



12. Sučelje s analognom okolinom



Sadržaj predavanja

- **uključivanje digitalnog sustava u okolinu**
 - **konceptualizacija sučelja**
 - **parametri pretvorbe**
- digitalno-analogna pretvorba
- analogno-digitalna pretvorba

Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- pretvorba na *sučelju* digitalnog sustava i stvarnog svijeta koji ga okružuje:



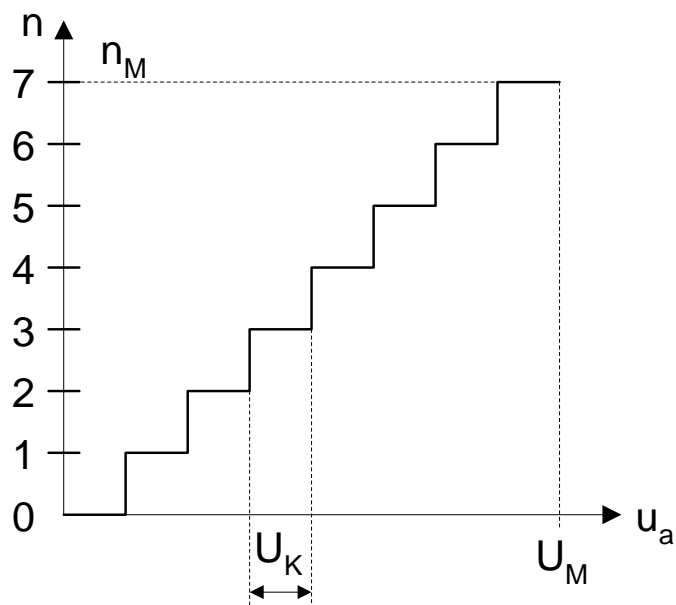
- na *ulazu* digitalnog sustava
~ (analogni) napon \Rightarrow broj:
uzorkovanje (engl. sampling) + kvantizacija
 \rightarrow analogno-digitalna pretvorba (ADC)
- na *izlazu* digitalnog sustava
~ broj \Rightarrow (analogni) napon
 \rightarrow digitalna-analogno pretvorba (DAC)

Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- sučelje digitalnog sustava s analognom okolinom:
 - *pretvornici, konvertori, pretvarači*
~ *sklopovi* na sučelju analognog i digitalnog, i obratno
 - na *ulazu* digitalnog sustava
~ analogno-digitalni pretvornici
(engl. analog-digital convertors, ADC)
 - na *izlazu* digitalnog sustava
~ digitalno-analogni pretvornici
(engl. digital-analog convertors, DAC)
 - "tehnologija" pretvorbe:
 - dinamički pretvornici
~ pretvorba se odvija *u vremenu!*
 - statički pretvornici

Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- karakteristika pretvorbe za ADC (DAC ima isti oblik):
 - U_K : kvant, naponski interval, korak, *kanal*
 - *broj koraka* (kanala)
 \sim *rezolucija* ADC





Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- parametri pretvorbe:
 - rezolucija, razlučivanje
 - točnost
 - pogreška kvantizacije
 - vrijeme pretvorbe

Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- *rezolucija, razlučivanje:*

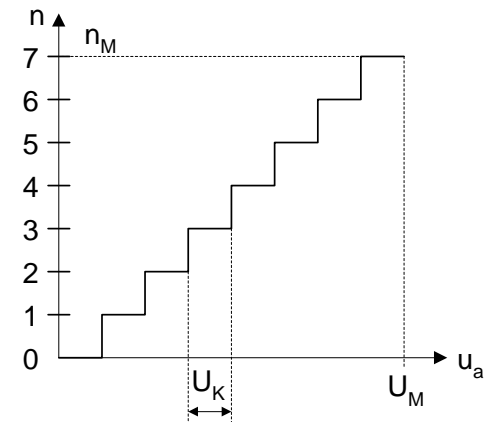
- *širina kanala* kao
% max ulaznog napona (ADC),
odnosno max izlaznog napona (DAC):

$$\text{rezolucija} = U_K / U_M$$

- izražavanje *brojem bitova* izlaznog (ADC),
odnosno ulaznog (DAC) podataka,
jer je $n_M \sim U_M$ (uz k-bitni prikaz):

$$\text{rezolucija} = 1/n_M = 1/(2^k - 1)$$

- tipične vrijednosti: ≈ 14 bitova



Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

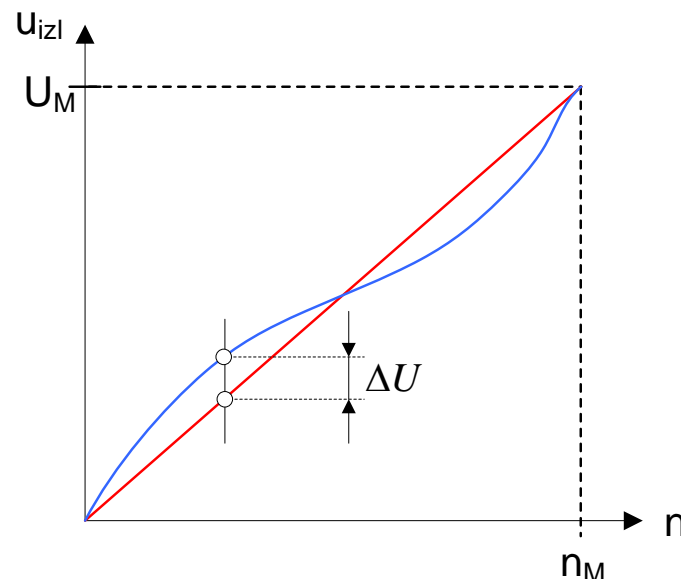
- *točnost*

~ mjera za razliku *stvarnog* analognog izlaza
i izlaza u *idealnom* slučaju

npr. realna karakteristika DAC

- *integralna* nelinearnost
~ granica pogreške:

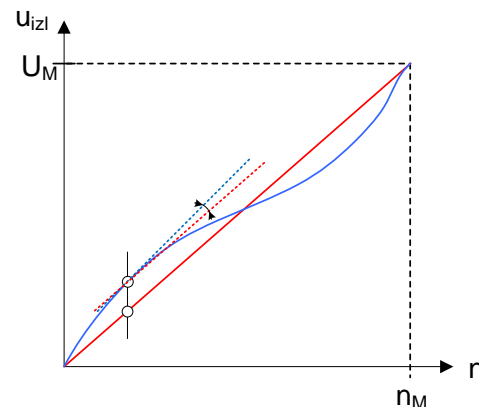
$$\varepsilon_i = \frac{\Delta U}{U_M}$$



Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- *diferencijalna nelinearnost*
~ granica pogreške *u kanalima*

$$\varepsilon_d = \frac{\left(\frac{du_a}{dn}\right)_{\max} - \left(\frac{du_a}{dn}\right)_{idealno}}{\left(\frac{du_a}{dn}\right)_{idealno}} = \frac{(U_K)_{\max} - U_K}{U_K} = \frac{\Delta U_K}{U_K}$$



- tipične vrijednosti za točnost: $\approx 10^{-2} \div 10^{-3}$

Uključivanje digitalnog sustava u okolinu

- *pogreška kvantizacije:*
 - rezultat diskretnog karaktera procesa konverzije
 - prava vrijednost
~ napon *u sredini kanala*
→ pogreška:

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

- *vrijeme pretvorbe:*
~ od početka konverzije
do pojave konačne vrijednosti na izlazu
tipične vrijednosti: ADC: $\approx 10 \text{ ns} \div 10 \text{ s}$
DAC: $\approx 100 \text{ ns}$



Sadržaj predavanja

- konceptualizacija sučelja
- **digitalno-analogna pretvorba**
 - **princip DA pretvorbe**
 - **otporna mreža s težinski raspoređenim otporima**
 - **ljestvičasta otporna mreža**
 - **DA pretvornik s brojilom**
- analogno-digitalna pretvorba

Digitalno-analogna pretvorba

- *DA pretvorba:*

- jednostavniji sklopovi (jednostavniji od ADC)
- (u nekim rješenjima) dijelovi AD pretvornika
- cilj pretvorbe
~ broj u binarnom prikazu konvertirati
u analognu veličinu, obično napon:

$$N = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0$$

$$U_N = K \cdot U_{REF} \cdot N$$

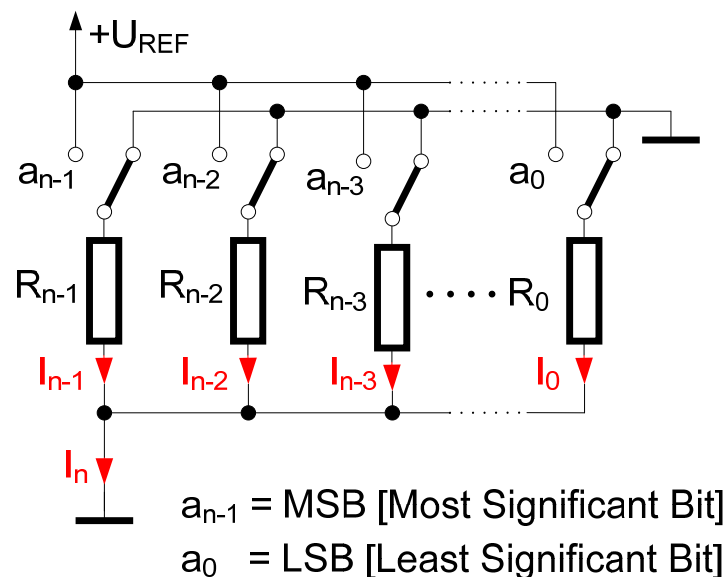
$U'_{REF} = K \cdot U_{REF}$ [V]: faktor proporcionalnosti

Digitalno-analogna pretvorba

- princip DA pretvorbe:

$$U_N = U_{REF} \cdot (a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0)$$

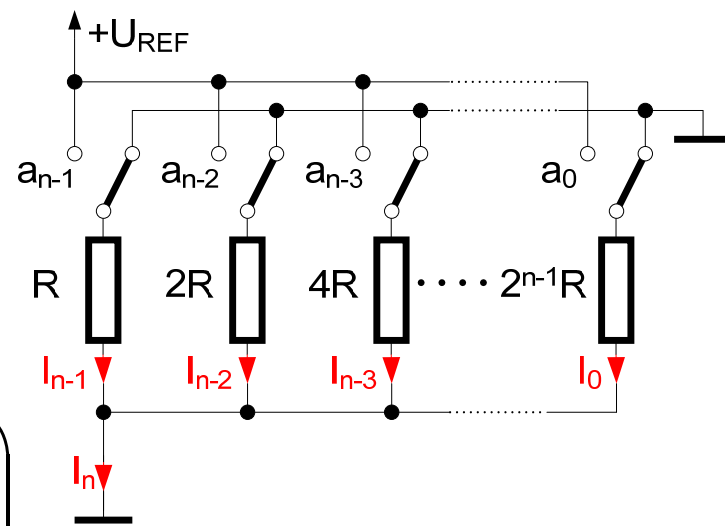
- pojedine težine binarnog broja izraziti *strujama*
- koeficijente uz odgovarajuće težine izvesti "sklopkama"
- principijelno rješenje
~ *otporna mreža*:
statički DA pretvornik



Digitalno-analogna pretvorba

- *otporna mreža s težinski raspoređenim otporima:*

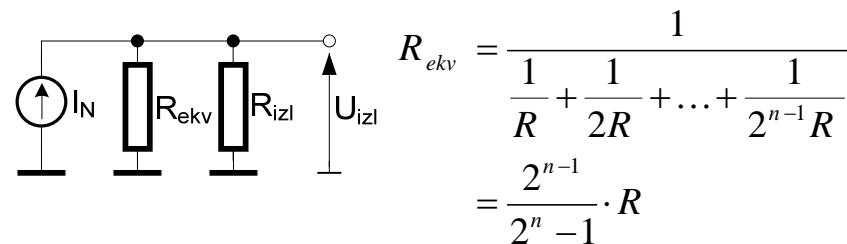
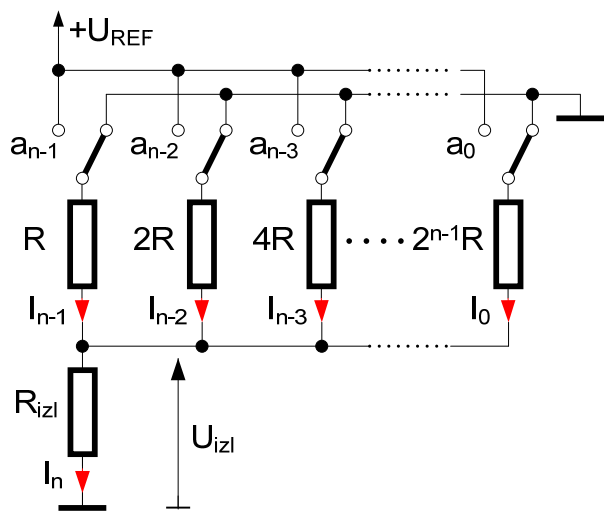
- R_i se međusobno odnose kao težine brojnih mjesta:
→ *zbrojiti struje* kroz R_i
- analogna veličina je *struja*



$$\begin{aligned} I_N &= U_{REF} \cdot \left(\frac{a_{n-1}}{R_{n-1}} + \frac{a_{n-2}}{R_{n-2}} + \dots + \frac{a_0}{R_0} \right) \\ &= \frac{U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0) \\ &= \frac{U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot N \end{aligned}$$

Digitalno-analogna pretvorba

- otporna mreža s težinski raspoređenim otporima
 \sim obično se za izlaznu veličinu želi *napon*:
 \rightarrow *struja* na poznatom R

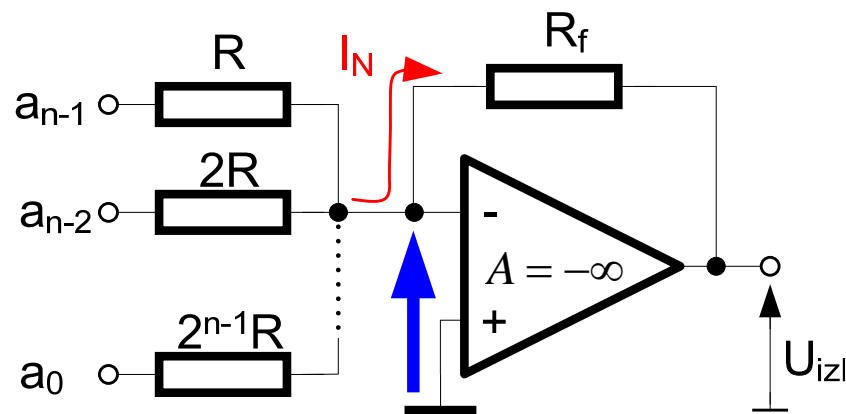


$$\begin{aligned}
 U_{izl} &= I_N \cdot (R_{ekv} \parallel R_{izl}) \\
 &= \frac{U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot \frac{R_{ekv} \cdot R_{izl}}{R_{ekv} + R_{izl}} \cdot (a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_0 2^0) \\
 &= \dots = \\
 &= \frac{R_{izl} \cdot U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R + (2^n - 1) \cdot R_{izl}} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i \\
 &= K \cdot U_{REF} \cdot N \\
 K &= f(R_{izl}) \neq const.
 \end{aligned}$$

Digitalno-analogna pretvorba

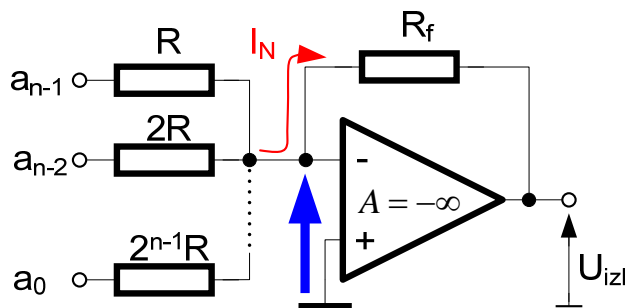
- izbjegavanje utjecaja R_{izl} u otpornoj mreži:
 - *operacijsko pojačalo*
~ "nulti otpor" između ulaza:
virtualna nula na ulazu pojačala
- zbrajanje I_i na izlazu sklopa:

$$\begin{aligned} U_{izl} &= -I_N \cdot R_f \\ &= -\frac{U_{REF} \cdot R_f}{2^{n-1} \cdot R} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i \end{aligned}$$



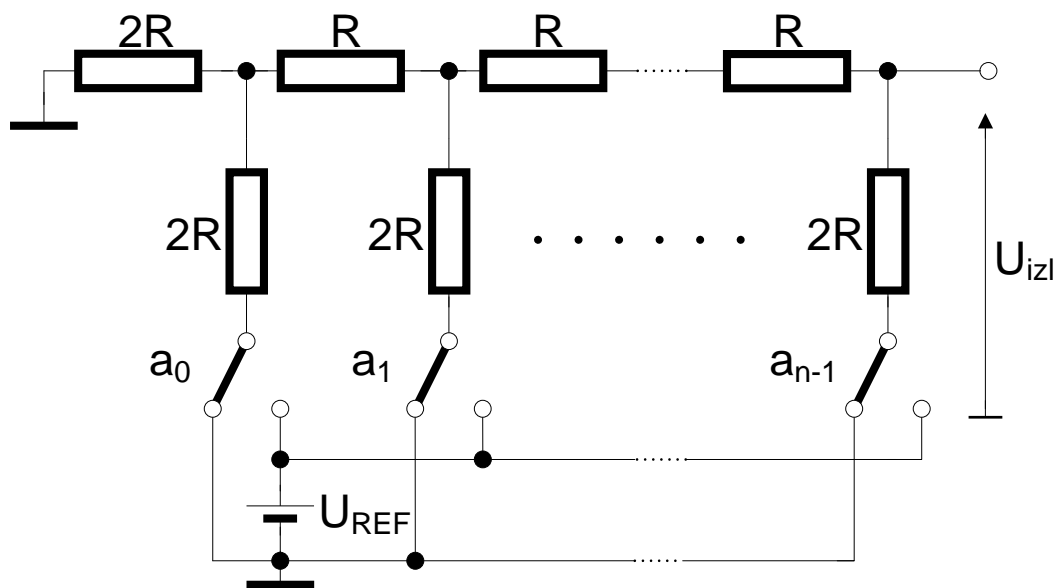
Digitalno-analogna pretvorba

- tehnološki problem izvedbe većih mreža:
 - preveliki odnos R_{n-1} (uz MSB) i R_0 (uz LSB)
~ uz zadanu pogrešku zbog tolerancija otpora
 R_{n-1} treba biti *vrlo precizan*
(također i svi R_i , za $i \nearrow$)
 - koristiti drugo rješenje, već od $n = 4$



Digitalno-analogna pretvorba

- *ljestvičasta otporna mreža* (engl. ladder network):
 - koristi *samo dvije* vrijednosti za R (R i $2 \cdot R$)
 - za isti n potrebno *dva puta više* R_i

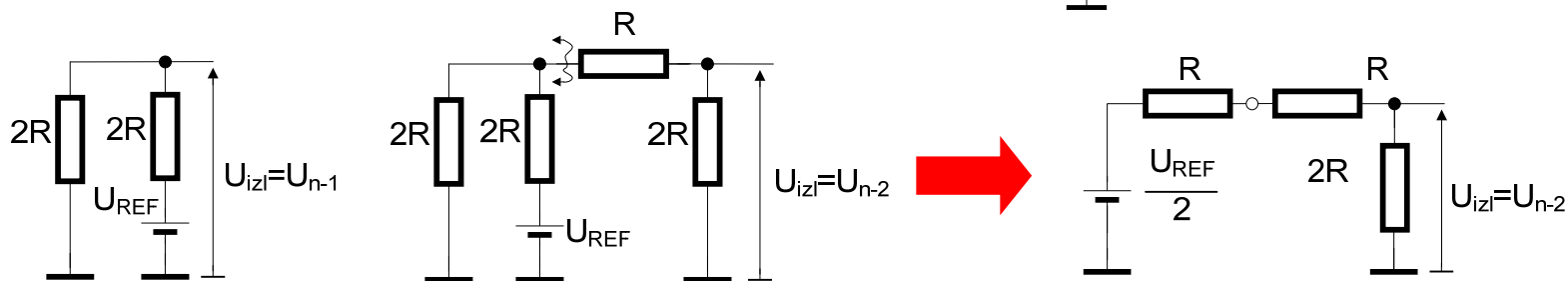
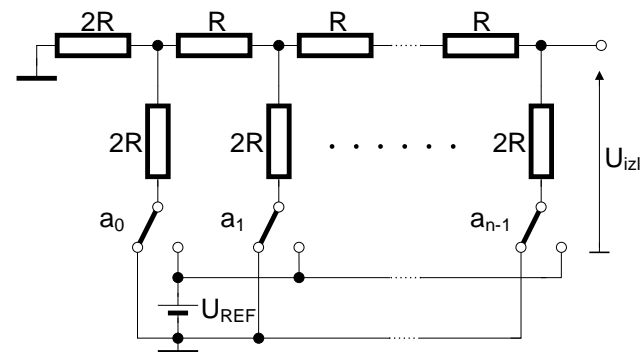


Digitalno-analogna pretvorba

- određivanje izlaznog napona ljestvičaste otporne mreže

$$U_{izl} = f(N):$$

- zaključenje $2 \cdot R$ "lijevo" od promatranog čvora a_i
- koristiti *Théveninov teorem*



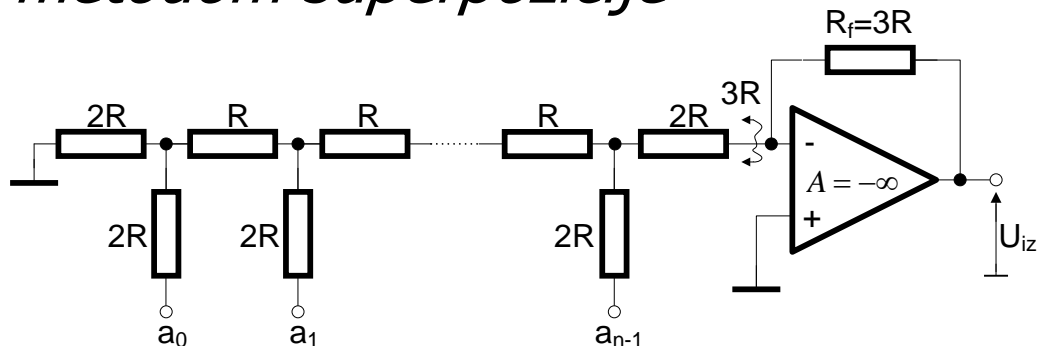
$$U_{n-1} = \frac{U_{REF}}{2}$$

$$U_{n-2} = \frac{U_{REF}}{4}$$

$$U_{izl} = \sum_{i=0}^{n-1} U_i = \frac{U_{REF}}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i = \frac{U_{REF}}{2^n} \cdot N$$

Digitalno-analogna pretvorba

- izvedba ljestvičaste otporne mreže s *operacijskim pojačalom*:
 - zaključenje $2 \cdot R$ s obje strane čvora a_i
 - određivanja doprinosa pojedinih bitova *metodom superpozicije*



$$U_{n-1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{REF}}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{REF}}{2^{n-1}} \cdot N$$

$$U_{izl} = -U_{n-1} \cdot \frac{R_f}{2R} = -U_{n-1} \cdot \frac{3R}{2R} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{3R}{2R} \cdot \frac{U_{REF}}{2^{n-1}} \cdot N = -\frac{U_{REF}}{2^n} \cdot N$$



Digitalno-analogna pretvorba

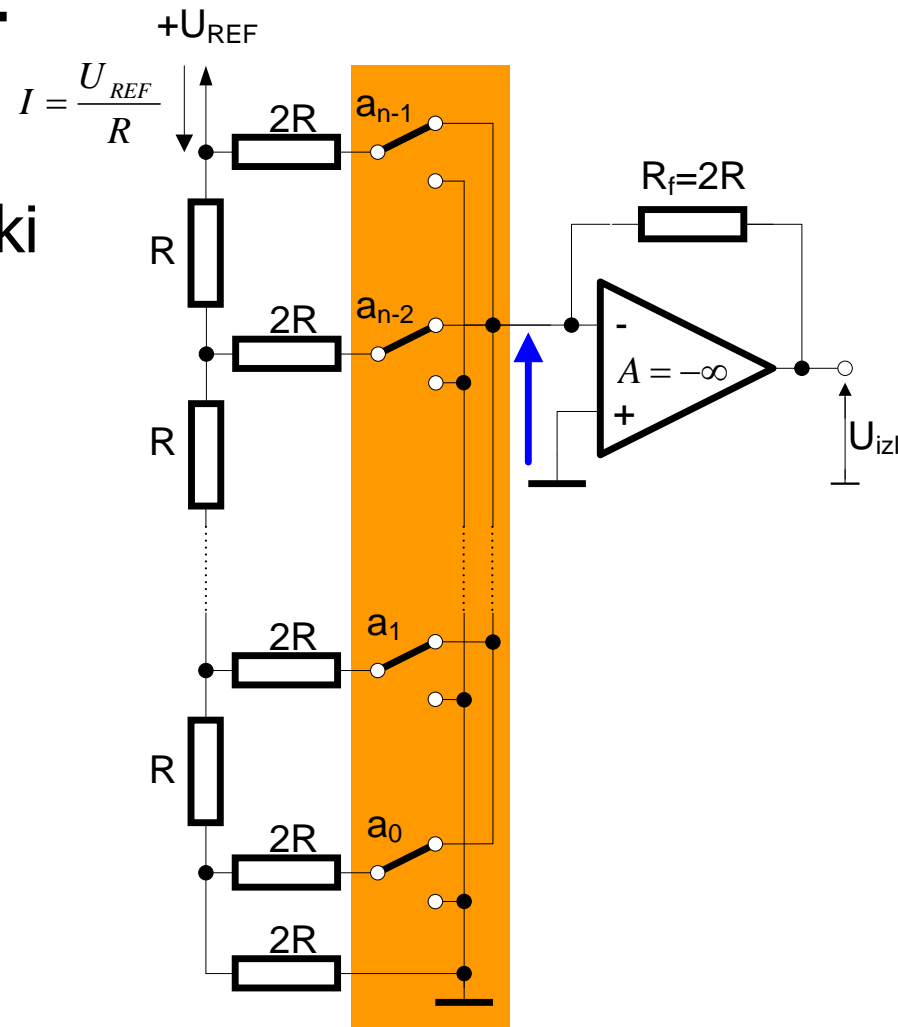
- svojstva izvedbi ljestvičastih otpornih mreža:
 - samo *dvije vrijednosti* otpora
~ moguće zadovoljiti tolerancije,
pogotovo stoga što se traži *omjer vrijednosti*
 - pogodno za *integriranu izvedbu* i za veći broj bitova
~ svi otpori i naponski izvori *jednako* opterećeni
 - *sporije* u pogledu vremenskog odziva
~ niz četveropola s C_{par}

Digitalno-analogna pretvorba

- uklanjanje problema kašnjenja ljestvičaste otporne mreže:

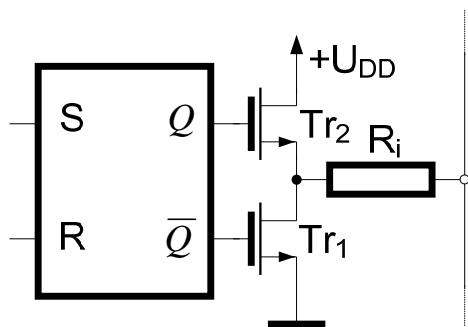
- virtualna nula:
~ nema nabijanja C_{par} kod prebacivanja sklopki
- nema promjena u opterećenju U_{REF} i R_i

$$U_{\text{izl}} = -\frac{U_{\text{REF}}}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i$$



Digitalno-analogna pretvorba

- *sklopke za DA pretvornike:*
 - konceptualni spoj:



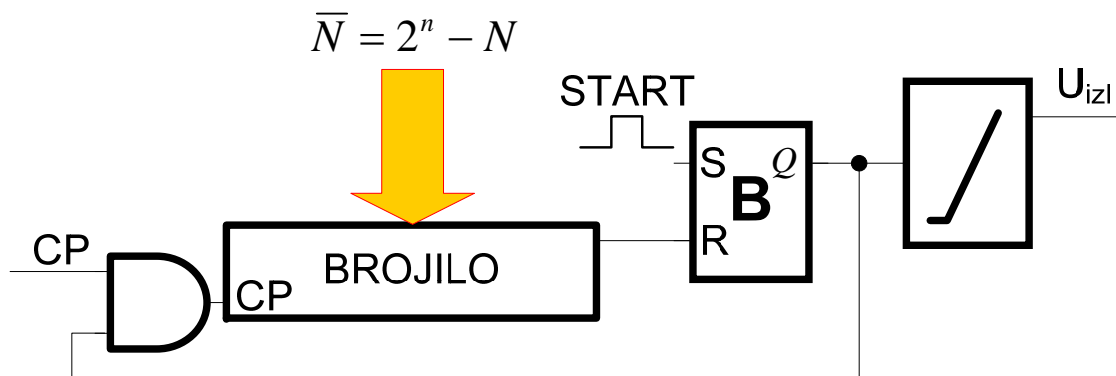
- osigurati $R_{\text{ekv}} \ll R_i$

Digitalno-analogna pretvorba

- svojstva *integriranih* otpornih mreža
~ otporne mreže integrirane u DA pretvornike:
 - ljestvičaste
 - za veći broj bitova (8÷14)
 - tipično $R = 10\text{ k}\Omega / 20\text{ k}\Omega$
 - tolerancije R : $\Delta R = \pm 5\%$
 - garantirana pogreška $U_{\text{izl}} \leq 1/4$ doprinosa LSB
u granicama $-55^\circ\text{ C} \leq T \leq 125^\circ\text{ C}$

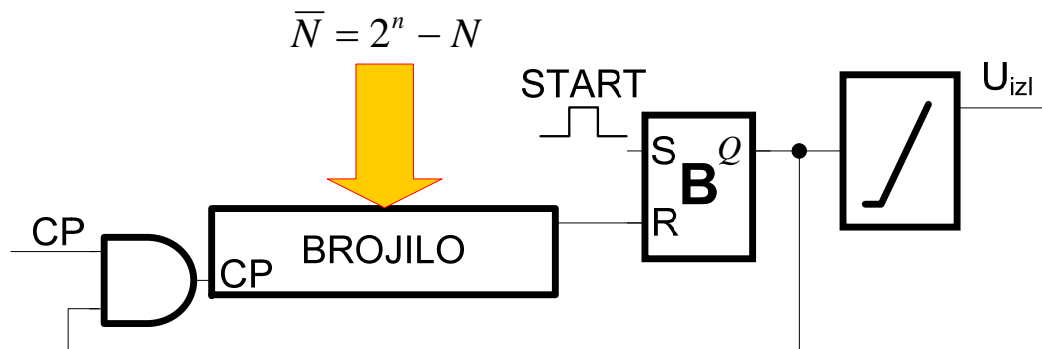
Digitalno-analogna pretvorba

- *DA pretvornik s brojilom*
~ ugrađeno brojilo s prethodnim postavljanjem:
 - u brojilo upisati *dvojni komplement* od N
 - $B = 1 \Rightarrow$ *pretvorba*: brojilo broji, generira se pilasti napon U_{izl}
 - $B = 0 \Rightarrow U_{izl} \sim N$ (n-bitni prikaz)



Digitalno-analogna pretvorba

- DA pretvornik s brojilom:



- *dinamički* DA pretvornik:
 - pretvorba *traje* izvjesno vrijeme
 - pretvorba *indirektna*
~ preko vremena
(brojilo broji $\Rightarrow B = 1 \Rightarrow$ porast U_{izl})!
- problemi pri pretvorbi
~ osigurati $f_{CP} = const.$ + *linearnost* pile



Sadržaj predavanja

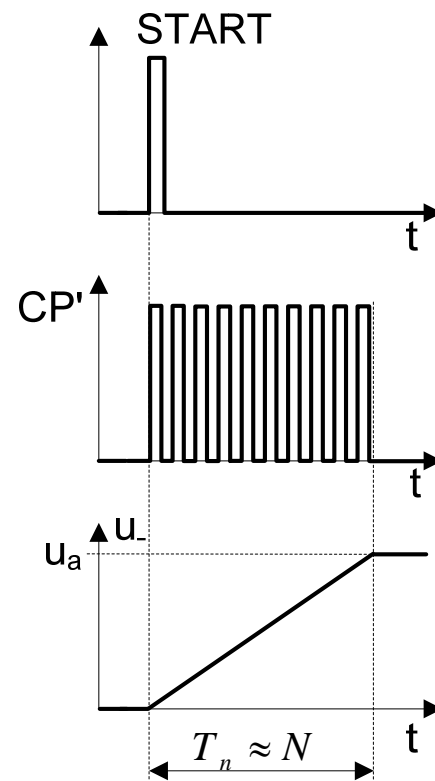
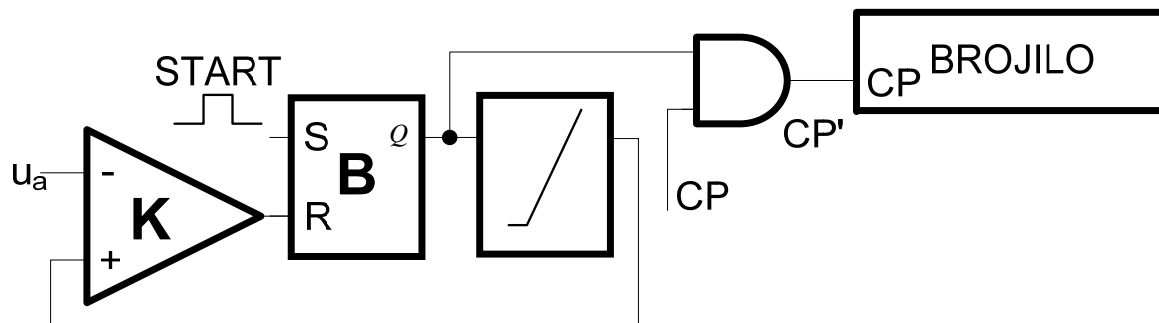
- uključivanje digitalnog sustava u okolinu
- digitalno-analogna pretvorba
- **analogno-digitalna pretvorba**
 - **Wilkinsonov pretvornik**
 - **AD pretvornik s postepenim približavanjem**
 - **AD pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom**
 - **slijedni AD pretvornik**
 - **paralelni AD pretvornik**
 - **sklop za uzorkovanje**

Analogna-digitalno pretvorba

- *AD pretvorba:*
 - složeniji postupak!
 - tipično uključuje *brojilo*
~ *dinamički* postupci:
 - pretvorba *usporedbom* $U_{ul} = U_a$ i
(interno) generiranog $U_d \sim N$
 - završavanje pretvorbe za $U_d = U_a$
 - karakteristična *petlja povratne veze*
~ *naponski komparator*
 - najzahtjevnije izvedbe (stoga i najskuplje!)
~ nema brojila!

Analogna-digitalno pretvorba

- *Wilkinsonov pretvornik*
~ dinamički pretvornik:
ugrađeno brojilo
 - dok brojilo broji generira se pilasti napon
 - komparator u *petlji povratne veze*
~ usporedba pilastog napona
s $U_{ul} = U_a$



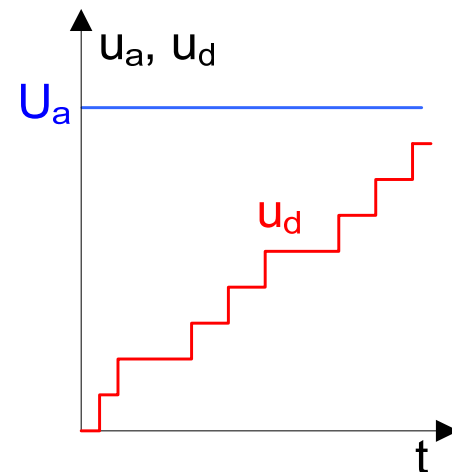
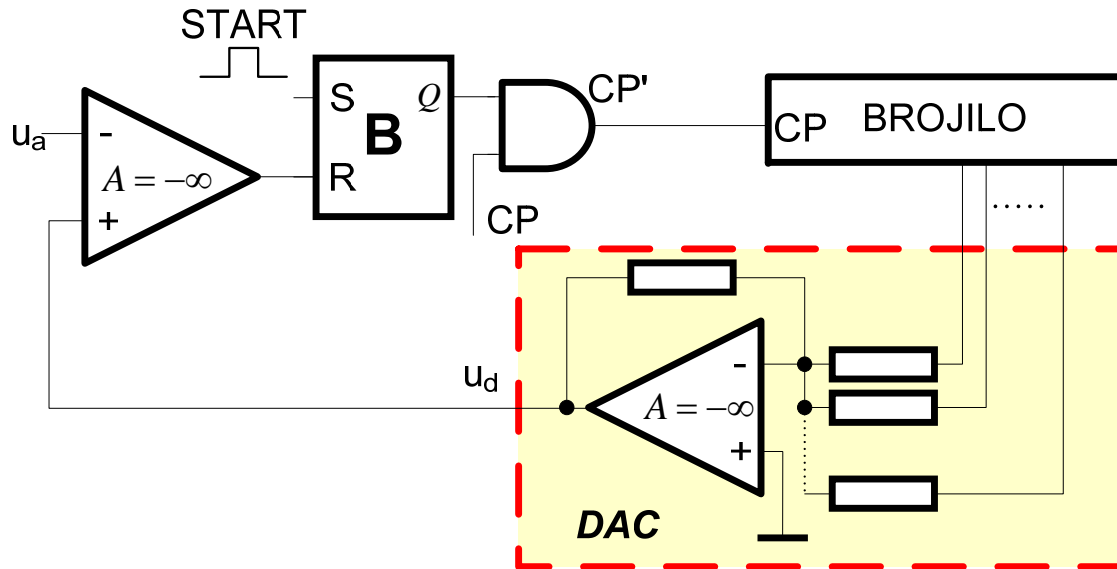


Analogna-digitalno pretvorba

- problemi Wilkinsonovog pretvornika
~ pretvorba *indirektna* – obavlja se preko vremena!
 - generirana pila obično *nelinearna*
~ pogreške pri pretvorbi ($U_d \neq U_a$)
 - potrebno osigurati $f_{CP} = \text{const.}$
 - ostvariti sinkronizaciju impulsa START i CP

Analogna-digitalno pretvorba

- *AD pretvornik s postepenim približavanjem* (s DA pretvornikom),
brojeći AD pretvornik (engl. counting ADC)
~ modifikacija Wilkinsonovog pretvornika
koja rješava njegove probleme



Analogna-digitalno pretvorba

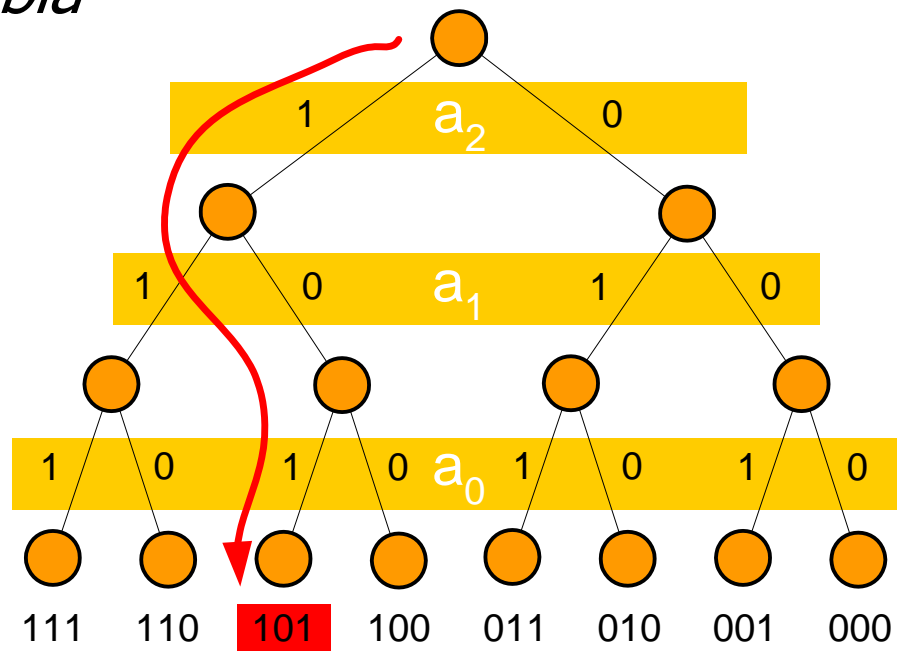
- AD pretvornik s postepenim približavanjem:
 - pretvorba je *direktna, bez* posrednika (generatora pile)
~ DA pretvornik umjesto generatora pile
 - eliminirana potreba za točnom i stabilnom f_{CP}
 - moguće dozvoliti $f_{CP} \neq const.$
~ *neperiodički* impulsi pobude brojila
 - točnost pretvorbe
~ točnost DAC:
ovisi o pasivnim komponentama (R_i),
može se dobro namjestiti

Analogna-digitalno pretvorba

- *brzi AD pretvornik,*
AD pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom
(engl. successive approximation ADC):
 - jako popularni AD pretvornik
~ široko korišten samostalno ili
u kombinacijama s paralelnim AD pretvornikom
 - pretvorba *direktna*
~ DA pretvornik u petlji povratne veze
 - cilj:
 - ubrzanje pretvorbe, $T_{\max} \ll N_{\max} \cdot T_{CP}$
~ *smanjenje* broja koraka
 - konstantno vrijeme pretvorbe, $T \neq f(U_a)$
~ *konstantan* broj koraka

Analogna-digitalno pretvorba

- princip rada brzog AD pretvornika:
 - usporedba u_a i u_d :
~ postepeno formiranje u_d počev 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)



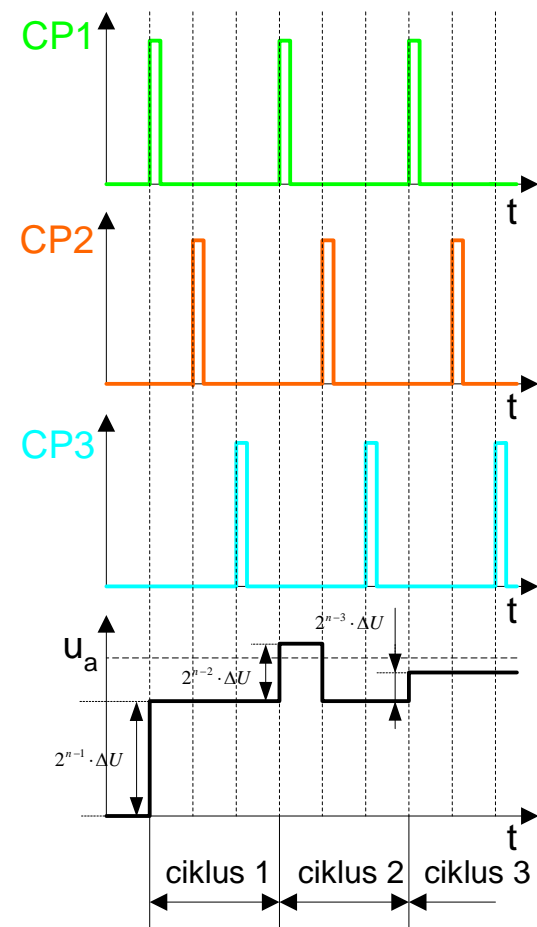
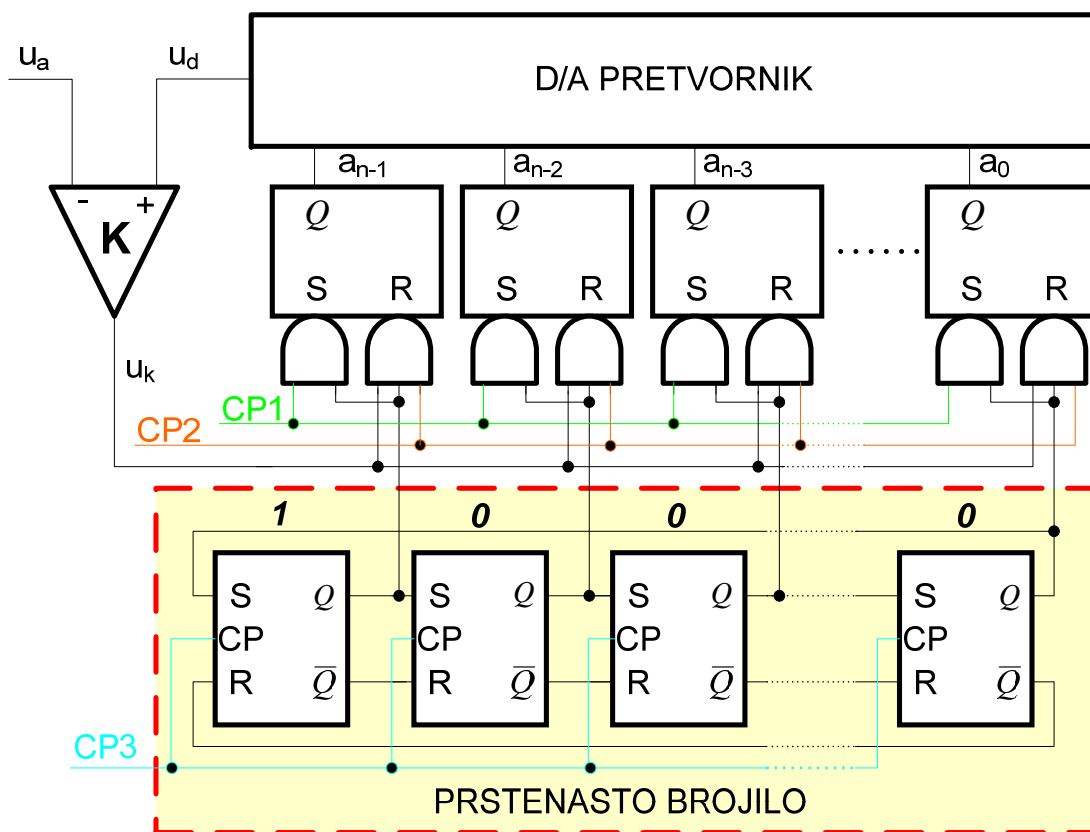


Analogna-digitalno pretvorba

- princip rada brzog AD pretvornika:
 - broj koraka za proizvoljni u_a
 \sim broj bitova zapisa n
 - izvedba sklopom za *slijedno ispitivanje* bitova:
 - prstenasto brojilo (početno 1 kod a_{n-1})
 - binarno brojilo s dekoderom
 - mreža logičkih sklopova

Analogna-digitalno pretvorba

- izvedba brzog AD pretvornika *prstenastim brojilom*



Analogna-digitalno pretvorba

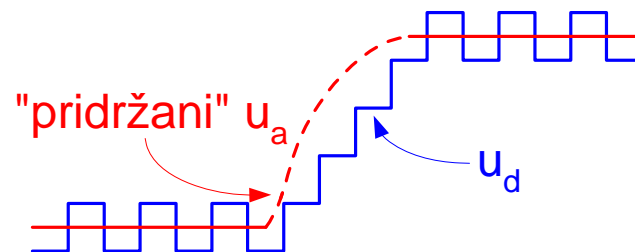
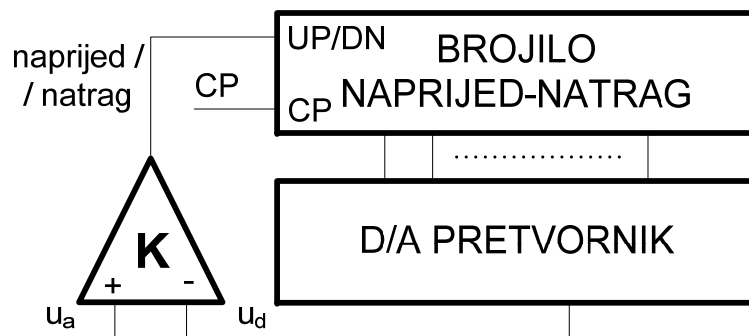
- *slijedni AD pretvornik*
(engl. tracking converter, servo converter),
kontinuirano brojeći AD pretvornik
(engl. continuous-digital-ramp converter):
 - (dodatno) *ubrzanja* pretvorbe
~ modifikacija osnovnog AD pretvornika s brojiлом
(s postepenim približavanjem)
 - zamjena binarnog brojila (broji $0 \rightarrow N \sim U_{a,i+1}$)
brojiлом naprijed-natrag

Analogna-digitalno pretvorba

- slijedni AD pretvornik
~ ubrzanje pretvorbe
korištenjem brojila naprijed-natrag:
 - smjer brojanja: $\nearrow/\searrow = f(\Delta U_a) = f(U_{a,i+1} - U_{a,i})$
~ u_d "slijedi" u_a
 - naročito pogodno
kad se u_a mijenja "relativno sporo"
 - u prosjeku $T_{\text{naprijed-natrag}} \approx 1/2 \cdot T_{\text{binarno}}$
 $\Rightarrow f_{\text{naprijed-natrag}} \approx 2 \cdot f_{\text{binarno, max}}$

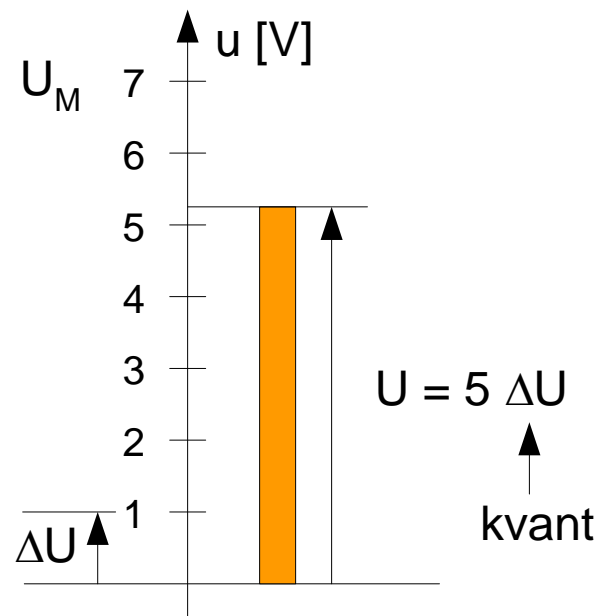
Analogna-digitalno pretvorba

- slijedni AD pretvornik
~ smjer brojanja: ↗/↘ = $f(\Delta U_a) = f(U_{a,i+1} - U_{a,i})$



Analogna-digitalno pretvorba

- *paralelni AD pretvornik, komparatorski AD pretvornik* (engl. parallel-comparator ADC):
 - naročito rješenje za postizanje *najbrže moguće* ADC, također i najskuplje
 - usporediti u_a s *nizom referentnih napona*, \forall naponsku razinu u intervalu $0 \div U_M$, s razmakom ΔU



Analogna-digitalno pretvorba

- paralelni AD pretvornik, komparatorski AD pretvornik
~ usporedba u_a s *nizom referentnih napona*:
 - najprikladnija izvedba "niza referentnih napona":
~ otporni djelitelj
 - *niz* naponskih komparatora
~ $l = (2^n - 1)$ za n -bitnu pretvorbu
 - \forall dodatni bit *dva puta više* komparatora
~ cijena!

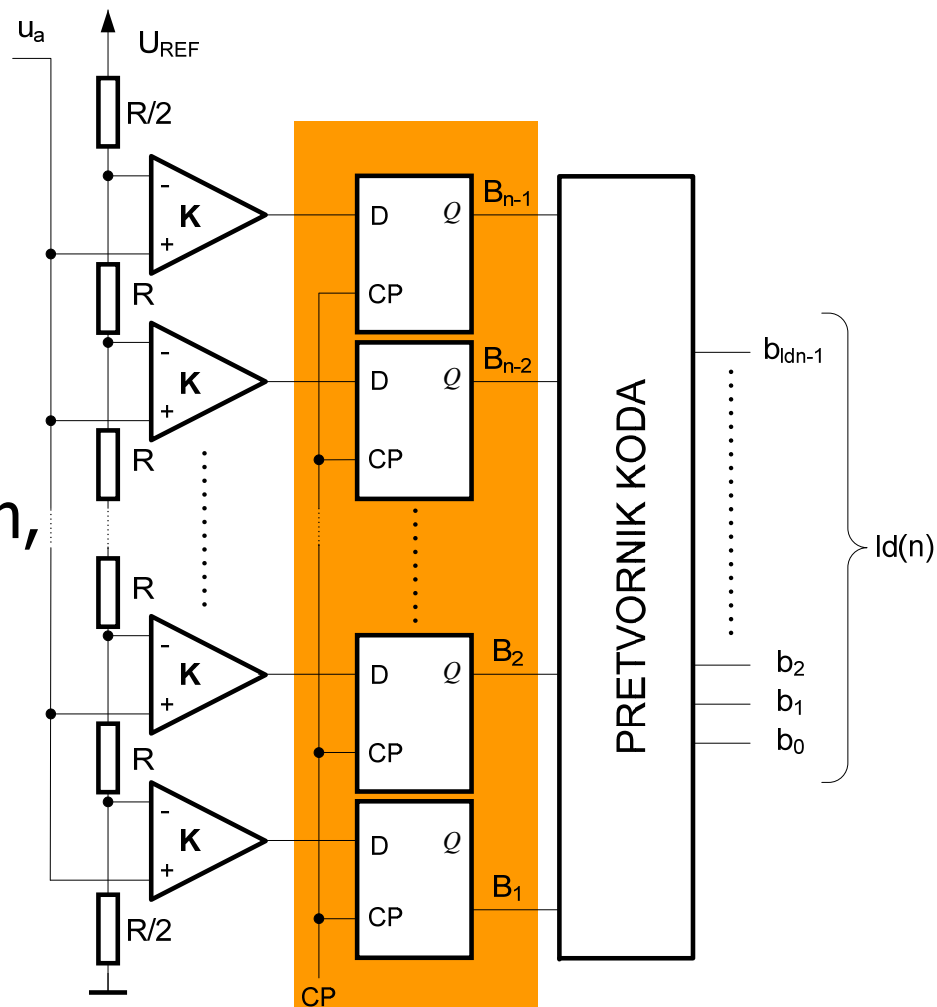
Analogna-digitalno pretvorba

- paralelni AD pretvornik:
 - usporedba u_a s nizom referentnih napona
 \sim *paralelni* rad:
 ne treba brojati!
 - izvorni kod na izlazu komparatora
 \sim "termometarski niz":
 N u *binarnom* obliku tek nakon *pretvorbe koda*
 (Id n = $\log_2 n$: broj bitova ADC)

B_{n-1}	B_{n-2}	...	B_3	B_2	B_1	B_0	$m_{Id(l+1)}$...	m_2	m_1	m_0
0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0	0
0	0	...	0	0	0	1	0	...	0	0	1
0	0	...	0	0	1	1	0	...	0	1	0
0	0	...	0	1	1	1	0	...	0	1	1
0	0	...	1	1	1	1	0	...	1	0	0
.....										
1	1	...	1	1	1	1	1	...	1	1	1

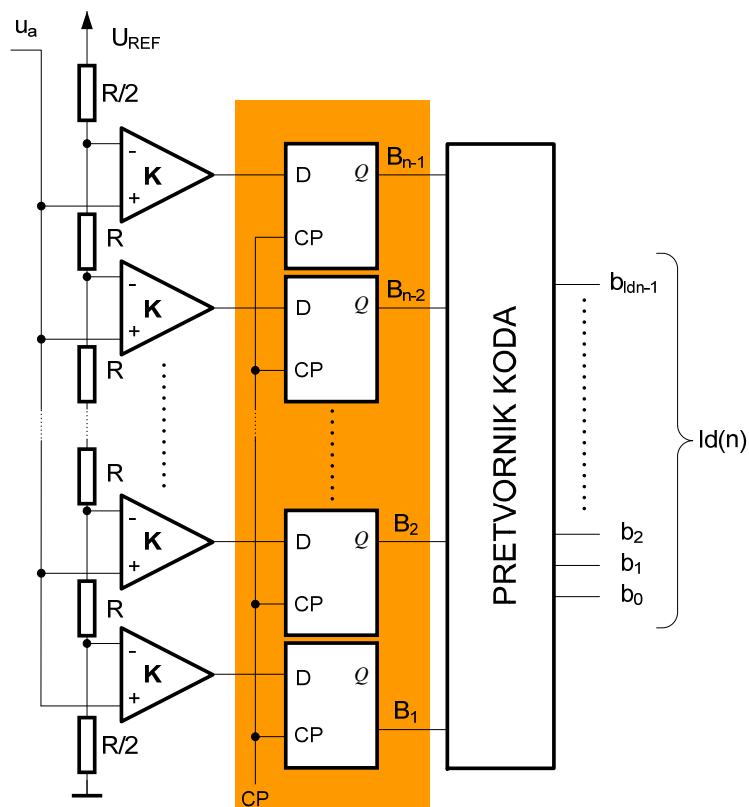
Analogna-digitalno pretvorba

- paralelni AD pretvornik:
 - registar
~ pohranjivanje rezultata pretvorbe; nije nužan
 - bistabili i pretvornik koda
~ najbržom tehnologijom, npr. ECL



Analogna-digitalno pretvorba

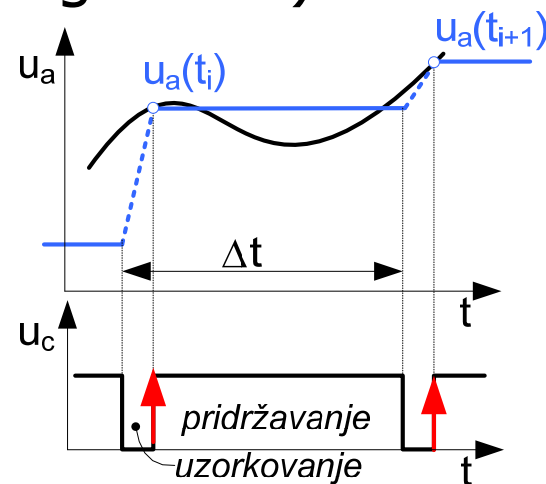
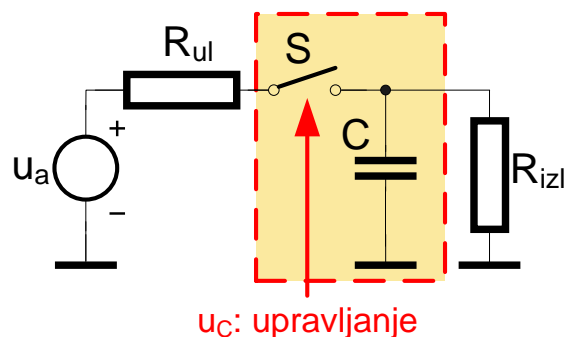
- paralelni AD pretvornik
 \sim ujednačavanje ε_K posebnom raspodjelom referentnih napona: $\varepsilon_K = U_{REF} / (2n - 2)$



$$\begin{array}{lcl}
 u_{n-1} = \frac{2n-3}{2(n-1)} U_{REF} & \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} 11\dots111 & \text{---} U_{REF} \\
 u_{n-2} = \frac{2n-5}{2(n-1)} U_{REF} & \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} 01\dots111 & \text{---} \frac{n-2}{n-1} U_{REF} \\
 u_{n-3} = \frac{2n-7}{2(n-1)} U_{REF} & \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} 00\dots111 & \text{---} \frac{n-3}{n-1} U_{REF} \\
 \vdots & & \vdots \\
 u_3 = \frac{5}{2(n-1)} U_{REF} & \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} 00\dots011 & \text{---} \frac{2}{n-1} U_{REF} \\
 u_2 = \frac{3}{2(n-1)} U_{REF} & \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} 00\dots001 & \text{---} \frac{1}{n-1} U_{REF} \\
 u_1 = \frac{1}{2(n-1)} U_{REF} & \left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} 00\dots000 & \text{---} 0
 \end{array}$$

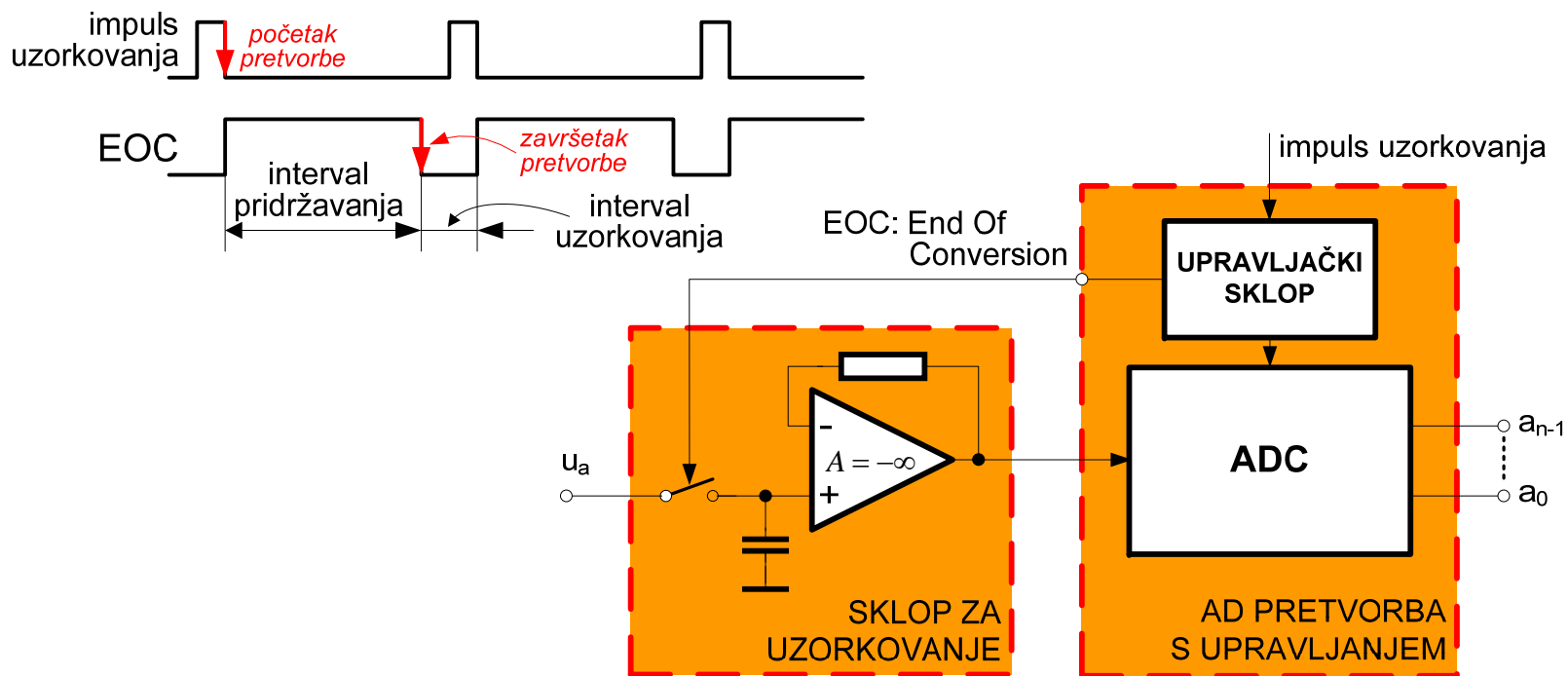
Sklop za uzorkovanje

- *sklop za uzorkovanje*
(engl. sample-and-hold, S/H circuit):
 - uzimanje uzoraka ("uzorkovanje")
~ nabijanje C zatvaranjem prikladno izvedene sklopke
 - otvorena sklopka
~ *pridržavanje* uzorka U_a za vrijeme pretvorbe
 - sklopka
~ "analogna sklopka" (engl. analog switch):
propušta *analogni* napon



Sklop za uzorkovanje

- povezivanje sklopa za uzorkovanje i ADC:
 - uzorkovanje u intervalima (između) pretvorbe
 - pridržavanje uzorka u_a za vrijeme pretvorbe
 - podešavanje opsega u_a



- U. Peruško, V. Glavinić: *Digitalni sustavi*, Poglavlje 13:
Sučelje s analognom okolinom.
- uključivanje digitalnog sustava u okolinu: str. 491-494
 - digitalno-analogna pretvorba: str. 494-499
 - analogno-digitalna pretvorba: str. 499-509



Zadaci za vježbu (1)

- U. Peruško, V. Glavinić: *Digitalni sustavi*, Poglavlje 13:
Sučelje s analognom okolinom.
- digitalno-analogna pretvorba: 13.1-13.8, 13.15-13.19
 - analogno-digitalna pretvorba: 13.9-13.14



Zadaci za vježbu (2)

M. Čupić: *Digitalna elektronika i digitalna logika. Zbirka riješenih zadataka*, Cjelina 13: AD i DA konverzija.

- digitalno-analogna pretvorba:
 - riješeni zadaci: 13.1-13.4, 13.8
 - zadaci za vježbu: 1
- analogno-digitalna pretvorba:
 - riješeni zadaci: 13.5-13.7
 - zadaci za vježbu: 2