



Digitaalsüsteemid / Digital Systems

IAS0150 – 6 EAP 4 2-2-0 E S

<https://moodle.taltech.ee/course/view.php?id=36743> – IAS0150 Digitaalsüsteemid (2026)

Peeter Ellervee

ICT-526

620 2258

511 3631

peeter.ellervee@taltech.ee

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

- **16 loeng-praktikum-harjutust (2 paari korraga)**
- **kaks kodutööd, algoritmi prototüüpimine, neli testi**
- **kirjalik eksam, eeldusteks esitatud kodutööd ja osalemine praktikumides (testid!)**
- **koondhinne (max 100) – kodutööd 15+20, prototüüpimine 15, testid 20, eksam 30**
 - **hinded: 1: 50-59, 2: 60-69, 3: 70-79, 4: 80-89, 5: 90-...**

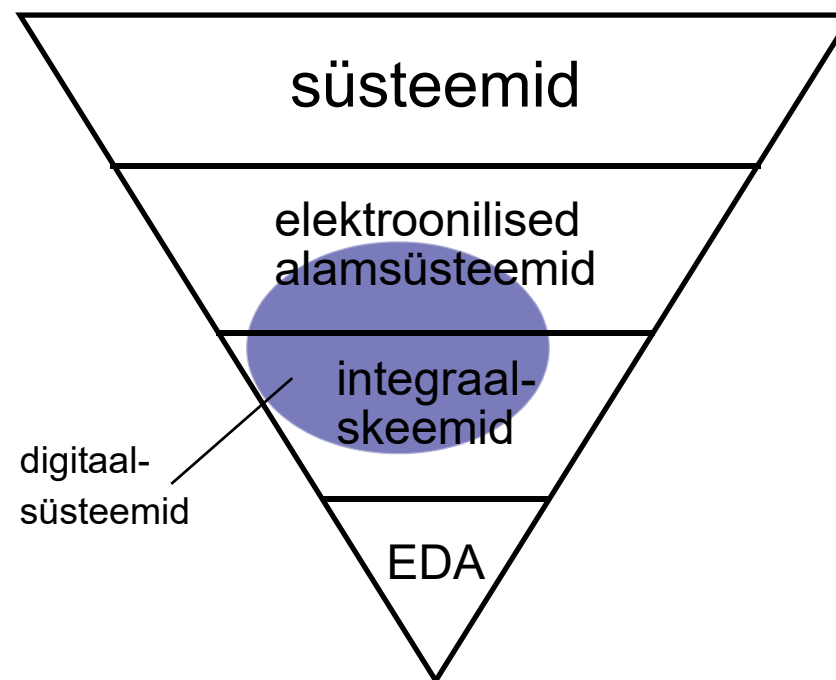


Digitaalsüsteemid

- **Süsteemid**
 - *NB! Piirid pole täpselt paigas...*
 - **Mehhaanikasüsteem** – *liikumine*
 - **Elektrisüsteem** – *elektrienergia*
 - **Elektroonikasüsteem** – *infotöötlus*
 - **Analoogsüsteem** – signaalide esitamine ja töötlus pidevate suurustena
signaalide väärtused: 0...5 V, -10...+10 mA, jne.
 - **Digitaalsüsteem** – signaalide esitamine ja töötlus diskreetsete suurustena
signaalide väärtused: 0/1, tõene/väär, true/false, high/low, jne.
- **Sardsüsteem (embedded system)**
 - Kaasajal peamiselt (hajutatud) digitaalsüsteem, mis sisaldab nii analoog-alamsüsteeme aga ka mehhaanilisi ja elektrilisi komponente
 - Suvaline digitaalsüsteem sisaldab alati analoog, elektrilisi ja mehhaanilisi komponente – nt. nivoomuundurid, toide, lülitid, ...
 - Küberfüüsikalised süsteemid – süsteem + keskkond, kasutajad, ...

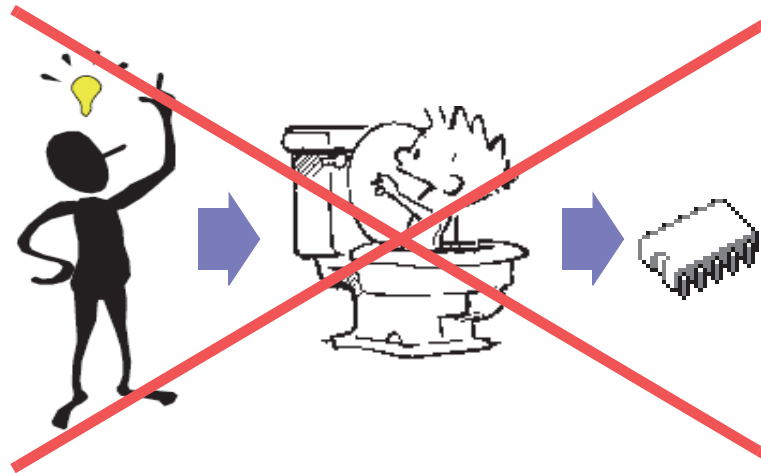
Digitaalsüsteemid

- **Digitaalsüsteem**
 - digitaalne andmetöötlus
 - andmeosa, juhtosa, sisend/väljund
- **Primaarturud**
 - infosüsteemid
 - telekommunikatsioon
 - laiatarbe-elektronika
- **Sekundaarturud**
 - süsteemid (nt. transport)
 - tootmine (nt. robotid)
- **VLSI tehnoloogiate rakendused**
VLSI – Very Large Scale Integration



Digitaalsüsteemide projekteerimine e. disain

- **Müüt – kõrgtaseme projekteerimine on ainult üks samm**



- **Vajalikud on iteratsioonid**
 - funktsionaalsus
 - disaini eesmärgid



PDSA - Plan, Do, Study, Act
PDCA - Plan, Do, Check, Adjust



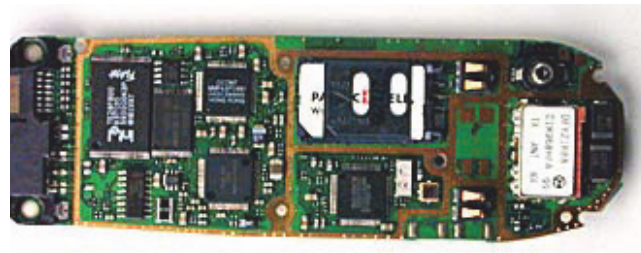
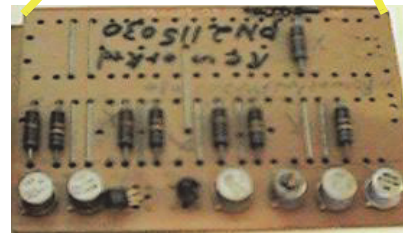
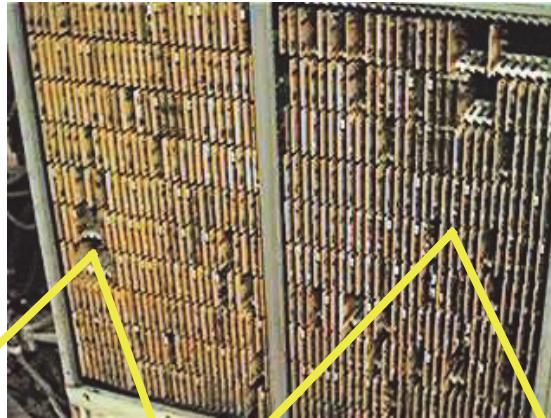
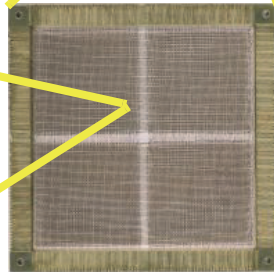
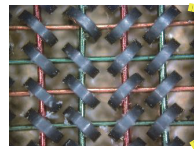
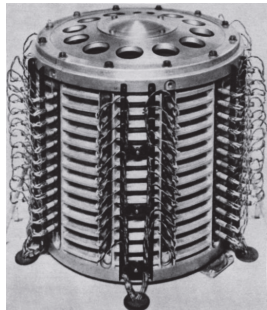
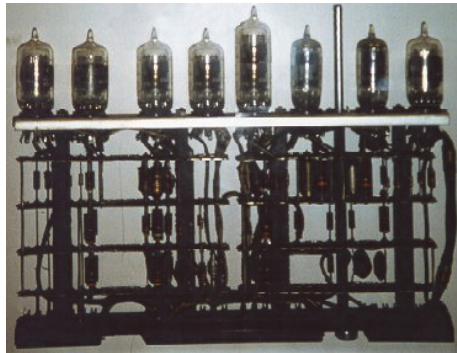
Disaini põhietapid

- **Süsteemi disain – System design**
a.k.a. Arhitektuuri süntees – Architectural-level synthesis
 - kirjeldus / spetsifikatsioon → plokk-skeem
 - makroskoopilise struktuuri määramine *ehk*
kuidas on peamised ühendusplokid omavahel ühendatud
- **Loogikadisain – Logic Design**
 - plokk-skeem → loogikalülid
 - mikroskoopilise struktuuri määramine *ehk*
kuidas on loogikalülid omavahel ühendatud
- **Füüsiline disain – Physical design**
a.k.a. Geomeetria süntees – Geometrical-level synthesis
 - loogikalülid → transistorid, ühendusjuhtmed, mikroskeem

Abstraktsioonitasemed

Tase	Abstraktsioon	Töövahendid
süsteem	käitumine ruumis ja ajas kui suuniste, ajastuse ja s/v spetsifikatsioonid	plokk-skeemid, diagrammid, kõrgtaseme (programmeerimis) keeled
arhitektuur	funktsionaalsete olemite üldine süsteem (organisatsioon)	riistvara kirjelduskeeled, moodulite paigalduse planeerimine takt-sageduse ja pinna ennustamiseks
registersiirded	andmevoo funktsionaalsete moodulite ja mikrokäskude sidumine	süntees, simuleerimine, verifitseerimine, testi analüüs, ressursside vajaduse hinnang
funktsionaalsed moodulid	primitiivsed operatsioonid ja juhtimisviisid	teegid, mooduli generaatorid, skeemisisestus, testimine
loogika	loogikalülide Boole' funktsioonid	skeemisisestus, süntees ja simuleerimine, verifitseerimine, PLA vahendid
lülitused	transistorahelate elektrilised omadused	RC leidmine, ajastuse verifitseerimine, elektriline analüüs
kristalli pind	geomeetrilised piirangud	pinna redaktor, ahelate ekstraheerimine, DRC, paigaldus ja trasseerimine (ruutimine)

Digitaalsüsteemide realiseerimine – ajalugu ja tänapäev



Algoritmist skeemini

- **Peatuspunkt / sünkroniseerimine**
 - olek (automaadi olek)
 - mäluelemendid
 - takteerimine

- **Funktsioon**

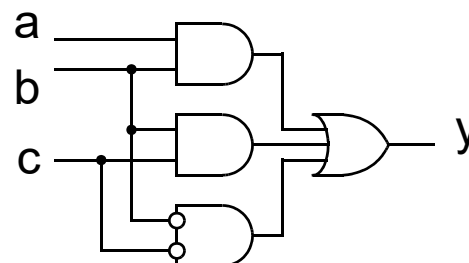
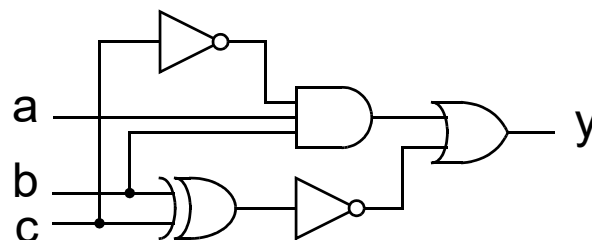
- $y = \overline{(b \oplus c)} + a b \bar{c}$

- **Normaalkuju**

- $y = a b + b c + \bar{b} \bar{c}$

- **Tõeväärtustabel**

- mitu sisendit & mitu väljundit



abc	y
000	1
001	0
010	0
011	1
100	1
101	0
110	1
111	1

Algoritmist skeemini (2)

- Lõplik funktsioon**

$$j = a' + b + c'$$

$$k = c + d$$

$$q = a + b$$

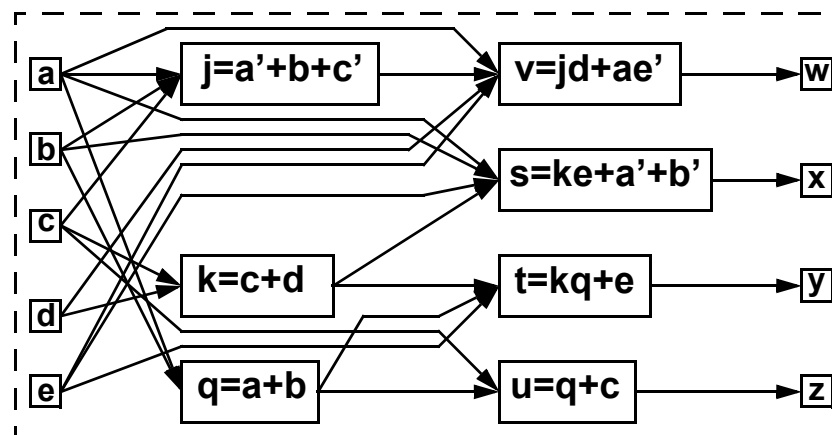
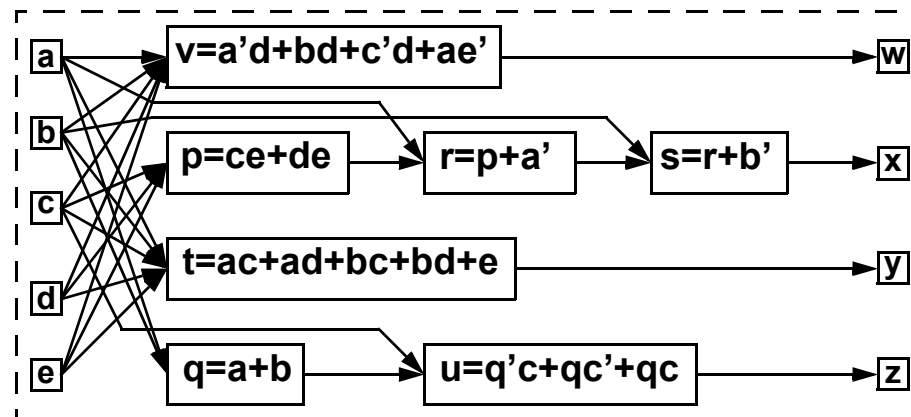
$$s = ke + a' + b'$$

$$t = q + c$$

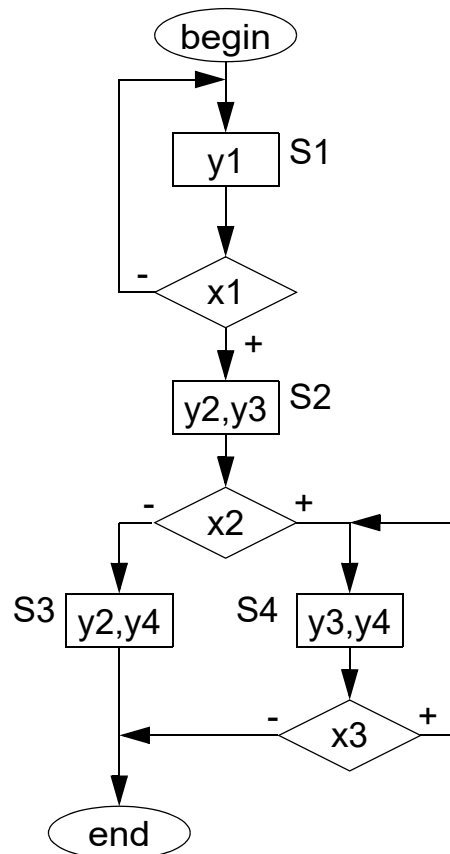
$$u = q + c$$

$$v = jd + ae'$$

- Funktsioone/loogikalülisid – 7 ja 7**
- Literaale – 33 ja 20**
- Viide – 3 ja 2 (sõlmi)**
- Viide – 9 ja 7 (sõlmi+literaale)**



Algoritmist skeemini (3)



i^t	s^t	$q1\ q0$	s^{t+1}	$q1\ q0$	o^t
$x1'$	S1	0 0	S1	0 0	y1
$x1$			S2		
$x2'$	S2	0 1	S3	1 1	y2,y3
$x2$			S4		
-	S3	1 1	S1	0 0	y2,y4
$x3'$	S4	1 0	S1	0 0	y3,y4
$x3$			S4		

Skeem

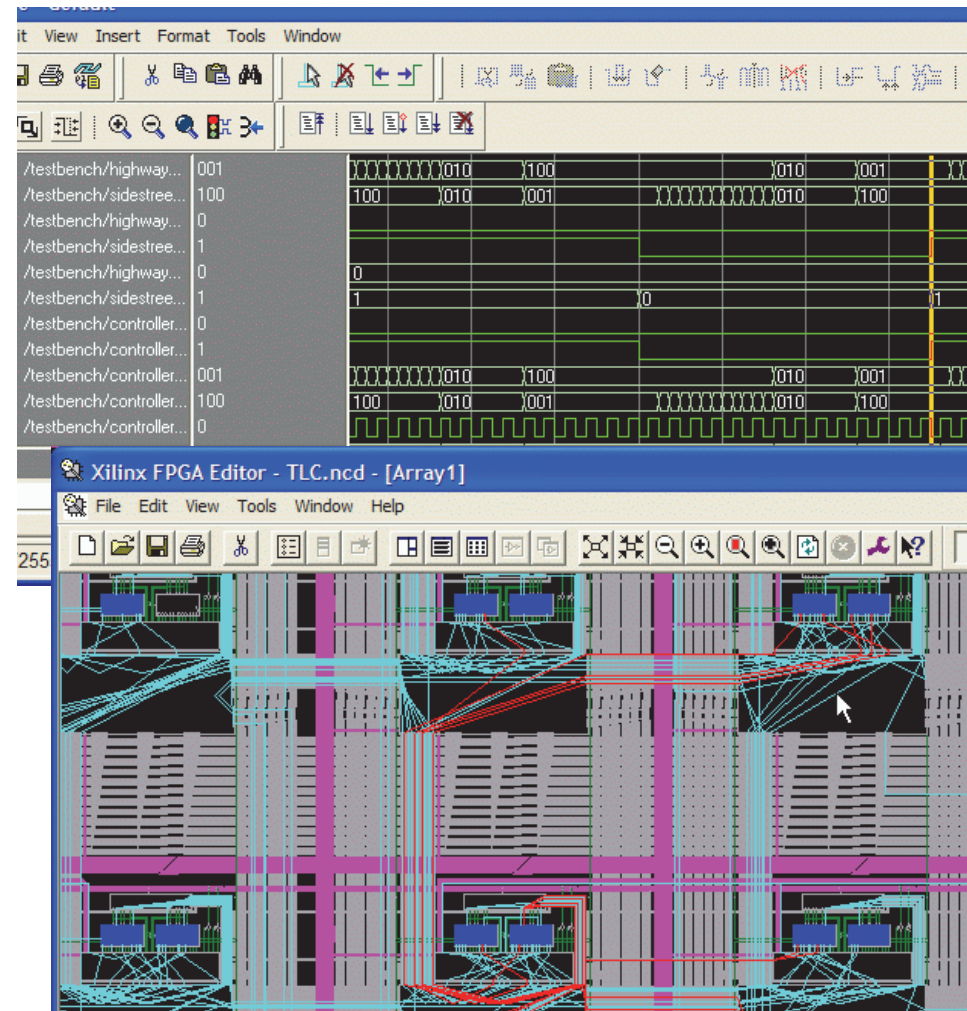
- $n0 = \overline{q1}q0$
- $d1 = n0 + x3n1$
- $y1 = \overline{q1}\ \overline{q0}$
- $y3 = n0 + n1$

- $n1 = q1\overline{q0}$
- $d0 = x1y1 + \overline{x2}n0$
- $y2 = q0$
- $y4 = q1$

Projekteerimine tänapäeval

- Riistvara kirjelduskeel**

```
--
-- Highway is green, sidestreet is red.
--
if  sidestreet_car = NoCar  then
    wait until  sidestreet_car = Car;
end if;
-- Waiting for no more than 25 seconds ...
if  highway_car = Car  then
    wait until  highway_car = NoCar  for 25 sec;
end if;
-- ... and changing lights
highway_light <= GreenBlink;
wait for 3 sec;
highway_light <= Yellow;
sidestreet_light <= Yellow;
wait for 2 sec;
highway_light <= Red;
sidestreet_light <= Green;
```





Turg e. \$\$\$

- **Projekteerimise maksumus**
 - *projekteerimisaeg & kristallide tootmise hind*
 - *suured kapitalimahutused*
 - *pea-aegu võimatu parandada*
- **Muudatuste kõrge hind**
 - *suured tootmismahud rentaablimad*
 - *null-defekti on äärmiselt oluline*
 - *turusuundumuste järgimine oluline*
- **Hind pöördvõrdeline tootmismahuga**
 - *üldotstarbelised protsessorid - odav kuid pole alati kasutatav*
 - **ASIC (Application-Specific Integrated Circuits)** – häälestamine vastavalt vajadusele (nt. telekommunikatsioon)
 - *prototüübid – väljatöötluses on paindlikkus äärmiselt oluline*
 - *spetsrakendused (nt. sateliidid)*
- **Rekonfigureeritavus**
 - *paindlikud tooted, võimalus modifitseerida töötavat skeemi*



Automatiseeritud projekteerimine

- **Gordon Moore seadus (1965)**
- **Edusammud tehnoloogias**
 - väiksemad skeemid
 - suurem jõudlus
 - rohkem transistore kristallil
- **Suurem integratsiooniaste**
 - kompleksemad süsteemid
 - arvutusvõimsuse odavnemine
 - suurem töökindlus
- **Automatiseerimine võimaldab:**
 - uusimate tehnoloogiate kasutamist
 - vähendada projekteerimiskulutusi
 - kiirendada projekteerimist

Automatiseerimise ajalugu (natuke idealistlik vaade)

- **Alberto Sangiovanni-Vincentelli, 2003**
 - *Age of Gods* – 1964-1978
 - *Age of Heroes* – 1979-1993
 - *Age of Men* – 1993-...(2002)
- **Projekteerija jõudlus**
 - 1990 – 4 K elementi / aastas / disainer
 - 1995 – insener teeb kõik (RTL→GDSII) – 9.1K
 - 2000 – suurte plokkide korduvkasutus, süntees (RTL→GDSII) – 91K
 - 2005 – käitumuslik ja arhitektuurne tase, riist- ja tarkvara (koos)disain – 200K
 - 2010 – väga suurte plokkide korduvkasutus (multi-tuumad) – 1200K
 - *Tänapäev ja tulevik – riist- ja tarkvara koosverifitseerimine, täidetav spetsifikatsioon jne.*



Miks kahendloogika?

- **Digitaali eelised**
 - Tulemuste korratavus – samad sisendväärtused annavad alati sama tulemuse
 - analoog – temperatuur, toitepinge, vananemine, ...
 - Projekteerimise lihtsus – loogikafunktsioonid, optimeerimisalgoritmid
 - Paindlikkus ja funktsionaalsus – erinevad algoritmid, sama funktsionaalsus (võimsustarbe, kiiruse, suuruse jne. erinevused)
 - Programmeeritavus – programmeerimiskeeled / riistvara kirjelduskeeled
 - Töökiirus
 - Turu ja tehnoloogia areng – ränikiipide/-tehnoloogia skaleeritavus/korratavus
- **Analoogi eelised**
 - Differentsiaalvõrrandite realiseerimine
 - Energeetiline efektiivsus, kõrge töösagedus
- **Mitmevalentne loogika – rohkem kui kaks diskreetset väärtust**
 - Suurem infotihedus – nt. 4-, 8- ja 16-valentsed mälud
 - Boole'i algebra edasiarendus – funktsioonide süsteemi minimeerimine

Dgitaalsüsteem – disaininäide #1

- Neli kahend-sisendit ja -väljundit – nt. 4 lüliti (S1-S4) ja 4 valgusdiodi (L1-L4)
- Sisendite muutumine muudab väljundeid
 - kui $S1=1$ & $S2=0$, siis $L1 \leftarrow 1$, muidu $L1 \leftarrow 0$
 - kui $S1=0$ & $S3 \uparrow$, siis $V++$ ($V[1]=L2$, $V[0]=L3$)
 - kui $S1=1$ & $S2=1$ & $S4 \downarrow$, siis $L4 \leftarrow \neg L4$

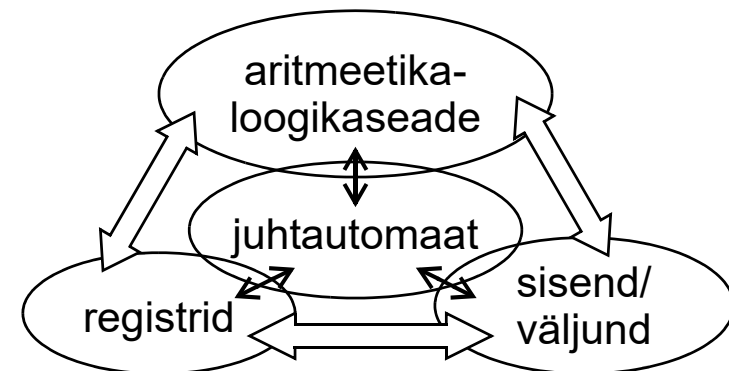
Võimalik programm

```
int s3p=0, s4p=0, v=0; l4=0;
while (1) {
    if (s1&!s2) l1=1; else l1=0;
    if (!s1&((s3^s3p)&s3)) v++;
    if (v>3) v=0;
    l2=v/2; l3=v%2;
    if (s1&s2&((s4^s4p)&!s4)) l4~=l4;
    s3p=s3; s4p=s4; wait_100ms();
}
```

- $s1...s4$ – lülitiid == DIP1...DIP4 programmis
- $l1...l4$ – LED-d (tuled) == leds – kõik 4 ühes sõnas!
- üksikute bittidega manipuleerimine?

Protsessor / kontrollor

- sisendid/väljundid
- vahetulemused
- töötlus- e. arvutus-sõlm
- juht-osa



Disaininäide #1 – mikrokontroller

- **Esiagne programm – leds: and -> '0'; or -> '1'; dubleeritud lugemine**

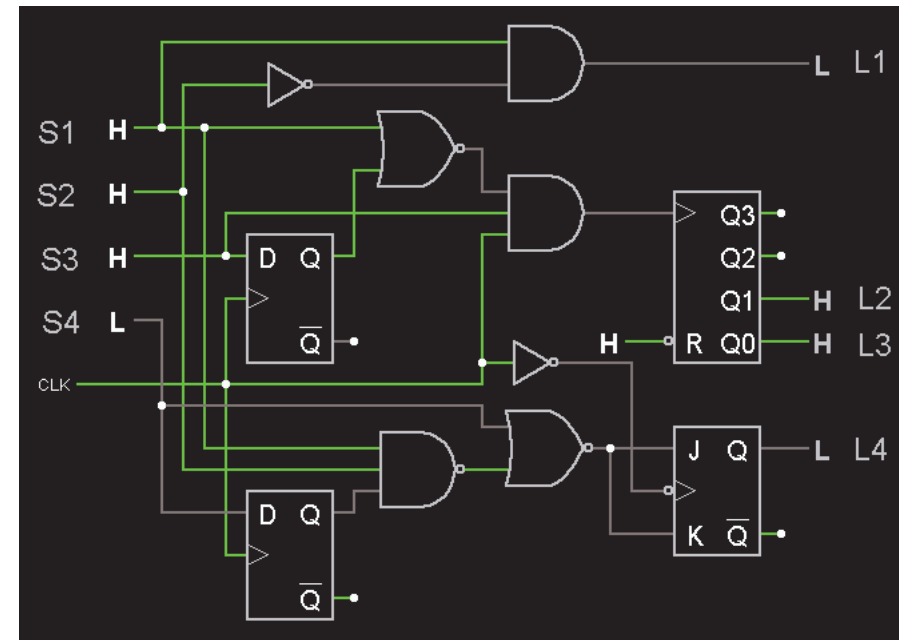
```
char leds=0,dip3p=0,dip4p=0,v=0;    // ROM - 548 / RAM - 81
while (1) {
    if (DIP1&&!DIP2) leds|=0b1000; else leds&=0b0111;
    if (!DIP1&&((DIP3^dip3p)&&DIP3)) v++;
    if (v>3) v=0;
    leds=(leds&0b1001)|(v<<1);
    if (DIP1&&DIP2&&((DIP4^dip4p)&&!DIP4)) leds^=0b0001;
    dip3p=DIP3; dip4p=DIP4; led_out(leds); delay_100ms;
}
```

- **Optimeeritud programm [~~Shannoni arendus]**

```
char leds=0,dip3p=0,dip4p=0,v=0; // ROM - 518 / RAM - 81
while (1) {
    if (DIP1) {
        if (DIP2) { if ((DIP4^dip4p)&&!DIP4) leds^=0b0001; leds&=0b0111; }
        else leds|=0b1000;
    }
    else {
        if ((DIP3^dip3p)&&DIP3) v++;        if (v>3) v=0;
        leds=(leds&0b0001)|(v<<1);
    }
    dip3p=DIP3; dip4p=DIP4; led_out(leds); delay_100ms;
}
```

Disaininäide – skeem

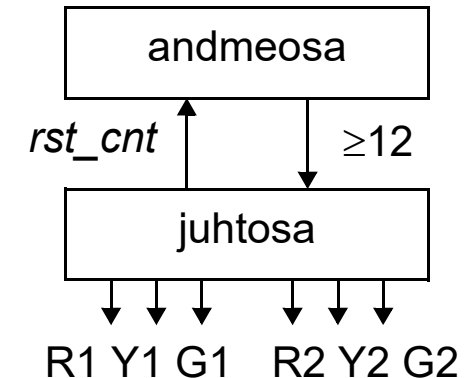
- **Tegevused**
 - kui $S1=1$ & $S2=0$, siis $L1 \leftarrow 1$, muidu $L1 \leftarrow 0$
 - kui $S1=0$ & $S3 \uparrow$, siis $V++$ ($V[1]=L2$, $V[0]=L3$)
 - kui $S1=1$ & $S2=1$ & $S4 \downarrow$, siis $L4 \leftarrow \neg L4$
- Kolm paralleelset osa
- **Kombinatsioon-skeem**
 - $L1 \leftarrow S1 \& !S2$
- **Loendur + loogika**
 - D-tiger – $S3p \leftarrow S3$
 - $v++ \leftarrow !S1 \& !S3p \& S3$
 - $L2 \leftarrow V[1]$; $L3 \leftarrow V[0]$
- **T-triger + loogika**
 - D-tiger – $S4p \leftarrow S4$
 - $!L4 \leftarrow S1 \& S2 \& S4p \& !S4$
- **Asünkroonsed pisihädad**
 - takti ja signaali muutuse sünkroniseerimine
 - vt. S3 muutmist...



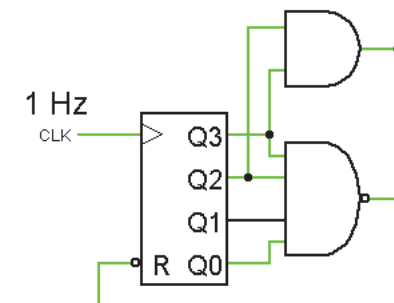
<https://ati.ttu.ee/~lrv/IAS0150/switch4led4.txt>

Näide #2 – valgusfoor kui digitaalsüsteem

- 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”

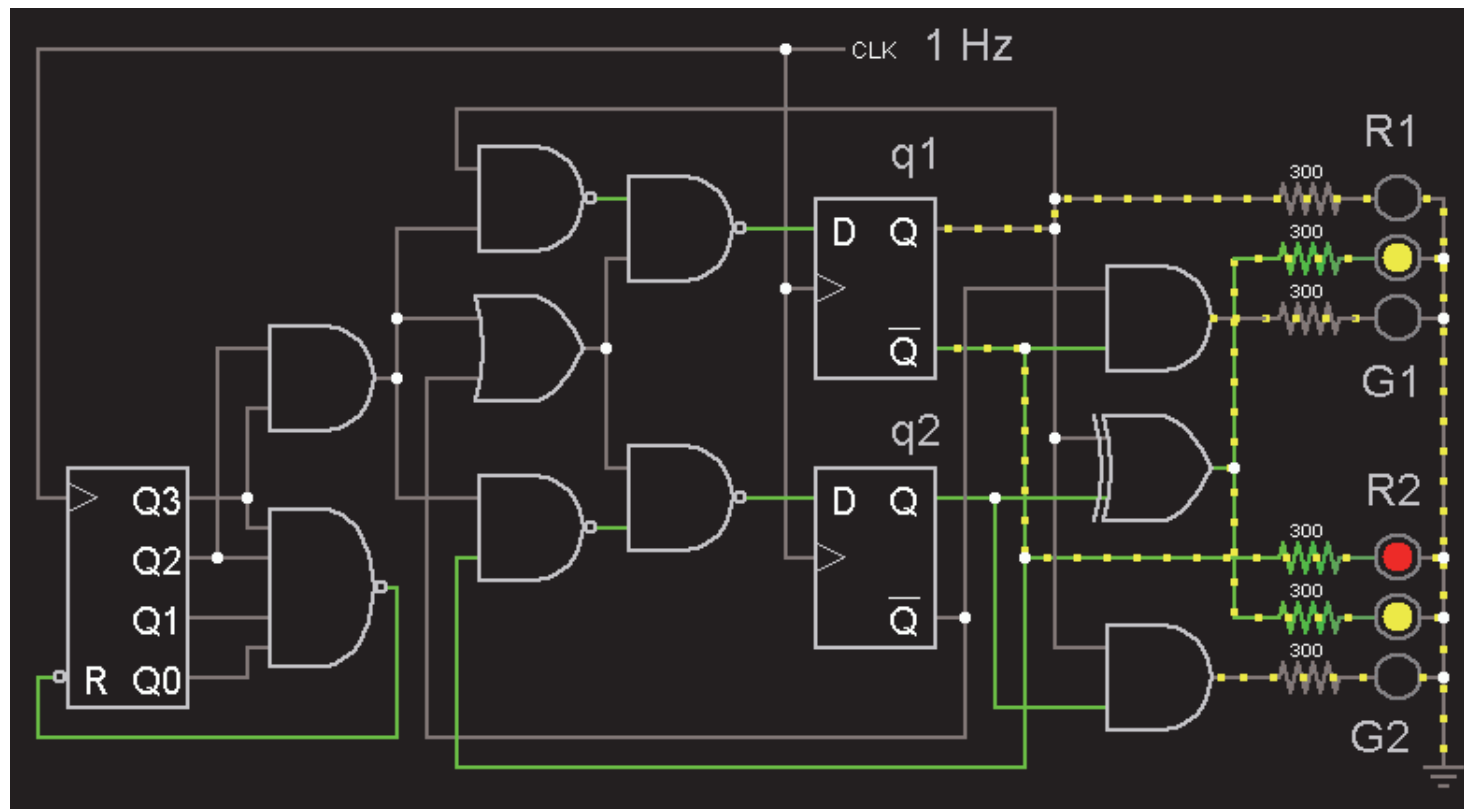


Andmeosa



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

Valgusfoor – tulemus



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



Näide #3 – diferentsiaalvõrrand

$$\frac{d^2y}{dx^2} + 5\frac{dy}{dx}x + 3y = 0$$

- Kuidas jõuda algoritmist realisatsioonini?

- **Tarkvaraline realisatsioon**

- protsessor ette antud
- leida (assembler)käskude jada

- **Riistvaraline realisatsioon**

- protsessor pole ette antud
- leida (mikro)käskude jada

```

process
  variable a,dx,x,u,y,x1,y1: integer;
begin
  cycles(sysclock,1); a:=inport;
  cycles(sysclock,1); dx:=inport;
  cycles(sysclock,1); y:=inport;
  cycles(sysclock,1); x:=inport;
  cycles(sysclock,1); u:=inport;
  loop
    cycles(sysclock,7);
    x1 := x + dx; y1 := y + (u * dx);
    u := u-5 * x * (u * dx) - 3 * y * dx;
    x := x1; y := y1;
    exit when not (x1 < a);
  end loop;
end process;
  
```

Tarkvaraline realisatsioon == kompileerimine

- Diferentsiaalvõrrand

$$\frac{d^2y}{dx^2} + 5\frac{dy}{dx}x + 3y = 0$$

```

{
  sc_fixed<6,10> a,dx,y,x,u,x1,x2,y1;
  while ( true ) {
    wait(); a=inport.read();
    wait(); dx=inport.read();
    wait(); y=inport.read();
    wait(); x=inport.read();
    wait(); u=inport.read();
    while ( true ) {
      for (int i=0;i<7;i++) wait();
      x1 = x + dx;  y1 = y + (u*dx);
      u = u - 5*x*(u*dx) - 3*y*dx;
      x = x1; y = y1;
      if (!(x1<a)) break;
    }
    outport.write(y);
  };
}

```

```

# R1:a, R2:dx, R3:y, R4:x, R5:u,
# R6:x1, R7:x2, R8:y1, R9:tmp
...
_loop_$32:
  ADD.fx    R6, R4, R2      # x1=x+dx
  MUL.fx    R9, R5, R2      # tmp=u*dx
  ADD.fx    R8, R3, R9      # y1=y+tmp
  MUL.fx    R9, R4, R9      # tmp=x*tmp
  MUL.fx    R9, R9, $5      # tmp=5*tmp
  SUB.fx    R5, R5, R9      # u=u-tmp
  MUL.fx    R9, R3, R2      # tmp=y*dx
  MUL.fx    R9, R9, $3      # tmp=3*tmp
  SUB.fx    R5, R5, R9      # u=u-tmp
  ADD.fx    R4, R6, $0      # x=x1
  ADD.fx    R3, R8, $0      # y=y1
  SUB.fx    R9, R6, R1      # tmp=x1-a
  JMP.neg   _loop_$32      # ...break
...

```

Näide #4 – otsimine mälust

```

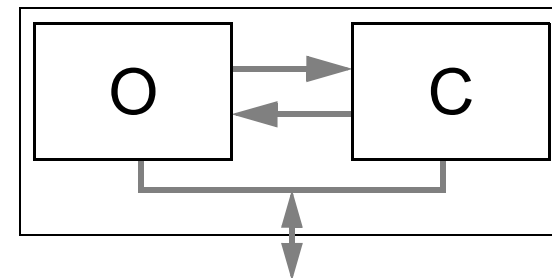
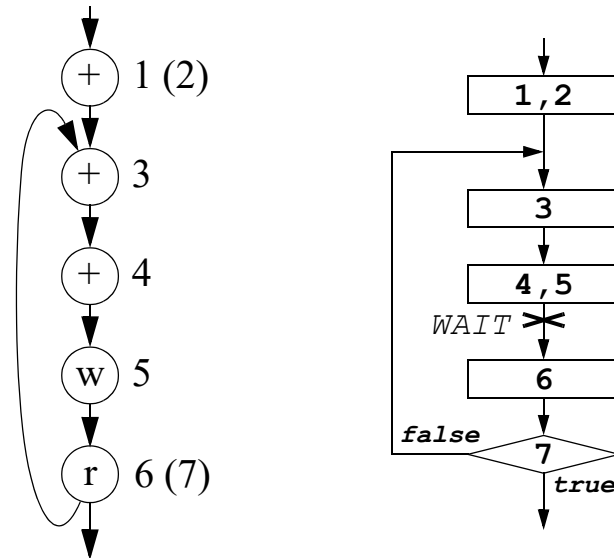
...
base := ... + ... ;
l1: for i in 1 to max_address loop
  x := memory(base+i);
  exit l1 when x = x_required;
end loop l1;
...

```

```

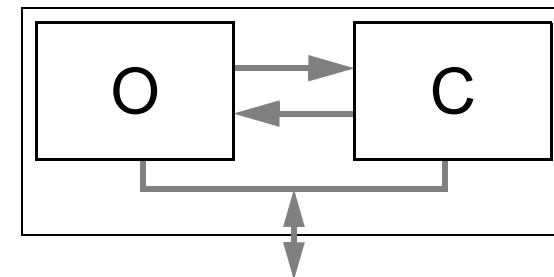
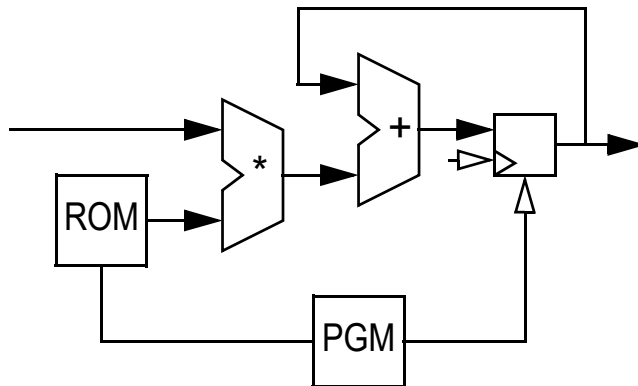
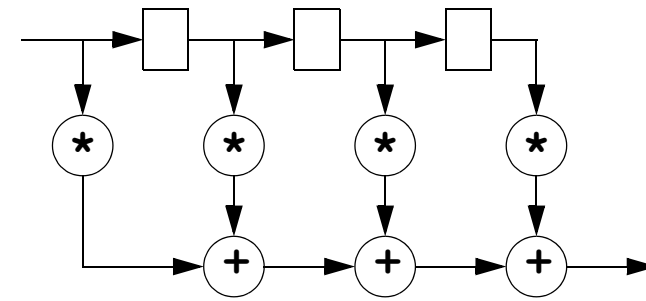
...
base := ... + ... ;           -- 1
i := 0;                       -- 2
loop
  i := i + 1;                 -- 3
  -- x := memory(base+i);
  tmp := base + i;            -- 4
  address <= tmp;              -- 5
  wait on clk until clk='1';  -- (5)
  x := data;                  -- 6
  exit when x = x_required;    -- 7
end loop;
...

```

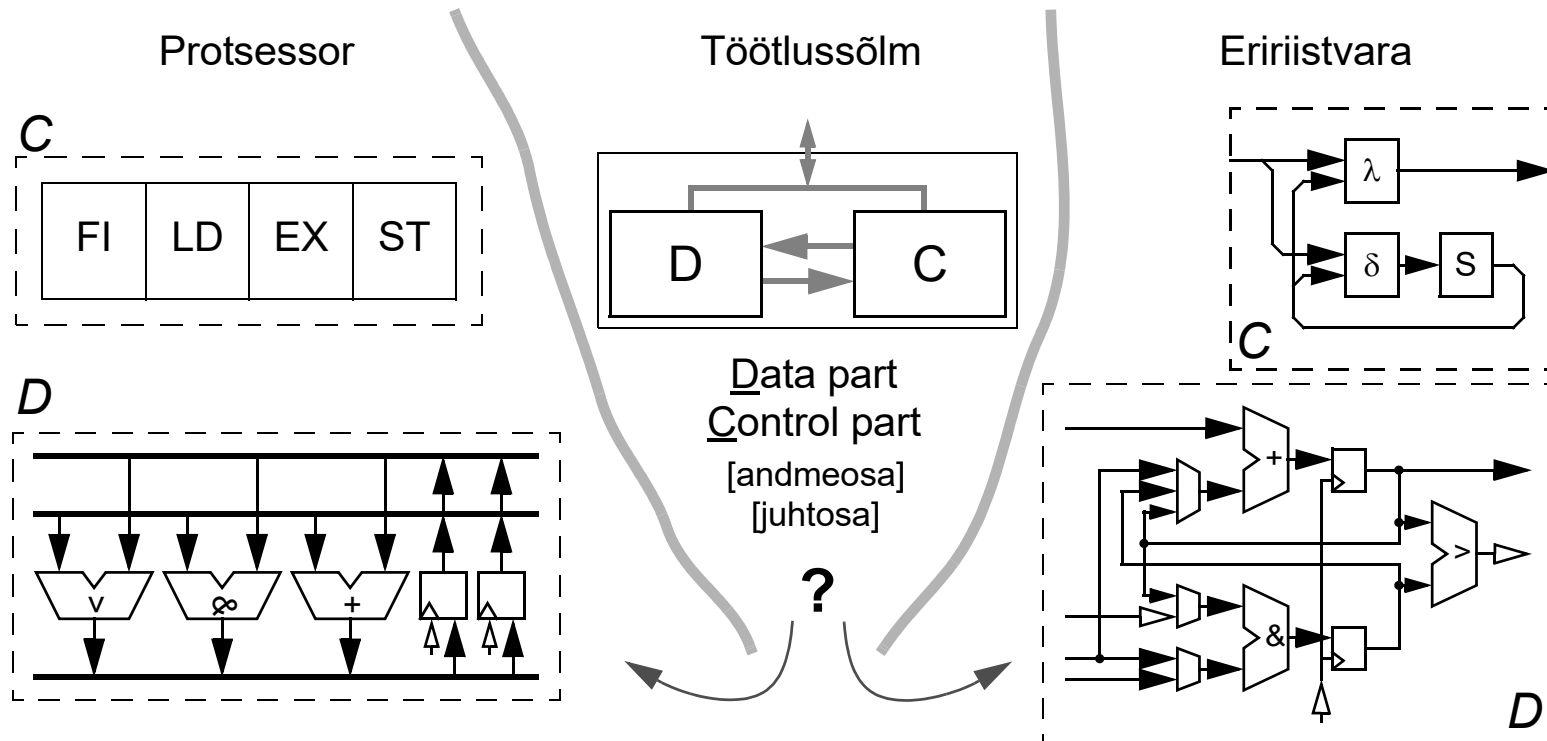


Näide #5 – FIR filter

```
...
x=c0*i(0)+c1*i(1)+c2*i(2)+c3*i(3);
...
```



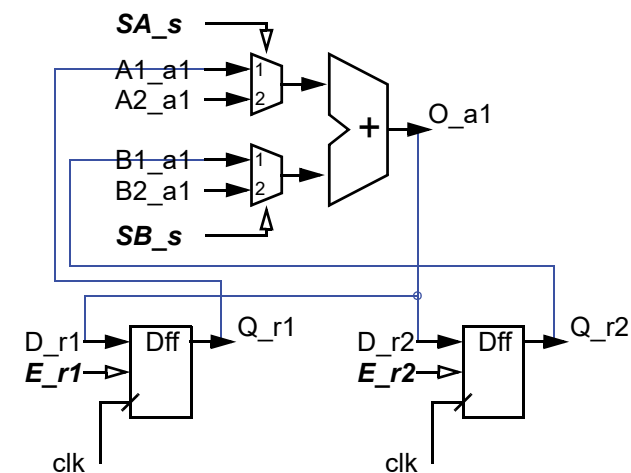
Tarkvara või Riistvara?



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

Andme- ja juhtosa

- **Andmeosa (operatsioonautomaat)**
 - andmete töötlus (operatsioonid e. arvutamine)
 - kombinatsioonskeemid (loogikafunktsioonid)
 - andmete salvestamine (mälu)
 - registrid (mäluelemendid)
- **Juhtosa (juhtautomaat)**
 - operatsioonide (tingimuslik) järjestamine
 - (eelmiste) operatsioonide tulemused
 - välised tingimused (sisendsignaalid)
- **Algoritm**
 - operatsioonide järjestus ~~ mikroprogramm
- **Register-siirete tase**
 - Register-Transfer Level (RTL)
 - register → kombinatsioonskeem → register → ...



$O_{a1} \equiv D_{r1} \equiv D_{r2}$ $Q_{r1} \equiv A1_a1$
 $Q_{r2} \equiv B1_a1$ $n \equiv A2_a1$ $m \equiv B2_a1$

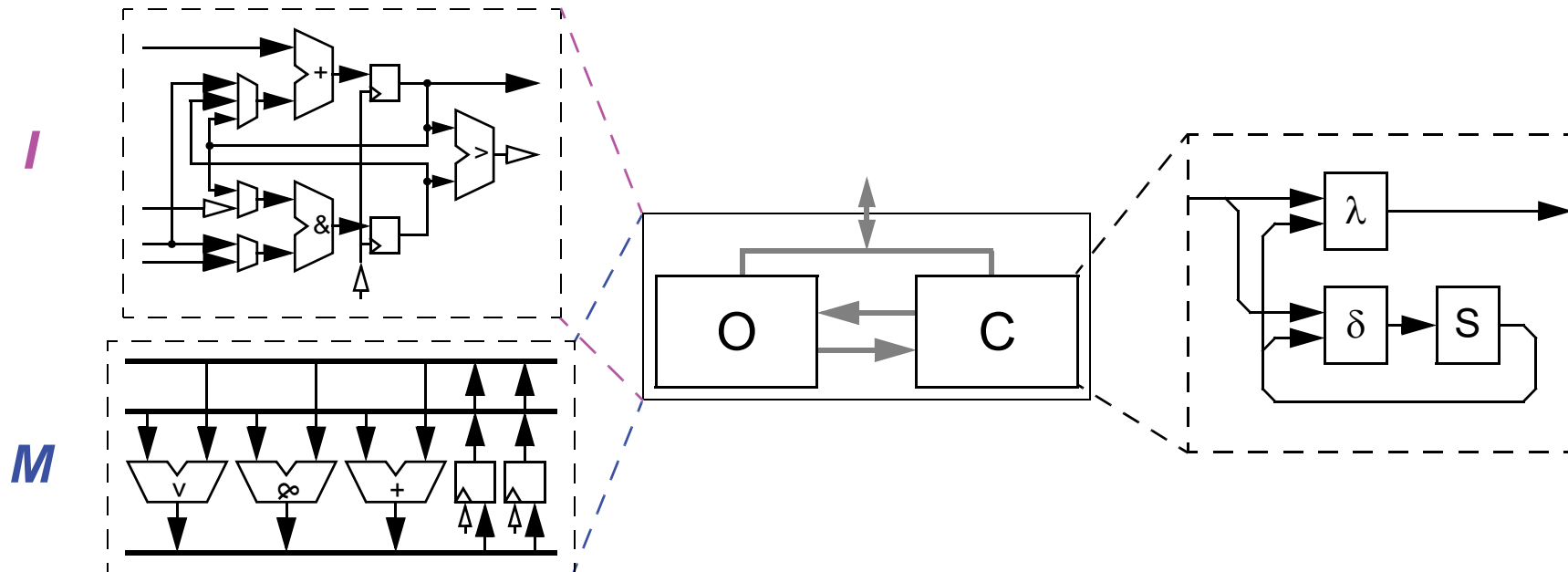
$$x = 2 * n + 2 * m$$

	SA_s	SB_s	E_r1	E_r2
1: r2 <- n	2	0	0	1
2: r2 <- n + r2	2	1	0	1
3: r1 <- m	0	2	1	0
4: r1 <- r1 + m	1	2	1	0
5: r1 <- r1 + r2	1	1	1	0

SA_s & SB_s – väärtus 0 annab väljundisse "00...00"

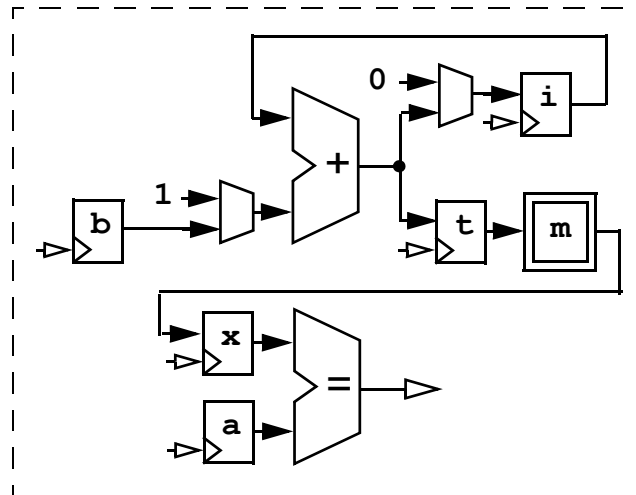
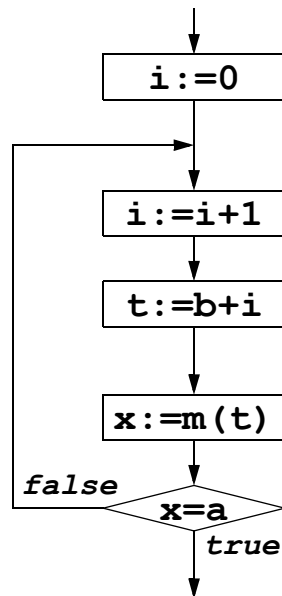
Andmeosa struktuur

- **I-automaat** (~~eririistvara)
 - võimaldab üheaegselt sooritada kõiki funktsionaalselt ühitatavaid operatsioone (mikrokāske)
 - iga registri sisendis kombinatsioonskeem
- **M-automaat** (~~protsessor)
 - iga unikaalse operatsiooni jaoks on oma täitursõlm, üheaegselt võimalik täita tüübilt erinevaid operatsioone
 - andmesiidid



Andmeosa – eridisain või üldotstarbeline?

[Otsimine mälust]

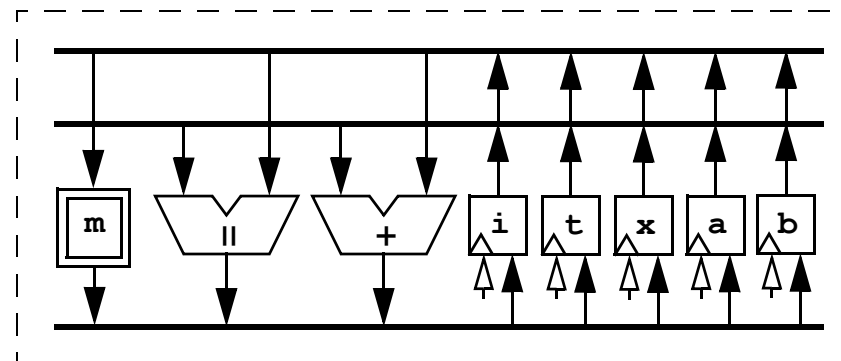


eridisain (e. I)

+ kiire

+ väike

-- paindumatu



üldotstarbeline (e. M)

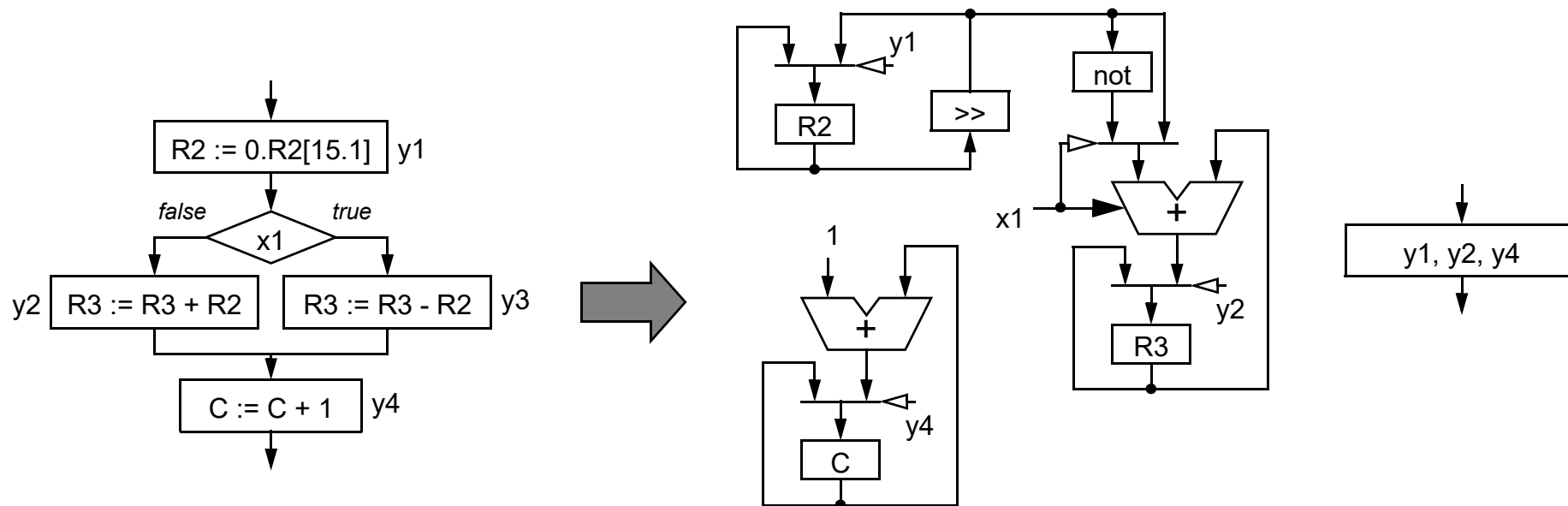
++ paindlik

- aeglane

-- suur

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





Näide #6 – algoritmi realiseerimise optimaalsus

- Algoritm kui programm
 - operatsioonid – andmeosa / järjestus ja tingimused – 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?
 - $A < B \implies A - B < 0$ / $A \neq B \implies A - B \neq 0$ – kõike saab teha lahutajaga?!
 - $A - B \implies A + \overline{B} + 1$ – lahutaja == liitja + invertorid (ja ülekanne 1)
 - sama riistvara kõikidele operatsioonidele või korraga arvutamine?
 - kiirus või suurus? [ja kas see ongi probleem?]



Andmete esitamine

- **Kümnendarvude esitamine kahendkoodis (kahendarvudena)**
 - Arvutamine – liitmine, lahutamine, korrutamine, jagamine
 - Teisendamine – sisend/väljund 10-nd kujul
 - Erinevad arvuformaadid – täisarvud, murdarvud jne.
- **Täiendkood**
 - Kõige levinum, positsiooniline –
$$N = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \cdot 2^i$$
 - Negatiivne arv – $-A == \bar{A} + 1$
- **Täisarvud:** $116_{10} == 01110100_2$ $-116_{10} == 10001100_2$ [n=8, m=0]
- **Püsikomaarvud:** $4,125_{10} == 0100.0010_2$ [n=4, m=4]
- **Ujukomaarvud:** $M \cdot 2^E$ $4,125_{10} == 0,515625 \cdot 2^3 == 0.0011.1000010$
 - S.E.M == sign.exponent.mantissa (märk.aste.mantiss) – E=-8..+7, M=0,5..0,(9)

Digitaalsüsteem

- Digitaalsüsteem = andmeosa + juhtosa

