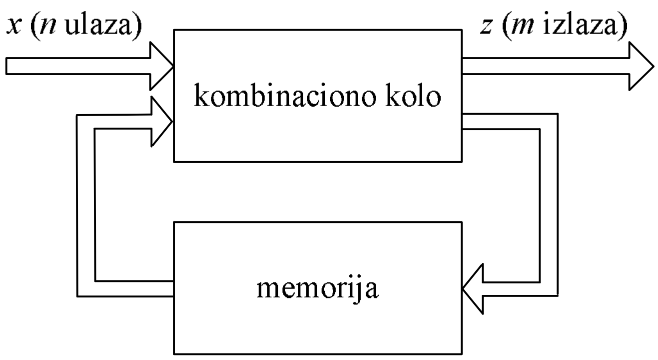
1 SEKVENCIJALNA KOLA

Elementarne logičke operacije, iz njih izvedene logičke operacije, kao i složeni logički izrazi, u cilju svoje primjene, moraju biti praktično implementirani. Osnovne i iz njih izvedene operacije se implementiraju logičkim elementima, dok se složeni logički izrazi realizuju prekidačkim mrežama, koje se implementiraju digitalnim elektronskim kolima. Karakteristika navedenih kola i prekidačkih mreža je da za iste ulazne signale uvijek daju iste signale na svojim izlazima. Mreže kod kojih izlaz zavisi isključivo od trenutnog stanja na njihovim ulazima, nazivaju se kombinacione mreže (*kombinaciona kola*). Za razliku od njih, postoje mreže čiji izlaz zavisi ne samo od trenutnog stanja na njihovim ulazima, već i od stanja iz prethodnog trenutka. Takve mreže u sebi sadrže memorijske elemente i nazivaju se *sekvencijalnim mrežama* (*sekvencijalnim kolima*).

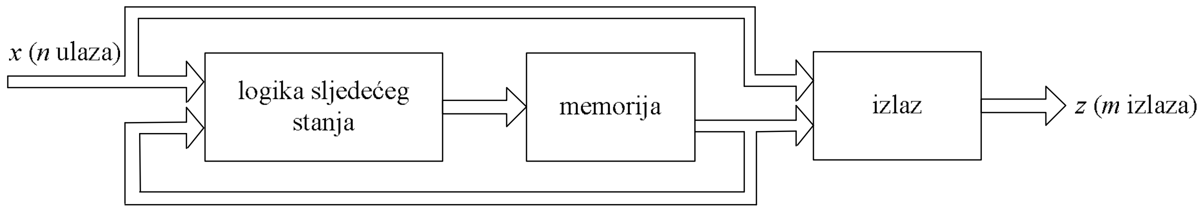
Sekvencijalna kola predstavljaju neizbježan sastavni dio svih računarskih sistema opšte i specijalizovane namjene, od sistema niskog stepena složenosti do arhitektura veoma visokih performansi. Pojednostavljeno posmatrano, svaki računarski sistem predstavlja medjusobnu spregu kombinacionih kola i memorijskih elemenata. Stoga se svaki računarski sistem, opšte ili specijalizovane namjene, može ugrubo smatrati nekom formom sekvencijalnog kola, manjeg ili većeg stepena složenosti. Iz navedenih razloga sekvencijalna kola zauzimaju našu početnu pažnju u uvodnim razmatranjima o arhitekturama računarskih sistema.

Generalna logička struktura sekvencijalnog kola predstavlja medjusobnu vezu kombinacionog dijela posmatranog kola i memorijskih elemenata, kao što je prikazano na slici 1.1.

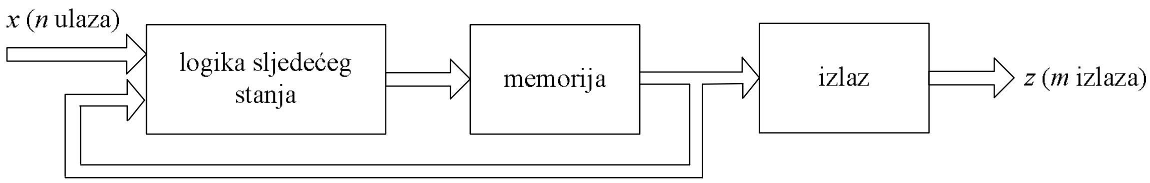


Slika 1.1. Uopšteni šematski prikaz sekvencijalnog kola.

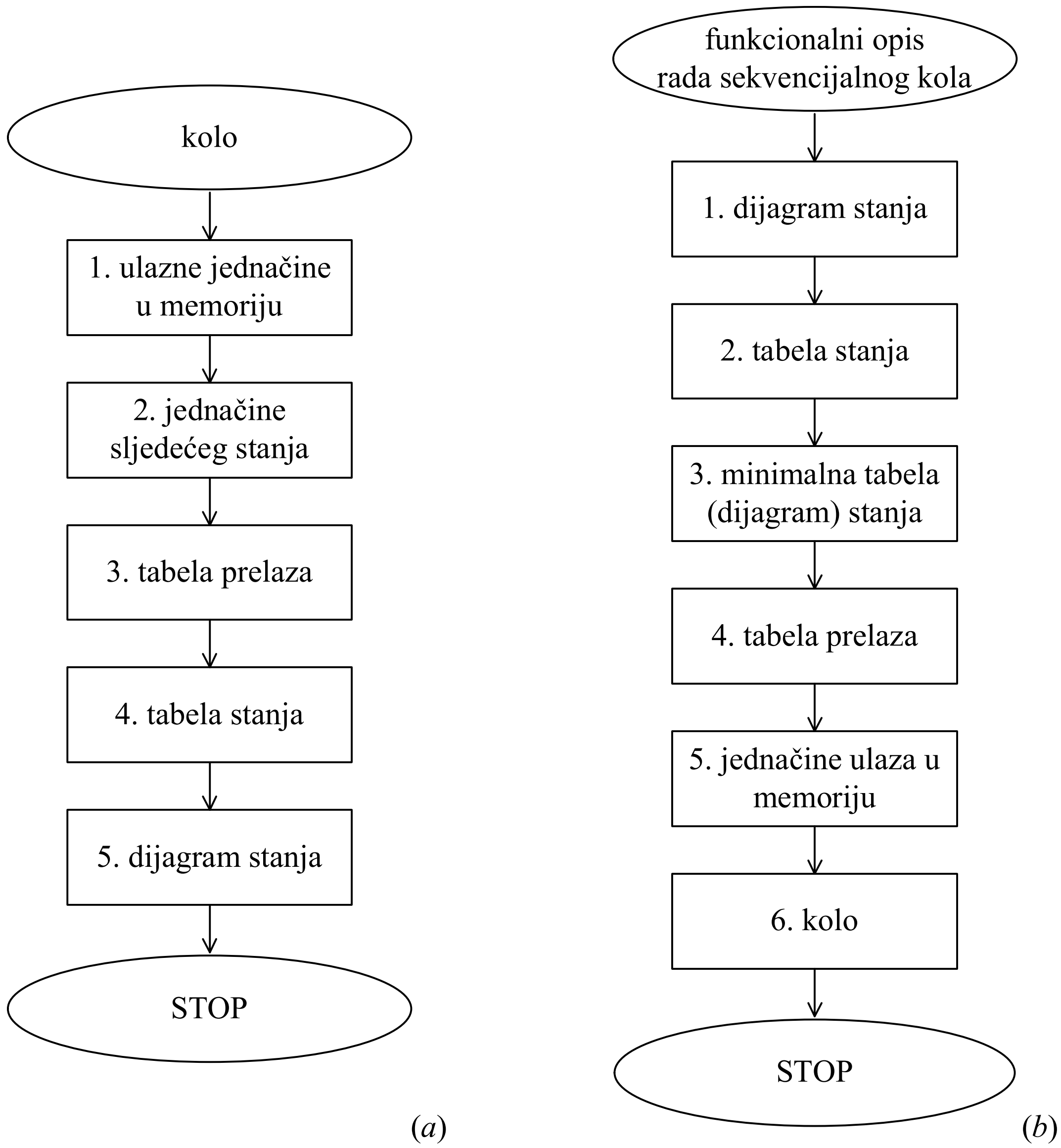
Zavisno od načina na koji ulazni signali utiču na izlazne signale, postoje dva tipa sekvencijalnih kola, Mealy-ev i Moore-ov. Kod Mealy-evog tipa sekvencijalnog kola, ulazni signali direktno (eventualno preko neke proste izlazne kombinacione logike) utiču na izlazne signale, dok kod Moore-ovog tipa sekvencijalnog kola to nije slučaj. Šematski prikazi Mealy-evog i Moore-ovog tipa sekvencijalnih kola, nešto detaljniji od uopštenog šematskog prikaza sa slike 1.1, su dati na slikama 1.2 i 1.3, respektivno.



Slika 1.2. Šematski prikaz Mealy-evog tipa sekvencijalnog kola.



Slika 1.3. Šematski prikaz Moore-ovog tipa sekvencijalnog kola.



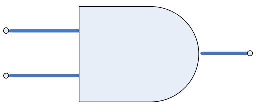
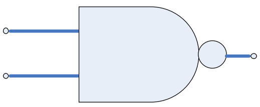
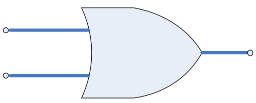
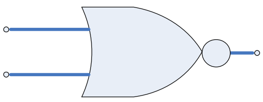
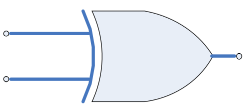
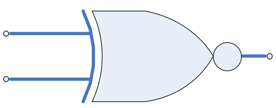
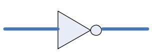
Slika 1.4. Algoritamski prikaz (*a*) analize, (b) sinteze (dizajniranja) sekvencijalnog kola.

U praksi se susrijeću dvije situacije. Naime, sekvencijalno kolo može biti zadato ili se, pak, od projektanta može očekivati njegovo dizajniranje. Ukoliko je sekvencijalno kolo zadato, očekuje se analiza njegovog funkcionisanja, odnosno sagledavanje problema koji se posmatranim sekvencijalnim kolom rješava. Analiza funkcionisanja sekvencijalnog kola se izvršava u nekoliko koraka, algoritamski prikazanih na slici 1.4 (a).

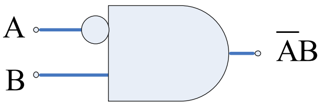
Prilikom sinteze (dizajniranja) sekvencijalnog kola, od projektanata se očekuje da na osnovu funkcionalnog opisa zadatog problema (funkcionalnog opisa rada budućeg sekvencijalnog kola) dizajnira sekvencijalno kolo kojim će se zadati problem rješavati. Dizajniranje sekvencijalnog kola se izvršava u nekoliko koraka, algoritamski prikazanih na slici 1.4 (b).

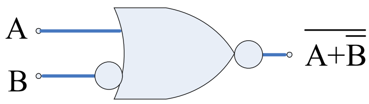
1.1 REKAPITULACIJA TEORIJSKIH POJMOVA POTREBNIH ZA SINTEZU I ANALIZU SEKVENCIJALNIH KOLA

1.1.1 Osnovna i izvedena logička kola i njihova funkcija

<table>
<tr>
<td>I kolo (množač)
A
B

AB</td>
<td>
<table>
<tr><th>A</th><th>B</th><th>AB</th><th>$\overline{AB}$</th></tr>
<tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr>
</table>
</td>
<td>NI kolo
A
B

$\overline{AB}$</td>
</tr>
<tr>
<td>ILI kolo (sabirač)
A
B

A+B</td>
<td>
<table>
<tr><th>A</th><th>B</th><th>A+B</th><th>$\overline{A+B}$</th></tr>
<tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr>
</table>
</td>
<td>NILI kolo
A
B

$\overline{A+B}$</td>
</tr>
<tr>
<td>EKSKLUZIVNO ILI kolo
A
B

$A \oplus B$</td>
<td>
<table>
<tr><th>A</th><th>B</th><th>$A \oplus B$</th><th>$\overline{A \oplus B}$</th></tr>
<tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr>
</table>
</td>
<td>EKSKLUZIVNO NILI kolo
A
B

$\overline{A \oplus B}$</td>
</tr>
<tr>
<td>INVERTOR
A  $\overline{A}$</td>
<td>
<table>
<tr><th>A</th><th>$\overline{A}$</th></tr>
<tr><td>0</td><td>1</td></tr>
<tr><td>1</td><td>0</td></tr>
</table>
</td>
<td></td>
</tr>
</table>

Napomena: Dodavanjem invertora na ulazu u posmatrano kolo invertuje se samo signal koji dolazi na taj ulaz!
Na primjer:





1.1.2 Pravila i teoreme prekidačke (Bulove) algebre

Pravila Bulove algebre

$A + 0 = A \qquad A \times 0 = 0$

$A + 1 = 1 \qquad A \times 1 = A$

$A + A = A \qquad A \times A = A$

$A + \overline{A} = 1 \qquad A \times \overline{A} = 0$

$\overline{\overline{A}} = A$

De Morganova teorema

$$\overline{A+B} = \overline{A} \times \overline{B}$$
$$\overline{A \times B} = \overline{A} + \overline{B}$$

1.1.3 Minimizacija funkcija upotrebom Karnoovih mapa

Veličina Karnoove mape zavisi od broja promjenljivih koje sadrži posmatrana funkcija. U praksi se najčešće javljaju Karnoove mape sa 3 ili 4 promjenljive, koje ukupno imaju 2^3=8, odnosno 2^4=16 polja:

A \ BC	00	01	11	10
0				
1				

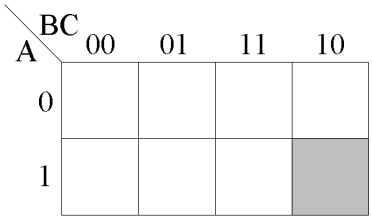
AB \ CD	00	01	11	10
00				
01				
11				
10				

Obratiti pažnju na numeraciju polja: 00, 01, 11, 10!

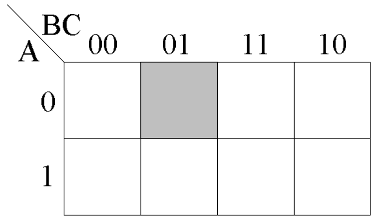
Karnoova mapa se ispunjava tako što se upisuju odgovarajuće vrijednosti funkcije za posmatranu kombinaciju ulaznih promjenljivih.

Na primjer:

- ako promjenljiva A ima vrijednosti 1, a promjenljive B i C vrijednosti 1 i 0, respektivno, tada se sa vrijednošću funkcije popunjava polje koje je u drugoj vrsti i četvrtoj koloni mape;
- ako promjenljiva A ima vrijednosti 0, a promjenljive B i C vrijednosti 0 i 1, respektivno, tada se sa vrijednošću funkcije popunjava polje koje je u prvoj vrsti i drugoj koloni mape;

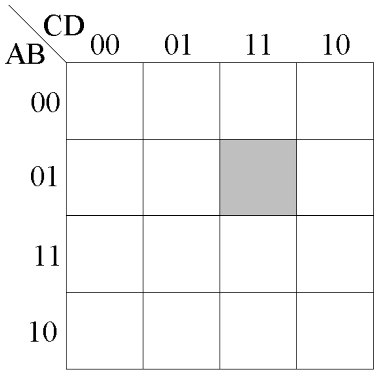


A=1, B=1, C=0

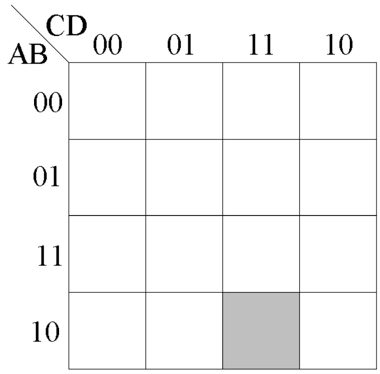


A=0, B=0, C=1

- ako promjenljive A i B imaju vrijednosti 0 i 1, a promjenljive C i D vrijednosti 1 i 1, respektivno, tada se sa vrijednošću funkcije popunjava polje koje je u drugoj vrsti i trećoj koloni mape;
- ako promjenljive A i B imaju vrijednosti 1 i 0, a promjenljive C i D vrijednosti 0 i 1, respektivno, tada se sa vrijednošću funkcije popunjava polje koje je u četvrtoj vrsti i drugoj koloni mape;



A=0, B=1, C=1, D=1



A=1, B=0, C=0, D=1

Kada se vrijednosti funkcije za sve kombinacije promjenljivih unesu u Karnoovu mapu, vrši se njihovo grupisanje.

Pravila rješavanja Karnoove mape:

1. Grupišu se ili jedinice ili nule – NE kombinovano!
2. Grupe moraju biti pravougaone – dijagonalno grupisanje nije dozvoljeno.
3. Broj jednica (nula) u grupi mora biti stepen dvojke. Najmanja grupa obuhvata jednu (2^0) jedinicu (nulu), a zatim slijede grupe od dvije (2^1), četiri (2^2), osam (2^3)...jedinica (nula).
4. Grupe moraju biti što je moguće veće.
5. Grupe se mogu preklapati. Ukoliko se preklapaju, svaka grupa mora imati BAR jednu jedinicu (nulu) koja pripada samo njoj.
6. Karnoova mapa se nastavlja s lijeva na desno (i obratno) i odozgo na dolje (i obratno), što se može koristiti prilikom formiranja grupa.
7. Koristi se što je najmanje moguće grupa.
8. Projenljiva X u mapi se može tretirati ili kao 1 ili kao 0, u zavisnosti od potrebe i koristiti u formiranju što većih grupa. Ukoliko nam nije potrebna, promjenljivu X ostavljamo negrupisanu.

Svaka grupa Karnoove mape rezultuje jednim članom funkcije. Ukoliko promjenljiva ima konstantnu vrijednost u grupi, postoji u članu funkcije. U suprotnom se ta promjenljiva ne uzima u obzir. Ako je promjenljiva konstantno 1 onda se piše njena stvarna vrijednost; ako je konstantno 0 piše se njena komplementirana vrijednost.

Primjeri:

- Promjenljiva A se u zaokruženoj grupi mijenja sa 0 na 1, pa ne postoji u funkciji. Promjenljive B i C su konstantno 1, pa su sastavni dio funkcije. Funkcija predstavljena ovom Karnoovom mapom je F=BC.

A \ BC	00	01	11	10
0			1	
1			1	

F=BC

- Promjenljiva A se u zaokruženoj grupi mijenja sa 0 na 1, pa je nema u funkciji. Promjenljiva B se mijenja sa 0 na 1, stoga ni nje nema u funkciji. Promjenljiva C je konstantno 1, pa je prisutna u funkciji. Funkcija predstavljena ovom Karnoovom mapom je F=C.

A \ BC	00	01	11	10
0		1	1	
1		1	1	

F=C

- U prvoj grupi promjenljiva A je konstantno 0, B se mijenja sa 0 na 1, a C je konstantno 1. U drugoj grupi A je konstantno 0, B je konstantno 1, a C se mijenja sa 1 na 0. Funkcija predstavljena ovom Karnoovom mapom je $F=\overline{A}C+\overline{A}B$

A \ BC	00	01	11	10
0		1	1	1
1				

$F=\overline{A}C+\overline{A}B$

- U prvoj grupi promjenljiva A je konstantno 1, B se mijenja sa 0 na 1, a C je konstantno 0. U drugoj grupi A se mijenja sa 0 na 1, B je konstantno 1, a C konstantno 0. Funkcija predstavljena ovom Karnoovom mapom je $F=A\overline{C}+B\overline{C}$

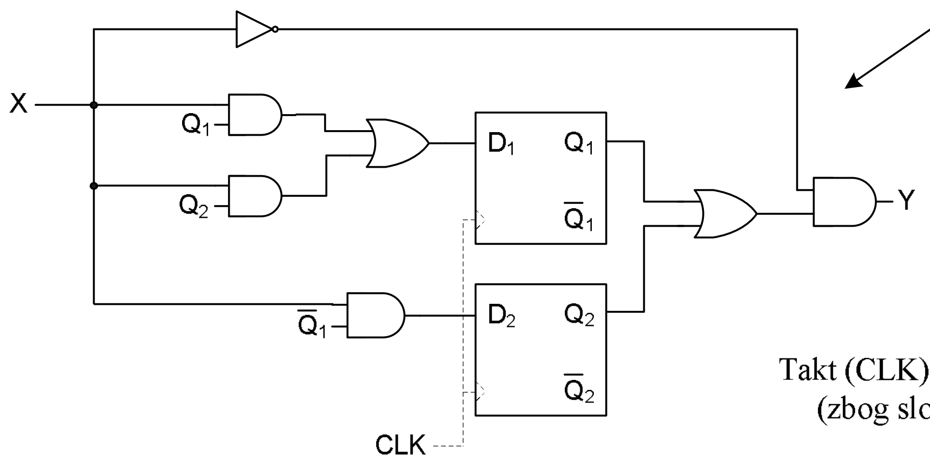
A \ BC	00	01	11	10
0				1
1	1			1

$F=A\overline{C}+B\overline{C}$

1.2 RIJEŠENI ZADACI ZA VJEŽBU:

1. a) Analizirati sekvencijalno kolo prikazano na slici.

b) Pod uslovom da je početno stanje Q_1=**0** i Q_2=**1** i da je ulazna sekvenca ***X***=**010011**, odrediti posljednje stanje flip-flopova, kao i izlaznu sekvencu ***Y***.



Mealy-evo sekvencijalno kolo

Takt (CLK) nećemo crtati!!!
(zbog složenosti slike)

a) Šablon po kojem se radi analiza sekvencijalnog kola je:

Kolo → Jednačine ulaza u flip-flopove → Jednačine sljedećeg stanja za date flip-flopove → Tabela prelaza → Tabela stanja → Dijagram stanja

I Pišemo jednačine ulaza u flip-flopove, kao i jednačinu izlaza:

$$D_1 = Q_1^k X + Q_2^k X = X\left(Q_1^k + Q_2^k\right)$$

$$D_2 = \overline{Q_1^k} X$$

$$Y = \overline{X}\left(Q_1^k + Q_2^k\right)$$

k je *k*-ti trenutak, tj. trenutno stanje
k+1 je *k*+1-ti trenutak, tj. sljedeće stanje

II Pišemo jednačine sljedećeg stanja flip-flopova. Prvo izvodimo karakterističnu jednačinu D flip-flopa.

D	Q^k	Q^{k+1}
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

$\Rightarrow$

$\boldsymbol{Q^{k+1}=D}$ **-** Sljedeće stanje D flip-flopa, tj. njegov izlaz, zavisi samo od ulaza, ne i od sadašnjeg stanja!

Znači, jednačine sljedećeg stanja odgovarajućih flip-flopova imaju oblik:

$$Q_1^{k+1} = D_1 = X\left(Q_1^k + Q_2^k\right)$$

$$Q_2^{k+1} = D_2 = \overline{Q_1^k} X$$

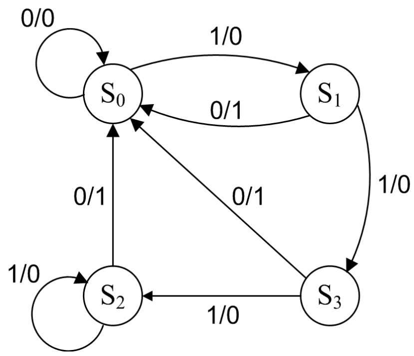
III Tabela prelaza:

			$X=0$			$X=1$		
	Q_1^k	Q_2^k	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y
S_0	0	0	0	0	0	0	1	0
S_1	0	1	0	0	1	1	1	0
S_2	1	0	0	0	1	1	0	0
S_3	1	1	0	0	1	1	0	0

IV Pišemo <u>tabelu stanja</u> na osnovu <u>tabele prelaza</u>:

	$X = 0$	$X = 1$
S_0	S_0 / 0	S_1 / 0
S_1	S_0 / 1	S_3 / 0
S_2	S_0 / 1	S_2 / 0
S_3	S_0 / 1	S_2 / 0

V Crtamo dijagram stanja na osnovu tabele stanja:



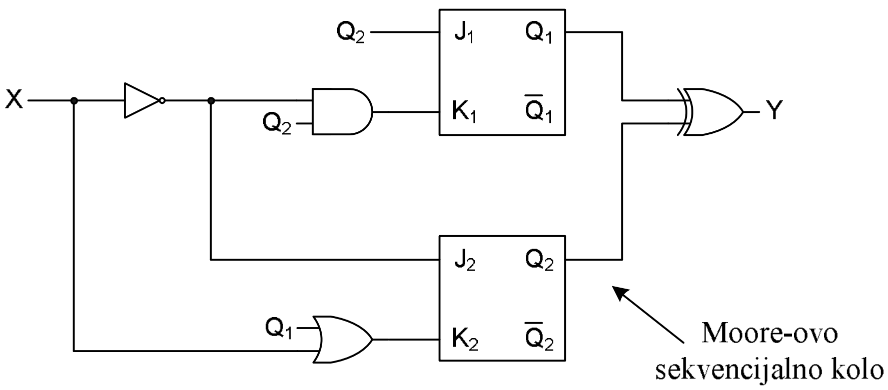
b) Početno stanje je Q_1=0 i Q_2=1 (S_1) i ulazna sekvenca je X=010011.

$$\boldsymbol{S_1} \xrightarrow[Y=1]{X=0} \boldsymbol{S_0} \xrightarrow[Y=0]{X=1} \boldsymbol{S_1} \xrightarrow[Y=1]{X=0} \boldsymbol{S_0} \xrightarrow[Y=0]{X=0} \boldsymbol{S_0} \xrightarrow[Y=0]{X=1} \boldsymbol{S_1} \xrightarrow[Y=0]{X=1} \boldsymbol{S_3}$$

Znači, posljednje stanje je $\boldsymbol{S_3}$(**11**), dok je izlazna sekvenca $\boldsymbol{Y}$=**101000**.

2. a) Analizirati sekvencijalno kolo prikazano na slici.

b) Pod uslovom da je početno stanje flip-flopova **00** i da je ulazna sekvenca $\boldsymbol{X}$=**110010**, odrediti posljednje stanje flip-flopova, kao i izlaznu sekvencu $\boldsymbol{Y}$.



I Pišemo jednačine ulaza u flip-flopove, kao i jednačinu izlaza:

$$J_1 = Q_2^k$$
$$K_1 = \overline{X}\, Q_2^k$$
$$J_2 = \overline{X}$$
$$K_2 = Q_1^k + X$$
$$Y = Q_1^k \oplus Q_2^k = Q_1^k \overline{Q_2^k} + \overline{Q_1^k} Q_2^k$$

II Pišemo jednačine sljedećeg stanja flip-flopova. Prvo izvodimo karakterističnu jednačinu JK flip-flopa.

J K Q^k	Q^{k+1}
0 0 0	0
0 0 1	1
0 1 0	0
0 1 1	0
1 0 0	1
1 0 1	1
1 1 0	1
1 1 1	0

$$\Rightarrow \boxed{Q^{k+1} = \overline{K} Q^k + J\overline{Q^k}}$$

Znači, jednačine sljedećeg stanja odgovarajućih flip-flopova imaju oblik:

$$Q_1^{k+1} = \overline{K_1} Q_1^k + J_1 \overline{Q_1^k} = \overline{\overline{X}\, Q_2^k} Q_1^k + Q_2^k \overline{Q_1^k} = \left(X + \overline{Q_2^k}\right) Q_1^k + Q_2^k \overline{Q_1^k} =$$
$$= X\, Q_1^k + \overline{Q_2^k} Q_1^k + Q_2^k \overline{Q_1^k} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{Q_1^{k+1} = X\, Q_1^k + Q_1^k \oplus Q_2^k}$$
$$Q_2^{k+1} = \overline{K_2} Q_2^k + J_2 \overline{Q_2^k} = \overline{Q_1^k + X}\, Q_2^k + \overline{X}\, \overline{Q_2^k} =$$
$$= \overline{Q_1^k}\, \overline{X}\, Q_2^k + \overline{X}\, \overline{Q_2^k} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{Q_2^{k+1} = \overline{X} \left(\overline{Q_1^k} Q_2^k + \overline{Q_2^k}\right)}$$

III Tabela prelaza:

			$X=0$			$X=1$		
	Q_1^k	Q_2^k	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y
S_0	0	0	0	1	0	0	0	0
S_1	0	1	1	1	1	1	0	1
S_2	1	0	1	1	1	1	0	1
S_3	1	1	0	0	0	1	0	0

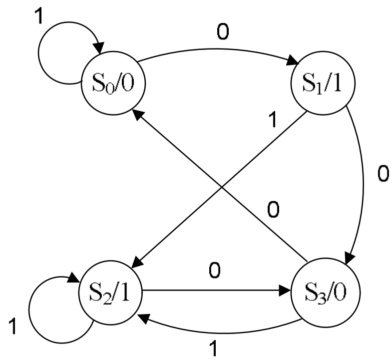
IV Tabela stanja na osnovu tabele prelaza:

	$X=0$	$X=1$	Y
S_0	S_1	S_0	0
S_1	S_3	S_2	1
S_2	S_3	S_2	1
S_3	S_0	S_2	0

Uočimo da izlaz Y ne zavisi od ulaza X, već isključivo od stanja, odnosno za:

S_0 => Y=0
S_1 => Y=1
S_2 => Y=1
S_3 => Y=0

V Dijagram stanja na osnovu tabele stanja:



b) Početno stanje je Q_1=0 i Q_2=0 (S_0) i ulazna sekvenca je X=110010.

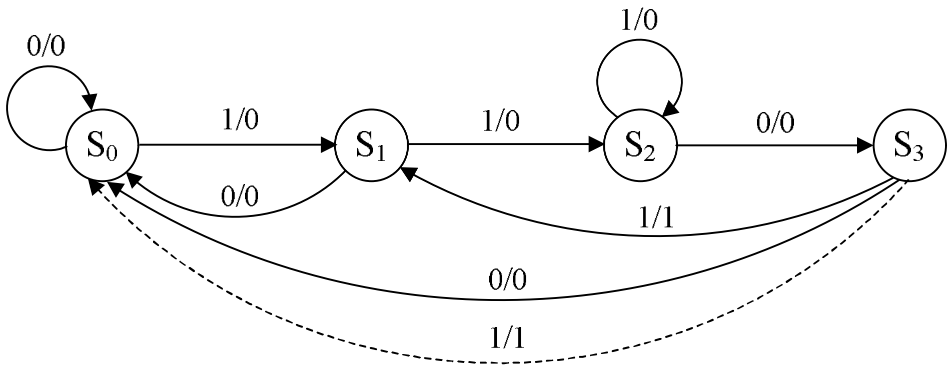
$$\boldsymbol{S_0/0} \xrightarrow{X=1} \boldsymbol{S_0/0} \xrightarrow{X=1} \boldsymbol{S_0/0} \xrightarrow{X=0} \boldsymbol{S_1/1} \xrightarrow{X=0} \boldsymbol{S_3/0} \xrightarrow{X=1} \boldsymbol{S_2/1} \xrightarrow{X=0} \boldsymbol{S_3/0}$$

Znači, posljednje stanje je $\boldsymbol{S_3}$(**11**), dok je izlazna sekvenca ***Y*=0001010**.

3. Projektovati sekvencijalno kolo koje na svom izlazu signalizira pojavu sekvence **1101** sa ulaza. Signalizirati datu sekvencu bilo gdje u ulaznoj sekvenci (non-reseting sequence recognizer). U sintezi koristiti D flip-flopove.

X = **0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1** => Šta će biti izlaz?

I Dijagram stanja



Napomena: Isprekidanom linijom je označeno ponašanje kola kada je u stanju S_3 primljena 1, pod uslovom da je kolo reseting sequence recognizer. Ovo je ujedno i jedina razlika u ponašanju non-reseting i reseting sequence recognizer-a za zadatu sekvencu.

II Tabela stanja na osnovu dijagrama stanja:

	$X=0$	$X=1$
S_0	S_0 / 0	S_1 / 0
S_1	S_0 / 0	S_2 / 0
S_2	S_3 / 0	S_2 / 0
S_3	S_0 / 0	S_1 / 1

Vršimo kodiranje stanja na osnovu tabele:

	Q_1	Q_2
$S_0 \leftrightarrow$	0	0
$S_1 \leftrightarrow$	0	1
$S_2 \leftrightarrow$	1	0
$S_3 \leftrightarrow$	1	1

III Pišemo tabelu prelaza na osnovu tabele stanja:

	X= 0			X= 1				
	Q_1^k	Q_2^k	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y
S_0	0	0	0	0	0	0	1	0
S_1	0	1	0	0	0	1	0	0
S_2	1	0	1	1	0	1	0	0
S_3	1	1	0	0	0	0	1	1

Pišemo proširenu tabelu prelaza koja uključuje i ulaze flip-flopova:

Tabela prelaza za D flip-flop:

$Q^k \rightarrow Q^{k+1}$	D
$0 \rightarrow 0$	0
$0 \rightarrow 1$	1
$1 \rightarrow 0$	0
$1 \rightarrow 1$	1

→

X	Q_1^k	Q_2^k	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y	D_1	D_2
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	1	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	1	0
1	1	1	0	1	1	0	1

IV Karnoove tabele za dobijanje jednačina ulaza u flip-flopove:

D_1:

X \ $Q_1^k Q_2^k$	0 0	0 1	1 1	1 0
0	0	0	0	1
1	0	1	0	1

D_2:

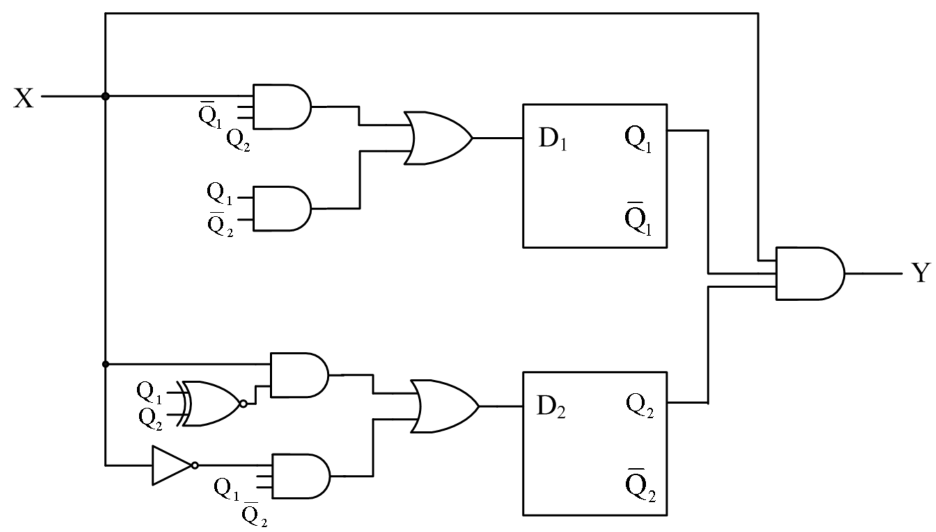
X \ $Q_1^k Q_2^k$	0 0	0 1	1 1	1 0
0	0	0	0	1
1	1	0	1	0

$$D_1 = X\,\overline{Q_1^k}\,Q_2^k + Q_1^k\,\overline{Q_2^k}$$

$$D_2 = X\,\overline{Q_1^k}\,\overline{Q_2^k} + X\,Q_1^k Q_2^k + \overline{X}\,Q_1^k\,\overline{Q_2^k} = X\left(\overline{Q_1^k \oplus Q_2^k}\right) + \overline{X}\,Q_1^k\,\overline{Q_2^k}$$

$$Y = X\,Q_1^k Q_2^k$$

V Šema sekvencijalnog kola:



b) X = **0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1**

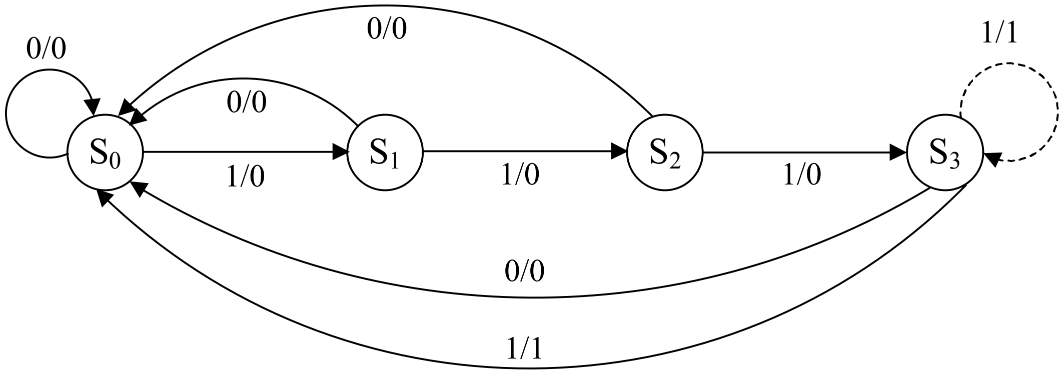
Y = **0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0**

4. Projektovati sekvencijalno kolo koje na svom izlazu signalizira pojavu sekvence **1111** sa ulaza. Nakon signaliziranja sekvence kolo se resetuje, tj. vraća u početno stanje (reseting sequence recognizer). U sintezi koristiti JK flip-flopove.

X = **0 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 1**

Y = **0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0**

I Dijagram stanja:



Napomena: Isprekidanom linijom je označeno ponašanje kola kada je u stanju S_3 primljena 1, pod uslovom da je kolo reseting sequence recognizer. Ovo je ujedno i jedina razlika u ponašanju non-reseting i reseting sequence recognizer-a za zadatu sekvencu.

II Tabela stanja na osnovu dijagrama stanja:

	$X=0$	$X=1$
S_0	S_0 / 0	S_1 / 0
S_1	S_0 / 0	S_2 / 0
S_2	S_0 / 0	S_3 / 0
S_3	S_0 / 0	S_0 / 1

Vršimo kodiranje stanja na osnovu tabele:

	Q_1	Q_2
$S_0 \leftrightarrow$	0	0
$S_1 \leftrightarrow$	0	1
$S_2 \leftrightarrow$	1	0
$S_3 \leftrightarrow$	1	1

III Pišemo tabelu prelaza na osnovu tabele stanja:

			$X=0$			$X=1$		
	Q_1^k	Q_2^k	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y
S_0	0	0	0	0	0	0	1	0
S_1	0	1	0	0	0	1	0	0
S_2	1	0	0	0	0	1	1	0
S_3	1	1	0	0	0	0	0	1

Pišemo proširenu tabelu prelaza koja uključuje i ulaze flip-flopova:

Tabela prelaza za JK flip-flop:

$Q^k \rightarrow Q^{k+1}$	$J\,K$
0 → 0	0 X
0 → 1	1 X
1 → 0	X 1
1 → 1	X 0

→

X	Q_1^k	Q_2^k	Q_1^{k+1}	Q_2^{k+1}	Y	J_1	K_1	J_2	K_2
0	0	0	0	0	0	0	X	0	X
0	0	1	0	0	0	0	X	X	1
0	1	0	0	0	0	X	1	0	X
0	1	1	0	0	0	X	1	X	1
1	0	0	0	1	0	0	X	1	X
1	0	1	1	0	0	1	X	X	1
1	1	0	1	1	0	X	0	1	X
1	1	1	0	0	1	X	1	X	1

J=0 i K=0 → flip-flop ne mijenja stanje

J=1 i K=1 → flip-flop komplementira stanje

IV Minimizacija algebarskih izraza za ulaze flip-flopova uz pomoć Karnoovih tabela:

J_1:

$X \backslash Q_1^kQ_2^k$	00	01	11	10
0	0	0	X	X
1	0	1	X	X

K_1:

$X \backslash Q_1^kQ_2^k$	00	01	11	10
0	X	X	1	1
1	X	X	1	0

J_2:

$X \backslash Q_1^kQ_2^k$	00	01	11	10
0	0	X	X	0
1	1	X	X	1

K_2:

$X \backslash Q_1^kQ_2^k$	00	01	11	10
0	X	1	1	X
1	X	1	1	X

Iz prethodno zapisanih Karnoovih mapa i označenih zajedničkih površina na njima, jednostano se mogu zapisati logički izrazi ulaza memorijskih elemenata na koje se mape odnose:

$$J_1 = X\,Q_2^k \qquad J_2 = X \qquad Y = X\,Q_1^k Q_2^k$$

$$K_1 = \overline{X} + Q_2^k \qquad K_2 = 1$$

V Šema sekvencijalnog kola: