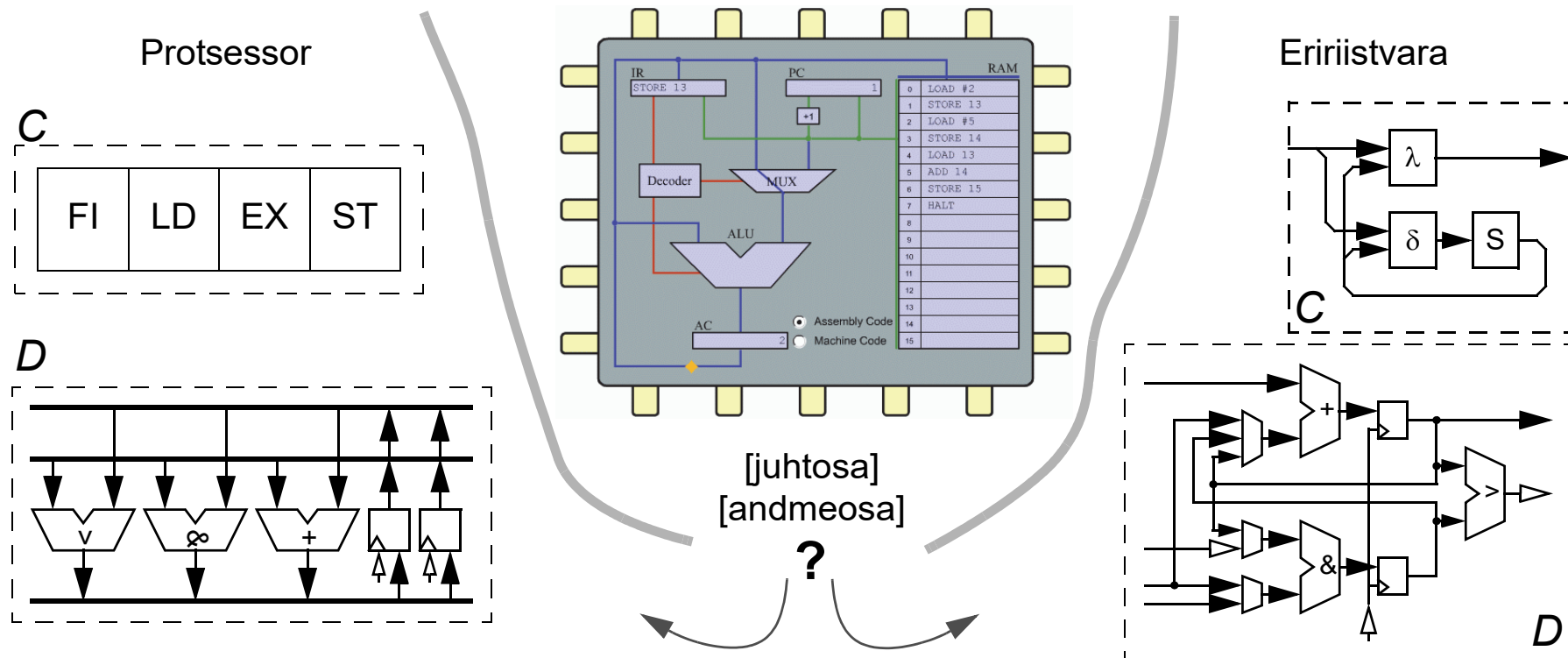
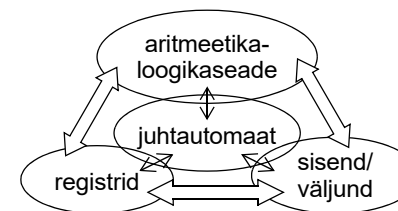


Digitaalsüsteem – struktuur & juhtautomaat

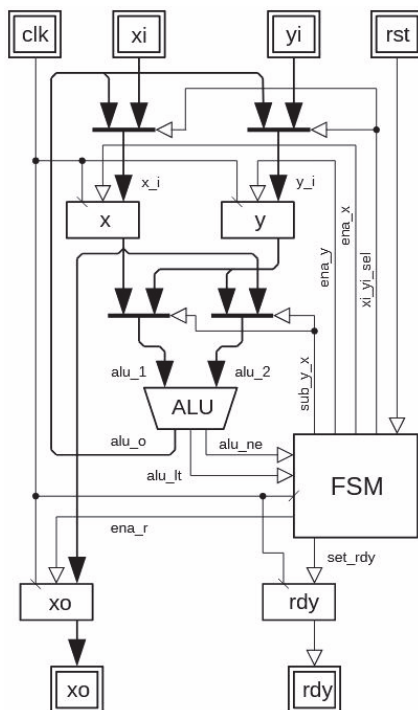


- **Protsessor – tarkvara**
 - universaalne andmetee – aeglane, suured mõõtmed, energianäljane
 - universaalne algoritm – äärmiselt paindlik, kuid nõuab palju ruumi (bitte)
- **Eriiistvara**
 - fikseeritud andmetee – kiire, kompaktne, väike energiatarve
 - paindlikkus määratud juhtautomaadiga, algoritm sageli fikseeritud



Digitaalsüsteem – andme- ja juhtosa

Suurima ühisteguri leidmine (GCD)

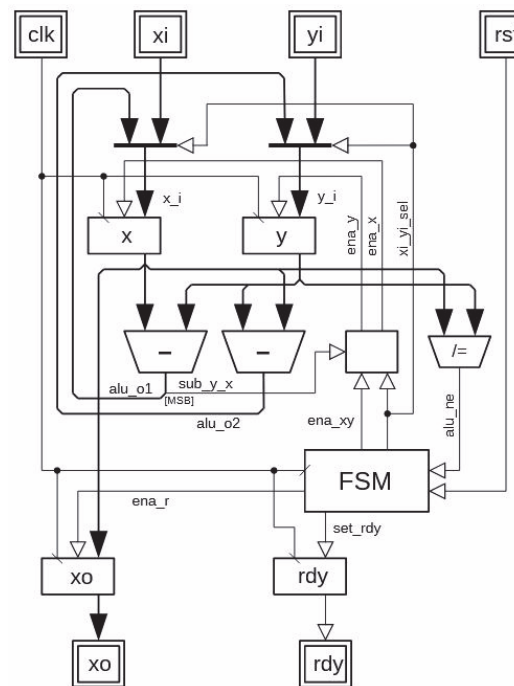
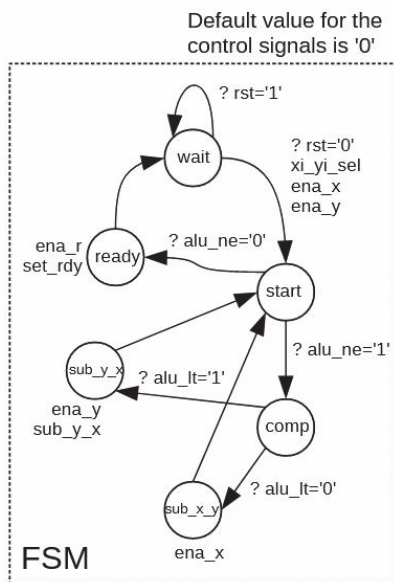


Register-transfer level description with universal ALU (operation reuse).

Code: gcd-rtl1.vhdl

Single ALU ("–", "<", "/=")
[3 clock steps per iteration]

ASIC: 986 e.g. / 19.8 ns
FPGA: 50 SLC / 10.8 ns

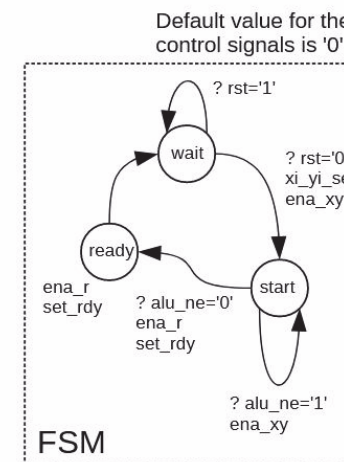


Register-transfer level description with out-of-order subtractions. Only data-path differs from RTL #3 & #4.

Code: gcd-rtl5.vhdl

2 subtractors, 1 comparator
[1 clock step per iteration]

ASIC: 915 e.g. / 20.0 ns
FPGA: 58 SLC / 8.0 ns



- Sama algoritm, erinevad realisatsioonid [vt. ka <https://ati.ttu.ee/~lrv/gcd/>]

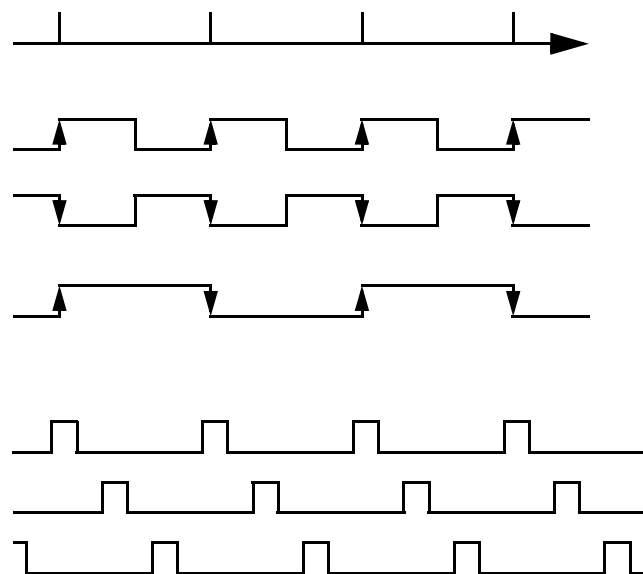
Diskreetne aeg

- **Rangelt järjestatud sündmuste jada (ajamomentide jada)**
 - üksiksündmuse kestus on 0
 - sündmuste vaheline ajavahemik pole oluline
- **Taktsignaali (clock)**
 - reaalne diskreetse aja esitusviis
 - üksiksündmus == taktsignaali front
 - tõusev või langev front – ühefaasiline taktsignaali (single phased clock)
 - tõusev ja langev front – kahefaasiline taktsignaali (double phased clock)
 - varasem mitme faasiline taktsignaali – eri faasid tüürisid eri mäluelemente



diskreetne aeg

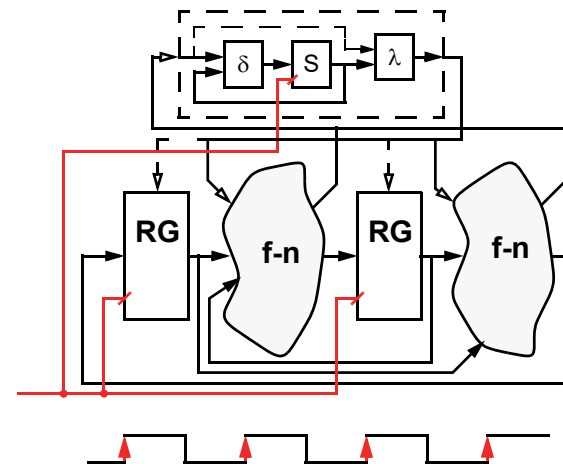
taktsignaali



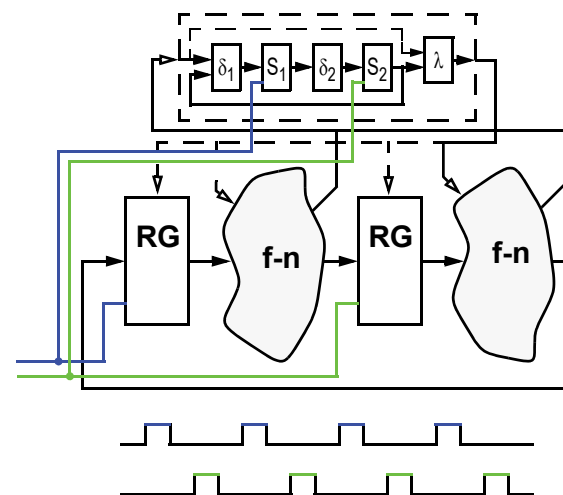
Takteerimine

- **register** →
kombinatsiooniskeem →
register → ...
- **registri tüüp määrab taktsignaali faaside arvu ja lubatud tagasisided**
- **flip-flop**
 - frondist aktiveeruv triger
 - tagaside korral peab olema vähemalt üks triger ahelas
- **latch**
 - lukustuv triger (lukk-register)
 - taktsignaali aktiivse nivoo korral on triger “läbipaistev” → tagaside selliselt, et vähemalt üks suletud triger ahelas

ühefaasiline taktsignaali – flip-flop registrid



kahefaasiline taktsignaali(id) – lukk-registrid





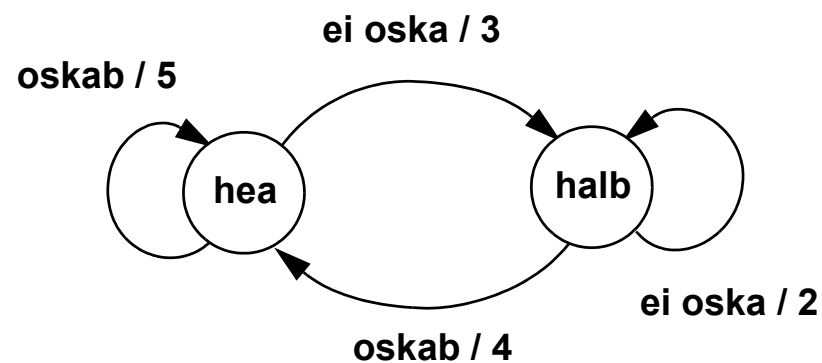
Abstraktne automaat

- **Kombinatoorne skeem**
 - skeemi väljund sõltub ainult skeemi sisendist
 - atsüklilise topoloogiaga skeem on kombinatoorne
 - tsükliga (tagasisidega) skeemid võivad olla kombinatoorsed
- **Mäluga skeem**
 - eksisteerivad mäluelemendid
 - asünkroonsetes skeemis võib mäluelement olla mitteilmutatud kujul
 - tagasiside on vajalik
- **Automaat – mäluga skeemi erijuht**
 - sisendid, väljundid ja olekud – lõplikud hulgad
 - abstraktne automaat, lõplik automaat
 - automaton (pl. automata), sequential machine, finite state machine (FSM)

Näide

- **Õppejõu käitumine eksamil**
 - kui õppejõud on heas tujus ja tudeng oskab, siis tudeng saab 5 ning õppejõu hea tuju säilib
 - kui õppejõud on heas tujus ja tudeng ei oska, siis tudeng saab 3 ning õppejõu tuju läheb halvaks
 - kui õppejõud on halvas tujus ja tudeng ei oska, siis tudeng saab 2 ning õppejõu halb tuju säilib
 - kui õppejõud on halvas tujus ja tudeng oskab, siis tudeng saab 4 ning õppejõu tuju läheb heaks

<i>sisend</i>	<i>olek</i>	<i>väljund</i>	<i>uus olek</i>
tudeng	õppejõud	hinne	õppejõud
oskab	hea tuju	5	hea tuju
ei oska	hea tuju	3	halb tuju
ei oska	halb tuju	2	halb tuju
oskab	halb tuju	4	hea tuju



Näide – õppejõu realisatsioon riistvaras

- **Realisatsiooni efektiivsus sõltub kodeeringust!**

- **Sisend- ja väljundkodeering üldjul teada**
- **Olekute kodeerimine oluline**
 - pindala – loogikalülide arv
 - viide – funktsioonide keerukus
 - võimsustarve – lülituste arv ajaühikus

- **Realisatsioon #1**

sisend: ei oska - 0, oskab - 1

väljund: 2 - 0001, 3 - 0010, 4 - 0100, 5 - 1000

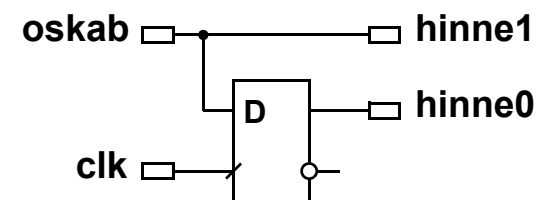
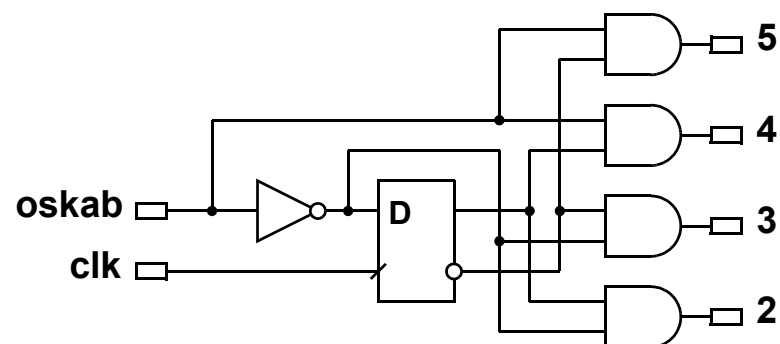
olek: hea - 0, paha - 1

- **Realisatsioon #2**

sisend: ei oska - 0, oskab - 1

väljund: 2 - 00, 3 - 01, 4 - 10, 5 - 11

olek: hea - 1, paha - 0





Abstraktne automaat – definitsioonid

- **Automaat on viisik (quintuple) – $M = (S, I, O, \delta, \lambda)$**
 - **S: (sise)olekute hulk (states)**
 - **I: sisendite hulk (inputs)**
 - **O: väljundite hulk (outputs)**
 - **δ : siirdefunktsioon (transition) - $\delta: S \times I \rightarrow S$**
 - **λ : väljundfunktsioon - $\lambda: S \times I \rightarrow O$**

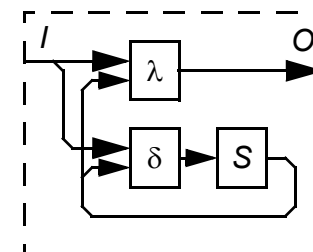
- **Hulgad on lõplikud ja (üldjuhul) mittetühjad**
 - **hulkade ja funktsioonide erijuhud – automaatide erijuhud**

- **Lähteolek s_0 – $M = (S, I, O, \delta, \lambda, s_0)$**

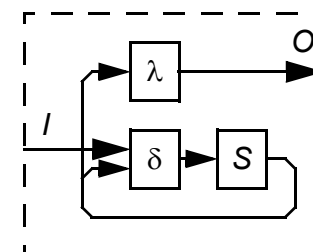
Automaatide erijuhud

- **Mealy automaat** – $M = (S, I, O, \delta, \lambda)$
 - $S \neq \emptyset, I \neq \emptyset, O \neq \emptyset, \delta: S \times I \rightarrow S, \lambda: S \times I \rightarrow O$
- **Moore automaat** – $M = (S, I, O, \delta, \lambda)$
 - $S \neq \emptyset, I \neq \emptyset, O \neq \emptyset, \delta: S \times I \rightarrow S, \lambda: S \rightarrow O$
- **Primitiivne automaat** – $M = (S, I, \delta)$
 - $S \neq \emptyset, I \neq \emptyset, O = \emptyset (O \equiv S), \delta: S \times I \rightarrow S, \lambda \equiv \emptyset$
- **Generaator** – $M = (S, O, \delta, \lambda)$
 - $S \neq \emptyset, I = \emptyset, O \neq \emptyset, \delta: S \rightarrow S, \lambda: S \rightarrow O$
- **Loogikafunktsioon** – $M = (I, O, \lambda)$
 - $S = \emptyset, I \neq \emptyset, O \neq \emptyset, \delta = \emptyset, \lambda: I \rightarrow O$
- **Mikroprogramm automaat** – $M = (S, I, O, \delta, \lambda)$
 - $S \neq \emptyset, I = \{0,1\}^L, O = \{0,1\}^M, \delta: S \times I \rightarrow S, \lambda: S \times I \rightarrow O$

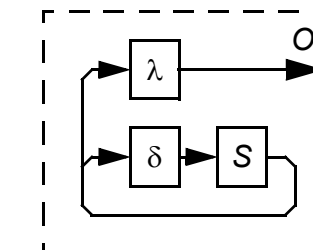
Mealy



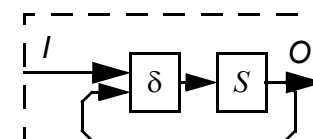
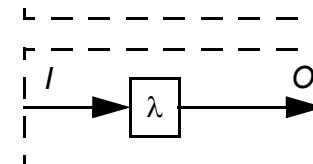
Moore



generaator



primitiivne


 loogika-
funktsioon


Esitusviisid

- **Tabel**

- veerud:
 - sisend (i_t), jooksev olek (s_t), väljund (o_t), uus olek (s_{t+1})
- read: siire jooksvast olekust uude olekusse:
 - $i_t \times s_t \rightarrow o_t \times s_{t+1}$

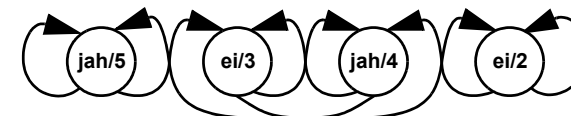
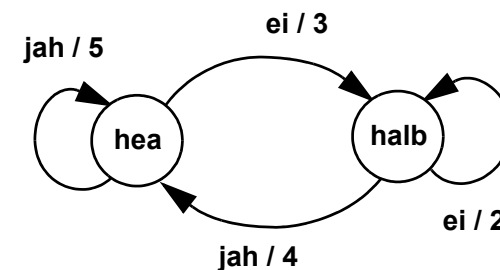
i_t	s_t	o_t	s_{t+1}
jah	hea	5	hea
ei	hea	3	halb
ei	halb	2	halb
jah	halb	4	hea

- **Olekudiagramm, olekugraaf (state graph)**

- sõlmed: olekud
- kaared: siirded

- **Siirdediagramm (transition graph)**

- sõlmed: siirded
- kaared: olekud





Automaatide omadusi

- **Osaliselt määratud automaadid**
 - leidub olekuid, kus siire pole mingi sisendi puhul määratud
 - lihtsustatud kirjapilt – vaikimisi jääb nt. samasse olekusse
 - määramatus tuleneb väliskeskonna iseärasustes – mitte-eksisteerivad sisendkombinatsioonid
 - kahendkodeeritud olekud – osa kombinatsioone on kasutamata
 - automaadi minimeerimisel vabamad käed – osaliselt määratud loogikafunktsioonid
- **Mittedeterministlikud automaadid**
 - leidub olekute ja sisendite kombinatsioone, mille puhul on määratud rohkem kui üks järgmine olek
 - kompaktne meetod kirjeldamiseks, kui leidub rohkem kui üks legaalne reaktsioon mingile sisendkombinatsioonile (jadale)
 - matemaatilised mudelid
- **Isomorfism**
 - üksühene vastavus kahe automaadi komponentide $(S, I, O, \delta, \lambda)$ vahel
- **Homomorfism**
 - ühene vastavus kahe automaadi komponentide $(S, I, O, \delta, \lambda)$ vahel ~ “alam-automaat”



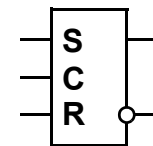
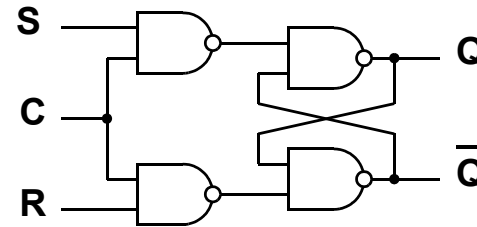
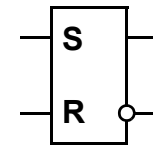
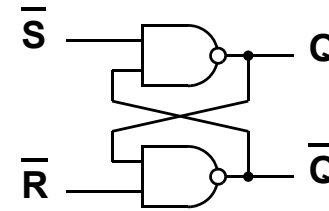
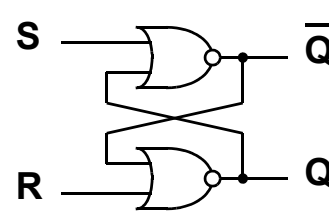
Mäluelemendid

- **Salvestavad olekukoodi**
- **Register**
 - kahendvektori salvestamiseks
 - sama tüüpi mäluelemendid
- **Mäluelementide tüübid**
 - funktsionaalsus – SR, JK, D- ja T-trigerid
 - takteerimine
 - asünkroone – takt puudub
 - latch (lukk-register/-triger) – läbipaistev kui takt on aktiivne
 - flip-flop (frondist aktiveeruv triger) – väljundis muutus ainult taktsignaali frondi korral
 - master-slave (meister-sell) – kaks järjestikust lukk-registrit (latch'i)
 - frondile reageerivad trigerid – spetsiaalne sise-ehitus

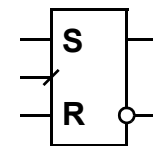
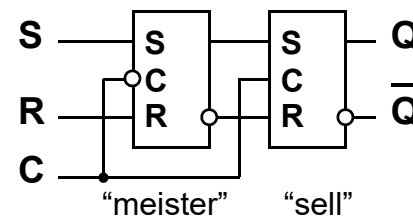
SR-triger (set/reset)

S	R	Q_{t+1}	\bar{Q}_{t+1}
0	0	Q_t	\bar{Q}_t
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	?	?

Q_t	Q_{t+1}	S	R
0	0	0	-
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	-	0



latch

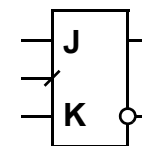


flip-flop

JK-triger

J	K	Q_{t+1}	\overline{Q}_{t+1}
0	0	Q_t	\overline{Q}_t
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	\overline{Q}_t	Q_t

Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0



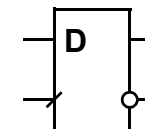
- Määramatus võimaldab loogikafunktsioone efektiivsemalt minimeerida
- Kaks sisendit → kaks loogikafunktsiooni

D-triger (delay)

- **Kõige enam kasutusel**
 - lihtne sise-ehitus
 - väike sisendite arv → vähem loogikafunktsioone

D	Q_{t+1}	\bar{Q}_{t+1}
0	0	1
1	1	0

Q_t	Q_{t+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

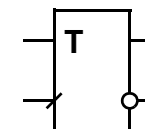


T-triger

- **Sobiv loendurites kasutamiseks**

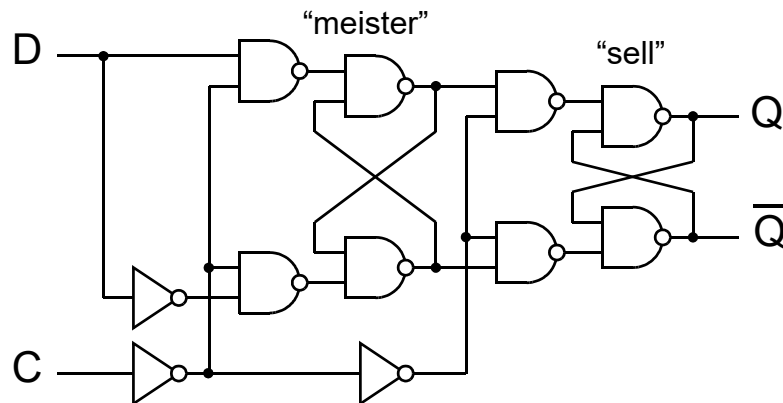
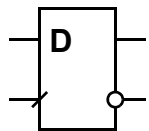
T	Q_{t+1}	\bar{Q}_{t+1}
0	Q_t	\bar{Q}_t
1	\bar{Q}_t	Q_t

Q_t	Q_{t+1}	T
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

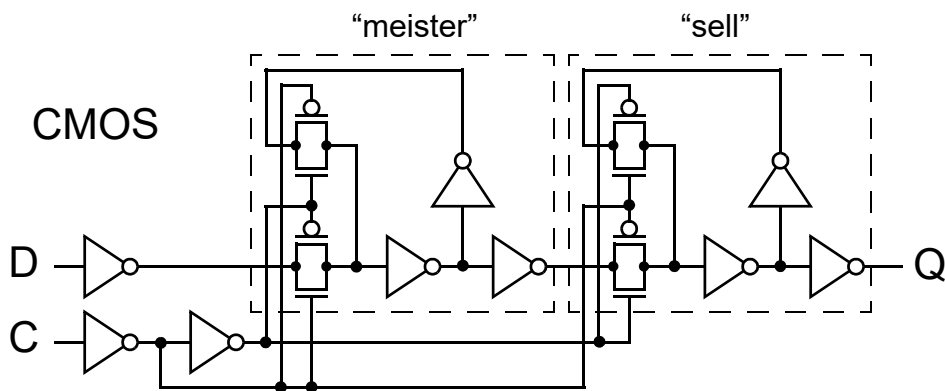


Trigerite sise-ehitus

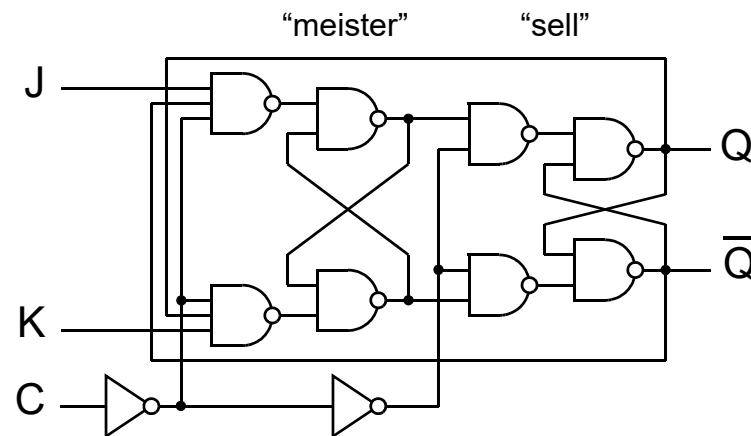
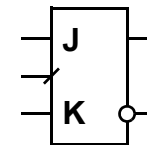
D-triger



CMOS



JK-triger

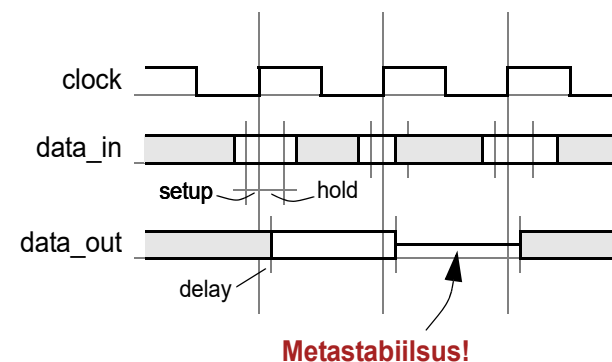


Trigerite simulaatorid

- <http://www.falstad.com/circuit/> – Sequential Logic → Flip-Flops → ...
- <http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/applets/cmos/cmosdemo.html>
vt. CMOS D-latch

Trigerite ajalised parameetrid

- **Sisemised ahelad erinevate viidetega**
 - nt. sisendist mäluelementideni võrreldes tagasisidega
 - seadeaeg (setup) – nõutav valmisoleku aeg
 - sisend peab olema stabiilne mingi aeg enne taktsignaali aktiivset fronti
 - hoideaeg (hold) – nõutav stabiilsuse aeg
 - sisend peab olema stabiilne mingi aeg pärast taktsignaali aktiivset fronti
 - nõuete rikkumise korral metastabiilsuse oht – väljundi '0' ja '1' vahel



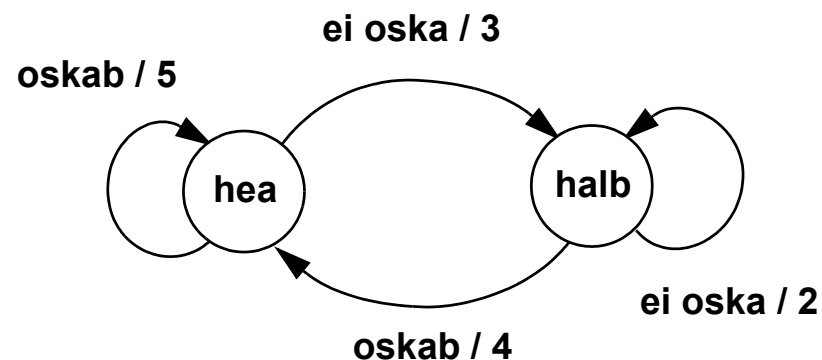


Juhtautomaatide süntees

- **Automaadi olekudiagrammi / tabeli genereerimine (süntees)**
 - *tabeli süntees plokk-skeemist (plokk-diagrammist)*
 - *plokk-skeemi genereerimine kõrgtaseme keeltest*
 - *riistvara kirjelduskeel (hardware description language)*
 - *vt. automaadi näiteid VHDL-i loengumaterjalides*
- **Automaadi süntees olekudiagrammist / tabelist**
 - **eesmärk – automaadi efektiivne realisatsioon**
 - suurus, kiirus, energiatarve, testitavus jne.
 - **sisendite / väljundite kodeerimine**
 - **olekute kodeerimine**
 - **siirde- ja väljundfunktsiooni süntees ja minimeerimine**
 - sõltub valitud mälulementide tüübist (tüüpidest)

Tabel → skeem – Mealy automaat

<i>sisend</i>	<i>olek</i>	<i>väljund</i>	<i>uus olek</i>
tudeng	õppejõud	hinne	õppejõud
oskab	hea tuju	5	hea tuju
ei oska	hea tuju	3	halb tuju
ei oska	halb tuju	2	halb tuju
oskab	halb tuju	4	hea tuju



- **Sisendite kodeerimine:** oskab – “1”, ei oska – “0”
- **Väljundite kodeerimine:** 5 – “11”, 4 – “10”, 3 – “01”, 2 – “00”
- **Olekute kodeerimine:** hea tuju – “1”, halb tuju – “0”



Kodeeritud tabel

<i>sisend</i>		<i>olek</i>		<i>väljund</i>		<i>uus olek</i>	
tudeng	i_t	õppejõud	s_t	hinne	o_t	õppejõud	s_{t+1}
oskab	1	hea tuju	1	5	11	hea tuju	1
ei oska	0	hea tuju	1	3	01	halb tuju	0
ei oska	0	halb tuju	0	2	00	halb tuju	0
oskab	1	halb tuju	0	4	10	hea tuju	1

- Ainult koodid vajalikud
- Siirded sorteeritud (lähte)olekute järgi

i_t	s_t	s_{t+1}	o_t
0	0	0	00
1	0	1	10
0	1	0	01
1	1	1	11

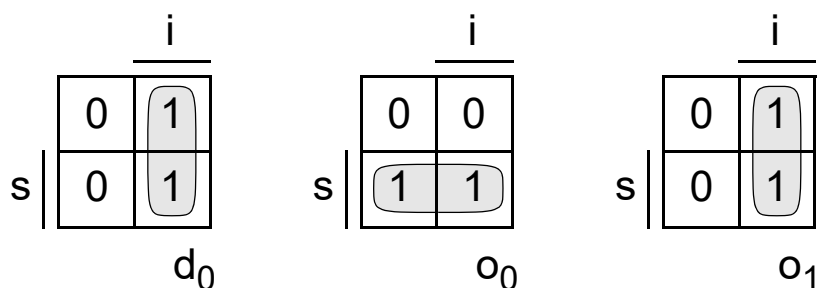
Funktsioonide süntees

- Kodeeritud tabel
- Mäluelemendi tabel
 - vana olek & uus olek → sisendkombinatsioon(id)
 - D-trigger

i_t	s_t	s_{t+1}	o_t
0	0	0	00
1		1	10
0	1	0	01
1		1	11

Q_t	Q_{t+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

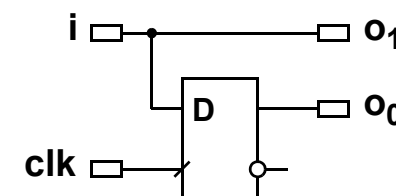
- Funktsioonide minimeerimine



$$d_0 = i$$

$$o_0 = s$$

$$o_1 = i$$



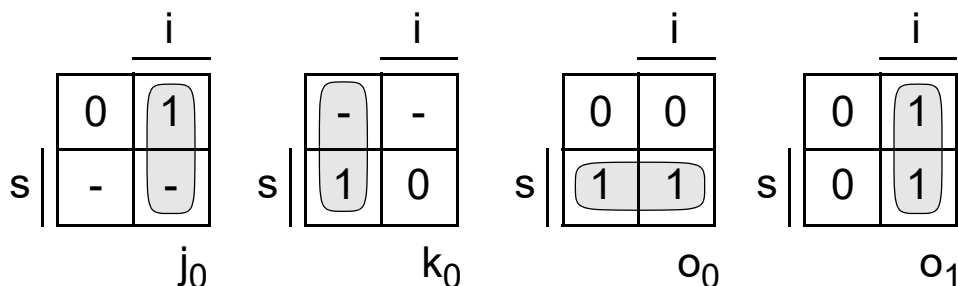
Funktsioonide süntees (variant)

- Kodeeritud tabel
- Mäluelemendi tabel
 - vana olek & uus olek → sisendkombinatsioon(id)
 - JK-trigger

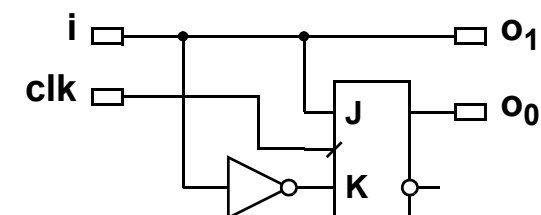
i_t	s_t	s_{t+1}	o_t
0	0	0	00
1		1	10
0	1	0	01
1		1	11

Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

- Funktsioonide minimeerimine



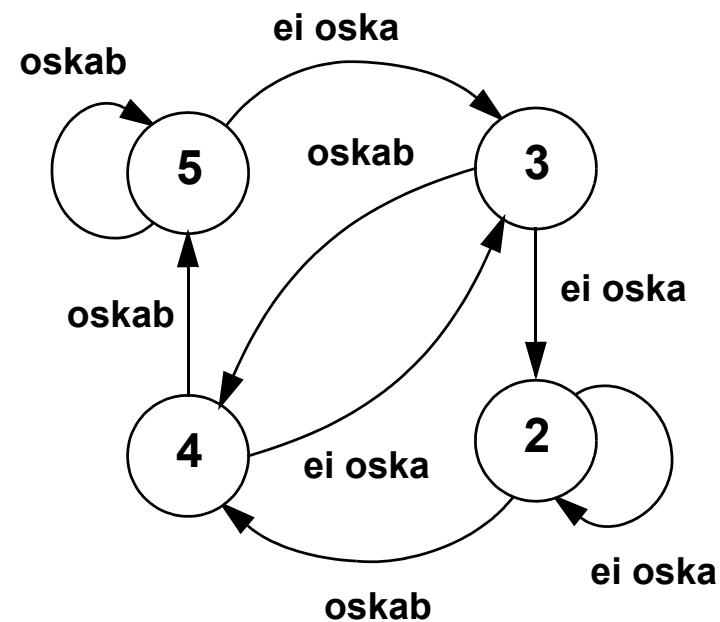
$$\begin{aligned}
 j_0 &= i \\
 k_0 &= \bar{i} \\
 o_0 &= s \\
 o_1 &= i
 \end{aligned}$$



Moore automaadi süntees

- Põhimõtteliselt sama
 - olekuid rohkem
 - väljundfunktsioon lihtsam

<i>sisend</i>	<i>olek</i>	<i>väljund</i>	<i>uus olek</i>
ei oska	halb tuju & 2	2	halb tuju & 2
oskab			hea tuju & 4
ei oska	halb tuju & 3	3	halb tuju & 2
oskab			hea tuju & 4
ei oska	hea tuju & 4	4	halb tuju & 3
oskab			hea tuju & 5
ei oska	hea tuju & 5	5	halb tuju & 3
oskab			hea tuju & 5



Moore automaadi süntees (järg)

Kodeerimine

- sisend ja väljundkoodid samad
- olekud – halb tuju & 2 – “00”, halb tuju & 3 – “01”, hea tuju & 4 – “10”, hea tuju & 5 – “11”

i_t	s_t	s_{t+1}	o_t
0	00	00	00
1	00	10	00
0	01	00	01
1	01	10	01
0	10	01	10
1	10	11	10
0	11	01	11
1	11	11	11

Q_t	Q_{t+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Funktsioonide minimeerimine

	s_0		s_1	
d_0	0	0	1	1
i	0	0	1	1

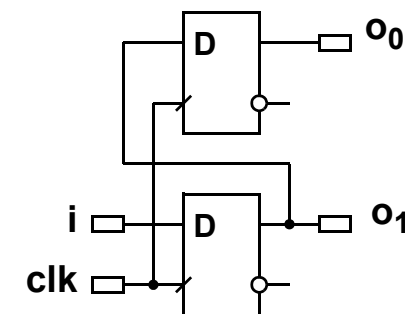
	s_0		s_1	
d_1	0	0	0	0
i	1	1	1	1

$$d_0 = s_1$$

$$d_1 = i$$

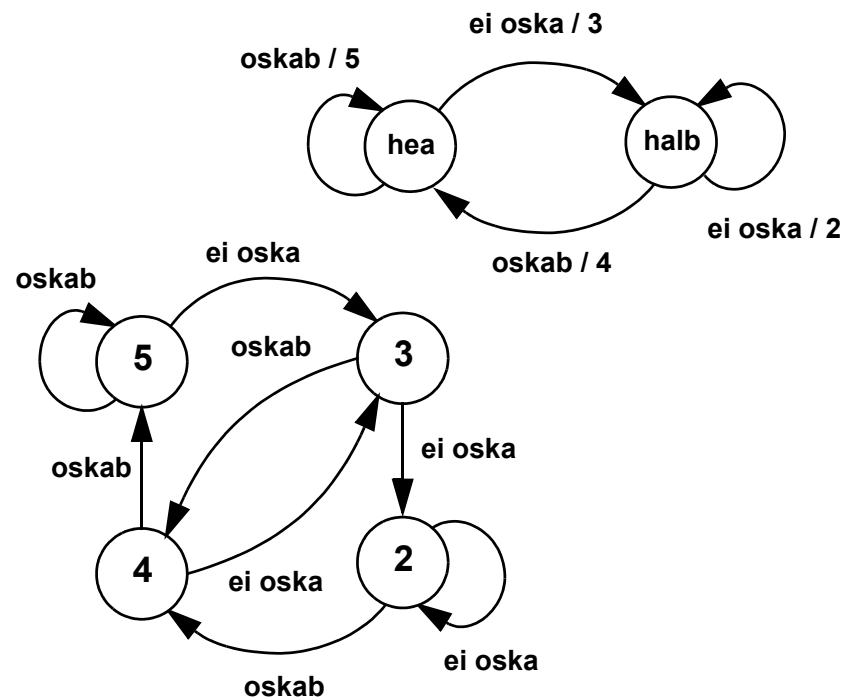
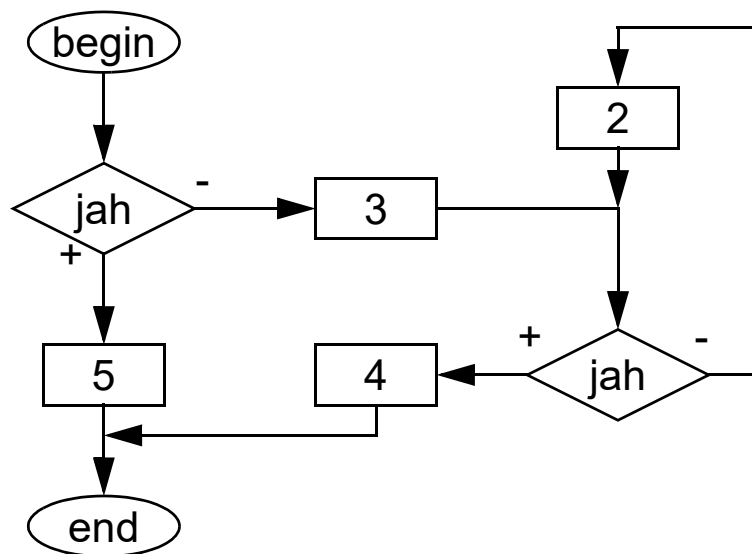
$$o_0 = s_0$$

$$o_1 = s_1$$

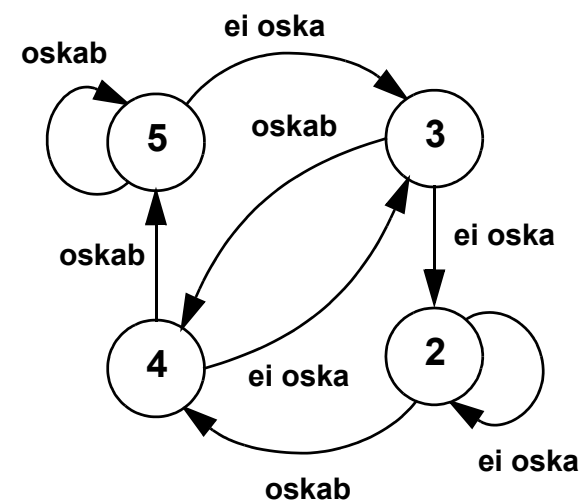
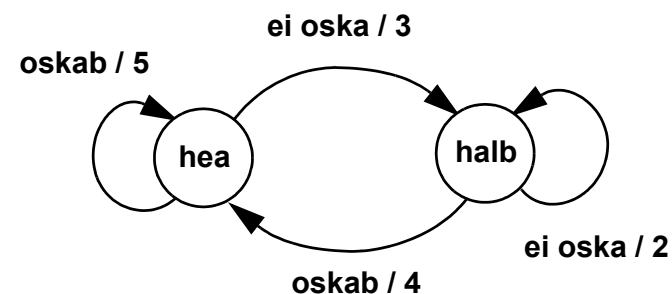
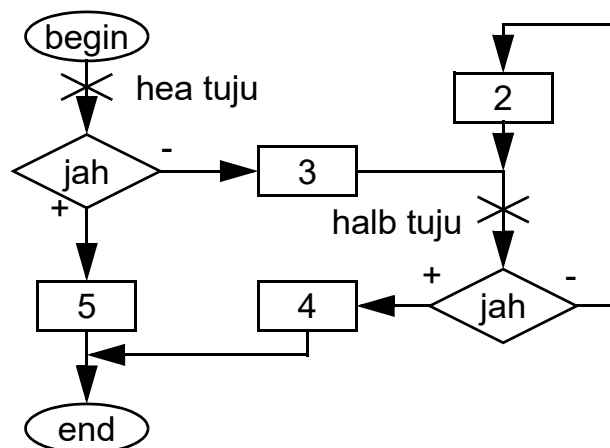


Tabeli / olekudiagrammi süntees plokkskeemist

- Algoritmi graaf-skeem (GSA)
- Behavioral FSM



Tabeli / olekudiagrammi süntees plokkskeemist – reeglid



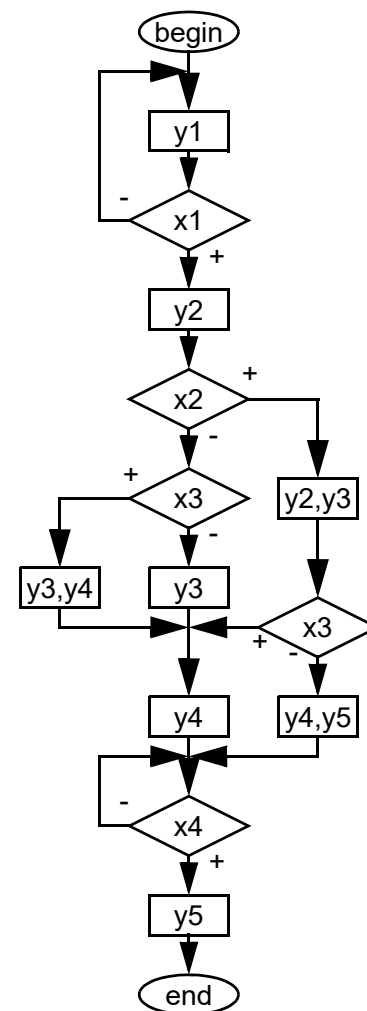
- **Mealy automaat**
 - kahe väljundploki vahel peab olema olek
 - tsükel peab sisaldama olekut
- **Moore automaat**
 - väljundplokki on olek
 - tsükel peab sisaldama olekut

Plokkskeemi genereerimine

- Automaatne genereerimine kõrgtaseme kirjeldusest
 - programmeerimiskeel või riistvara kirjelduskeel

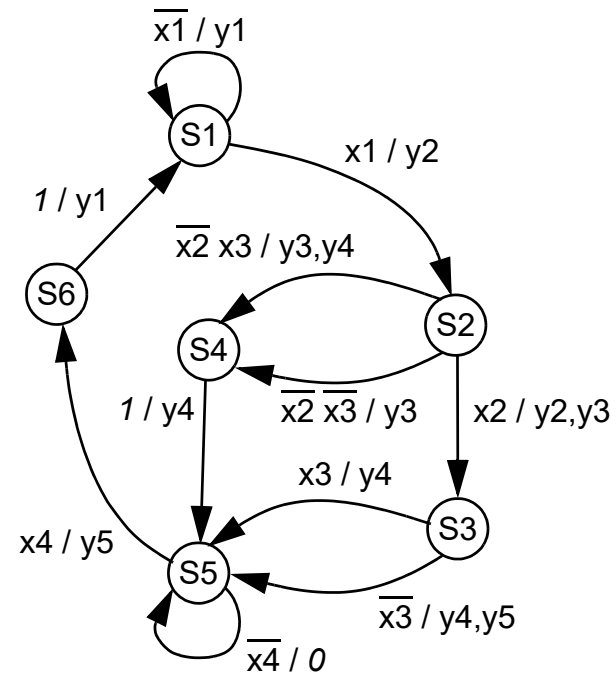
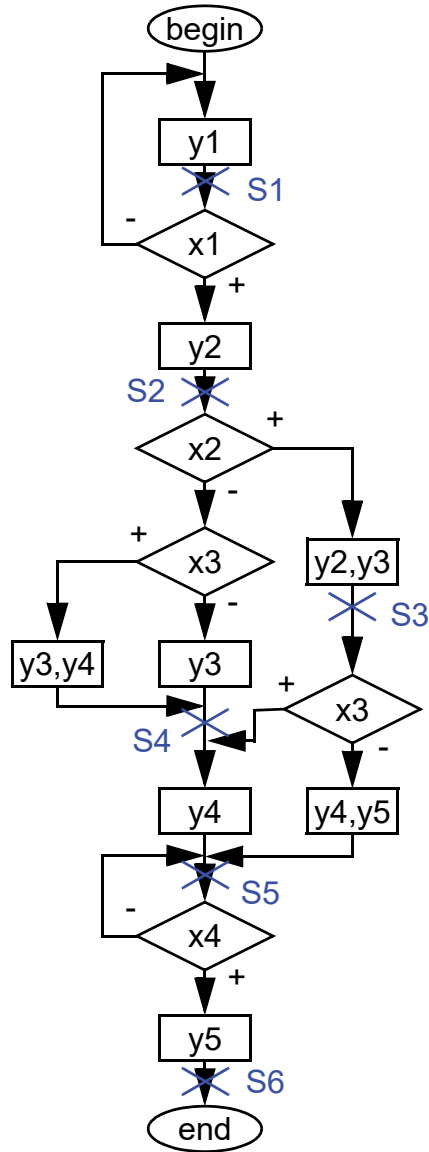
```

process fsm (x1,x2,x3,x4,y1,y2,y3,y4,y5)
  bit in x1,x2,x3,x4;  bit out y1,y2,y3,y4,y5;
{
  while (!x1)  out (y1);
  out (y2);
  if (x2) {
    out (y2,y3);
    if (!x3) { out (y4,y5); goto L1; }
  }
  else { if (x3) out (y3,y4);  else out (y3); }
  out (y4);
L1: while (!x4);
  out (y5);
}
  
```





Mealy automaat

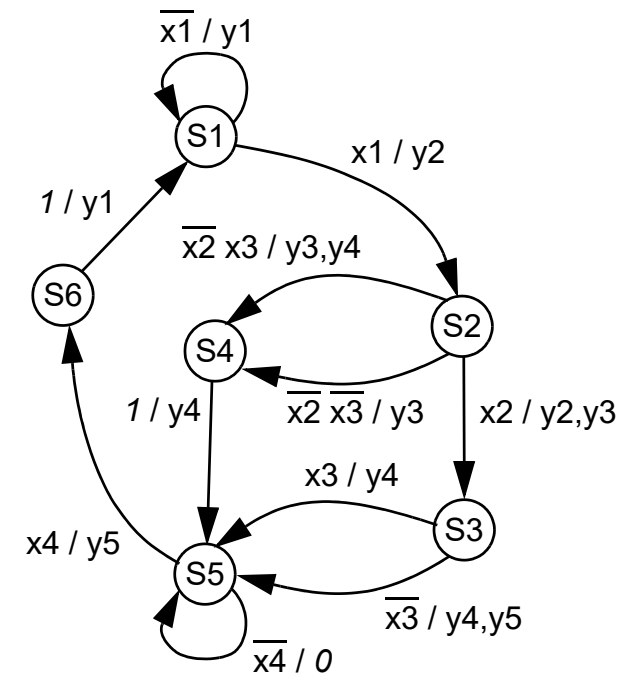




Mealy automaat – tabel

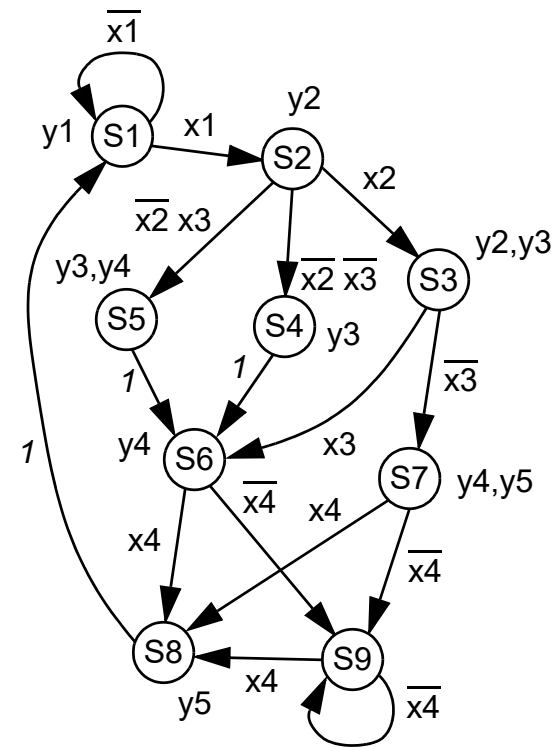
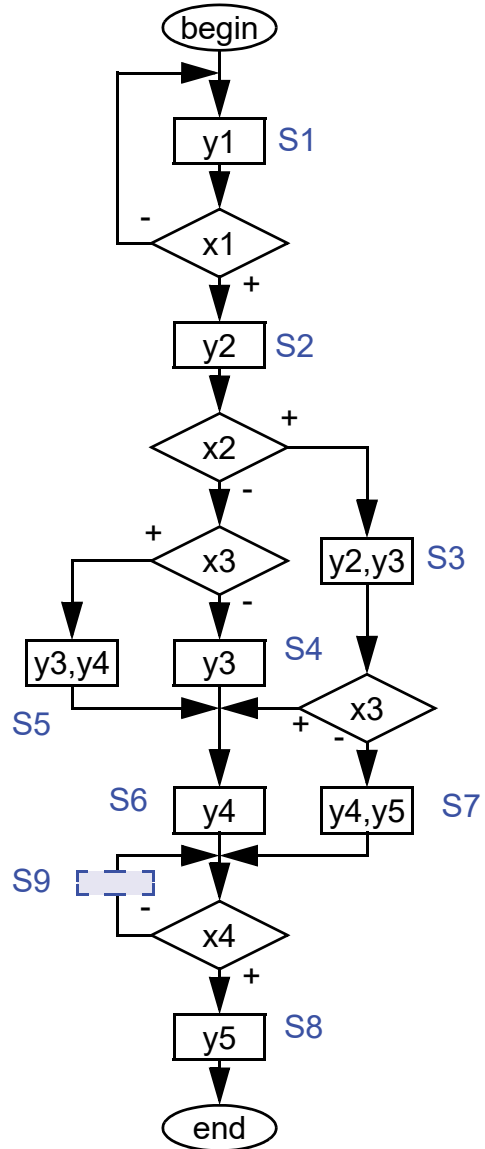
i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
$\overline{x1}$	S1	S1	y1
x1	S1	S2	y2
$\overline{x2} \ \overline{x3}$		S2	S4
$\overline{x2} \ x3$	S2	S4	y3, y4
x2		S3	y2, y3
$\overline{x3}$		S3	S5
x3	S3	S5	y4
1		S4	S5
$\overline{x4}$	S5	S5	0
x4	S5	S6	y5
1		S6	S1

i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
0---	S1	S1	10000
1---	S1	S2	01000
-00-		S2	S4
-01-	S2	S4	00110
-1--		S3	01100
--0-		S3	S5
--1-	S3	S5	00010
----		S4	S5
----0	S5	S5	00000
----1	S5	S6	00001
----		S6	S1





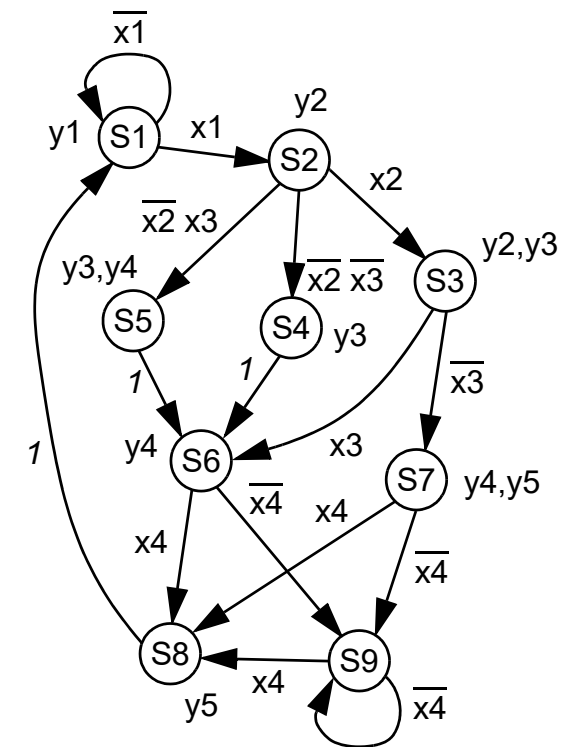
Moore automaat



Moore automaat – tabel

i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
$\overline{x1}$	S1	S1	y1
x1		S2	
$\overline{x2} \overline{x3}$	S2	S4	y2
$\overline{x2} x3$		S5	
x2		S3	
$\overline{x3}$	S3	S7	y2, y3
x3		S6	
1	S4	S6	y3
1	S5	S6	y3, y4
$\overline{x4}$	S6	S9	y4
x4		S8	
$\overline{x4}$	S7	S9	y4, y5
x4		S8	
1	S8	S1	y5
$\overline{x4}$	S9	S9	0
x4		S8	

i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
0---	S1	S1	10000
1---		S2	
-00-	S2	S4	01000
-01-		S5	
-1--		S3	
--0-	S3	S7	01100
--1-		S6	
----	S4	S6	00100
----	S5	S6	00110
---0	S6	S9	00010
---1		S8	
---0	S7	S9	00011
---1		S8	
----	S8	S1	00001
---0	S9	S9	00000
---1		S8	





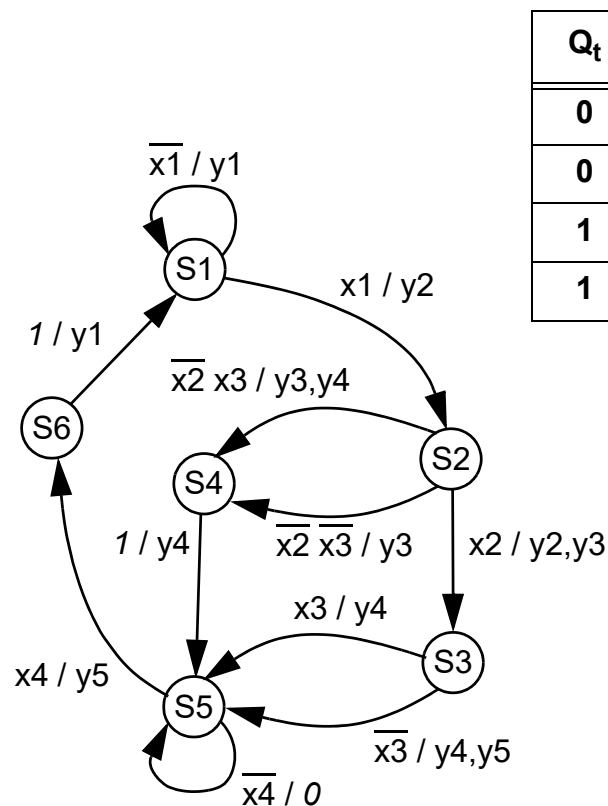
Olekute kodeerimine

- **Leida olekutele sellised koodid, et siirde- ja väljundfunktsioonid oleksid minimaalsed**
 - osaliselt määratud funktsioonid aitavad sellele kaasa
- **Heuristilised reeglid**
 - **Kõik mäluolemendid**
 - olekud, mis samade sisendtingimuste korral viivad samasse olekusse, peaksid olema naaberkodeidiga – võimaldab kaks konjunktsiooni kokku kleepida
 - **D-trigerid – mida rohkem siirdeid mingisse olekusse, seda vähem peaks selle kood sisaldama 1**
 - iga siire vastab ühele konjunktsioonile
 - olek, millesse toimub kõige rohkem siirdeid, peaks olema ainult 0-dest koosneva koodiga
 - **SR-, JK- & T-trigerid – siirdele vastava jooksva ja järgnev oleku koodid peaksid võimalikult kokku langema**
 - ideaaljuhul naaberkodeid
 - sarnane sobivusgraafi servakatte leidmise ülesandega

Mealy automaat – olekute kodeerimine

i^t	s^t		s^{t+1}		o^t
0---	S1	000	S1	000	10000
1---			S2	100	01000
-00-	S2	100	S4	110	00100
-01-			S4	110	00110
-1--			S3	101	01100
--0-	S3	101	S5	111	00011
--1-			S5	111	00010
----	S4	110	S5	111	00010
---0	S5	111	S5	111	00000
---1			S6	011	00001
----	S6	011	S1	000	10000

- Naabrid: S1-S2, S2-S3, S2-S4, S3-S5, S4-S5, S5-S6, ~~S6-S4~~



Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0



Mealy automaat – funktsioonide süntees

i^t	s^t		s^{t+1}		JK^{t+1}	o^t
0---	S1	000	S1	000	0- 0- 0-	10000
1---			S2	100	1- 0- 0-	01000
-00-	S2	100	S4	110	-0 1- 0-	00100
-01-			S4	110	-0 1- 0-	00110
-1--			S3	101	-0 0- 1-	01100
--0-	S3	101	S5	111	-0 1- -0	00011
--1-			S5	111	-0 1- -0	00010
----	S4	110	S5	111	-0 -0 1-	00010
---0	S5	111	S5	111	-0 -0 -0	00000
---1			S6	011	-1 -0 -0	00001
----	S6	011	S1	000	0- -1 -1	10000

Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

JK^{t+1} - JK
trigerite
sisendid

Kasutamata
olekukoodid:
001, 010



Mealy automaat – funktsioonide minimeerimine

funktsioonid

```

xxxx qqg | jkjkjk yyyyyy
1234 123 | 112233 12345
-----+-----
0--- 000 | 0-0-0- 10000
1--- 000 | 1-0-0- 01000
-00- 100 | -01-0- 00100
-01- 100 | -01-0- 00110
-1-- 100 | -00-1- 01100
--0- 101 | -01--0 00011
--1- 101 | -01--0 00010
---- 110 | -0-01- 00010
---0 111 | -0-0-0 00000
---1 111 | -1-0-0 00001
---- 011 | 0--1-1 10000
---- 001 | -----
---- 010 | -----

```

espresso sisend

```

.i 7
.o 11
0---000 0-0-0-10000
1---000 1-0-0-01000
-00-100 -01-0-00100
-01-100 -01-0-00110
-1--100 -00-1-01100
--0-101 -01--000011
--1-101 -01--000010
----110 -0-01-00010
---0111 -0-0-000000
---1111 -1-0-000001
----011 0--1-110000
----001 -----
----010 -----
.e

```

espresso väljund

```

.i 7
.o 11
#.phase 11011101101
---1111 01000000001
--0--00 00000000010
--0--01 00000000001
1---0-0 10000011000
----100 00000000100
-----11 00000000010
-1--100 00101001010
-----1- 00001000000
----1-- 00000010000
----0-- 00110100010
.e

```



Mealy automaat – skeem

espresso väljund

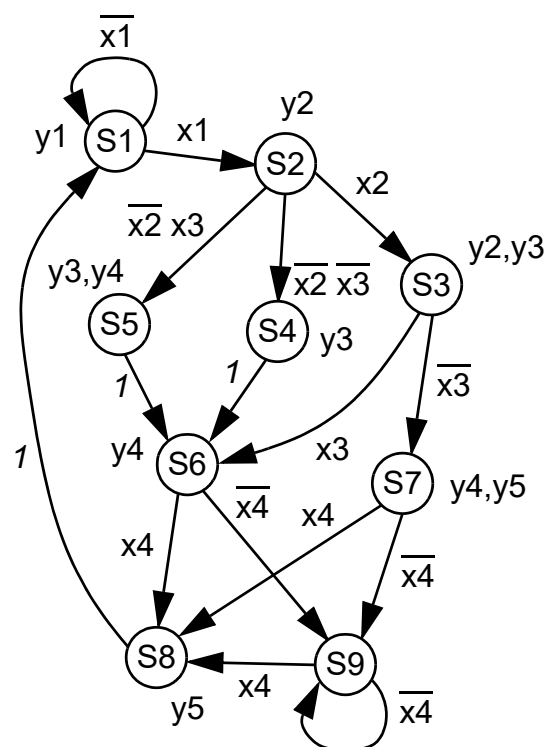
```
.i 7
.o 11
#.phase 11011101101
---1111 01000000001
--0--00 00000000010
--0--01 00000000001
1---0-0 10000011000
----100 00000000100
-----11 00000000010
-1--100 00101001010
-----1- 00001000000
----1-- 00000010000
----0-- 00110100010
.e
```

- $j1 = x1 \overline{q1} \overline{q3}$
- $k1 = x4 q1 q2 q3$
- $\overline{j2} = x2 q1 \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q1}$
- $k2 = k3 = q1$
- $j3 = x2 q1 \overline{q2} \overline{q3} + q2$
- $\overline{y1} = j1 + q1$
- $y2 = j1 + x2 q1 \overline{q2} \overline{q3}$
- $y3 = q1 \overline{q2} \overline{q3}$
- $\overline{y4} = \overline{x3} \overline{q2} \overline{q3} + q2 q3 + x2 q1 \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q1}$
- $y5 = k1 + \overline{x3} \overline{q2} q3$



Moore automaat – olekute kodeerimine

i^t	s^t		s^{t+1}		o^t
0---	S1	0000	S1	0000	10000
1---			S2	0011	
-00-	S2	0011	S4	1100	01000
-01-			S5	0101	
-1--			S3	0110	
--0-	S3	0110	S7	1000	01100
--1-			S6	0001	
----	S4	1100	S6	0001	00100
----	S5	0101	S6	0001	00110
----0	S6	0001	S9	0100	00010
----1			S8	0010	
----0	S7	1000	S9	0100	00011
----1			S8	0010	
----	S8	0010	S1	0000	00001
----0	S9	0100	S9	0100	00000
----1			S8	0010	



Q_t	Q_{t+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Siirete arv:

S1 - 2, S2 - 1,
S3 - 1, S4 - 1,
S5 - 1, S6 - 3,
S7 - 1, S8 - 3,
S9 - 3



Moore automaat – funktsioonide süntees

i^t	s^t		s^{t+1}		D^{t+1}	o^t
0---	S1	0000	S1	0000	0000	10000
1---			S2	0011	0011	
-00-	S2	0011	S4	1100	1100	01000
-01-			S5	0101	0101	
-1--			S3	0110	0110	
--0-	S3	0110	S7	1000	1000	01100
--1-			S6	0001	0001	
----	S4	1100	S6	0001	0001	00100
----	S5	0101	S6	0001	0001	00110
---0	S6	0001	S9	0100	0100	00010
---1			S8	0010	0010	
---0	S7	1000	S9	0100	0100	00011
---1			S8	0010	0010	
----	S8	0010	S1	0000	0000	00001
---0	S9	0100	S9	0100	0100	00000
---1			S8	0010	0010	

Q_t	Q_{t+1}	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

D^{t+1} - D-trigerite sisendid

Kasutatava olekukoodid:
0111, 1001, 1010,
1011, 1101, 1110,
1111



```

xxxx qqqq | dddd siirde-
1234 1234 | 1234 funktsioon
-----+-----
0--- 0000 | 0000
1--- 0000 | 0011
-00- 0011 | 1100
-01- 0011 | 0101
-1-- 0011 | 0110
--0- 0110 | 1000
--1- 0110 | 0001
---- 1100 | 0001
---- 0101 | 0001
---1 0001 | 0010
---0 0001 | 0100
---1 1000 | 0010
---0 1000 | 0100
---- 0010 | 0000
---1 0100 | 0010
---0 0100 | 0100
---- 0111 | ----
---- 1001 | ----
---- 1010 | ----
---- 1011 | ----
---- 1101 | ----
---- 1110 | ----
---- 1111 | ----

väljund-
funktsioon
qqqq | yyyy
1234 | 12345
-----+-----
0000 | 10000
0011 | 01000
0110 | 01100
1100 | 00100
0101 | 00110
0001 | 00010
1000 | 00011
0010 | 00001
0100 | 00000
0111 | -----
1001 | -----
1010 | -----
1011 | -----
1101 | -----
1110 | -----
1111 | -----

```

espresso sisend:

```

.i 8
.o 4
0---0000 0000
1---0000 0011
-00-0011 1100
-01-0011 0101
-1--0011 0110
--0-0110 1000
--1-0110 0001
----1100 0001
----0101 0001
---00001 0100
---10001 0010
---01000 0100
---11000 0010
----0010 0000
---00100 0100
---10100 0010
----0111 ----
----1001 ----
----1010 ----
----1011 ----
----1101 ----
----1110 ----
----1111 ----
.e

```

siirde-
funktsioon

väljund-
funktsioon

```

.i 4
.o 5
0000 10000
0011 01000
0110 01100
1100 00100
0101 00110
0001 00010
1000 00011
0010 00001
0100 00000
0111 -----
1001 -----
1010 -----
1011 -----
1101 -----
1110 -----
1111 -----
.e

```



Moore automaat – funktsioonide minimeerimine

```

.i 8
.o 4
0---0000 0000
1---0000 0011
-00-0011 1100
-01-0011 0101
-1--0011 0110
--0-0110 1000
--1-0110 0001
----1100 0001
----0101 0001
---00001 0100
---10001 0010
---01000 0100
---11000 0010
----0010 0000
---00100 0100
---10100 0010
----0111 ----
----1001 ----
----1010 ----
----1011 ----
----1101 ----
----1110 ----
----1111 ----
.e

```

siirde-
funktsioon

espresso sisend

väljund-
funktsioon

```

.i 4
.o 5
0000 10000
0011 01000
0110 01100
1100 00100
0101 00110
0001 00010
1000 00011
0010 00001
0100 00000
0111 ----
1001 ----
1010 ----
1011 ----
1101 ----
1110 ----
1111 ----
.e

```

espresso väljund

```

.i 8
.o 4
#.phase 0011
1---0000 0011
---10100 0110
-01---11 1001
---1-001 0110
-1----11 1010
--1--11- 1001
---110-- 0110
----00-0 1100
-----10 0100
----11-- 0101
-----1-1 0101
-----0- 1000
.e

```

siirde-
funktsioon

väljund-
funktsioon

```

.i 4
.o 5
#.phase 10011
0000 10000
0-00 00100
-010 01001
--01 00010
10-- 00011
--0- 01000
-0-- 00100
.e

```




Moore automaat – skeem

```
.i 8
.o 4
#.phase 0011
1---0000 0011
---10100 0110
-01---11 1001
---1-001 0110
-1----11 1010
--1--11- 1001
---110-- 0110
----00-0 1100
-----10 0100
----11-- 0101
-----1-1 0101
-----0- 1000
.e
```

siirde-
funktsioon

$$\overline{d1} = \overline{x2} \ x3 \ q3 \ q4 + \overline{x2} \ \overline{q3} \ q4 + \\ + x3 \ q2 \ q3 + \overline{q1} \ \overline{q2} \ \overline{q4} + \overline{q3}$$

$$\overline{d2} = x4 \ \overline{q1} \ \overline{q2} \ \overline{q3} \ \overline{q4} + \overline{x4} \ \overline{q2} \ \overline{q3} \ \overline{q4} + \\ + x4 \ q1 \ q2 + \overline{q1} \ \overline{q2} \ q4 + q3 \ q4 + \\ + q1 \ q2 \ q2 \ q4$$

$$d3 = x1 \ \overline{q1} \ \overline{q2} \ \overline{q3} \ \overline{q4} + \\ + x4 \ \overline{q1} \ q2 \ \overline{q3} \ \overline{q4} + \overline{x4} \ \overline{q2} \ \overline{q3} \ q4 + \\ + x2 \ q3 \ q4 + \overline{x4} \ q1 \ \overline{q2}$$

$$d4 = x1 \ \overline{q1} \ \overline{q2} \ \overline{q3} \ \overline{q4} + \overline{x2} \ x3 \ q3 \ q4 + \\ + x3 \ q2 \ q3 + \overline{q1} \ \overline{q2} + \overline{q2} \ q4$$

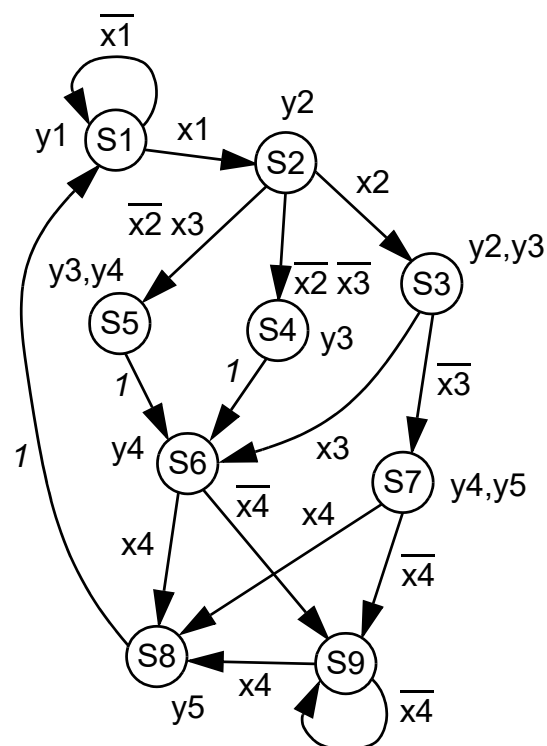
```
.i 4
.o 5
#.phase 10011
0000 10000
0-00 00100
-010 01001
--01 00010
10-- 00011
--0- 01000
-0-- 00100
.e
```

väljund-
funktsioon

$$\overline{y1} = \overline{q1} \ \overline{q2} \ \overline{q3} \ \overline{q4} \\ \overline{y2} = \overline{q2} \ q3 \ \overline{q4} + \overline{q3} \\ \overline{y3} = \overline{q1} \ \overline{q3} \ \overline{q4} + \overline{q2} \\ y4 = \overline{q3} \ q4 + \overline{q1} \ \overline{q2} \\ y5 = \overline{q2} \ q3 \ \overline{q4} + \overline{q1} \ \overline{q2}$$

Moore automaat – olekute kodeerimine #2

i^t	s^t		s^{t+1}		o^t
0---	S1	0000	S1	0000	10000
1---			S2	0001	
-00-	S2	0001	S4	0101	01000
-01-			S5	0011	
-1--			S3	1001	
--0-	S3	1001	S7	1010	01100
--1-			S6	0110	
----	S4	0101	S6	0110	00100
----	S5	0011	S6	0110	00110
----0	S6	0110	S9	1110	00010
----1			S8	1100	
----0	S7	1010	S9	1110	00011
----1			S8	1100	
----	S8	1100	S1	0000	00001
----0	S9	1110	S9	1110	00000
----1			S8	1100	



Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

Võimalikult vähe
muutuvad koodid:

S1 - 0000, S2 - 0001,
S3 - 1001, S4 - 0101,
S5 - 0011, S6 - 0110,
S7 - 1010, S8 - 1100,
S9 - 1110



Moore automaat – funktsioonide süntees #2

i^t	s^t		s^{t+1}		JK^{t+1}	o^t
0---	S1	0000	S1	0000	0-0-0-0-	10000
1---			S2	0001	0-0-0-1-	
-00-	S2	0001	S4	0101	0-1-0--0	01000
-01-			S5	0011	0-0-1--0	
-1--			S3	1001	1-0-0--0	
--0-	S3	1001	S7	1010	-00-1--1	01100
--1-			S6	0110	-11-1--1	
----	S4	0101	S6	0110	0--01--1	00100
----	S5	0011	S6	0110	0-1--0-1	00110
---0	S6	0110	S9	1110	1--0-00-	00010
---1			S8	1100	1--0-10-	
---0	S7	1010	S9	1110	-01--00-	00011
---1			S8	1100	-01--10-	
----	S8	1100	S1	0000	-1-10-0-	00001
---0	S9	1110	S9	1110	-0-0-00-	00000
---1			S8	1100	-0-0-10-	

Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

JK^{t+1} - JK-trigerite
sisendid

Kasutamata
olekukoodid:
0010, 0100, 0111,
1000, 1011, 1101,
1111



Moore automaat – funktsioonide minimeerimine #2

```

.i 8
.o 8
0---0000 0-0-0-0-
1---0000 0-0-0-1-
-00-0001 0-1-0--0
-01-0001 0-0-1--0
-1--0001 1-0-0--0
--0-1001 -00-1--1
--1-1001 -11-1--1
----0101 0--01--1
----0011 0-1--0-1
---00110 1--0-00-
---10110 1--0-10-
---01010 -01--00-
---11010 -01--10-
----1100 -1-10-0-
---01110 -0-0-00-
---11110 -0-0-10-
----0010 -----
----0100 -----
----0111 -----
----1000 -----
----1011 -----
----1101 -----
----1111 -----
.e

```

siirde-
funktsioon

espresso sisend

väljund-
funktsioon

```

.i 4
.o 5
0000 10000
0001 01000
1001 01100
0101 00100
0011 00110
0110 00010
1010 01011
1100 00001
1110 00000
0010 -----
0100 -----
0111 -----
1000 -----
1011 -----
1101 -----
1111 -----
.e

```

espresso väljund

siirde-funktsioon

```

.i 8
.o 8
#.phase 11110110
-00-00-1 00101000
-1--0001 10001000
--1-1--1 01100000
1----00- 00000010
----000- 00000001
---1---0 00000100
-----10 10000000
-----00 01011000
-----1- 00100000
.e

```

väljund-
funktsioon

```

.i 4
.o 5
#.phase 00010
0-1- 00010
000- 00101
-11- 00001
-01- 11010
---0 01100
---1 10001
-1-- 11000
.e

```



Moore automaat – skeem #2

```
.i 8
.o 8
#.phase 11110110
-00-00-1 00101000
-1--0001 10001000
--1-1--1 01100000
1----00- 00000010
----000- 00000001
---1---0 00000100
-----10 10000000
-----00 01011000
-----1- 00100000
.e
```

siirde-
funktsioon

$$\begin{aligned}
 j1 &= x2 \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} \overline{q4} + q3 \overline{q4} \\
 k1 &= x3 \overline{q1} \overline{q4} + \overline{q3} \overline{q4} \\
 j2 &= \overline{x2} \overline{x3} \overline{q1} \overline{q2} \overline{q4} + \\
 &\quad + x3 \overline{q1} \overline{q4} + q3 \\
 k2 &= \overline{q3} \overline{q4} \\
 \overline{j3} &= \overline{x2} \overline{x3} \overline{q1} \overline{q2} \overline{q4} + \\
 &\quad + x2 \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} \overline{q4} + \overline{q3} \overline{q4} \\
 k3 &= x4 \overline{q4} \\
 \overline{j4} &= x1 \overline{q2} \overline{q3} \\
 \overline{k4} &= \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3}
 \end{aligned}$$

```
.i 4
.o 5
#.phase 00010
0-1- 00010
000- 00101
-11- 00001
-01- 11010
---0 01100
---1 10001
-1-- 11000
.e
```

väljund-
funktsioon

$$\begin{aligned}
 \overline{y1} &= \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q4} + q2 \\
 \overline{y2} &= \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q4} + q2 \\
 \overline{y3} &= \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q4} \\
 \overline{y4} &= \overline{q1} \overline{q3} + \overline{q2} \overline{q3} \\
 \overline{y5} &= \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} + q2 \overline{q3} + q4
 \end{aligned}$$

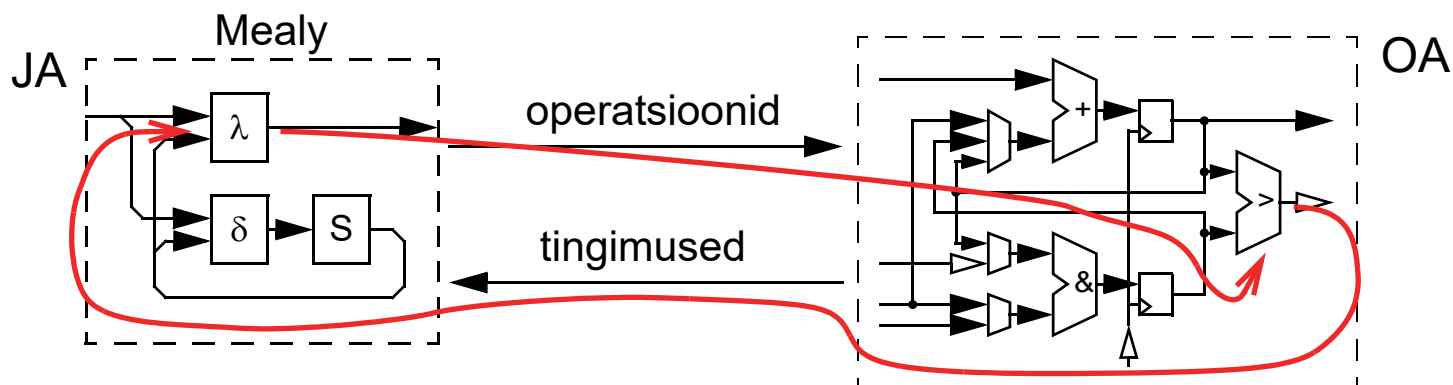


Olekute kodeerimise olulisus – võrdlus

Automaat	Kodeering #1	Kodeering #2	Kodeering #3
$x \ s \ s+ \ y$	“loendur”	D-trigeri heuristika	$\overline{1,2,3,4,5,6}$ $\overline{1,6,2,5,3,4}$
0 1 4 0	1:000 2:001	1: 1 2: 2	1:110 2:101
1 1 3 0	3:010 4:011	3: 3 4: 3	3:100 4:000
0 2 6 0	5:100 6:101	5: 2 6: 1	5:001 6:010
1 2 3 0			
0 3 5 0			
1 3 2 0			
0 4 2 1	faas 1011	ülesanne	faas 1111
1 4 5 1	0001 1100	0110 0010	-000 0001
0 5 1 0	000- 0010	1110 0000	00-- 1000
1 5 4 0	01-0 0100	0010 1010	11-- 1000
0 6 3 0	11-- 0010	1010 0000	0--1 0100
1 6 4 0	1-10 0110	0000 1000	--00 0010
	0-10 1100	1000 0100	
	1-11 1101	0001 0101	
	0-11 0111	1001 1001	
		0100 1100	
		1100 0010	
		0101 0000	
		1101 0010	
		-011 ----	
		-111 ----	
			$y = \overline{q_1} \overline{q_2} \overline{q_3}$
			$d_1 = \overline{x} \overline{q_1} + x q_1$
			$d_2 = \overline{x} q_3$
			$d_3 = \overline{q_2} \overline{q_3}$

Mealy või Moore?

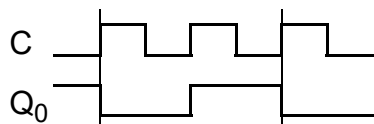
- **Mealy**
 - vähem olekuid → vähem mälulemente
 - keerulisemad väljundfunktsioonid
 - puhverdamata väljundid → asünkroonse tagasiside oht
- **Moore**
 - rohkem olekuid → rohkem mälulemente
 - lihtsamad väljundfunktsioonid
 - “puhverdatud” väljundid



Loendur kui automaat ...

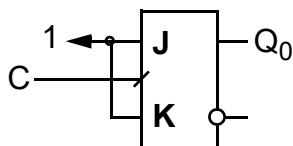
- Loendur – primitiivne generaator – $S \neq \emptyset$, $I = \emptyset$, $O = \emptyset$ ($O \equiv S$), $\delta: S \rightarrow S$, $\lambda \equiv \emptyset$

2-nd loendur Jada – 0, 1

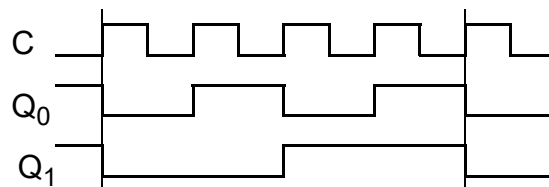


s_t	s_{t+1}	JK_{t+1}
0	1	1-
1	0	-1

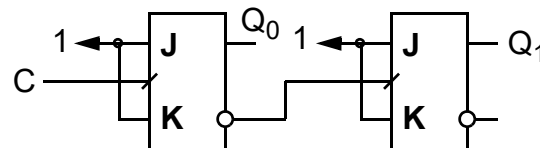
$$J=K=1$$



4-nd loendur Jada – 0, 1, 2, 3



Kaks loendurit järjest?

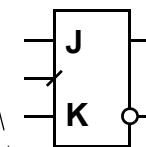


Takti hilistumine!!!

Automaat?

Olekud – 00, 01, 10, 11 [Q1 Q0]

JK-triger



Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

s_t	s_{t+1}	JK_{t+1}
00	01	0- 1-
01	10	1- -1
10	11	-0 1-
11	00	-1 -1

$$J_0=K_0=1$$

$$J_1=K_1=Q_0$$

