



OSNOVE DIGITALNE ELEKTRONIKE

**Digitalno-analogna i
analogno-digitalna
pretvorba**

Zdravko Kunić
zdravko.kunic@racunarstvo.hr



Analogno-digitalna pretvorba

Ishod
učenja 9

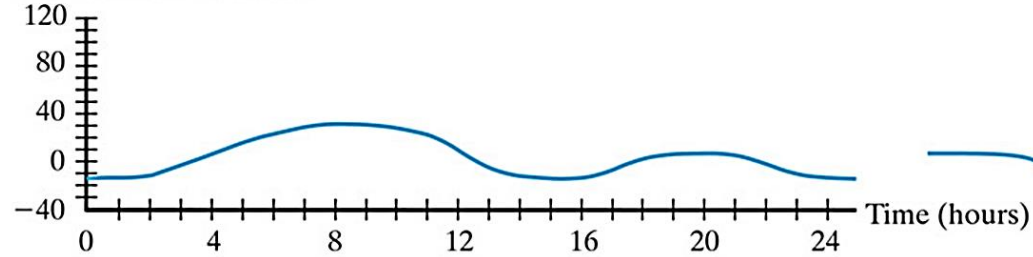
Nacrtati shemu i objasniti rad DA i AD pretvornika. Detaljno objasniti način rada i sastavnice digitalno-analogne i analogno-digitalne pretvorbe

Sadržaj predavanja

- Odnosi analognih i digitalnih sustava
- Karakteristike pretvorbe
- Operacijsko pojačalo
- DA pretvorba
- AD pretvorba

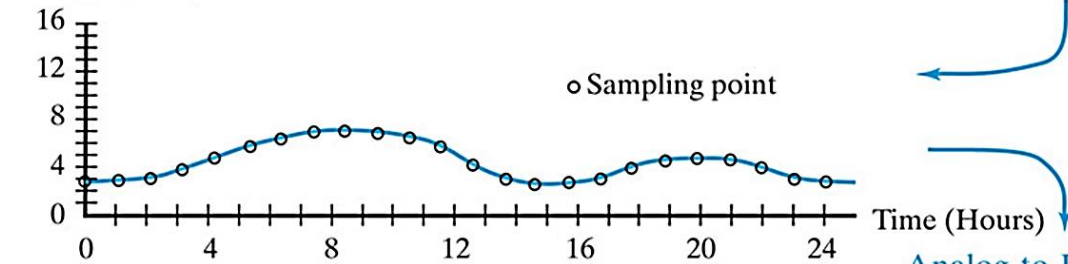
AD konverzija

Temperature (degrees F)



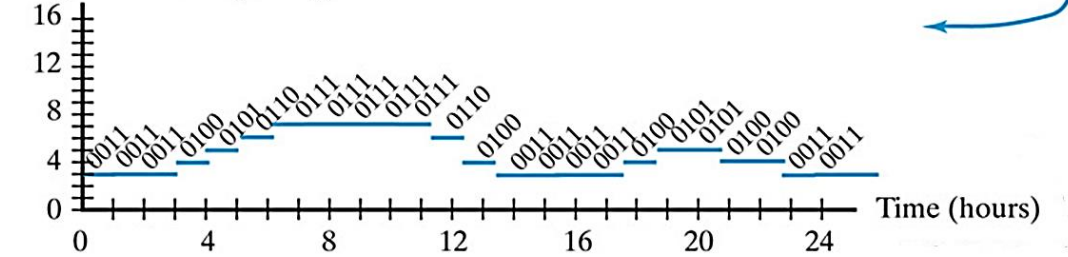
(a) Analog temperature

Voltage (Volts)



(b) Continuous (analog) voltage

Digital numbers (binary)



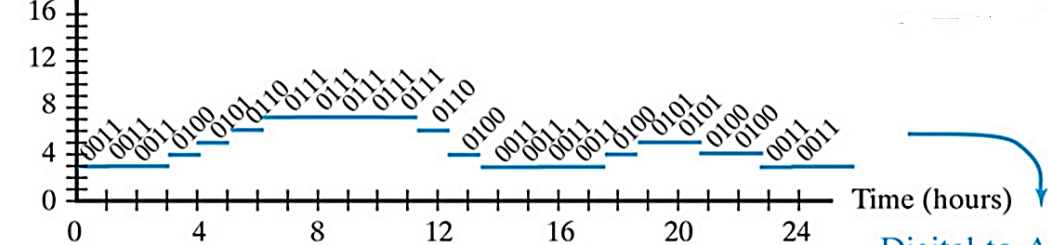
(c) Digital voltage

Sensor and
Signal Conditioning

Analog-to-Digital
(A/D) Conversion

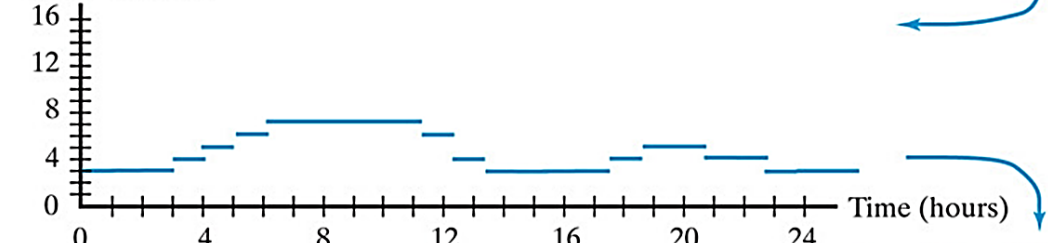
DA konverzija

Digital numbers (binary)



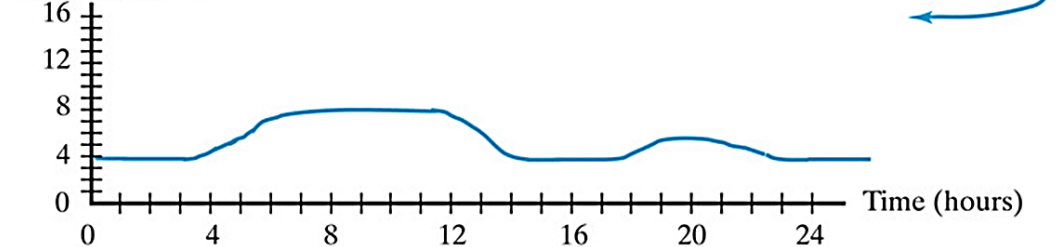
(c) Digital voltage

Voltage (volts)



(d) Discrete (digital) voltage

Voltage (volts)



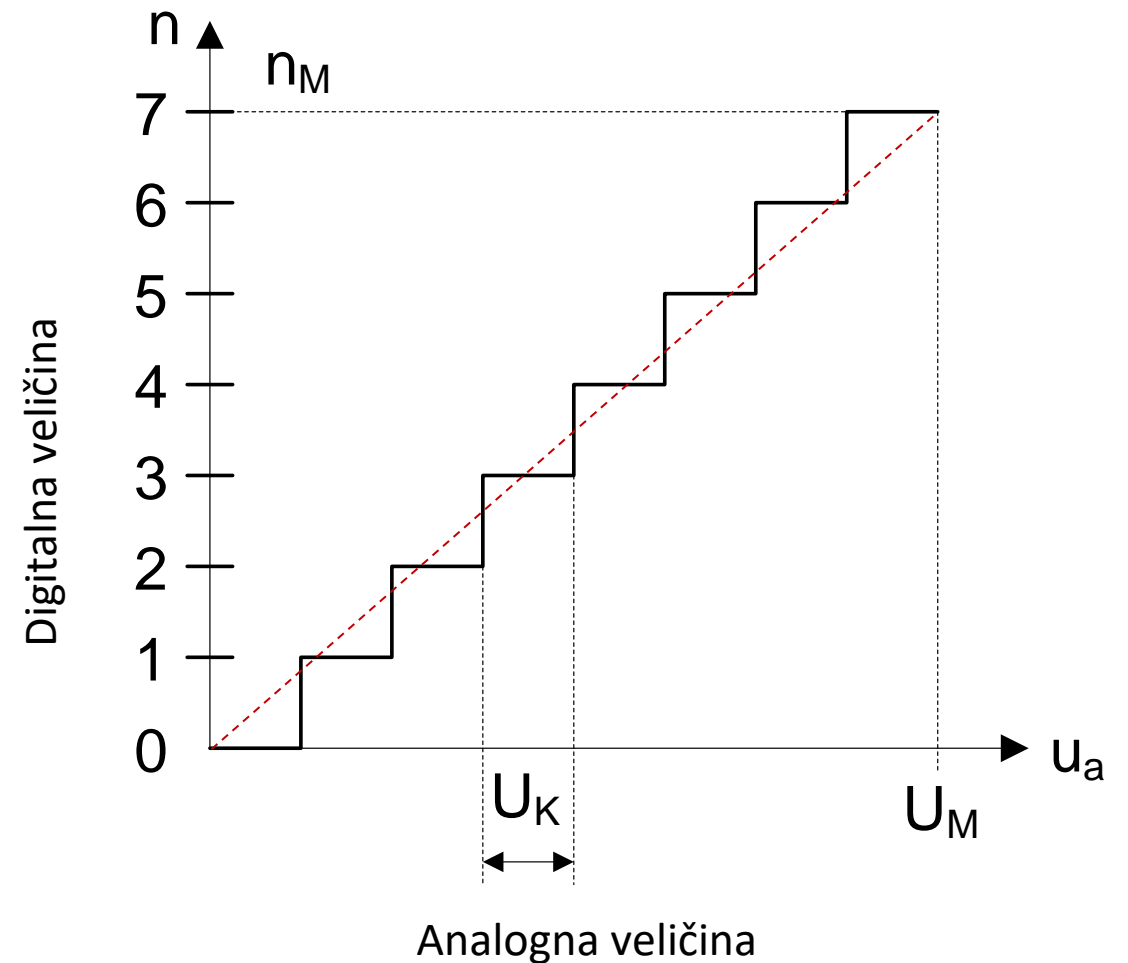
(e) Continuous (analog) voltage

Digital-to-Analog
(D/A) Conversion

Signal Conditioning

Idealna karakteristika AD pretvorbe

- U_K : kvant, naponski interval, korak, kanal
- U_M : maksimalna vrijednost ulaznog napona
- broj koraka (kanala) određuje rezoluciju ADC



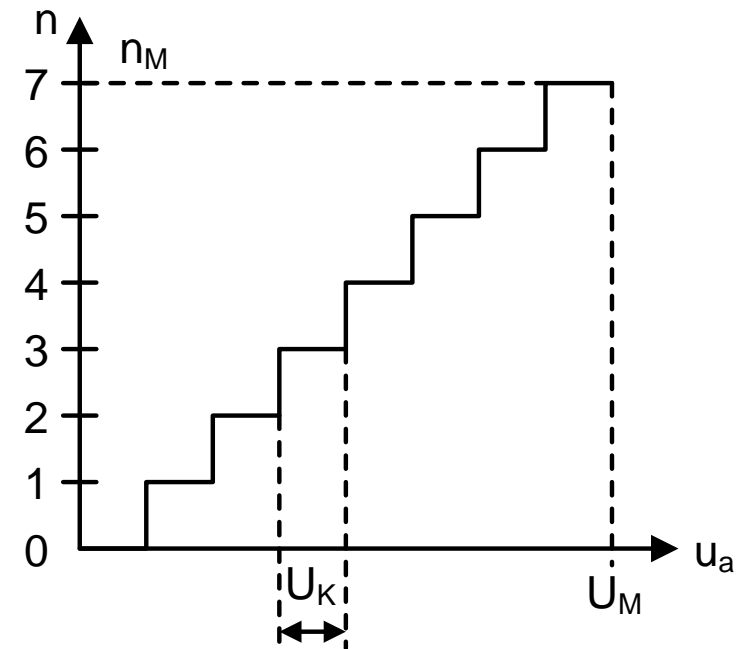
Parametri pretvorbe

- Rezolucija, razlučivanje
- Točnost
- Pogreška kvantizacije
- Vrijeme pretvorbe

Rezolucija, razlučivanje

Širina koraka kao postotak maksimalnog ulaznog analognog napona: $rez = U_k / U_M$

- najmanja moguća promjena izlazne veličine izazvana promjenom binarne kombinacije od 1 bita na ulazu
- Budući da **ovisi samo o broju bitova**, rezolucija se uobičajeno izražava kao broj bitova ulaznog ili izlaznog digitalnog podatka



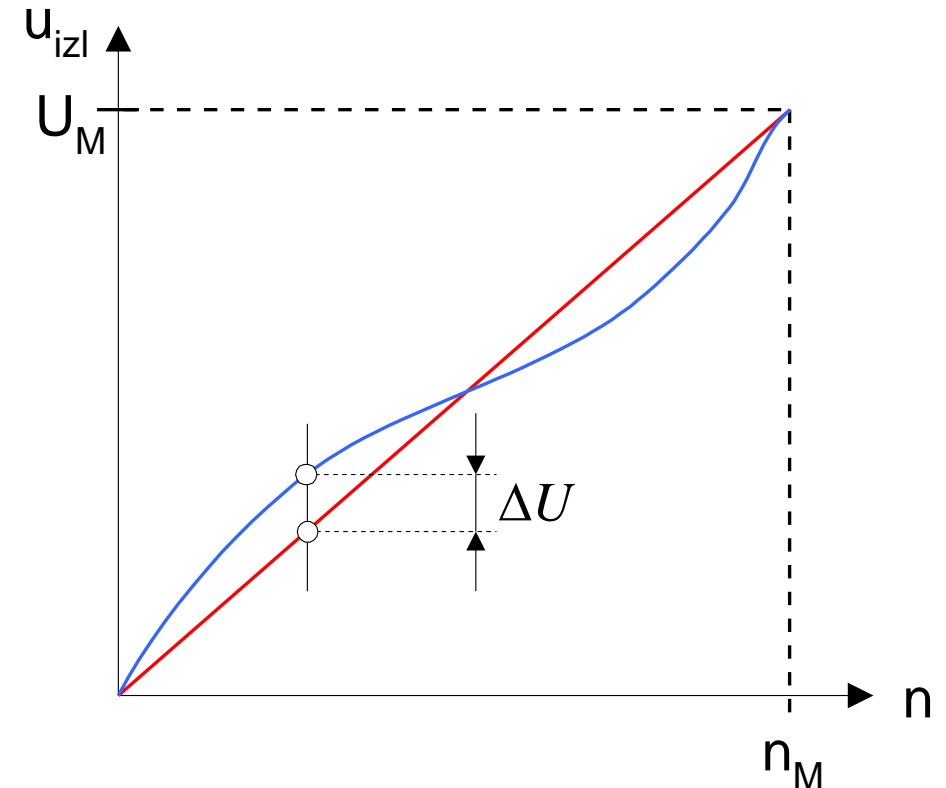
Točnost

Mjera za razliku između stvarnog i idealnog analognog izlaza DA pretvornika

- ako se najveće odstupanje označi s ΔU onda je **granica pogreške** (integralna nelinearnost) jednaka:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta U}{U_M}$$

- u praksi se tipično postižu točnosti od 10^{-2} do 10^{-3}



Pogreška kvantizacije

Kvantizacija je mjerni proces u kojem se utvrđuje koliko je standardnih mjernih jedinica sadržano u mjerenoj veličini

- **Pogreška kvantizacije** proizlazi iz diskretnog karaktera procesa AD konverzije
- Budući da se u svakom intervalu samo jedna točka može smatrati pravom vrijednošću analognog napona kojem je pridružen broj n , druge vrijednosti napona označavaju pogrešku razmjernu udaljenosti od centra:

$$\varepsilon_K = \pm \frac{U_K}{2}$$

U_K = širina jednog kvanta

Vrijeme pretvorbe

Vrijeme koje protekne od početka procesa konverzije do trenutka u kojem izlaz zauzme svoju konačnu vrijednost

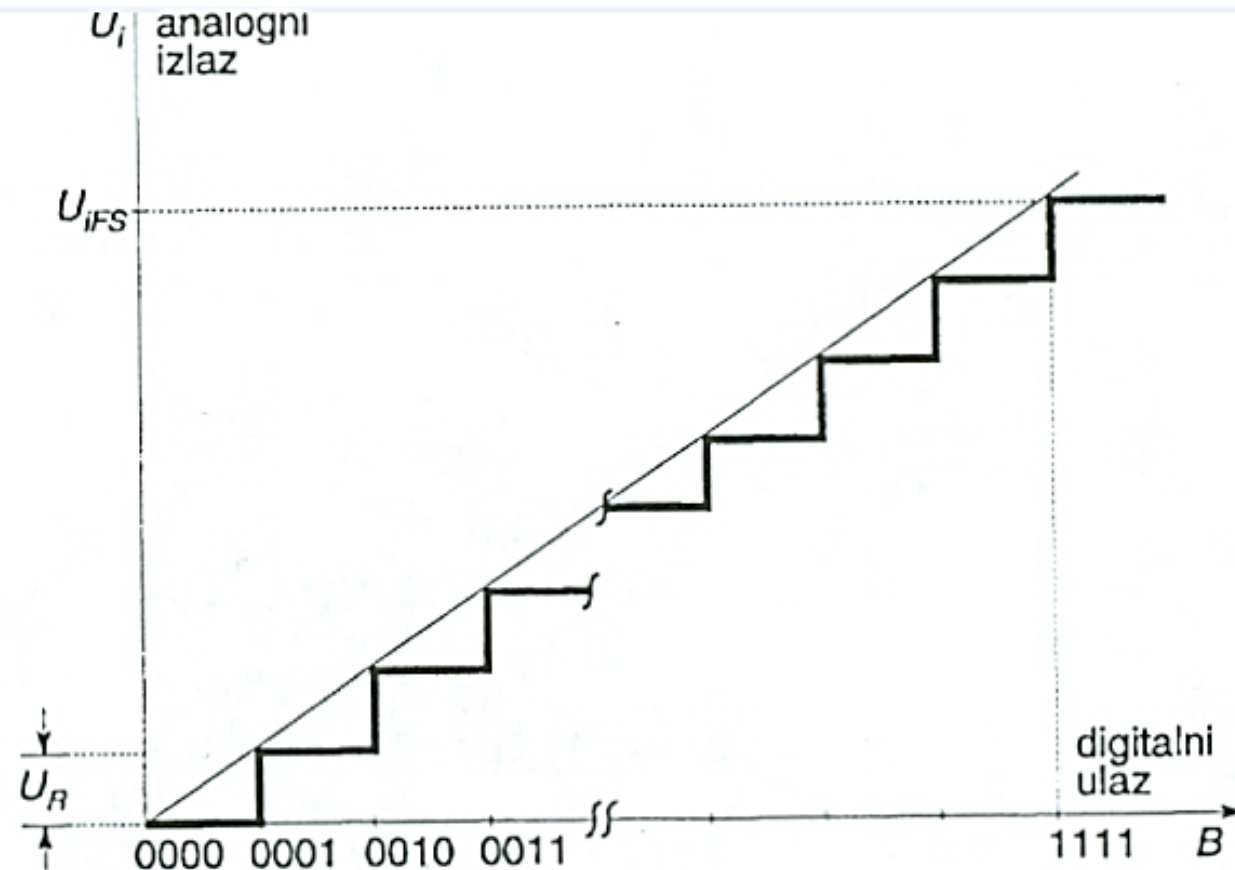
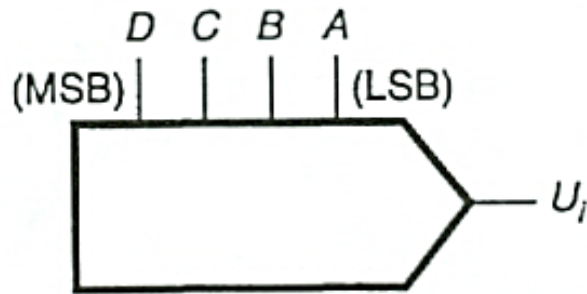
- za AD-pretvornike
 - od nekoliko desetaka nanosekundi do nekoliko sekundi
- za DA pretvornike
 - nekoliko stotina nanosekundi

Digitalno-analognna pretvorba

Postupak kojim se **digitalna veličina** (binarni signal) pretvara u **napon** ili **struju** proporcionalnu digitalnoj veličini

- Svakoј vrijednosti ulazne veličine odgovara točno određena vrijednost izlaznog napona ili struje
 - 4-bitni DA pretvornik može pretvoriti digitalni zapis u jednu od 16 analognih razina
- Pretvorba se principijelno obavlja korištenjem:
 - otporničkih mreža
 - sklopki koje predstavljaju digitalna stanja
 - operacijskih pojačala

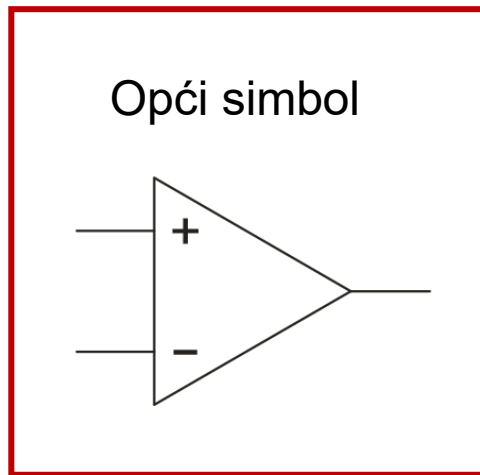
DA pretvorba (engl. *Digital-to-Analog Conversion*, DAC)



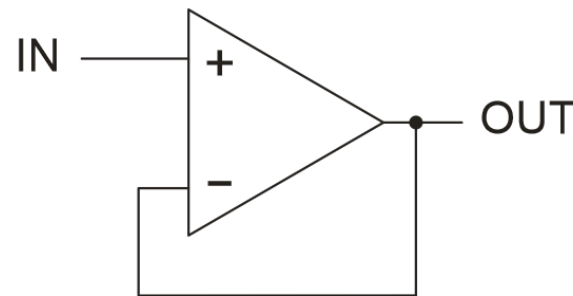
Operacijsko pojačalo *(engl. Operational Amplifier, OPAMP)*

Elektronički sklop s **dva ulaza** i **jednim izlazom** kontroliran **povratnom vezom** koja u cijelosti određuje njegova svojstva.

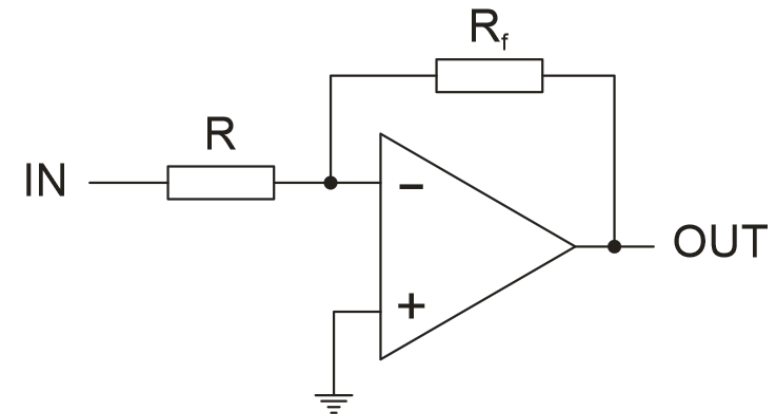
U digitalnoj elektronici se najčešće koristi u sljedeća dva oblika:



**Neinvertirajuće
pojačalo (buffer)**



**Invertirajuće
pojačalo**



Operacijsko pojačalo *(engl. Operational Amplifier, OPAMP)*

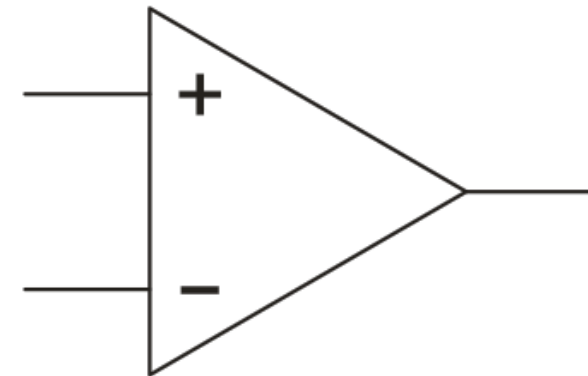
Pravila važna za razumijevanje rada operacijskog pojačala:

1. Struja ne teče između dva ulaza

- ulazni otpor je vrlo velik (beskonačan u idealnom sklopu)

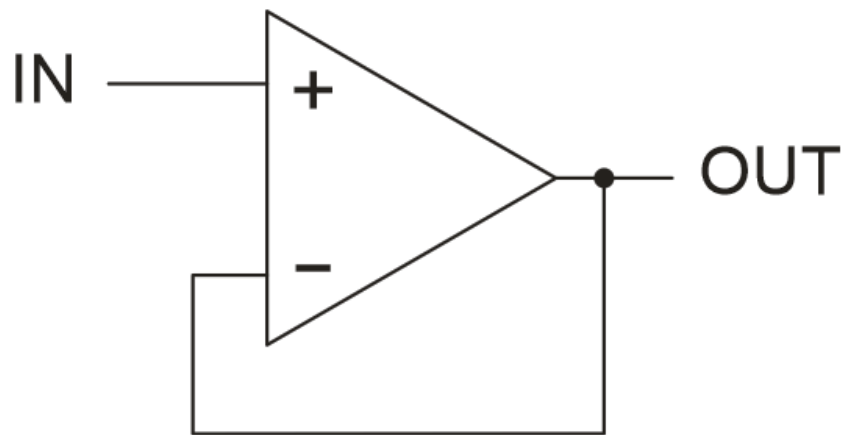
2. OPAMP teži izjednačavanju napona na oba ulaza

- Ako dovedemo određeni napon na jedan od ulaza, sklop će težiti dovođenju drugog ulaza na taj isti napon.



Neinvertirajuće operacijsko pojačalo

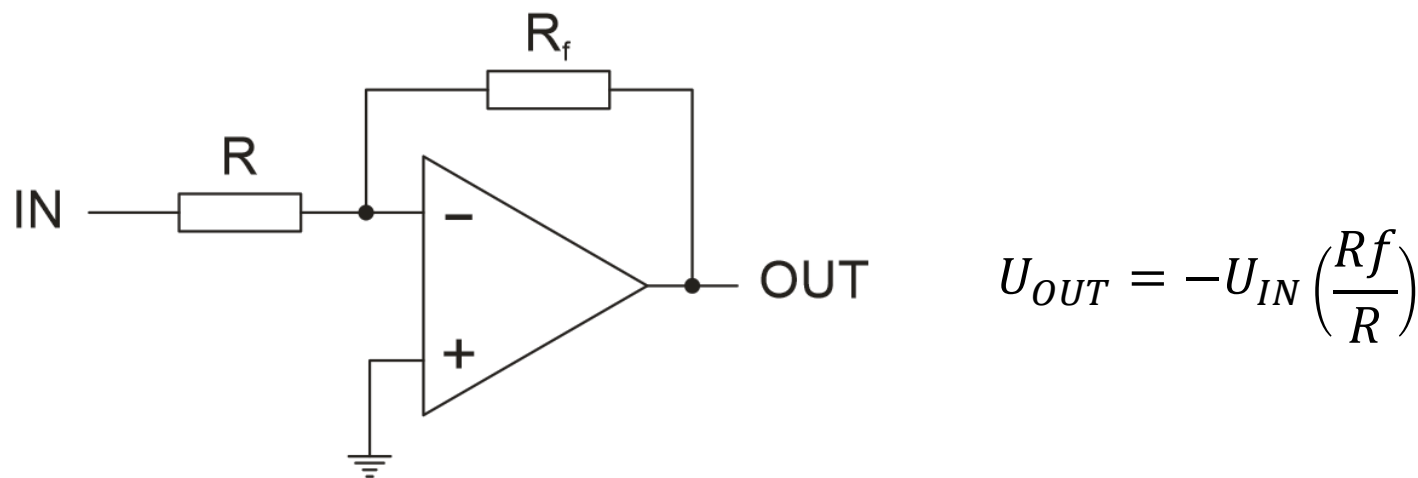
- **Pojačanje = 1** (izlazni napon je jednak ulaznom)
- **Ne invertira** ulazni signal
- **Ulazni signal** se dovodi direktno na **pozitivni (neinvertirajući)** ulaz
- **Izlaz** je povratnom vezom spojen s **negativnim (invertirajućim)** ulazom



- Sklop teži izjednačavanju napona na oba ulaza, čime se i napon na izlazu proporcionalno prilagođava naponu ulaza ($U_{OUT} = U_{IN}$)

Invertirajuće operacijsko pojačalo

- Pojačanje ovisi o omjeru otpora otpornika spojenih na ulaz/izlaz
- Invertira ulazni napon
- **Ulazni signal se preko otpornika** dovodi na **negativni** ulaz operacijskog pojačala
- **Izlaz se povratnom vezom preko otpornika** također dovodi na **negativni** ulaz



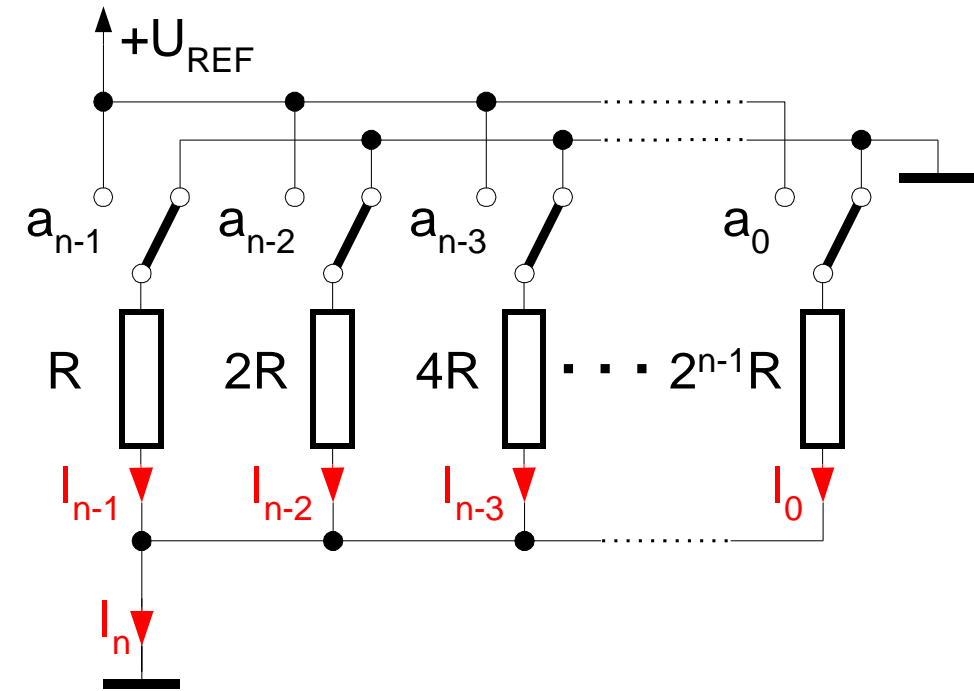
- Operacijsko pojačalo prilagođava napon invertirajućeg ulaza naponu na neinvertirajućem ulazu (nula V). **Izlazni napon je negativan.**

DA pretvornik s težinskim otporima

- Analogna veličina na izlazu sklopa je **struja**

$$I_n = U_{REF} \cdot \left(\frac{a_{n-1}}{R_{n-1}} + \frac{a_{n-2}}{R_{n-2}} + \dots + \frac{a_0}{R_0} \right)$$
$$= \frac{U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0)$$

- Ako vrijednosti otpornika odredimo **obrnuto proporcionalno** težinskim vrijednostima binarnih brojnih mjesta, struja kroz njih će biti proporcionalna težinskom omjeru aktivnih (**1**) i neaktivnih (**0**) digitalnih vrijednosti:
- Uobičajeno se kao veličina na analognom izlazu očekuje **napon**



a_0 = LSB (Least Significant Bit)
 a_{n-1} = MSB (Most Significant Bit)

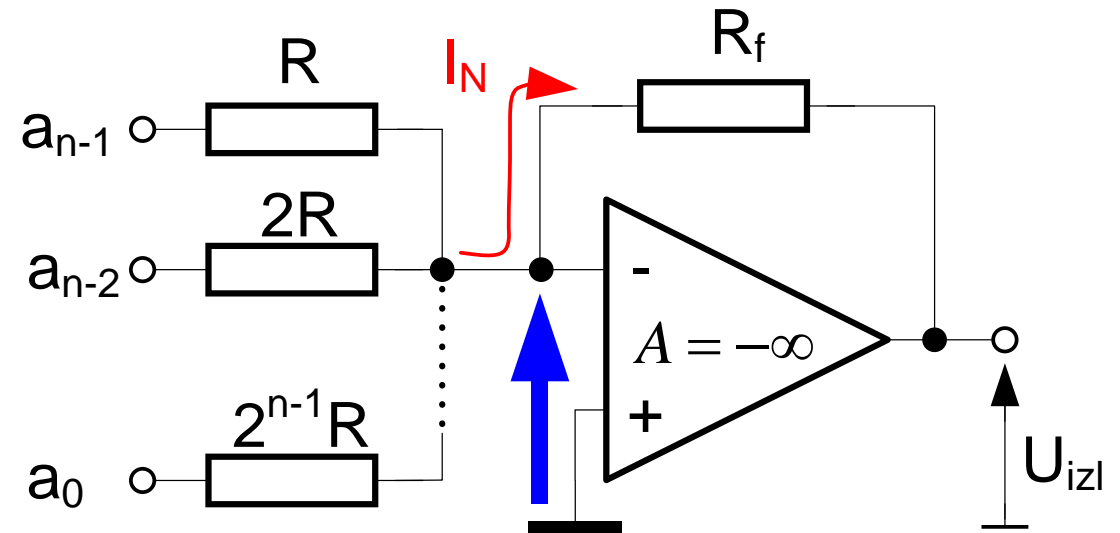
Kako na izlazu DA pretvornika umjesto jakosti struje dobiti proporcionalnu veličinu napona?

Naponski izlaz DA pretvornika

- napon možemo jednostavno izračunati iz struje ako su nam poznate veličine otpora R i R_f
- operacijsko pojačalo djeluje kao pretvornik jakosti struje u napon:

- Za aktivne bitove se zbrajaju struje kroz pripadajuće otpornike
- ukupna struja I_N stvara na R_f pad napona: $U_{izl} = -I_N \cdot R_f$

$$U_{izl} = -U_{REF} * \left(\frac{R_f}{R}\right) * \left(\frac{B}{2^{n-1}}\right)$$



Nedostatci pretvornika s težinskim otpornicima

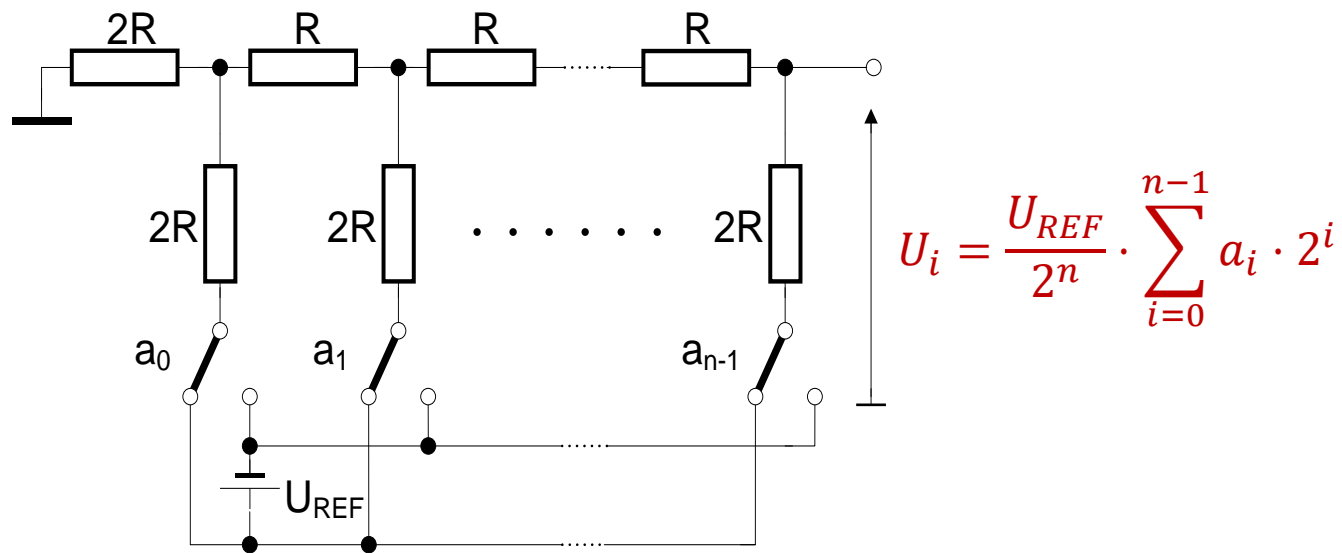
- DA pretvornik s težinskim otpornicima je zahtjevno realizirati za velik broj bita, pogotovo u integriranoj tehnici
- Vrijednost najvišeg i najnižeg otpornika razlikuje se za faktor 2^{n-1}
 - Za 8 bitova se otpor najvećeg i najmanjeg otpornika razlikuje 128 puta

Rješenje:

Ljestvičasta otpornička mreža
u kojoj otpori nisu težinski

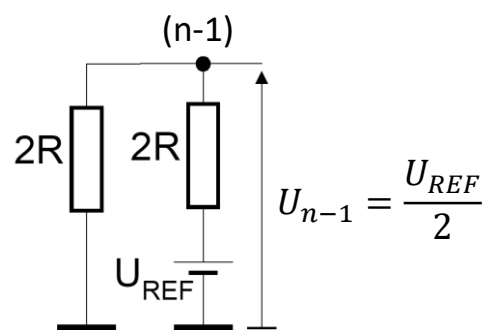
Ljestvičasta otpornička mreža

- Koristi samo dvije vrijednosti otpora: **R** i **2R**
- Za isti n potrebno je 2 puta više otpornika od mreže s jednostrukim težinskim otporima, ali **nestaje problem tolerancije vrijednosti otpornika** nastao zbog velikih razlika u redovima veličine otpora.

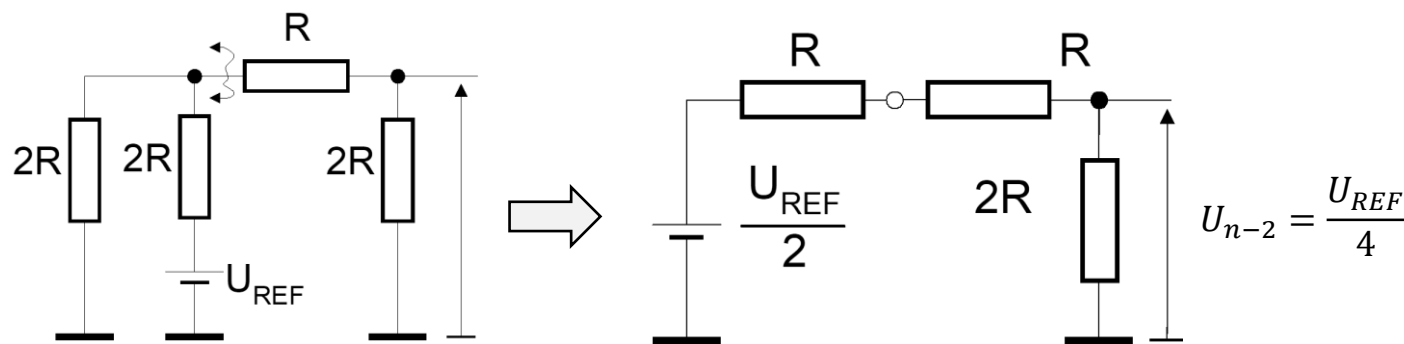


Ljestvičasta otpornička mreža

- Izlazni napon je funkcija broja bitova (članova), $U = f(N)$
- Lijevo od promatranog čvora a_i otpor možemo nadomjestiti s R
 - **Théveninov teorem:** cijela preostala mreža osim onog elementa/grane koja nas zanima, se može zamijeniti s jednim realnim izvorom napona U unutarnjeg otpora R
- doprinosi pojedinih bitova određuju se metodom superpozicije
 - **Metoda superpozicije:** u aktivnoj linearnoj mreži (u kojoj ima više izvora) struja u nekoj grani je jednaka algebarskom zbroju svih struja koje bi u toj grani dali pojedini izvori

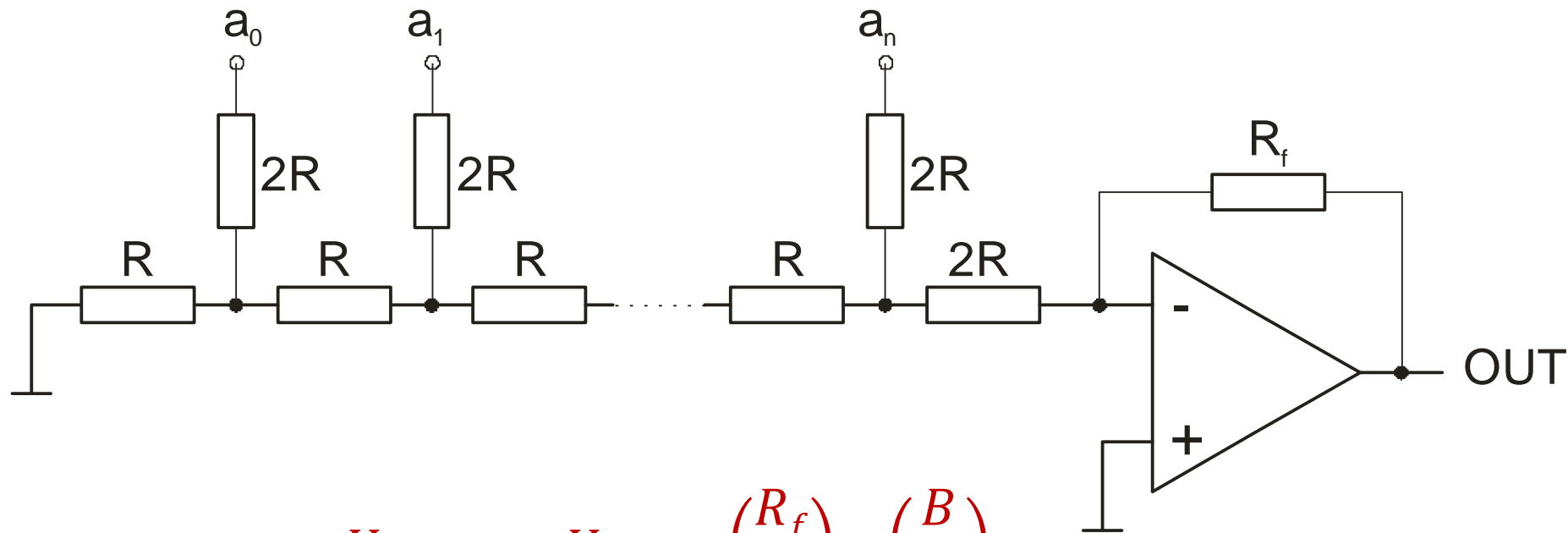


Ekvivalentni sklop za izračunavanje doprinosa (n-1)-og člana



Ekvivalentni sklopovi za izračunavanje doprinosa (n-2)-og člana

DAC s ljestvičastom otporničkom mrežom i operacijskim pojačalom



$$U_{OUT} = -U_{REF} * \left(\frac{R_f}{R}\right) * \left(\frac{B}{2^n}\right)$$

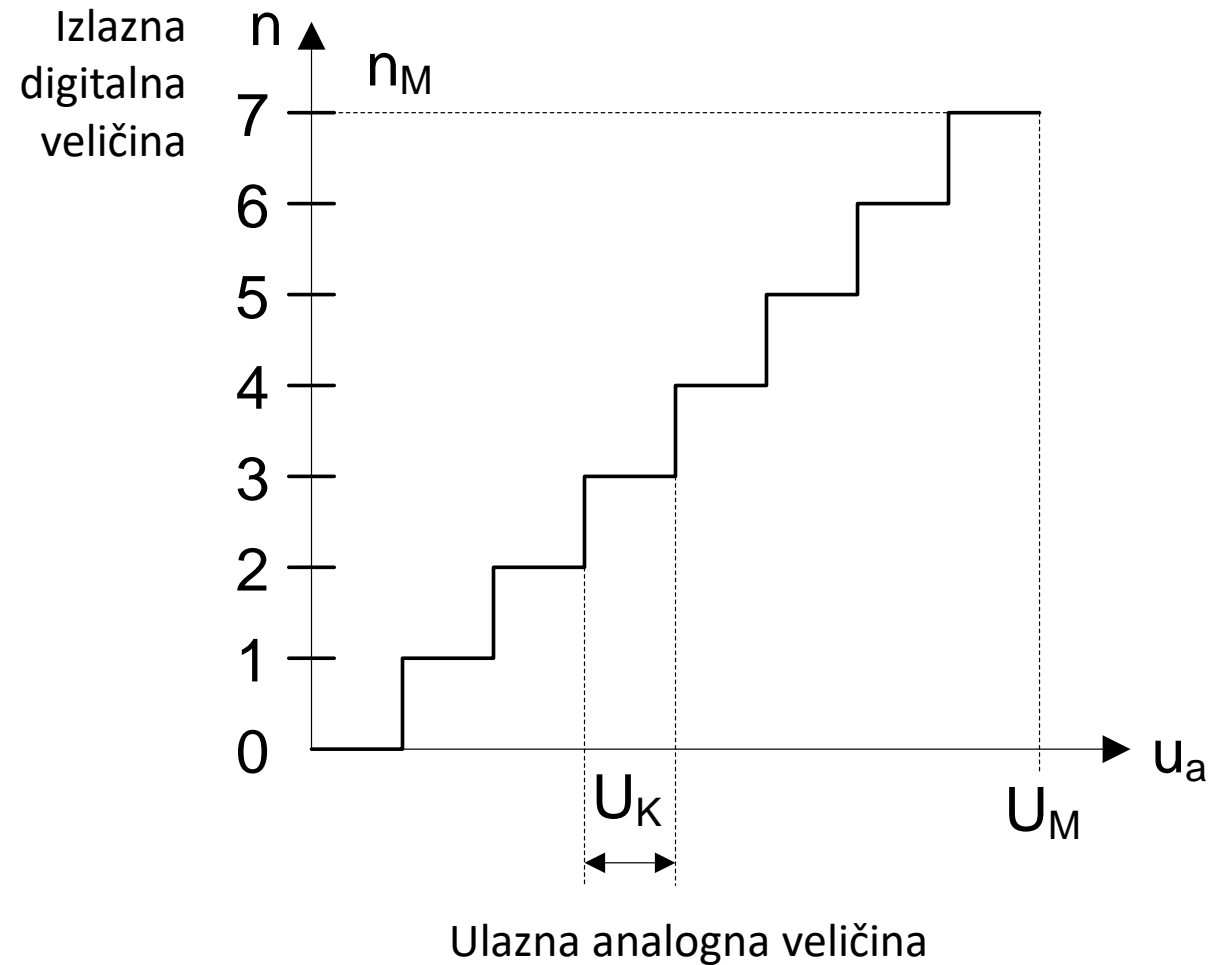
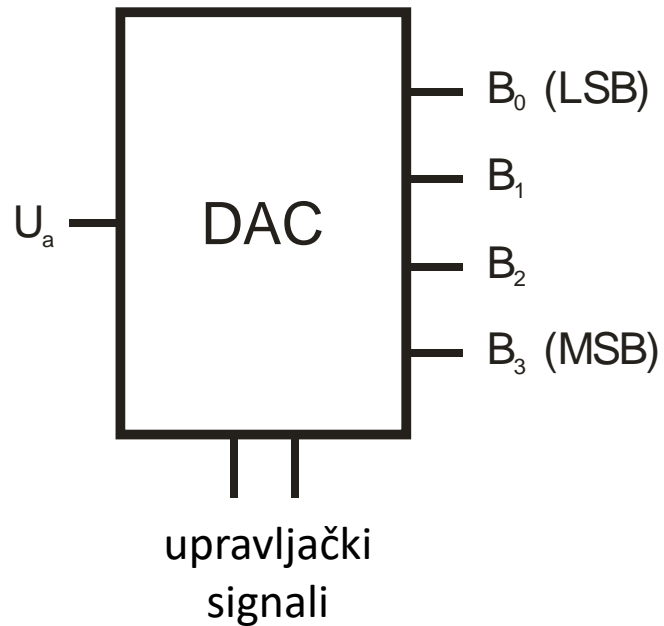
B predstavlja decimalnu vrijednost binarnog broja a ($a_0 \dots a_n$)

Analogno-digitalna pretvorba (AD)

Postupak kojim se **analogna** veličina (uobičajeno napon ili struja) pretvara u **digitalnu**

- Postupak je složeniji od DA pretvorbe
- Analognu veličinu predstavlja amplituda ulaznog signala
- Digitalnu veličinu predstavlja n -bitni binarni zapis
- Izlazna karakteristika je po obliku istovjetna karakteristici DA pretvornika

Analogno-digitalna pretvorba

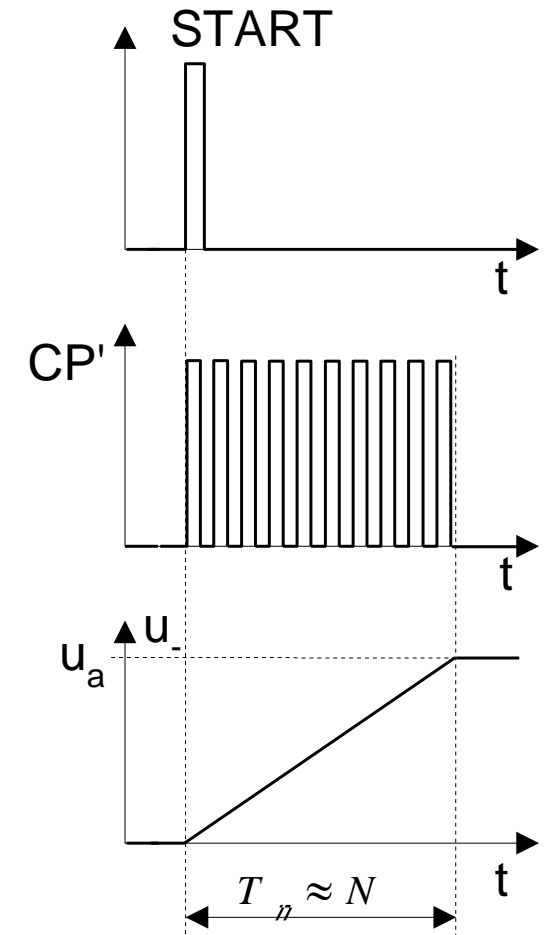
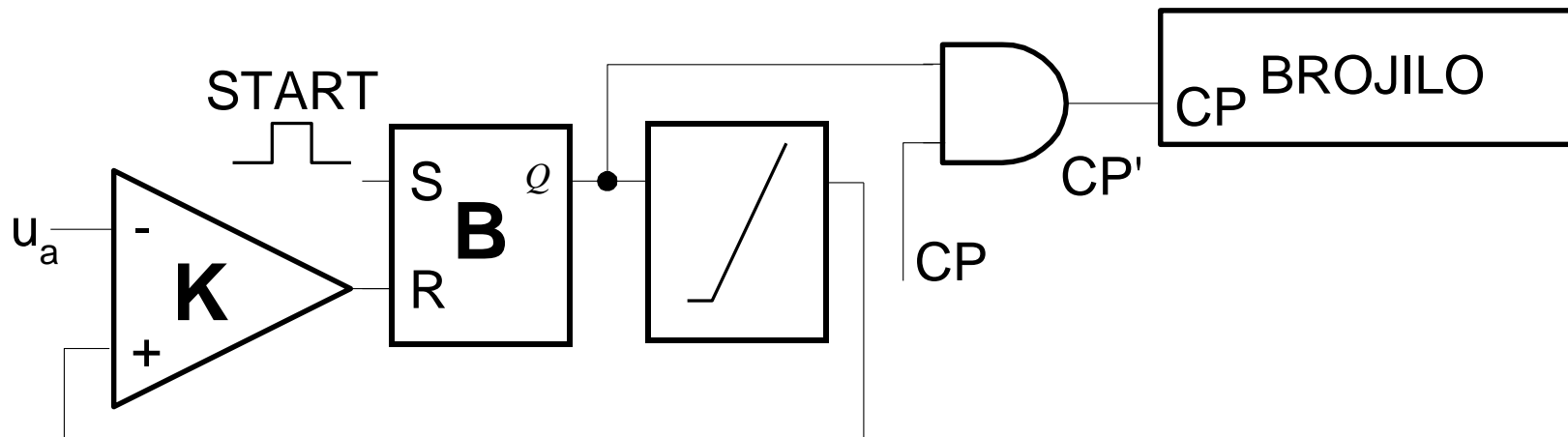


Vrste analogno-digitalnih pretvornika

- Wilkinsonov AD pretvornik
- Brojeći AD pretvornik
- AD pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom
- Slijedni AD pretvornik
- Paralelni komparatorski AD pretvornik

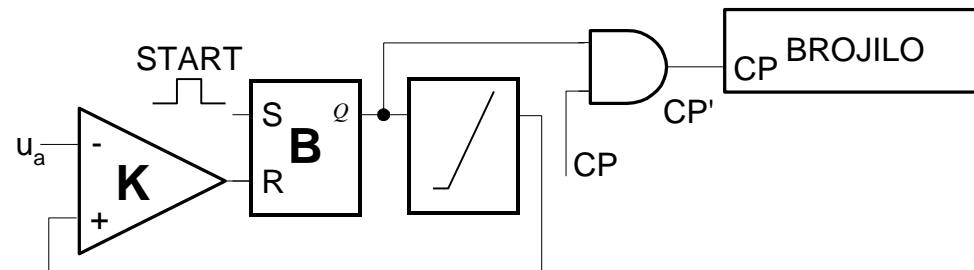
Wilkinsonov AD-pretvornik

- **Dinamički** pretvornik s ugrađenim brojilom
 - Pretvara napon u vremenski interval
- Dok brojilo broji generira se pilasti napon
- Komparator K uspoređuje pilasti napon s U_a
 - Pretvorba završava resetiranjem bistabila kad pilasti napon naraste do vrijednosti ulaznog napona U_a



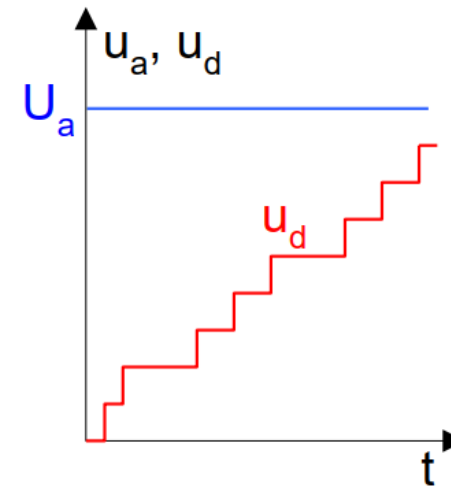
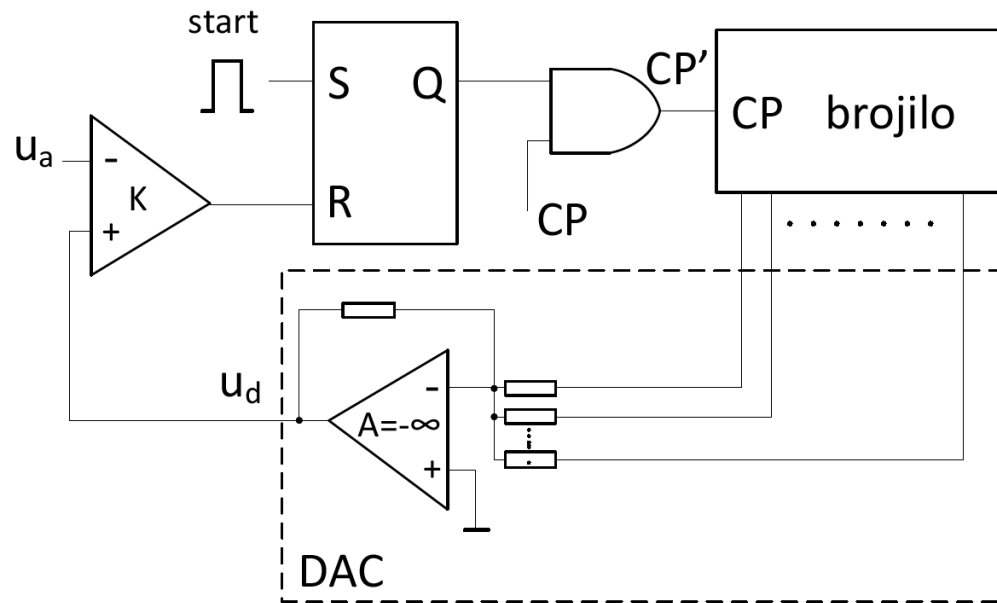
Problemi Wilkinsonovog pretvornika

- pretvorba je **indirektna** – obavlja se preko vremena!
- generiran pilasti napon obično nije potpuno linearan, što rezultira pogreškama pri pretvorbi jer je $U_d \neq U_a$
- potrebno je osigurati konstantnu (točnu, stabilnu) frekvenciju CP
- impulsi START i CP moraju biti sinkronizirani



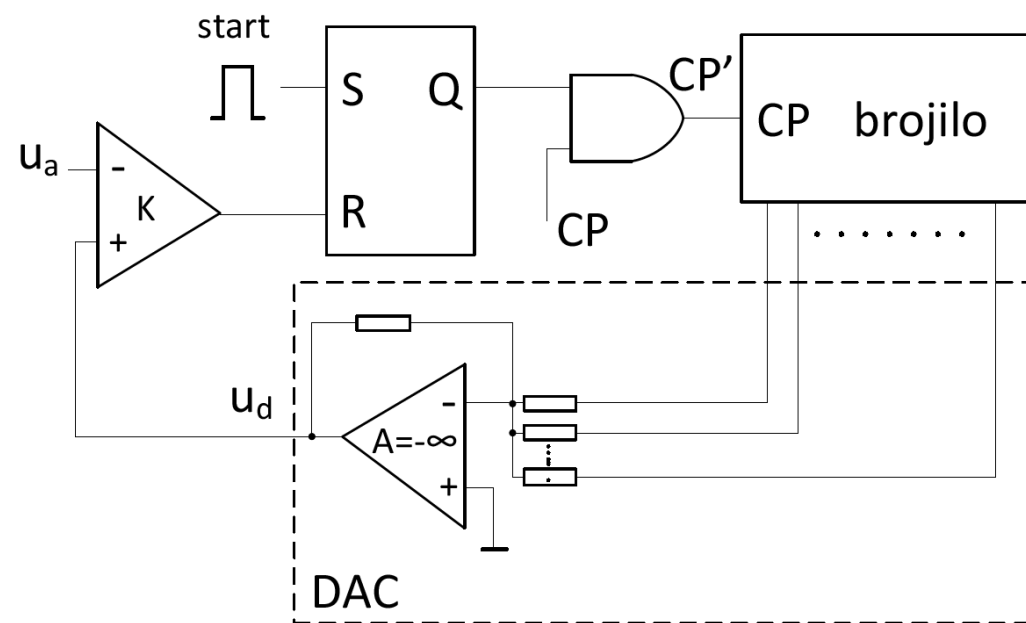
Brojeći AD pretvornik (engl. *Counter Type ADC*)

- Modificirani Wilkinsonov pretvornik
 - umjesto generatora pilastog napona koristi se DA pretvornik s otporničkom mrežom
 - eliminirana potreba za točnom i stabilnom frekvencijom CP (f_{CP})



Princip rada brojećeg AD pretvornika

- Impuls za početak konverzije dovodi brojilo u početno stanje
- Izlaz iz AD pretvornika = $0V \rightarrow U_K=1$
 - CP prolazi kroz I sklop i pokreće brojilo
- Brojilo broji do zadovoljavanja jednakosti $U_a=U_d$
 - $U_K = 0$ zatvara I sklop i zaustavlja brojilo
- Zaustavljeno stanje brojila predstavlja konvertiranu vrijednost U_a



AD pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom

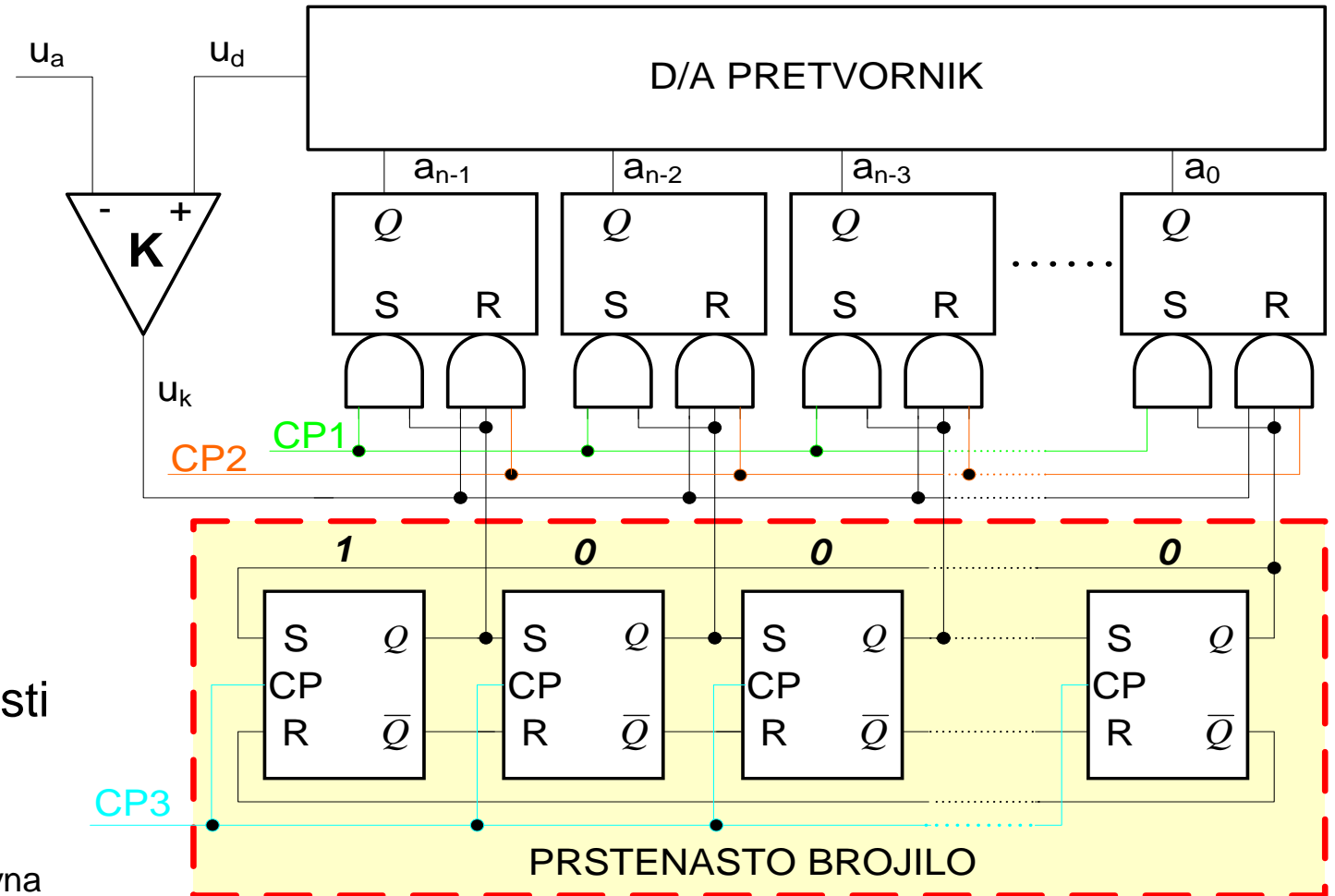
- Vrlo popularan AD pretvornik, široko korišten samostalno ili u kombinacijama s paralelnim AD pretvornikom
- Pretvorba je **direktna**, s DA pretvornikom u petlji povratne veze
- Prednosti:
 - **ubrzan proces pretvorbe usporedbom s mogućim doprinosom pojedinih bitova** umjesto s postepeno rastućim naponom iz DA pretvornika
 - **vrijeme pretvorbe ne ovisi o ulaznom naponu**
 - s pretvaračem od n bitova traje n ciklusa

AD pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom

Sklop se sastoji od:

- naponskog komparatora
 - n -bitnog registra
 - DA – pretvornika
 - upravljačke logike (prstenasto brojilo)
 - logičkih sklopova
-
- Prstenasto brojilo i registar imaju isti broj bitova

CP1, CP2 i CP3 predstavljaju redosljed tri sukcesivna taktna impulsa (CP)

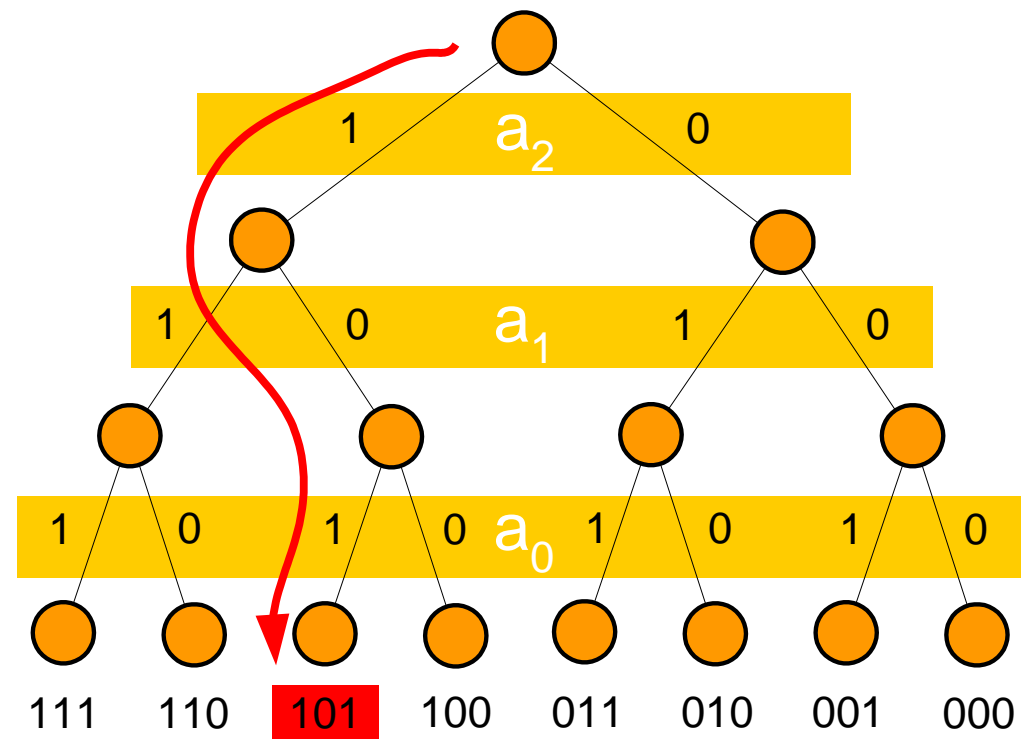


Princip rada AD pretvornika sa sukcesivnom aproksimacijom

Usporedba U_a i U_d :

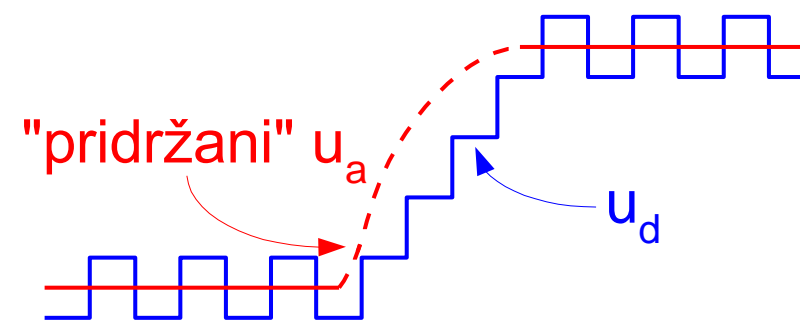
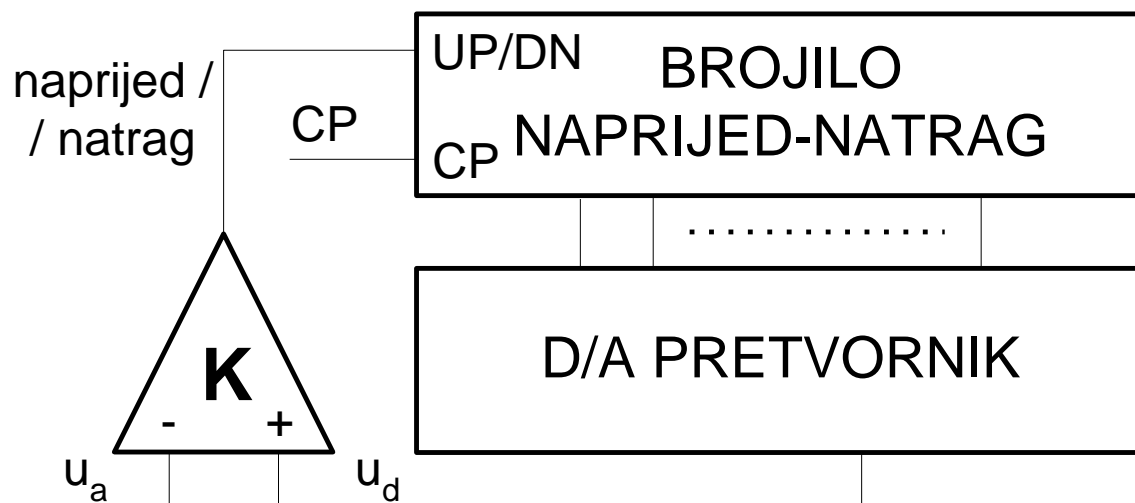
- postepeno formiranje U_d počevši od MSB (a_{n-1}):
 - **if** $U_a > U_{d,i}$ **then** $U_k = 0$
 - **else** $U_k = 1$
{brisanje doprinosa a_i }

Obilazak binarnog stabla po dubini
(engl. preorder tree traversal)



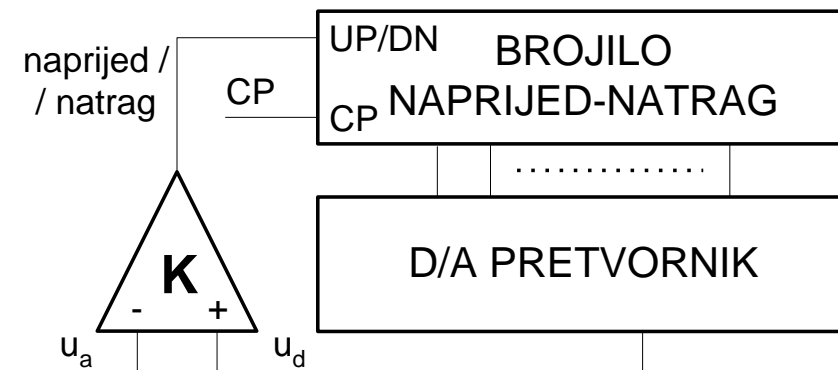
Slijedni AD pretvornik (engl. *Tracking ADC*)

- Ako mjerena veličina nije konstantna već je relativno sporo promjenljiva, vrijeme odziva se može znatno skratiti kontinuiranom pretvorbom



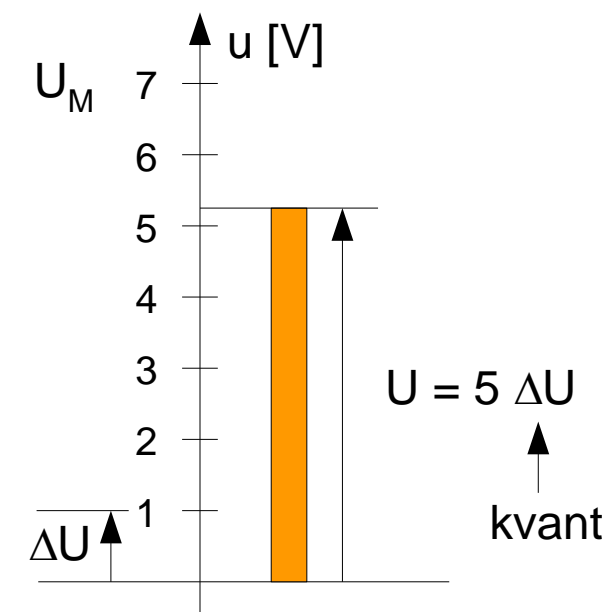
Slijedni AD pretvornik

- Modifikacija brojećeg ADC (bez ulaza Start)
- Dvosmjerno brojilo pribraja ili oduzima dolazne impulse, ovisno o aktualnom stanju brojila
- Ako je $U_a > U_d$, $U_k = 1$, brojilo pribraja CP
- Kad je $U_d = U_a$, izlaz iz DA pretvornika oscilira oko ulazne vrijednosti jer, u stvarnosti, zbog pogreške kvantizacije U_d nikad nije jednak U_a
 - ako se U_a nije promijenio u odnosu na prethodni korak, u sljedećim koracima će brojilo naizmjenično brojati unaprijed/unatrag (oscilirati) dok se U_a ne promijeni dovoljno za prelazak na sljedeću izlaznu razinu



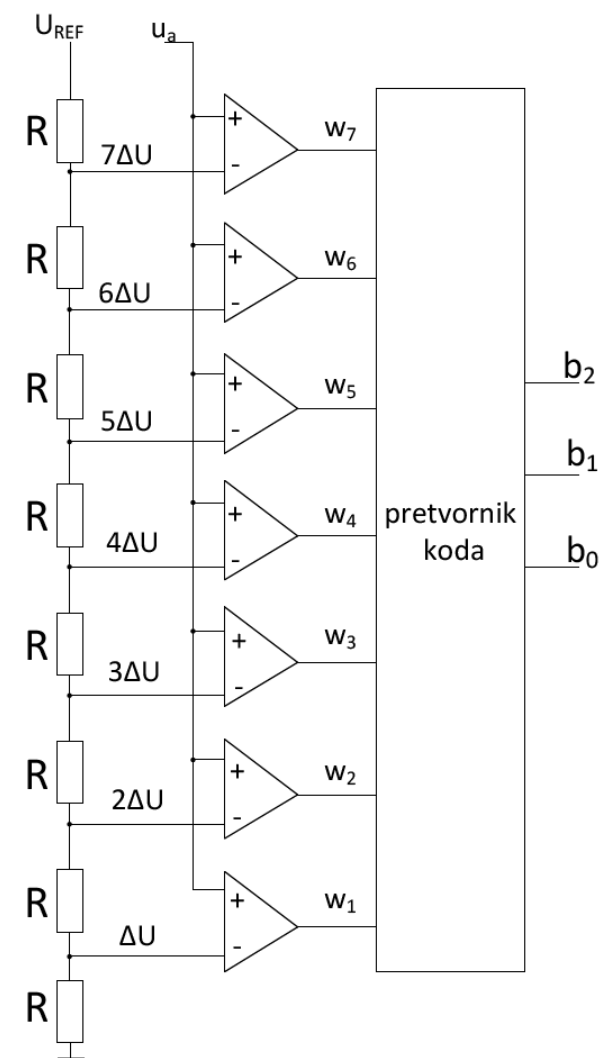
Paralelni AD pretvornik *(Parallel-Comparator ADC)*

- Komparatorski AD pretvornik
- Najbrža AD pretvorba
- U_a se uspoređuje s nizom referentnih napona, za svaku naponsku razinu u intervalu od 0 do U_M , s razmakom ΔU
- Implementacija niza referentnih napona:
 - otporni djelitelj
 - niz naponskih komparatora (2^{n-1}) za n -bitnu pretvorbu
 - za svaki dodatni bit se udvostručava broj potrebnih komparatora



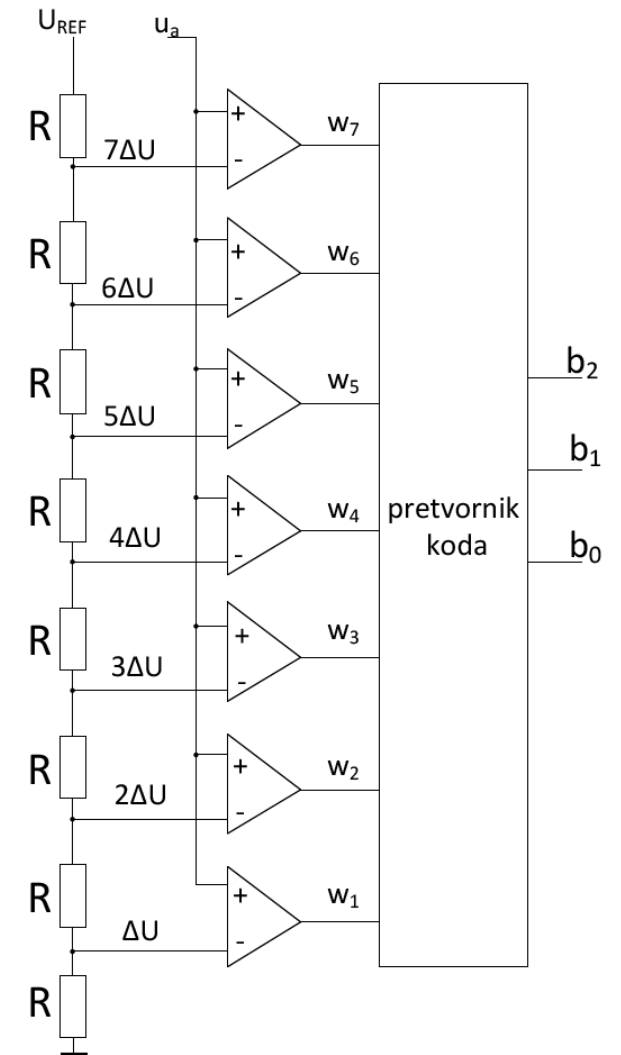
Paralelni komparatorski AD pretvornik

- Naponski djelitelj paralelno dovodi ulazni napon U_a na niz komparatora
- U primjeru digitalni podatak ima 3 bita pa je stoga referentni napon podijeljen na 8 naponskih razina (0-7)
- Za svaki interval u kojem je ulazni napon veći od napona djelitelja, izlaz komparatora će biti u stanju 1
- Pomoću pretvornika koda, ulazna informacija se pretvara u binarni broj



Paralelni komparatorски AD pretvornik

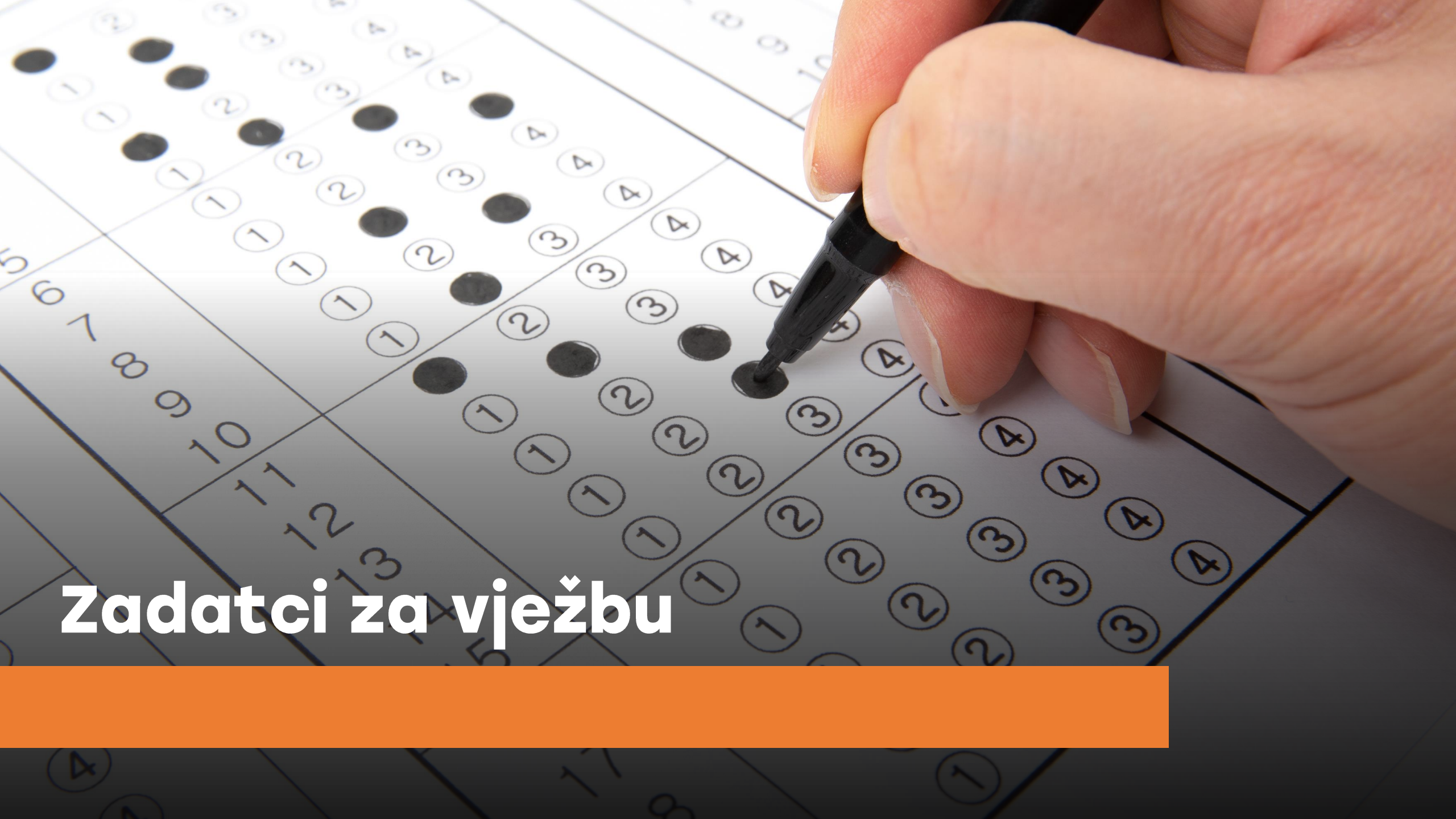
	w_7	w_6	w_5	w_4	w_3	w_2	w_1	b_2	b_1	b_0
$< \Delta U$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$(1-2)\Delta U$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$(2-3)\Delta U$	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
$(3-4)\Delta U$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
$(4-5)\Delta U$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
$(5-6)\Delta U$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
$(6-7)\Delta U$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
$> 7\Delta U$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1





Analogno-digitalna pretvorba





Zadatci za vježbu

Zadatak

- Maksimalna razina napona na izlazu 5-bitnog digitalno-analognog konvertera je 31 V.
- Izračunajte rezoluciju napona DAC-a.

Rješenje

- Maksimalna razina napona na izlazu 5-bitnog digitalno-analognog konvertera je 31 V.
- Izračunajte rezoluciju napona DAC-a.

$$\text{rezolucija} = \max \text{ napon} / \max B$$

gdje $B_{(10)}$ predstavlja decimalnu vrijednost binarnog ulaza.

$$\text{rezolucija} = 31 / (2^5 - 1) = \frac{31}{31} = 1 \text{ V}$$

Zadatak

- 6-bitni DA konverter pretvara binarni broj 100000 u izlazni napon od -8 V.
- Koliki bi bio izlazni napon ako promijenimo ulazni binarni broj u 100110?

Rješenje

- 6-bitni DA konverter pretvara binarni broj 100000 u izlazni napon od -8 V.
- Koliki bi bio izlazni napon ako promijenimo ulazni binarni broj u 100110?
- Izlazni napon računamo pomoću formule:

$$U_{izl} = -B * U_{rez}$$

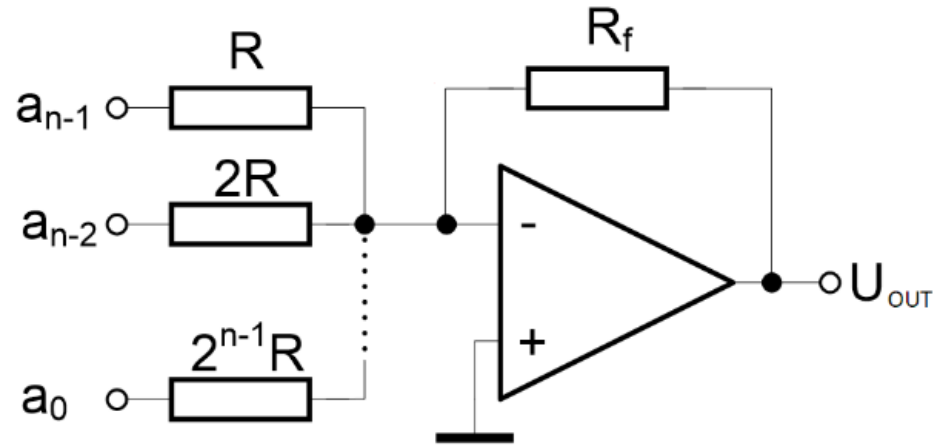
gdje je B decimalna vrijednost binarnog ulaza, a U_{rez} napon rezolucije

$$U_{rez} = \frac{U_{izl}}{-B} = \frac{-8}{-32} = 0,25 V$$

$$U_{izl} = -B * U_{rez} = -38 * 0,25 = -9,5 V$$

Zadatak

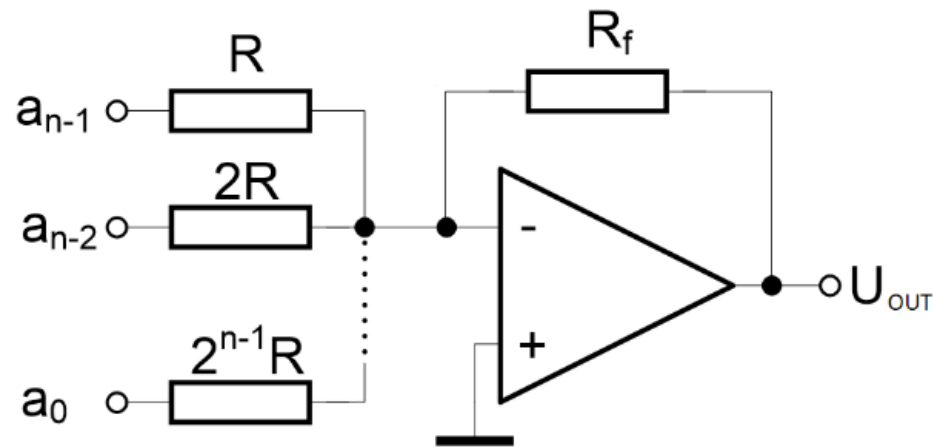
- Na ulazu 4-bitnog DAC-a nalazi se kodna riječ 0101. Referentni napon je 4V.



- Izračunajte napon na izlazu DAC-a.

Rješenje

- Na ulazu 4-bitnog DAC-a nalazi se kodna riječ 0101. Referentni napon je 4V.

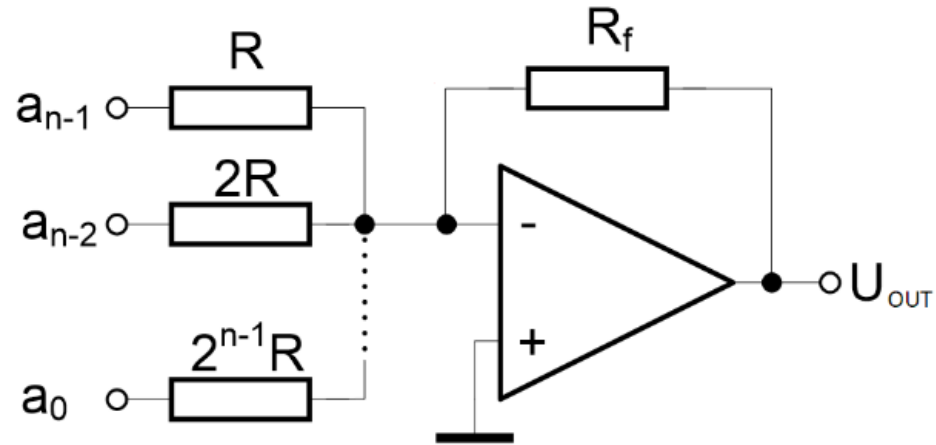


- Izračunajte napon na izlazu DAC-a.

$$U_{out} = -4 * (0 * 2^0 + 1 * 2^{-1} + 0 * 2^{-2} + 1 * 2^{-3}) = -2,5 V$$

Zadatak

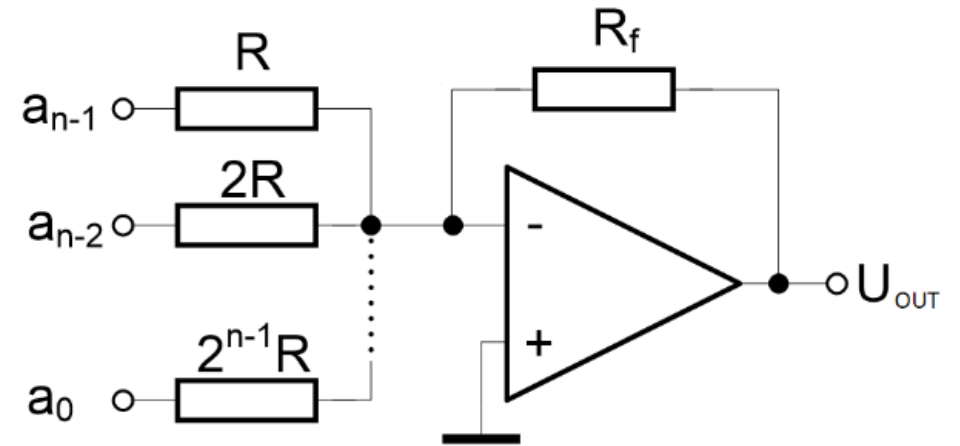
- 4-bitni DAC s $U_{\text{ref}}=5\text{V}$ uključuje otpornike $R_f=4\text{k}\Omega$ i $R=2\text{k}\Omega$.



- Izračunajte izlazni napon za ulazni binarni broj 1011.

Rješenje

- 4-bitni DAC s $U_{\text{ref}}=5\text{V}$ uključuje otpornike $R_f=4\text{k}\Omega$ i $R=2\text{k}\Omega$.
- Izračunajte izlazni napon za ulazni binarni broj 1011.



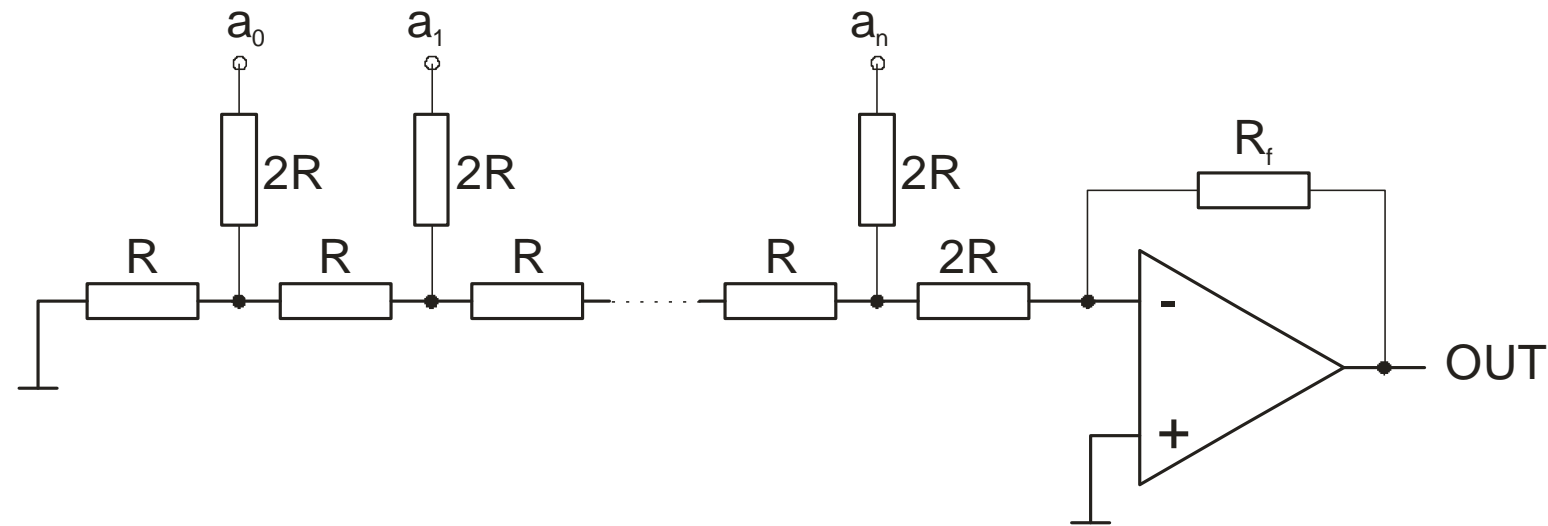
- Izlazni napon težinskog DA pretvarača izračunavamo pomoću formule:

$$U = -U_{\text{ref}} * (R_f/R) * (B/2^{n-1})$$

$$U = -5 * (4/2) * (11/8) = -13,75 \text{ V}$$

Zadatak

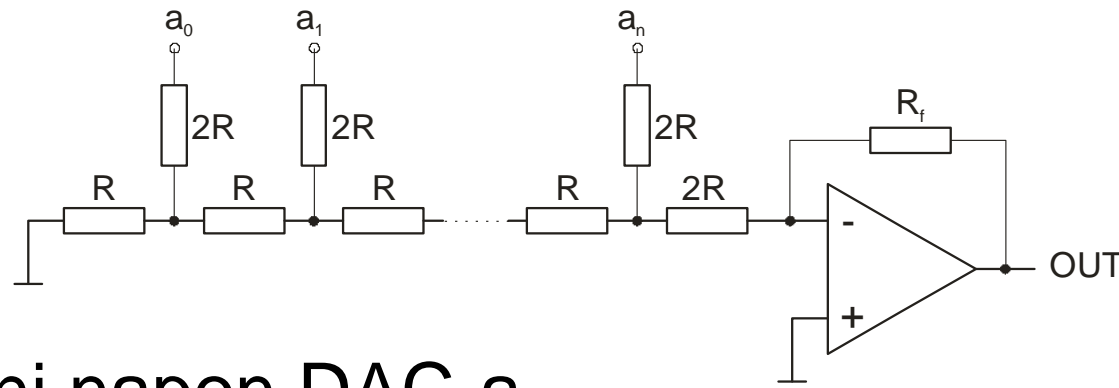
- Na ulazu 4-bit DAC s ljestvičastom otporničkom mrežom je kodna riječ 1001. Referentni napon je 10V.



- Izračunajte izlazni napon DAC-a.

Rješenje

- Na ulazu 4-bitnog DAC konvertera s ljestvičastom otporničkom mrežom je kodna riječ 1001. Referentni napon je 10V.



- Izračunajte izlazni napon DAC-a.

$$U_{OUT} = -U_{REF} * \left(\frac{R_f}{R}\right) * \left(\frac{B}{2^n}\right) = -10 * \left(\frac{R_f}{R}\right) * \frac{9}{16} = -5,625 V$$

Primjeri zadataka s prethodnih ispita*

Ishod učenja 9 – 7 bodova - 20 min

1. **[I9_M, 2 boda]** Izračunajte iznos izlaznog napona DA pretvornika za dovedenu ulaznu kombinaciju 00001011, ako se za podatak 11110000 dobije na izlazu vrijednost napona od 24mV, a za podatak 00000000 se dobije 0V. (napon rezolucije - 1 bod; iznos izlaznog napona - 1 bod).
2. **[I9_M, 2 boda]** Nacrtajte shemu AD pretvornika po izboru(1,5 bodova) i navesti karakteristike tog ADC-a (0,5 bodova)
3. **[I9_Ž, 3 boda]** Nacrtajte shemu DA pretvornika za pretvorbu 3-bitnog binarnog broja u analogni oblik (1 bod). Označite vrijednosti svih otpornika (1 bod), ako otpornik koji odgovara najznačajnijem bitu ima vrijednost od 1k Ω . Odredite vrijednost izlaznog napona, ako je na ulaz dovedena binarna kombinacija 111, uz napon rezolucije od 0,2V. (1 bod)

* Primjer ispita je ilustrativan. Vrste zadataka na budućim brzim testovima i ispitima mogu biti drugačije.

LITERATURA

- U. Peruško, V. Glavinić: Digitalni sustavi
 - 491-512