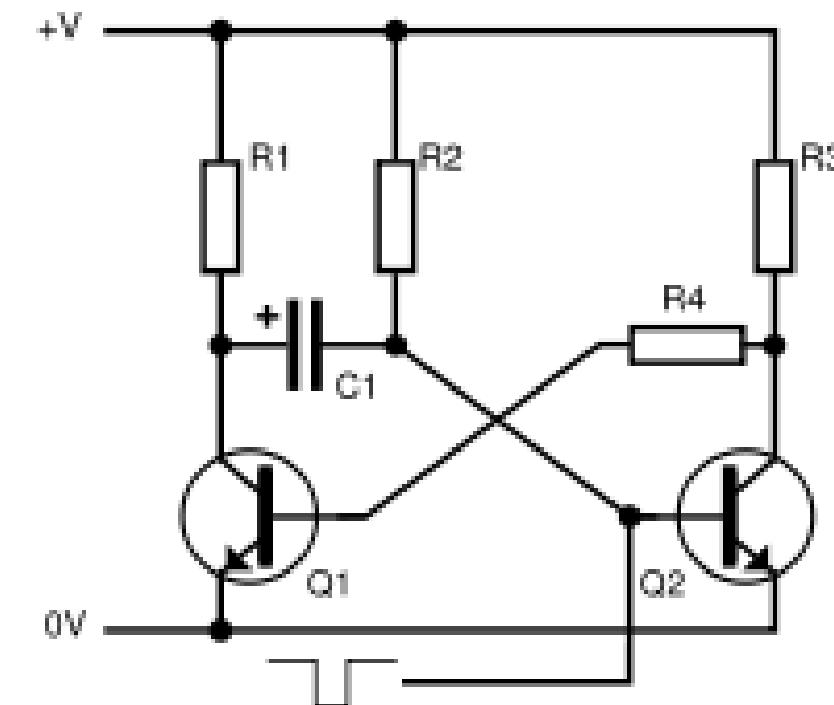
Izvor: Wikipedia



Multivibratorski sklopovi

▪ Monostabil

- Jedno stabilno stanje
- Određeni vremenski period je u nestabilnom stanju, a zatim prelazi u stabilno stanje (*one shot circuit*)
- Pogodan za stvaranje fiksnog vremenskog perioda kao reakcije na vanjski događaj



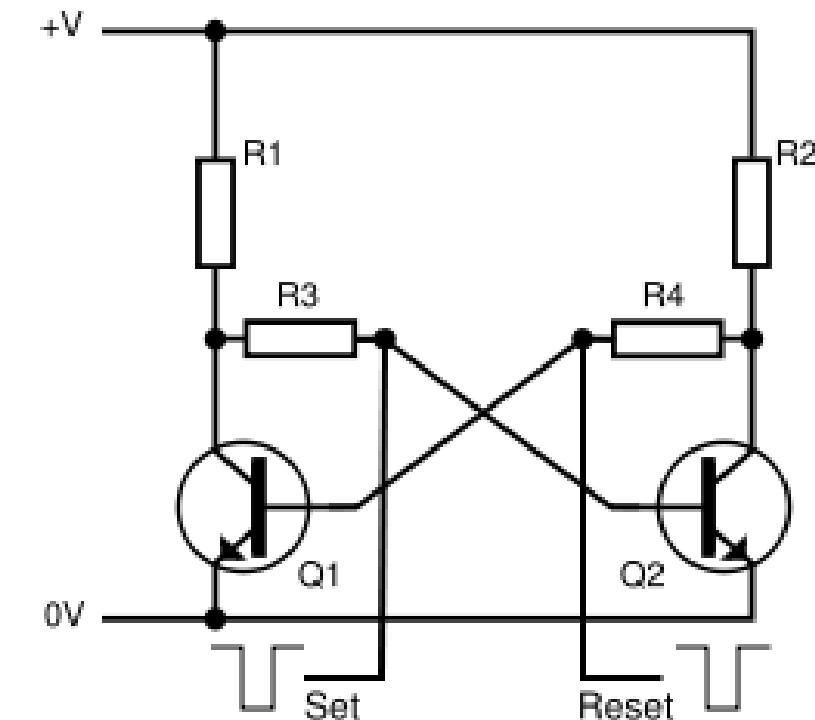
Izvor: Wikipedia



Multivibratorski sklopovi

▪ Bistabil

- Dva stabilna stanja
- Sklop je u jednom od stanja neodređeno vrijeme
- Može se prebacivati iz jednog stanja u drugo pomoću nekog vanjskog utjecaja, okidača
- Koristi se i kao memorijска ћelija

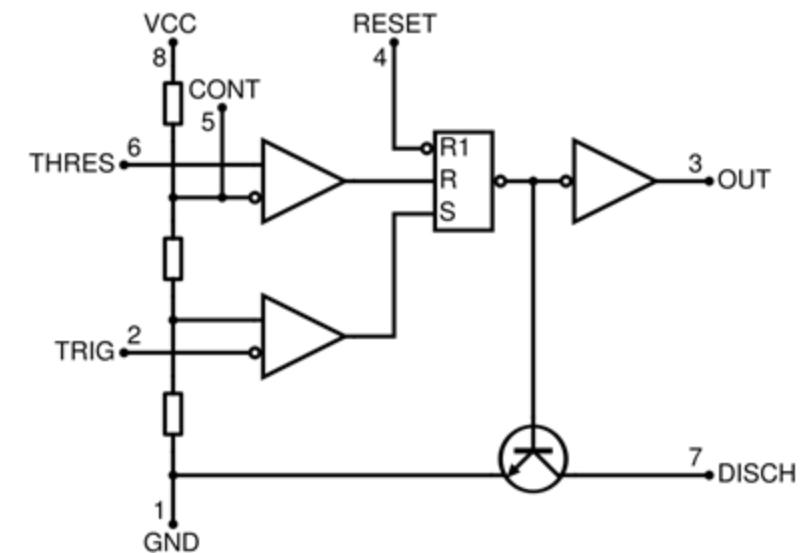
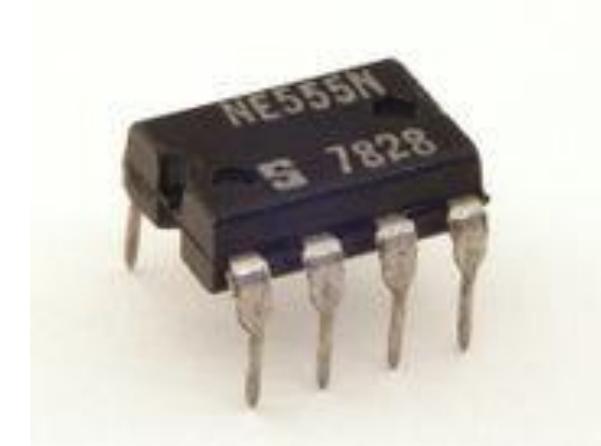


Izvor: Wikipedia



Integrirane verzije

- Npr: NE 555 timer
- Tri načina rada
 - Astabilni
 - Monostabilni
 - Bistabilni

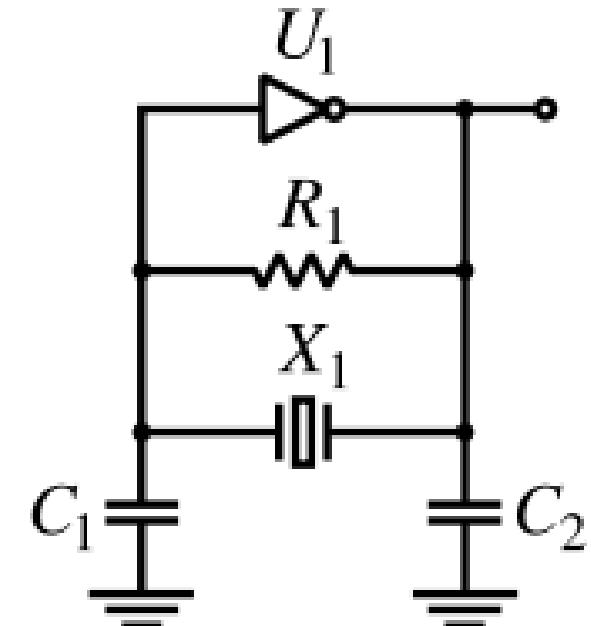
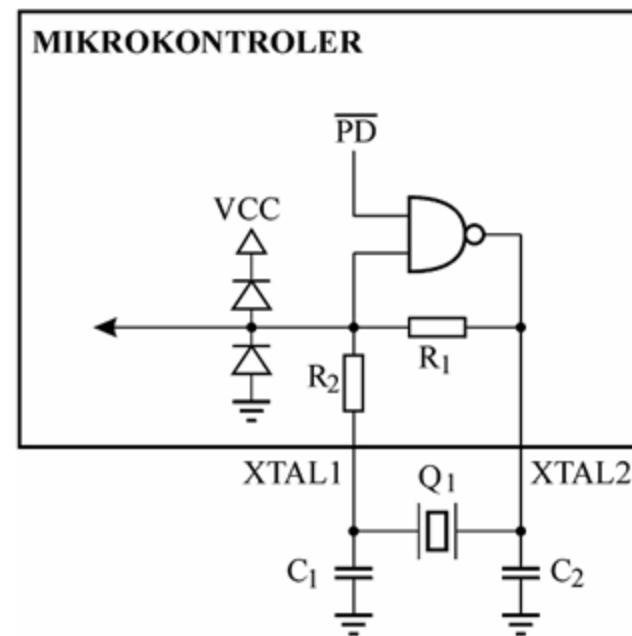




Oscilator s kristalom

- Pierceov oscilator
 - Kristal kao rezonantni sklop
- Podsjetimo se URS-a? ☺

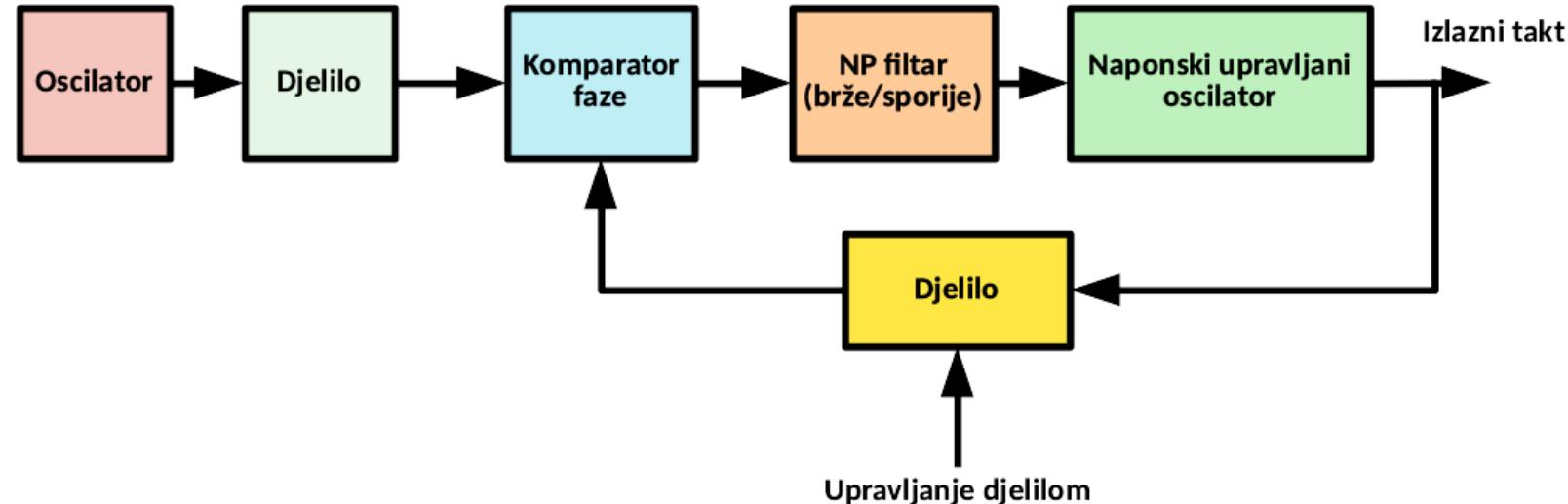
Oscilator mikrokontrolera 80C51





Stabilizirani elektronički oscilator

- Koristi rezonator (najčešće kristal) za stabilizaciju frekvencije
- PLL (Phase-lock loop) sklop
 - Sinkronizira vlastitu frekvenciju titranja s referentnom
 - Moguće izvesti množenje ili dijeljenje frekvencije
 - U osnovi isti princip i u atomskim oscilatorima



Usporedba oscilatora

- Zasnovani na mehaničkim rezonatorima

- Kristali i keramički rezonatori
- Visoka inicijalna preciznost
- Umjereni mali temperaturni koeficijent
- Osjetljivi na promjenu frekvencije (mehanička oštećenja)



- Zasnovani na električnim spojevima s faznim pomakom

- RC – oscilator
- Niska cijena
- Preciznost ovisi o temperaturi i napajanju
- Varijacije nominalne izlazne frekvencije 5% do 50%

Utjecaj okoline

- Okolina bitna za odabir oscilatora
 - Elektromagnetsko zračenje
 - Vibracije, udarci
 - Vлага, temperatura
- Utjecaji
 - Treperenje faze signala
 - Kristali ispoljavaju male pomake frekvencije
 - Promjena izlazne frekvencije
 - Starenje
 - U težim slučajevima prekid rada
- Manji utjecaj okoline ako se koriste integrirane komponente



Usporedba oscilatora

Oscilator takta	Preciznost	Prednosti	Mane
Kristal	Srednja do velika	Niska cijena	Osjetljivost na EM zračenje, vibracije i vlagu
Kristal oscilator modul	Srednja do velika	Neosjetljivost na EM zračenje i vlagu, nepotrebne dodatne komponente	Visoka cijena, visoka potrošnja električne energije, osjetljivost na vibracije, velikih dimenzija
Keramički rezonator	Srednja	Niža cijena	Osjetljivost na EM zračenje, vibracije i vlagu
Ugrađeni silicijski oscilator	Mala do srednja	Neosjetljivost na EM zračenje i vlagu, nepotrebne dodatne komponente, male dimenzije	Temperaturna osjetljivost je generalno lošija nego kod kristala i kermamičkih oscilatora, visoka potrošnja električne energije
RC oscilator	Mala	Najniža cijena	Obično osjetljivi na EM zračenje, vlagu i temperaturu, velika potrošnja električne energije

Preciznost

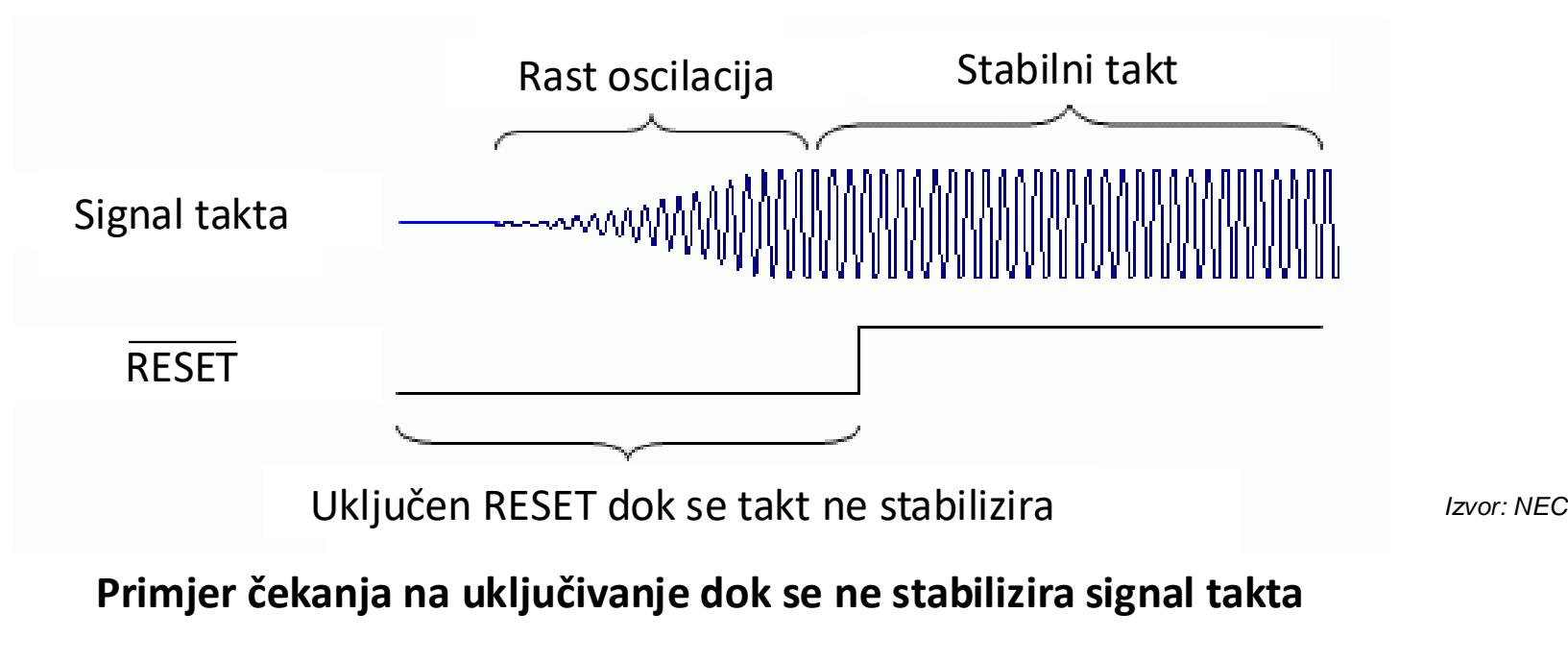
Oscilator takta	Točnost	Starenje (10 godina)	Potrebna snaga	Težina
Kristal (XO)	1E-5 do 1E-4	10-20 ppm	20 µW	20 g
Rubidij (Rb, RbXO)	1E-9	5E-10 do 5E-9	6-12 W	1,5 – 2,5kg
Cezijski (Cs)	1E-12 do 1E-12	1E-12 do 1E-11	25-40 W	10 – 20 kg

- Kristalni oscilatori
 - Cijena ispod 5 US\$
- Rubidijski i cezijski standardni oscilatori
 - Cijena veća od 40.000 US\$

Pokretanje oscilatora

- Pokretanje oscilatora – uspostavljanje titranja rezonatora

- Potrebna određena količina šuma koja zatitra rezonator (kristal) – šiljak napona pri uključivanju napajanja



- Buđenje iz SLEEP-a – nema početnog skoka napona

U praksi...

▪ Microchip PIC

- Odabir više vrsta oscilatora, ovisno o uporabi sustava

- Brzina
- Potrošnja
- Utrošak pinova

▪ Vrste oscilatora:

- HS
- XT
- LP
- RC
- IntRC
- ER



▪ ESP32

▪ Vanjski:

- 40 Mhz kristalni oscilator
- 10 ppm preciznost

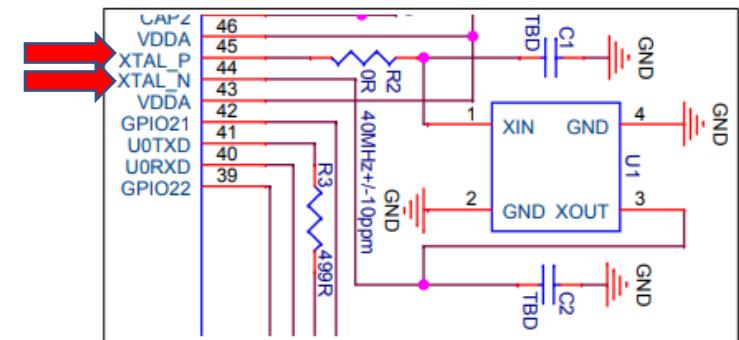


Figure 5: ESP32 Crystal Oscillator

▪ RTC:

- 32,768kHz kristal ili oscilator

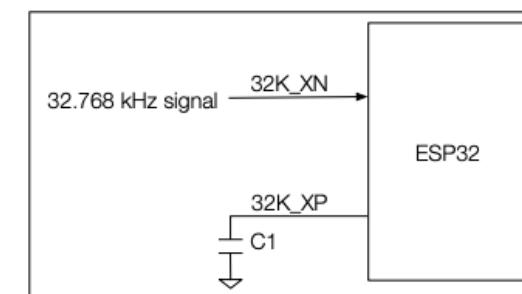


Figure 7: Schematic of External Oscillator

Interni RTC oscilator – greška f cca. 5% !!!



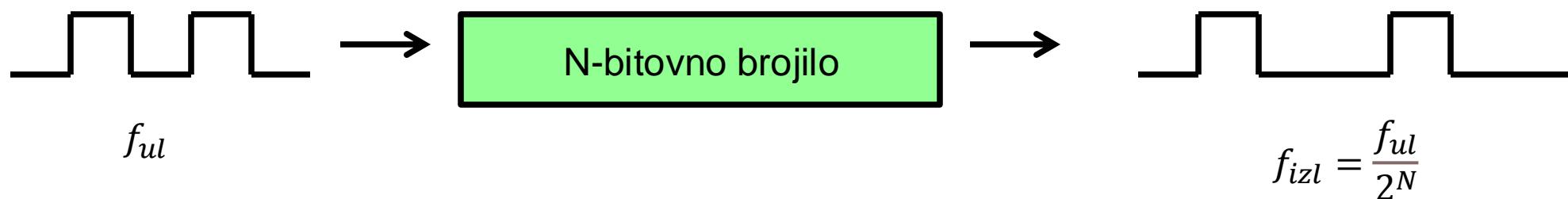
Vremenski skloovi

Vremenski sklopovi

- Sklopovi mikrokontrolera namijenjeni mjerenu vremena ili generiranju vremenski određenih signala
- Nekoliko primjera
 - Brojilo (*counter*)
 - Vremenski sklopovi (*timer*)
 - Sklopovi za zapis trenutnog vremena i usporedbu vremena (*capture & compare*)
 - Stvarno vrijeme (*real-time clock*)
 - *Pulsno-širinski modulator (pulse-width modulator)*
 - ...

Brojilo

- U osnovi – slijedni logički sklop od N bistabila
- Broji u rasponu $[0, 2^N-1]$ – prema gore ili dolje
- Ulaz
 - Pravokutni signal frekvencije f_{ul}
- Izlaz
 - Pravokutni signal frekvencije $f_{ul} / 2^N$



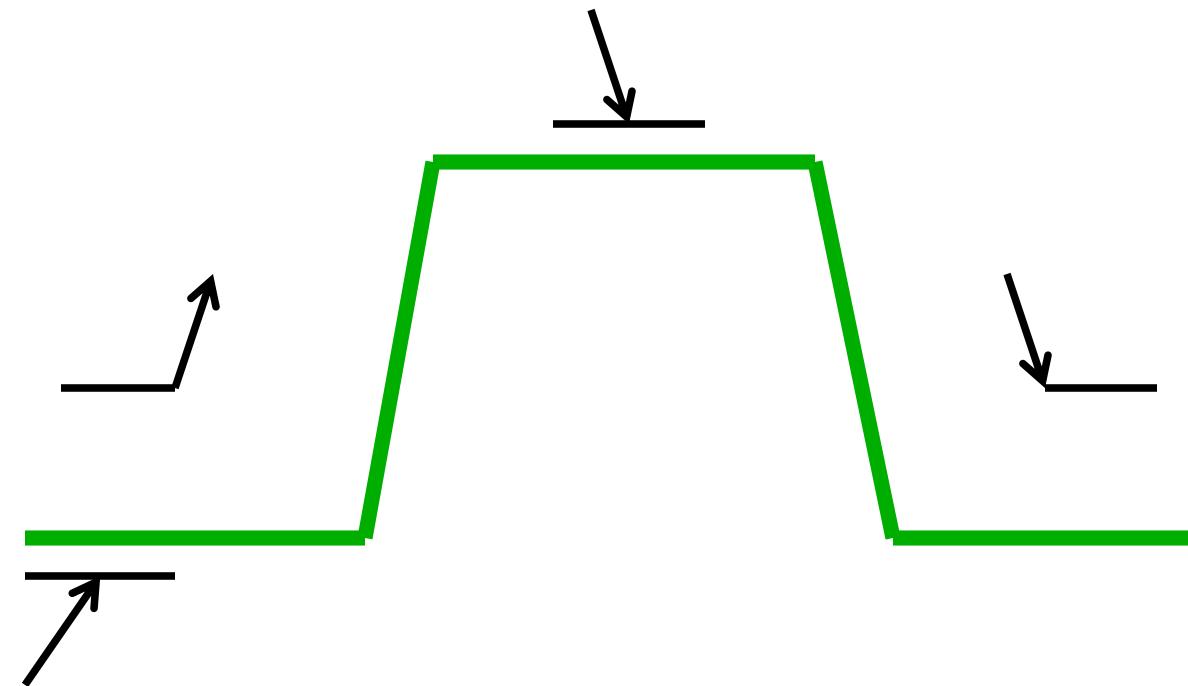
Brojilo

- Osnovna funkcija – brojenje
- Dodatni efekt – dijeljenje ulazne frekvencije
- Brojilo = dijelilo frekvencije
 - Želimo podijeliti frekvenciju s 5
 - Nemamo brojilo koje broji do 5
 - Rješenje
 - Uzmemo 3-bitno brojilo, broji u intervalu [0, 7]
 - U njega upišemo konstantu 4 i postavimo brojilo da broji prema dolje
 - 4, 3, 2, 1, 0
 - Kad dođe do 0 ponovno postavimo konstantu 4
 - Potrebno: brojilo, registar (konstanta) i nešto logike

Što brojiti?

- Pravokutni signal

- Razina (visoka ili niska)
- Uzlazni brid
- Silazni brid
- Svaki n-ti ulazni/silazni brid
- ...



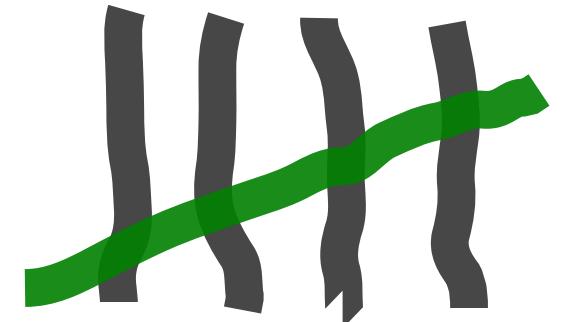
Brojilo kao vremenski sklop

- Kontroliramo frekvenciju koju dovodimo na ulaz brojila
 - Poznata frekvencija = poznato trajanje perioda
 - Imamo sklop kojim možemo mjeriti vrijeme
- Osnova vremenskih sklopova (*timer*)
- Dodatna kontrolna logika
 - Generiranje prekida na istek vremena (brojilo = 0)
 - Upravljanje radom

Dodatne mogućnosti

- **Upravljanje izvorom ulaznog signala u brojilo**

- Unutarnji izvor – takt
- Vanjski izvor – proizvoljni izvor impulsa (oscilator, senzor)
- Ulančavanje više brojila (povećanje raspona)
- Odabir pred-dijelila za smanjenje frekvencije



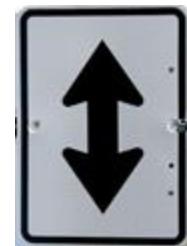
- **Upravljanje *okidanjem* brojila**

- Brojenje razine, brida, ...



- **Upravljanje radom**

- Zaporni sklop (*gated-timer*)
 - Moguća kontrola rada (izvana i iznutra)
 - Ulaz koji određuje radi li *timer* ili ne
 - Štoperica (stani-kreni)
- Određivanje smjera brojenja (*up-down*)
 - Upravljanje smjerom brojenja (izvana i iznutra)



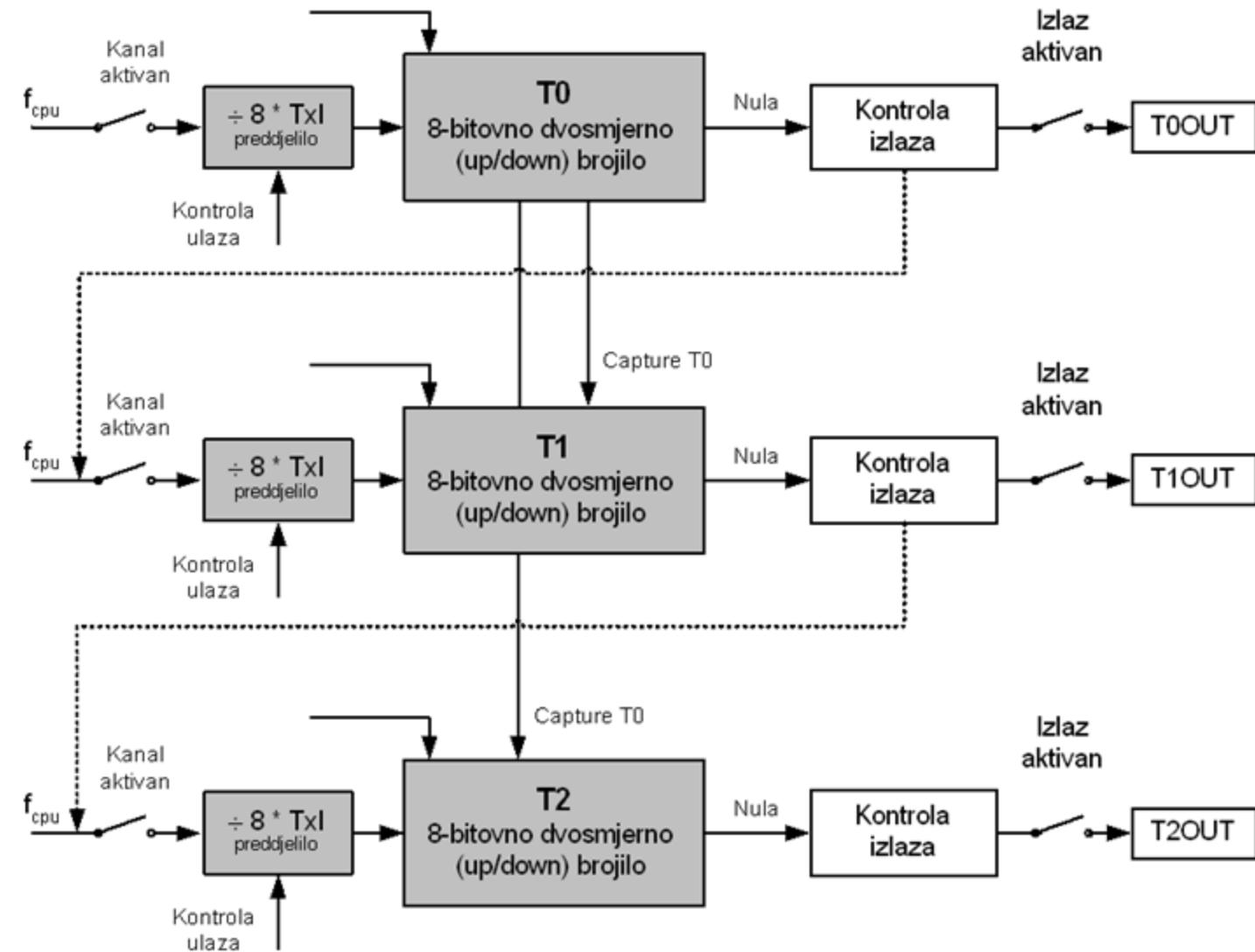
Capture sklop

- Upravljanje pohranom
 - Pohrana *snimke trenutnog stanja brojila (capture)*
 - Trenutak *okidanja* određen vanjskim signalom
 - Okidanje – trenutno stanje brojila pohranjuje se u poseban registar
- "Štoperica" s *prolaznim vremenom*



Primjeri vremenskih sklopova

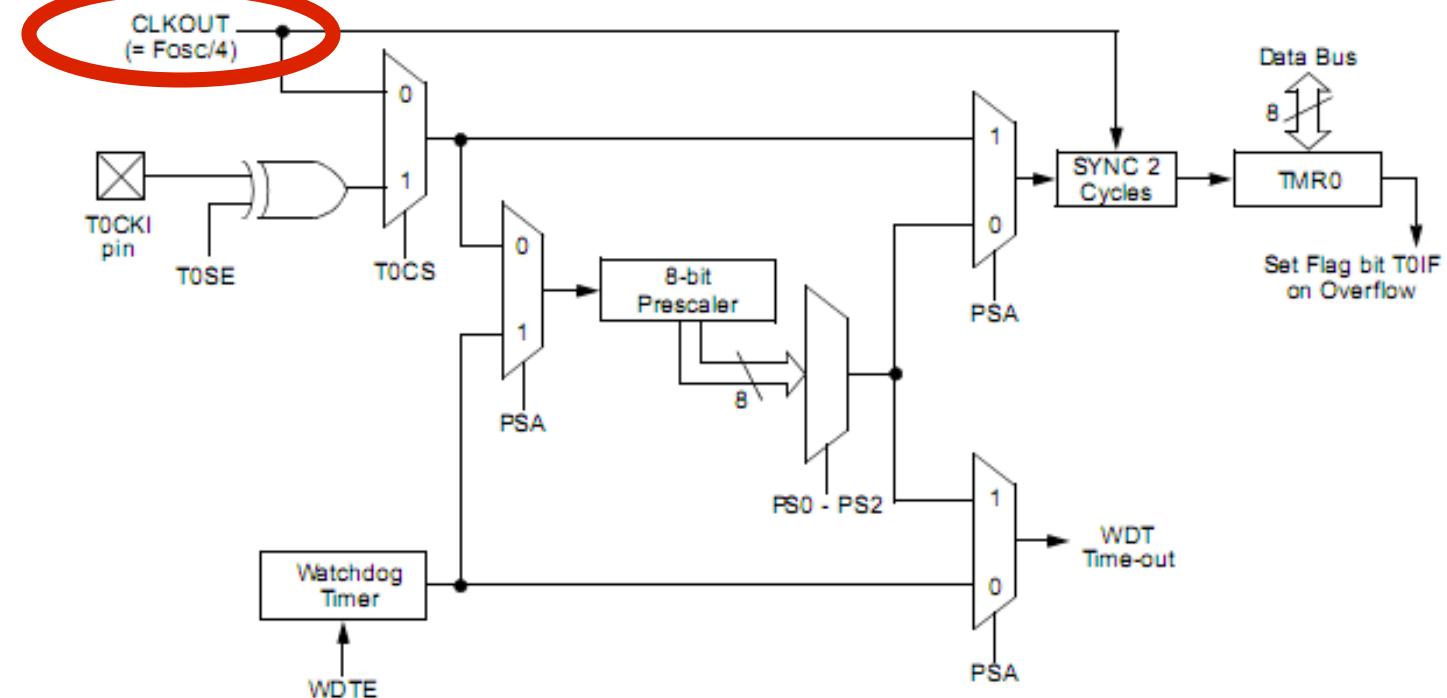
- FRISC ?! 😊



Primjeri vremenskih sklopova

- Primjer: PIC12 - Timer0

- 8-bitno brojilo + preddjelilo (*prescaler*)
- Unutarnji/vanjski takt, odabir brida
- Prekid na prijelazu FF → 00

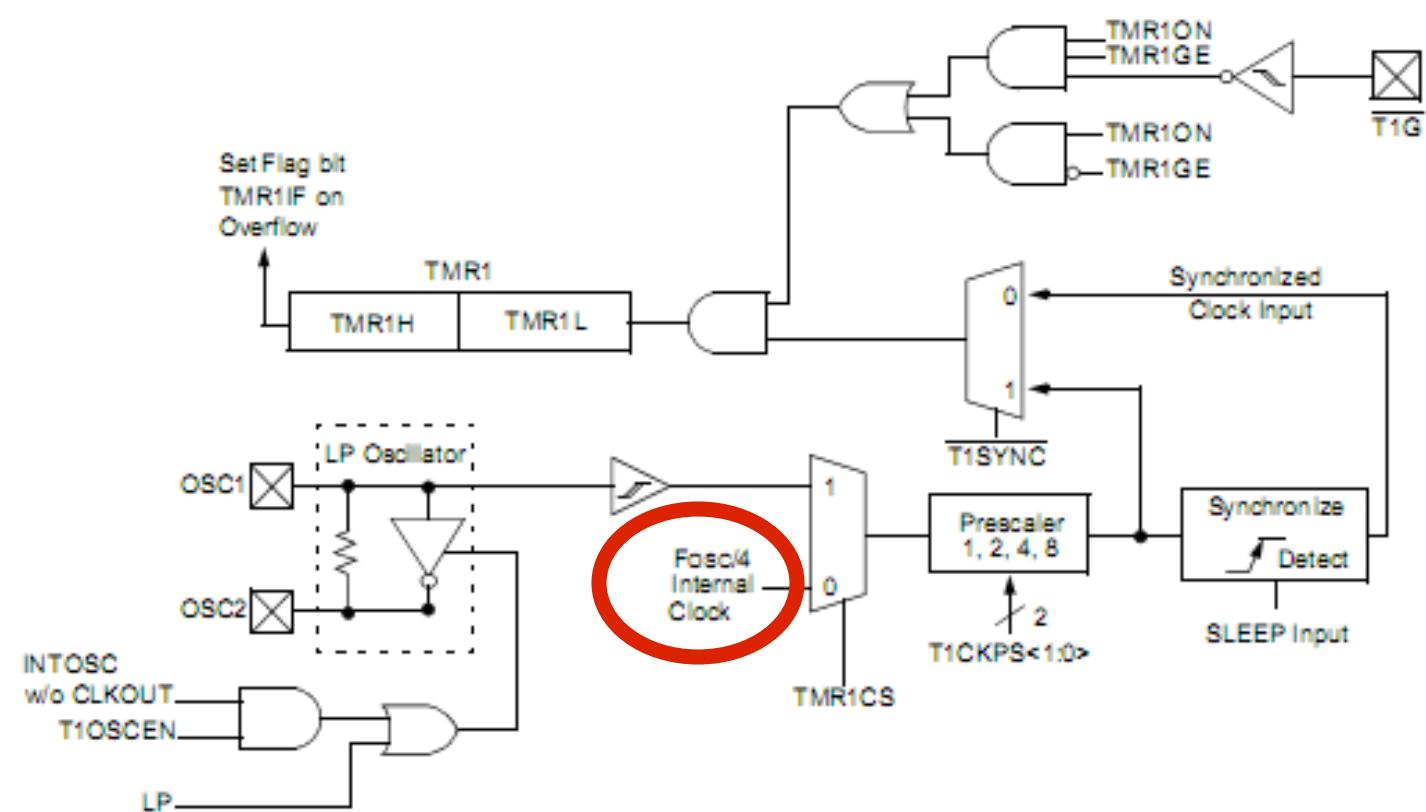


Note 1: TOSE, T0CS, PSA, PS0-PS2 are bits in the Option register.

Primjeri vremenskih sklopova

- Primjer: PIC12 - Timer1

- 16-bitno brojilo + preddjelilo (*prescaler*)
- Unutarnji ili vanjski takt
- Zaporni sklop (*gated timer*)
- Prekid na prijelazu FFFF → 0000



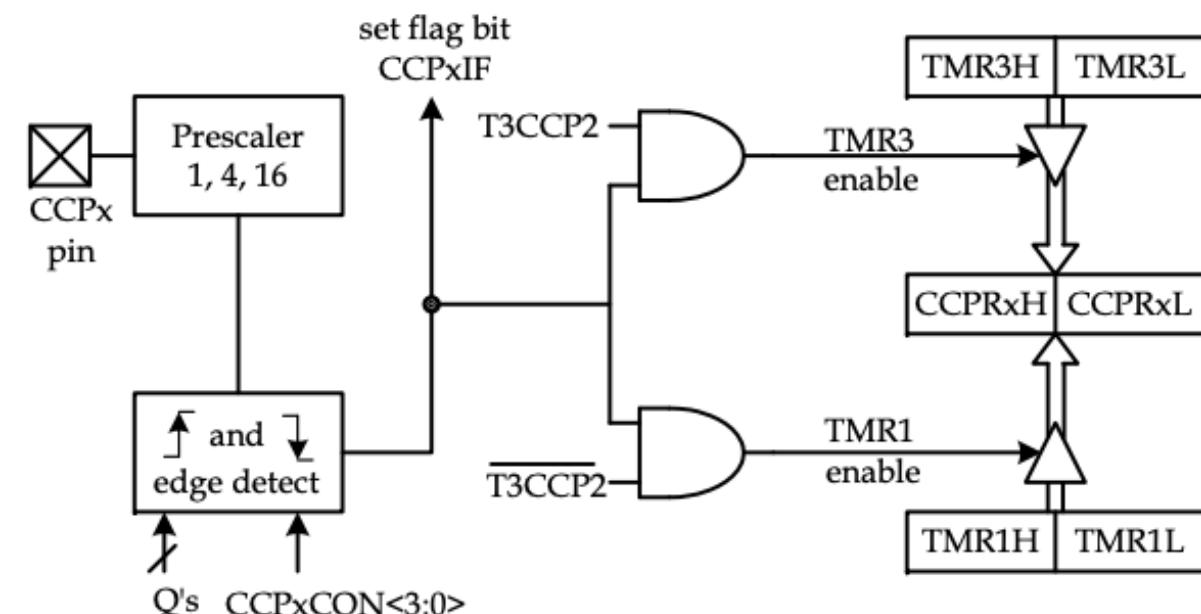
Primjeri vremenskih sklopova

▪ PIC18 Capture

- Zapis stanja vremenskog sklopa u nailasku *događaja*
- *događaj -> brid ulaznog signala*
- *Svaki ili svaki n-ti brid*
- *Podizanje prekida na događaj*

▪ Zašto *capture* sklop???

- Zašto ne kopirati stanje vremenskog sklopa programski?



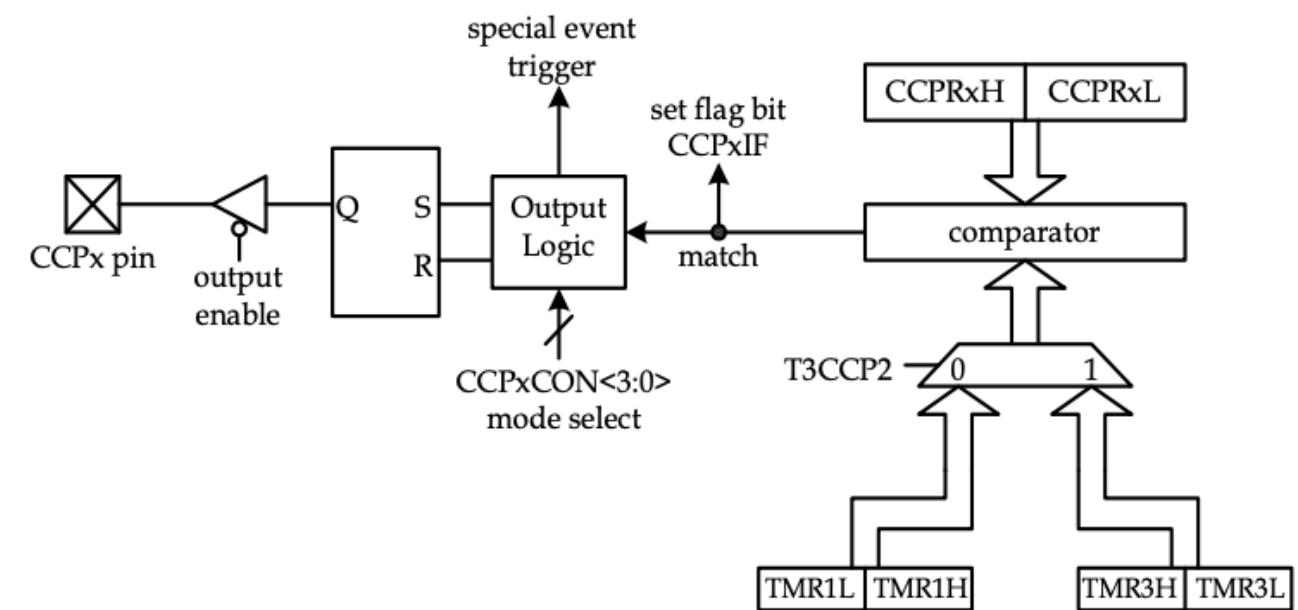
Primjeri vremenskih sklopova

■ PIC18 Compare

- Stanje vremenskog sklopa se uspoređuje sa stanjem registara
- *U slučaju podudaranja -> događaj*
- *Događaj se može reflektirati na stanje izlaznog pina*
 - prelazi u visoko stanje
 - prelazi u nisko stanje
 - prebacuje stanje (toggle)
 - ostaje nepromijenjeno stanje
- *Događaj može resetirati vremenski sklop*

■ Zašto compare sklop???

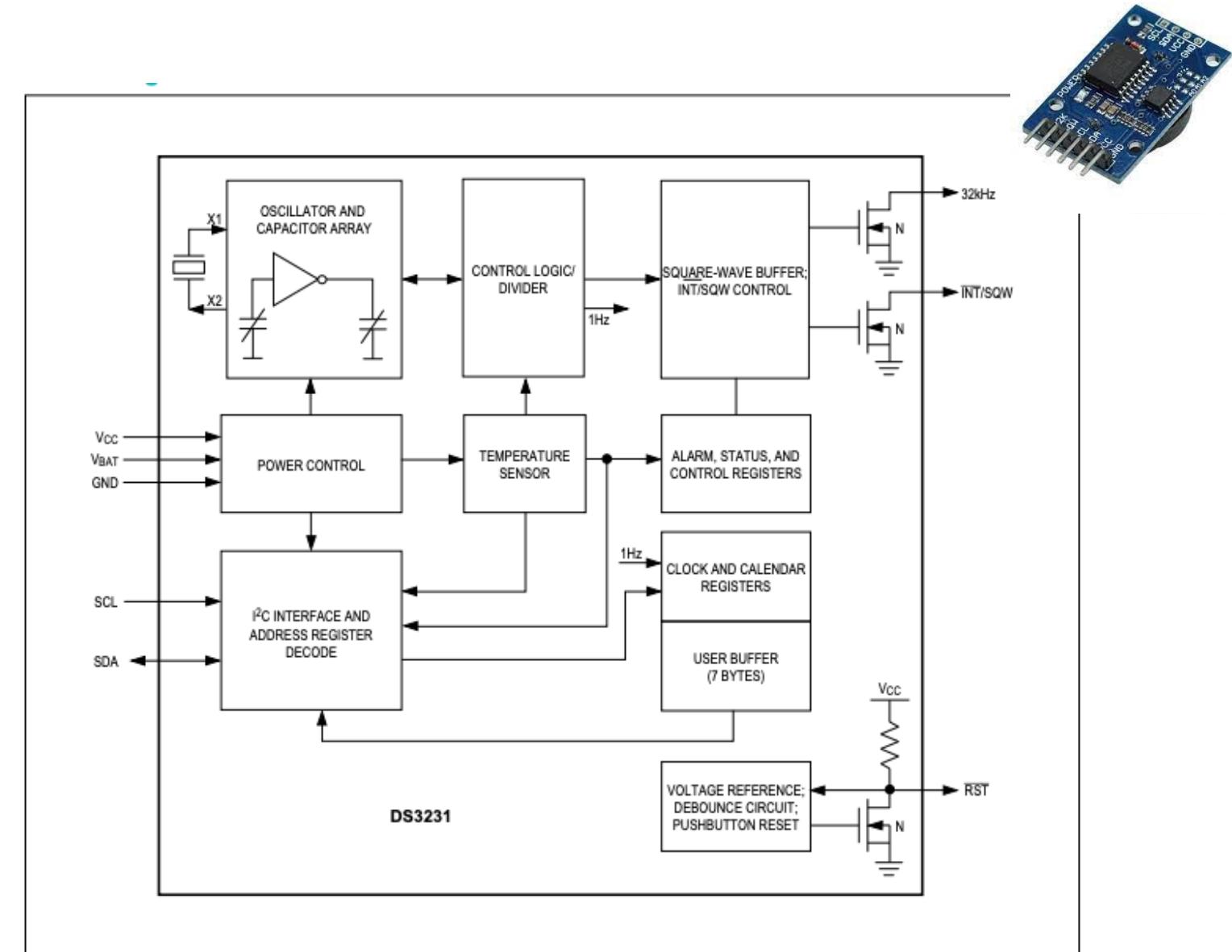
- Zašto ne usporedba stanja vremenskog sklopa programski?



- S vremenskim sklopovalima možemo mjeriti protok vremena – relativno vrijeme
- Za informaciju o apsolutom vremenu – real-time clock
 - minuta, sat, dan, datum, alarmi
 - poželjno zadržati funkcionalnost i tijekom prestanka napajanja sustava i/ili stanja niske potrošnje (*deep sleep*)
- Vrste RTC-a
 - interni – ugrađen u mikrokontroler
 - eksterni – zasebni IC povezani sabirnicom s mikrokontrolerom

Primjer – DS3231

- Održava:
 - Sekunde
 - Minute
 - Sate
 - Dan
 - Datum
 - Mjesec
 - Godina
 - Korekcije broja dana u mjesecu,
prestupna godina ...
- Dva alarma
- Baterijsko *backup* napajanje
- I²C sučelje
- Temperaturno kompenziran
- Točnost: 2ppm 0 - 40 C



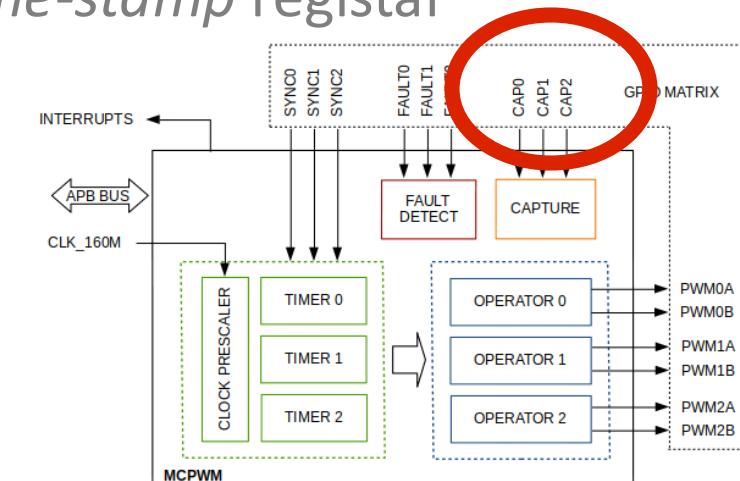
ESP32 vremenski skloovi

- Dvije grupe vremenskih skloova
 - Svaka grupa dva vremenska sklopa
- Svaki vremenski sklop
 - 64-bitni up/down brojač
 - 16-bitni prescaler
 - Izvor vremenskog signala: APB_CLK – 80MHz
 - Alarm (*očekivana vrijednost timera*):
 - Prekid (opcionalno)
 - Auto reload (opcionalno)



▪ Capture:

- MCPWM modul
- 32-bitni timer, APB_CLK (80MHz)
- Capture prescale (dijeljenje ulaznih bridova)
- *Time-stamp* registrar



<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.3/esp32/api-reference/peripherals/timer.html>

<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/mcpwm.html#capture>

ESP RTC

- RTC čuva vrijeme sustava i tijekom reseta i modova spavanja
 - Power-up reset također resetira i RTC (nema pomoćnog baterijskog napajanja)
 - Preciznost ovisi o izvoru signala vremenskog vođenja
 - Interni 150 kHz RC oscilator (najmanja potrošnja, loša stabilnost frekvencije, nema vanjskih komponenti)
 - Eksterni 32 kHz kristal (dobra stabilnost frekvencije, 1uA veća potrošnja u modu niske potrošnje, jedna vanjska komponenta)
 - Eksterni 32 kHz oscilator (gotov vanjski signal, dodatno vanjsko sklopolje)
 - Interni 8,5 MHz oscilator (cca. 33 kHz nakon djelila, dobra frekvencijska stabilnost, 5uA veća potrošnja u modu niske potrošnje, nema vanjskih komponenti)
- SNTP za dobavu vremena nakon uključenja i periodičku korekciju drifta RTC-a
 - Spajanje na NTP poslužitelj korištenjem WiFi sučelja



Rad u stvarnom vremenu

Definicije sustava za rad u stvarnom vremenu

- Oxford Dictionary of Computing:

A Real Time System - “Any system in which the **time at which output is produced is significant**. This is usually because the input corresponds to some movement in the physical world, and the output has to relate to that same movement. The lag **from input time to output time must be sufficiently small** for acceptable timeliness.”



- Young S. (1982), Real Time Languages

any information processing activity or system which has to **respond** to externally generated input stimuli **within a finite and specified period**.



- The Predictably Dependable Computer Systems (PDCS)

A real-time system is a system that is required to react to stimuli from the environment (including the passage of physical time) **within time intervals dictated by the environment**

Rad u stvarnom vremenu

- Koliko je sati? KADA će biti ručak?
- ZA KOLIKO će biti gotov ručak?
- Odziv (vrijeme od ulaza do izlaza)
- Relativnost, ovisno o okolini
 - krstareća raketa Tomahawk, proizvodnja automobila i UNIX (višekorisnički rad) nemaju iste zahtjeve
- Predvidljivost, KADA?
- Ispravnost rada računala ne samo rezultat izračunavanja već i vrijeme kada (za koliko) je rezultat proizведен!

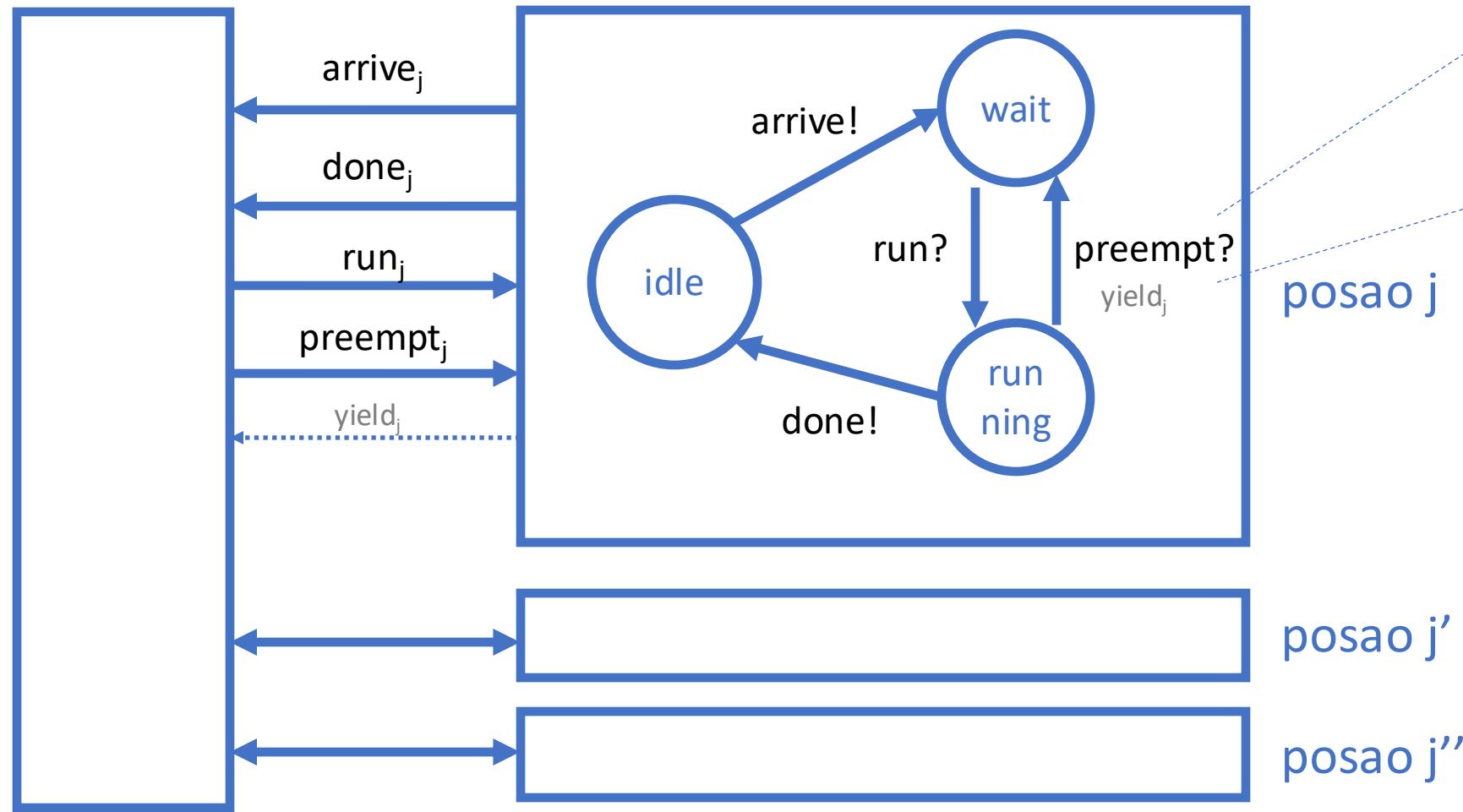


Zadaci u stvarnom vremenu

- Strogost poštivanja vremenskih ograničenja
 - Strogi sustavi (hard real-time systems) [aktiviranje zračnog jastuka]
 - Ublaženi sustavi (soft real-time systems) [dekodiranje video sadržaja]
- Poslovi s obzirom na vrijeme dolaska:
 - Periodički
 - Aperiodički
- Raspoređivač poslova:
 - Optimalno rasporediti poslove po dostupnim resursima i s obzirom na ovisnosti između poslova, tako da sva vremenska ograničenja obavljanja poslova budu poštovana
 - Osnovni zahtjevi na raspoređivač poslova:
 - U jednom trenutku samo jedan posao aktivan (po jezgri)
 - Svaki posao mora dobiti „dovoljno“ procesorskog vremena za njegovo obavljanje u zadanom roku

Rasporedjivač i poslovi

Rasporedjivač



Multitasking:

- cooperative
- preemptive
- non-preemptive

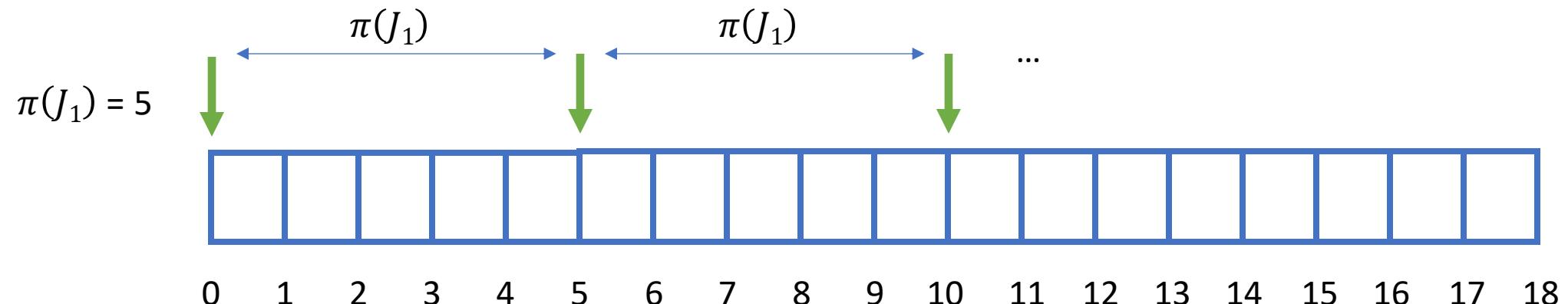
[embeddedOS]
(Windows < 95)
macOS
TinyOS
JavaScript ?!?!?

Model periodičkog posla

- Vrijeme razdijeljeno u vremenske odsječke t_0, t_1, t_2, \dots uniformnog trajanja
- Periodički posao opisan s tri ključna parametra:
 - $\pi(J)$ - Period dolaska posla
 - $\delta(J)$ - Krajnji rok dovršetka posla
 - $\eta(J)$ - Najdulje vrijeme izvršavanja posla (*worst-case execution time*)
- Parametri $\pi(J)$ i $\delta(J)$ su definirani tijekom **oblikovanja** sustava
- Parametar $\eta(J)$ je posljedica **implementacije** sustava
 - Karakteristike odabrane izvršne platforme
 - Implementacija programske podrške

Period dolaska posla

- Posao J se izvršava periodički, svakih $\pi(J)$ vremenskih odsječaka
- Dolazak instance posla J^a
 - J^a je a -ta instance posla J , $a \in \mathbb{N}$
 - *Vrijeme dolaska (arrival time)* instance posla: $(a-1) \pi(J)$
 - Instanca posla J^a je inicijalno u stanju *idle*
 - Raspoređivač šalje događaj $arrive_j$, instance posla prelazi u stanje *wait* i čeka da joj se dodijeli vrijeme na procesoru/jezgri



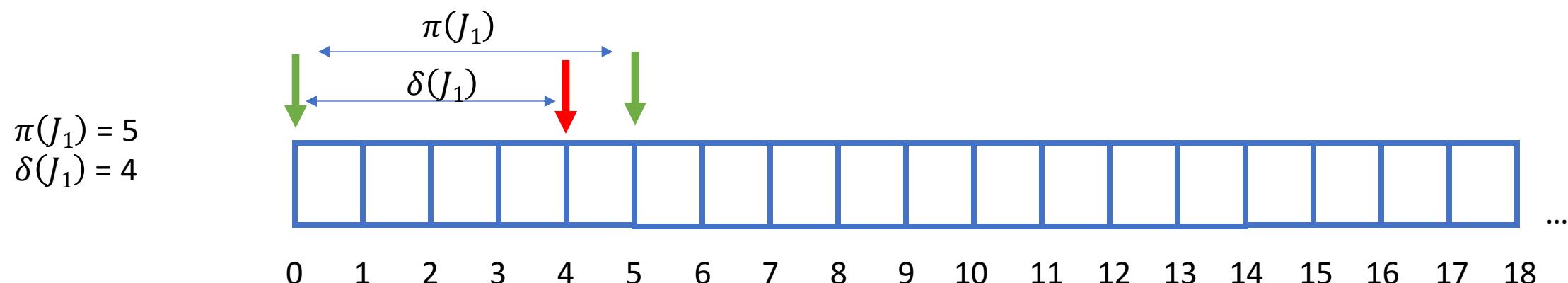
Krajnji rok dovršetka posla

- Dospjeli posao J mora biti završen za $\delta(J)$ vremenskih odsječaka, s obzirom na vremenski odsječak dolaska
- S obzirom na događaje, vrijedi

$$done_j - arrive_j \leq \delta(J)$$

- Također mora vrijediti

$$\delta(J) \leq \pi(J)$$



Najdulje vrijeme izvršavanja posla

- Ocjenjuje se najgori slučaj trajanja izvršavanja posla J (izražen u vremenskim odsječcima)
 - Statička analiza
 - Analiza tijekom izvršavanja (dinamička analiza)
- Posao J garantira izdavanje događaja $done_j$ ako provede $\eta(J)$ vremenskih odsječaka u stanju *running*
- Da bi posao J bio rasporediv, mora vrijediti
$$\eta(J) \leq \delta(J) \leq \pi(J)$$

Npr. posao J je rasporediv s danim parametrima:

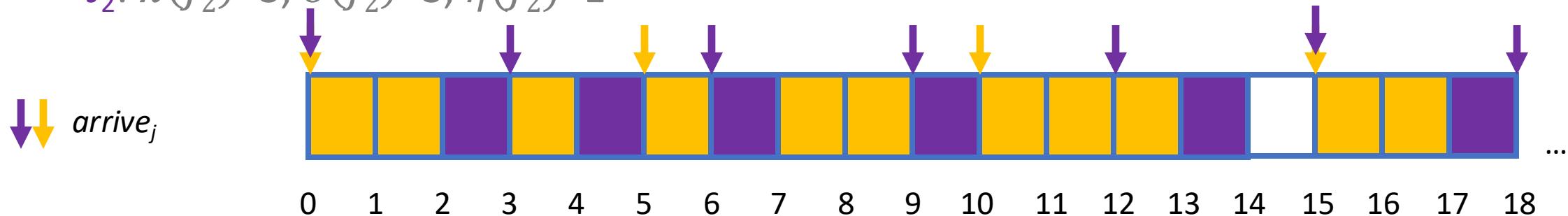
$$\pi(J)=5, \delta(J)=4, \eta(J)=3$$

Statička ocjena vremena izvršavanja posla

- Posao:
 - Slijed izraza (sastavljen od atomičnih izraza)
 - Ne postoje petlje (for ...)
 - Postoje uvjetni izrazi (if ...)
- Nizovi izraza:
$$\eta(stmt) = \eta(stmt_1) + \eta(stmt_2) + \dots + \eta(stmt_i)$$
- Uvjetni izrazi:
$$\eta(stmt) = \eta(e) + \max\{\eta(stmt_1), \eta(stmt_2)\}$$
- Trajanje izvođenja izraza $stmt_n$, npr. $c = a + b$ ovisi o:
 - generiranom programskom kodu (lokalne/globalne varijable ...)
 - arhitekturi (registarsko polje -> priručna memorija -> memorija ...)
 - trenutnom stanju registara, priručne memorije ...
 - ...
- Problem suviše pesimističnih procjena trajanja izvršavanja
 - Npr. promašaj u priručnoj memoriji se dešava najčešće samo na početku bloka instrukcija koji koristi neki skup varijabli
 - Što s pogreškama u predviđanju grananja (i posljedičnim pražnjenjem cjevovoda ...)?

Model periodičkih poslova

- Konačan skup periodičkih poslova \mathfrak{J} , gdje:
 - svaki posao J ima pridruženi period $\pi(J)$, krajnje vrijeme izvršavanja $\delta(J)$ i najdulje vrijeme izvršavanja $\eta(J)$
 - Za svaki posao J vrijedi $\eta(J) \leq \delta(J) \leq \pi(J)$
- Zadatak rasporedjivača je pronaći raspored poslova u raspoložive vremenske odsječke (procesorsko vrijeme) tako da su zadovoljeni krajnji rokovi izvršavanja za sve poslove
- Npr. neka su dani poslovi J_1 i J_2 sa sljedećim parametrima:
 - J_1 : $\pi(J_1)=5$, $\delta(J_1)=4$, $\eta(J_1)=3$
 - J_2 : $\pi(J_2)=3$, $\delta(J_2)=3$, $\eta(J_2)=1$



Rasporedivost poslova

- Zadatak rasporedjivača: pronađak rasporeda izvršavanja (periodičkih) poslova, tako da svi poslovi budu obavljeni prije isteka njihovih krajnjih vremena izvršavanja
- Formalno: raspored σ za periodički model poslova \mathfrak{J} je definiran kao funkcija:
$$\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathfrak{J} \cup \{\perp\}$$

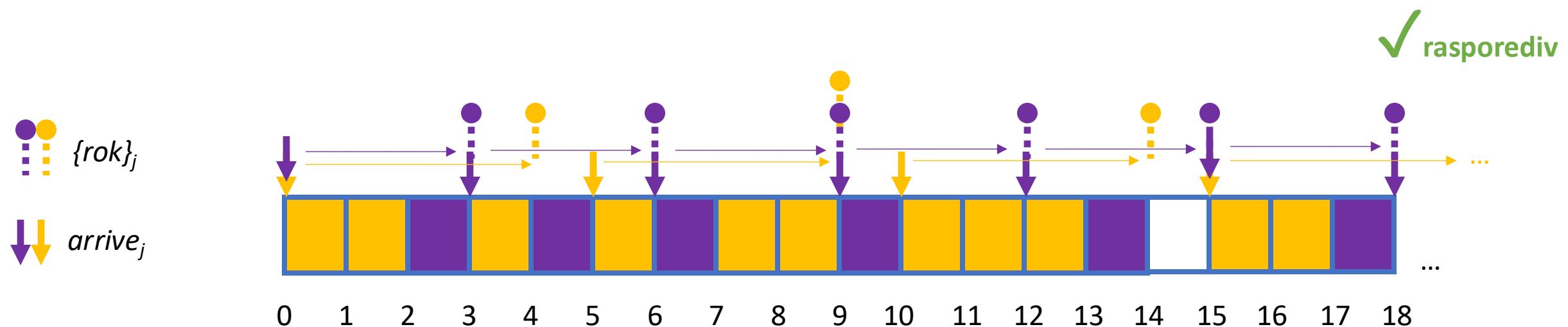
$\sigma(t) = J$: u vremenskom odsječku t izvodi se posao J

$\sigma(t) = \perp$: u vremenskom odsječku t ne izvodi se niti jedan posao

- raspored σ je sukladan rokovima (*deadline-compliant*) za periodički posao J ako alocira dovoljan broj vremenskih odsječaka $\eta(J)$ tako da posao J završi prije roka $\delta(J)$
- raspored σ je **sukladan rokovima za periodički model poslova \mathfrak{J}** ako je sukladan rokovima za svaki od poslova iz modela poslova \mathfrak{J}

Rasporedivost poslova

- Npr. neka su dani poslovi J_1 i J_2 sa sljedećim parametrima:
 - J_1 : $\pi(J_1)=5$, $\delta(J_1)=4$, $\eta(J_1)=3$
 - J_2 : $\pi(J_2)=3$, $\delta(J_2)=3$, $\eta(J_2)=1$
- Svi poslovi završeni prije krajnjih rokova \rightarrow postoji σ koji je sukladan rokovima za \mathfrak{J} \rightarrow model poslova \mathfrak{J} je rasporediv

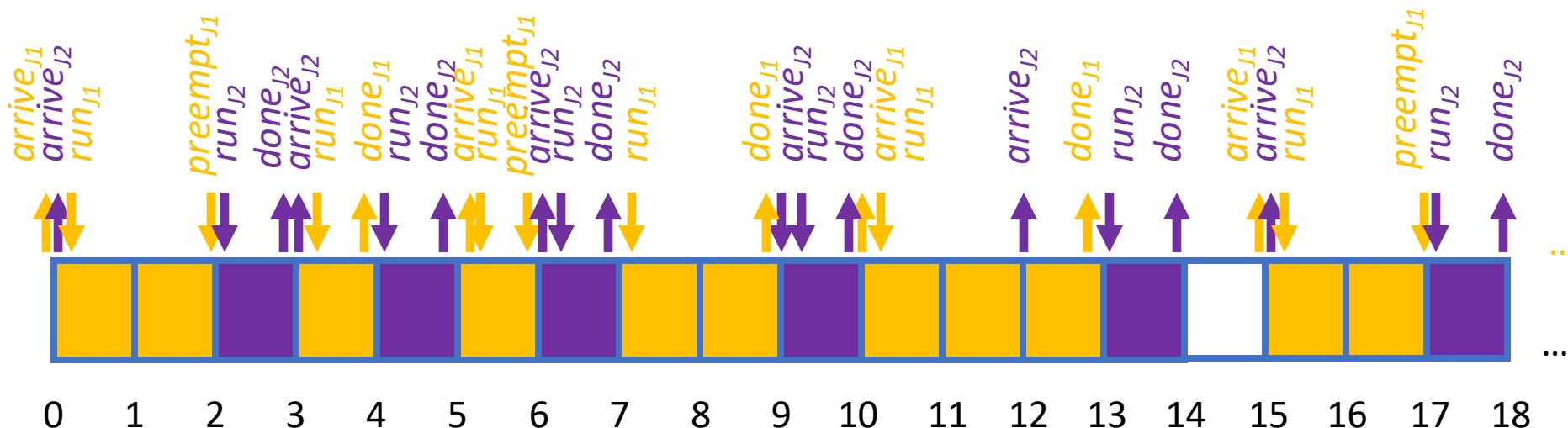


Interakcija rasporedjivača i poslova

Npr. neka su dani poslovi J_1 i J_2 sa sljedećim parametrima:

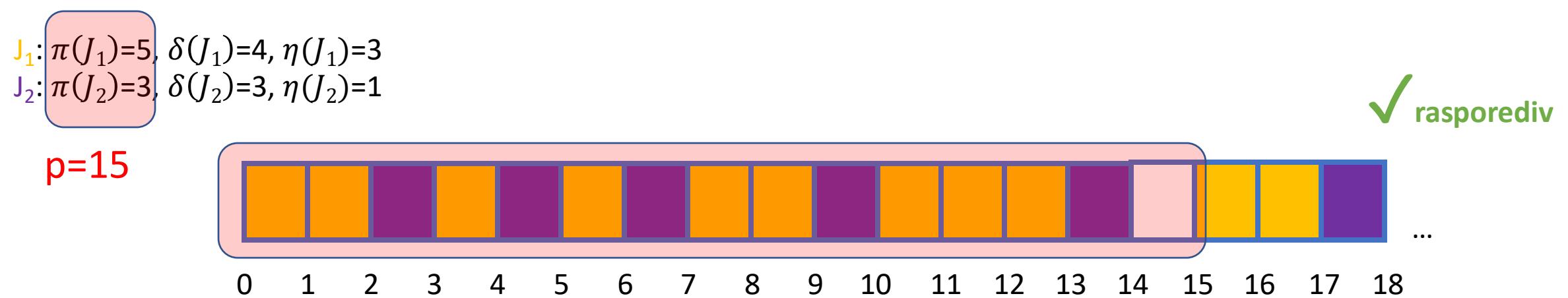
J_1 : $\pi(J_1)=5$, $\delta(J_1)=4$, $\eta(J_1)=3$

J_2 : $\pi(J_2)=3$, $\delta(J_2)=3$, $\eta(J_2)=1$



Periodički raspored poslova

- σ je periodički raspored s periodom p , gdje je $p \in \mathbb{N}$ ako za svaki t vrijedi
 $t \geq 0: \sigma(t+p) = \sigma(t)$
- Periodički model poslova \mathfrak{J} je rasporediv ako i samo ako postoji periodički raspored sukladan rokovima za model poslova \mathfrak{J}
- Period p je najmanji zajednički višekratnik brojeva u skupu $\{\pi(J) \mid J \in \mathfrak{J}\}$



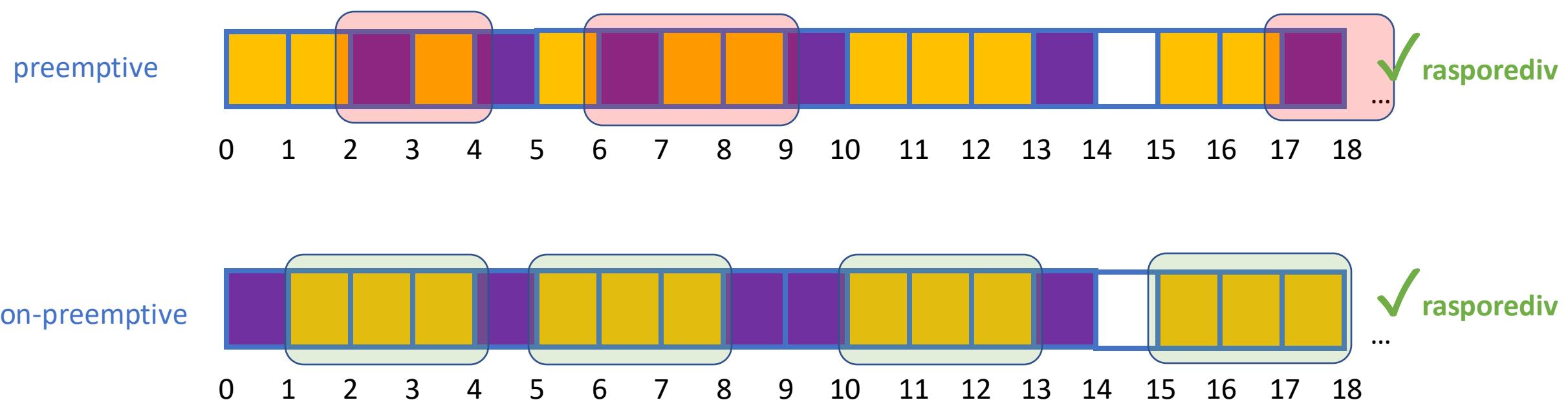
Iskorištenje

- Iskorištenje (*utilization*) periodičnog modela poslova \mathfrak{J}
- Koliko procesnog vremena je potrebno da bi bila moguća obrada svih poslova

$$U(\mathfrak{J}) = \sum_{J \in \mathfrak{J}} \eta(J) / \pi(J)$$

- Brzi test rasporedivosti: $U(\mathfrak{J}) > 1$ podrazumijeva da nedostaje procesnog vremena za poslove iz \mathfrak{J} , stoga model poslova nije rasporediv

Preemptive raspoređivanje



- Preemptive raspoređivač – može prekinuti izvođenje posla i naknadno ga nastaviti
 - Fleksibilnost u raspoređivanju izvršavanja poslova
 - Lakše pronaći raspored sukladan rokovima modela posla ukoliko se koristi *preemptive* raspoređivanje (npr. periodični model može biti rasporediv samo uz korištenje *preemptive* raspoređivanja)
 - Nedostatak *preemptive* raspoređivača: gubitci procesorskog vremena tijekom zamjene konteksta poslova (želimo što manje zamjena)!

Politike raspoređivanja

- Politika raspoređivanja, uz dani periodični model poslova \mathfrak{I} treba:
 - Odrediti periodički raspored σ sukladan rokovima ili
 - Prijaviti nemogućnost nalaženja takvog rasporeda
- Velik broj politika (algoritama) raspoređivanja
 - Osnovna podjela: fiksni ili dinamički prioritet poslova
- Neke od svojstava politika:
 - Računalna složenost
 - Linearna, polinomijalna, NP složenost s obzirom na broj poslova u \mathfrak{I} i period p
 - On-line ili off-line raspoređivanje
 - Prethodno izračunati raspored, računanje rasporeda prije svakog vremenskog odsječka, računanje na promjenu u skupu \mathfrak{I} ...
 - Alternativni kriteriji raspoređivanja
 - Ako postoji više rasporeda koji zadovoljavaju kriterij sukladnosti rokovima, kako odabrati *onaj pravi?*
 - Minimizacija broja *preemption* operacija, maksimizacija responzivnosti ...

Drugi modeli poslova

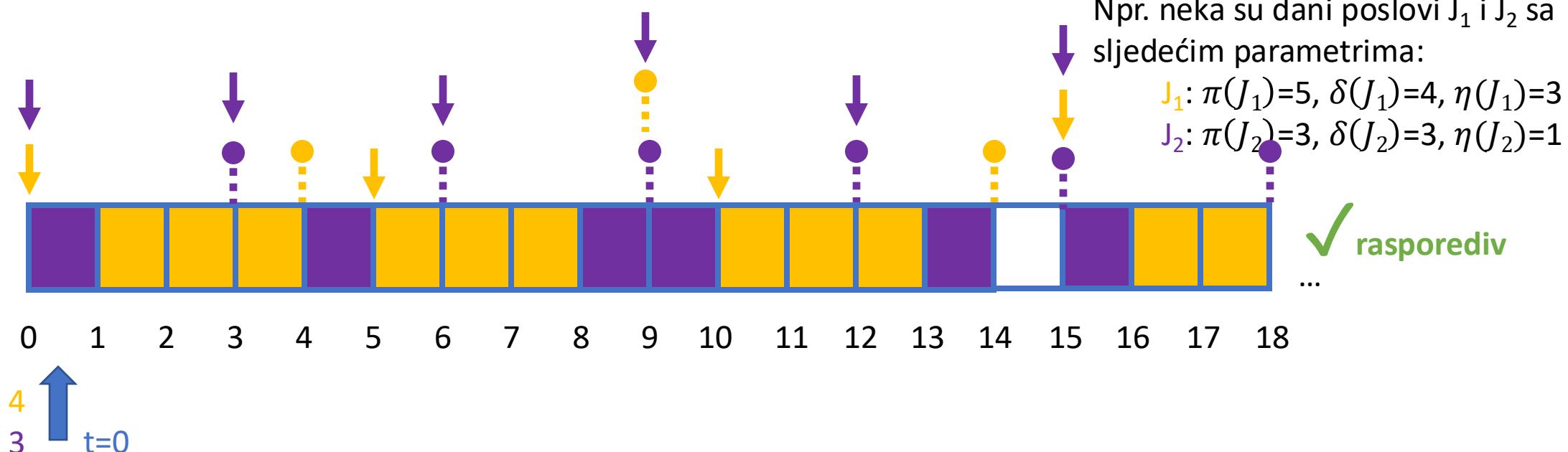
- **Ovisnosti između poslova**
 - npr. posao J_4 ovisi o prethodnom završetku posla J_1
- **Dinamički promjenljivi skup poslova**
 - dodavanjem ili brisanjem posla mora se obaviti test rasporedivosti, stvoriti novi raspored bez utjecaja na izvršavanje sustava i dostizanje krajnjih rokova poslova
- **Aperiodični poslovi**
 - Nepoznat trenutak dolaska posla
 - Rezervacija vremena u rasporedu za aperiodičke poslove
 - „Best-effort“ umjesto garantiranja dostizanja rokova
- **Višeprocesorske/višejezgrene platforme**
 - Raspoređivanje poslova i po više procesora ili jezgri
 - Afiniteti poslova za jezgre
 - Specijalizirani procesori / jezgre
- **Hard / soft zahtjevi na dostizanje krajnjih rokova**
 - Hard – garancija rasporeda za obavljanje svih poslova na vrijeme (npr. abs)
 - Soft – garancija rasporeda za određeni % obavljanja poslova na vrijeme (npr. dekodiranje videa)



Politika najbližeg roka

- *Earliest deadline first (EDF) politika:*

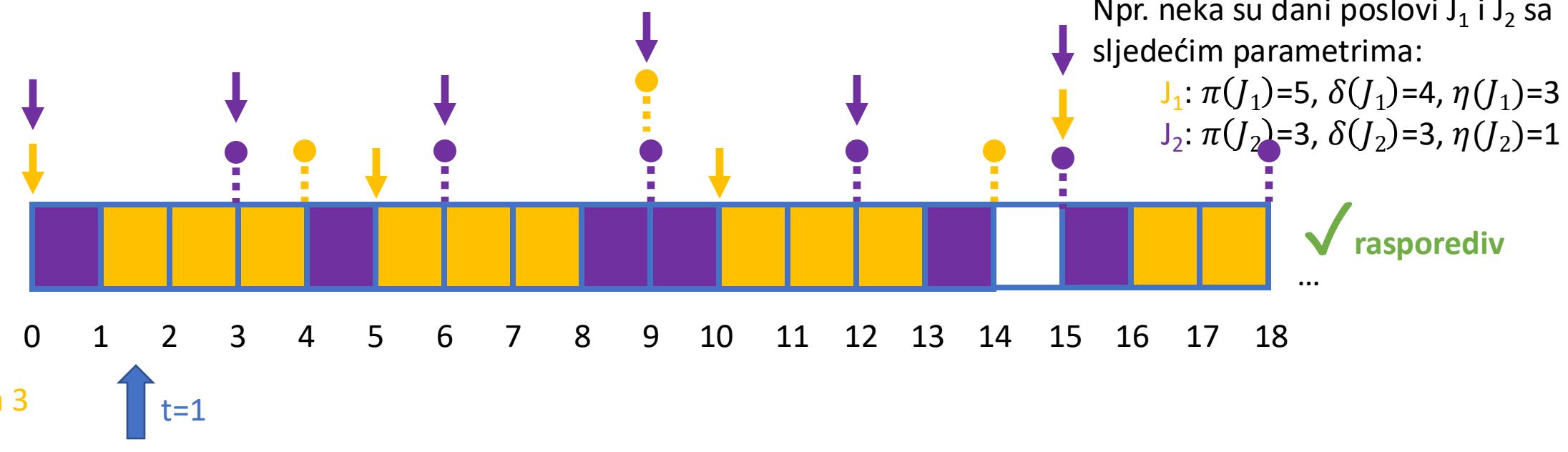
- na početku svakog vremenskog odsječka t ($t \geq 0$) određuje se koji aktivni poslovi $J \in \mathfrak{J}$ još nisu završeni (još nisu odradili sve $\eta(J)$, trebaju procesorskog vremena)
- ako nema takvih poslova: $\sigma(t) = \perp$
- ako ima takvih poslova, određuje se posao J_e čiji je rok $\delta(J_e)$ najbliži t : $\sigma(t) = J_e$
 - *Ako ima više poslova s istim najbližim rokom, odabir se vrši arbitrarno ili po alternativnom kriteriju*



Politika najbližeg roka

- *Earliest deadline first (EDF) politika:*

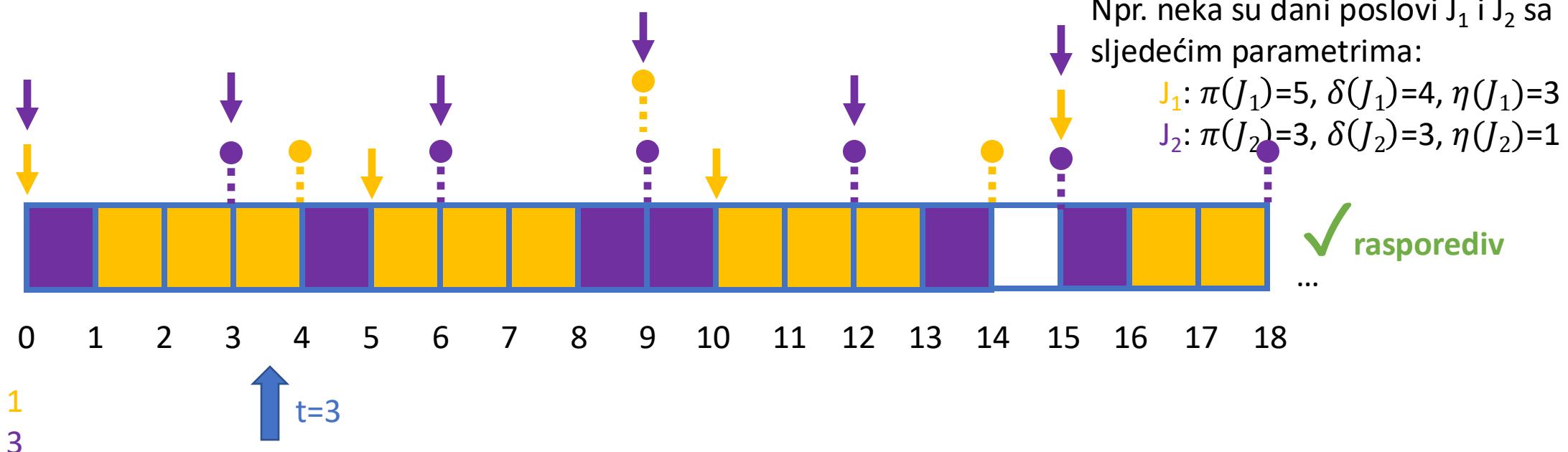
- na početku svakog vremenskog odsječka t ($t \geq 0$) određuje se koji aktivni poslovi $J \in \mathfrak{J}$ još nisu završeni (još nisu odradili sve $\eta(J)$, trebaju procesorskog vremena)
- ako nema takvih poslova: $\sigma(t) = \perp$
- ako ima takvih poslova, određuje se posao J_e čiji je rok $\delta(J_e)$ najbliži t : $\sigma(t) = J_e$
 - *Ako ima više poslova s istim najbližim rokom, odabir se vrši arbitrarno ili po alternativnom kriteriju*



Politika najbližeg roka

- *Earliest deadline first (EDF) politika:*

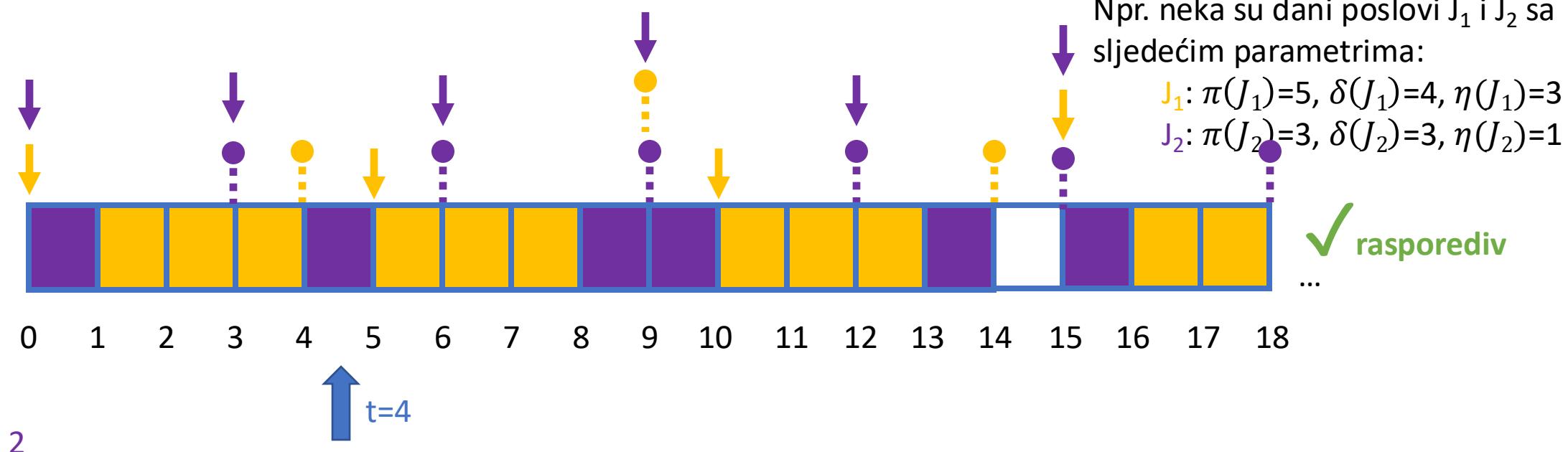
- na početku svakog vremenskog odsječka t ($t \geq 0$) određuje se koji aktivni poslovi $J \in \mathfrak{J}$ još nisu završeni (još nisu odradili sve $\eta(J)$, trebaju procesorskog vremena)
- ako nema takvih poslova: $\sigma(t) = \perp$
- ako ima takvih poslova, određuje se posao J_e čiji je rok $\delta(J_e)$ najbliži t : $\sigma(t) = J_e$
 - *Ako ima više poslova s istim najbližim rokom, odabir se vrši arbitrarno ili po alternativnom kriteriju*



Politika najbližeg roka

- *Earliest deadline first (EDF) politika:*

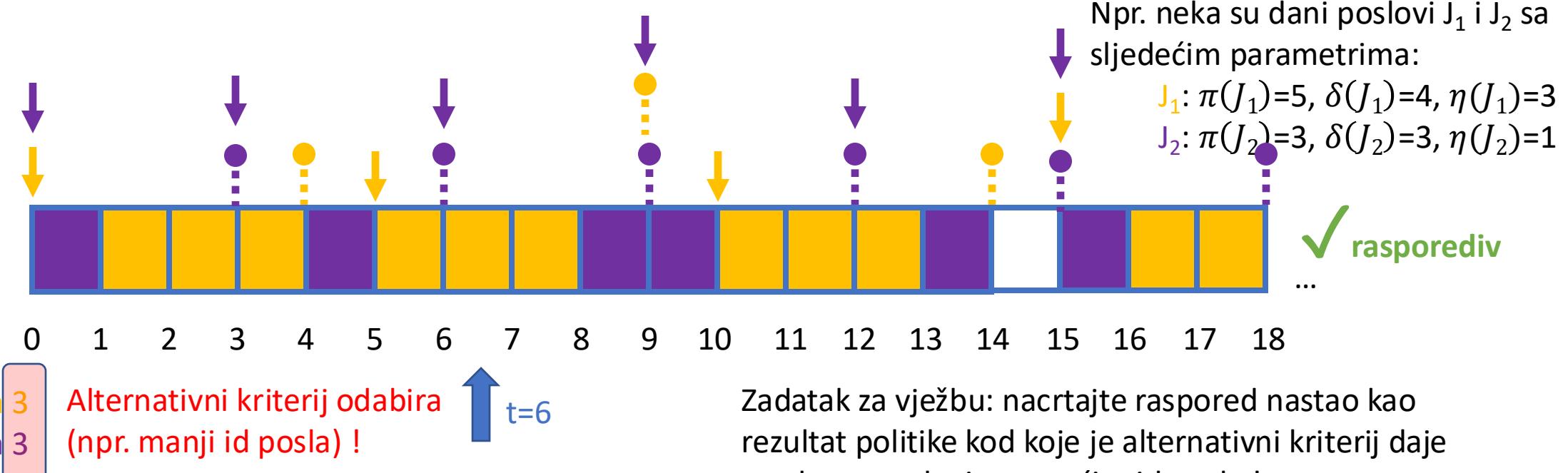
- na početku svakog vremenskog odsječka t ($t \geq 0$) određuje se koji aktivni poslovi $J \in \mathfrak{J}$ još nisu završeni (još nisu odradili sve $\eta(J)$, trebaju procesorskog vremena)
- ako nema takvih poslova: $\sigma(t) = \perp$
- ako ima takvih poslova, određuje se posao J_e čiji je rok $\delta(J_e)$ najbliži t : $\sigma(t) = J_e$
 - *Ako ima više poslova s istim najbližim rokom, odabir se vrši arbitrarno ili po alternativnom kriteriju*



Politika najbližeg roka

▪ Earliest deadline first (EDF) politika:

- na početku svakog vremenskog odsječka t ($t \geq 0$) određuje se koji aktivni poslovi $J \in \mathfrak{J}$ još nisu završeni (još nisu odradili sve $\eta(J)$, trebaju procesorskog vremena)
- ako nema takvih poslova: $\sigma(t) = \perp$
- ako ima takvih poslova, određuje se posao J_e čiji je rok $\delta(J_e)$ najbliži t : $\sigma(t) = J_e$
 - Ako ima više poslova s istim najbližim rokom, odabir se vrši arbitratarno ili po alternativnom kriteriju



Svojstva politike najbližeg roka

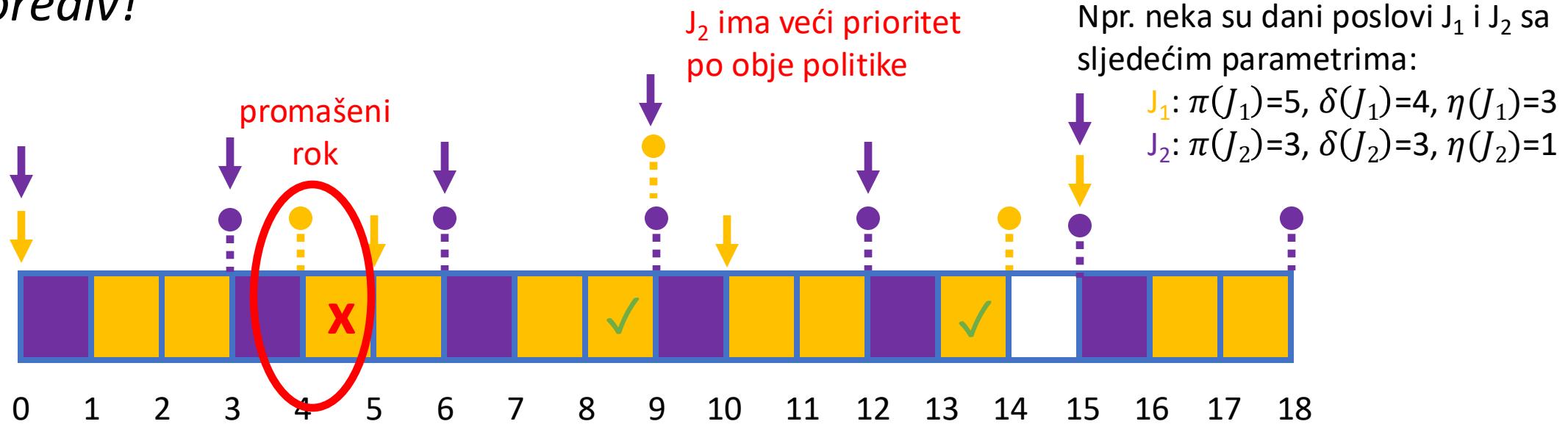
- Priпада у групу tzv. *greedy* алгоритама (одлуке на основу локалних информација, не обраћа се пажња на глобалне последице)
- Политика *dinamičког prioriteta*
 - *Prioritet raspoređivanja posla J se mijenja u vremenu*
- Створени распоред може бити *preemptive*
- Докле god je model periodičkih poslova \mathfrak{J} rasporediv, EDF politika ће створити распоред σ koji je sukladan свим роковима poslova J из \mathfrak{J}
- Brzi test rasporedivosti:
 - Svi рокови су implicitni: $\delta(J) = \pi(J)$ --> instance posla J мора завршити до долaska нове instance
 - Model poslova \mathfrak{J} је rasporediv ако vrijedi: $U(\mathfrak{J}) \leq 1$

Politike fiksnog prioriteta poslova

- Poslovi ne mijenjaju prioritet tijekom vremena
 - Rasporedioca odluce o dodjeli vremenskog odsjecka na osnovu prethodno definiranog, nepromjenljivog prioriteta posla
 - Politike određivanja prioriteta posla:
 - Prethodno, arbitrarno dodijeljen prioritet (npr. pozitivni cijeli broj)
 - *Deadline-monotonic* – poslovi s kraćim rokom imaju veći prioritet
 - *Rate-monotonic* – poslovi s kraćim periodom imaju veći prioritet
- Raspored posla σ se stvara za svaki vremenski odsječak t zasebno
 - na početku svakog vremenskog odsjecka t ($t \geq 0$) određuje se koji aktivni poslovi $J \in \mathfrak{J}$ još nisu završeni (još nisu odradili sve $\eta(J)$, trebaju procesorskog vremena)
 - ako nema takvih poslova: $\sigma(t) = \perp$
 - ako ima takvih poslova, određuje se posao J_e čiji je prioritet najviši
 - *Ako ima više poslova s istim prioritetom, odabir se vrši arbitrarno, round-robin ili po nekom drugom alternativnom kriteriju*

Svojstva politika

- Poslovi više frekvencije dolaska imaju veći prioritet
 - Ako su krajnji rokovi *implicitni, rate-monotonic* politika je optimalna
 - U ovom slučaju su, u stvari, *deadline-* i *rate-monotonic* politike iste!
 - Ako su krajnji rokovi kraći od perioda dolaska poslova, *deadline-monotonic* je bolja
- Niti jedna od navedenih politika ne garantira pronalaženje rasporeda σ sukladnog svim rokovima poslova J iz \mathfrak{J} , makar model periodičkih poslova \mathfrak{J} bio *rasporediv!*

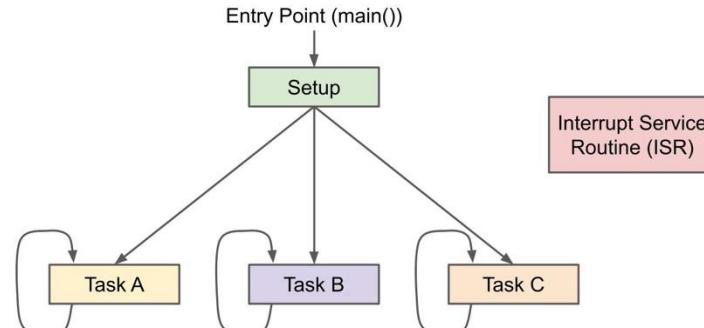


Svojstva politika

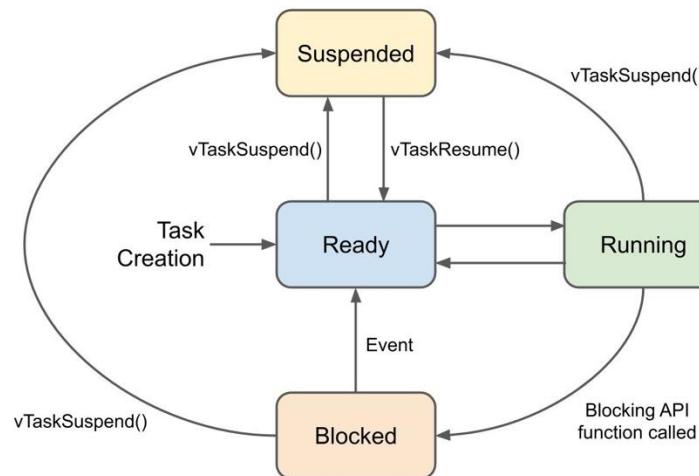
- Pripadaju u grupu tzv. *greedy* algoritama
- Stvoreni raspored može biti *preemptive*
- Minimalna potrebna procesna snaga prilikom određivanja rasporeda
 - Prioriteti se određuju *off-line*
 - U toku izvršavanja potrebno je samo poredati spremne poslove po prioritetu, odabrati onog s najvišim prioritetom

FreeRTOS na ESP32

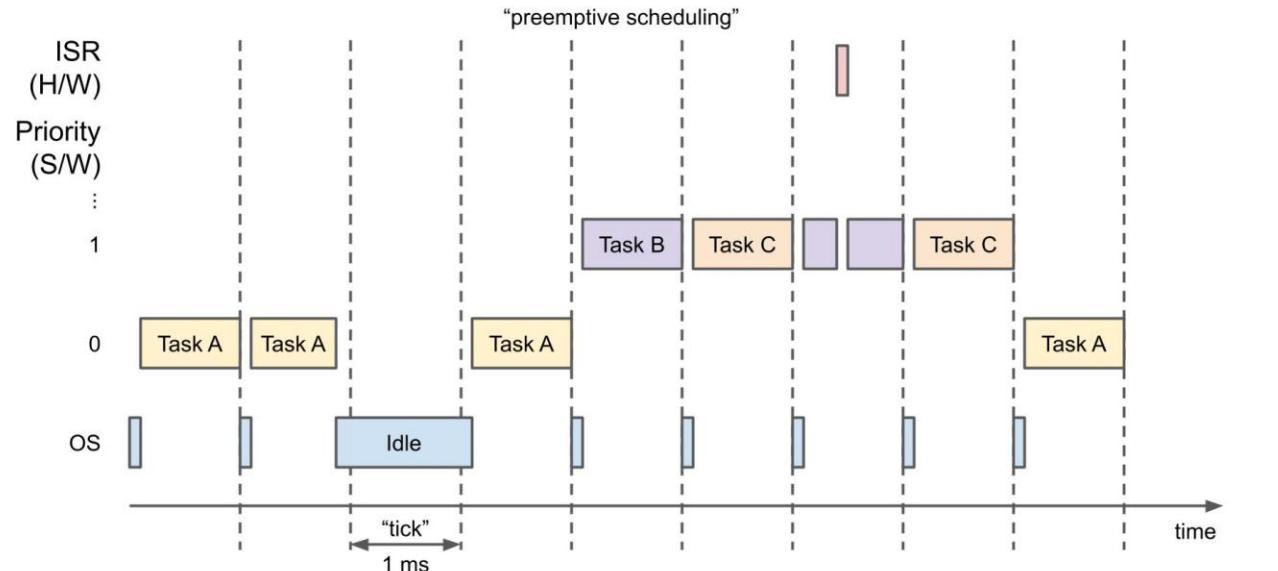
What our code looks like



Task States



What actually happens*





Sveprisutno računarstvo

5. Energija

- Izvori napajanja
- Tehnologije izvedbe i potrošnja
- Upravljanje potrošnjom
- ESP32 i upravljanje potrošnjom

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.

Potrošnja energije – ugradbeni sustavi

- Manja potrošnja postaje važnija od većih performansi
- Moderni uređaji:
 - prijenosni
 - opremljeni mikrokontrolerom
 - baterijski napajani
 - malih dimenzija
- Potrošnja
 - Koliko prosječno trošimo? Koliko dugo će trajati baterija? (energija)
 - Koliko grijemo? (snaga)
 - Koliko trošimo vršno? (snaga)



Izvori napajanja

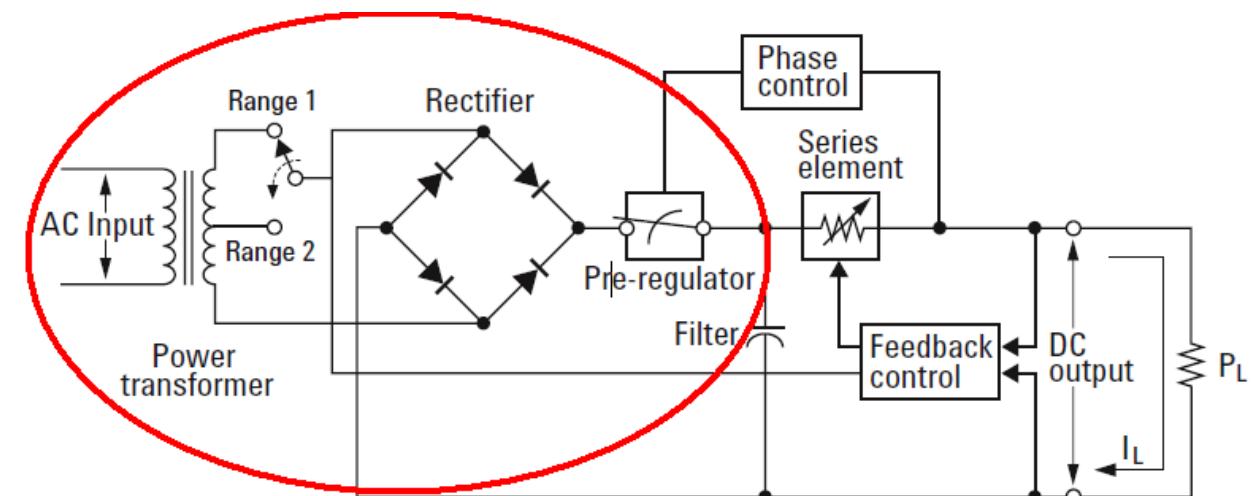
Potrošnja i napon napajanja

- Izvor napajanja je:
 - regulator
 - linearni
 - switching, ili
 - Baterija
 - Prikupljanje energije iz okoline
- Zahtjevi
 - efikasnost
 - stabilnost
 - veća potrošnja – veća nestabilnost, veći gubici
 - točnost napona



Napajanje – ulazni napon

- Istosmjerni ili izmjenični?
- Iznos, odstupanje, smetnje?
- Izmjenični ulazni napon
 - treba proći ispravljanje i filtriranje
 - na primjeru jednostavnog serijskog regulatora:





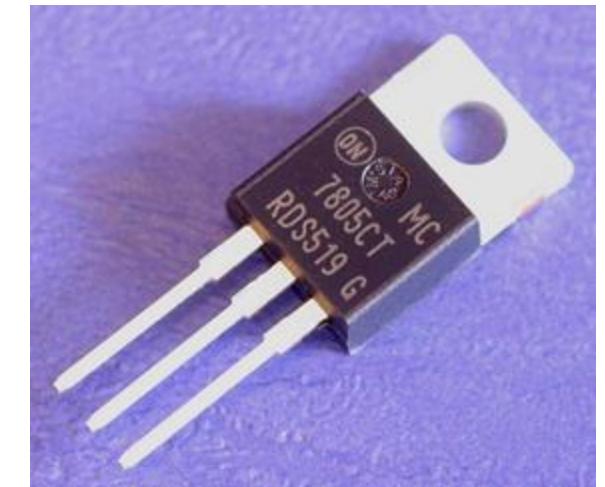
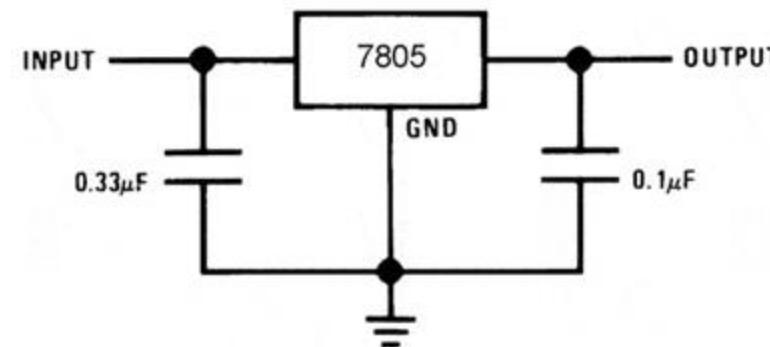
Napajanje – regulatori napona

- Regulator prilagođava ulazni istosmjerni napon radnom naponu mikrokontrolera
- Princip rada – izlazni napon se uspoređuje s internim referentnim naponom, razlika se pojačava i upravlja izlazom regulatora
 - problemi (prisjetite se PID regulatora!):
 - brzina odziva
 - stabilnost
 - nadvišenje, itd.
- Regulator se sastoji od
 - u potpunosti od diskretnih komponenti ili
 - (češće) od integriranog sklopa i nekoliko komponenti



Napajanje – regulatori napona

- Dva osnovna tipa integriranih regulatora:
 - Linearni ili serijski (princip rada potenciometra)
 - Prednost: jednostavna realizacija, manje vanjskih komponenata
 - Nedostatak: neželjena disipacija energije proporcionalna je traženom padu napona i jakosti struje
 - Primjer: 3.3V napajanje, 2.5V napon jezgre -> 24% energije troši se beskorisno

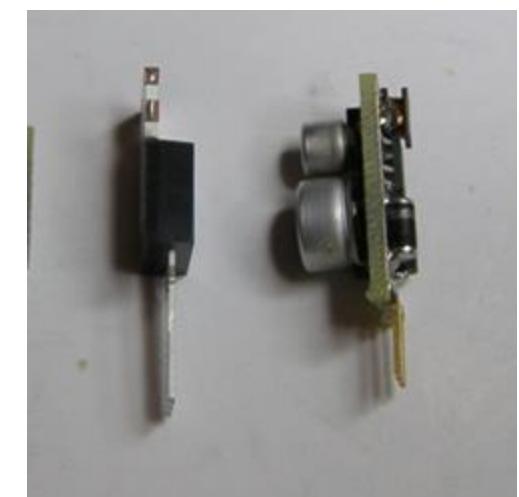


- Preklopni (*switching regulator*)



Preklopni (*switching*) regulator napona

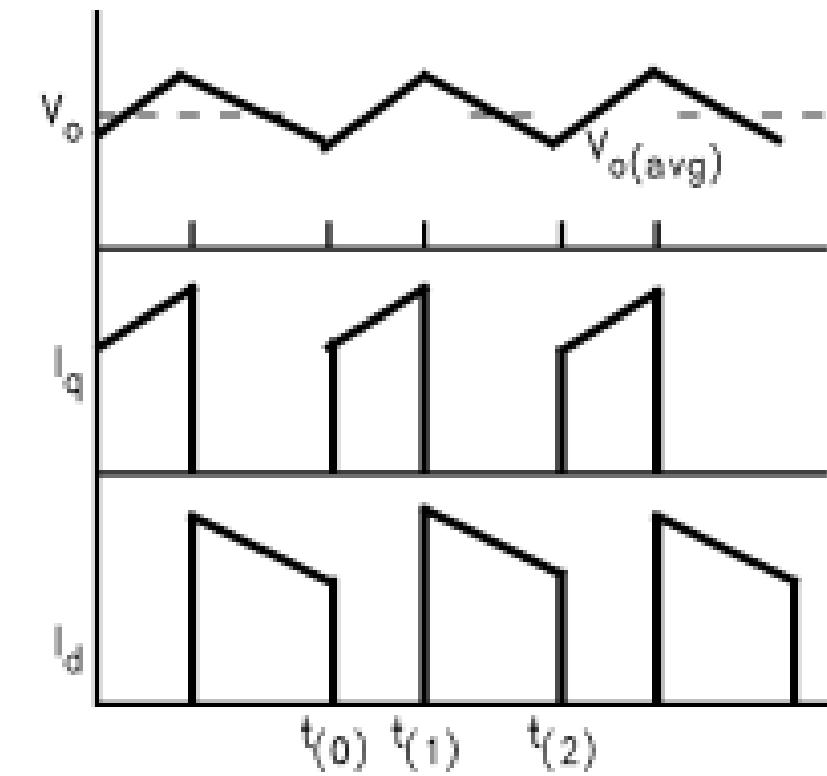
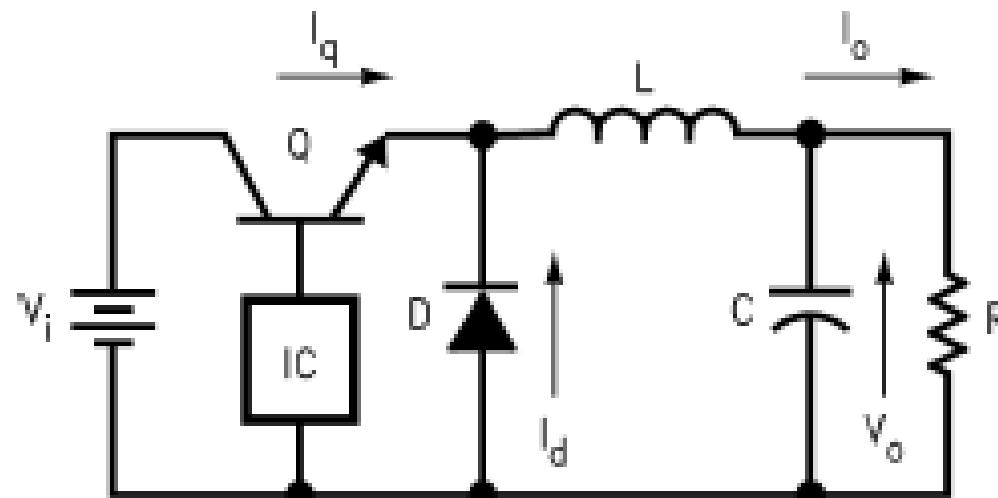
- Pulsno-širinska modulacija struje kroz zavojnicu
- Efikasniji od linearног
 - Za prilagodbu napona sa 3.3V na 1.5V postotak neiskoriшtene energije smanjuje se sa 54% na otprilike 10%
- Nedostaci
 - Potrebno je dodati vanjsku zavojnicu
(viša cijena)
 - Veća emisija elektromagnetskog zračenja
(EMI) jer radi na području oko 1MHz





Preklopni (*switching*) regulator napona

- npr. preklopni *step-down/buck* regulator:





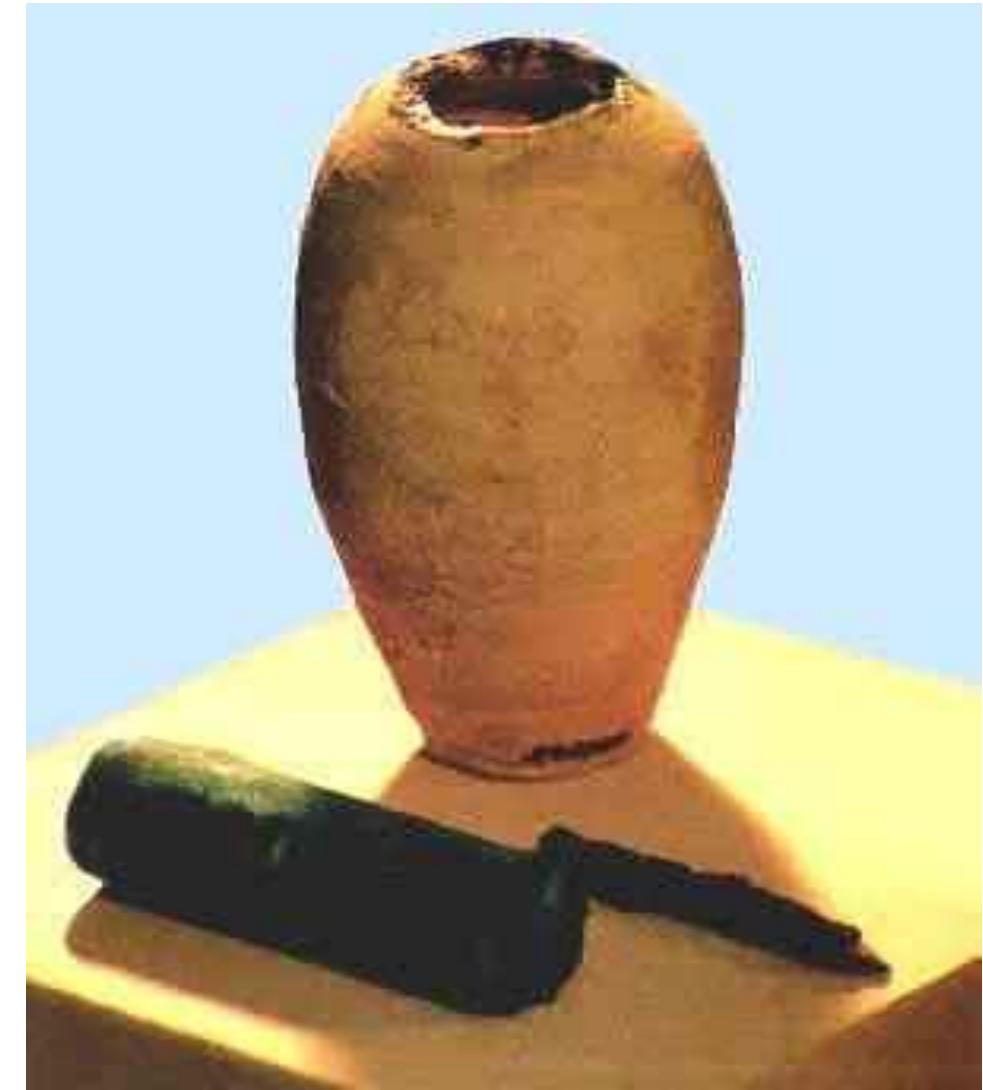
Napajanje – regulatori napona

- **Krajnosti**
 - preklopni regulator (regulaciju i generiranje PWM signala) moguće je ostvariti i mikrokontrolerom
 - regulator napona može biti i integriran u sâm mikrokontroler - *on-chip* regulator napona
- U istom sustavu treba izbjegavati više naponskih regulatora (ako je to moguće)



Baterije

- Kemijski izvor električne energije
 - Pretvara energiju pohranjenu u kemijskim vezama u električnu (direktno)
- Prve baterije u upotrebi još prije nekoliko tisuća godina
 - Egipćani? – elektroliza za zaštitu metala, 4000 g. p.n.e
 - Bagdadska baterija – 250 g. p.n.e – bakar, željezo i ocat
- Moderna baterija – Galvanski članak
 - Luigi Galvani – 1791. – životinjski elektricitet
 - Alessandro Volta – 1800. – prva moderna baterija





Vrste baterija

- Osnovna podjela
 - Primarne
 - Proces pretvorbe kemijske u električnu energiju je jednosmjeran
 - Sekundarne
 - Proces pretvorbe kemijske u električnu energiju je dvosmjeran, povrat baterije u početno stanje dovođenjem električne energije (akumulator, punjiva baterija)
- Primarne baterije
 - Jednokratne
 - Velik izbor oblika i kapaciteta
 - Najčešće cink-ugljik (Zn-C) ili alkalne baterije (Zn-MnO₂)



Sekundarne baterije

- Karakteristike baterije ovise prvenstveno o kemijskom sastavu baterije – *kemiji* baterije
 - Zasnovane na olovu (Pb)
 - Zasnovane na niklu (Ni)
 - Zasnovane na litiju (Li)
 - ...
- Po agregatnom stanju elektrolita
 - *Mokre* ćelije (*wet cells*)
 - *Suhe* ćelije (*dry cells*)
 - Elektrolit vezan, npr. u obliku gela



Kemije baterija

- Na osnovi nikla
 - Nikal-kadmij (NiCd)
 - Srednja gustoća energije
 - Trajna, otporna
 - Visoke struje pražnjenja, velik temperaturni raspon
 - Otrvni metali, vrlo štetna po okoliš
 - Nikal-metal-hidrid (NiMh)
 - Viša gustoća energije
 - Kraći životni vijek
 - Štetna po okoliš
- Na osnovi litija
 - Litij-ion (Li-ion)
 - Velika gustoća energije, mala težina, manje štetna po okoliš
 - Osjetljivija – potrebna zaštita od prevelikih napona i struja

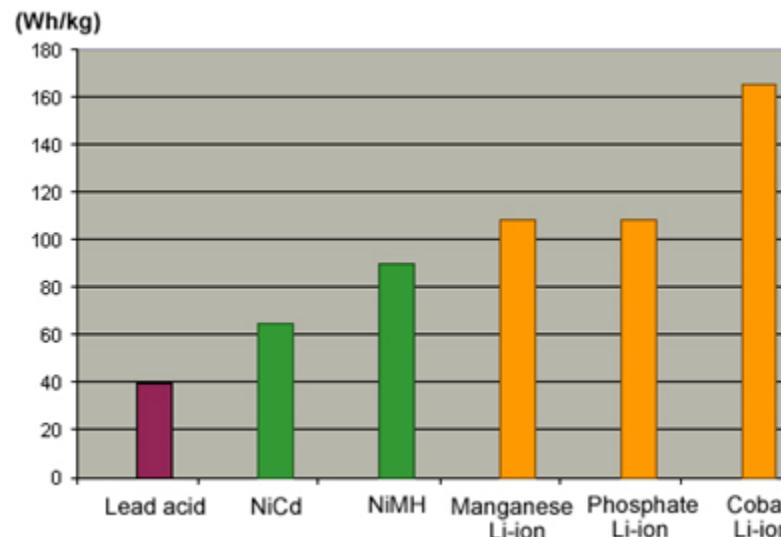


Kemije baterija

- Olovo (Pb)
 - Niska cijena
 - Niska gustoća energije
 - Otpornost
 - Ali: potrebna zaštita od prepunjjenja, prepražnjenja, ...
 - Velike struje pražnjenja
 - Velika težina
 - Štetna po okoliš – olovo, elektrolit je kiselina
- Posebne primjene (vozila, pomoćna napajanja, ...)

Usporedba baterija

Tip baterije	NiCd	NiMh	Olovne	Lilon (kobalt)	Lilon (fosfat)
Gustoća energije [Wh/kg]	45-80	60-120	30-50	150-190	90-120
Životni ciklus (pad do 80% kap.)	1500	300-500	200-300	300-500	>1000
Brzo punjenje	1h	2-4h	8-16h	1.5-3h	>= 1h
Podnosi prepunjjenje	umjereno	slabo	dobro	jako slabo	jako slabo
Samopražnjenje (mjesečno)	20%	30%	5%	<10%	<10%
Napon čelije	1.25V	1.25V	2V	3.6V	3.3V
Radna temperatura	-40 do 60	-20 do 60	-20 do 60	-20 do 60	-20 do 60
Otrovnost	Visoka	Relativno niska	Visoka		Niska

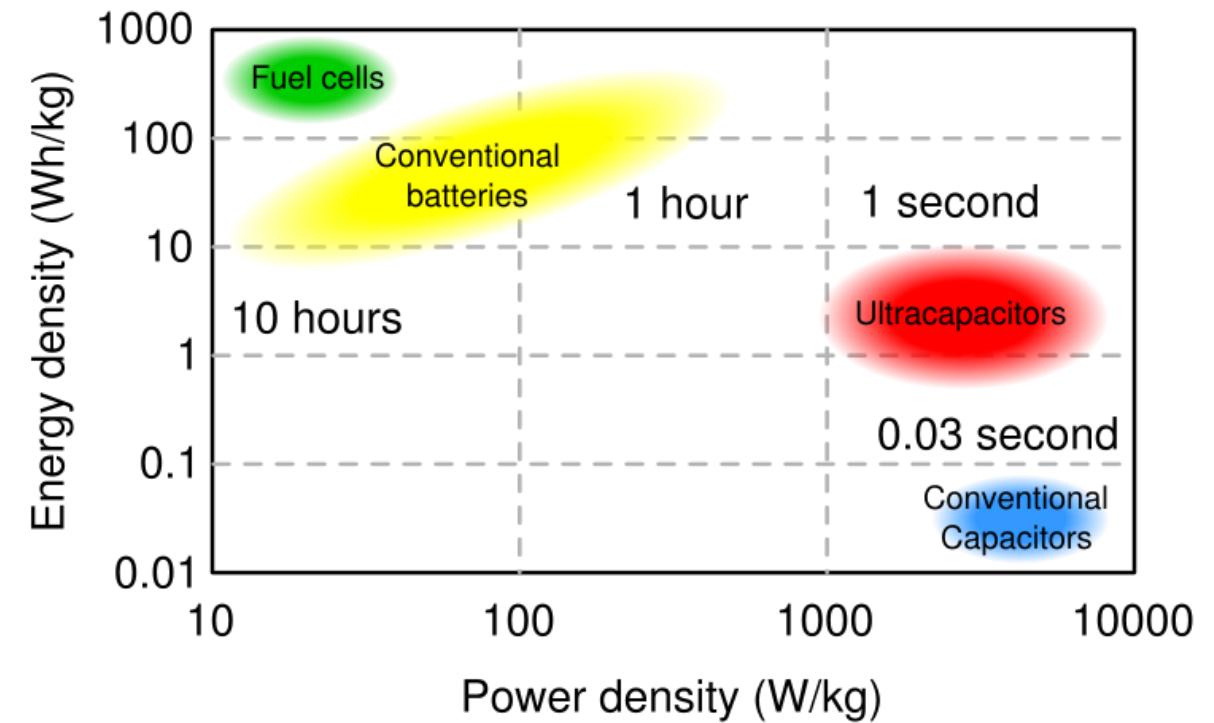


Gustoća pohrane energije

Izvor: Battery University, <http://www.batteryuniversity.com>

Ostali tipovi baterija

- Gorive ćelije (*fuel cells*), protočne ćelije (*flow cells*)
 - Kemijski reaktor koji pretvara kemijsku energiju *goriva* u električnu energiju
 - Najčešće – kemijski procesi *redukcije i oksidacije* (u osnovi, *gorenje*)
 - Redox – ćelije
 - Punjenje – promjena/dopuna rezervoara *goriva*
 - Brzo punjenje – slično vozilima na fosilna goriva
- Superkondenzatori
 - Kondenzatori velike gustoće energije (1000x više u odnosu na klasične kondenzatore)





Tehnologije izvedbe i potrošnja

Uvod

- Pinovi napajanja – V_{CC} ili V_{DD}
- Pinovi uzemljenja – GND ili V_{SS}
- V_{CC}
 - potječe od bipolarnih tranzistora – kolektori tranzistora (C-C) spojeni zajedno na napajanje
- V_{DD}
 - slično, ali s MOSFET-oma – odvodi (*drain*) spojeni zajedno (D-D) na napajanje, uvodi (*source*) spojeni zajedno (S-S) na uzemljenje – V_{SS}
- Često - V_{CC} i GND neovisno o tehnologiji izrade

- Što troši?

- CMOS - $V_{DD} \leftrightarrow V_{SS}$ statički ne troši
- izlaz na ulaz – samo kapacitivni teret

- Parazitni kapaciteti

- pri promjeni stanja (*switching power*),
nabijanje/praznjenje prividnih "kondenzatora", energija/promjena stanja je:

$$E_t = \frac{1}{2} C_L V_{DD}^2 \quad \sim 1 \text{ pJ}$$

- gubi se, prelazi u toplinu

Uvod

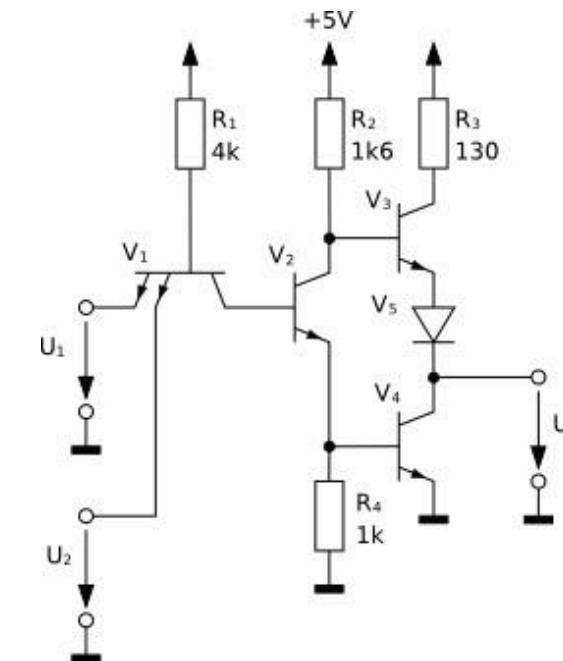
- Potrošnja kratkog spoja (*short-circuit power*)
 - u kratkom trenutku vodi i P i N tranzistor (neznatno u usporedbi s promjenom stanja – 10% do 20%)
- Potrošnja “curenja” (*leakage current*)
 - dio nA po vratima, zanemariv u aktivnom stanju (ali problem kod dugog stajanja)

Potrošnja i tehnologija izvedbe

- Tehnologija izvedbe mikrokontrolera:

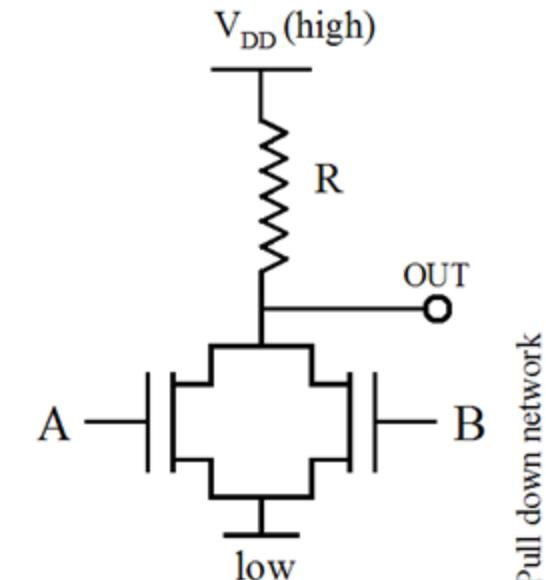
- TTL

- Transistor-Transistor Logic
 - troši i u statickom stanju



- NMOS

- MOSFET tipa N
 - Otpornik manjeg otpora ubrzat će promjenu stanja no porasti će disipacija



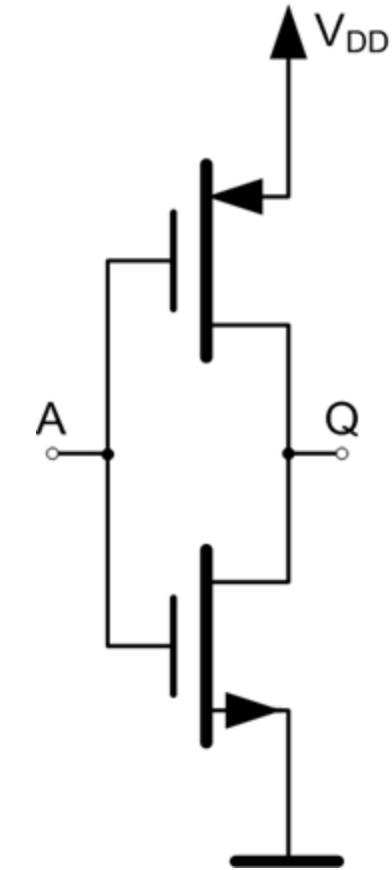
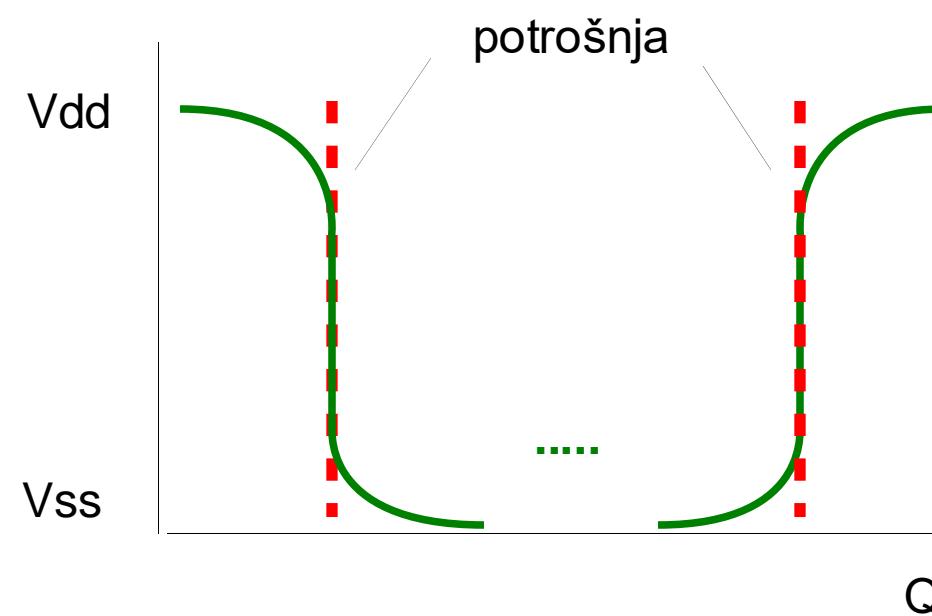
Pull down network

Potrošnja i tehnologija izvedbe

- Tehnologija izvedbe - nastavak

- CMOS (*complementary metal–oxide–semiconductor*)

- Visoka otpornost na smetnje
 - Vrlo niska potrošnja u statičkom stanju (kada nema promjena)
 - Sporost zbog parazitnih kapaciteta



Izvedba - CMOS

$$P_C = \frac{1}{2} f V_{DD}^2 * \sum (A_g C_L^g)$$

f = frekvencija

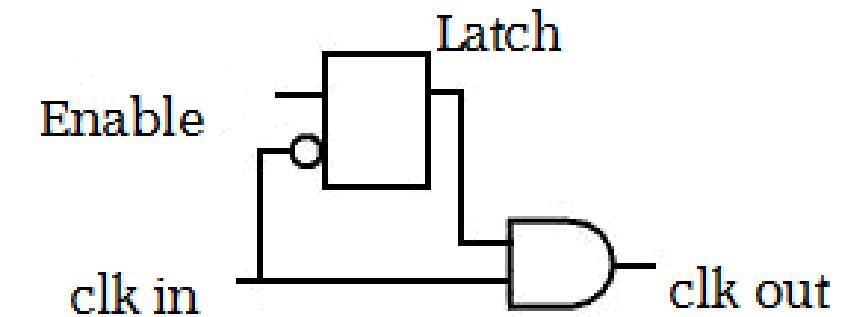
A_g = *activity factor* (linija takta ima $A_g=2$ promjene u taktu)

C_L^g = *gate load capacitance*

- Kapacitet je vezan uz proizvodni proces/tehnologiju dakle projektant ima utjecaj, uz to treba smanjiti:
 - V_{DD} (kvadratno)
 - A_g (isključivati sklopove koji ne rade)
 - broj tranzistora (vrata)
 - frekvenciju takta (pogotovo u kombinaciji s V_{DD})
 - tu je pitanje MIPS/W

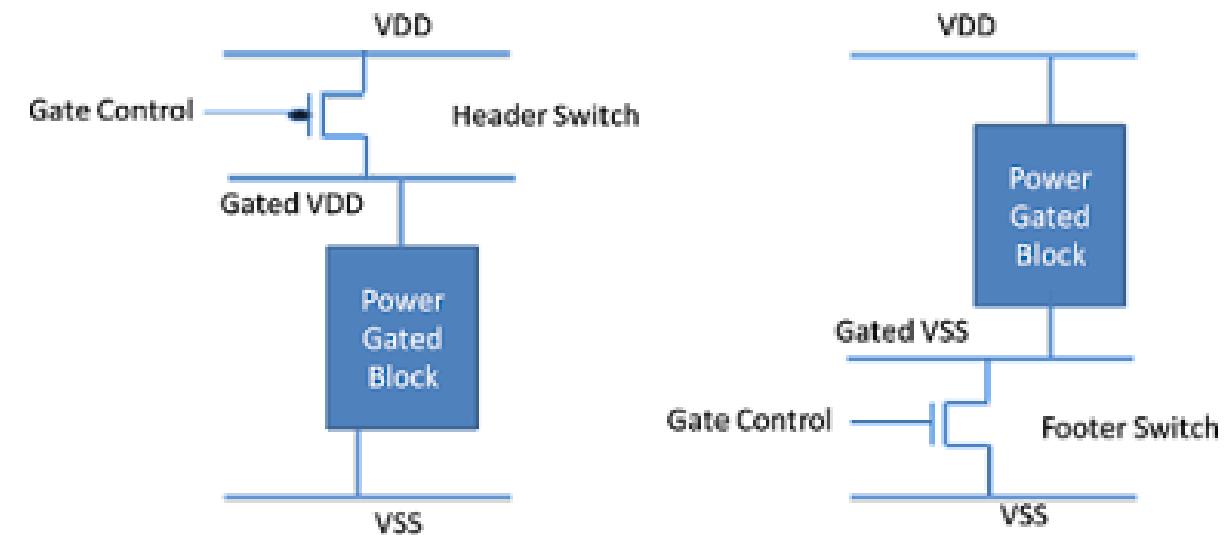
Clock gating

- Upravljanjem dostavom signala vremenskog vođenja dijelovima mikrokontrolera
 - Nema promjena stanja – nema aktivne potrošnje
 - Ostaje uključeno napajanje – potrošnja curenja nije spriječena
 - Brzo uključivanje i isključivanje (stanja su očuvana)



Power gating

- Upravljanje napajanjem pojedinih dijelova mikrokontrolera
 - Automatski od strane mikrokontrolera
 - Programske
- Eliminacija *potrošnje curenja* (nema napona – nema struje :))
- Problemi:
 - Daleko komplikiranija izvedba od *clock gating-a*
 - Izolacija isključenih blokova od aktivnih blokova
 - Sporiji početak rada (stabilizacija napona ...) – *rump-up time*
 - Čuvanje stanja blokova (pohrana u memoriju, napajani dijelovi blokova ...)



Snimanje profila potrošnje

- ULP mikrokontroleri vrlo agresivno koriste clock i/ili power gating za minimizaciju potrošnje energije
 - Vrlo teško teoretski procijeniti potrošnju sklopa
- Praktično – snimanje stvarne potrošnje sklopa po segmentima izvršavanja programa
- Ispitivanje ponašanja sklopa pod različitim stanjima napajanja i potrošnje
- Procjena trajanja rada sklopa na baterijskom napajanju

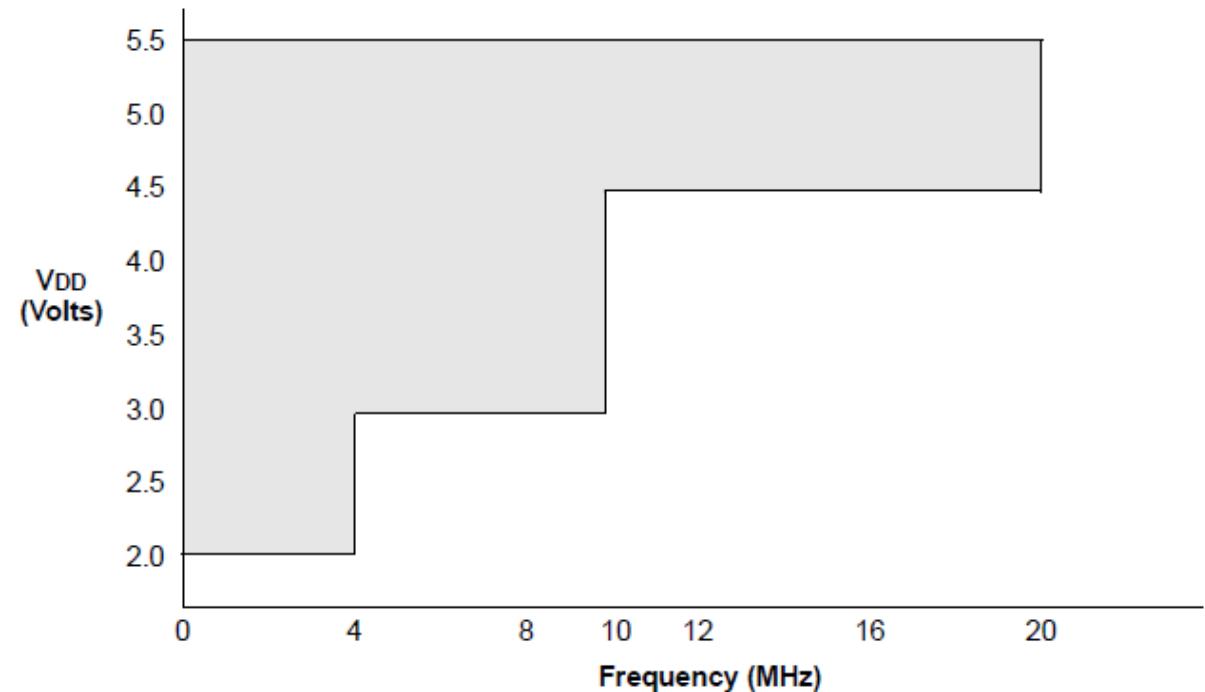




Upravljanje potrošnjom

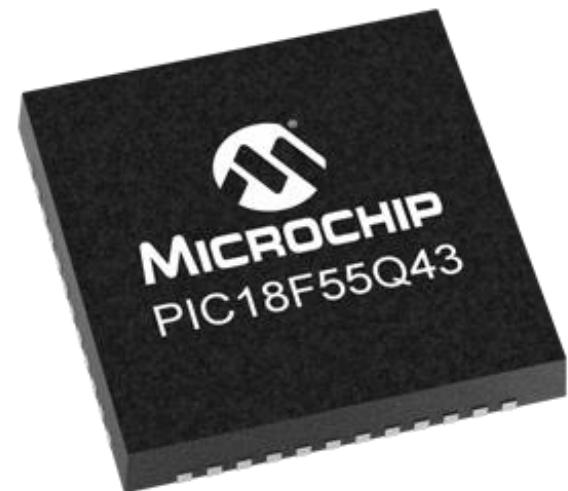
Potrošnja i napon / frekvencija

- Napon napajanja (V_{DD} , V_{CC}):
 - Minimalni potreban napon napajanja ovisi o ciljanoj frekvenciji
 - Viša željena frekvencija rada traži viši napon napajanja za pouzdan rad, što neminovno rezultira višom potrošnjom
- Proizvođač definira dopuštene kombinacije napona napajanja i radnog takta
 - npr. za PIC12F675, $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 125^{\circ}\text{C}$



PIC modovi rada

- Načini rada kod mikrokontrolera PIC18
 - spavanje (*sleep*) – jezgra i vanjske jedinice ignoriraju takt
 - mirovanje (*idle*) – jezgra ignorira takt, vanjske jedinice rade na vanjskom ili internom taktu
 - izvođenje (*run*) – jezgra i vanjske jedinice rade na vanjskom ili internom taktu
- Prelazak na niži takt oscilatora
 - većina mikrokontrolera ima mogućnost korištenja alternativnog (unutarnjeg ili vanjskog) oscilatora nižeg takta
 - u trenutku kad više nije potrebno brzo izvođenje, prelazi se na niži takt (npr. 32 kHz)



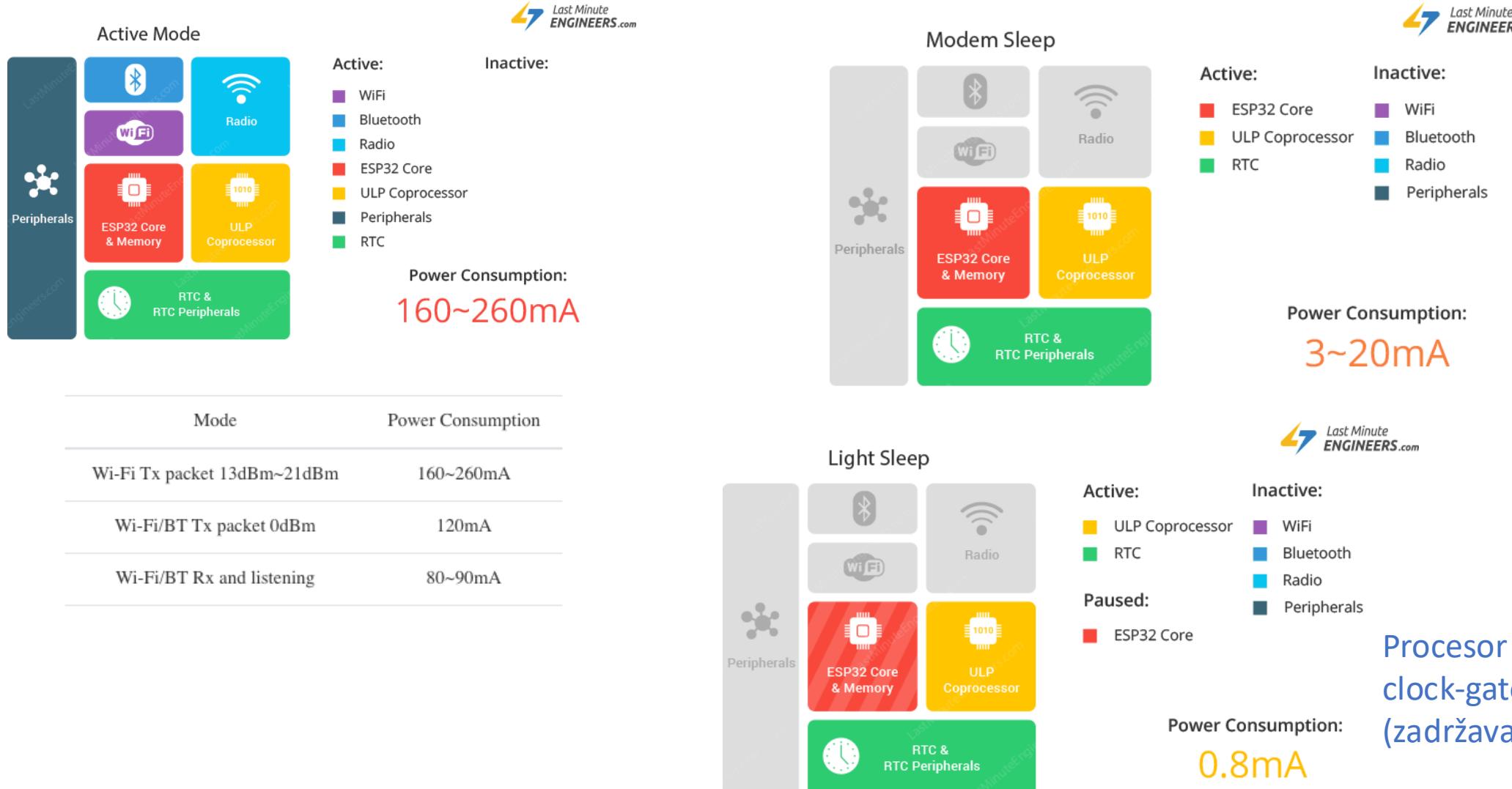
ESP32 modovi rada



Modovi rada ESP32:

1. Active Mode
2. Modem Sleep Mode
3. Light Sleep Mode
4. Deep Sleep Mode
5. Hibernation Mode

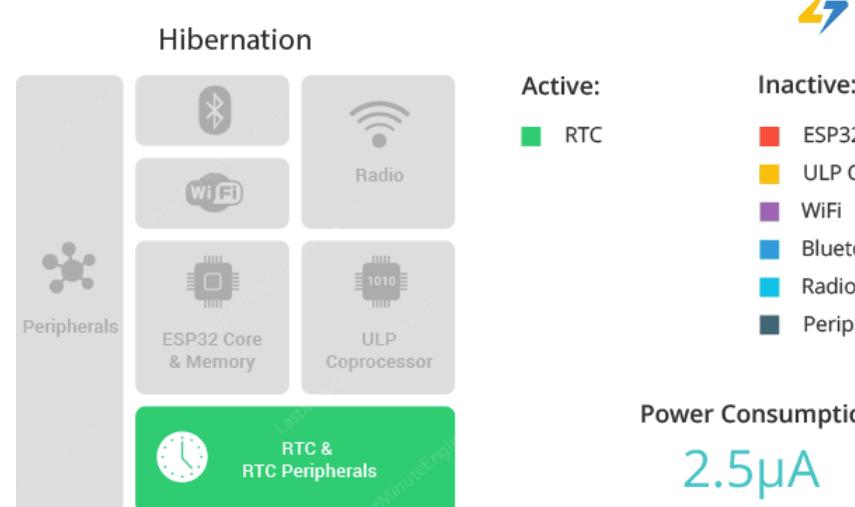
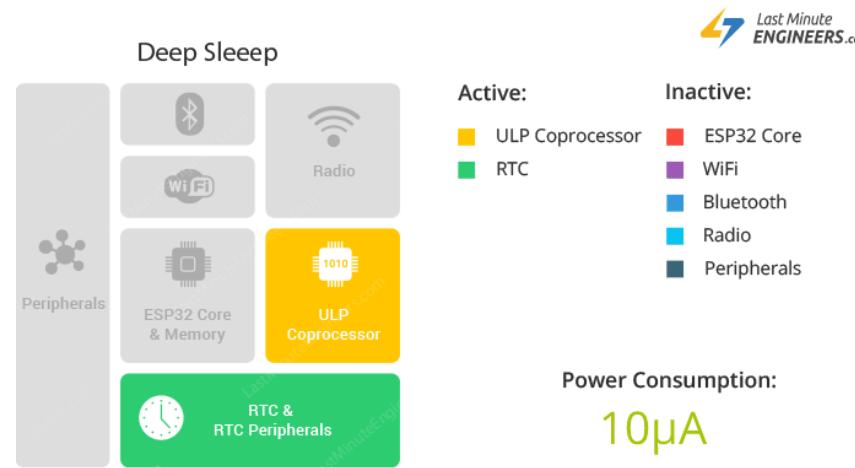
ESP32 modovi rada



Izvor: <https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>

Procesor i memorija
clock-gated
(zadržavaju stanje)

ESP32 modovi rada



- Upravljanje frekvencijom signala vremenskog vođenja

Procesor i memorija
power-gated (gubi se stanje),
čuva se stanje memorije u RTC-u

Snaga ili energija?

Prevelika potrošnja s obzirom na izvor napajanja

- brownout?
- oštećenje izvora?

