



OSNOVE DIGITALNE ELEKTRONIKE

Registri i brojila

Zdravko Kunić
zdravko.kunic@algebra.hr

The background features a complex digital display system. At the top, a large blue LED display shows the number '1299'. Below it, a white LED display shows '0000'. To the right, a red LED display shows '000000'. In the center, a large red LED matrix displays '000472'. Below that, a green LED display shows '000159'. To the right of the green display, a black display shows the word 'SPACE'. At the bottom, a row of grey LED displays shows '000000'.

Registri i brojila

Ishod 7 Minimalni: Realizirati jednostavni kombinacijski digitalni sklop
Željeni: Realizirati složeni sekvencijski digitalni sklop

Sadržaj predavanja

- Registri
 - registri u užem smislu
 - paralelni i posmačni registri
- Brojila
 - asinkrona brojila
 - sinkrona brojila
 - brojila na osnovi posmačnog registra
- Generatori sekvencije

Registri

- Sklopovi za **pamćenje** višebitnih podataka
- Sekvencijski moduli koji se, gotovo beziznimno, upotrebljavaju u svim digitalnim sustavima
- Sastavljeni od **bistabila**
- Broj bistabila je obično jednak broju bitova standardne količine informacije koju digitalni sustav obrađuje (riječ, znak, *bajt*)
- Omogućuju serijsko-paralelnu i paralelno-serijsku pretvorbu informacije

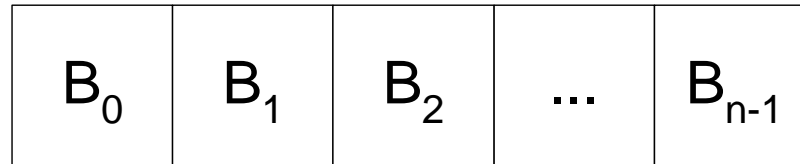
Registri

- Podjela prema mogućnosti upisa i čitanja:
 - **registri u užem smislu** ~ paralelni upis i ispis
 - **posmačni registri** ~ serijski upis i ispis
 - **druge primjene** ~ kombinacije upisa/ispisa
- Prema klasifikaciji integriranih logičkih sklopova prema stupnju integracije, uglavnom se radi o **MSI** i **LSI** modulima:
 - SSI - *Small Scale Integration*: <100 komponenata (tranzistora)
 - **MSI - *Medium Scale Integration*: <1000** komponenata
 - **LSI - *Large Scale Integration*: <10000** komponenata
 - VLSI - *Very Large Scale Integration*: >10000 komponenata

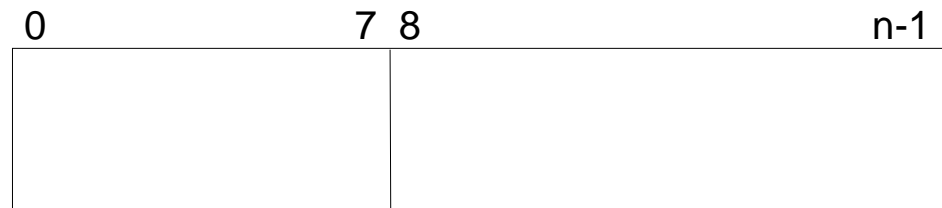
Pojednostavljeni prikaz registra

U složenijim shemama registar se često prikazuje pojednostavljeno:

- Ne crtaju se detaljno svi ulazi i izlazi iz bistabila:

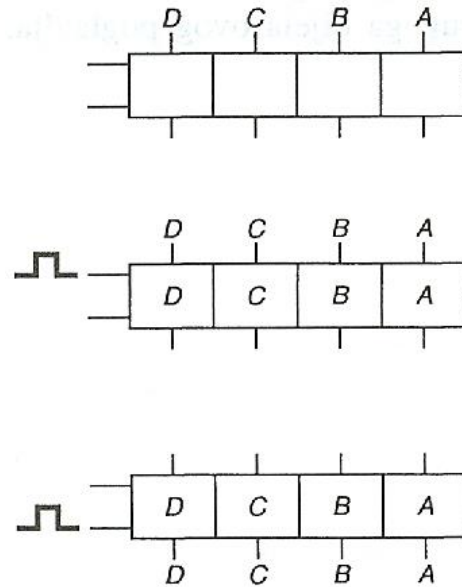


- Kod grupa bistabila crtaju se samo odvojene riječi:

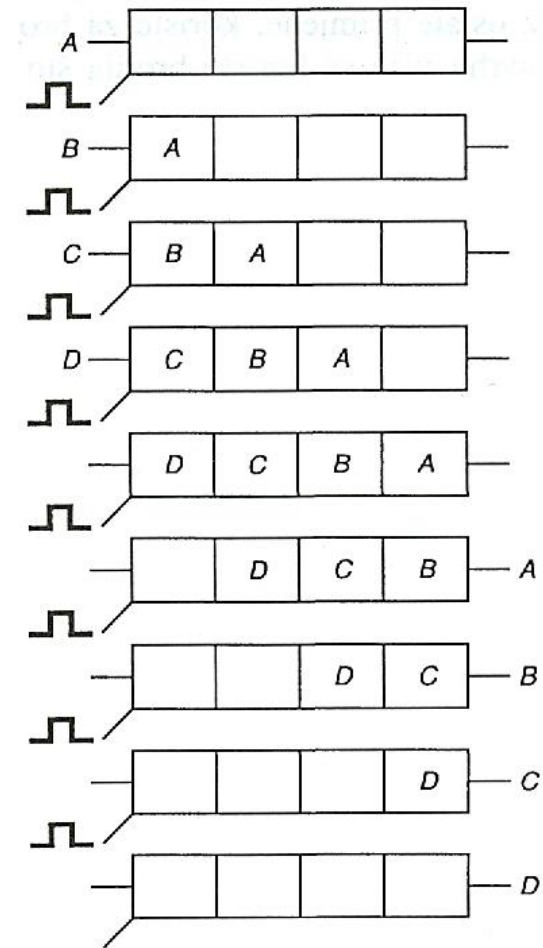


Registri

Paralelni
paralelni upis i čitanje

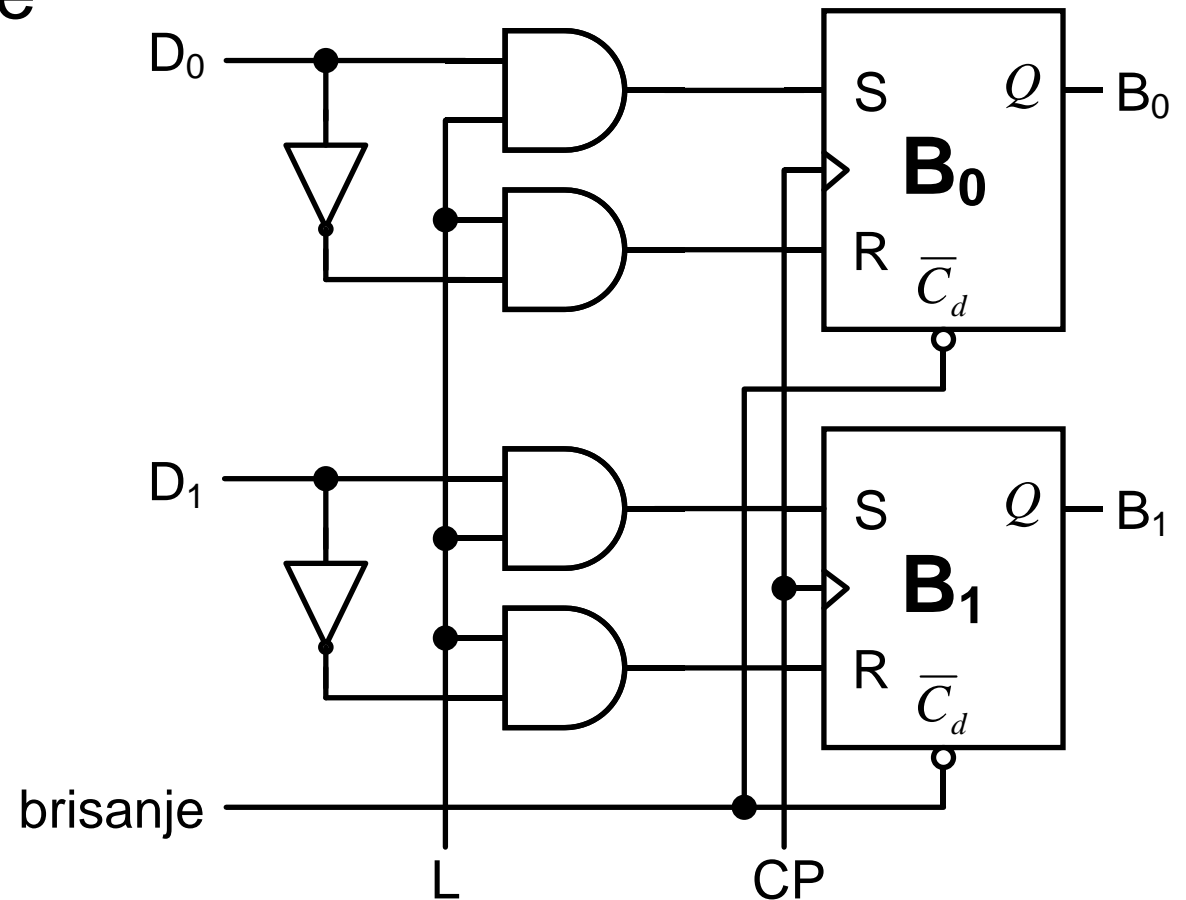


Posmačni
serijski upis i čitanje



Paralelni registar

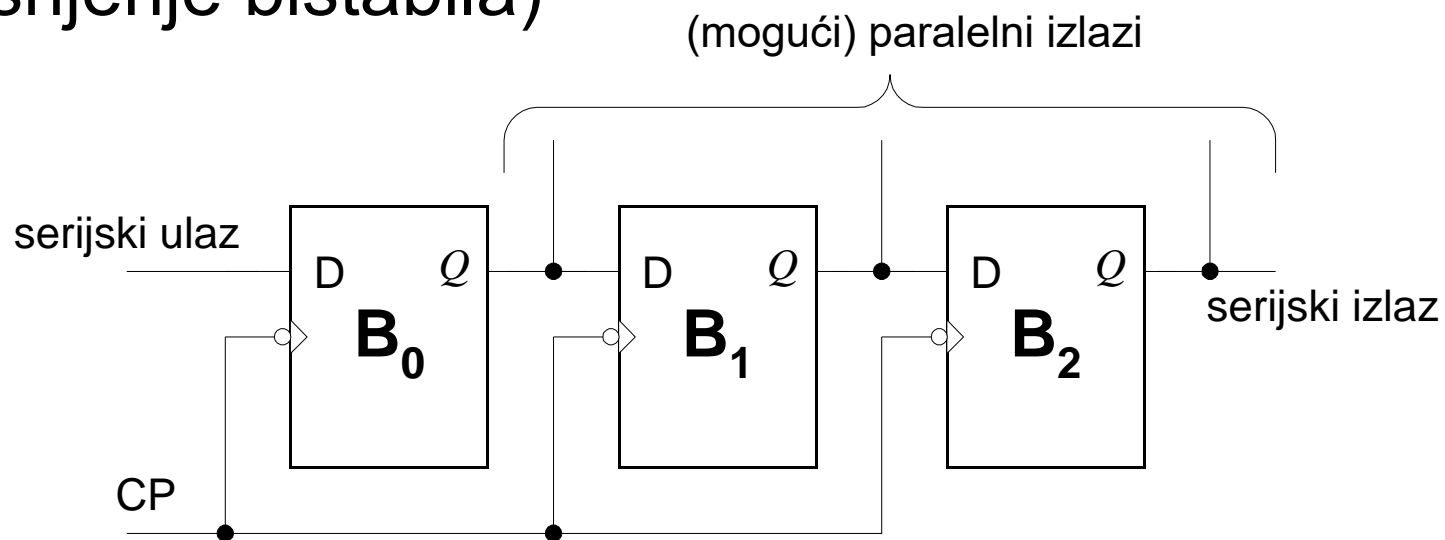
Niz **nepovezanih** bistabila u koje se informacija upisuje električki **paralelno** (istovremeno u sve bistabile)



Posmačni registar (engl. *shift register*)

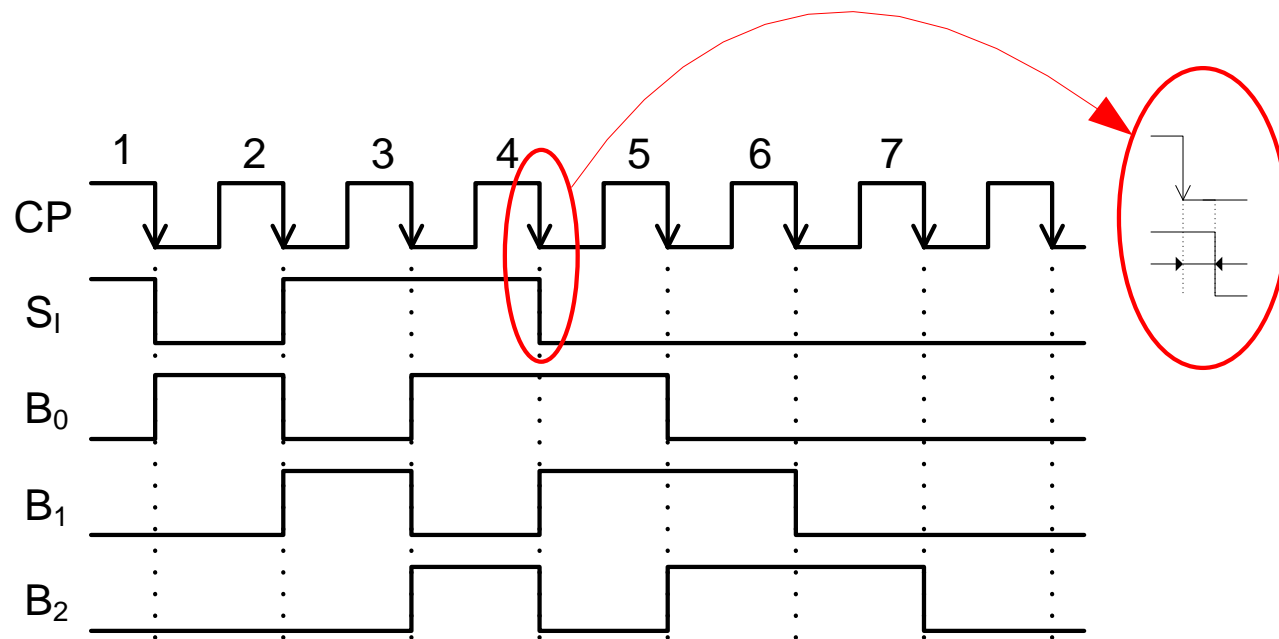
Niz **povezanih** bistabila u koje se informacija upisuje **serijski**

- Izlaz bistabila spaja se na ulaz slijedećeg po redu
- Prividno se bitovi iz B_i u B_{i+1} prenose „**istovremeno**” (ako zanemarimo interno kašnjenje bistabila)



Posmačni registar

- Za ispravan upis nužno je osigurati **kašnjenja između bistabila**:
 - korištenjem dvostrukih bistabila
 - korištenjem bridom okidanih bistabila

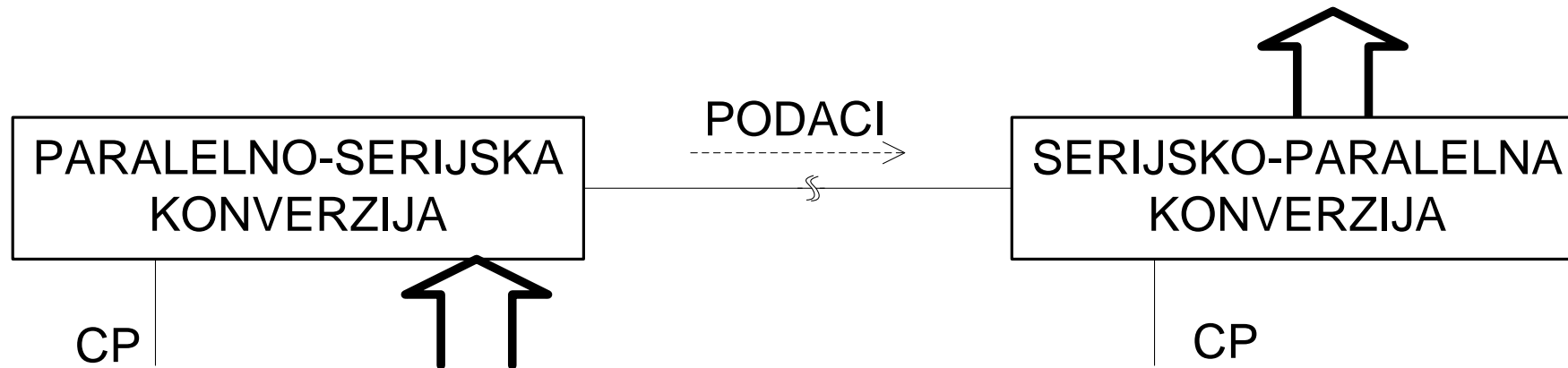


CP	S _I	B ₀	B ₁	B ₂	S ₀
	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0
2	1	0	1	0	0
3	1	1	0	1	1
4	0	1	1	0	0
5	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1
7	0	0	0	0	0

$S_0 = B_2$

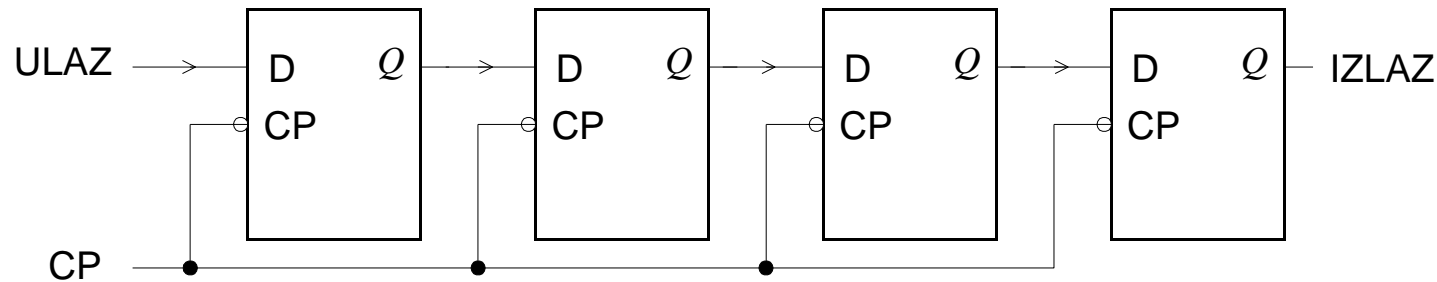
Pretvorba (konverzija) zapisa informacije

- serijski ulaz → paralelni izlaz
- paralelni ulaz → serijski izlaz
- **univerzalni** posmačni registar
 - serijski i paralelni ulaz i izlaz

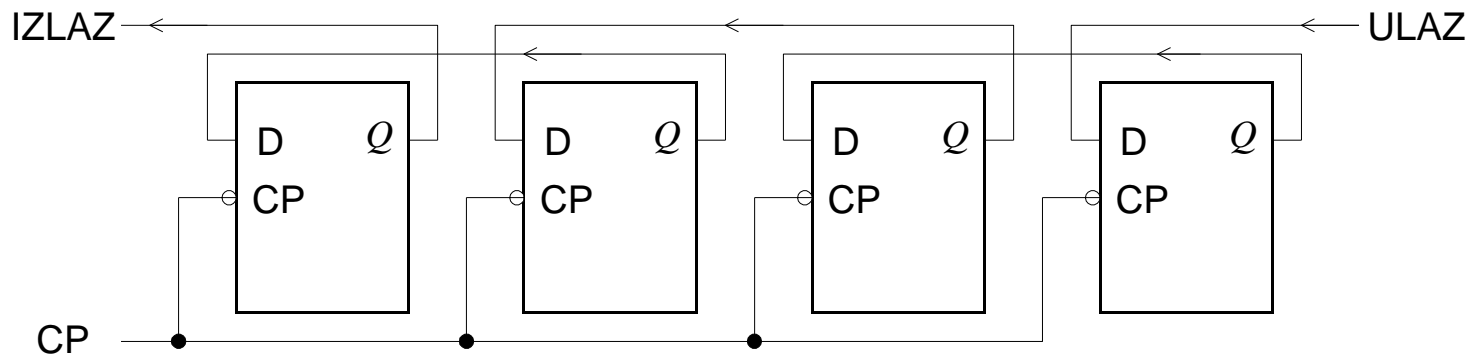


Smjer posmaka

- uobičajeno: **udesno** (prema "normalnom" **izlazu**)

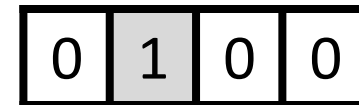


- moguće i **ulijevo** (prema "normalnom" **ulazu**)

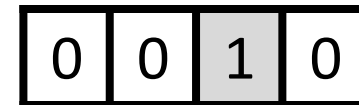


Registri s posmakom u oba smjera

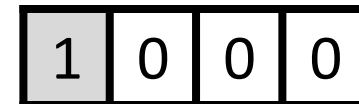
Početni položaj podatka u registru



Posmak podatka iz početnog položaja udesno

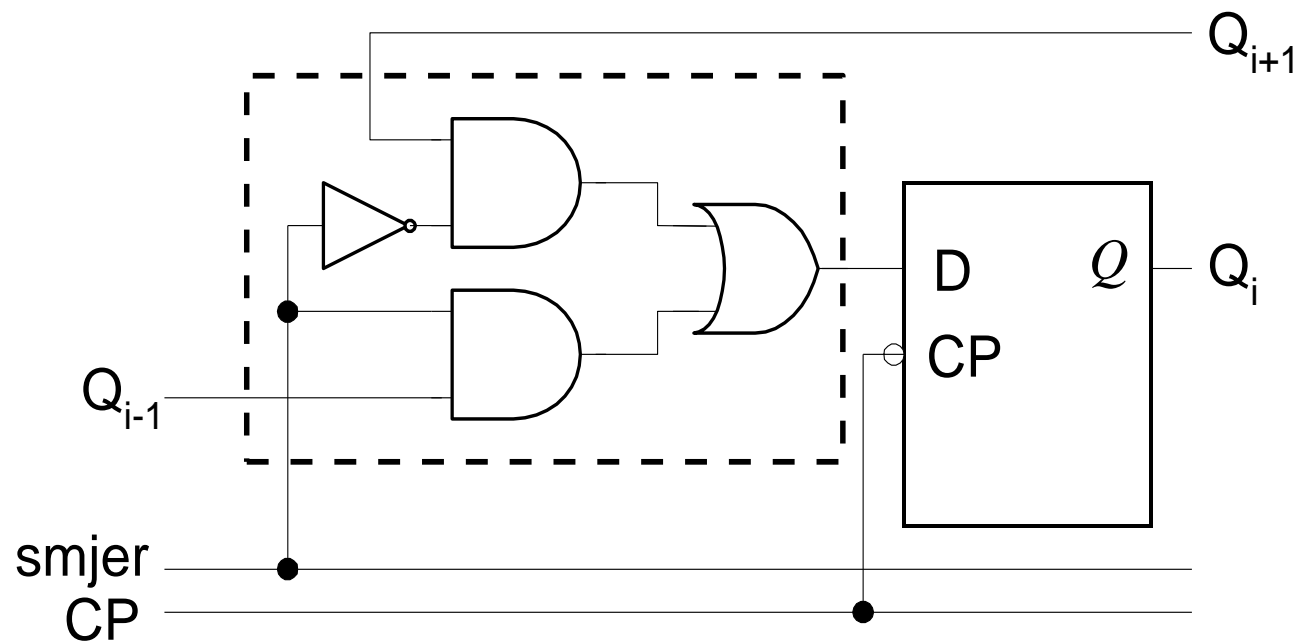


Posmak podatka iz početnog položaja ulijevo



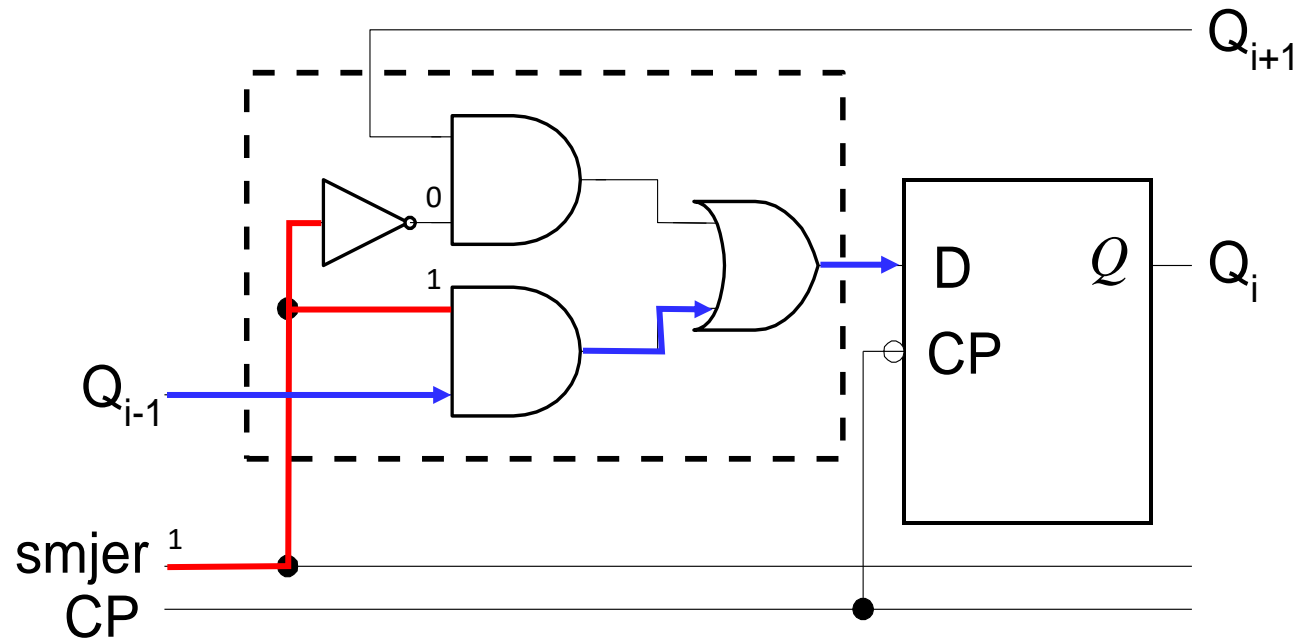
Dvosmjerni posmačni registri

- Kombinaijski sklop za upravljanje smjerom posmaka registra



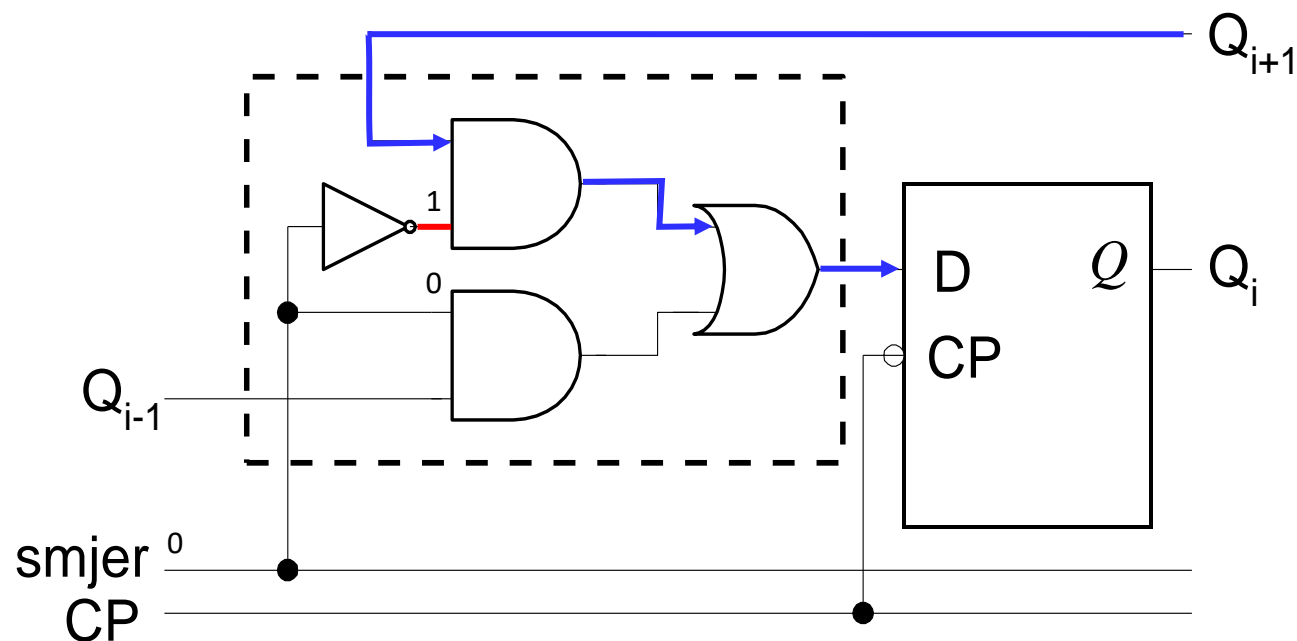
Dvosmjerni posmačni registri

- Kombinaijski sklop za upravljanje smjerom posmaka registra



Dvosmjerni posmačni registri

- Kombinaijski sklop za upravljanje smjerom posmaka registra



Primjena posmačnih registara

- **Zapis (memoriranje)** podataka za serijsko izvršavanje (aritmetičkih) operacija
- **Pretvorba** zapisa informacije:
 - serijsko-paralelna (paralelni izlazi), paralelno-serijska (paralelni ulazi)
- **Izvršavanje** (aritmetičkih) operacija:
 - posmak **ulijevo** → **množenje** s 2; posmak **udesno** → **dijeljenje** s 2
- **Brojenje**
 - posmačni registar u funkciji brojila
- **Generiranje "pseudo-slučajnog" slijeda** (generatori sekvencija):
 - linijski kodovi (pretvorba digitalnih informacija u digitalni signal), kriptiranje
 - izvedbe cirkulirajućih memorija (FIFO), generator znakova (*news crawls*)

Brojilo

Sklop koji pod utjecajem ulaznih impulsa (CP) ciklički prolazi utvrđenim redoslijedom stanja.

- Posmačni registar čiji je izlaz spojen s ulazom:
 - "broji" ulazne impulse (koji ne moraju biti periodički)
 - u pravilu imaju samo jedan ulaz, i to obično za CP
- Pojmovi vezani uz brojila:
 - **ciklus brojenja**: niz stanja kroz koja brojilo prolazi
 - **baza brojenja**: baza brojevnog sustava u kojem brojilo broji
 - broj mogućih stanja u jednom ciklusu brojenja (prije povratka u početno stanje)

Baza brojenja

- Brojenje u "modulu":
 - stanje (sadržaj) brojila je ostatak cjelobrojnog dijeljenja s bazom (modulom)
 - $m = B \rightarrow$ brojilo modulo m
- Brojilo s n bistabila:
 - Maksimalan broj stanja: $N = 2^n$
 - Maksimalan broj u binarnoj notaciji: $W = 2^n - 1$
- Kaskadiranje brojila:
 - Pomoću signala da je brojilo ponovno u početnom stanju moguće je ostvariti višeznamenasti brojevni sklop

Funkcijska podjela brojila

- **Brojila u užem smislu** (engl. *counters*)
 - važan je **redoslijed izmjene stanja** u ciklusu i mogućnost ispravnog očitavanja (dekodiranja!) svakog stanja
 - Primjer primjene: generator upravljačkih impulsa digitalnog sustava
- **Djelitelji frekvencije** (engl. *scalers*)
 - važan je **broj stanja**, ne i redoslijed njihove izmjene
 - očitavaju samo stanje definirano željenim n -tim izlaznim impulsom

Podjela brojila prema načinu upravljanja

- **Sinkrona** brojila:

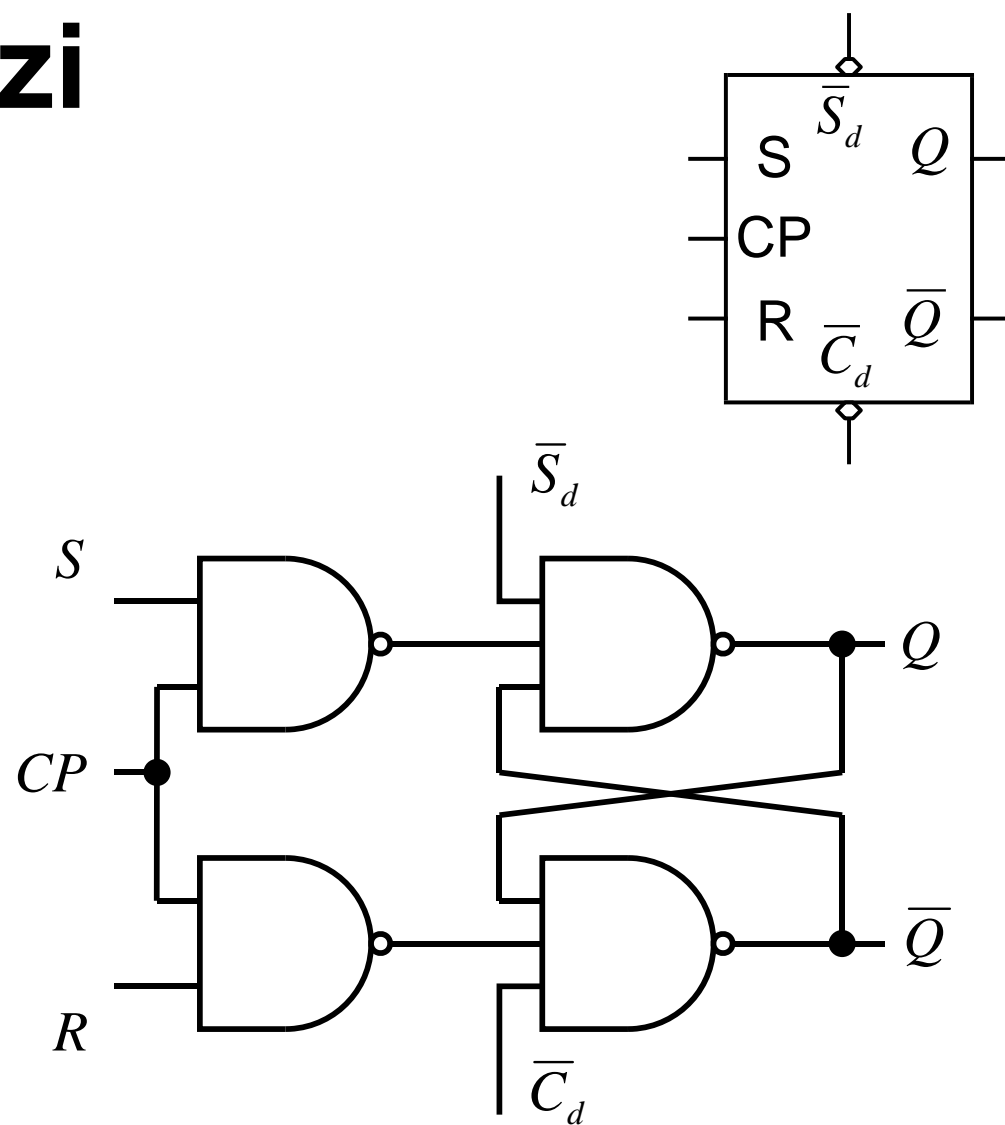
- svi bistabili mijenjaju stanja pod utjecajem impulsa (takta)
- složenija, skuplja, brža

- **Asinkrona** (engl. *ripple*) brojila:

- promjena stanja prvog bistabila uzrokuje serijsku promjenu stanja sljedećih u nizu
- umjesto impulsa (takta), slijedeći bistabil je pobuđen promjenom stanja prethodnog bistabila (engl. *ripple*: mreškanje, talasanje)
- jednostavnija, jeftinija, sporija (niža maksimalna frekvencija brojenja)

Dodatni asinkroni ulazi

- Omogućuju zaobilaznje sinkronizacijskih impulsa
 - direktni ulazi ($\overline{S}_d, \overline{C}_d$)
 - aktivna razina je 0
 - dominiraju nad sinkronim ulazima S i R
- Potencijalni problem:
 - za vrijeme aktivnog stanja CP istovremena pobuda putem sinkronih i asinkronih ulaza može izazvati hazard



Brojila na osnovi posmačnog registra

Povratna veza s izlaza posmačnog registra na njegov ulaz nudi dvije mogućnosti:

- **prstenasto brojilo**

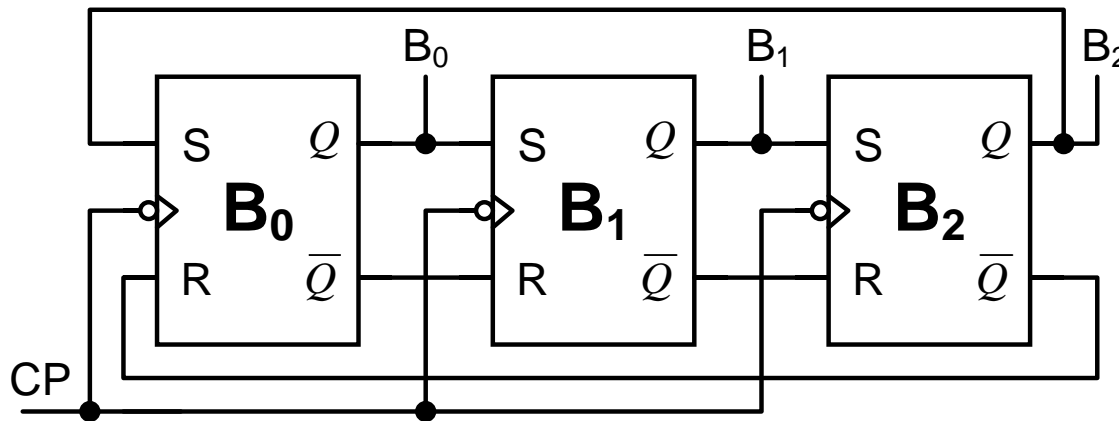
- $T_{SET} = Q_{n-1} ; T_{RESET} = \overline{Q}_{n-1}$
- povratna veza – posmačni registar spojen u prsten
- početno stanje čini samo jedna 1 u posmačnom registru

- **Johnsonovo brojilo**

- $T_{SET} = \overline{Q}_{n-1} ; T_{RESET} = Q_{n-1}$
- povratna veza – Q i \overline{Q} se križaju (engl. *Twisted ring counter*)
- dvostruko više mogućih stanja s istim brojem bistabila

Prstenasto brojilo (engl. *ring counter*)

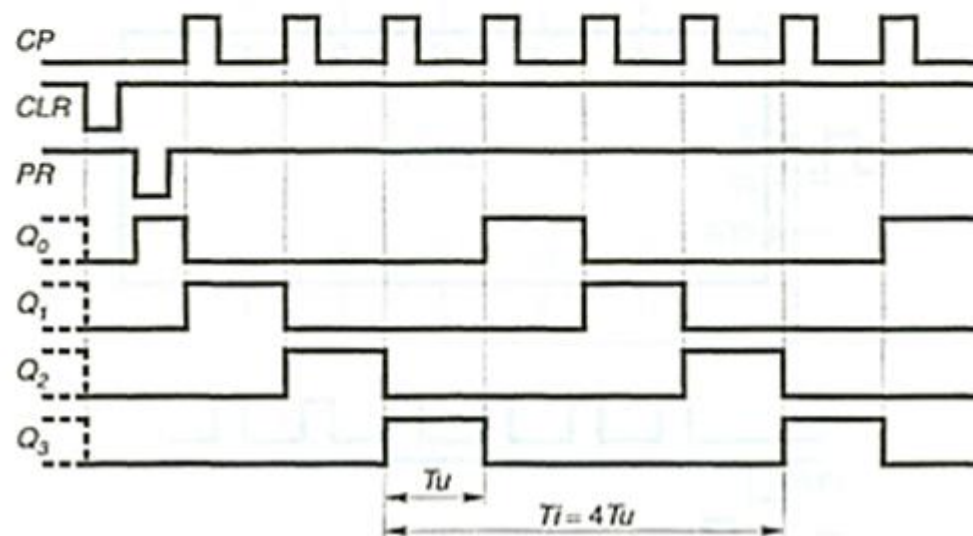
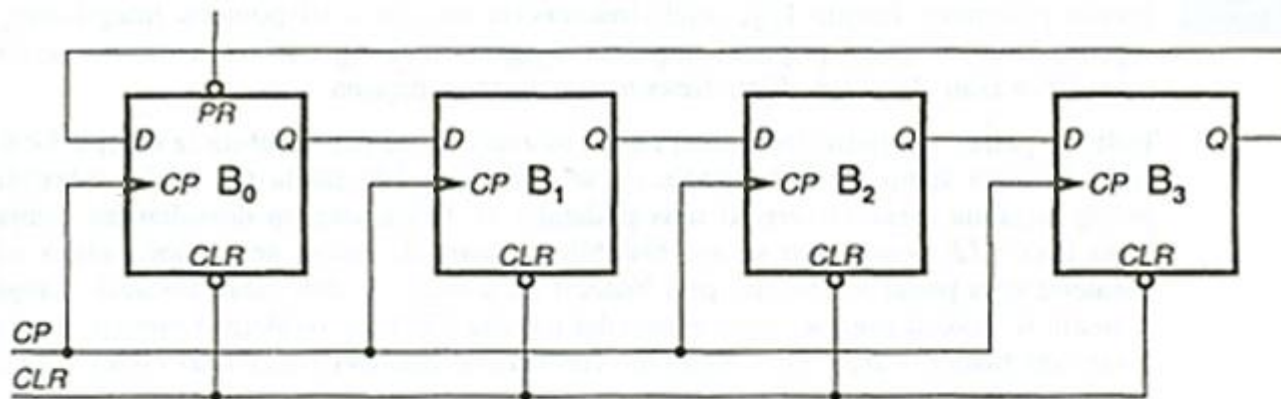
- samo jedna jedinica (1) cirkulira u posmačnom registru
(raspon brojenja je od 0 do $n - 1$)
- baza (modul) = broj bistabila (neefikasno)



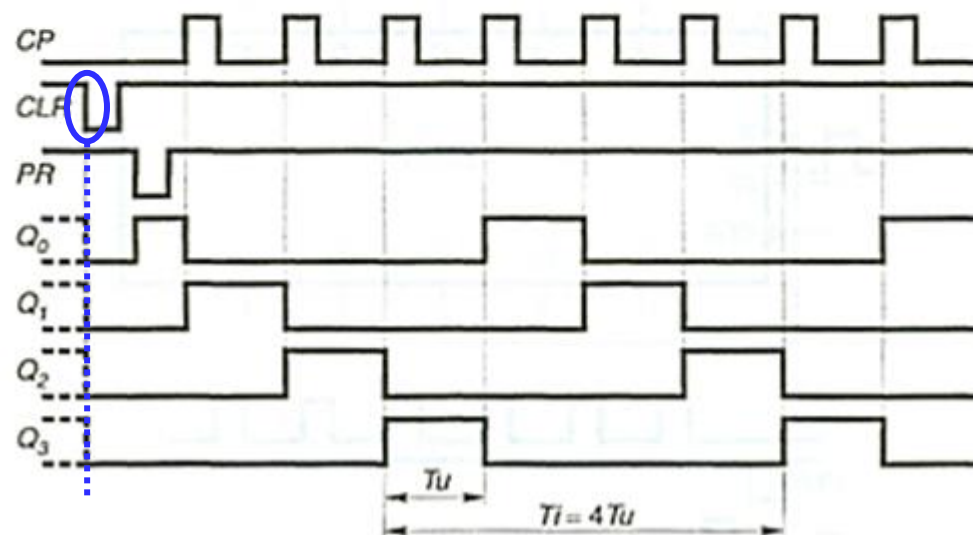
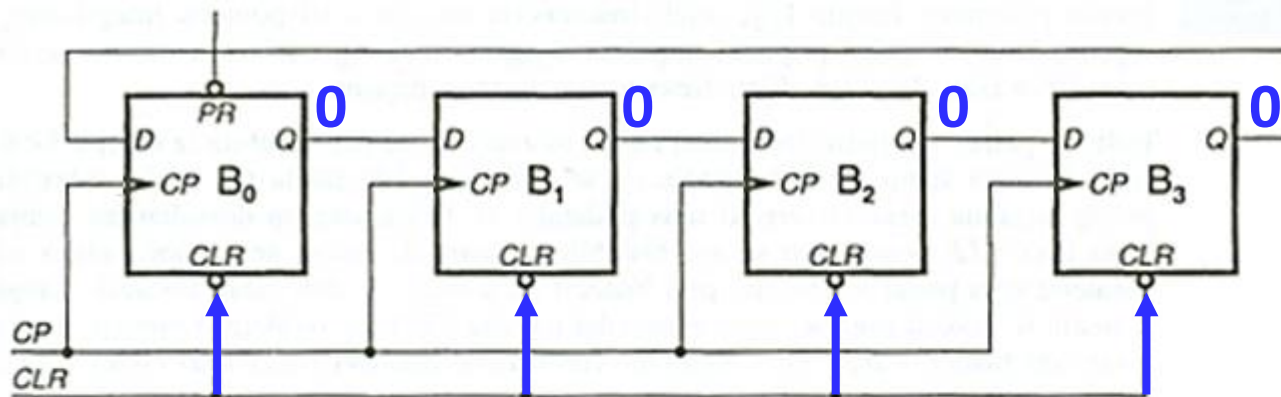
CP	B ₀	B ₁	B ₂
0	1	0	0
1	0	1	0
2	0	0	1
3	1	0	0

- djelitelj frekvencije: dijeli frekvenciju s n

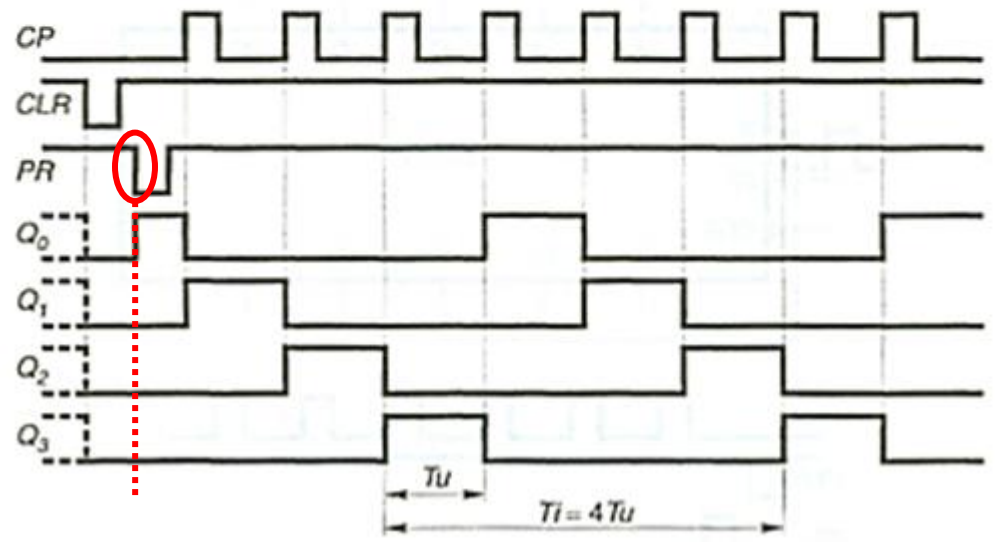
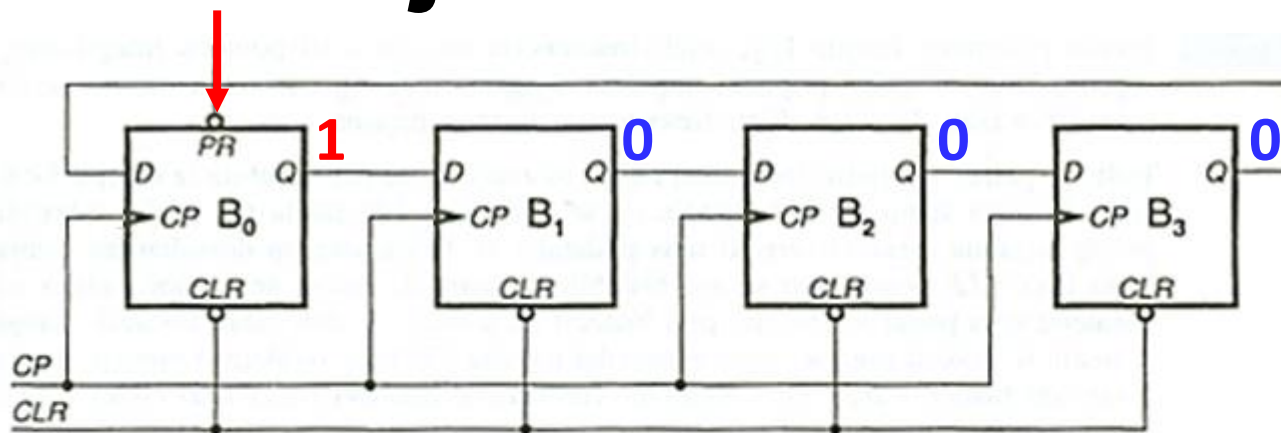
Prstenasto brojilo – vremenski dijagram



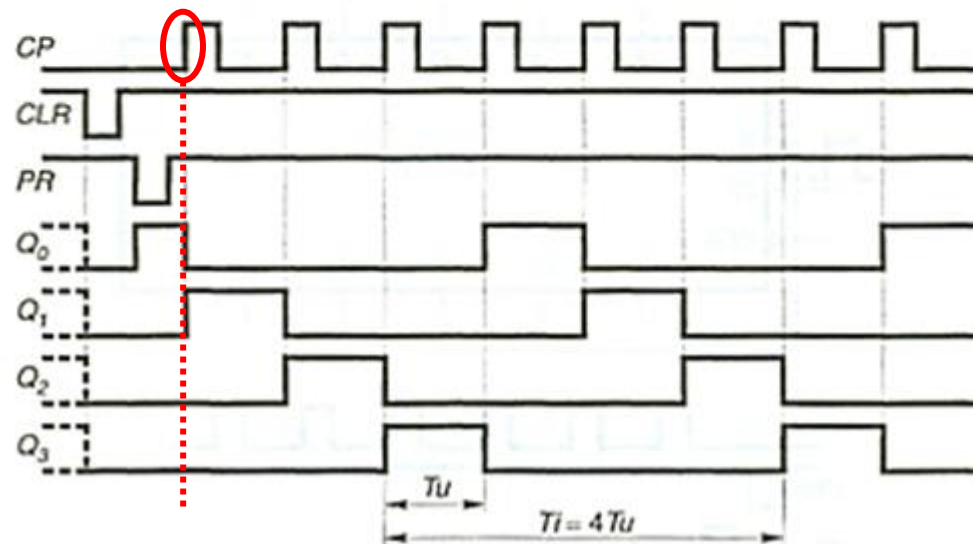
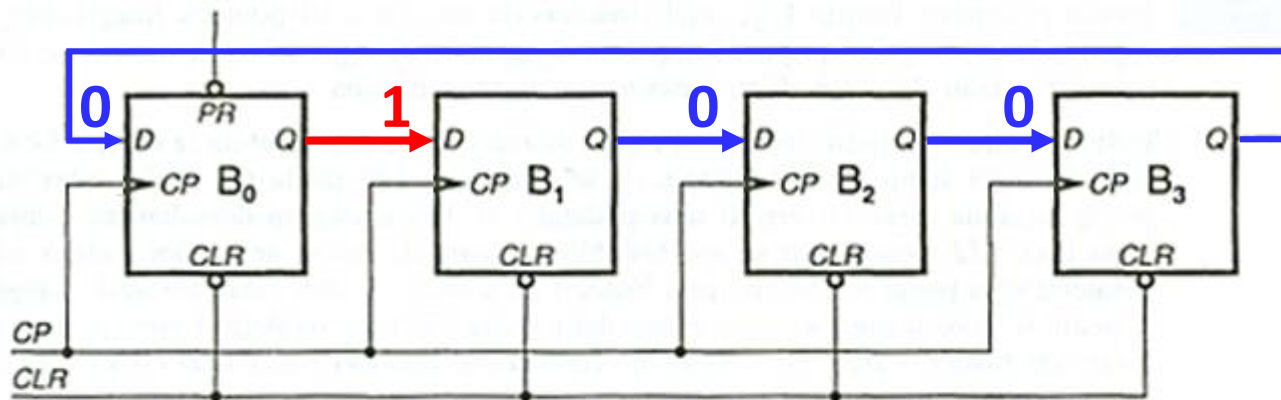
Prstenasto brojilo – vremenski dijagram



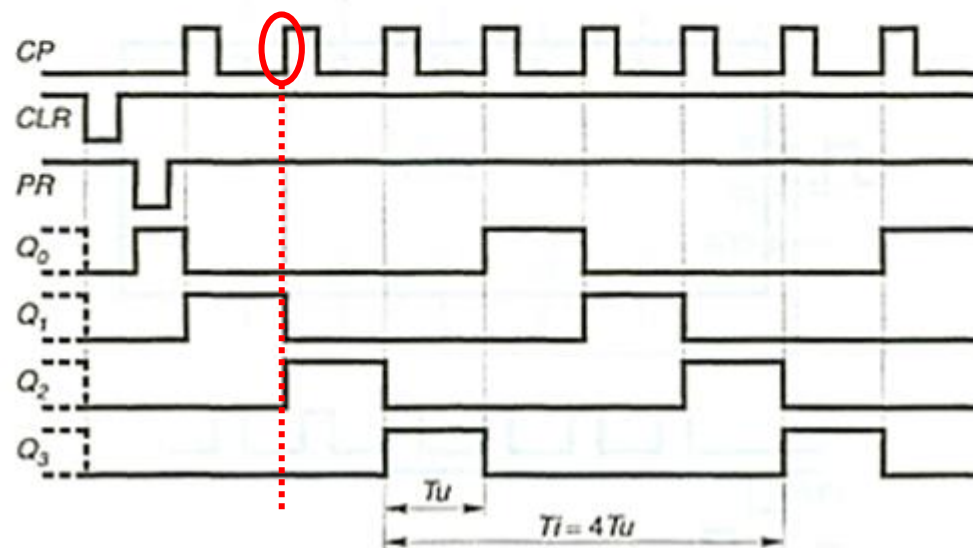
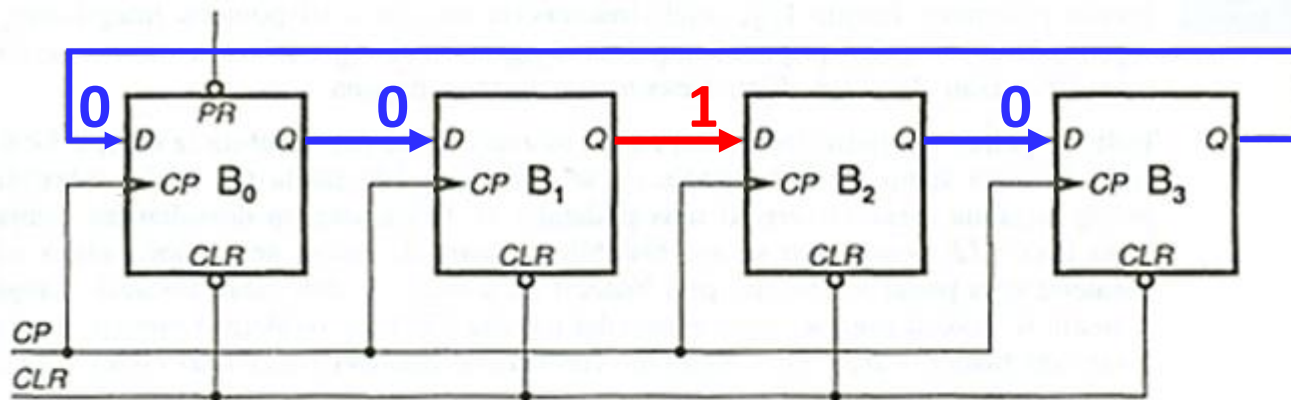
Prstenasto brojilo – vremenski dijagram



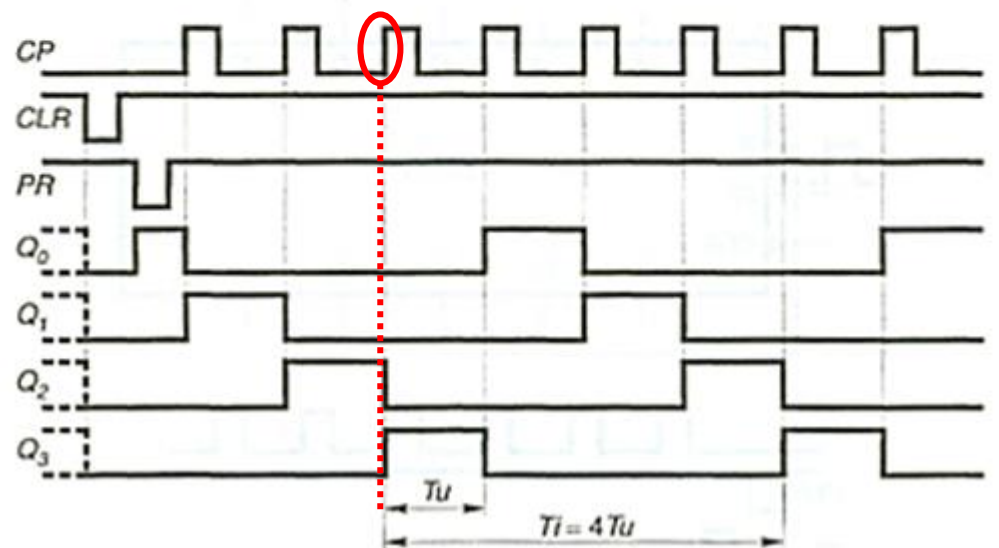
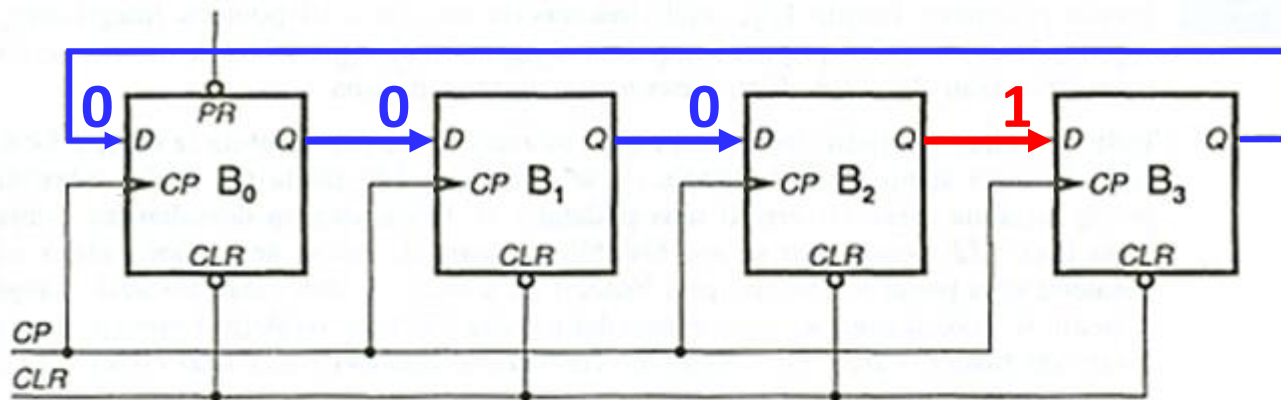
Prstenasto brojilo – vremenski dijagram



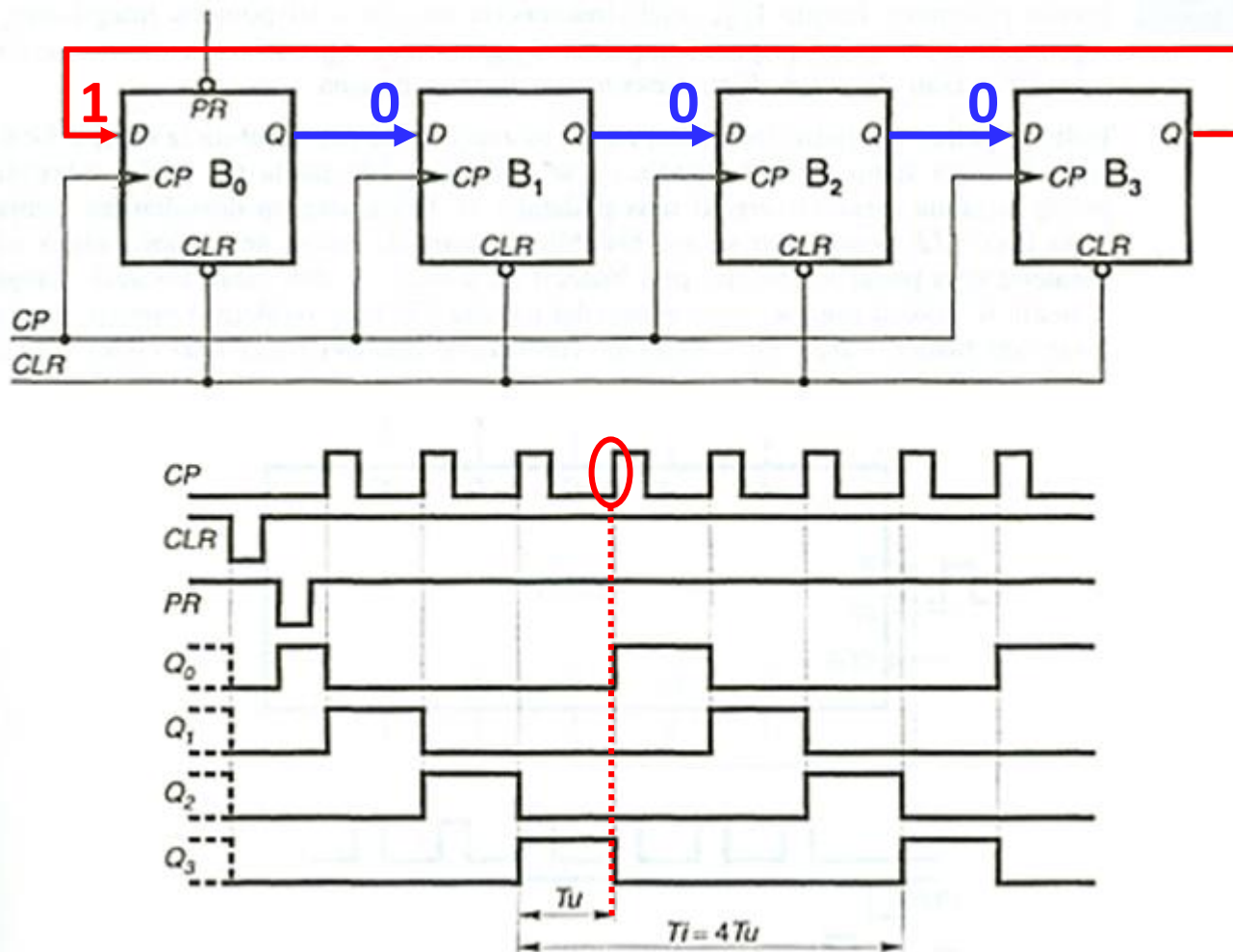
Prstenasto brojilo – vremenski dijagram



Prstenasto brojilo – vremenski dijagram

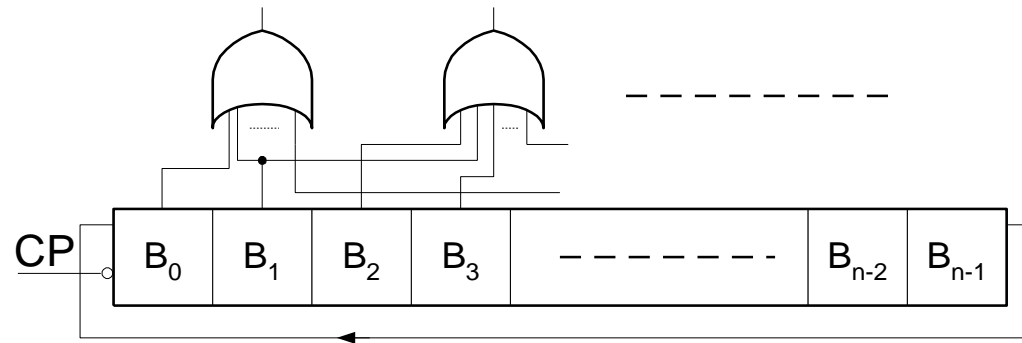


Prstenasto brojilo – vremenski dijagram



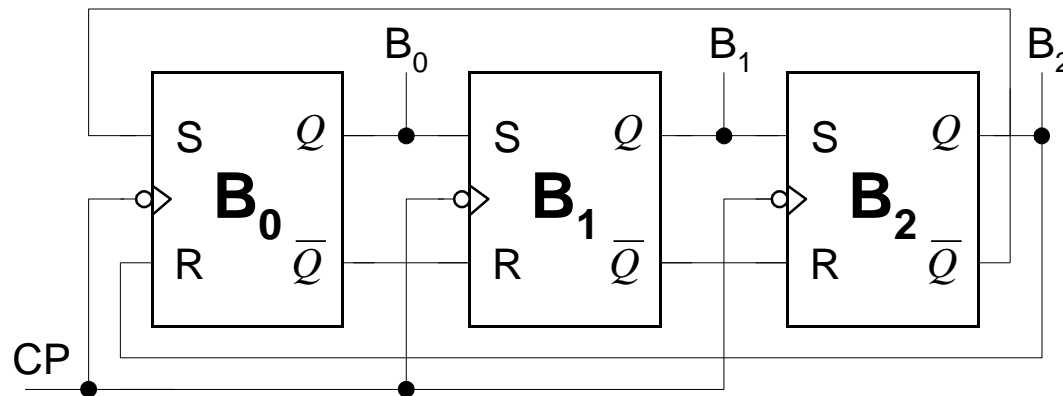
Prstenasto brojilo - karakteristike

- Sinkrono brojilo
- Za očitavanje stanja nije potreban dekodler
- Za siguran start je potrebno predvidjeti prelazak iz pogrešnih stanja u ispravno stanje - **jedna jedinica** u registru!
- Primjer korištenja: kombiniranjem ILI izlaza pojedinih bistabila moguće je postići proizvoljni valni oblik



Johnsonovo brojilo

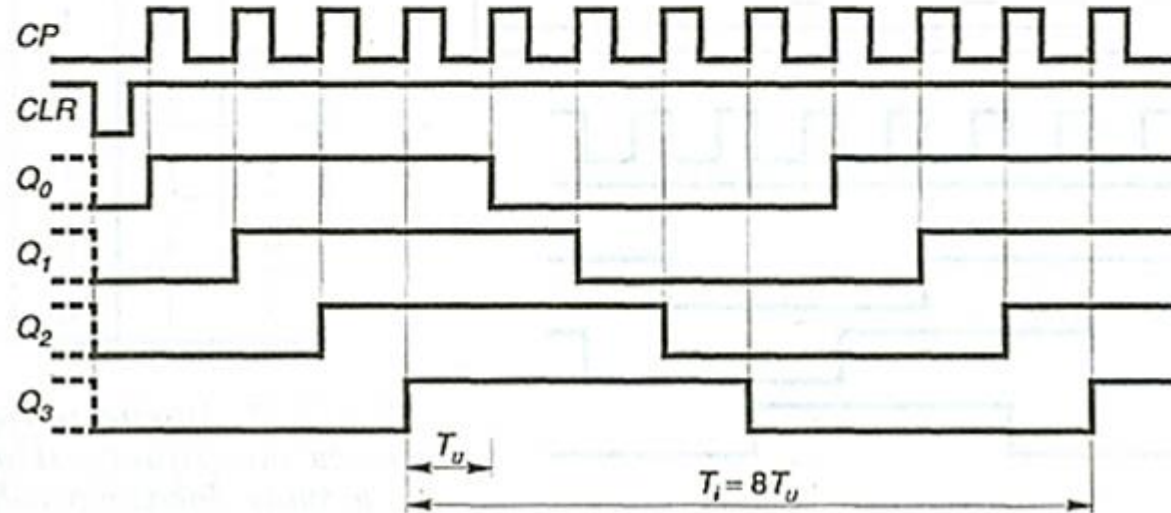
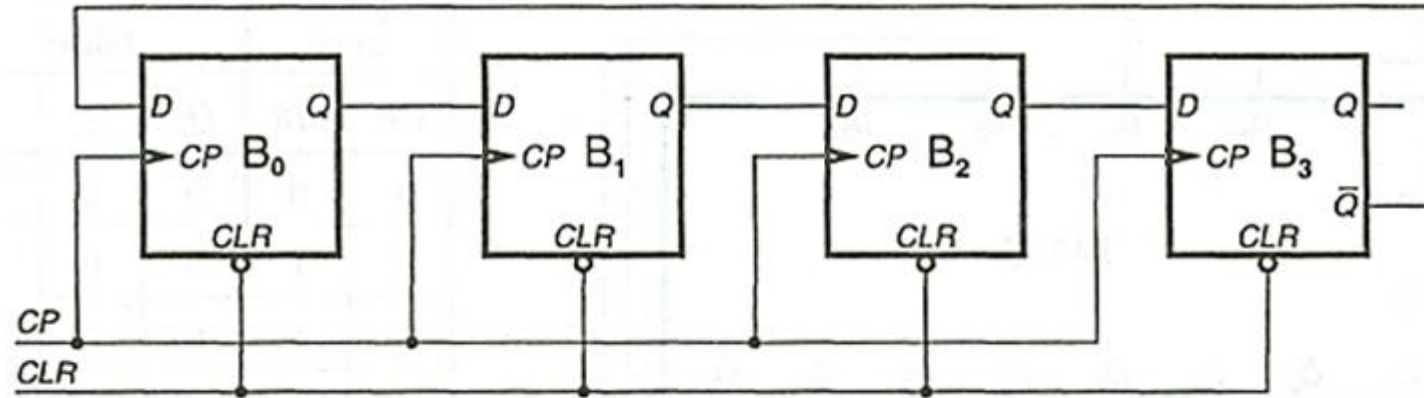
- Sinkrono brojilo s ukrižanim prstenom (engl. *twisted ring counter*)
- Broj mogućih stanja: $2n$ (raspon brojenja je od 0 do $2n - 1$)
- Budući da je $2n < 2^n$ određeni broj stanja se ne koristi
- Distanca izlaznog kôda $d_{min} = 1$



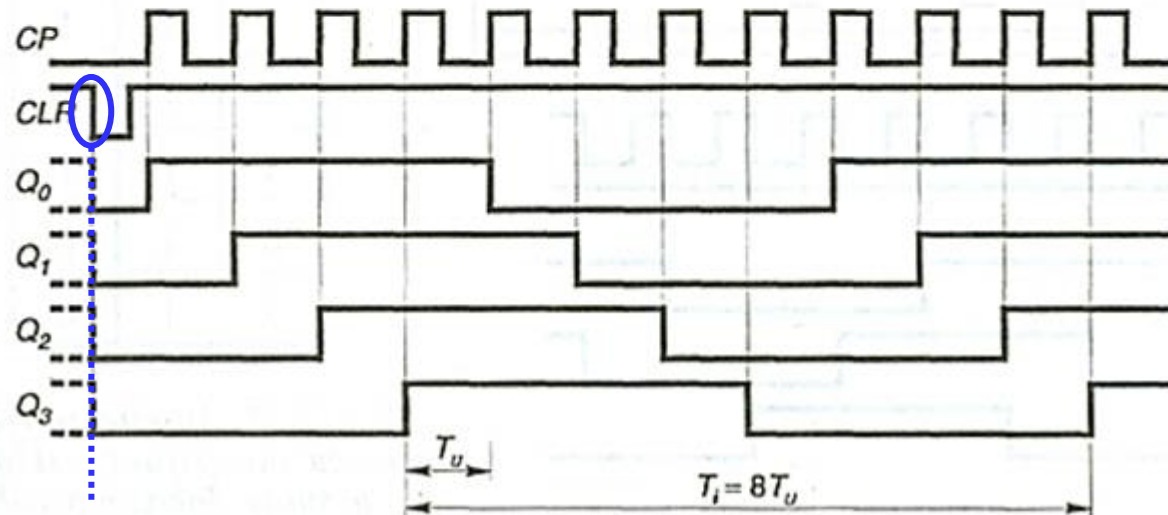
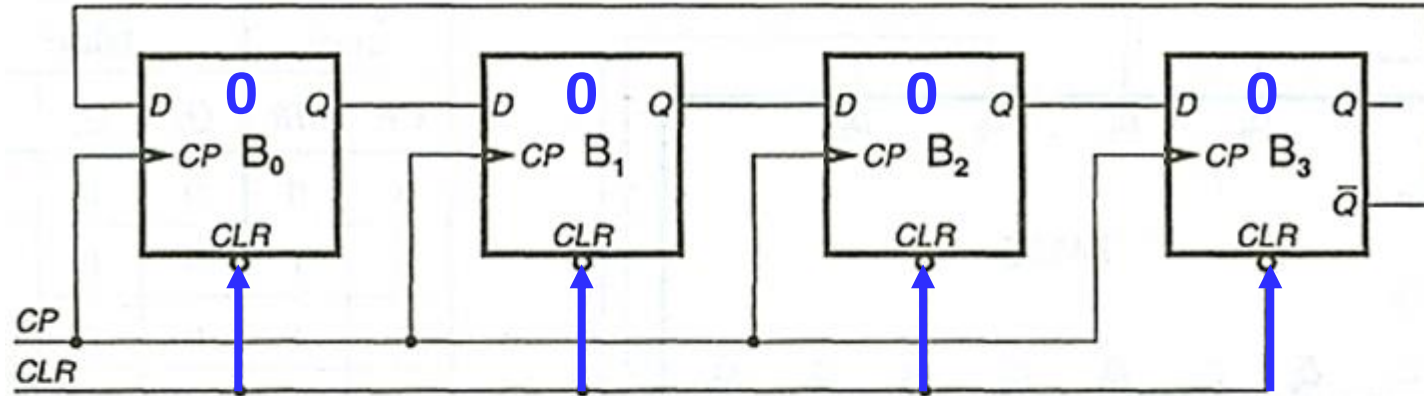
CP	B ₀	B ₁	B ₂
0	0	0	0
1	1	0	0
2	1	1	0
3	1	1	1
4	0	1	1
5	0	0	1
6	0	0	0

- dijeli frekvenciju s $2n$

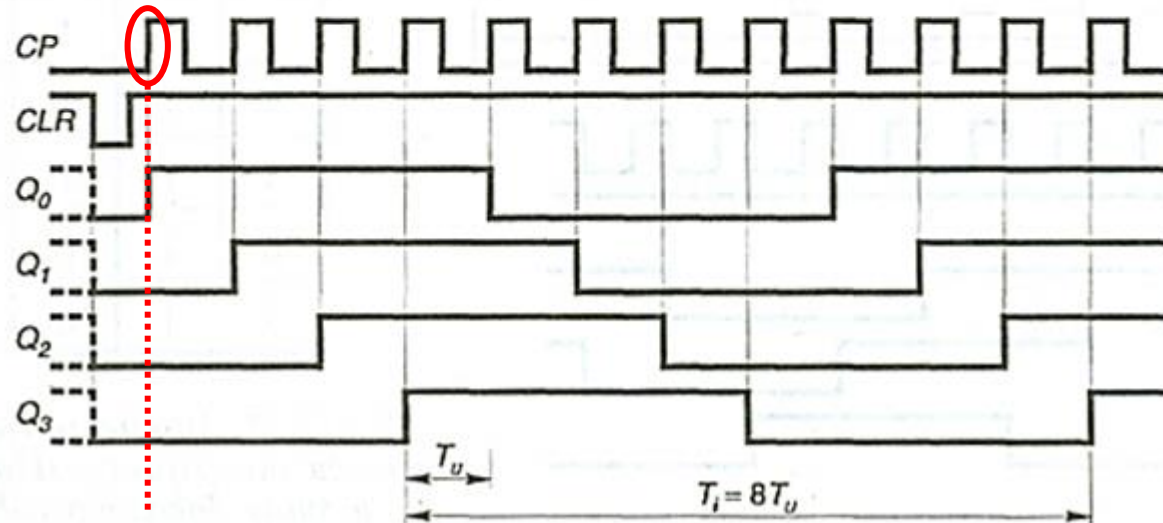
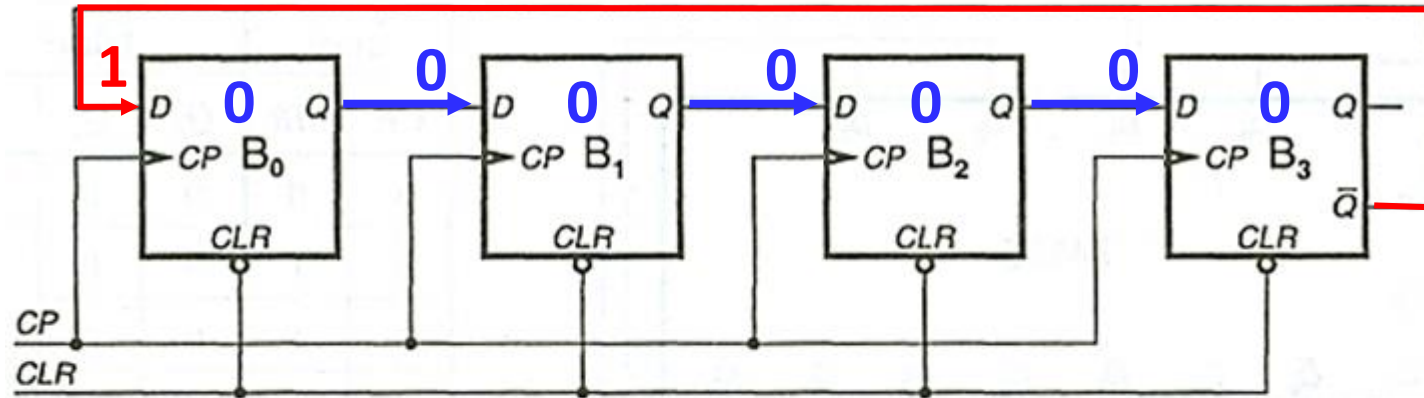
Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram



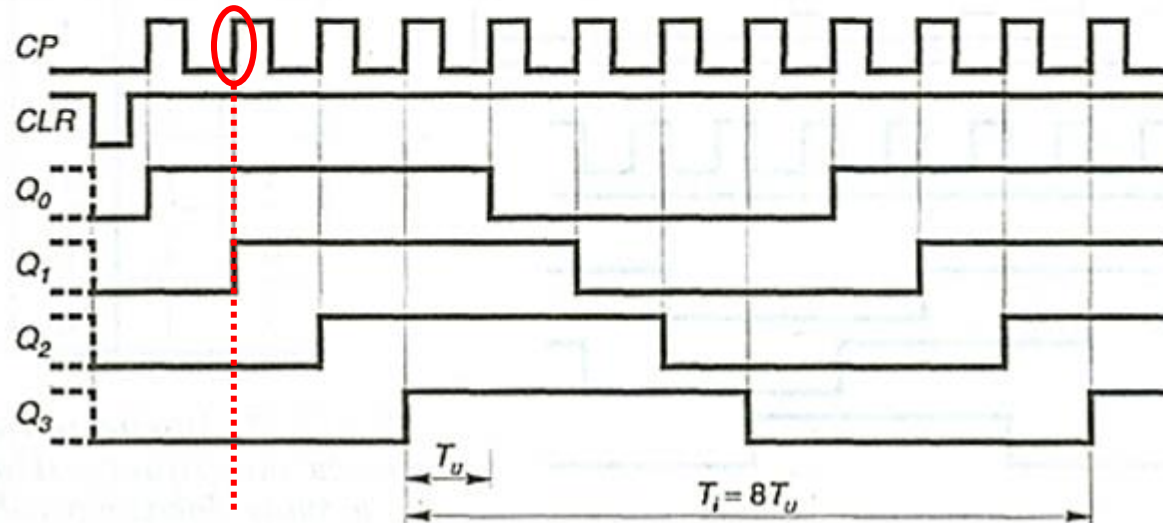
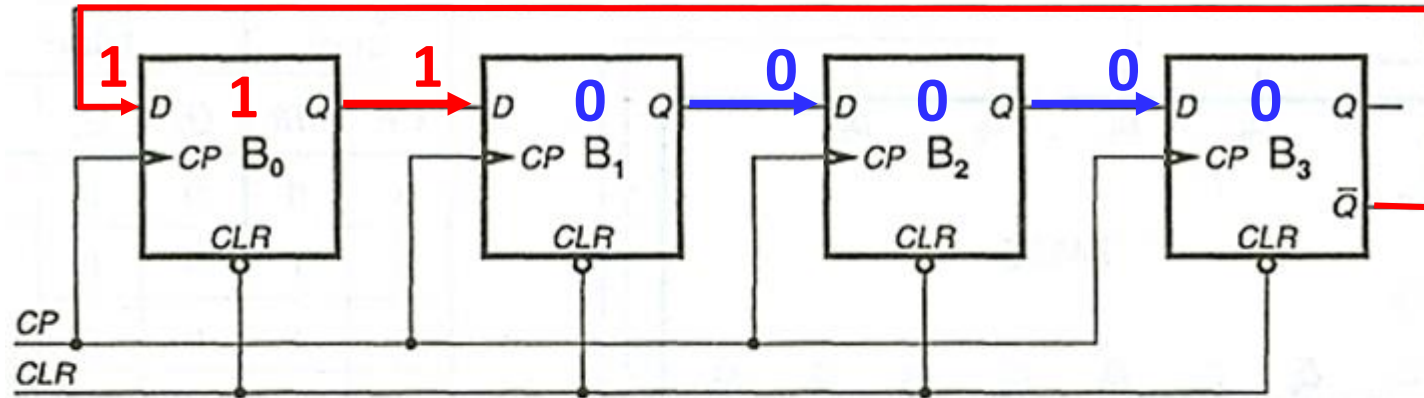
Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram



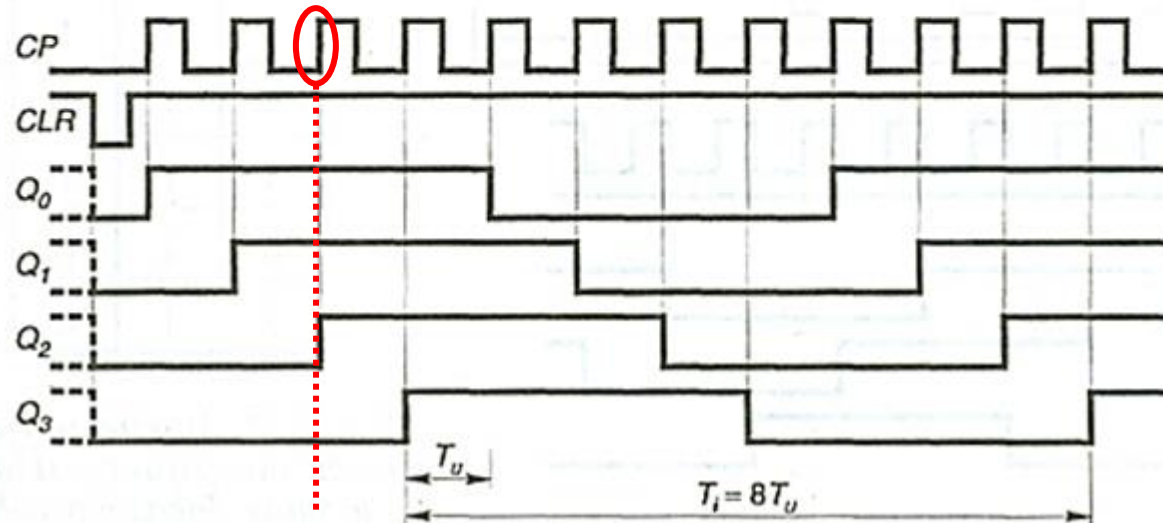
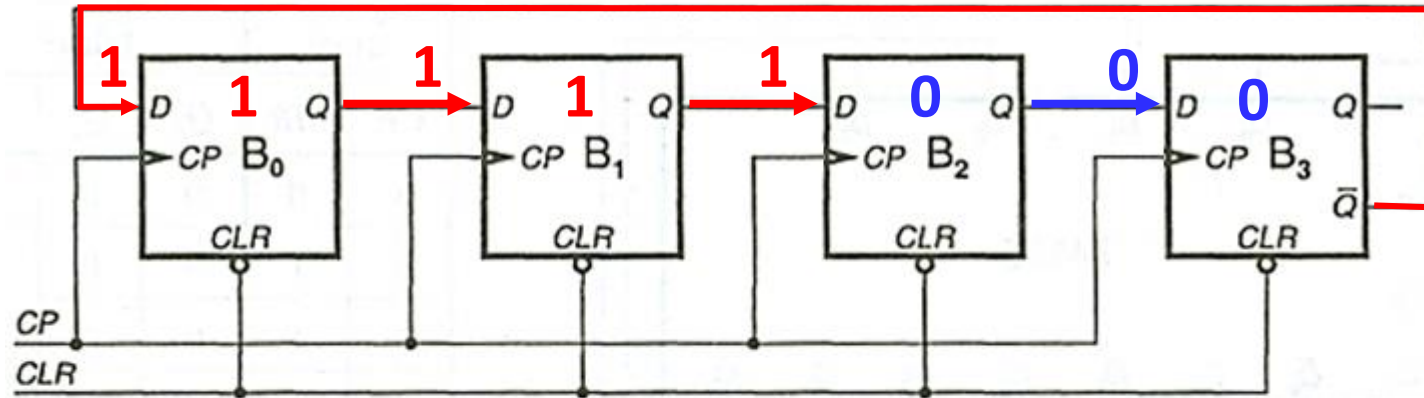
Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram



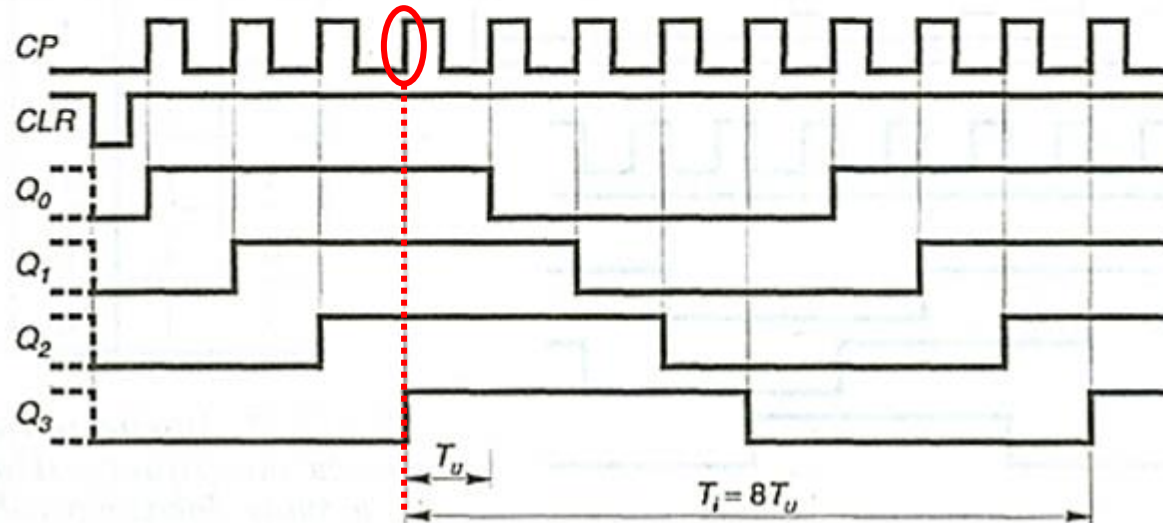
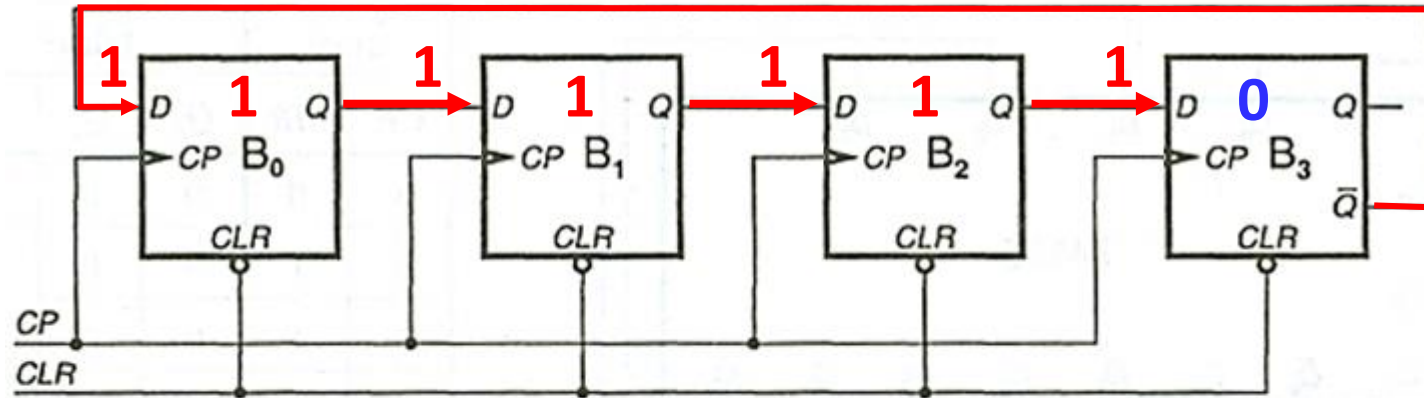
Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram



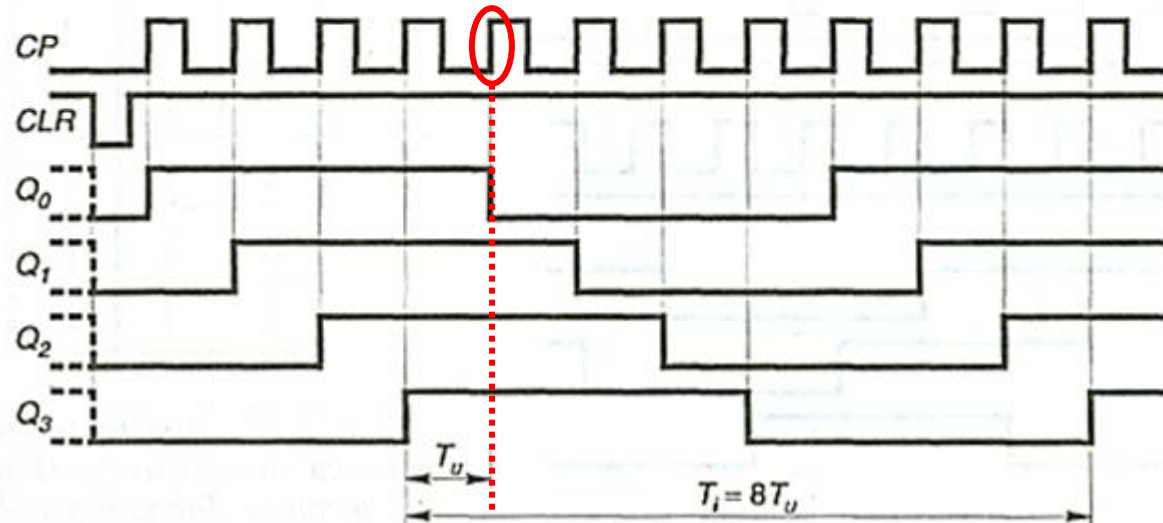
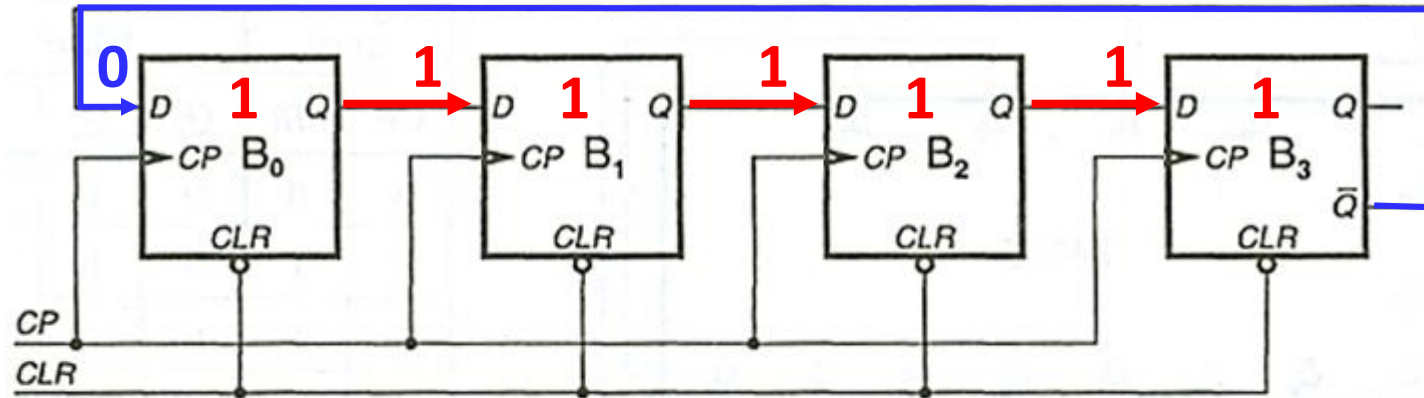
Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram



Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram

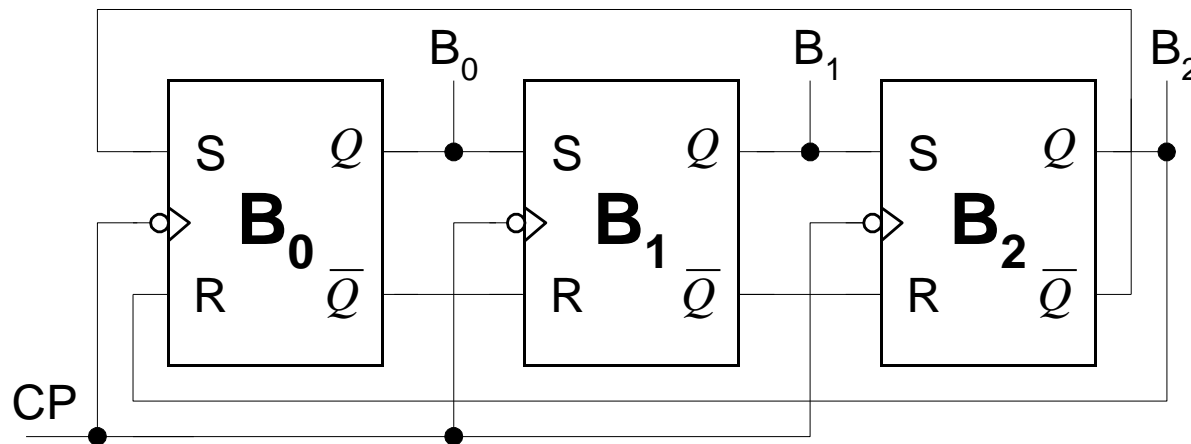


Johnsonovo brojilo – vremenski dijagram



Johnsonovo brojilo

- Relativno jednostavno dekodiranje stanja:
 - I-funkcija dva susjedna izlaza: B_i i \bar{B}_i



CP	B_0	B_1	B_2
0	0	0	0
1	1	0	0
2	1	1	0
3	1	1	1
4	0	1	1
5	0	0	1
6	0	0	0

$$0: \bar{B}_2 \bar{B}_0$$

$$1: \bar{B}_1 B_0$$

$$2: \bar{B}_2 B_1$$

$$3: B_2 B_0$$

$$4: B_1 \bar{B}_0$$

$$5: B_2 \bar{B}_1$$

Binarno sinkrono brojilo

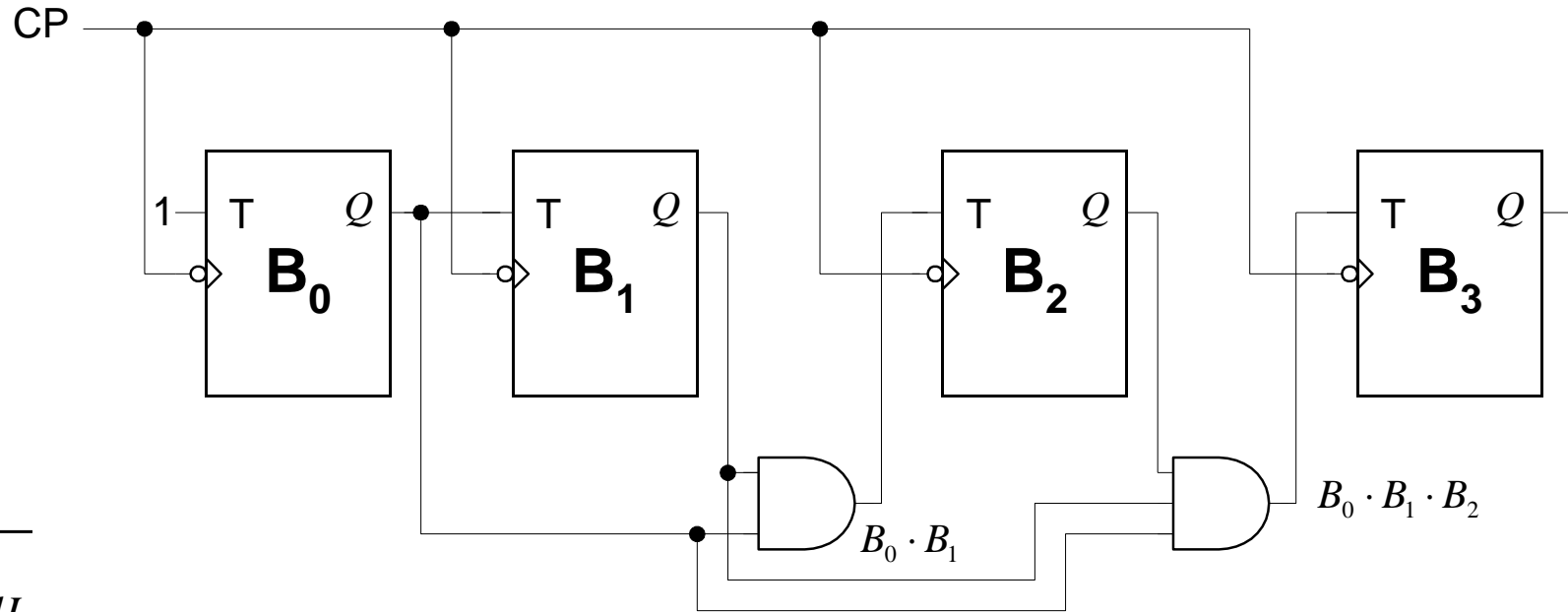
Redosljed brojenja je jednak redosljedu prirodnih brojeva:

- prvi bistabil B_0 mijenja stanje **pri svakom CP**
- i -ti bistabil B_i mijenja stanje samo **kad su svi prethodni bistabili u stanju 1**
- Prijenos stanja između bistabila može biti:
 - **paralelni** (brži)
 - **serijski** (jeftiniji)

CP	B ₂	B ₁	B ₀
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Binarno sinkrono brojilo s paralelnim prijenosom

- poseban I-sklop za svaki T_i
 - brže i skuplje rješenje od serijskog - za veliki n izvedba je kontraproduktivna zbog rastućeg broja ulaza I-sklopova

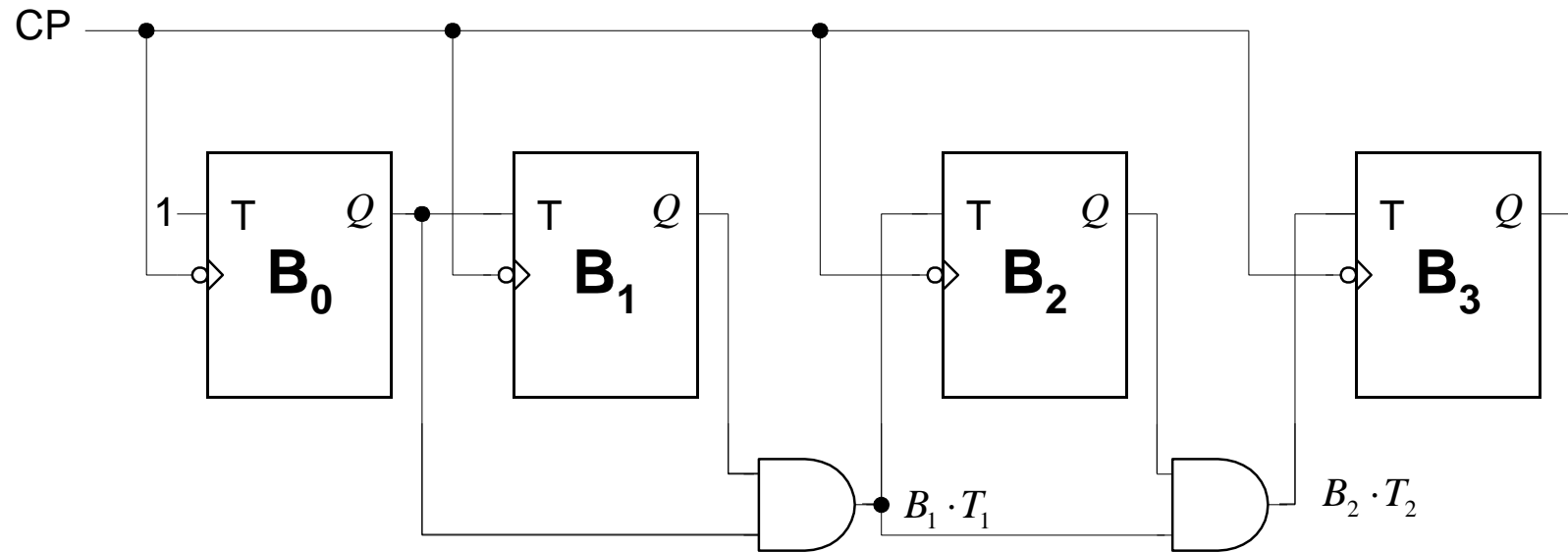


$$f_{\max} = \frac{1}{t_{\text{setup}} + t_{\text{db}} + t_{\text{dI}}}$$

t_{setup} = vrijeme postavljanja bistabila, t_{db} = vrijeme kašnjenja bistabila, t_{dI} = vrijeme kašnjenja I-sklopa

Binarno sinkrono brojilo sa serijskim prijenosom

- kaskadni I-sklopovi s 2 ulaza (jeftinije i sporije rješenje od paralelnog)

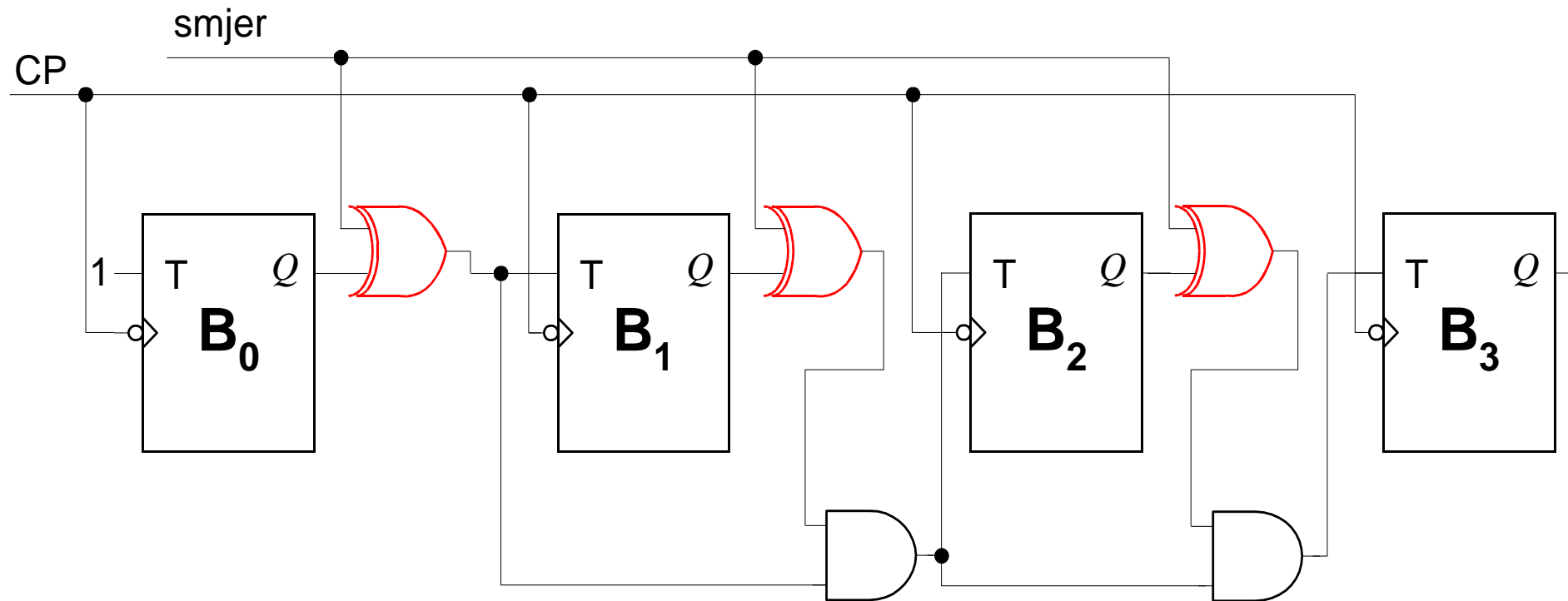


$$f_{\max} = \frac{1}{t_{\text{setup}} + t_{\text{db}} + (n-2) \cdot t_{\text{dI}}}$$

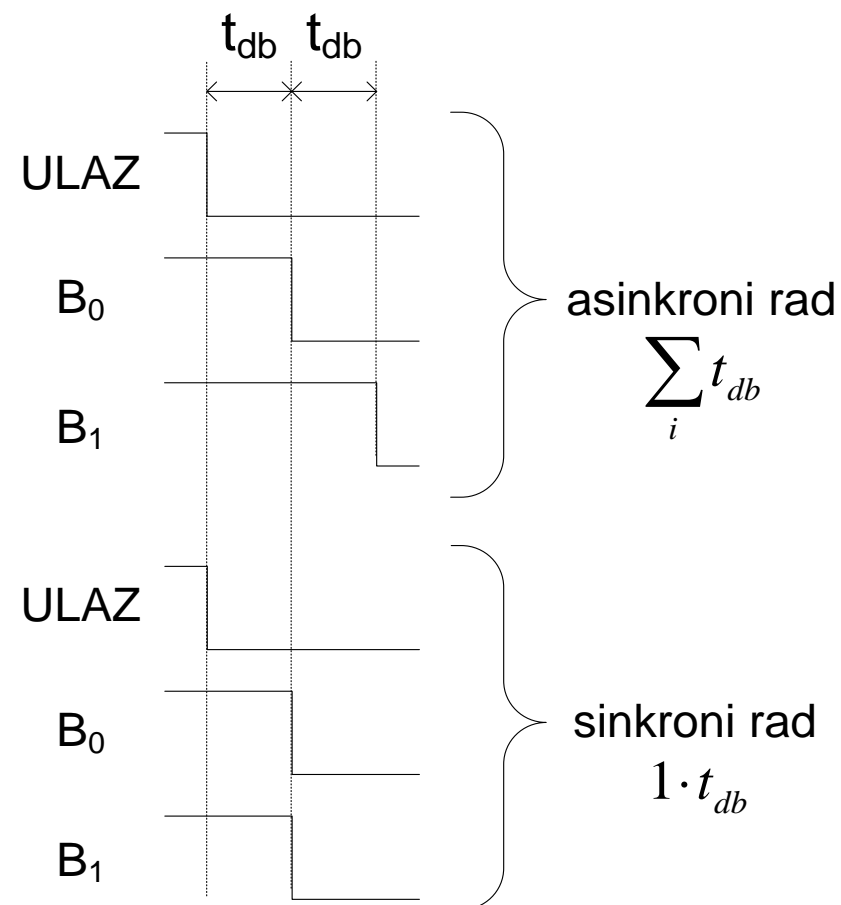
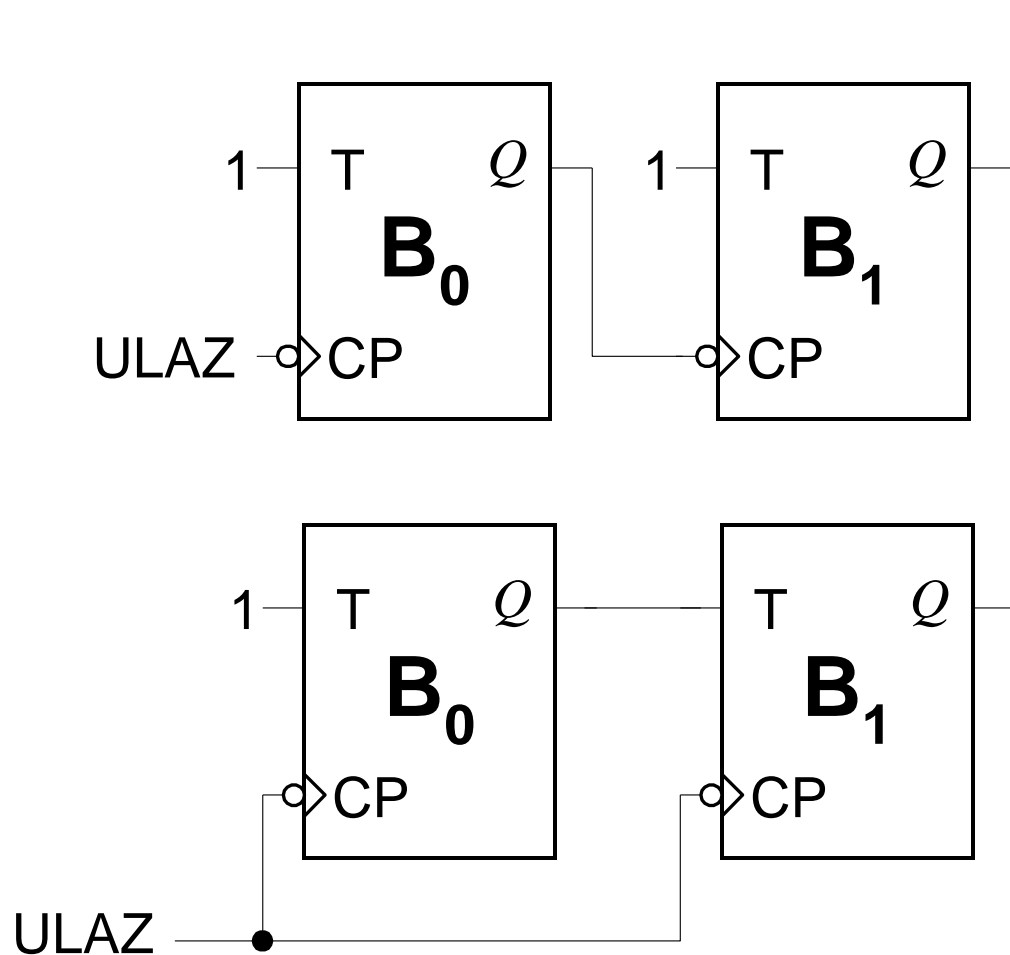
t_{setup} = vrijeme postavljanja bistabila, t_{db} = vrijeme kašnjenja bistabila, t_{dI} = vrijeme kašnjenja I-sklopa

Dvosmjerno sinkrono binarno brojilo

- Promjena smjera brojenja se može ostvariti prijenosom signala između bistabila kroz EX-ILI (isključivo ILI) sklop



Asinkrona brojila vs Sinkrona brojila

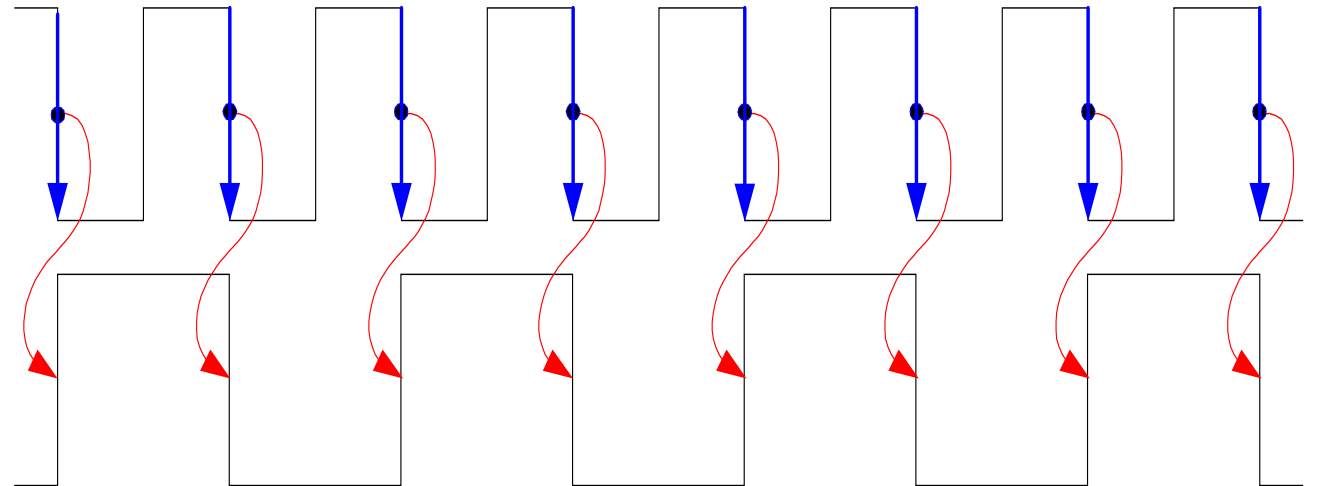
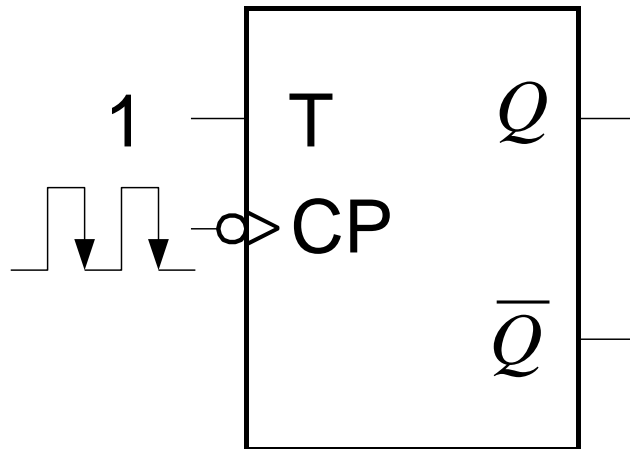


Asinkrona brojila

- stanja niza bistabila se mijenjaju serijski
- umjesto CP se koristi stanje izlaza prethodnog bistabila
- jednostavnija, jeftinija i sporija izvedba od sinkrone

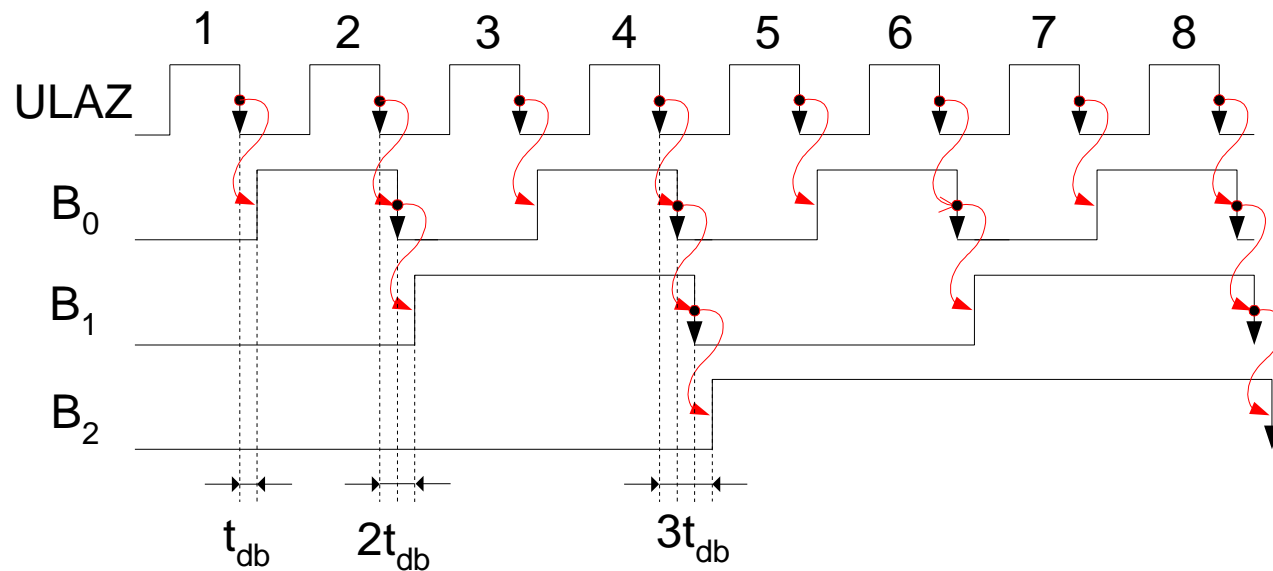
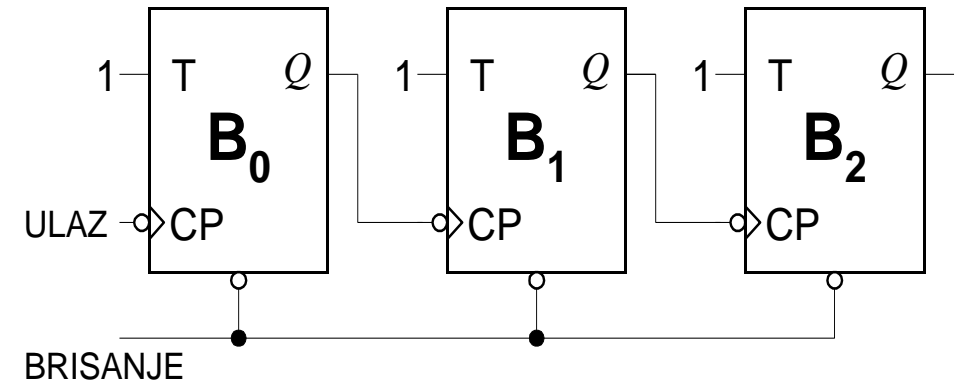
T-bistabil u asinkronim brojilima

- $T = 1$
- promjena stanja CP dijeli frekvenciju CP s 2
- brojenje u binarnom brojevnom sustavu: 2^n stanja za n bistabila



Asinkrono binarno brojilo

- 2^n stanja za n bistabila

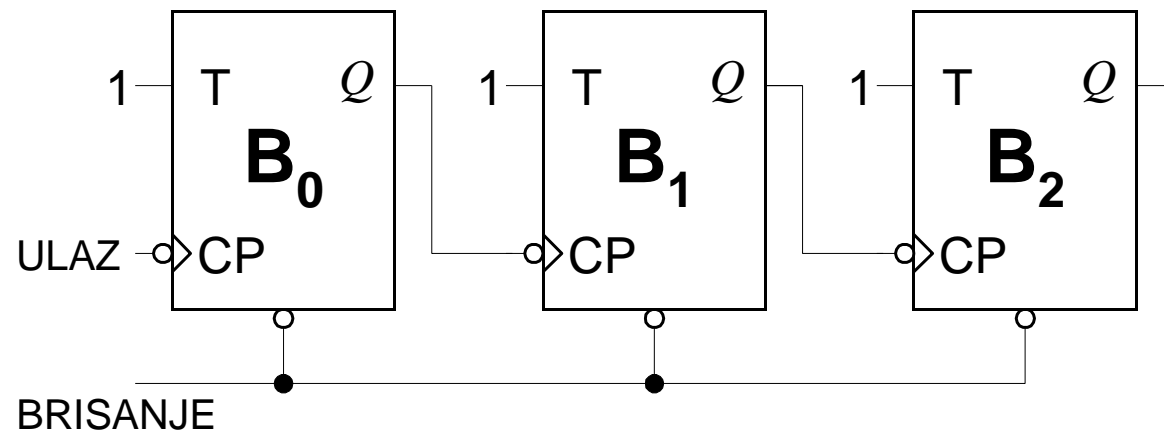


BROJ ULAZNIH IMPULSA	B ₂	B ₁	B ₀
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8	0	0	0

CIKLUS

Asinkrono binarno brojilo

- Tipični problem asinkronih brojila:
 - točno očitavanje (dekodiranje) stanja
 - serijsko okidanje bistabila unosi tranzijentnu pogrešku dekodiranja ~ potencijalni hazard!

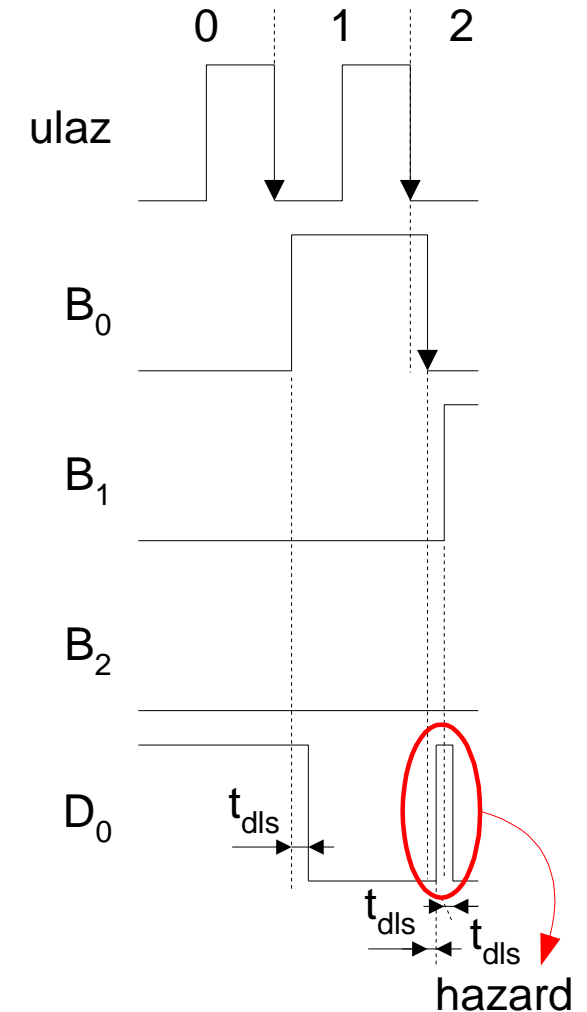


$$D_0 = \bar{B}_2 \bar{B}_1 \bar{B}_0$$

$$D_1 = \bar{B}_2 \bar{B}_1 B_0$$

⋮

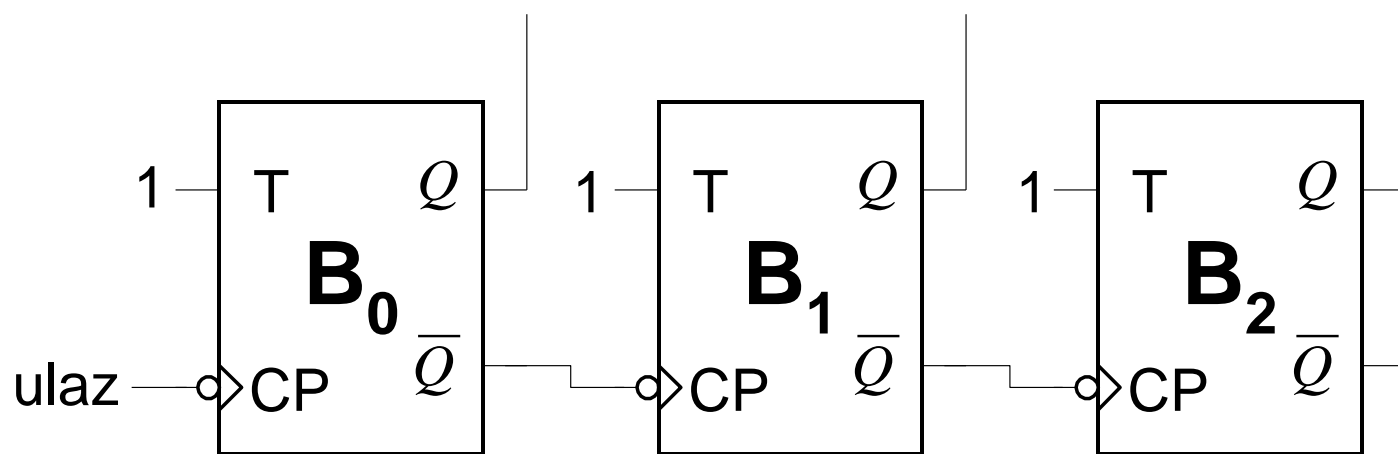
$$D_7 = B_2 B_1 B_0$$



Dvosmjerno asinkrono binarno brojilo

Brojilo unatrag:

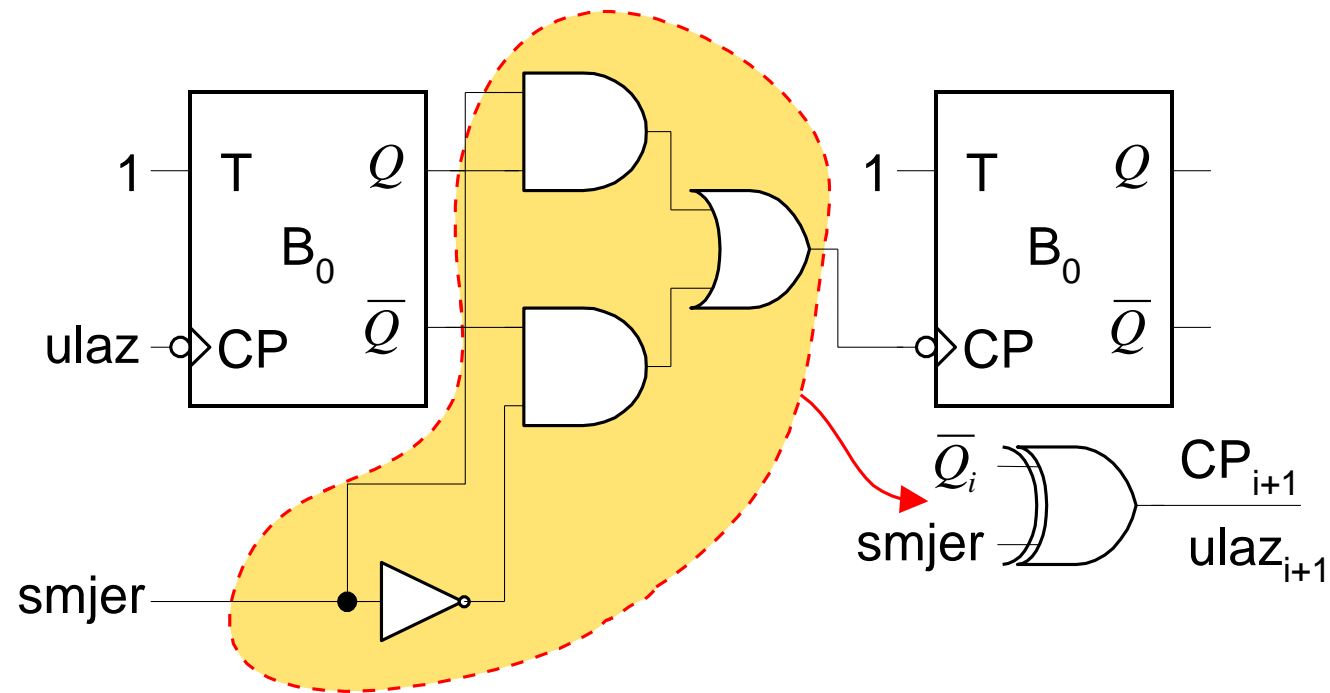
- pobuda s Q_{i-1} prethodnog bistabila



ULAZ	B_2	B_1	B_0
0	0	0	0
1	1	1	1
2	1	1	0
3	1	0	1
4	1	0	0
5	0	1	1
6	0	1	0
7	0	0	1
8	0	0	0

Brojilo naprijed-natrag (engl. *up-down counter*)

Korisno za obavljanje jednostavnih aritmetičkih operacija nad impulsima, digitalno upravljanje...

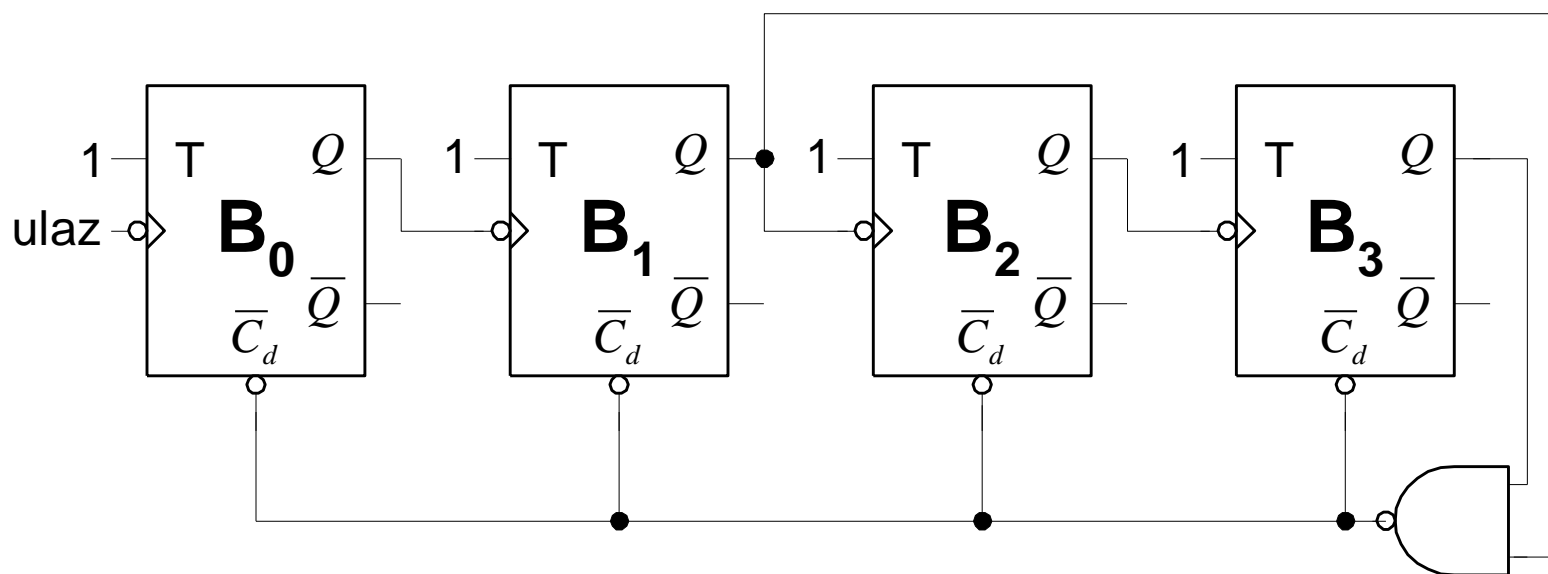


Brojilo modulo m (brojilo-djelitelj s m)

- Ostvarenje asinkronog brojila u nekom drugom (nebinarnom) brojevnom sustavu s bazom m zahtijeva n bistabila tako da vrijedi: $m < 2^n$
- Implementira se prekidom ciklusa binarnog brojenja korištenjem asinkronih ulaza bistabila
 - Aktivira se pomoću zadnje kombinacije stanja u ciklusu

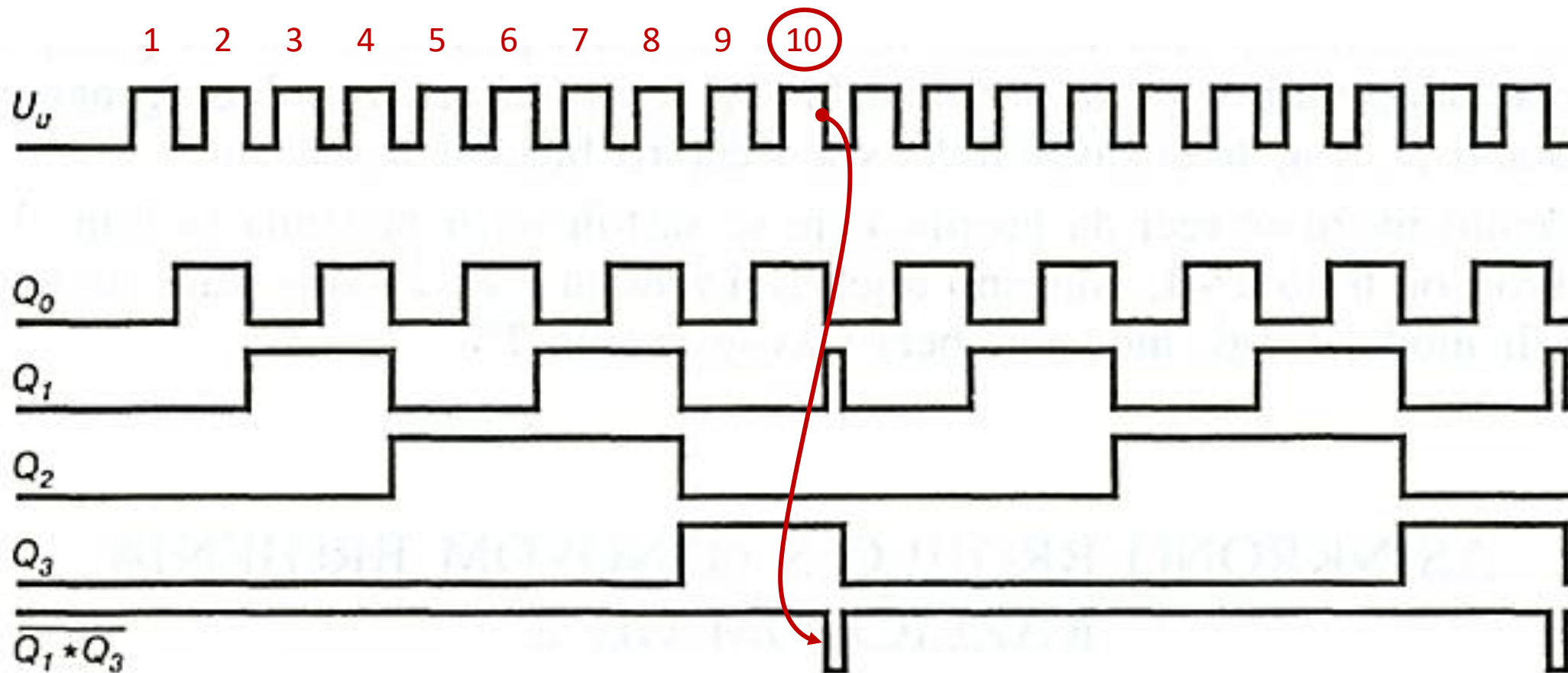
Dekadsko (BCD) asinkrono brojilo

- NI-sklop detektira karakterističnu pojavu $B_3B_1 = 1$ (binarna reprezentacija broja 10) i resetira brojilo



CP	B ₃	B ₂	B ₁	B ₀
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10≡0	1	0	1	0
	0	0	0	0

Reset dekadskog asinkronog brojila



Vremenski odnosi

- **vrijeme razlučivanja** (rezolucije) ulaznih impulsa: t_{DB}
 - svojstvo prvog bistabila
- **vrijeme kašnjenja** (cijelog) brojila: $n \cdot t_{DB}$
 - najduže vrijeme odziva → promjena stanja **svih** n bistabila
- **maksimalna frekvencija brojila u užem smislu** (uključivo očitavanje/dekodiranje svih stanja): $f_{max} = 1/(n \cdot t_{DB})$
 - najlošiji slučaj: B_0 ne smije promijeniti stanje dok B_{n-1} nije došao u stanje uzrokovano prethodnim impulsom
- **maksimalna frekvencija djelitelja**: $f_{max} = 1/t_{DB}$
 - Kašnjenje ostalih bistabila (osim prvog) ne utječe na frekvenciju jer sljedeći bistabil već dobiva ulaznu frekvenciju podijeljenu s 2

Brojilo proizvoljne sekvencije

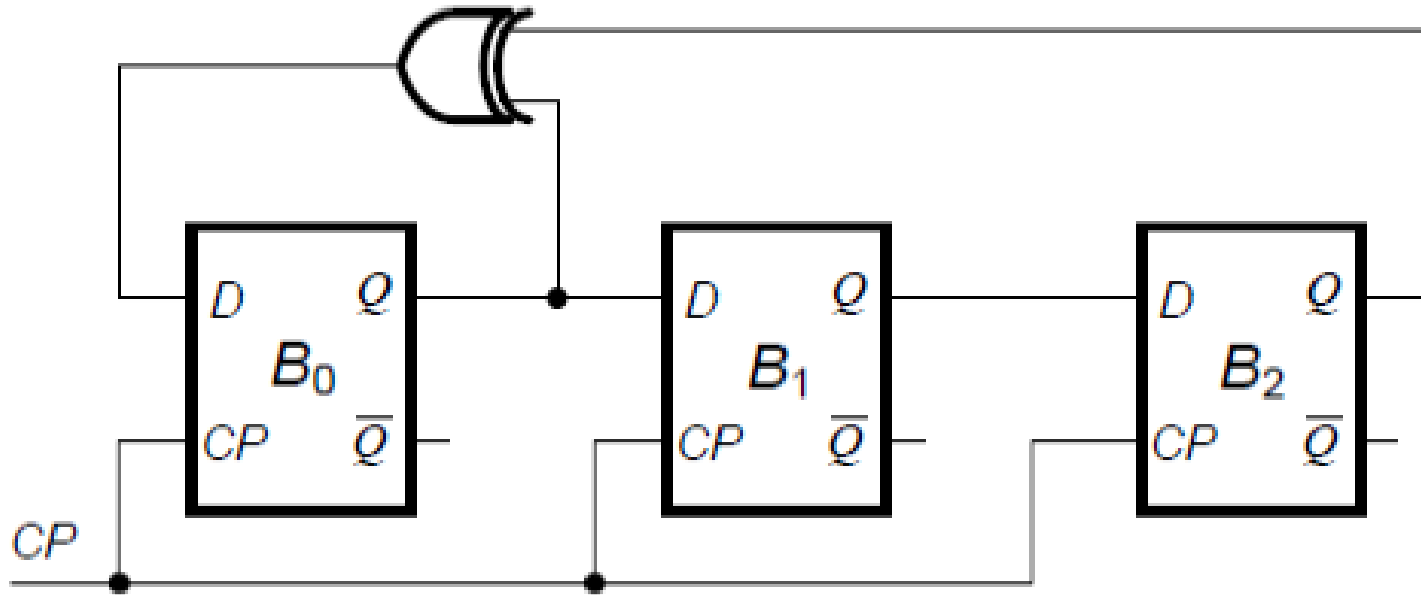
Generator sekvencije (pseudoslučajni generator)

- Sekvenc(ij)u predstavljaju bitovi na izlazu iz posmačnog registra s linearnom povratnom vezom
 - (engl. *Linear Feedback Shift Register*, LFSR)
 - najčešće korištena linearna funkcija je **EX-ILI**
- najveća moguća duljina sekvencije (za n bistabila): **$2^n - 1$**
 - Stanje **0** je zabranjeno (jer kod EX-ILI vrijedi $A \oplus A = 0$)

	B_0	B_1	B_2	
B_{n-4}	B_{n-3}	B_{n-2}	B_{n-1}	
1	1	1	0	↑ sekvencija ↓
0	1	1	1	
0	0	1	1	
1	0	0	1	
0	1	0	0	
1	0	1	0	
1	1	0	1	
1	1	1	0	
1	1	1	0	

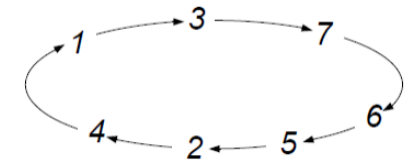
Generator (pseudoslučajne) sekvencije

Primjer: $D_0 = f(B_2, B_1, B_0) = B_2 \oplus B_0$



B_0	B_1	B_2	D_0
1	0	0	1
1	1	0	1
1	1	1	0
0	1	1	1
1	0	1	0
0	1	0	0
0	0	1	1
1	0	0	1

↑
sekvencija
↓





Registri i brojila

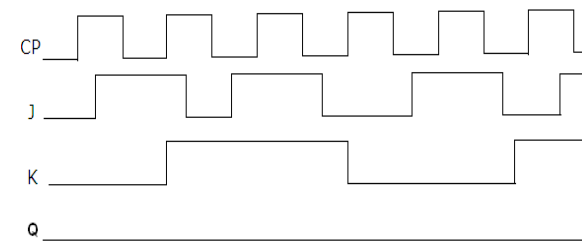
Zadatci i teme za vježbu

- Nacrtati sheme paralelnog i posmačnog registra
- Nacrtati binarno sinkrono i asinkrono brojilo i objasniti princip rada
- Nacrtati prstenasto brojilo i objasniti princip rada
- Nacrtati i objasniti paralelno-serijsku i serijsko-paralelnu konverziju podataka
- Nacrtati shemu i tablicu brojenja, binarnog asinkronog i Johnsonovog brojila
- Izračunati maksimalnu frekvenciju brojenja binarnog brojila

Primjeri zadatka s prethodnih ispita*

Ishod učenja 7 – 8 bodova - 25 min

- [I7_M, 3 boda]** Za JK bistabil okidan negativnim bridom odredite izgled signala na izlazu prema zadanim ulazima te početnim stanjem bistabila $Q_n=1$ (2 boda).
Nacrtajte simbol bistabila (0,5 bodova) i sažetu tablicu stanja (0,5 bodova).
- [I7_M, 2 boda]** Nacrtajte shemu prstenastog brojila izvedenog sa D bistabilima (1 bod), te analizirajte rad prikazom tablice stanja - početno stanje brojila je 110 (tablica stanja -1 bod)
- [I7_Ž, 3 boda]** Nacrtajte shemu 3-bitnog asinkronog binarnog brojila koje broji unazad (1,5 bodova). Zadano je početno stanje brojila: 100. Napišite tablicu stanja za jedan ciklus brojenja (1 bod) i nacrtajte valne oblike na izlazima bistabila za prva 4 taktne impulsa (slika – 0,5 bodova)



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

LITERATURA:

- Uroš Peruško: Digitalni sustavi
 - str. 413 – 440 (registri i brojila)
 - str. 451 – 456 (zadatci za vježbu)