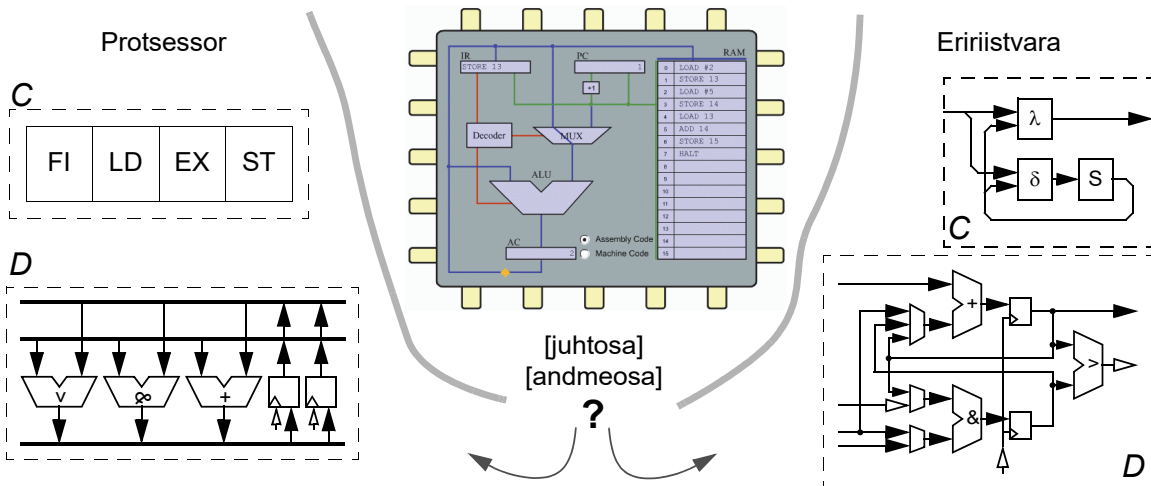
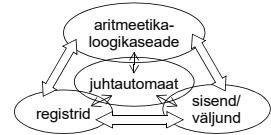


Digitaalsüsteem – struktuur & juhtautomaat

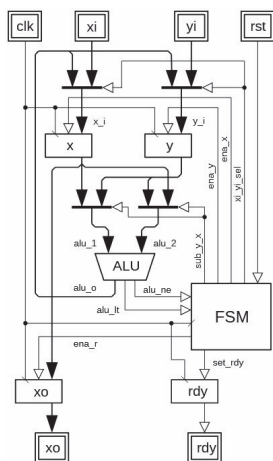


- **Protsessor – tarkvara**
 - universaalne andmetee – aeglane, suured mõõtmed, energianäljane
 - universaalne algoritm – äärmiselt paindlik, kuid nõuab palju ruumi (bitte)
- **Eriistvara**
 - fikseeritud andmetee – kiire, kompaktned, väike energiatarve
 - paindlikkus määratud juhtautomaadiga, algoritm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

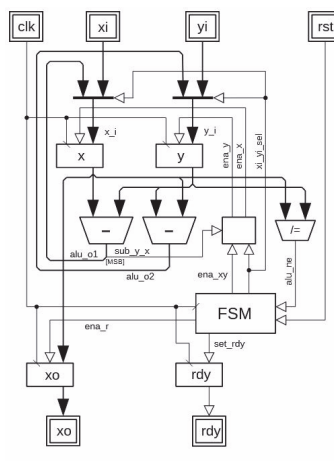


Digitaalsüsteem – andme- ja juhtosa

Suurima ühisteguri leidmine (GCD)

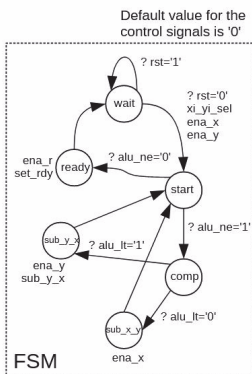


Register-transfer level description with universal ALU (operation reuse).

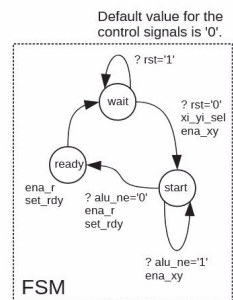


Register-transfer level description with out-of-path subtractions. Only data-path differs from RTL #3 & #4.

Code: gcd-rtl1.vhdl
 Single ALU ("=", "<", ">", "=")
 [3 clock steps per iteration]
 ASIC: 986 e.g. / 19.8 ns
 FPGA: 50 SLC / 10.8 ns



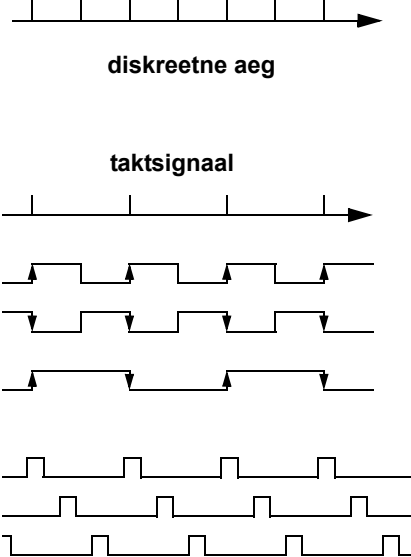
Code: gcd-rtl5.vhdl
 2 subtractors, 1 comparator
 [1 clock step per iteration]
 ASIC: 915 e.g. / 20.0 ns
 FPGA: 58 SLC / 8.0 ns



- **Sama algoritm, erinevad realisatsioonid [vt. ka <http://mini.pld.ttu.ee/~lrv/gcd/>]**

Diskreetne aeg

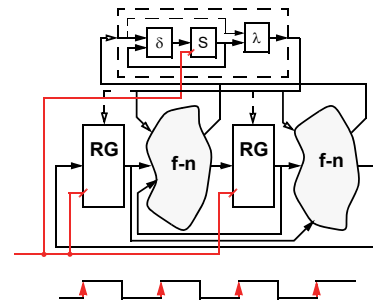
- Rangelt järjestatud sündmuste jada (ajamomentide jada)
 - üksiksündmuse kestus on 0
 - sündmuste vaheline ajavahemik pole oluline
- Taktsignaali (clock)
 - reaalne diskreetse aja esitusviis
 - üksiksündmus == taktsignaali front
 - tõusev või langev front – ühefaasiline taktsignaali (single phased clock)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



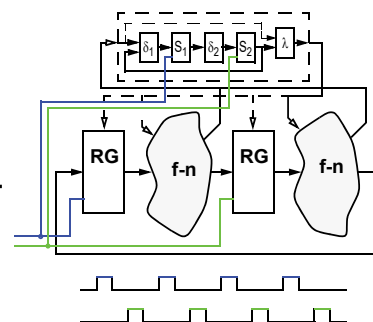
Takteerimine

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

ühefaasiline taktsignaali – flip-flop registrid



kahefaasiline taktsignaali(id) – luku-registrid





Abstraktne automaat

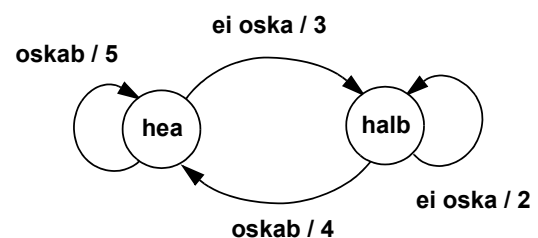
- **Kombinatoorne skeem**
 - skeemi väljund sõltub ainult skeemi sisendist
 - atsüklilise topoloogiaga skeem on kombinatoorne
 - tsükliga (tagasisidega) skeemid võivad olla kombinaatorsed
- **Mäluga skeem**
 - eksisteerivad mäluelemendid
 - asünkroonsetes skeemis võib mäluelement olla mitteilmutatud 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

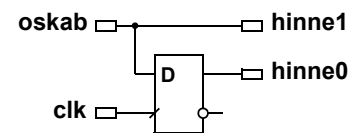
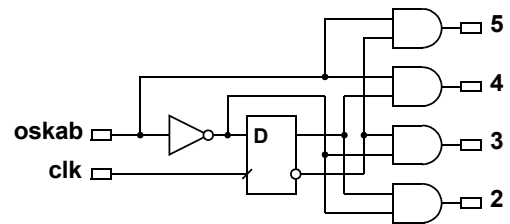
<i>sisend</i>	<i>olek</i>	<i>väljund</i>	<i>uus olek</i>
tudeng	õppejõud	hinne	õppejõud
oskab	hea tuju	5	hea tuju
ei oska	hea tuju	3	halb tuju
ei oska	halb tuju	2	halb tuju
oskab	halb tuju	4	hea tuju





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



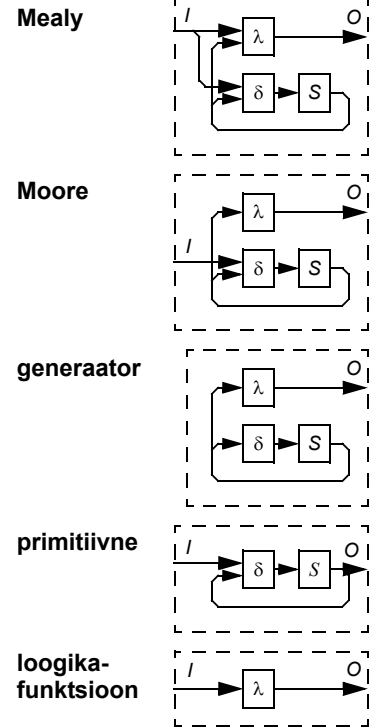
Abstraktne automaat – definitsioonid

- **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

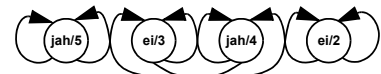
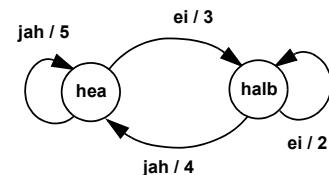
- **Mealy automaat** – $M = (S, I, O, \delta, \lambda)$
 - $S \neq \emptyset, I \neq \emptyset, O \neq \emptyset, \delta: S \times I \rightarrow S, \lambda: S \times I \rightarrow O$
- **Moore automaat** – $M = (S, I, O, \delta, \lambda)$
 - $S \neq \emptyset, I \neq \emptyset, O \neq \emptyset, \delta: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



Esitusviisid

- **Tabel**
 - veerud: sisend (i_t), jooksev olek (s_t), väljund (o_t), uus olek (s_{t+1})
 - read: siire jooksvast olekust uude olekusse: $i_t \times s_t \rightarrow o_t \times s_{t+1}$
- **Olekudiagramm, olekugraaf (state graph)**
 - sõlmed: olekud
 - kaared: siirded
- **Siirdediagramm (transition graph)**
 - sõlmed: siirded
 - kaared: olekud

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





Automaatide omadusi

- **Osaliselt määratud automaadid**
 - leidub olekuid, kus siire pole mingi sisendi puhul määratud
 - lihtsustatud kirjapilt – vaikumisi 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”



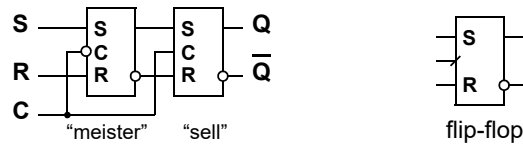
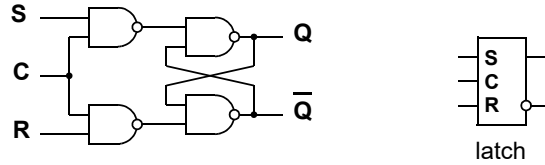
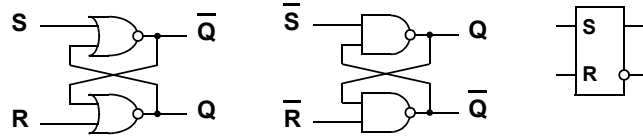
Mäluelemendid

- **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



JK-triger

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

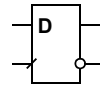


D-triger (delay)

- **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

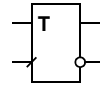


T-triger

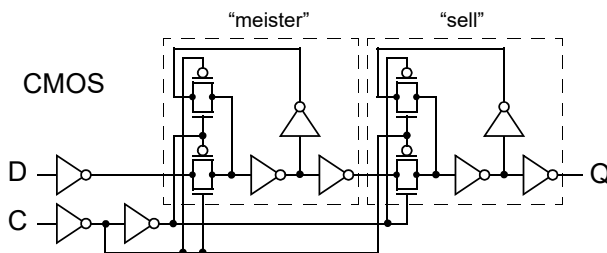
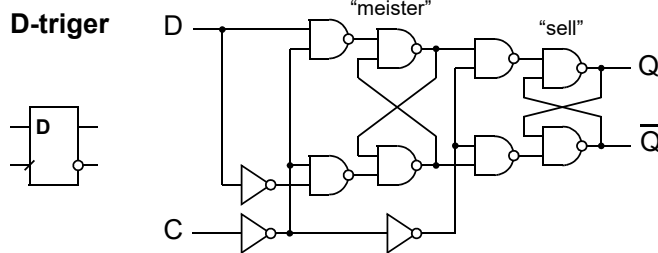
- Sobiv loendurites kasutamiseks

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

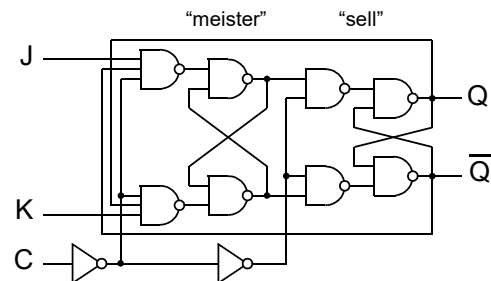
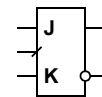
Q_t	Q_{t+1}	T
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Trigerite sise-ehitus



JK-triger



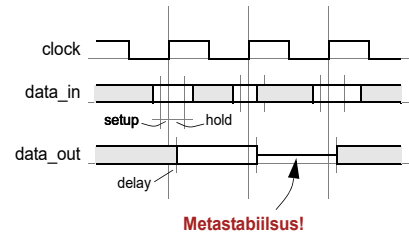


Trigerite simulaatorid

- <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 mälulementideni 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



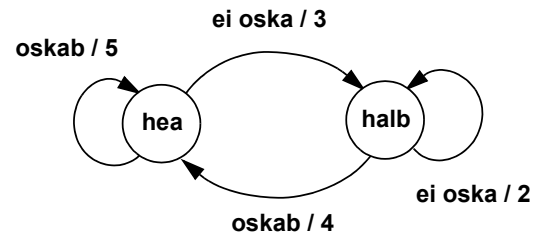
Juhtautomaatide süntees

- **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

sisend	olek	väljund	uus olek
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

sisend		olek		väljund		uus olek	
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

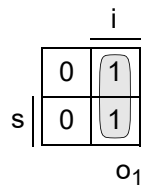
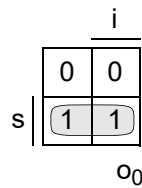
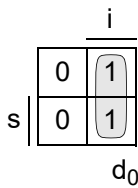
Funktsioonide süntees

- 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	0	1	10
0	1	0	01
1	1	1	11

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

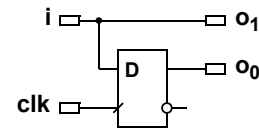
- Funktsioonide minimeerimine



$$d_0 = i$$

$$o_0 = s$$

$$o_1 = i$$



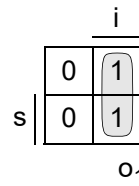
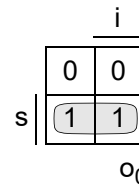
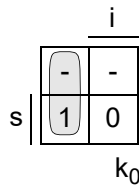
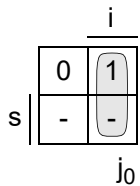
Funktsioonide süntees (variant)

- 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	0	1	10
0	1	0	01
1	1	1	11

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

- Funktsioonide minimeerimine

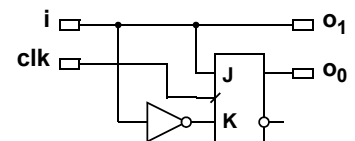


$$j_0 = i$$

$$k_0 = \bar{i}$$

$$o_0 = s$$

$$o_1 = i$$

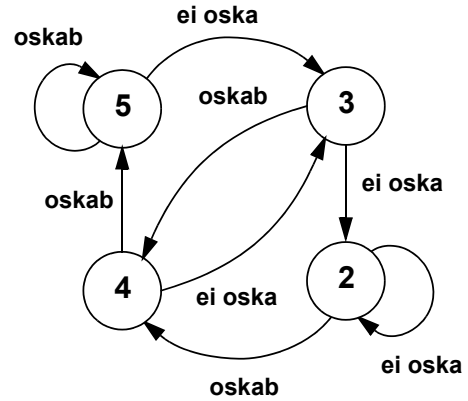




Moore automaadi süntees

- Põhimõtteliselt sama
 - olekuid rohkem
 - väljundfunktsioon lihtsam

sisend	olek	väljund	uus olek
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



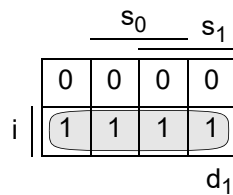
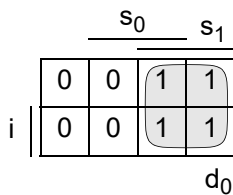
Moore automaadi süntees (järg)

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

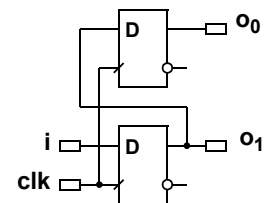
i_t	s_t	s_{t+1}	o_t
0	00	00	00
1		10	
0	01	00	01
1		10	
0	10	01	10
1		11	
0	11	01	11
1		11	

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

- Funktsioonide minimeerimine



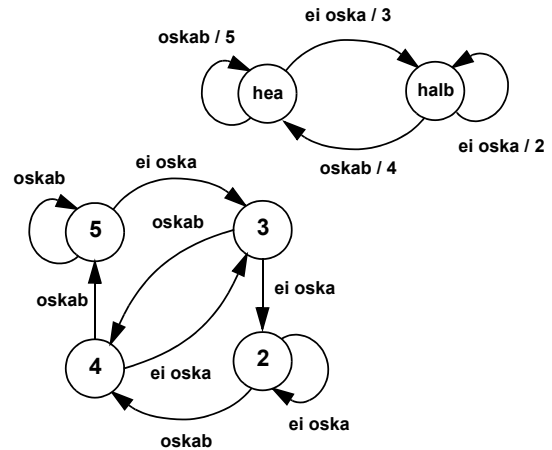
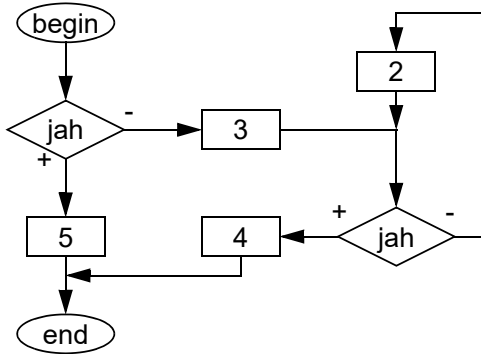
$$\begin{aligned}
 d_0 &= s_1 \\
 d_1 &= i \\
 o_0 &= s_0 \\
 o_1 &= s_1
 \end{aligned}$$



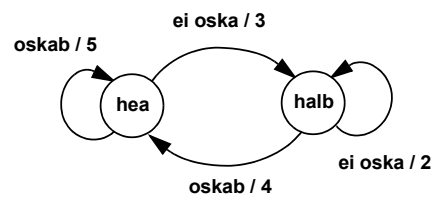
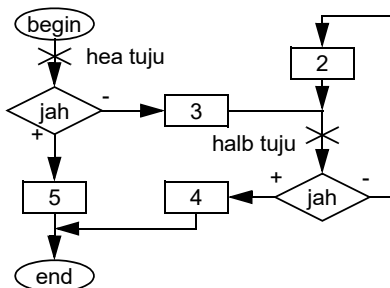


Tabeli / olekudiagrammi süntees plokskeemist

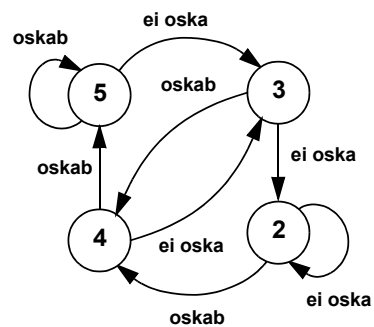
- Algoritmi graaf-skeem (GSA)
- Behavioral FSM



Tabeli / olekudiagrammi süntees plokskeemist – reeglid



- Mealy automaat
 - kahe väljundplokki vahel peab olema olek
 - tsükkel peab sisaldama olekut
- Moore automaat
 - väljundplokk on olek
 - tsükkel peab sisaldama olekut



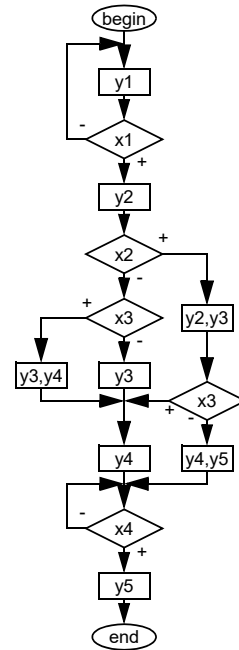


Plokskeemi genereerimine

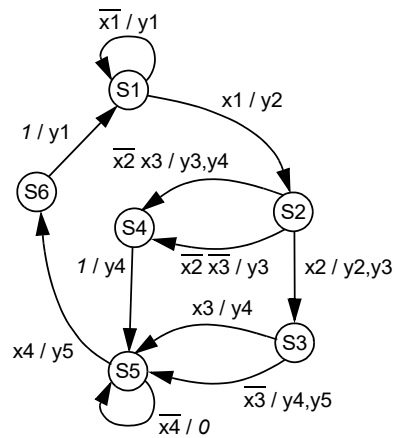
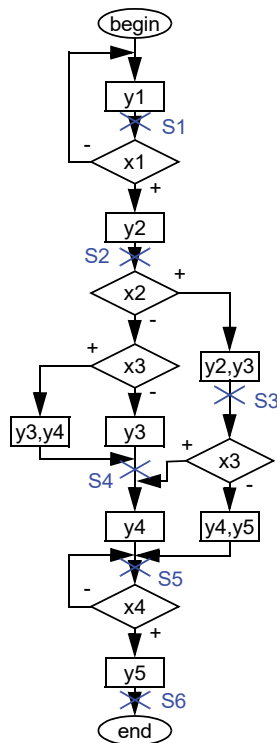
- Automaatne genereerimine kõrgtaseme kirjeldusest
- programmeerimiskeel või riistvara kirjelduskeel

```

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

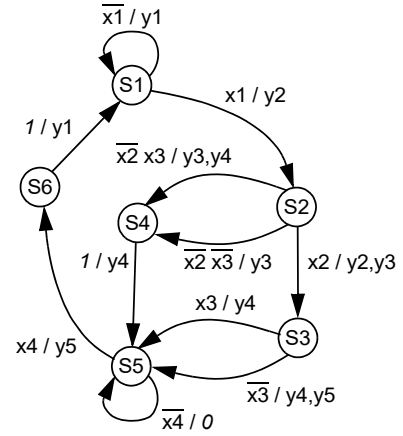




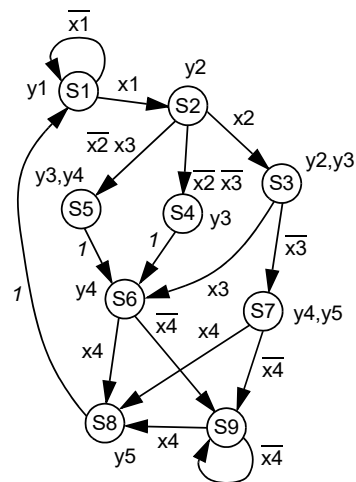
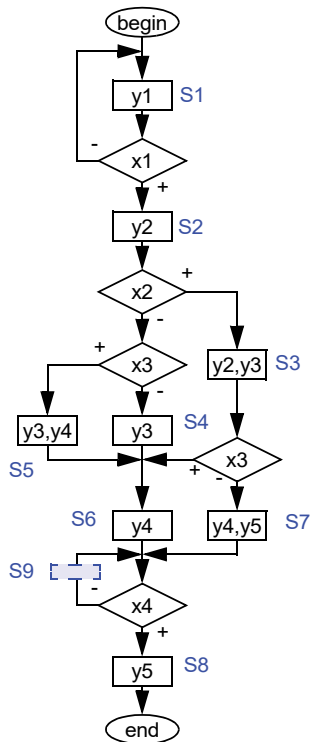
Mealy automaat – tabel

i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
$\bar{x}1$	S1	S1	y1
x1		S2	y2
$\bar{x}2 \bar{x}3$	S2	S4	y3
$\bar{x}2 x3$		S4	y3, y4
x2		S3	y2, y3
$\bar{x}3$	S3	S5	y4, y5
x3		S5	y4
1	S4	S5	y4
$\bar{x}4$	S5	S5	0
x4		S6	y5
1	S6	S1	y1

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



Moore automaat

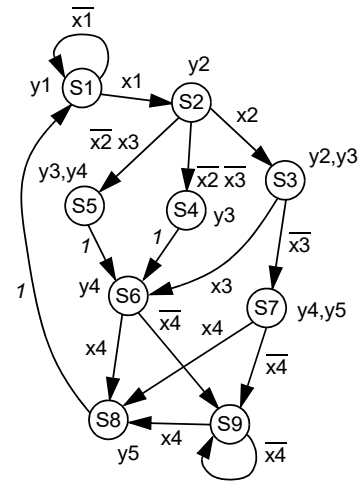




Moore automaat – tabel

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
$\overline{1}$	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

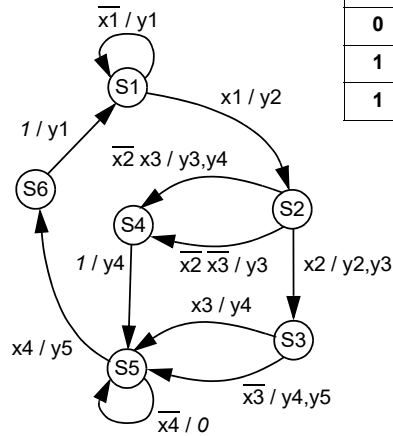
- Leida olekutele sellised koodid, et siirde- ja väljundfunktsioonid oleksid minimaalsed
- osaliselt määratud funktsioonid aitavad sellele kaasa
- Heuristilised reeglid
 - Kõik mäluolekud
 - olekud, mis samade sisendtingimuste korral viivad samasse olekusse, peaksid olema naaberkoodidega – võimaldab 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 järgneva oleku koodid peaksid võimalikult kokku langema
 - ideaaljuhul naaberkoodid
 - 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

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



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



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 qq | jkjkjk yyy
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

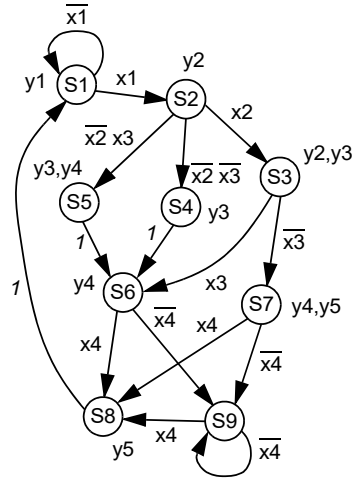
```
.i 7
.o 11
#.phase 11011101101
---1111 01000000001
--0--00 00000000010
--0--01 00000000001
1---0-0 10000011000
----100 00000000100
----11 00000000010
-1--100 00101001010
----1- 00001000000
----1-- 00000010000
----0-- 00110100010
.e
```

- $j_1 = x_1 \overline{q_1} \overline{q_3}$
- $k_1 = x_4 q_1 \overline{q_2} \overline{q_3}$
- $\overline{j_2} = x_2 q_1 \overline{q_2} \overline{q_3} + \overline{q_1}$
- $k_2 = k_3 = \overline{q_1}$
- $\overline{j_3} = x_2 q_1 \overline{q_2} \overline{q_3} + q_2$
- $y_1 = j_1 + q_1$
- $y_2 = j_1 + x_2 \overline{q_1} \overline{q_2} \overline{q_3}$
- $\overline{y_3} = \overline{q_1} \overline{q_2} \overline{q_3}$
- $\overline{y_4} = \overline{x_3} \overline{q_2} \overline{q_3} + q_2 q_3 + x_2 \overline{q_1} \overline{q_2} \overline{q_3} + \overline{q_1}$
- $y_5 = k_1 + x_3 \overline{q_2} \overline{q_3}$



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

Kasutamata 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

```



```

.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

Moore automaat –
funktsioonide minimeerimine

.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

$$\begin{aligned} \overline{d1} &= \overline{x2} x3 q3 q4 + x2 \overline{q3} q4 + x3 q2 q3 + q1 \overline{q2} q4 + q3 \\ \overline{d2} &= x4 \overline{q1} q2 \overline{q3} \overline{q4} + x4 \overline{q2} \overline{q3} q4 + x4 q1 q2 + q1 q2 q4 + q1 q2 q2 q4 \\ \overline{d3} &= x1 \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} \overline{q4} + x4 \overline{q1} q2 \overline{q3} \overline{q4} + x4 \overline{q2} \overline{q3} q4 + x2 q3 q4 + x4 q1 \overline{q2} \\ \overline{d4} &= x1 \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} \overline{q4} + x2 x3 q3 q4 + x3 q2 q3 + q1 q2 + q2 q4 \end{aligned}$$

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

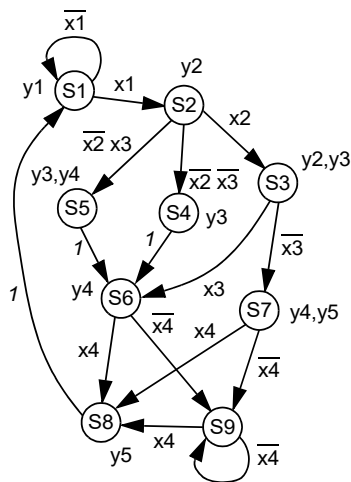
väljund-funktsioon

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



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
espresso väljund

```
.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
```

```
siirde-funktsioon
.v 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

<pre>.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</pre>	<p>siirde-funktsioon</p> $j1 = x2 \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} \overline{q4} + q3 \overline{q4}$ $k1 = \overline{x3} \overline{q1} \overline{q4} + \overline{q3} \overline{q4}$ $j2 = \overline{x2} \overline{x3} \overline{q1} \overline{q2} \overline{q4} + \overline{x3} \overline{q1} \overline{q4} + q3$ $k2 = \overline{q3} \overline{q4}$ $j3 = \overline{x2} \overline{x3} \overline{q1} \overline{q2} \overline{q4} + \overline{x2} \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} \overline{q4} + \overline{q3} \overline{q4}$ $k3 = \overline{x4} \overline{q4}$ $j4 = \overline{x1} \overline{q2} \overline{q3}$ $k4 = \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3}$	<pre>.i 4 .o 5 #.phase 00010 0-1- 00010 000- 00101 -11- 00001 -01- 11010 ---0 01100 ---1 10001 -1-- 11000 .e</pre> <p>väljund-funktsioon</p> $\overline{y1} = \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q4} + q2$ $\overline{y2} = \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q4} + q2$ $\overline{y3} = \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} + \overline{q4}$ $\overline{y4} = \overline{q1} \overline{q3} + \overline{q2} \overline{q3}$ $\overline{y5} = \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3} + q2 \overline{q3} + q4$
---	---	--

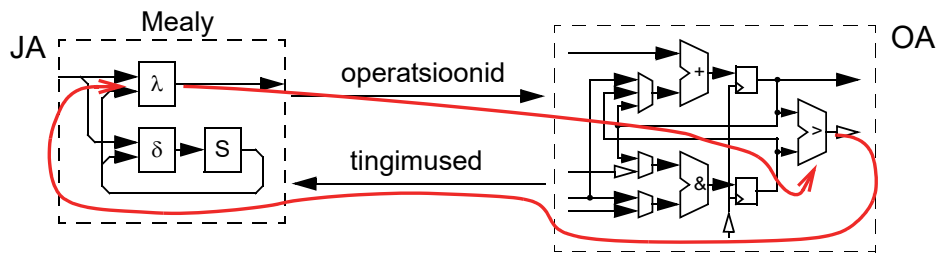


Olekute kodeerimise olulisus – võrdlus

Automaat	Kodeering #1	Kodeering #2	Kodeering #3
x s s+ y	"loendur"	D-trigeri heuristika	<u>1,2,3,4,5,6</u>
0 1 4 0			1,6,2,5,3,4
1 1 3 0			
0 2 6 0	1:000 2:001	1: 1 2: 2	1:110 2:010
1 2 3 0	3:010 4:011	3: 3 4: 3	3:100 4:000
0 3 5 0	5:100 6:101	5: 2 6: 1	5:001 6:010
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 ----	
			$y = \overline{q1} \overline{q2} \overline{q3}$
			$d_1 = \overline{x} \overline{q1} + x q_1$
			$d_2 = \overline{x} q_3$
			$d_3 = \overline{q2} \overline{q3}$

Mealy või Moore?

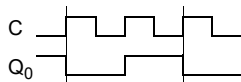
- **Mealy**
 - vähem olekuid → vähem mälulemente
 - keerulisemad väljundfunktsioonid
 - puhverdamata väljundid → asünkroonse tagasiside oht
- **Moore**
 - rohkem olekuid → rohkem mälulemente
 - lihtsamad väljundfunktsioonid
 - "puhverdatud" väljundid



Loendur kui automaat ...

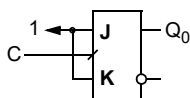
- Loendur – primitiivne generaator – $S \neq \emptyset, I = \emptyset, O = \emptyset (O \equiv S), \delta: S \rightarrow S, \lambda \equiv \emptyset$

2-nd loendur
Jada – 0, 1

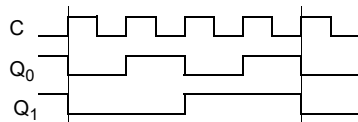


s_t	s_{t+1}	JK_{t+1}
0	1	1-
1	0	-1

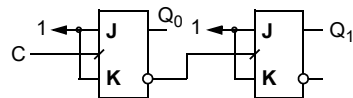
J=K=1



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	-01-
11	00	-1-1

$J_0=K_0=1$

$J_1=K_1=Q_0$

