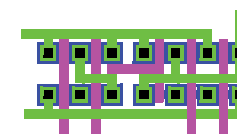
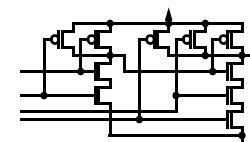
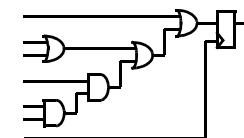
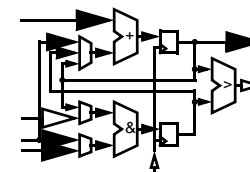
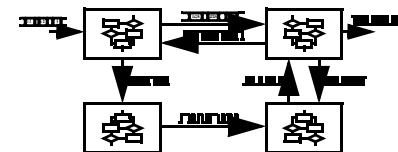


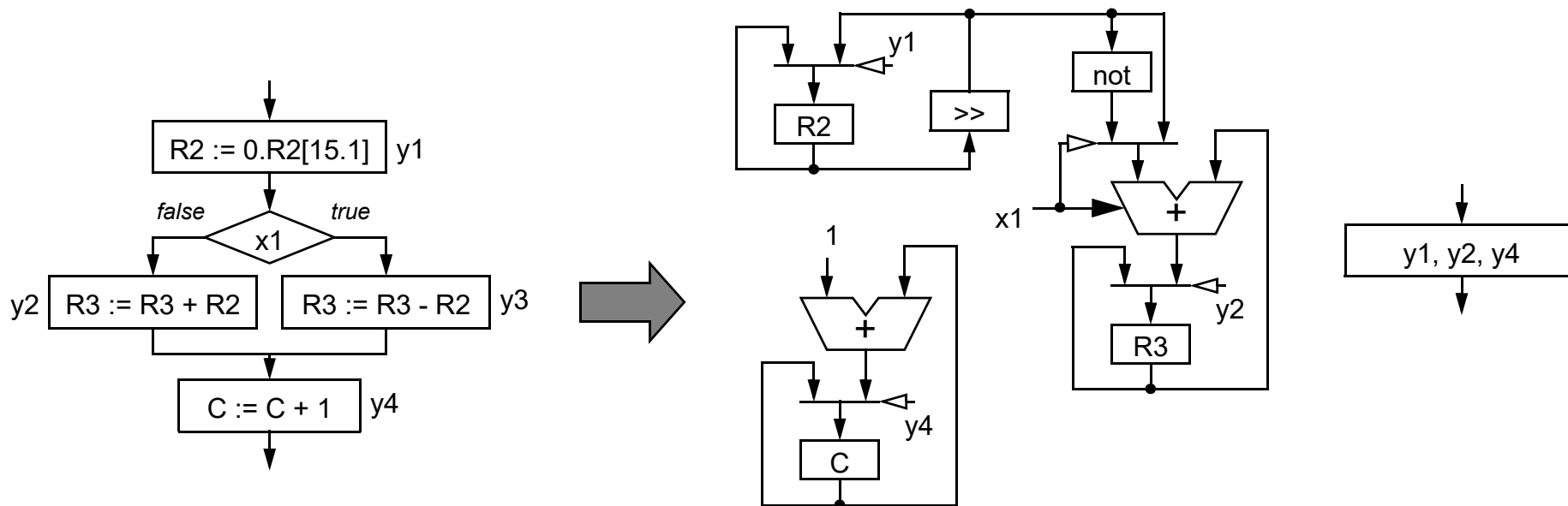
Digitaalsüsteemide struktuuri optimeerimine

- **Süsteemi disain – System design**
a.k.a. Arhitektuuri süntees – Architectural-level synthesis
 - Süsteemi taseme süntees
 - tükeldamine & liideste süntees
 - Kõrgtaseme süntees
 - planeerimine, eraldamine & sidumine
- **Loogikadisain – Logic Design**
 - Registersiirete taseme süntees
 - andme- & juhtosa süntees
 - Loogikataseme süntees
 - loogika minimeerimine & optimeerimine
- **Füüsiline disain – Physical design**
a.k.a. Geomeetria süntees – Geometrical-level synthesis
 - Füüsikalise taseme süntees
 - teisendus loogikaelementideks
 - paigaldamine & trasseerimine/ruutimine



Realisatsiooni optimaalsus?

- operatsiooni hind riistvaras
 - nihutamine == traatide teisiti viimine
 - liitmist ja lahutamist teostab sama seade – summaator (+ülekanne)
- sõltumatud operatsioonid võib täita korraga
 - tegelike andmesõltuvuste analüüs – nt. R2 nihutamise tulemus

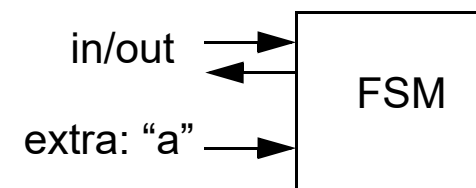
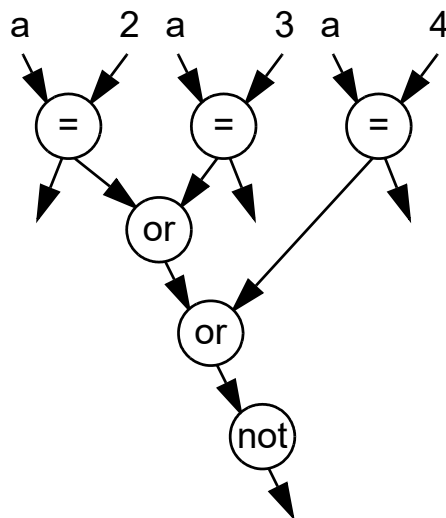


Andmeosa → juhtosa

- Osa operatsioonidest andmeosas teisendatakse operatsioonideks juhtosas
 - võrdlused konstantidega
 - siirdetingimuste avaldised (*if-then-else*, *case*, tsüklid)
 - optimeeritakse koos automaadiga – võib toimuda olekute arvu plahvatuslik kasv

```

case a is
when 2 => ...
when 3 => ...
when 4 => ...
when others => ...
end case;
  
```



```

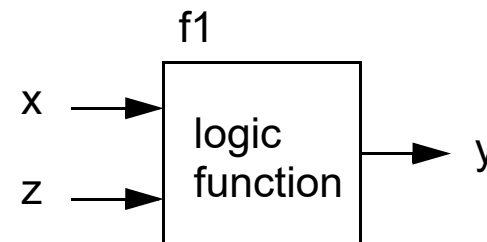
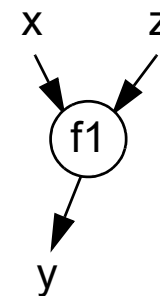
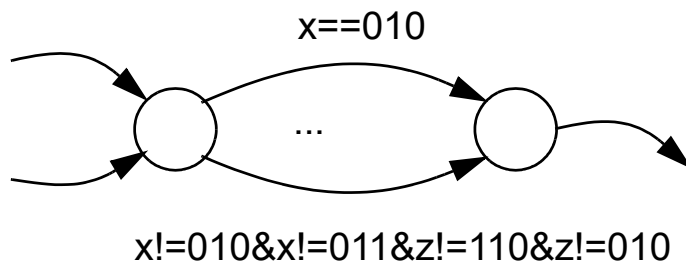
a&state:
010:000
011:000
100:000
.....
  
```

Juhtosa → andmeosa

- Osa operatsioonidest juhtosas teisendatakse operatsioonideks andmeosas
 - siirdetingimuste arvutuste grupeerimine
 - lihtsustab automaadi sünteesi
 - parem (osade) loogikafunktsioonide minimeerimine

```

if x="010" then y:="0110";
elsif x="011" and
      z="110" then y:="0101";
else
  if z="010" then y:="1001";
  else       y:="1100";
  end if;
end if;
  
```



Aritmeetika-operatsioonide realiseerimine

• Summator e. liitja

- poolsummator – $(c_i, o_i) = a_i + b_i$

- $o_i = a_i \oplus b_i$ $c_i = a_i \& b_i$

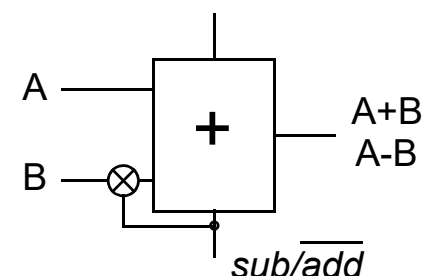
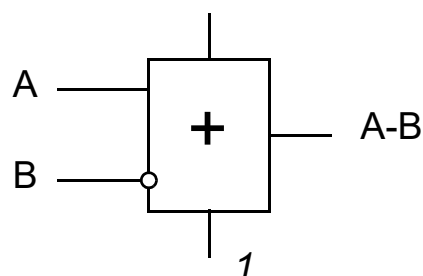
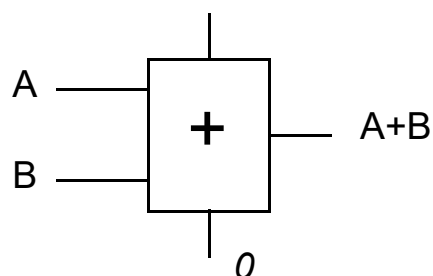
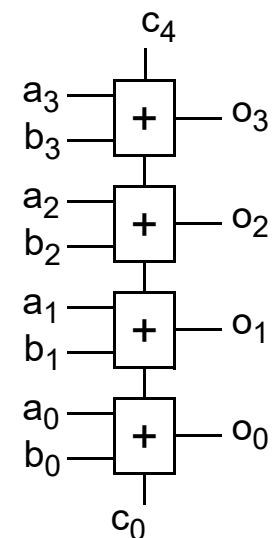
- täis-summator – $(c_i, o_i) = a_i + b_i + c_{i-1}$

- $o_i = a_i \oplus b_i \oplus c_i$ $c_i = (a_i \& b_i) \vee (a_i \& c_{i-1}) \vee (b_i \& c_{i-1})$

• Lahutaja

- täiendkood – $O = A - B = A + \bar{B} + 1$

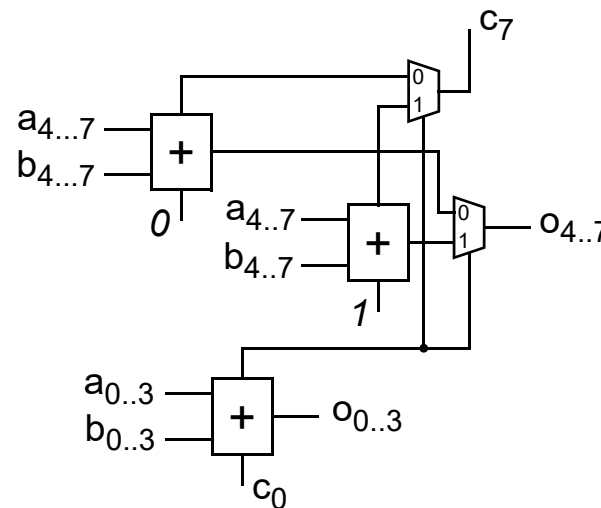
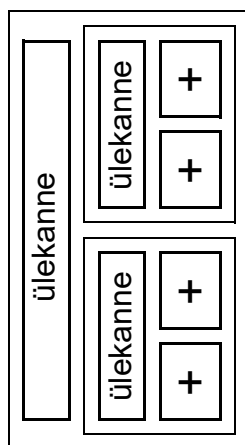
- liitja-lahutaja – $O = n ? (A - B) : (A + B)$



Aritmeetika-operatsioonide realiseerimine

Ülekande kiirendamine

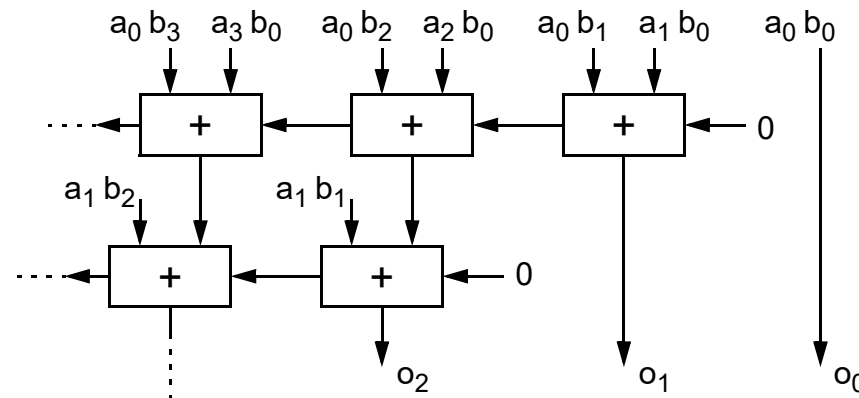
- jagatud gruppideks, grupi sees ülekande eraldi funktsioonina
- “carry-lookahead”
 - “generate” – $g_i = a_i \& b_i$ “propagate” – $p_i = a_i | b_i$ “carry” – $c_i = g_i | (p_i \& c_{i-1})$
 - $g_{i+1} = a_{i+1} \& b_{i+1}$; $p_{i+1} = a_{i+1} | b_{i+1}$; $c_{i+1} = g_{i+1} | (p_{i+1} \& c_i)$
 - $c_{i+1} = g_{i+1} | (p_{i+1} \& (g_i | (p_i \& c_{i-1}))) \dots$
- “carry-select”
 - spekulatiivne arvutus – vanemates järkudes leitakse summa ja ülekande edasi nii 0 kui 1 jaoks, tulemus valitakse multipleksoriga, kui ülekande alt “lõpuks kohale jõuab”



Aritmeetika-operatsioonide realiseerimine

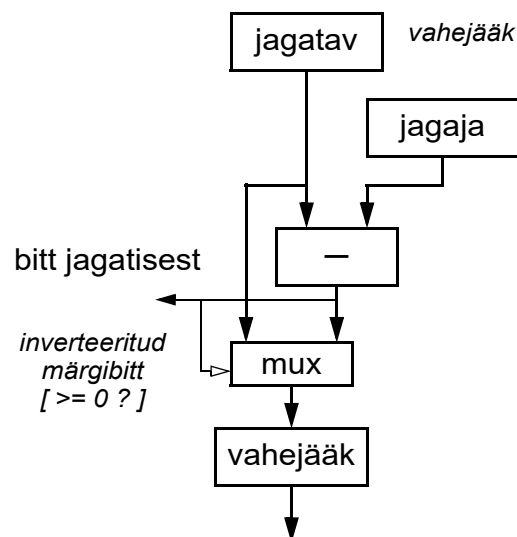
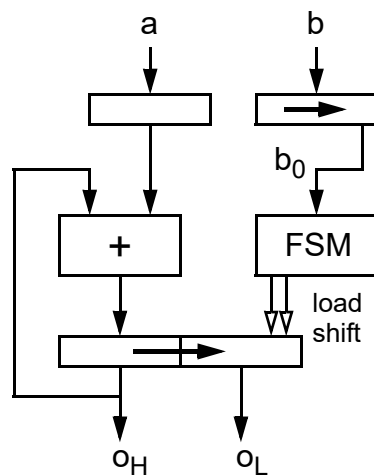
Korrutamine

- $A = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$
- $B = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0$
- $A \cdot B = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) +$
 $a_{n-2} \cdot 2^{n-2} \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) + \dots$
 $a_2 \cdot 2^2 \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) +$
 $a_1 \cdot 2^1 \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) +$
 $a_0 \cdot 2^0 \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) =$
 $a_{n-1} \cdot b_{n-1} \cdot 2^{2 \cdot n - 2} + a_{n-1} \cdot b_{n-2} \cdot 2^{2 \cdot n - 3} + \dots + a_0 \cdot b_2 \cdot 2^2 + a_0 \cdot b_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot b_0 \cdot 2^0$



Aritmeetika-operatsioonide realiseerimine

- **Korrutamine**
 - **paralleelne – kombinatsiooniskeem**
 - $m \cdot n$ bitti – m n -bitist summaatorit ja $m \cdot n$ JA-elementi
 - kombinatsiooniskeem võib olla liiga suure viitega – abiregistrid & konveier (pipeline)
 - **järjestikuline – järk-järgu kaupa tsükliliselt**
 - akumulaator ja juhtautomaat
 - mitu järku korraga – juhtloogika lisaks
- **Jagamine – tavaliselt tsükliliselt – akumulaator, juhtloogika ja juhtautomaat**



<http://www.ecs.umass.edu/ece/koren/arith/simulator/>

Ripple Carry Adder

A: 00101110
B: 01100010

bin • dec

Number of Bits: 8

Signal Delays			
A _i to C _{i+1}	2.2	C _i to C _{i+1}	1.9
C _i to S _i	2.5	A _i to S _i	2.6

Compute

Reset

A 00101110 :46
B +01100010 :98

Sum 10010000 :144

Time taken to generate all Sum bits - (16.1)units
Time taken to generate all Carryout - (15.5)units

Delays to calculate Sum in each bit position

BitNumber	7	6	5	4	3	2	1	0
SumDelay	(16.1)units	(14.2)units	(12.3)units	(10.4)units	(8.5)units	(6.6)units	(4.7)units	(2.6)units

Carry Look Ahead Adder

A: 00101110
B: 01100010

bin • dec

Total Bits: 8 Group Size: 4

Signal Delays			
AND/OR Gate Delay	1.0		
XOR Gate Delay	1.6		
Maximum Fan-in	4		

Compute

Reset

A 00101110 :46
B +01100010 :98

Sum 10010000 :144

Time taken to generate all Sum bits - (10.0)units

2's Complement Array Multiplier

A: 00101
X: 11001

bin • dec

Number of Bits (>2): 5

Signal Delays			
A _i to C _{i+1}	1.5	C _i to C _{i+1}	1.0
C _i to S _i	1.5	A _i to S _i	2.0

Compute

Reset

Help

A 00101 :5
X 11001 :-7

Product 1111011101 :-35

Total Delay for Multiplier =12



Ületäitumine?

- Täiendkood

- 8 bitti: -128...+127
- 125+5=? [130]

```

125  01111101
+   5  00000101
[130] 10000010 == -126

```

- Arvude skaala

```

-1  11111111
    .....
-128 10000000
+127 01111111
    .....
  0  00000000

```

- Ekstra märgibitt

- 00 või 11 – OK

```

  75  001001011
+  15  000001111
[ 90] 001011010

```

```

125  001111101
+   5  000000101
[130] 010000010

```

```

-75  110110101
+ -15 111110001
[-90] 110100110

```

```

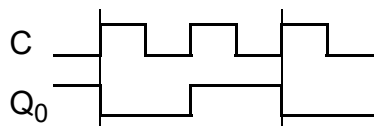
-125 110000011
+  -5 111111011
[-130] 101111110

```

Loendur kui juhtautomaat [#1]

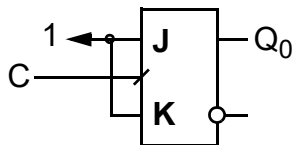
- Loendur – primitiivne generaator – $S \neq \emptyset$, $I = \emptyset$, $O = \emptyset$ ($O \equiv S$), $\delta: S \rightarrow S$, $\lambda \equiv \emptyset$

2-nd loendur
Jada – 0, 1

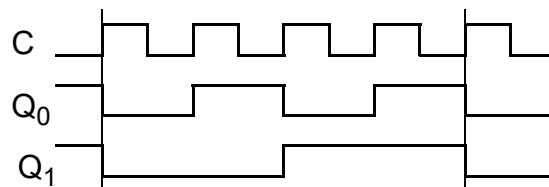


S_t	S_{t+1}	JK_{t+1}
0	1	1-
1	0	-1

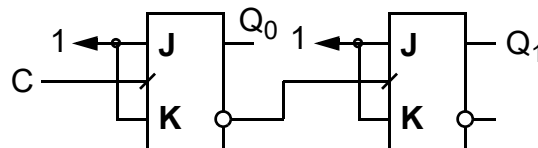
$J=K=1$



4-nd loendur
Jada – 0, 1, 2, 3



Kaks loendurit järjest?

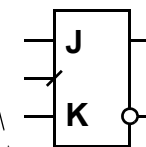


Takti hilistumine!!!

Automaat?

Olekud – 00, 01, 10, 11 [Q1 Q0]

JK-triger

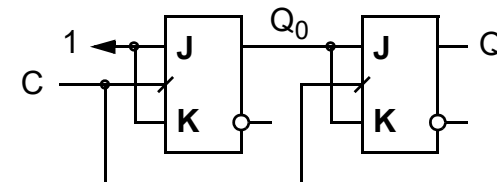


Q_t	Q_{t+1}	J	K
0	0	0	-
0	1	1	-
1	0	-	1
1	1	-	0

S_t	S_{t+1}	JK_{t+1}
00	01	0- 1-
01	10	1- -1
10	11	-0 1-
11	00	-1 -1

$J_0=K_0=1$

$J_1=K_1=Q_0$



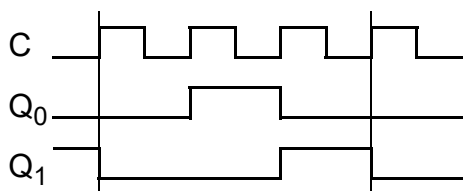


Loendur kui juhtautomaat [#2]

3-nd loendur

Jada – 0, 1, 2

Olekud – 00, 01, 10 [Q1 Q0]



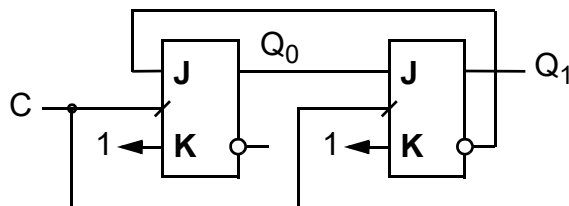
s_t	s_{t+1}	JK_{t+1}
00	01	0- 1-
01	10	1- -1
10	00	-1 0-

	Q_0	Q_0	
J_0	1	-	K_0
Q_1	0	-	-
J_1	0	1	K_1
Q_1	-	-	1

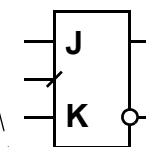
$$K_0 = K_1 = 1$$

$$J_0 = \bar{Q}_1$$

$$J_1 = Q_0$$



JK-triger



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

5-nd loendur

Jada – 0, 1, 2, 3, 4

Olekud – 000, 001, 100, 011, 100 [Q2 Q1 Q0]

s_t	s_{t+1}	JK_{t+1}
000	001	0- 0- 1-
001	010	0- 1- -1
010	011	0- -0 1-
011	100	1- -1 -1
100	000	-1 0- 0-

$$(J_0 = \bar{Q}_2 \quad K_0 = 1)$$

$$J_0 = K_0 = \bar{Q}_2$$

$$J_1 = K_1 = Q_0$$

$$J_2 = Q_1 Q_0 \quad K_2 = 1$$

Loendur kui juhtautomaat [#3]

- Pseudojuhuarvu generaator (LFSR) – 7, 5, 1, 2, 4, 3, 6, 7, 5, ...

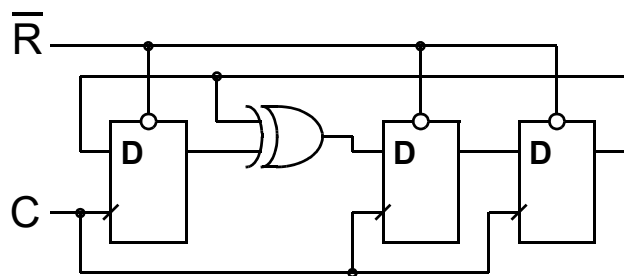
S_t	S_{t+1}	D_{t+1}
111	101	101
101	001	001
001	010	010
010	100	100
100	011	011
011	110	110
110	111	111

$[Q_3 Q_2 Q_1]$

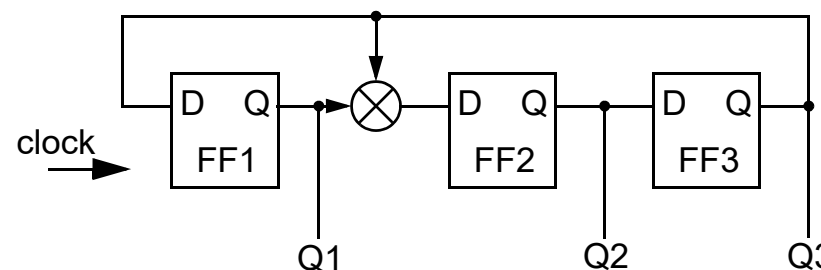
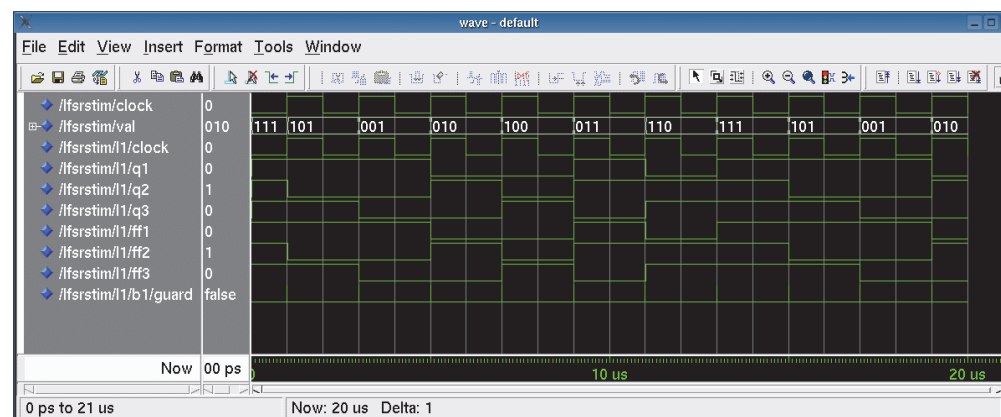
$$D_1 = Q_3$$

$$D_2 = Q_3 \otimes Q_1$$

$$D_3 = Q_2$$

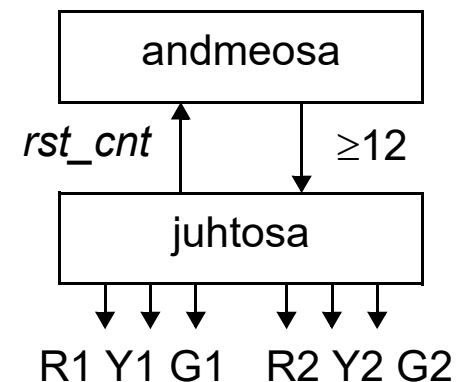


Vrdl. LFSR näidet VHDL-s

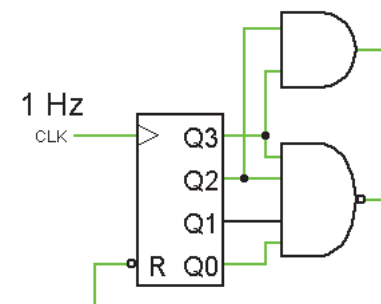


Valgusfoor kui digitaalsüsteem – näide #1

- Digitaalsüsteem – andmeosa + juhtosa
- Kogutsükkel 30 sek., andurid puuduvad
 - roheline 12 sek. punane
 - kollane 3 sek. kollane+punane
 - punane 12 sek. roheline
 - kollane+punane 3 sek. kollane
- Juhtosa – automaat
 - $I = \{<12, \geq 12\}$, $O = \{R1, Y1, G1, R2, Y2, G2, rst_cnt(?)\}$
- Andmeosa – loendur (0...14)
 - $0...14 \rightarrow 4$ bitti (0...15!)
 - asünkroonne nullimine kui loendur == 15 (e. 4-NAND)
 - 12 sek. == 0...11 / 3 sek. == 12...14 e. ≥ 12
 - $\geq 12 == 1100 + 1101 + 1110$ (+1111 määramatusena)
 - $\geq 12 == 11--$ (e. 2-AND)
 - rst_cnt vajalikkus? – sõltub juhtosa “tarkusest”











Andmeosa



<https://ati.ttu.ee/~lrv/IAS0150/tlc-datapath.txt>



Valgusfoor – juhtosa

- roheline 12 sek. punane   cnt=0...11
- kollane 3 sek. kollane+punane   cnt=12...14
- punane 12 sek. roheline   cnt=0...11
- kollane+punane 3 sek. kollane   cnt=12...14

```

while ( !≥12 )           // S1
    set ( G1, R2 );
while ( ≥12 )           // S2
    set ( Y1, Y2, R2 );
while ( !≥12 )         // S3
    set ( R1, G2 );
while ( ≥12 )         // S4
    set ( Y1, R1, Y2 );

```

i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
$!≥12$	S1	S1	G1, R2
$≥12$		S2	
$!≥12$	S2	S3	Y1, Y2, R2
$≥12$		S2	
$!≥12$	S3	S3	R1, G2
$≥12$		S4	
$!≥12$	S4	S1	Y1, R1, Y2
$≥12$		S4	



Valgusfoor – juhtosa

i^t		s^t		s^{t+1}		JK		D	o^t	
$! \geq 12$	0	S1	00	S1	00	0-	0-	00	G1, R2	001 100
≥ 12	1			S2	01	0-	1-	01		
$! \geq 12$	0	S2	01	S3	11	1-	-0	11	Y1, Y2, R2	010 110
≥ 12	1			S2	01	0-	-0	01		
$! \geq 12$	0	S3	11	S3	11	-0	-0	11	R1, G2	100 001
≥ 12	1			S4	10	-0	-1	10		
$! \geq 12$	0	S4	10	S1	00	-1	0-	00	Y1, R1, Y2	110 010
≥ 12	1			S4	10	-0	0-	10		

- Väljundid**

$$Y1 = Y2 = q1 \text{ xor } q2$$

$$R1 = q1$$

$$R2 = q1'$$

$$G1 = q1' q2'$$

$$G2 = q1 q2$$

- JK-trigerid**

$$j1 = i' q2$$

$$k1 = i' q2'$$

$$j2 = i q1'$$

$$k2 = i q1$$

- D-trigerid**

$$d1 = i q1 + i' q2$$

$$d2 = i q1' + i' q2$$

Optimeerimist...

$$i' q2 = (i + q2')'$$

$$k = i + q2'$$

$$d1 = ((i q1)' k)'$$

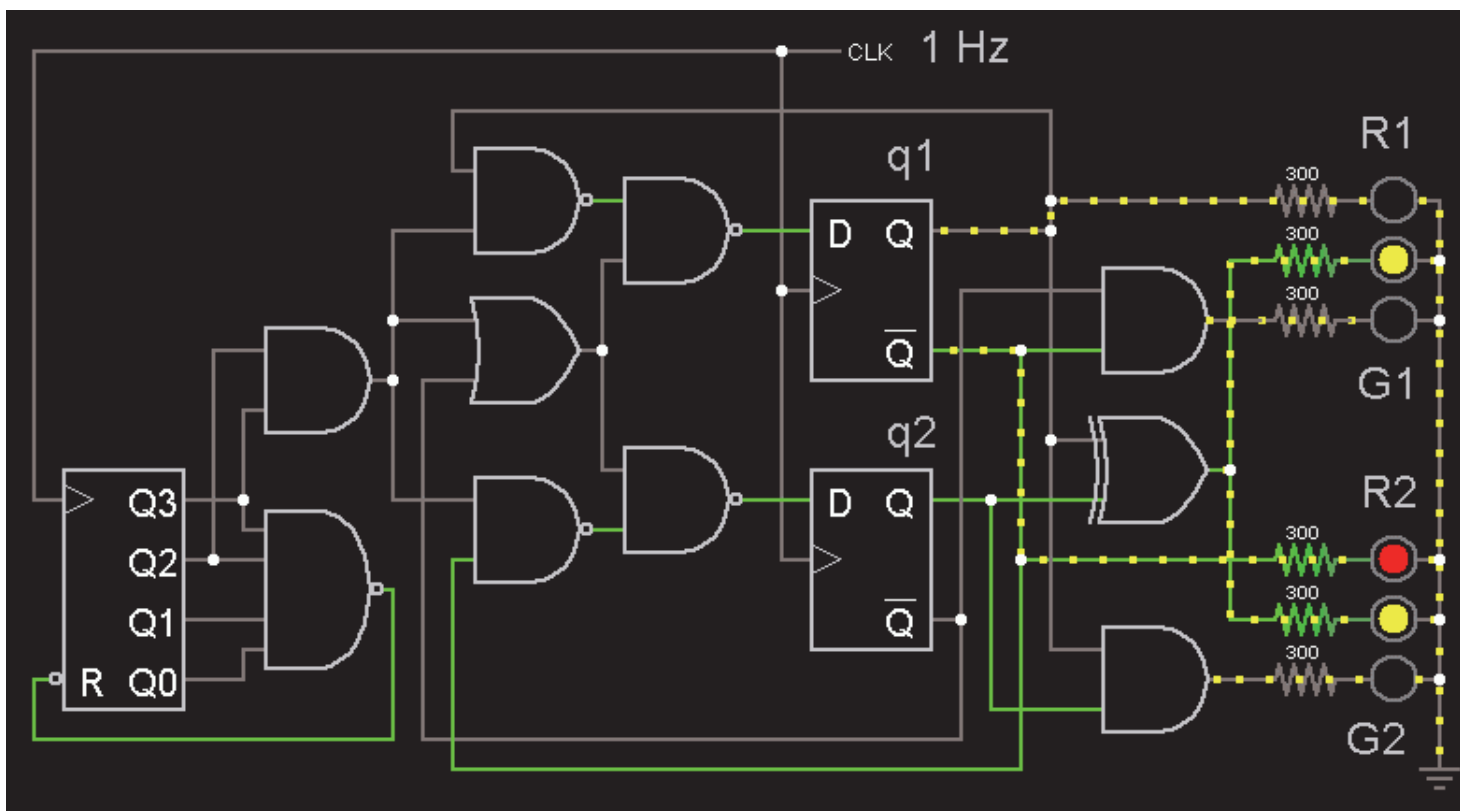
$$d2 = ((i q1')' k)'$$



TTÜ1918



Valgusfoor – tulemus



<https://ati.ttu.ee/~lrv/IAS0150/tlc-applet.txt>



Algoritmi realiseerimine

- **Algoritm kui programm**
 - operatsioonid – andmeosa
 - järjestus ja tingimuse – juhtosa
- **GCD (Greatest Common Divisor) – suurim ühistegur**

```
while ( x != y ) {
    if ( x < y ) y = y - x;
    else      x = x - y;
}
```

- operatsioonid – võrdlused ja lahutamine
- konkreetse operatsiooni realiseerimine?
 - $A < B \iff A - B < 0$ / $A \neq B \iff A - B \neq 0$ – kõike saab teha lahutajaga?!
- sama riistvara kõikidele operatsioonidele või korruga arvutamine?
 - kiirus või suurus? [ja kas see ongi probleem?]

Plokkskeemi genereerimine algoritmist

```

...
a = b + c ;
if ( a < 5 )   x = b ;
else          x = c ;
...
    
```

• Andme-osa

• Muutujad e. registrid

- a (x1), b, c, x

• Operatsioonid e. ALU-d – '+', '<'

- kombinatsioonskeemid
- antud juhul üks liitja

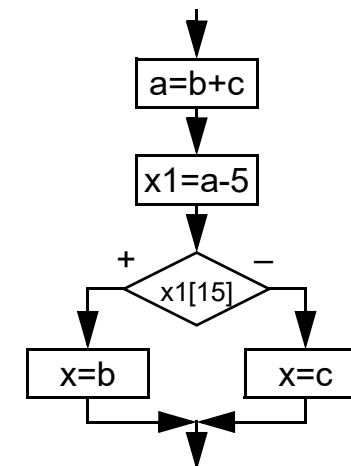
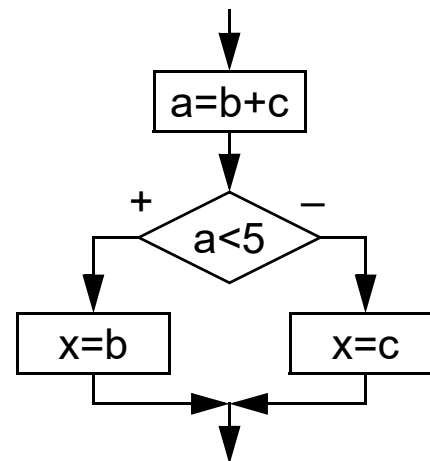
- $a < 5 \equiv a + (-5) < 0$ [märgibitt!]

• Omistamised e. multiplekserid

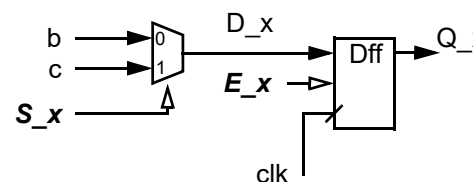
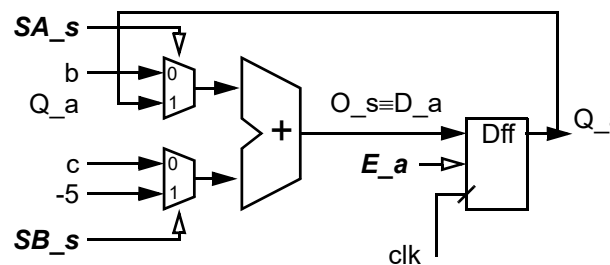
• Juht-osa

• Algoritm

- juhtsignaalid (juht)automaadist
- kontrollsignaalid (juht)automaati



Andmeosa



a=b+c

E_a=1; E_x=0; S_x=*;
SA_s=0; SB_s=0;

x1=a-5

E_a=1; E_x=0; S_x=*;
SA_s=1; SB_s=1;

x=b

E_a=0; E_x=1; S_x=0;
SA_s=*; SB_s=*;

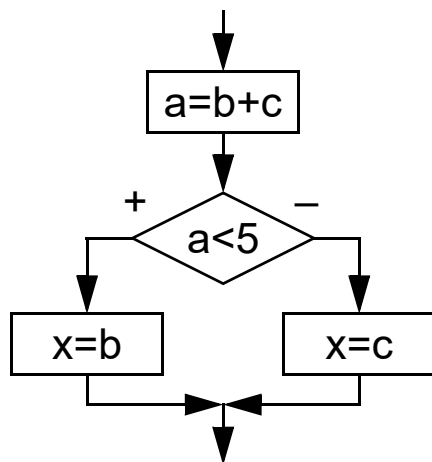
x=c

E_a=0; E_x=1; S_x=1;
SA_s=*; SB_s=*;

Plokkskeem ja juhtautomaadid

```

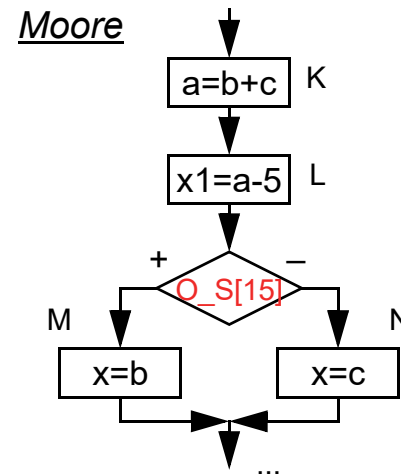
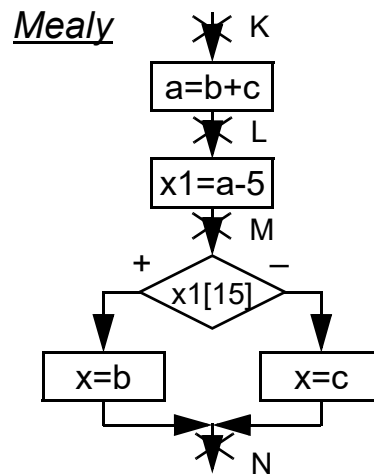
...
a = b + c ;
if ( a < 5 )   x = b ;
else          x = c ;
...
    
```



Mealy: $i^t - x1[15]$ (Q_a[15])

Moore: $i^t - O_s[15]$

$o^t - E_a, E_x, S_x, SA_s, SB_s$



i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
...	...	K
-	K	L	10-00
-	L	M	10-11
0	M	N	011--
1		N	010--
...	N

i^t	s^t	s^{t+1}	o^t
...	...	K
-	K	L	10-00
0	L	N	-0-11
1		M	
-	M	...	010--
-	N	...	011--



Näide #1 – GCD (Greatest Common Divisor)

- Spetsifikatsioon ~ käitumuslik kirjeldus
 - sisendi/väljundi ajastus fikseeritud – juht- ja takt-signaaliid

```
process -- gcd-bhv.vhdl
  variable x, y: unsigned(15 downto 0);
begin
  -- Wait for the new input data
  wait on clk until clk='1' and rst='0';
  x := xi;    y := yi;    rdy <= '0';
  wait on clk until clk='1';
  -- Calculate
  while x /= y loop
    if x < y then y := y - x;
    else          x := x - y;    end if;
  end loop;
  -- Ready
  xo <= x;    rdy <= '1';
  wait on clk until clk='1';
end process;
```

Probleemid

- tsüklis puudub takt
- keerukas “wait” käsk
(- mitu “wait” käsku)

Mida proovida?

- erinevad süntesaatorid
- suuruse minimeerimine
- kiiruse tõstmine

Tehnoloogiad – ASIC, FPGA

VHDL kood & testpingid

<https://ati.ttu.ee/~lrv/gcd/>



GCD – sünteesitav kood?

- Takteeritud käitumuslik stiil

```
process -- gcd-bhvc.vhdl
  variable x, y: unsigned(15 downto 0);
begin
  -- Wait for the new input data
  while rst = '1' loop
    wait on clk until clk='1';
  end loop;
  x := xi;    y := yi;    rdy <= '0';
  wait on clk until clk='1';
  -- Calculate
  while x /= y loop
    if x < y then y := y - x;
    else        x := x - y;    end if;
    wait on clk until clk='1';
  end loop;
  -- Ready
  xo <= x;    rdy <= '1';
  wait on clk until clk='1';
end process;
```

ASIC: sünteesitav

961 e.g. / 20.0 ns

2 lahutajat, 2 võrdlejat

FPGA: mitte-sünteesitav

“wait” käsud tsüklis :(

juhtautomaat vajalik :(:(

Võimalikud valikud

- funktsioonide jagamine

- universaalsed funktsioonid

- spekulatiivne arvutamine



GCD – käitumuslik automaat (behavioral FSM)

```
process begin -- gcd-bfsm.vhdl
  wait on clk until clk='1';
  case state is
  -- Wait for the new input data
  when S_wait =>
    if rst='0' then
      x<=xi; y<=yi; rdy<='0'; state<=S_start;
    end if;
  -- Calculate
  when S_start =>
    if x /= y then
      if x < y then y <= y - x;
      else x <= x - y; end if;
      state<=S_start;
    else
      xo<=x; rdy<='1'; state<=S_ready;
    end if;
  -- Ready
  when S_ready => state<=S_wait;
  end case;
end process;
```

ASIC: sünteesitav

911 e.g. / 19.4 ns

2 lahutajat, 2 võrdlejat

FPGA: sünteesitav

108 SLC / 9.9 ns

2 lahutajat, 2 võrdlejat

Kas saab teha paremaks?

Jälle need võimalikud valikud

- funktsioonide jagamine

üks operatsioon taktis

- universaalsed funktsioonid

$A < B == A - B < 0$ / $A /= B == A - B /= 0$

- spekulatiivne arvutamine

lahutamine enne otsustamist

GCD – universaalsed funktsioonid?

- $A < B == A - B < 0$ / $A = B == A - B = 0$

-- Three operations:

-- subtraction, and

-- comparisons not-equal &

-- less-than

`xo <= xi - yi;`

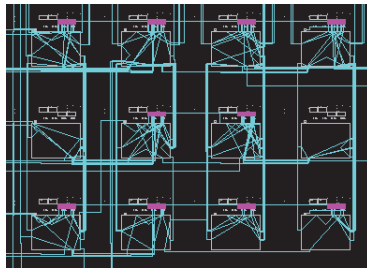
`ne <= '1' when xi /= yi else '0';`

`lt <= '1' when xi < yi else '0';`

ASIC: 209 e.g. / 19.9 ns

FPGA: 20 SLC / 12.1 ns

kolm liitjat!



-- ALU - subtracting and then comparing

`x_out <= xi - yi; xo <= x_out;`

`process (x_out)`

`variable or_tmp: unsigned(15 downto 0);`

`begin`

`or_tmp(15) := x_out(15);`

`for i in 14 downto 0 loop`

`or_tmp(i) := or_tmp(i+1) or x_out(i);`

`end loop;`

`ne <= to_bit(or_tmp(0));`

`end process;`

`lt <= to_bit(x_out(15));`

ASIC: 148 e.g. / 21.8 ns / FPGA: 12 SLC / 14.6 ns





GCD – disainiruumi uurimine

- Erinevad lahendused – <https://ati.ttu.ee/~lrv/gcd/>
 - gcd-bhv.vhdl – puhas käitumuslik kirjeldus, mitte-sünteesitav
 - gcd-bhvc.vhdl – takteeritud käitumuslik kirjeldus, osad süntesaatorid OK
 - gcd-bfsm.vhdl – nn. käitumuslik automaat (automaat & käitumuslik andmetee), sünteesitav (aga kui efektiivne see on?)
 - gcd-rtl1.vhdl – üks ALU, 3 takti iteratsiooni kohta –
1) “pole võrdne?”, 2) “väiksem kui?”, 3) lahutaja

```
#1#    a=x-y;    a!=0 ? #2# : #ready#  
#2#    a=x-y;    a<0 ? #3# : #4#  
#3#    y=y-x    /    #4#    x=x-y
```

- gcd-rtl2.vhdl – üks ALU, 2 takti iteratsiooni kohta –
1) “pole võrdne?” ja “väiksem kui?”, 2) lahutaja

```
#1#    a=x-y;    a!=0 ? ( a<0 ? #2# : #3# ) : #ready#  
#2#    y=y-x    /    #3#    x=x-y
```



GCD – disainiruumi uurimine (2)

- Erinevad lahendused – <https://ati.ttu.ee/~lrv/gcd/>
 - gcd-rtl3.vhdl – võrdleja (väiksem kui) kontrollib lahutajat, 1 takt iteratsiooni kohta – väike kuid aeglane (jadamisi) andmetee


```
#1#    x<y ? y=y-x : ( a=x-y;    a!=0 ? x=x-y : #ready# )
```
 - gcd-rtl4.vhdl – spekulatiiv arvutamine – mõlemad lahutamised tehakse kõigepealt, siis toimub otsustamine (üks lahutaja võrdleb “väiksem kui”, teine “pole võrdne”)


```
#1#    a1=x-y;    a2=y-x;    a2!=0 ? ( a1<0 ? y=a2 : x=a1 ) : #ready#
```
 - gcd-rtl5.vhdl – spekulatiiv arvutamine – mõlemad lahutamised tehakse kõigepealt, siis toimub otsustamine (üks lahutaja võrdleb “väiksem kui”, kuid eraldi “pole võrdne”)


```
#1#    a1=x-y;    a2=y-x;    x!=y ? ( a1<0 ? y=a2 : x=a1 ) : #ready#
```



GCD – üksik ALU, 2 takti iteratsiooni kohta

gcd-rtl2.vhdl

```
-- Next state function of the FSM
process (state, rst, alu_ne, alu_lt) begin
  ena_x <= '0';      ena_y <= '0';      ena_r <= '0';
  set_rdy <= '0';   xi_yi_sel <= '0';   sub_y_x <= '0';
  next_state <= state;
  case state is
  when S_wait =>      -- Wait for the new input data
    if rst='0' then
      xi_yi_sel <= '1';  ena_x <= '1';  ena_y <= '1';
      next_state <= S_start;
    end if;
  when S_start =>    -- Loop: ready?
    if alu_ne='1' then
      if alu_lt='1' then  next_state <= S_sub_y_x;
      else  next_state <= S_sub_x_y;  end if;
    else  next_state <= S_ready;
    end if;
  when S_sub_y_x =>  -- Loop: y-x
    ena_y <= '1';  sub_y_x <= '1';
    next_state <= S_start;
  when S_sub_x_y =>  -- Loop: x-y
    ena_x <= '1';  sub_y_x <= '0';
    next_state <= S_start;
  when S_ready =>   -- Ready
    ena_r <= '1';  set_rdy <= '1';
    next_state <= S_wait;
  end case;
end process;

-- ALU: subtract / less-than / not-equal
alu_o <= alu_1 - alu_2;
alu_lt <= to_bit(alu_o(15));
process (alu_o)
  variable or_tmp: unsigned(15 downto 0);
begin
  or_tmp(15) := alu_o(15);
  for i in 14 downto 0 loop
    or_tmp(i) := or_tmp(i+1) or alu_o(i);
  end loop;
  alu_ne <= to_bit(or_tmp(0));
end process;

-- Multiplexers
x_i <= xi when xi_yi_sel='1' else alu_o;
y_i <= yi when xi_yi_sel='1' else alu_o;
alu_1 <= y when sub_y_x='1' else x;
alu_2 <= x when sub_y_x='1' else y;

-- Registers
process begin
  wait on clk until clk='1';
  state <= next_state;
  if ena_x='1' then  x <= x_i;  end if;
  if ena_y='1' then  y <= y_i;  end if;
  if ena_r='1' then  xo <= x;  end if;
  rdy <= set_rdy;
end process;
```



GCD – komparaator+lahutaja, 1 takt

gcd-rtl3.vhdl

```
-- Next state function of the FSM
process (state, rst, alu_ne) begin
  ena_xy <= '0';   ena_r <= '0';
  set_rdy <= '0';  xi_yi_sel <= '0';
  next_state <= state;
  case state is
  when S_wait =>    -- Wait for the new input data
    if rst='0' then
      xi_yi_sel <= '1';   ena_xy <= '1';
      next_state <= S_start;
    end if;
  when S_start =>  -- Calculate
    if alu_ne='1' then
      ena_xy <= '1';   next_state <= S_start;
    else
      ena_r <= '1';   set_rdy <= '1';
      next_state <= S_ready;
    end if;
  when S_ready => -- Ready
    ena_r <= '1';   set_rdy <= '1';
    next_state <= S_wait;
  end case;
end process;

-- Comparator (less-than)
sub_y_x <= '1' when x < y else '0';

-- Subtractor (+not-equal)
alu_o <= alu_1 - alu_2;
process (alu_o)
  variable or_tmp: unsigned(15 downto 0);
begin
  or_tmp(15) := alu_o(15);
  for i in 14 downto 0 loop
    or_tmp(i) := or_tmp(i+1) or alu_o(i);
  end loop;
  alu_ne <= to_bit(or_tmp(0));
end process;

-- Multiplexers
x_i <= xi when xi_yi_sel='1' else alu_o;
y_i <= yi when xi_yi_sel='1' else alu_o;
alu_1 <= y when sub_y_x='1' else x;
alu_2 <= x when sub_y_x='1' else y;
ena_x <= '1' when (sub_y_x='0' and ena_xy='1') or
                 xi_yi_sel='1' else '0';
ena_y <= '1' when (sub_y_x='1' and ena_xy='1') or
                 xi_yi_sel='1' else '0';

-- Registers
process begin
  wait on clk until clk='1';
  state <= next_state;
  if ena_x='1' then x <= x_i;   end if;
  if ena_y='1' then y <= y_i;   end if;
  if ena_r='1' then xo <= x;   end if;
  rdy <= set_rdy;
end process;
```



GCD – spekuleeriv arvutamine (2 lahutajat)

gcd-rtl5.vhdl

```
-- Next state function of the FSM
process (state, rst, alu_ne) begin
  ena_xy <= '0';      ena_r <= '0';
  set_rdy <= '0';    xi_yi_sel <= '0';
  next_state <= state;
  case state is
  -- Wait for the new input data
  when S_wait =>
    if rst='0' then
      xi_yi_sel <= '1';    ena_xy <= '1';
      next_state <= S_start;
    end if;
  -- Calculate
  when S_start =>
    if alu_ne='1' then
      ena_xy <= '1';
      next_state <= S_start;
    else
      ena_r <= '1';      set_rdy <= '1';
      next_state <= S_ready;
    end if;
  -- Ready
  when S_ready =>
    ena_r <= '1';      set_rdy <= '1';
    next_state <= S_wait;
  end case;
end process;

-- Subtractor (x-y) / comparator (x<y)
alu_o1 <= x - y;
sub_y_x <= '1' when alu_o1(alu_o1'high)='1' else '0';

-- Subtractor (y-x)
alu_o2 <= y - x;

-- Comparator (y/=x)
alu_ne <= '1' when x /= y else '0';

-- Multiplexers
x_i <= xi when xi_yi_sel='1' else alu_o1;
y_i <= yi when xi_yi_sel='1' else alu_o2;
ena_x <= '1' when (sub_y_x='0' and ena_xy='1') or
  xi_yi_sel='1' else '0';
ena_y <= '1' when (sub_y_x='1' and ena_xy='1') or
  xi_yi_sel='1' else '0';

-- Registers
process begin
  wait on clk until clk='1';
  state <= next_state;
  if ena_x='1' then    x <= x_i;    end if;
  if ena_y='1' then    y <= y_i;    end if;
  if ena_r='1' then    xo <= x;    end if;
  rdy <= set_rdy;
end process;
```



GCD – sünteeside tulemused

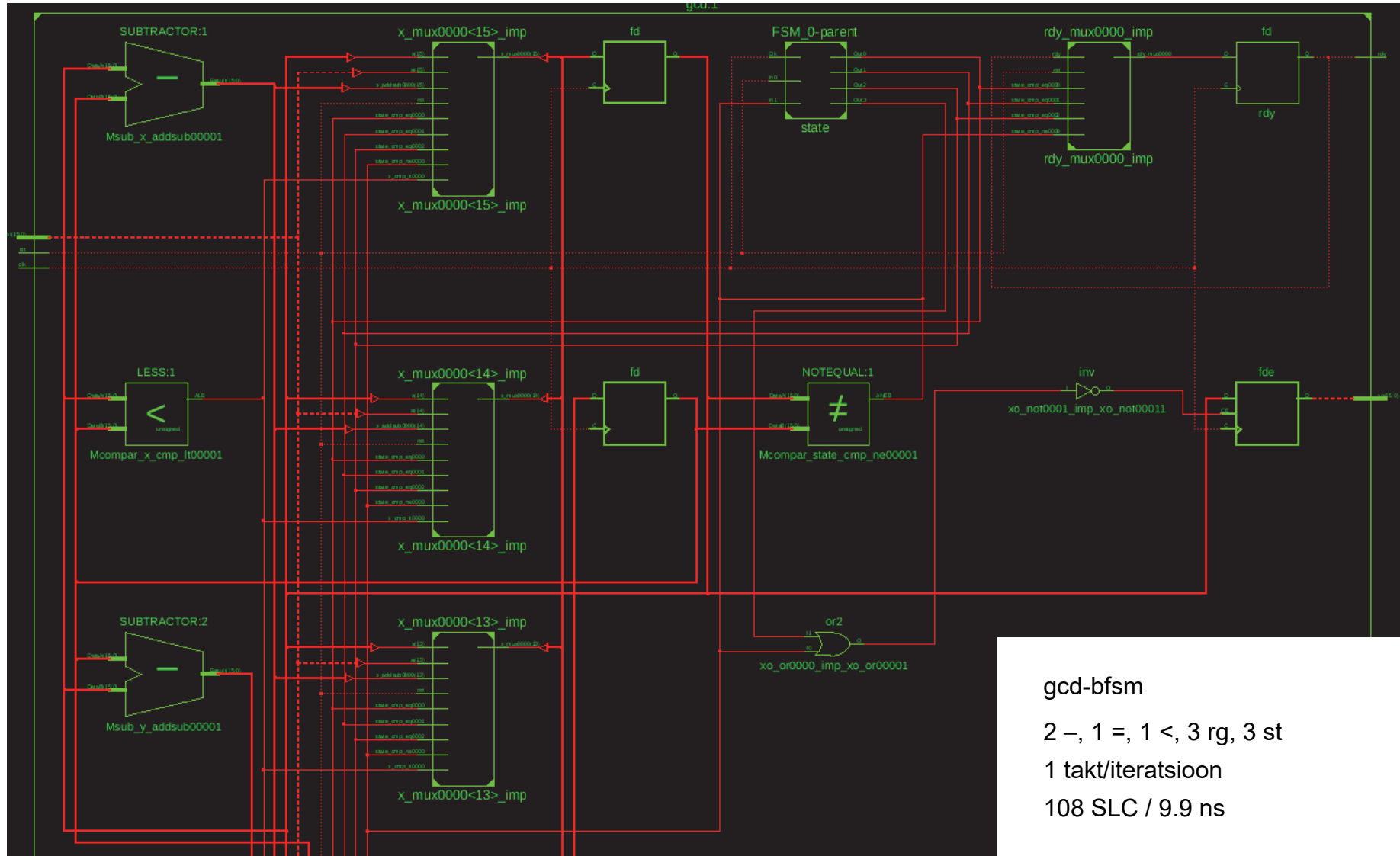
Tehnoloogia		FPGA				ASIC			
Piirangud ¹⁾		50 MHz		100 MHz		50 MHz		25 MHz	
	clk / FU	[SLC]	[ns]	[SLC]	[ns]	[e.g.]	[ns]	[e.g.]	[ns]
<i>gcd-bhv²⁾</i>	? / ?	93	17.3	-	-	1141	20.0	-	-
gcd-bhvc	1 / 2+2	-	-	-	-	961	20.0	977	31.1
gcd-bfsm	1 / 2+2	108	9.9	108	9.4	911	19.4	984	30.8
gcd-rtl1	3 / 1	50	10.8	50	9.7	986	19.8	883	32.4
gcd-rtl2	2 / 1	48	10.8	48	10.0	931	19.9	882	32.3
gcd-rtl3	1 / 1+1	58	17.0	58	14.6	1134	20.0	928	40.0
gcd-rtl4	1 / 2	78	12.6	78	9.0	976	19.9	928	29.0
gcd-rtl5	1 / 2+1	58	8.0	58	7.6	915	20.0	932	26.9

1) Taktiperiood oli ainuke piirang

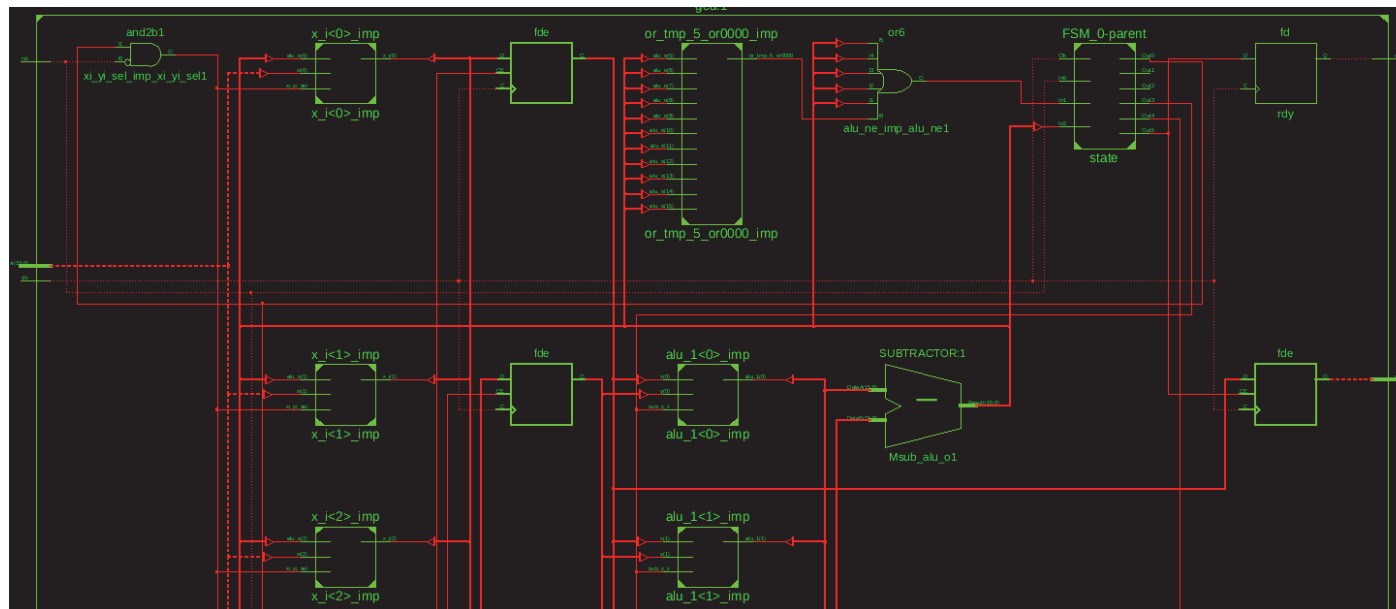
2) gcd-bhv sünteesiti prototüüp kõrgtasemesüntesaatoriga xTractor



GCD – kust tulevad need erinevused?



GCD – kust tulevad need erinevused?

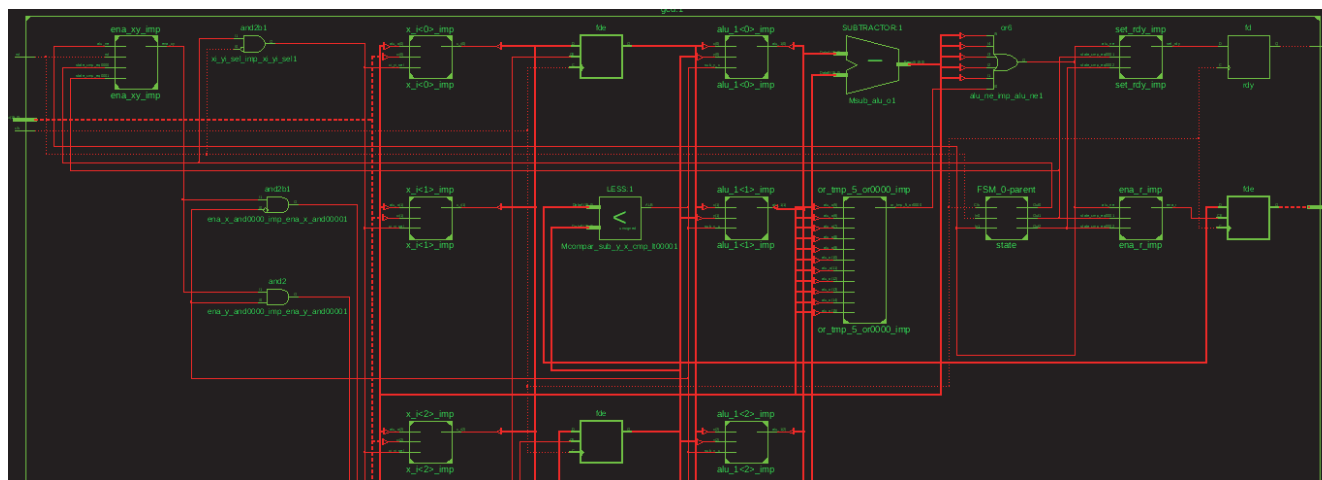


gcd-rtl1

1 ALU, 3 rg, 6 st
3 takti/iteratsioon
50 SLC / 10.8 ns

gcd-rtl2

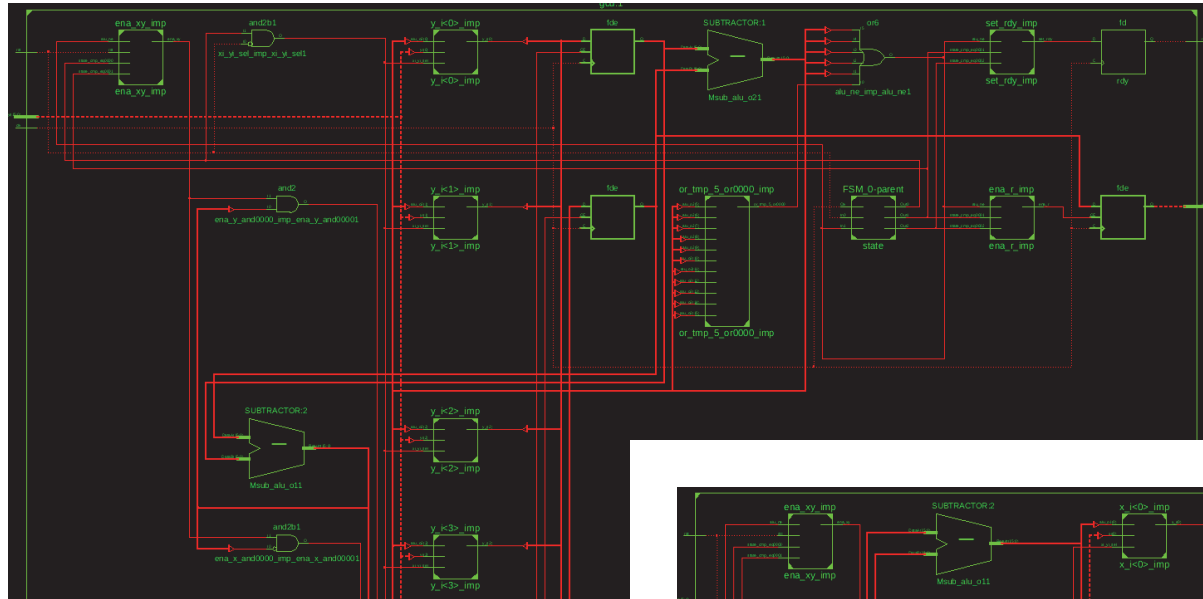
1 ALU, 3 rg, 5 st
2 takti/iteratsioon
48 SLC / 10.8 ns



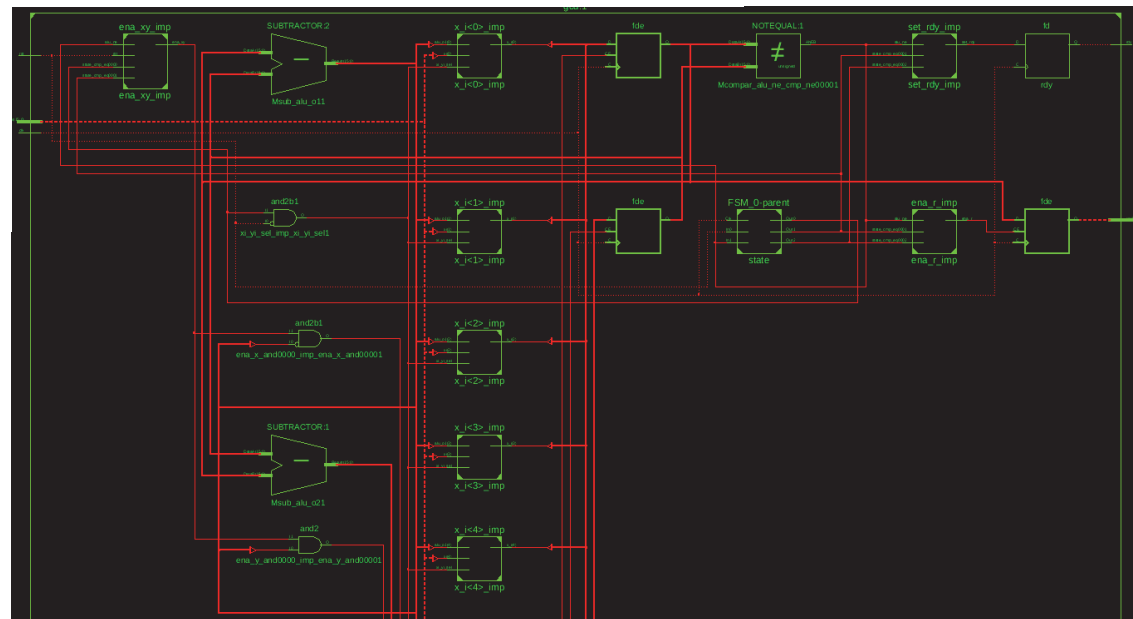
gcd-rtl3

1 =, 1 <, 3rg, 3st
1 takt/iteratsioon
58 SLC / 17.0 ns

GCD – kust tulevad need erinevused?



gcd-rtl4
 2 –, 3 rg, 3 st
 1 takt/iteratsioon
 78 SLC / 12.6 ns



gcd-rtl5
 2 –, 1 /=, 3 rg, 3 st
 1 takt/iteratsioon
 58 SLC / 8.0 ns

Realisatsiooni näide #2 – täisarvude korrutamine

- Märgita täisarvude korrutamine, 2-bitti korruga (radix-4)
- $o = a * b$
 - ... + [0,1,2,3]*b $\rightarrow 3*b = 4*b - b$
 - samm, kui eelmine bitipaar ei olnud '11'
 - $b_{10}=00$? \rightarrow ei midagi
 - $b_{10}=01$? $\rightarrow o+=a$
 - $b_{10}=10$? $\rightarrow o+=2*a$ [$o+=(a<<1)$]
 - $b_{10}=11$? $\rightarrow o-=a$ [ja jätame meelde]
 - samm, kui eelmine bitipaar oli '11'
 - $b_{10}=00$? $\rightarrow o+=a$ [$4-1==3$]
 - $b_{10}=01$? $\rightarrow o+=2*a$ [$2==1+1$]
 - $b_{10}=10$? $\rightarrow o-=a$ [$3==2+1$, jälle meelde]
 - $b_{10}=11$? \rightarrow ei midagi [$4==3+1$, jälle meelde]

Korrutamine 2 kohaga

00 - blok.

01 - $1*Rg1$

10 - $2*Rg1$ ($L1(Rg1)$)

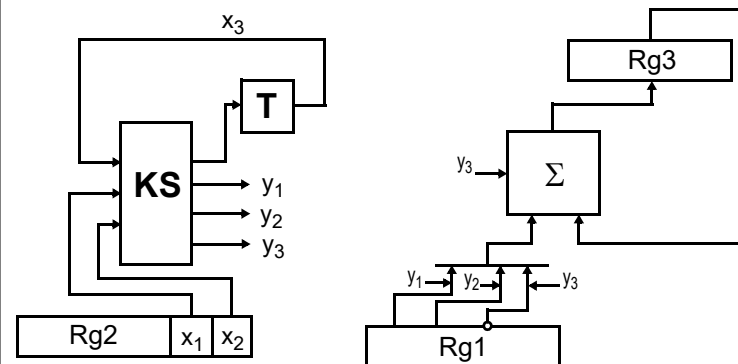
11 - $-Rg1$; +1 järgmisesse järku

$$11_2 = 100 - 1 = 10\bar{1}$$

N: 0,01101101



0,100 $\bar{1}$ 0 $\bar{1}$ 01



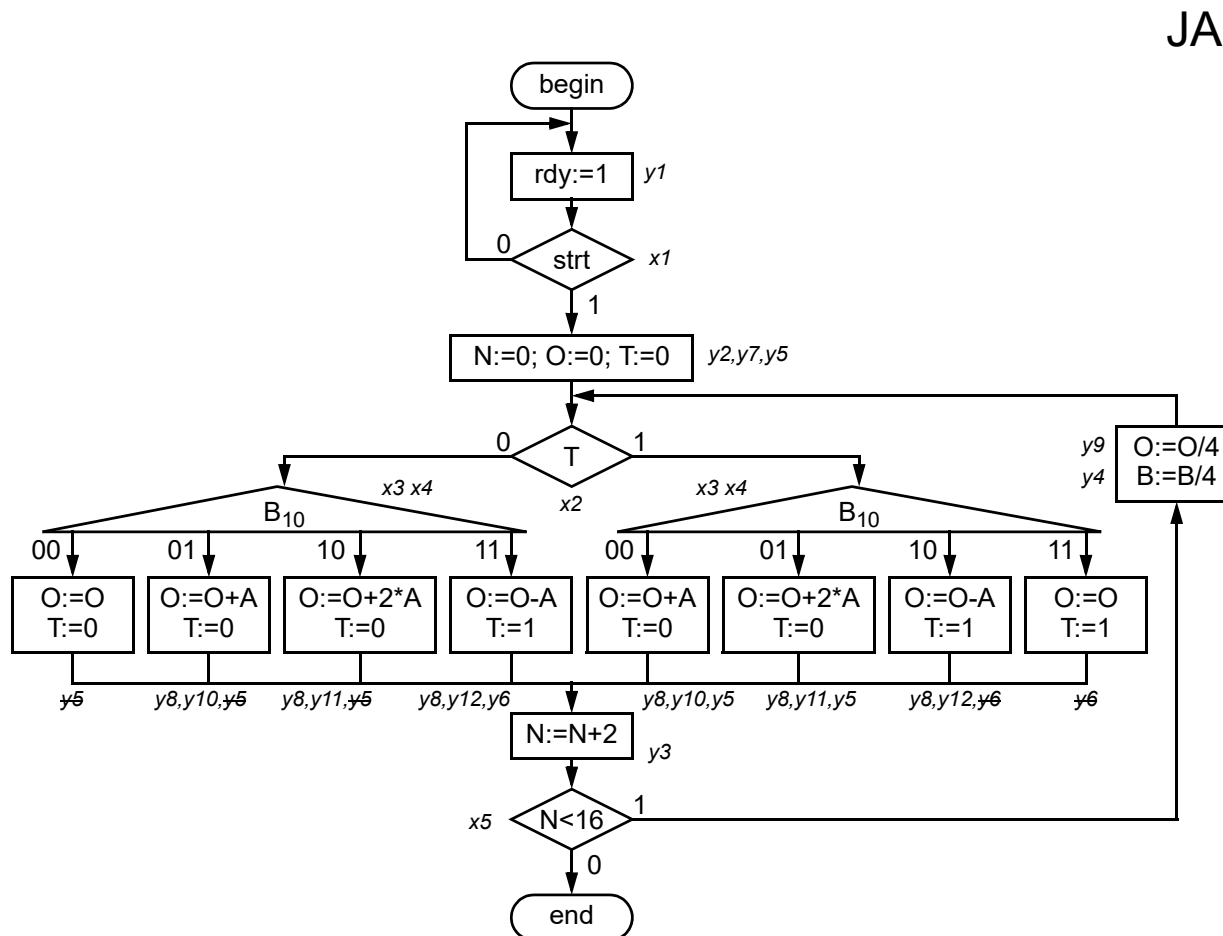
y1: $Rg3 := Rg3 + Rg1$

y2: $Rg3 := Rg3 + L1(Rg1)$

y3: $Rg3 := Rg3 - Rg1$

Margus Kruus: Korrutusalgoritmid

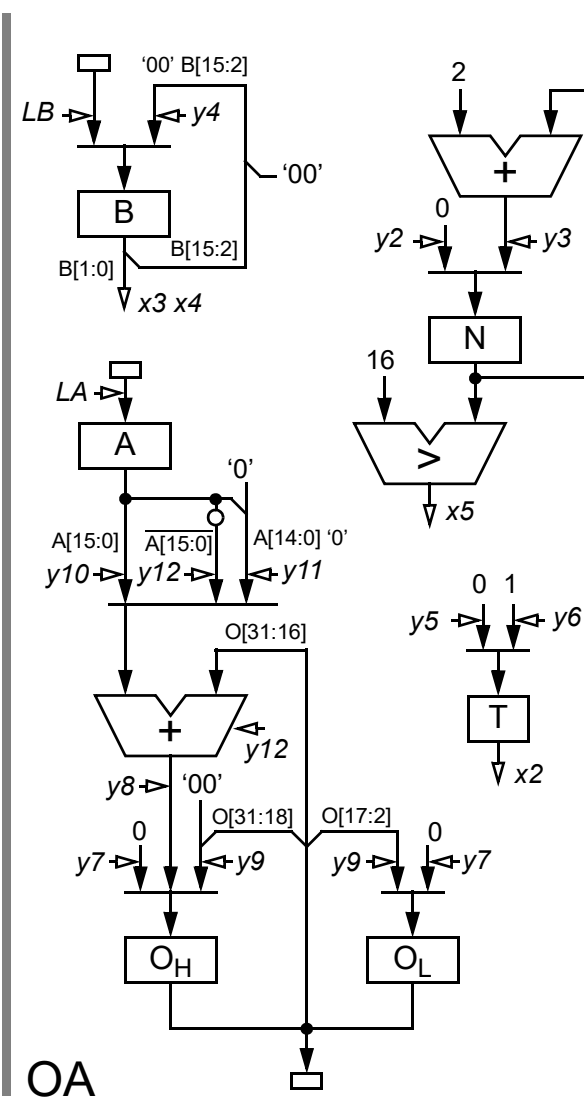
Realisatsiooni näide (ver. 1)



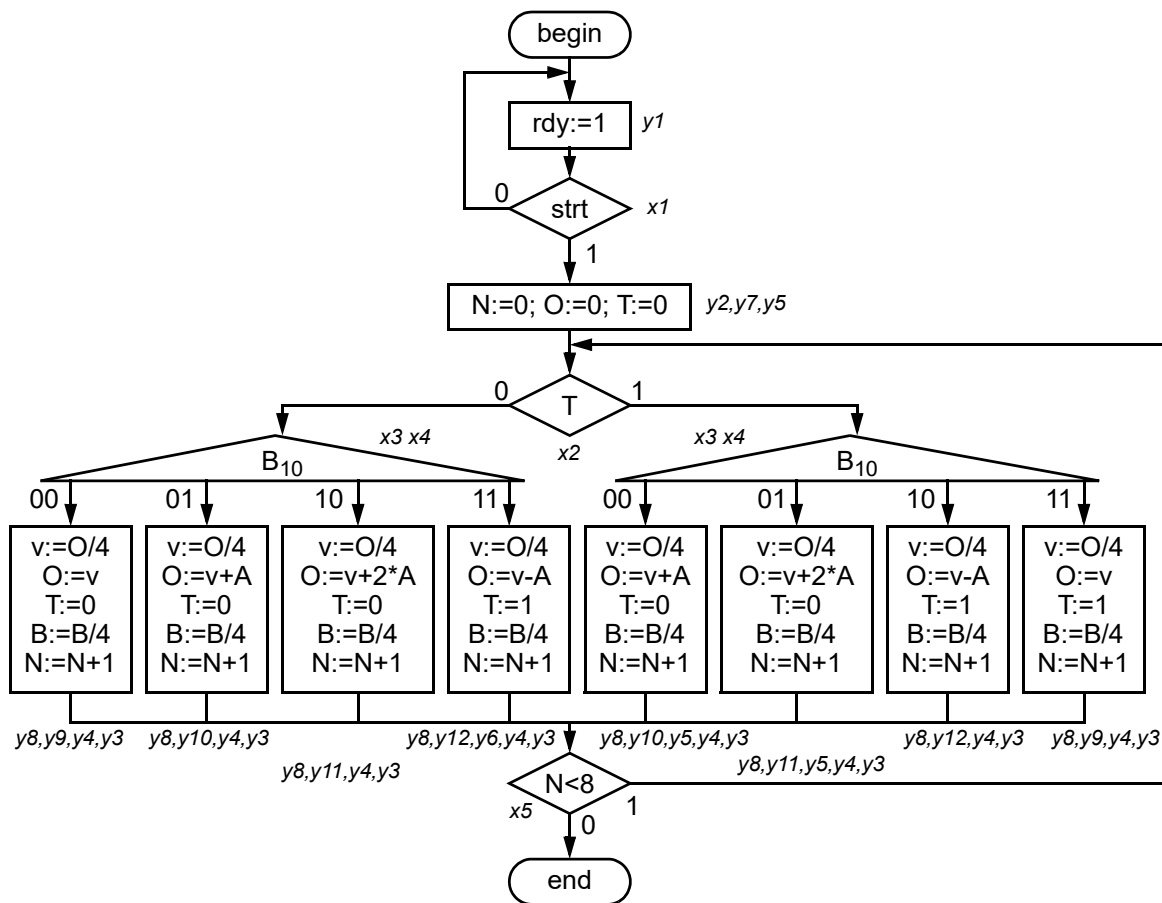
JA Moore: i 5, o 12, s 12, t 28; Mealy: i 5, o 12, s 4, t 13 (tagasiside OK)

OA 2 sum., 1 võrdl., 5 (6) mux, 5 (6) reg.

3 takti iteratsiooni kohta, kokku 24 (+1) takti

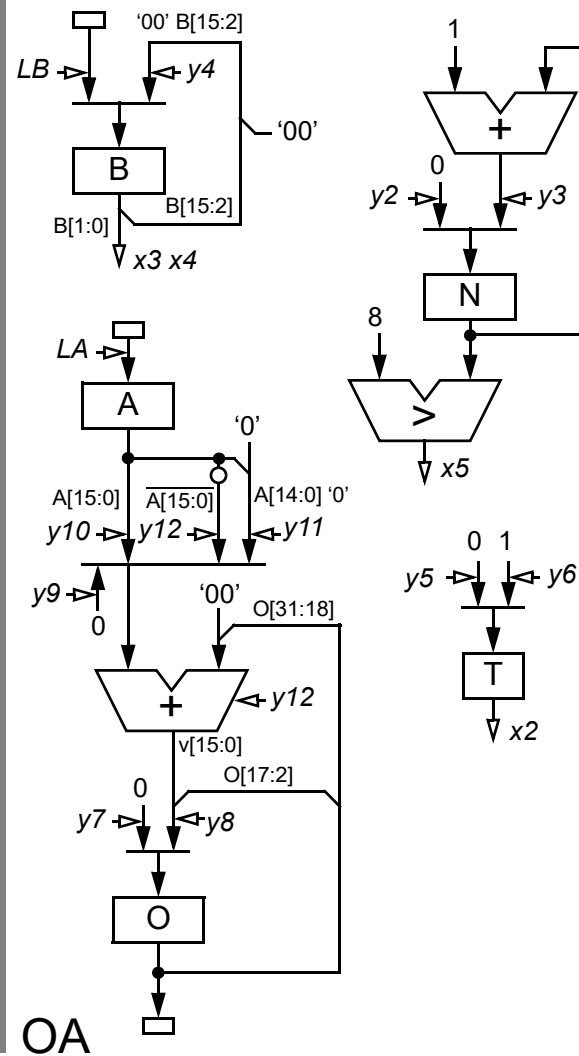


Realisatsiooni näide (ver. 2)



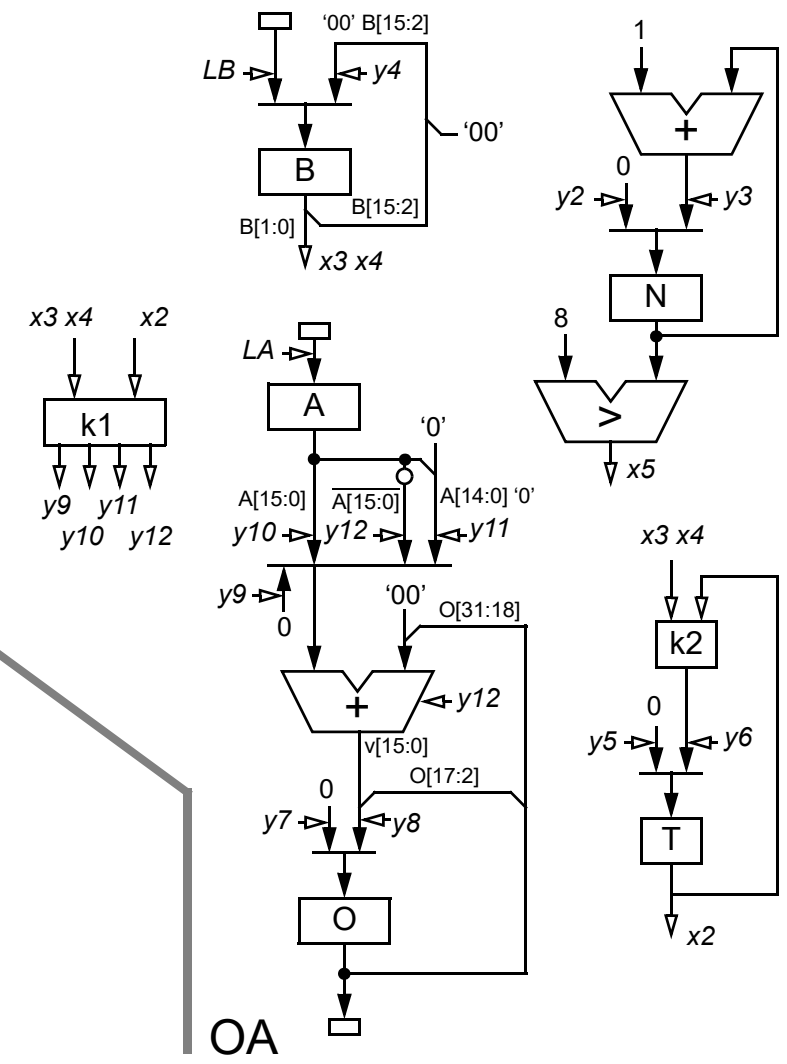
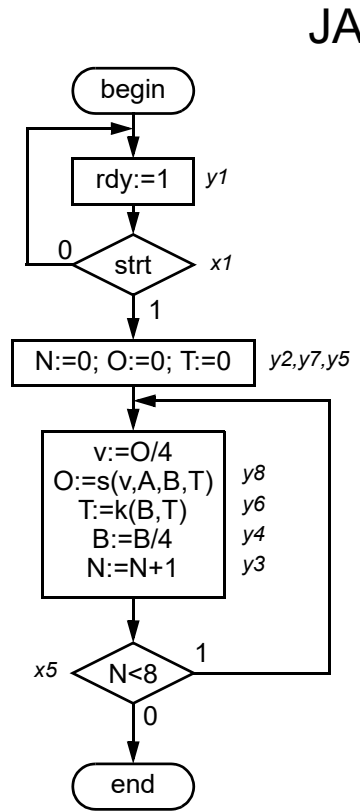
JA Moore: i 5, o 12, s 10, t 82; Mealy: i 5, o 12, s 3, t 17
 OA 2 sum., 1 võrdl., 5 mux, 5 reg.
1 takt iteratsiooni kohta, kokku 9 (+1) takti

JA



Realisatsiooni näide (ver. 3)

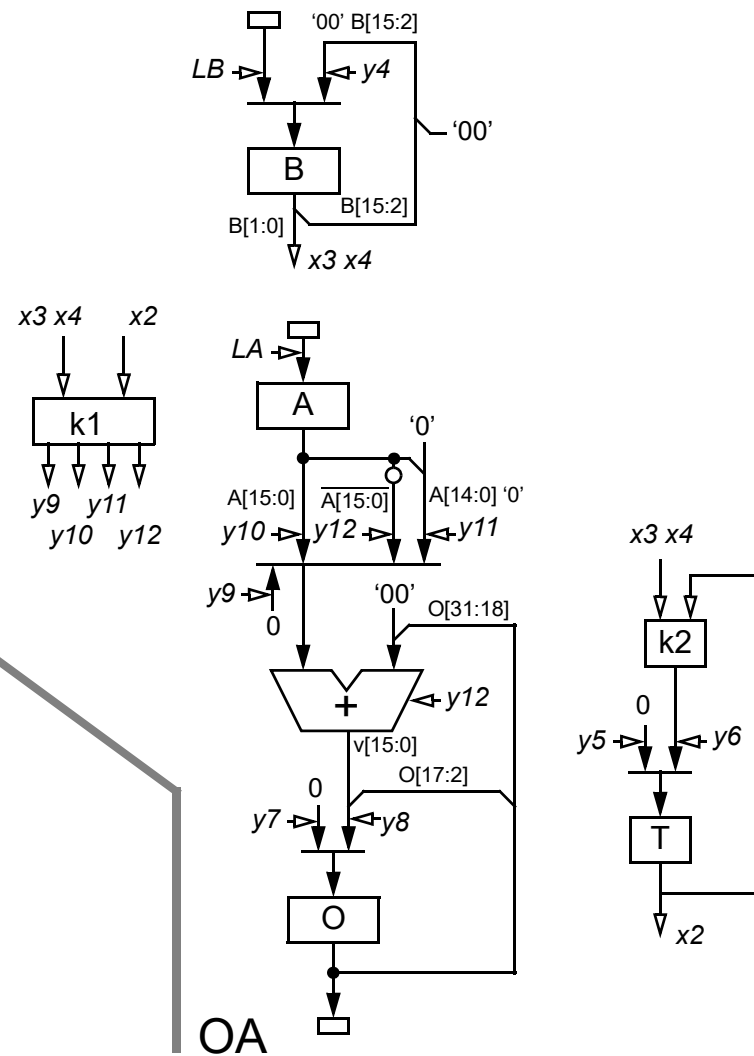
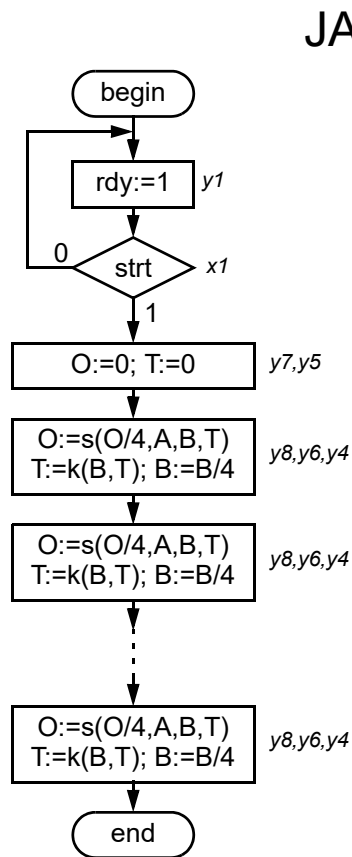
- Keerukus: JA → OA
- siirded ~~ kombinatsioonskem



JA Moore: i 2, o 8, s 3, t 5; Mealy: i 2, o 8, s 3, t 5
 OA 2 sum., 1 võrdl., 5 mux, 5 reg., 1 (2) f-n
 1 takt iteratsiooni kohta, kokku 9 (+1) takti

Realisatsiooni näide (ver. 3)

- Keerukus: OA → JA
- loendur ~ automaat
- Veelgi kiirem:
 - ühitada nullimine (y7,y5) ja esimene iteratsioon
 - OA: peaaegu sama
 - JA: 9 olekut
 - kiirus: 8 (+1) takti



JA Moore: i 1, o 6, s 10, t 11; Mealy: i 1, o 6, s 10, t 11
 OA 1 sum., 4 mux, 4 reg., 1 (2) f-n
 1 takt iteratsiooni kohta, kokku 9 (+1) takti

Realisatsiooni näide (ver. 4)

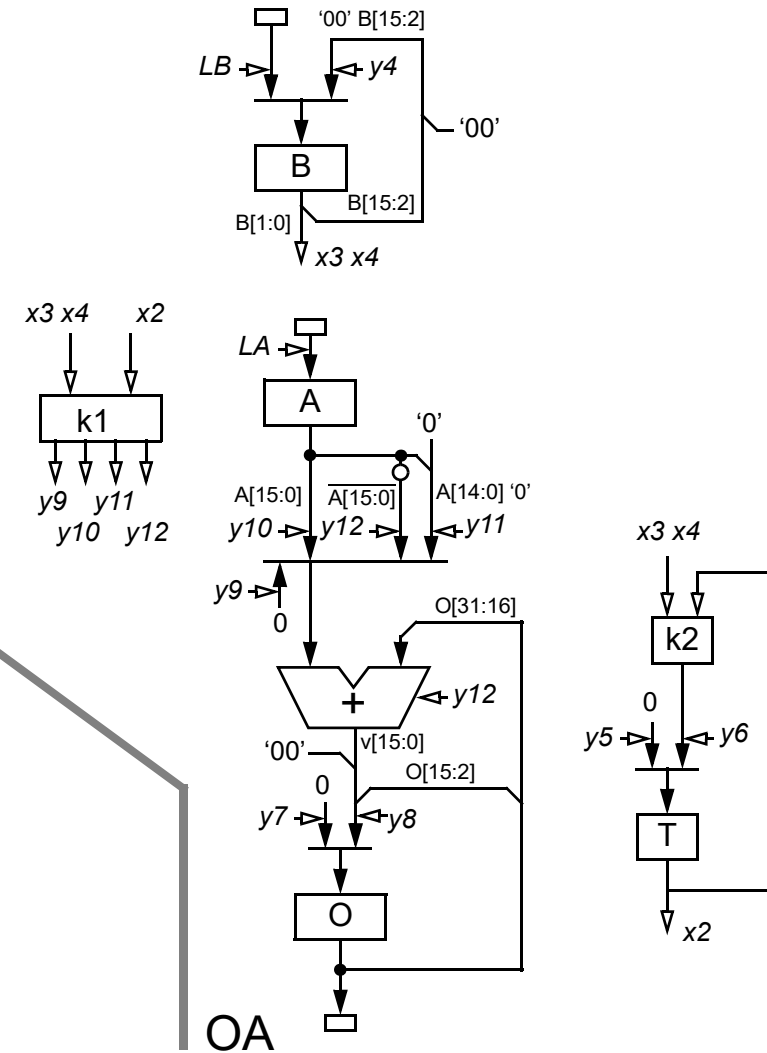
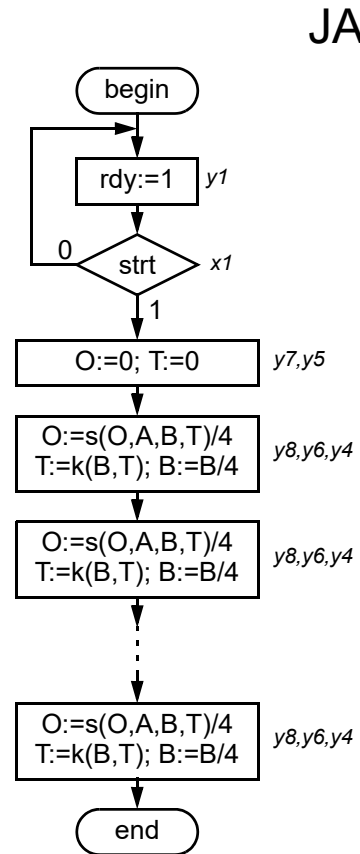
- Eelmised variandidid

- 2 noorimat järku kasutamata
- korrektse tulemuse asukoht?

- Nihutamine pärast liitmist/lahutamist

- 2 vanimat järku alati 0-d!!!

- Pisi-erinevused OA-s



JA Moore: i 1, o 6, s 10, t 11; Mealy: i 1, o 6, s 10, t 11

OA 1 sum., 4 mux, 4 reg., 1 (2) f-n

1 takt iteratsiooni kohta, kokku 9 (+1) takti

Realisatsioonide võrdlused

- **Seitse erinevat korrutaja realisatsiooni**
 - **paralleelne, bitt korruga, 2 bitti korruga (versioonide 3 ja 4 erinevad VHDL koodid)**
 - **VHDL koodide erinevused põhjustatud sünteesi juhtimise vajadusest**
 - “what you write is what you get...”
 - **VHDL failid – <https://ati.ttu.ee/~lrv/IAS0150/multiplier/>**

Tüüp	nr.	Synopsys DC		Xilinx ISE	
		comb. & reg. [e.g.]	[ns]	[slices]	[ns]
paralleelne	0	685 + 112 = 797	20.0	0 (1/24 mult.)	~10
radix-2 (bhv-rtl)	1	227 + 508 = 735	15.5	46 (7680)	6.7
radix-4 (v.4, bhv-rtl)	2	402 + 511 = 913	20.0	52 (7680)	7.8
radix-4 (v.4, ~90% rtl)	3	303 + 511 = 814	15.9	37 (7680)	7.1
radix-4 (v.4, 100% rtl)	4	179 + 511 = 690	19.9	34 (7680)	7.3
radix-4 (v.3, bhv-rtl)	5	397 + 514 = 911	20.0	51 (7680)	8.2
radix-4 (v.3, 100% rtl)	7	182 + 511 = 693	18.7	36 (7680)	6.4