BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
MÉRÉSTECHNIKA ÉS INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TANSZÉK

Digitális rendszerek tervezése FPGA áramkörökkel Verilog RTL kódolás

Fehér Béla
Szántó Péter, Lazányi János, Raikovich Tamás
BME MIT
FPGA laboratórium

FPGA-k

FPGA: Field Programmable Gate Array

- programozható logikai áramkör

Jelentősebb gyártók:

- Xilinx, Altera, Microsemi (Actel), Lattice, Achronix

Jellemzők

- Komplexitás
  - 50000 – 4millió „kapu”
  - 100 – 1500 I/O láb
  - 100 – 500 MHz működés (terv függő)

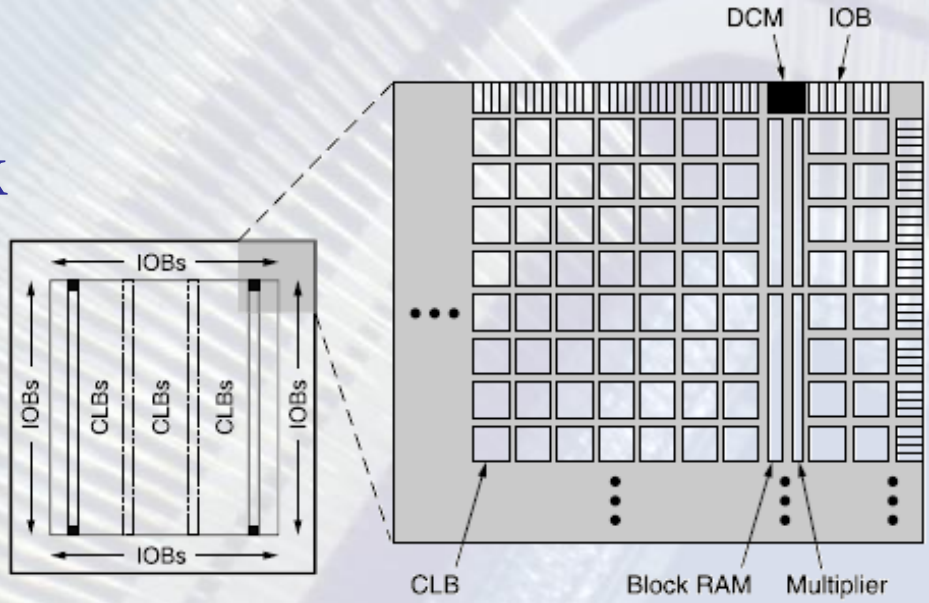
Xilinx FPGA-k

Több család

- Spartan: hatékony, optimalizált struktúra
- Virtex: speciális funkciók, gyorsabb, komplexebb, gazdagabb funkcionalitás
- Ma: Artix, Kintex, Virtex, Zynq

Felépítés:

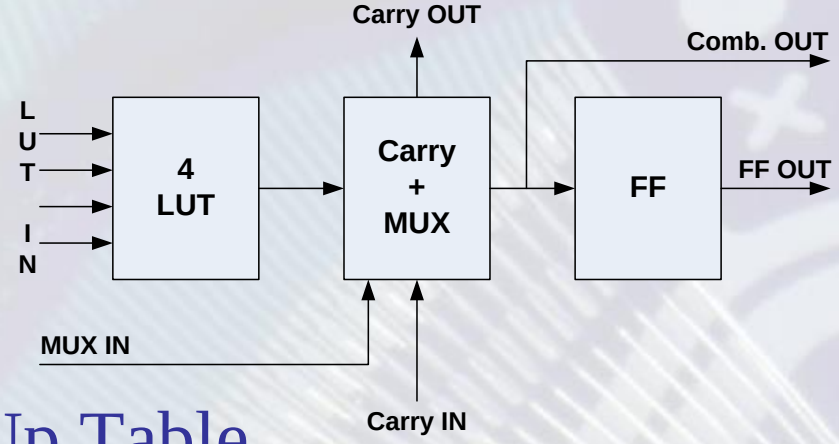
- CLB: logikai blokk
- IOB: I/O blokk
- BlokkRAM
- Szorzó
- Huzalozás



Xilinx FPGA: Alap logikai elem

Logikai elem (Logic Cell):

- 1 LUT4 + 1 FF + kiegészítő logika

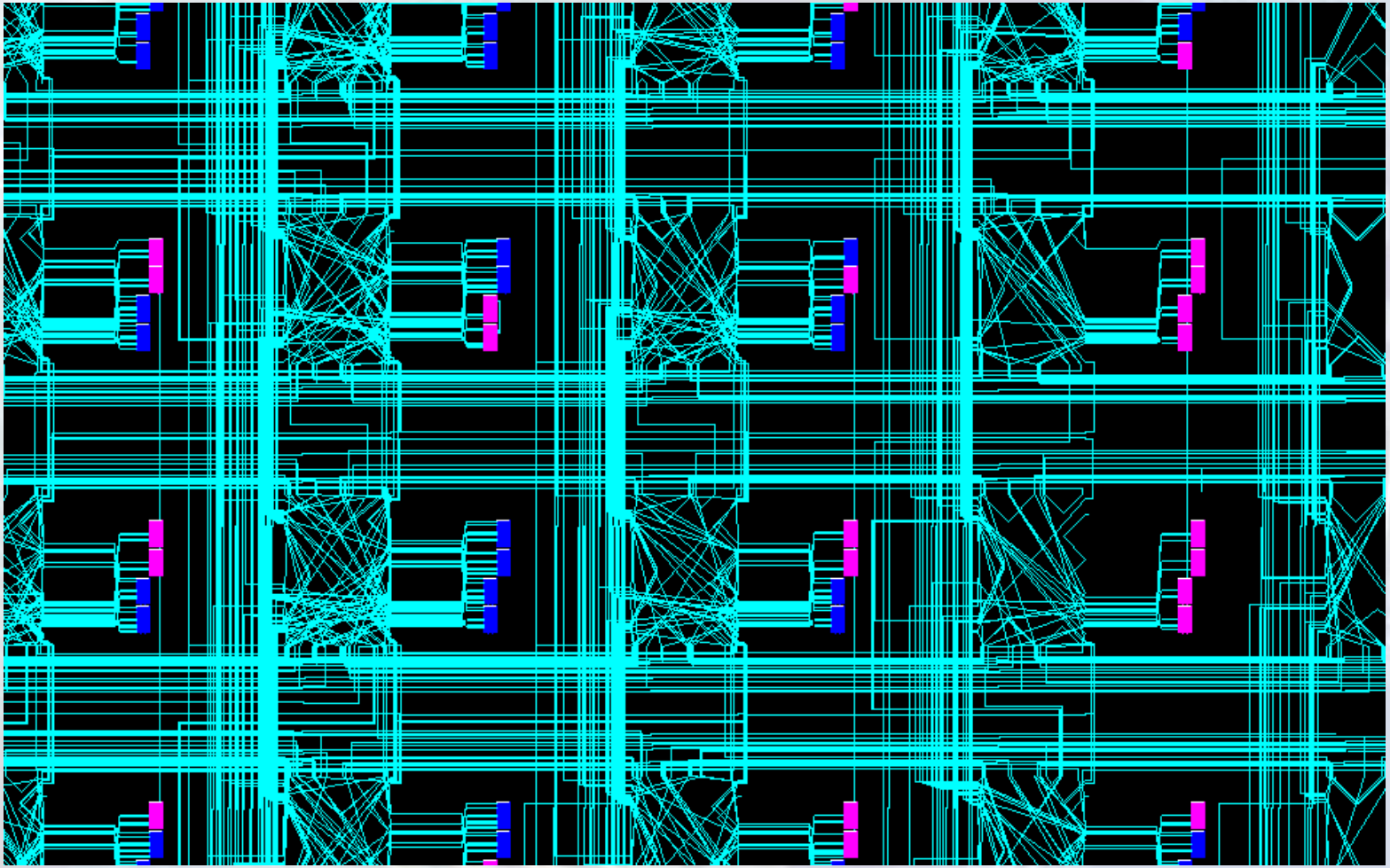


– LUT: Look-Up Table

- 16x1 bites memória (4 bemenet esetén)
- Cím: a logikai függvény bemeneti változói
- Tartalom: igazságtábla
- Bármilyen négy bemenetű, egy kimenetű logikai függvény megvalósítható

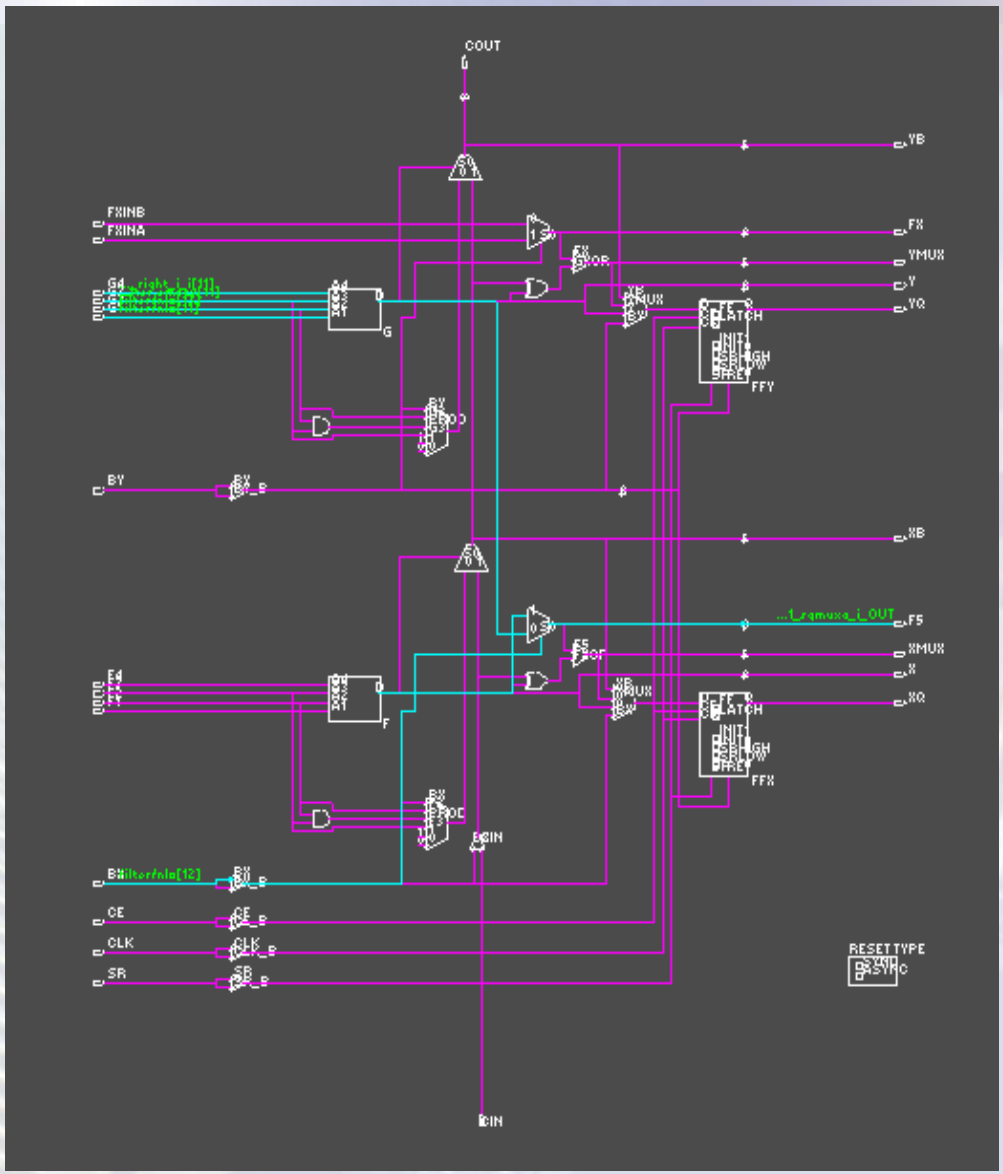
Xilinx FPGA-k

- **Részlet egy kész tervből: logikai blokkok + huzalozás**



Xilinx FPGA-k felépítése

- **A CLB belső felépítése az FPGA Editor-ban nézve**



Xilinx FPGA: konfiguráció

- **A konfigurációt (LUT tartalom, huzalozás, csatlakozások, egyéb paraméterek) SRAM tárolja**
- **Tápfeszültség kikapcsolásakor elveszíti a konfigurációt**
- **Bekapcsolás után konfiguráció szükséges**
  - EEPROM-ból, automatikusan
  - Fejlesztői kábel segítségével ún. JTAG porton keresztül

A HDL nyelvek

- **Verilog**
  - 1984: Gateway Design Automation Inc.
  - 1990: Cadence -> Open Verilog International
  - 1995: IEEE szabványosítás
  - 2001: Verilog 2001
  - 2005: System Verilog
- **VHDL**
  - 1983-85: IBM, Texas Instruments
  - 1987: IEEE szabvány
  - 1994: VHDL-1993

Egyéb megoldások

- **HDL fejlesztés a szoftver fejlesztéshez viszonyítva továbbra is időigényes**
- **Sok fejlesztő rendelkezik C/C++ ismerettel, viszonylag kevés HDL ismerettel**
- **Magasszintű hardver leíró nyelvek**
  - SystemC: szabványos, ma már (részben) szintetizálható, C++ alapú
  - Xilinx Vivado HLS, Altera C2H
  - Catapult-C: C++ kiegészítések nélkül
  - Altera/Xilinx OpenCL
  - NI LabView FPGA, Matlab Simulink

HDL nyelvek célja

- **Hardver modellezés**
  - Mindkét nyelv jelentős része csak a hardver funkciók modellezésére ill. szimulációra használható
  - Szintetizálható részhalmaz szintézer függő
- **Kapuszintű modulokból építkező, kapcsolási rajzon alapuló tervezési módszerek leváltása**
- **RTL (Register Transfer Level) szintű leírás**
  - Automatikus hardver szintézis a leírásból
  - Tervezői hatékonyság növelése

HDL nyelvek

- **Alapvetően moduláris felépítésű tervezést tesz lehetővé**
- **HDL modul**
  - Be-, kimenetek definiálása
  - Be-, kimenetek közötti logikai kapcsolatok és időzítések definiálása
- **NEM szoftver**
  - Alapvetően **időben párhuzamos, konkurrens** működést ír le

Verilog szintaktika

- **Megjegyzések (mint C-ben)**
  - // egy soros
  - /* */ több soros
- **Konstansok**
  - <bitszám><‘alap><érték>
    - 5’b00100: 00100 decimális érték: 4, 5 bites
    - 8’h4e: 1001110 decimális érték: 78, 8 bites
    - 4’bZ: ZZZZ nagy impedanciás állapot

Modulok

- **„Építőelem” komplex rendszerek létrehozására**
- **Hierarchikus leírás, feladat partícionálás**
- **Alkalmazható felülről lefelé, alulról felfelé tervezéskor**
- **Egy modul tetszőleges példányban beépíthető**
  - Nem szubrutin, mindegyik példány önálló valódi HW, saját erőforrásokkal
- **Adatkapcsolat az interfész leíráson keresztül**

Modul interfészlista

- **Preferált a kompakt lista, kevesebb hiba**

„module” kulcsszó

„module” név

```
module test(
        input clk,
        input [7:0] data_in,
        output [7:0] data_out,
        output reg valid
);
…….
…….
…….
endmodule
```

Modul bemeneti portjai

Modul kimeneti portjai

„endmodule” kulcsszó

Kívánt funkcionalítás

Hagyományos interfész lista

- **Dupla munka, kettős hibalehetőség**

„module” kulcsszó

„module” név

Port felsorolás
(típus nélkül)

```
module test(clk, data_in, data_out, valid);
input clk;
input [7:0] data_in;
output [7:0] data_out;
output reg valid;
……..
……..
……..
endmodule
```

Portok típusának
Megadása
Külön deklarációval

„endmodule”
kulcsszó

Bitműveletek

- **Logikai műveletek bitvektorokon (egy vagy több bites adatokon)**
  - ~, &, |, ^, (negálás, és, or, xor)
  - ~&, ~|, ~^ (NAND, NOR, XNOR)
- **Vektorokon bitenkén, pl:**
  - 4’b1101 & 4’b0110 = 4’b0100
- **Ha a két operandus szélessége nem egyezik meg, a kisebbik az MSB biteken 0-val kiterjesztve**
  - 2’b11 & 4’b1101 = 4’b0001
- **A feltételes kifejezések logikai operátorai az igaz-hamis vizsgálatokhoz eltérőek:**
  - !, &&, || (negálás, és, vagy)

Bit redukciós operátorok

- **Egy operandusú művelet, a bitvektor összes bitjét önálló egybites változóként értelmezve, eredménye is egy bites**
  - &, ~&, |, ~|, ^, ~^ (és, nem és, vagy, nem vagy)
  - Példák:
    - &4’b1101 = 1’b0
    - |4’b1101 = 1’b1
  - Használat:
    - Számláló kimenet végérték? assign tc = &cnt;
    - ALU kimenet nulla? assign z = ~|result;

Komparátor operátorok

- **C-szintakszissal megegyező**
- **Egyenlőség**
  - ==, !=
  - ===: egyenlőség az „x, z” értékek figyelembevételével, azaz bizonyos bitek értéke tetszőleges
  - !==: nem egyenlő, „x, z” figyelembevételével
- **Nem egyenlőség**
  - <, >, <=, >=

Aritmetikai operátorok

- **C-szintakszissal megegyező**
- **Operátorok: +, -, *, /, %**
  - Nem mindegyik szintetizálható
    - Szintézer függő, de tipikusan / pl. csak akkor, ha az osztó kettő hatvány
    - Szorzásra választható implementációs stílus
      - Beépített blokk vagy LUT hálózat
  - Negatív számok kettes komplemens kódban

Egyéb operátorok

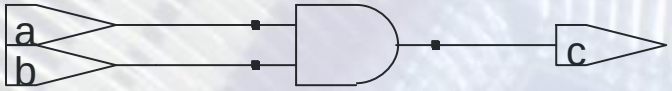
- **Konkatenálás (összefűzés): {}, pl:**
  - {4’b0101, 4’b1110} = 8’b01011110
  - {2{3’b101},2’b00} = 8’b10110100
- **Shift operátor**
  - <<, >>
  - <<<, >>> Előjeles shift, MSB nem változik
- **Bit kiválasztás**
  - Kiválasztott rész konstans
  - data[5:3]

Adattípusok

- **A szintézis szempontjából kétfajta adat van**
- **A huzal típusú „wire”**
  - Nevének megfelelően viselkedik (vezeték)
  - Nincs saját állapota, az mindig örökli
  - Pl. 8 bites vezeték: wire [7:0] data;
- **A változó típusú „reg”**
  - Két értékadás között állapotát tartja
  - Értékadás történhet eseményvezérlésre , vagy órajelre
  - Szintézis utáni eredmény nem mindig regiszter
    - Vezeték
    - Latch
    - Flip-flop
  - Pl. 8 bites regiszter: reg [7:0] data;

Assign

- **Tipikusan kombinációs logika leírására**
- **„assign”-val csak „wire” típusú változónak lehet értéket adni**
- **Konkurrens, folytonos értékadás**
  - A bal oldali változó bármely változása a kifejezés kiértékelődését, új értékének meghatározását okozza
    - Pl. assign c = a & b;



- **Egy változó csak egy „assign” által kaphat értéket**

Always blokk

- **Magas szintű viselkedési leírás**
- **Szintakszis:**

```
always @ (….)
begin
…..
…..
end
```

Érzékenységi lista

Blokkon belüli műveletek

  - Egy változó csak egy „always” blokkban kaphat értéket
  - Always blokk nem lehet érzékeny a saját kimenetére
  - Az „always” blokkok egymással párhuzamosan működnek

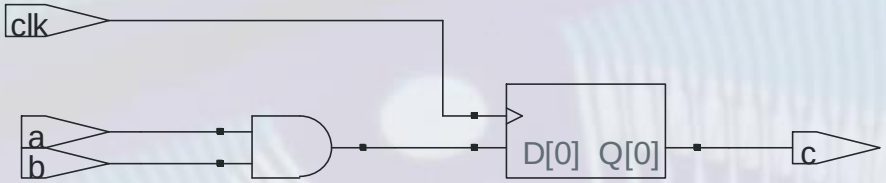
Always – értékadás

- **Eljáráson belül kétfajta értékadás**
- **Blokkoló értékadás: =**
  - Blokkolja az utána következő értékadásokat -> szekvenciális utasítás végrehajtás
- **Nem blokkoló értékadás: <=**
  - A nem blokkoló értékadások párhuzamosan hajtódnak végre, azaz a baloldali kifejezések kiértékelődnek az aktuális változó értékek szerint és az eredmény csak a fázis végén adódik át a bal oldali változónak
- **Blokkoló – nem blokkoló példa később**
  - A Verilog egyik népszerű témája

Always – Flip Flop

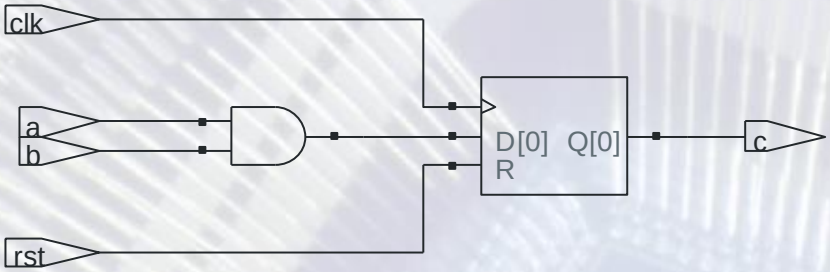
- **Flip Flop: élérzékeny D tároló**

```
always @ (posedge clk)
        c <= a & b;
```



- **Szinkron reset**

```
always @ (posedge clk)
if (rst)
        c <= 1'b0;
else
        c <= a & b;
```



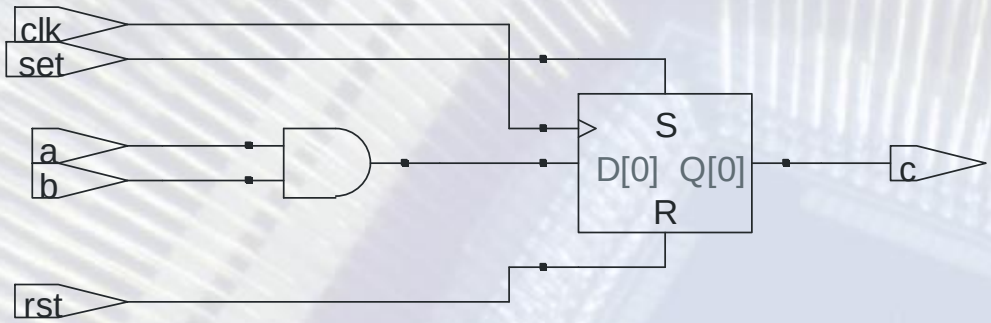
- **Aszinkron reset**

```
always @ (posedge clk, posedge rst)
if (rst)
        c <= 1'b0;
else
        c <= a & b;
```

Always – Flip Flop

- **Xilinx FPGA-kban a FF egy CLK bemenettel, két alaphelyzet beállító jellel és egy CE órajel engedélyező bemenettel rendelkezik.**
  - Szinkron vezérlés: Minden jel kiértékelése szinkron, ebben az esetben érvényesítés az órajel aktív élénél

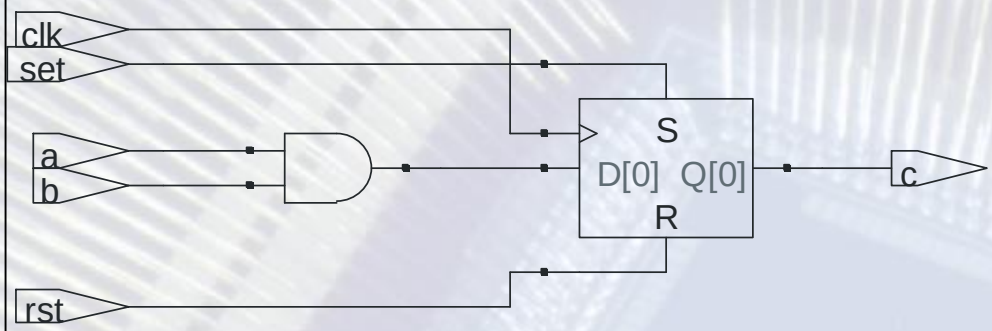
```
always @ (posedge clk)
if (rst)
        c <= 1'b0;
else if (set)
        c <= 1'b1;
else
        c <= a & b;
```



Always – Flip Flop

- **Xilinx FPGA-kban a FF egy CLK bemenettel, két alaphelyzet beállító jellel és egy CE órajel engedélyező bemenettel rendelkezik.**
  - Aszinkron vezérlés: A vezérlőjelek változása azonnal érvényre jut, prioritás a felírás sorrendjében

```
always @ (posedge clk, posedge rst,
posedge set)
if (rst)
        c <= 1'b0;
else if (set)
        c <= 1'b1;
else
        c <= a & b;
```

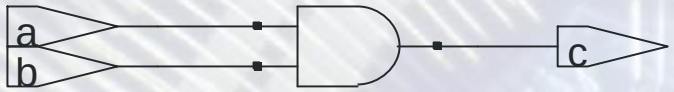


Always – kombinációs logikához

- **Szemléletesen:**
  - Az always blokk eseményvezérelt
  - A bemenőjelek bármely változása ilyen esemény
  - Ennek hatására az eljárás lefut, a kimenet kiértékelődik

```
always @ (a, b)
   c <= a & b;
```

```
always @ (*)
   c <= a & b;
```

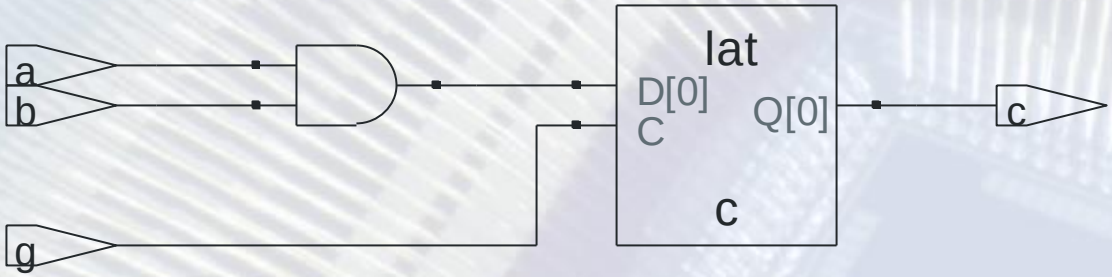


  - Ha egy változó kimarad az érzékenységi listából, akkor véletlen latch keletkezhet

Always – latch

- **Latch tároló természetesen szándékosan is generálható:**
  - Az engedélyező „gate” bemenet magas értéke mellett a tároló transzparens, míg a „gate” bemenet alacsony értéke mellett zárt, tartja értékét.

```
always @ (*)
If (g)
   c <= a & b;
```

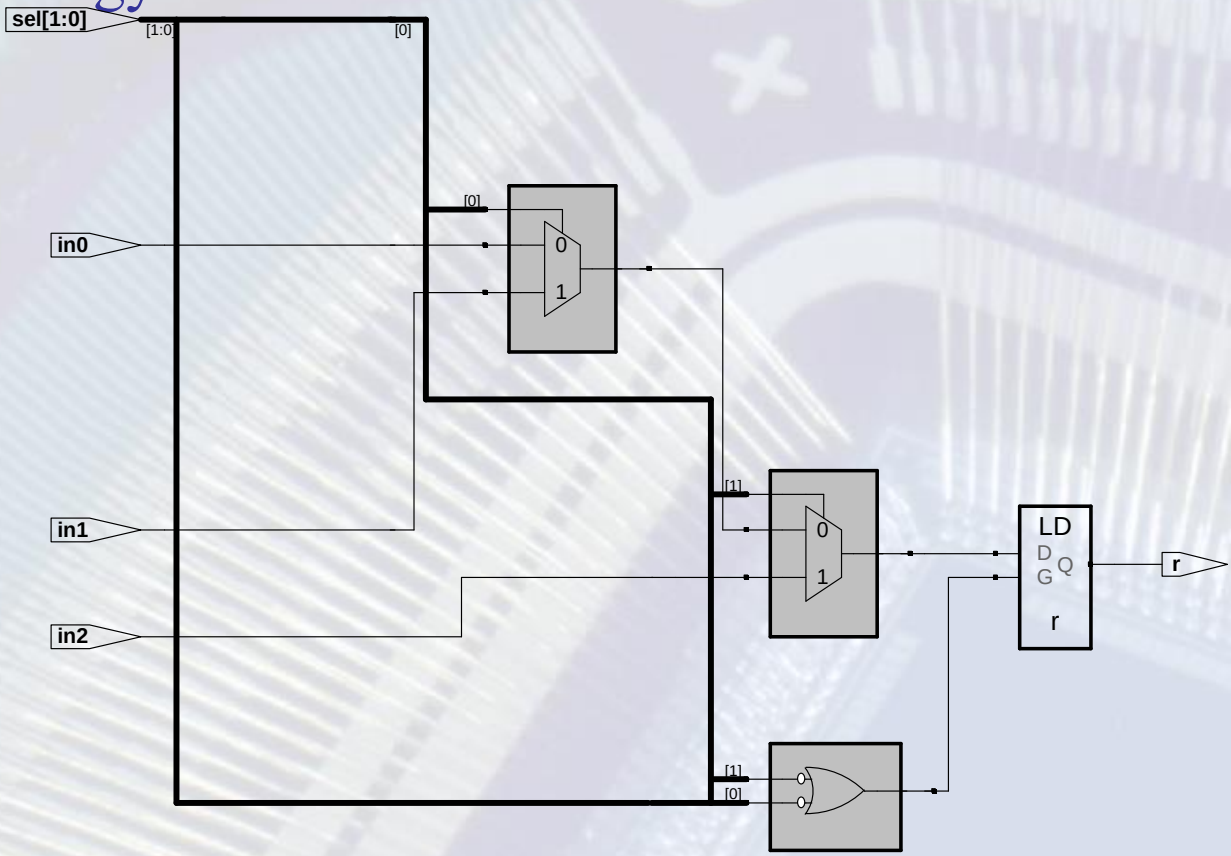


Always – latch hiba

- **A tipikus véletlen „Latch”**
  - Nem teljes “if” vagy „case” szerkezet
  - Szintézer általában figyelmeztet

```
always @ (*)
case (sel)
   2’b00: r <= in0;
   2’b01: r <= in1;
   2’b10: r <= in2;
endcase
```

```
always @ (*)
if (sel==0)
   r <= in0;
else if (sel==1)
   r <= in1;
else if (sel==2)
   r <= in2;
```

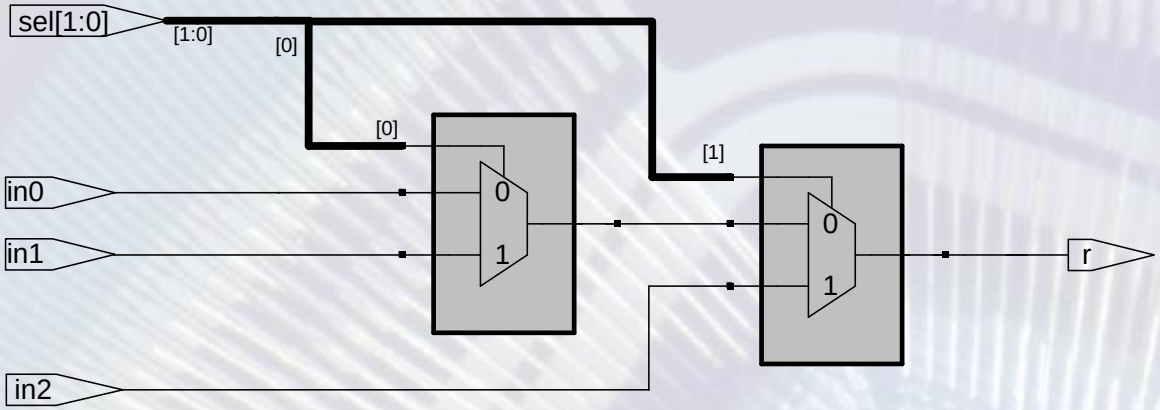


Always – helyes

- **Helyes kód**

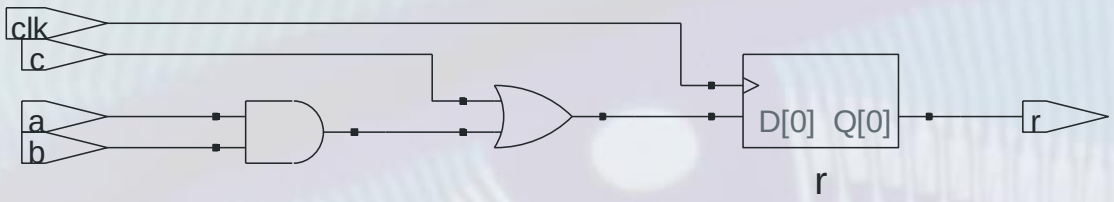
```
always @ (*)
case (sel)
   2'b00: r <= in0;
   2'b01: r <= in1;
   2'b10: r <= in2;
   default: r <= 'bx;
endcase
```

```
always @ (*)
if (sel==0)
   r <= in0;
else if (sel==1)
   r <= in1;
else
   r <= in2;
```

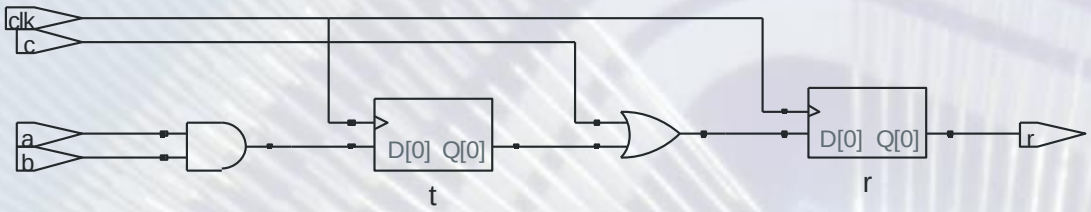


Blokkoló – nem blokkoló (1)

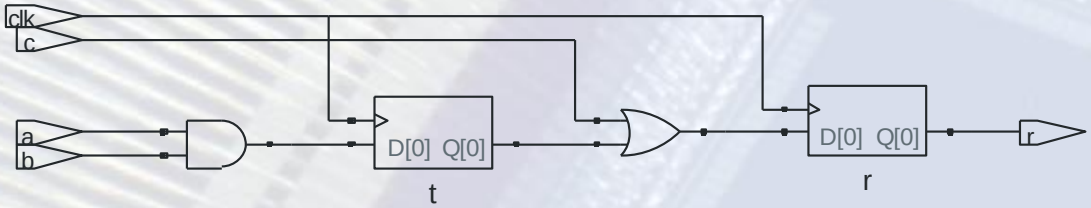
```
reg t, r;
always @ (posedge clk)
begin
    t = a & b;
    r = t | c;
end
```




```
reg t, r;
always @ (posedge clk)
begin
    t <= a & b;
    r <= t | c;
end
```

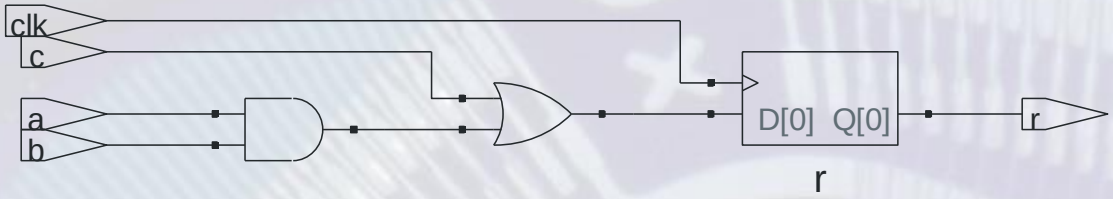



```
reg t, r;
always @ (posedge clk)
begin
    r = t | c;
    t = a & b;
end
```

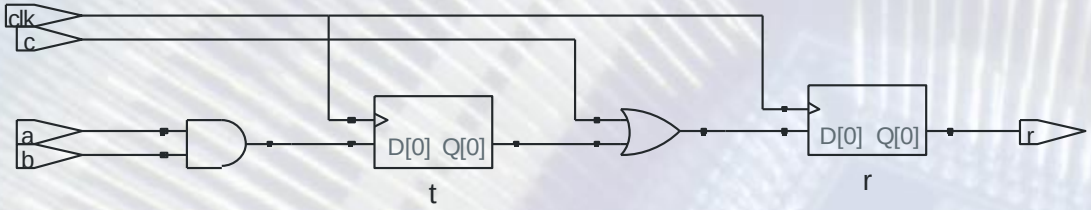


Blokkoló – nem blokkoló (2)

```
reg t, r;
always @ (posedge clk)
begin
    t = a & b;
    r <= t | c;
end
```




```
reg t, r;
always @ (posedge clk)
begin
    t <= a & b;
    r = t | c;
end
```



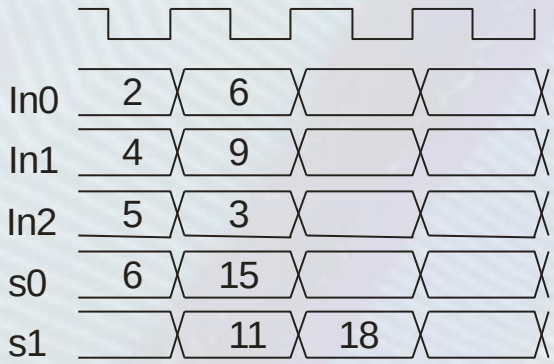
Blokkoló – nem blokkoló (3)

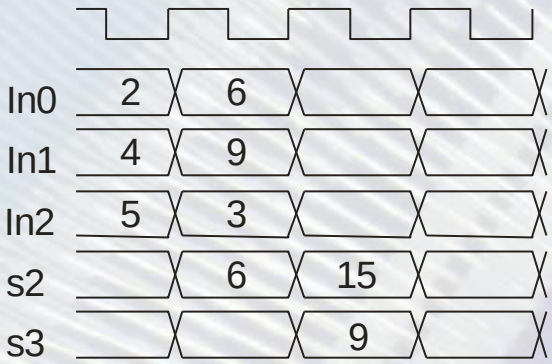
Pl. 3 bemenetű összeadó

```
reg s0, s1;
always @ (posedge clk)
begin
    s0 = in0 + in1;
    s1 = s0 + in2;
end
```

```
reg s2, s3;
always @ (posedge clk)
begin
    s2 <= in0 + in1;
    s3 <= s2 + in2;
end
```

```
reg s4;
always @ (posedge clk)
begin
    s4 <= in0 + in1 + in2;
end
```



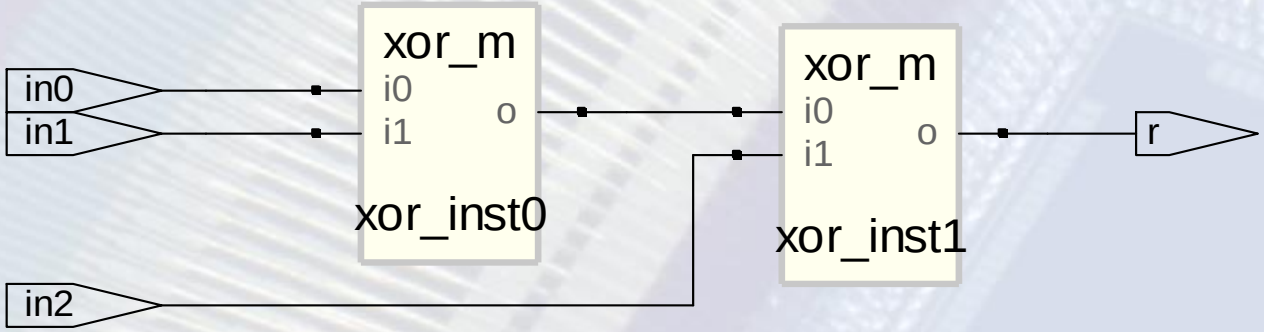


Strukturális leírás

- **Hierarchia felépítése: modulok összekapcsolása**

```
module top_level (input in0, in1, in2, output r);
wire xor0;
xor_m xor_inst0(.i0(in0), .i1(in1), .o(xor0));
xor_m xor_inst1(.i0(xor0), .i1(in2), .o(r));
endmodule
```

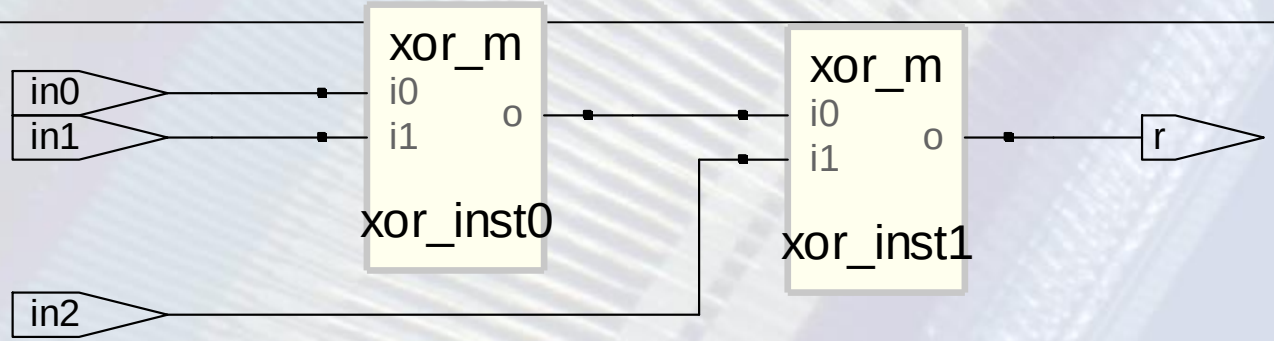
```
module top_level (input in0, in1, in2, output r);
wire xor0;
xor_m xor_inst0(in0, in1, xor0);
xor_m xor_inst1(xor0, in2, r);
endmodule
```



Strukturális leírás - generate

- **Hierarchia felépítése: modulok összekapcsolása**

```
wire [2:0] in_bus0; wire [1:0] in_bus1;
assign in_bus0[0] = in0;
assign in_bus1 = {in2, in1};

genvar k;
generate
for (k=0; k < 2; k=k+1)
begin: inst
    xor_m(.i0(in_bus0[k]), .i1(in_bus1[k]), .o(in_bus0[k+1]);
end
endgenerate
```



Példa – MUX (1.)

- **Különböző leírási stílusok a 2:1 multiplexerre**

```
module mux_21 (input in0, in1, sel, output r);
assign r = (sel==1'b1) ? in1 : in0;
endmodule
```

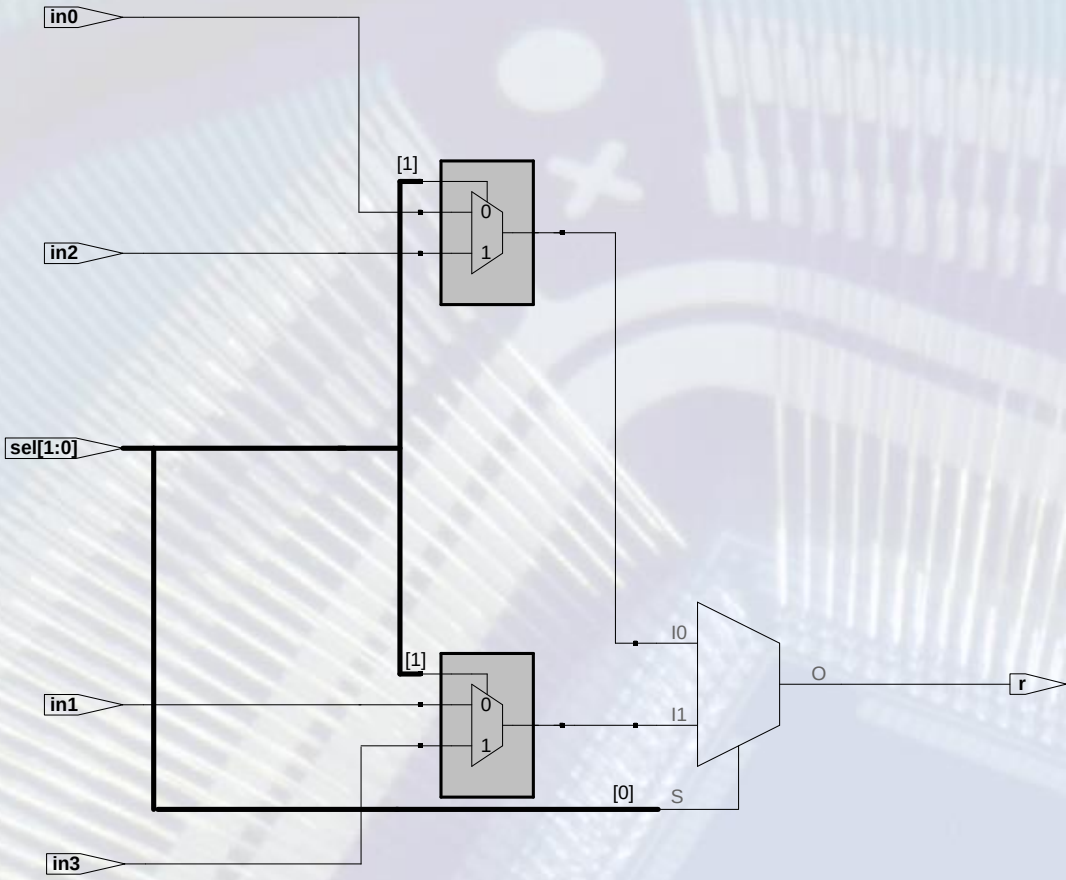
```
module mux_21 (input in0, in1, sel, output reg r);
always @ (*)
if (sel==1'b1) r <= in1;
else           r <= in0;
endmodule
```

```
module mux_21 (input in0, in1, sel, output reg r);
always @ (*)
case(sel)
    1'b0: r <= in0;
    1'b1: r <= in1;
endcase
endmodule
```

Példa – MUX (2.)

- **4:1 multiplexer**

```
module mux_41 (input in0, in1, in2, in3, input [1:0] sel, output reg r);
always @ (*)
case(sel)
    2'b00: r <= in0;
    2'b01: r <= in1;
    2'b10: r <= in2;
    2'b11: r <= in3;
endcase
endmodule
```



- **1 bites esetben**

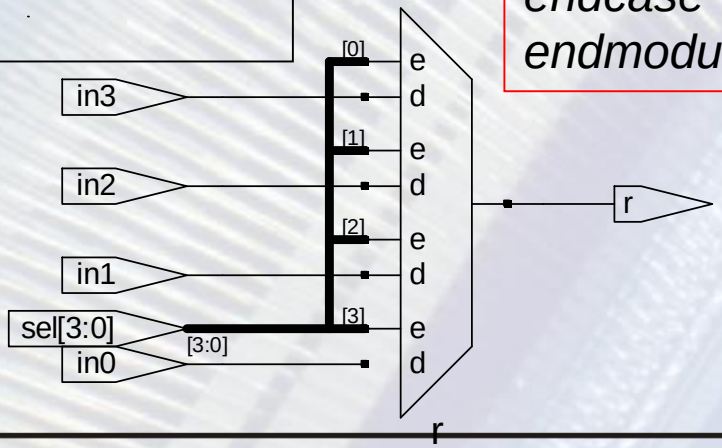
```
module mux_41 (input [3:0] in,
               input [1:0] sel,
               output r);

assign r = in[sel];

endmodule
```

Példa – MUX (3.)

- **4:1 multiplexer, 4 bites dekódolt kiválasztó jelek**

```
always @ (*)
casez(sel) /*synthesis parallel_case*/
    4'b1???: r <= in0;
    4'b?1??: r <= in1;
    4'b??1?: r <= in2;
    4'b???1: r <= in3;
    default:   r <= 'bx;
endcase
endmodule
```

```
always @ (*)
case(sel)
    4'b1000: r <= in0;
    4'b0100: r <= in1;
    4'b0010: r <= in2;
    4'b0001: r <= in3;
    default:   r <= 'bx;
endcase
endmodule
```



Példa – 1 bites összeadó

```
module add1_full (input a, b, cin, output cout, s);
xor3_m xor(.i0(a), .i1(b), .i2(cin), .o(s));
wire a0, a1, a2;
and2_m and0(.i0(a), .i1(b), .o(a0));
and2_m and1(.i0(a), .i1(cin), .o(a1));
and2_m and2(.i0(b), .i1(cin), .o(a2));
or3_m or(.i0(a0), .i1(a1), .i2(a2) , .o(cout))
endmodule
```

```
module add1_full (input a, b, cin, output cout, s);
    assign s = a ^ b ^ cin;
    assign cout = (a & b) | (a & cin) | (b & cin);
endmodule
```

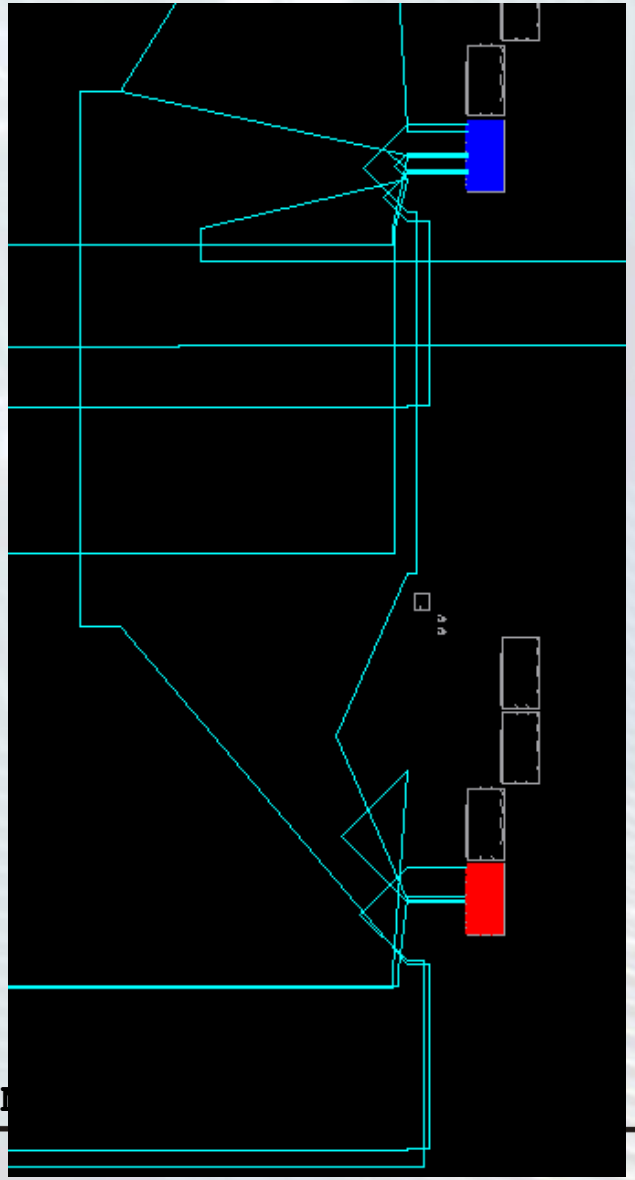
```
module add1_full (input a, b, cin, output cout, s);
    assign {cout, s} = a + b + cin;
endmodule
```

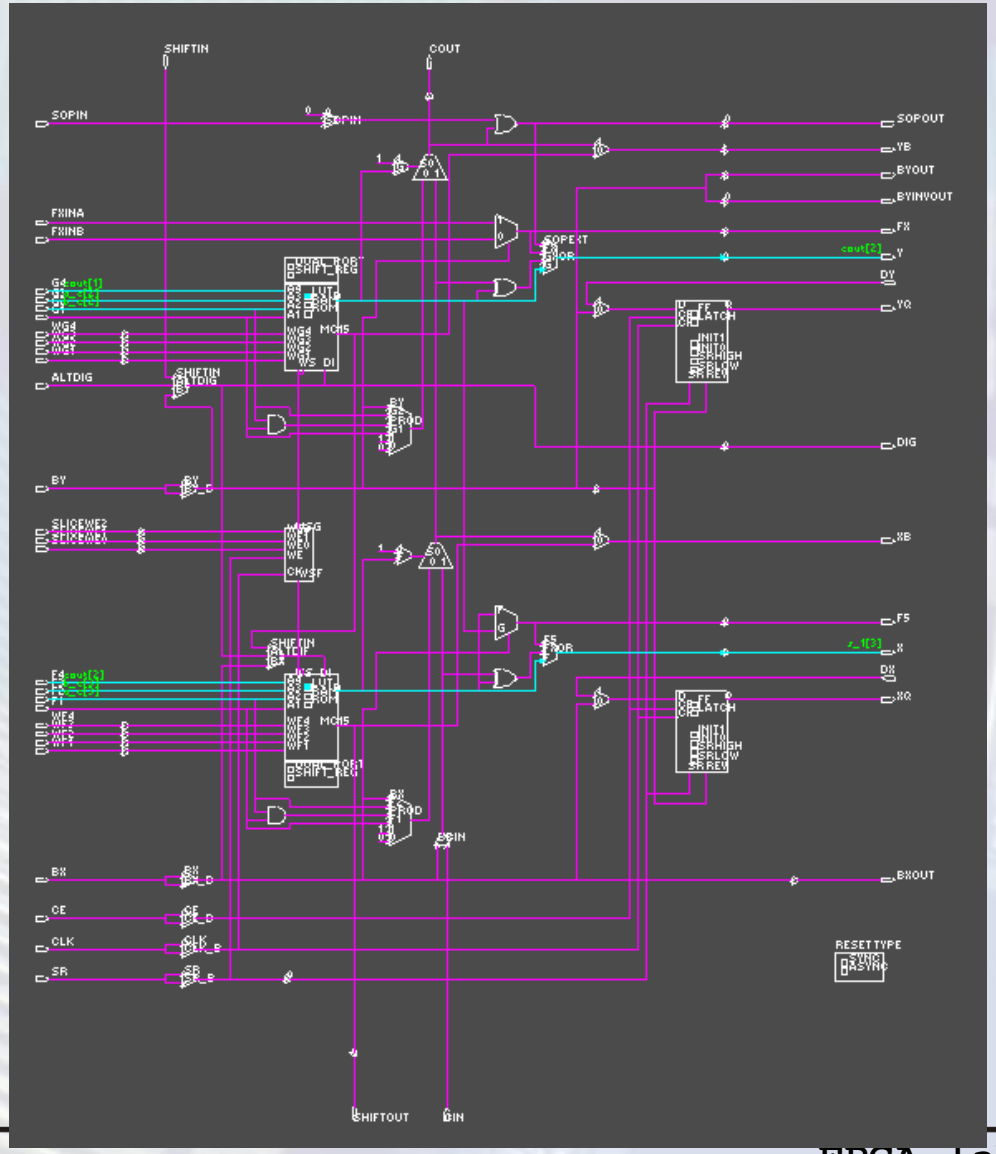
Példa – 4 bites összeadó

```
module add4 (input [3:0] a, b, output [4:0] s);
wire [3:0] cout;
add1_full add0(.a(a[0]), .b(b[0]), .cin(1'b0),    .cout(cout[0]), .s(s[0]));
add1_full add1(.a(a[1]), .b(b[1]), .cin(cout[0]), .cout(cout[1]), .s(s[1]));
add1_full add2(.a(a[2]), .b(b[2]), .cin(cout[1]), .cout(cout[2]), .s(s[2]));
add1_full add3(.a(a[3]), .b(b[3]), .cin(cout[2]), .cout(s[4]),    .s(s[3]));
endmodule
```

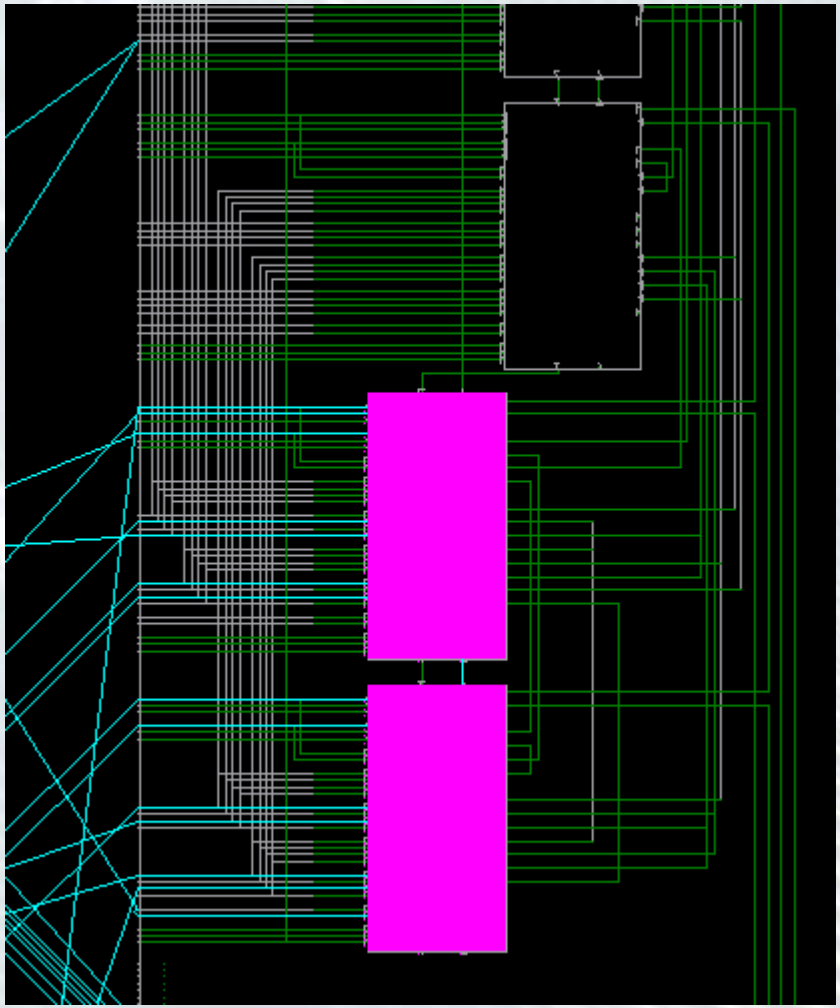
```
module add4 (input [3:0] a, b, output [4:0] s);
assign s = a + b;
endmodule
```

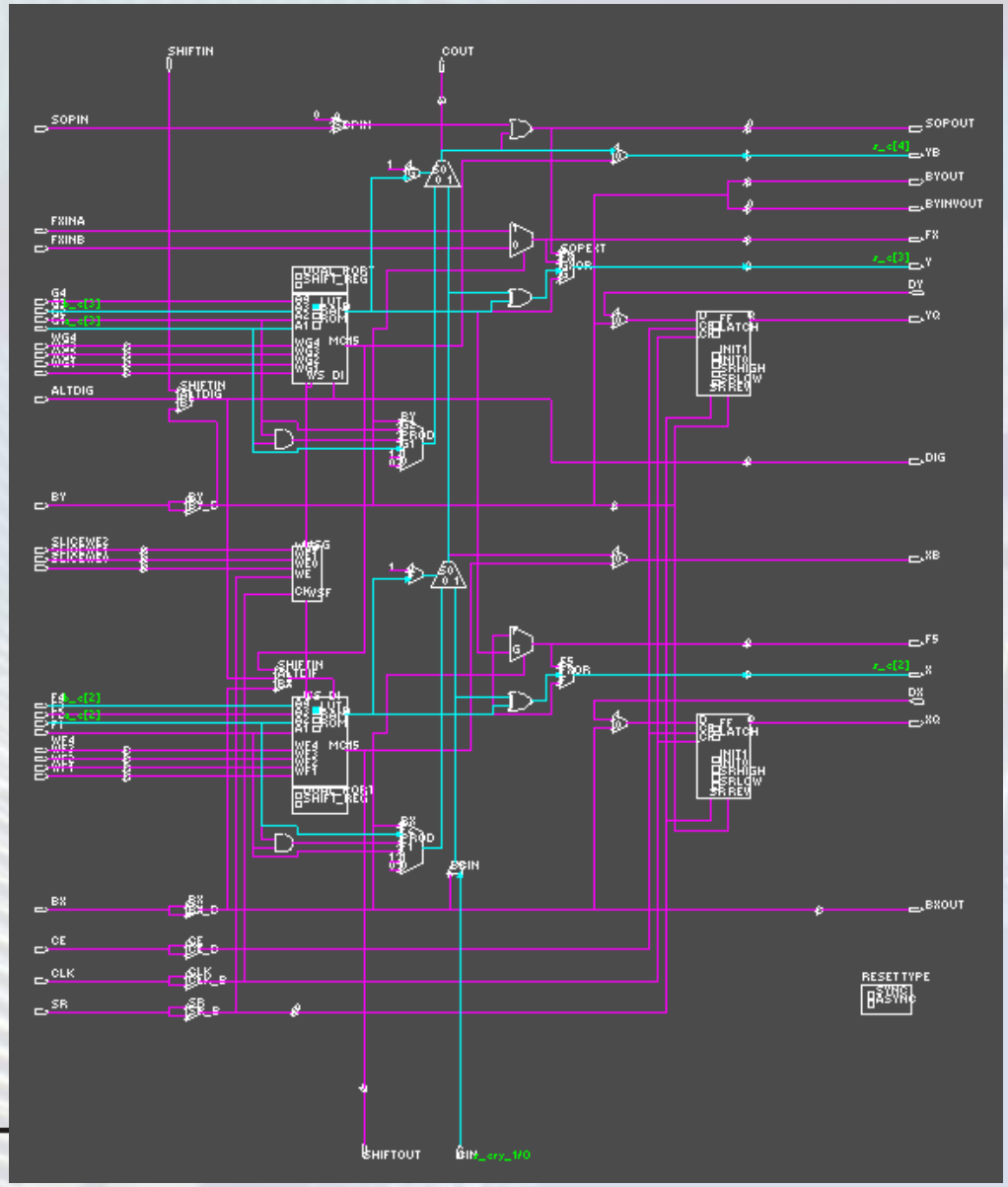
Példa – 4 bites összeadó, logikai op.



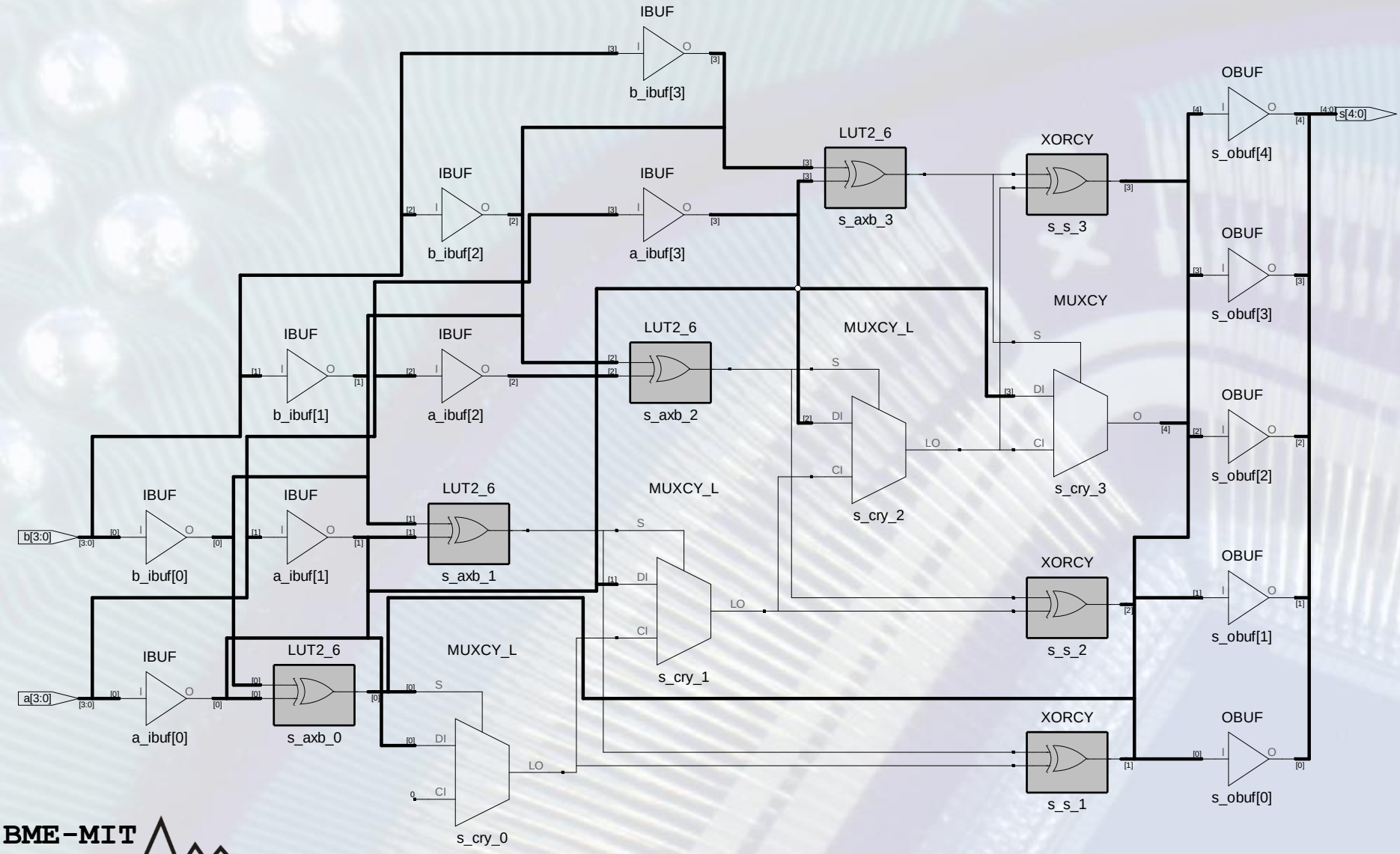


Példa – 4 bites összeadó, + operátor





Példa – 4 bites összeadó, +



Példa: Shift regiszter

- **16 bites shift regiszter,**
  - A LUT4 SRL16 soros shiftregiszter kihasználására

```
module shr_module (input clk, sh, din, output dout);

reg [15:0] shr;
always @ (posedge clk)
if (sh)
    shr <= {shr[14:0], din};

assign dout = shr[15];

endmodule
```

Példa: Számláló

- **Számláló minta leírás**
  - Szinkron, 8 bites
  - Szinkron RESET
  - Tölthető
  - Engedélyezhető
  - fel/le számláló

- **Megj:**
  - A CE nagyobb prioritású, mint a töltés, ez nem tipikus

```
module m_cntr (input        clk, rst, ce, load, dir,
                  input  [7:0] din,
                  output [7:0] dout);

reg [7:0] cntr_reg;
always @ (posedge clk)
if (rst)
    cntr_reg <= 0;
else if (ce)
    if (load)
        cntr_reg <= din;
    else if (dir)
        cntr_reg <= cntr_reg – 1;
    else
        cntr_reg <= cntr_reg + 1;

assign dout = cntr_reg;

endmodule
```

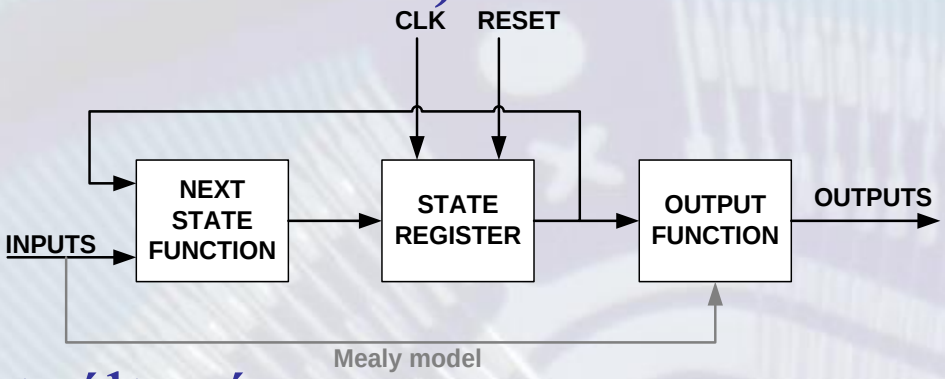
Háromállapotú vonalak

- **Kétirányú kommunikációs vonalak**
  - Mai FPGA-kban belül nincs HiZ buffer!
  - I/O lábak mind kétirányúak
    - Külső memóriák adatbusza
    - Processzoros busz

```
module tri_state (input clk, inout [7:0] data_io);

wire [7:0] data_in, data_out;
wire bus_drv;

assign data_in = data_io;
assign data_io = (bus_drv) ? data_out : 8'bz;

endmodule
```

FSM – Finite State Machine

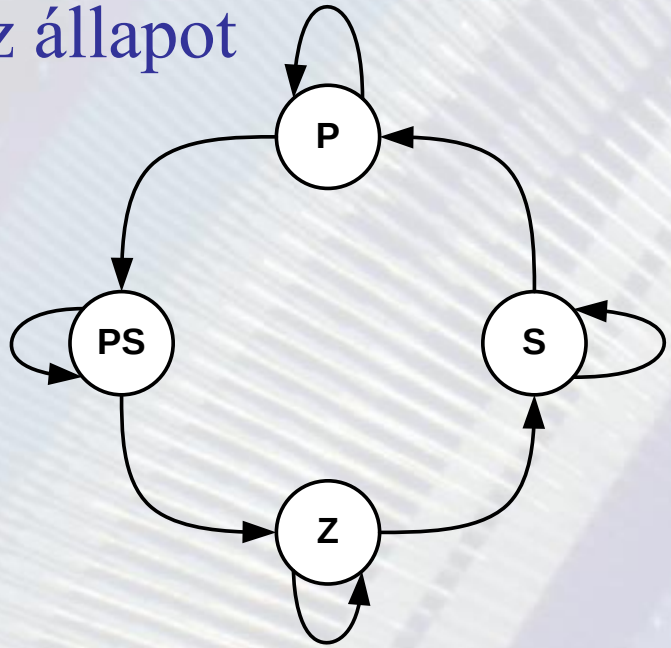
- **Állapotgép – vezérlési szerkezetek kialakítása**
- **Általános struktúra (Moore modell)**



  - State register: állapotváltozó
  - Next state function: következő állapotot dekódoló logika
  - Output function: kimeneti jeleket előállító logika
    - Moore: állapotváltozó alapján
    - Mealy: állapotváltozó + bemenetek alapján

FSM példa

- **Közlekedési lámpa**
  - Állapotok: piros, sárga, zöld, piros-sárga (a villogó sárga nem implementált)
  - Bemeneti változók: időzítő az egyes állapotokhoz
  - Kimenet: az állapot



FSM példa – Verilog (1)

```
module lampa(
        input           clk, rst,
        output reg [2:0] led);

parameter PIROS     = 2'b00;
parameter PS        = 2'b01;
parameter ZOLD      = 2'b10;
parameter SARGA     = 2'b11;

reg [15:0] timer;
reg [1:0] state_reg;
reg [1:0] next_state;

always @ (posedge clk)
if (rst)
        state_reg <= PIROS;
else
        state_reg <= next_state;
```

```
always @ (*)
case(state_reg)
        PIROS: begin
          if (timer == 0)
            next_state <= PS;
          else
            next_state <= PIROS;
          end
        PS: begin
          if (timer == 0)
            next_state <= ZOLD;
          else
            next_state <= PS;
          end
        SARGA: begin
          if (timer == 0)
            next_state <= PIROS;
          else
            next_state <= SARGA;
          end
        ZOLD: begin
          if (timer == 0)
            next_state <= SARGA;
          else
            next_state <= ZOLD;
          end
        default:
          next_state <= 3'bxxx;
endcase
```

FSM példa – Verilog (2)

```
always @ (posedge clk)
case(state_reg)
        PIROS: begin
          if (timer == 0)
            timer <= 500;       //next_state <= PS;
          else
            timer <= timer - 1;
          end
        PS: begin
          if (timer == 0)
            timer <= 4000;      //next_state <= ZOLD;
          else
            timer <= timer - 1;
          end
        SARGA: begin
          if (timer == 0)
            timer <= 4500;      //next_state <= PIROS;
          else
            timer <= timer - 1;
          end
        ZOLD: begin
          if (timer == 0)
            timer <= 500;       //next_state <= SARGA;
          else
            timer <= timer - 1;
          end
endcase
```

Időzítő

- Állapotváltáskor egy állapotfüggő kezdő-értéket tölt be
- Lefelé számol
- == 0 : állapotváltás

```
always @ (*)
case (state_reg)
        PS:    led <= 3'b110;
        PIROS: led <= 3'b100;
        SARGA: led <= 3'b010;
        ZOLD:  led <= 3'b001;
endcase

endmodule
```

Paraméterezett modulok

- **Paraméterezhető szélességű összeadó**

```
module add(a, b, s);
    parameter width = 8;
    input [width-1:0] a, b;
    output [width:0] s;
assign s =  a + b;
endmodule
```

```
module add
#(
    parameter width = 8
)(
    input [width-1:0] a, b,
    output [width:0] s
);

assign s =  a + b;

endmodule
```

- **Paraméterezhető modul felhasználása**

```
wire [15:0] op0, op1;
wire [16:0] res;

add #(
        .width(16)
        )
add_16(
      .a(op0),
      .b(op1),
      .s(res)
      );
```

Generate: for

- **Funkcionális elemek többszöri generálása**
  - Ciklusban minden Verilog konstrukció előfordulhat

```
module adec(
        input          cs,
        input    [7:0] addr,
        output [255:0] cs_reg
);

genvar i;
generate
        for (i=0; i<256; i=i+1)
        begin: gen_a
                assign cs_reg[i] = (addr==i) & cs;
        end
endgenerate

endmodule
```

Generate: if / else

- **Feltételes szintetizálás**
  - Pl. különböző FPGA típusokra történő optimalizáció
  - Implementációs és szimulációs kód szétválasztása

```
generate
  if (FAMILY=="VIRTEX4") begin: gen_v4
    add_v4 add(.clk(clk), .i0(input0), .i1(input1), .o(res));
  end else if (FAMILY=="VIRTEX5") begin: gen_v5
    add_v5 add(.clk(clk), .i0(input0), .i1(input1), .o(res));
  end
endgenerate
```

For ciklus szintézisben (1)

```
module test(
   input    [1:0] in,
   output   [3:0] out
);

integer I;
reg [3:0] res;
always @ ( * )
begin
   res = 0;
   for (I=0; I<4; I=I+1)
      if (in==I) res[I] = 1'b1;
end

assign out = res;

endmodule
```

For ciklus szintézisben (2)

Helyes

```
module test(
   input    [7:0] in,
   output   [2:0] out
);

integer I;
reg [2:0] res;
always @ ( * )
begin
   res = 0;
   for (I=0; I<8; I=I+1)
      res = res + in[I];
end

assign out = res;

endmodule
```

Helytelen

```
module test(
   input    [7:0] in,
   output   [2:0] out
);

integer I;
reg [2:0] res;
always @ ( * )
begin
   res <= 0;
   for (I=0; I<8; I=I+1)
      res <= res + in[I];
end

assign out = res;

endmodule
```

Szimuláció

- **Verilog Test Fixture**
  - Verilog kódban megírt stimulus
  - Nincs ki/bemenete
  - A tesztelt modul számára generál bementi jeleket
- **Szimulátor**
  - ISE szimulátor
  - Mentor ModelSim

Verilog Test Fixture

- **Test Fixture**
  - A Test Fixture egy Verilog modul, ez a legfelső szintű modul
  - A tesztelendő modul almodulként van beillesztve
  - Minden, a szintézisnél használt nyelvi elem felhasználható
  - Nem szintetizálható nyelvi elemek is

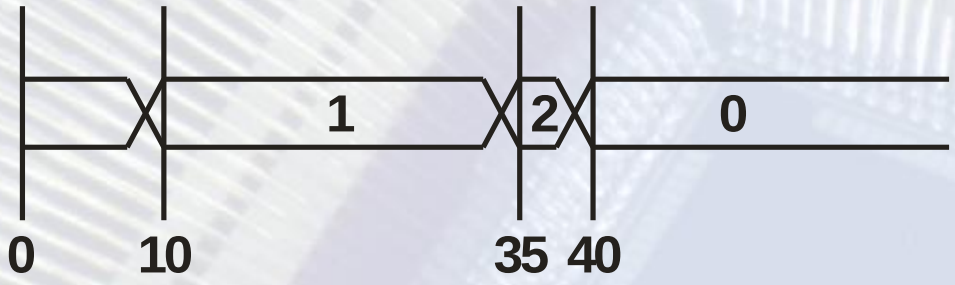
Időalap

- ‘timescale 1ns/1ps
  - Megadott idők ns-ban értendők
  - Szimulációs lépésköz: 1 ps

Test Fixture - initial

- **„initial” blokk**
  - 0. időpillanatban kezdődik a végrehajtása
  - Egyszer fut le, belső időzítések akkumulálódnak
  - Az „initial” blokkok egymással, és az „always” blokkokkal párhuzamosan működnek

```
initial
begin
    a <= 0;
    #10 a <= 1;
    #25 a <= 2;
    #5   a <= 0;
end
```



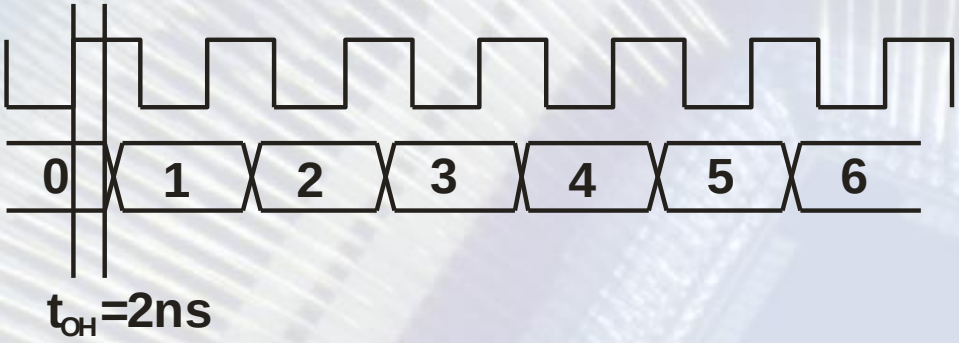
Test Fixture - always

- **Tipikus feladatok**
- **Órajel generálás**

```
initial
    clk <= 1;

always #5
    clk <= ~clk;
```

- **Órajelre működő bemenetek (pl. számláló)**

```
initial cntr <= 0;
always @ (posedge clk)
    #2 cntr <= cntr + 1;
```



Task

- **Deklaráció:**
  - Abban a modulban, amelyik használja
  - Külön file-ban (több modulban is használható)
- **Tetszőleges számú be- és kimenet**
- **Tartalmazhat időzítést**
- **A task-ban deklarált változók lokálisak**
- **A globális változók használhatók a task-ban**
- **Task meghívhat másik task-ot**

Task – 1. példa

- **Aszinkron írás ciklus szimulációja**

- **Verilog kód**

```
task bus_w(input [15:0] addr, input [7:0] data);
begin
        xaddr <= addr;
    #5  xdata <= data;
    #3  xwe   <= 0;
    #10 xwe   <= 1;
        while (xack != 1) wait;
    #4  xdata <= 8'bz;
        xaddr <= 0;
end
endtask;
```

Task hívása

- **„bus_w” a „tasks.v” file-ban deklarálva**
- **x* globális változók a test fixture-ben deklarálva**
- **Task felhasználása**
  - 3 írás ciklus
  - 10 ns szünet a ciklusok között

```
`include “tasks.v”

initial
begin
        bus_w(16’h0, 8’h4);
    #10 bus_w(16’h1, 8’h65);
    #10 bus_w(16’h2, 8’h42);
end
```

Task – 2. példa

- **PLB busz írási ciklus**

```
task plb_wr(input [31:0] addr, input [31:0] data);
begin
    @ (posedge clk_plb) #2
    plb_cs = 1;
    plb_rnw = 0;
    plb_rdreq = 0;
    plb_wrreq = 1;
    plb_addr = addr;
    plb_din = data;
    wait (plb_wrack==1);

    @ (posedge clk_plb) #2
    plb_cs = 0;
    plb_rnw = 0;
    plb_rdreq = 0;
    plb_wrreq = 0;
    plb_addr = 0;
    plb_din = 0;
end
endtask;
```

Filekezelés

- **File-ból olvasás tömbbe**

```
reg [9:0] input_data[255:0];
initial
    $readmemh("input.txt", input_data);
```

- **Adatok kiírása file-ba**

```
integer file_out;
wire res_valid;
wire [16:0] res;

initial
    file_out =$fopen("output.txt");

always @ (posedge clk)
if (res_valid)
    $fwrite(file_out, "%d \n", res);
```