

HY220

Εργαστήριο Ψηφιακών Κυκλωμάτων

Εαρινό Εξάμηνο
2022

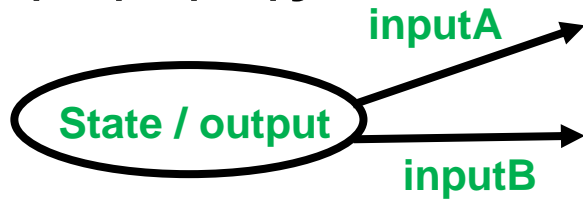
Μηχανές Πεπερασμένων
Καταστάσεων

FSMs

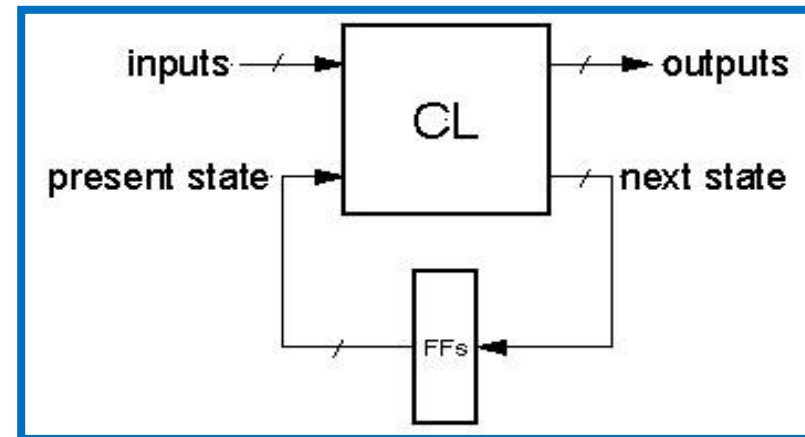
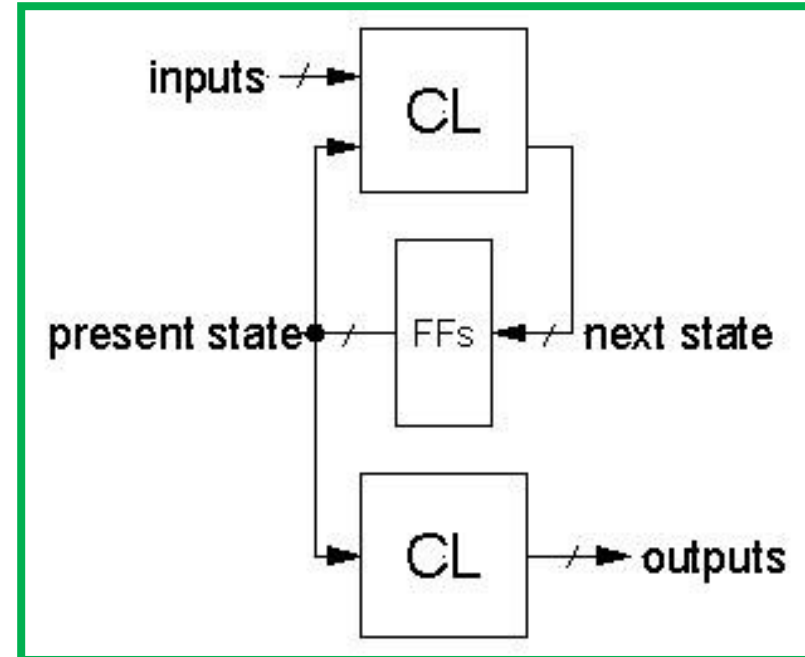
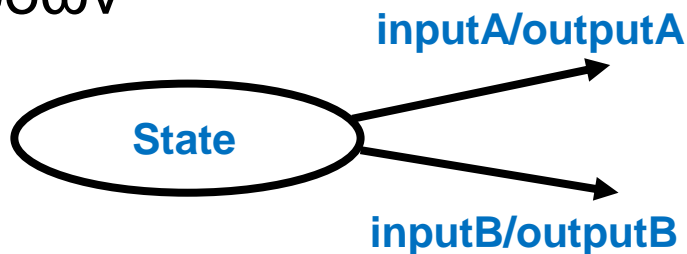
- Οι μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων Finite State Machines (FSMs)
 - πιο αφηρημένος τρόπος να εξετάζουμε ακολουθιακά κυκλώματα
 - είσοδοι, έξοδοι, τρέχουσα κατάσταση, επόμενη κατάσταση
 - σε κάθε ακμή του ρολογιού συνδυαστική λογική παράγει τις εξόδους και την επόμενη κατάσταση σαν συναρτήσεις των εισόδων και της τρέχουσας κατάστασης.

Χαρακτηριστικά των FSM

- Η επόμενη κατάσταση είναι συνάρτηση της τρέχουσας κατάστασης και των εισόδων
- **Moore Machine:** Οι έξοδοι είναι συνάρτηση της κατάστασης



- **Mealy Machine:** Οι έξοδοι είναι συνάρτηση της κατάστασης και των εισόδων

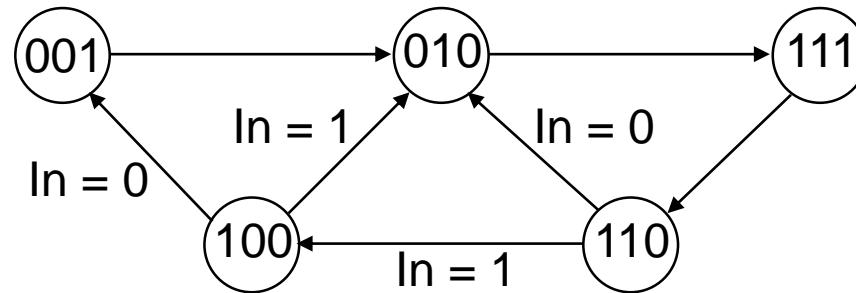


Βήματα Σχεδίασης

- Περιγραφή λειτουργία του κυκλώματος (functional specification)
- Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων (state transition diagram)
- Πίνακας καταστάσεων και μεταβάσεων με συμβολικά ονόματα (symbolic state transition table)
- Κωδικοποίηση καταστάσεων (state encoding)
- Εξαγωγή λογικών συναρτήσεων
- Διάγραμμα κυκλώματος
 - FFs για την κατάσταση
 - ΣΛ για την επόμενη κατάσταση και τις εξόδους

Αναπαράσταση FSM

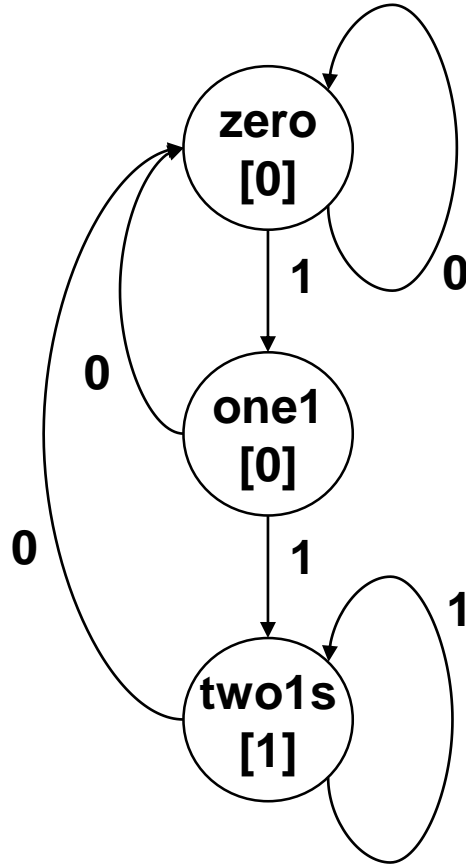
- Καταστάσεις: όλες οι πιθανές τιμές στα ακολουθιακά στοιχεία μνήμης (FFs)
- Μεταβάσεις: αλλαγή κατάστασης
- Αλλαγή τις κατάστασης με το ρολόι αφού ελέγχει την φόρτωση τιμής στα στοιχεία μνήμης (FFs)



- Ακολουθιακή λογική
 - Ακολουθία μέσω μιας σειράς καταστάσεων
 - Βασίζεται στην ακολουθία των τιμών στις εισόδους

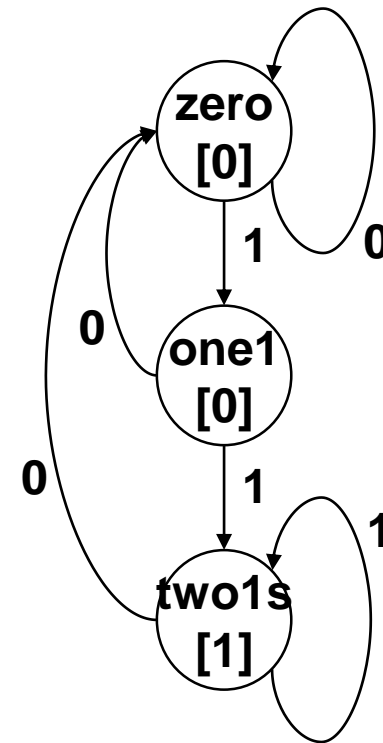
Παράδειγμα FSM - Reduce 1s

- Αλλαγή του πρώτου 1 σε 0 σε μια σειρά από 1
 - Moore FSM



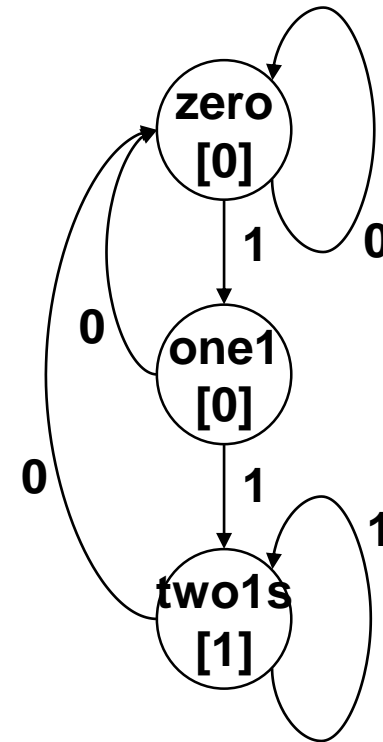
Moore FSM: General & State

```
module ReduceMoore(  
    input      Clk,  
    input      Rst,  
    input      In,  
    output reg Out  
);  
reg [1:0] CurrentState; // state reg  
reg [1:0] NextState;  
  
// State assignment  
parameter STATE_Zero    = 2'h0,  
           STATE_One1   = 2'h1,  
           STATE_Two1s  = 2'h2,  
           STATE_X      = 2'hX;  
  
// Implement the state register  
always @( posedge Clk) begin  
    if (Rst) CurrentState <= STATE_Zero;  
    else     CurrentState <= NextState;  
end
```



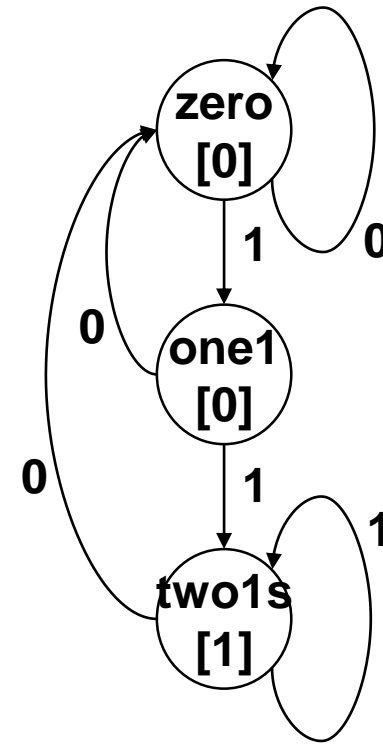
Moore FSM: Combinatorial

```
always @(In or CurrentState) begin
  NextState = CurrentState;
  Out = 1'b0;
  case (CurrentState)
    STATE_Zero: begin // last input was a zero
      if (In) NextState = STATE_One1;
    end
    STATE_One1: begin // we've seen one 1
      if (In) NextState = STATE_Two1s;
      else NextState = STATE_Zero;
    end
    STATE_Two1s: begin // we've seen at least 2 ones
      Out = 1;
      if (~In) NextState = STATE_Zero;
    end
    default: begin // in case we reach a bad state
      Out = 1'bx;
      NextState = STATE_Zero;
    end
  endcase
end
```



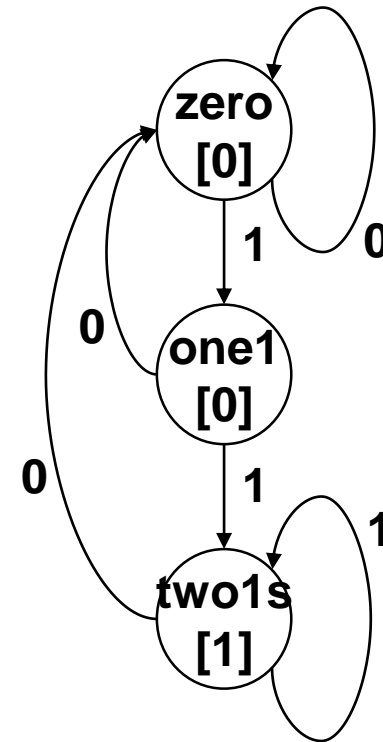
Moore FSM: SystemVerilog Enums

```
module ReduceMooreSV(  
    input  logic Clk,  
    input  logic Rst,  
    input  logic In,  
    output logic Out  
);  
enum logic [1:0] {  
    STATE_Zero    = 2'h0,  
    STATE_One1   = 2'h1,  
    STATE_Two1s  = 2'h2 } CurrentState, NextState;  
// alternative:  
// typedef enum logic [1:0] {  
//     STATE_Zero, STATE_One1, STATE_Two1s } FSM_State_t;  
// FSM_State_t CurrentState, NextState;  
  
// Implement the state register  
always_ff @( posedge Clk) begin  
    if (Rst) CurrentState <= STATE_Zero;  
    else     CurrentState <= NextState;  
end
```



Moore FSM: SystemVerilog Combinatorial

```
always_comb begin  
  NextState = CurrentState;  
  Out = 1'b0;  
  case (CurrentState)  
    STATE_Zero: begin // last input was a zero  
      if (In) NextState = STATE_One1;  
    end  
    STATE_One1: begin // we've seen one 1  
      if (In) NextState = STATE_Two1s;  
      else NextState = STATE_Zero;  
    end  
    STATE_Two1s: begin // we've seen at least 2 ones  
      Out = 1;  
      if (~In) NextState = STATE_Zero;  
    end  
    default: begin // in case we reach a bad state  
      Out = 1'bx;  
      NextState = STATE_Zero;  
    end  
  endcase  
end
```



Mealy FSM

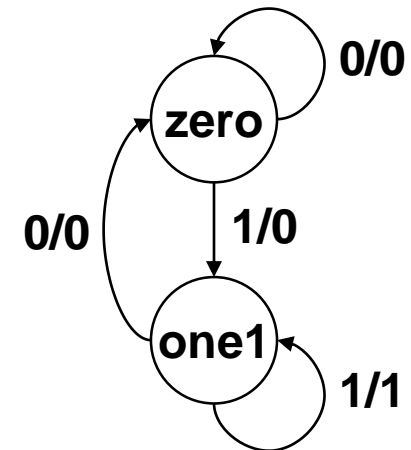
```
module ReduceMealy( input Clk, input Rst, input In, output reg Out);

reg    CurrentState;// state register
reg    NextState;

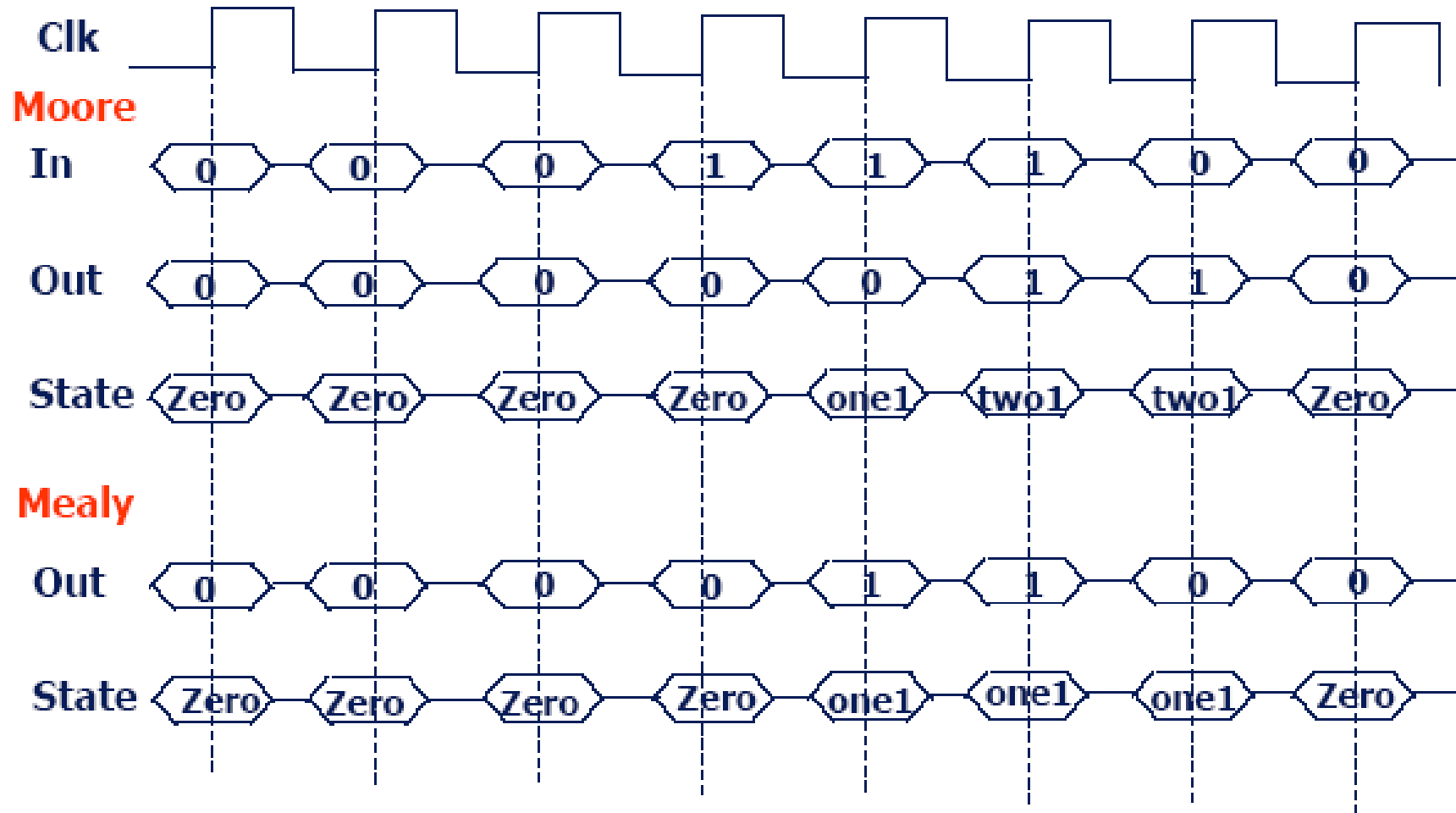
parameter  STATE_Zero =    1'b0,
           STATE_One1 =    1'b1;

always @(posedge Clk) begin
    if (Rst) CurrentState <= STATE_Zero;
    else     CurrentState <= NextState;
end

always @ (In or CurrentState) begin
    NextState = CurrentState;
    Out = 1'b0;
    case (CurrentState)
        STATE_Zero: if (In) NextState = STATE_One;
        STATE_One1: begin // we've seen one 1
            if (~In) NextState = STATE_One;
            else     NextState = STATE_Zero;
            Out = In;
        end
    endcase
end
endmodule
```



Moore vs Mealy

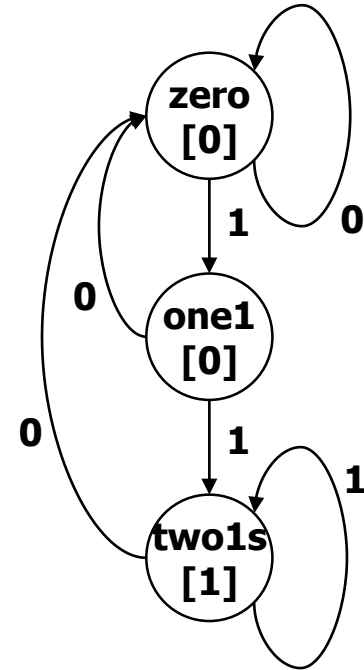


Moore vs Mealy Συμπεριφορά

- Moore
 - απλοποιούν τη σχεδίαση
 - αδυναμία αντίδρασης στις εισόδους στον ίδιο κύκλο - έξοδοι ένα κύκλο μετά
 - διαφορετικές καταστάσεις για κάθε αντίδραση
- Mealy
 - συνήθως λιγότερες καταστάσεις
 - άμεση αντίδραση στις εισόδους – έξοδοι στον ίδιο κύκλο
 - δυσκολότερη σχεδίαση αφού καθυστερημένη είσοδος παράγει καθυστερημένη έξοδο (μεγάλα μονοπάτια)
- Η Mealy γίνεται Moore αν βάλουμε καταχωρητές στις εξόδους

Moore Machine σε 1 always block (Bad Idea)

```
module ReduceMoore(  
  input      Clk,  
  input      Rst,  
  input      In,  
  output reg  Out  
);  
  
  reg [1:0] state; // state register  
  parameter zero = 0,  
             one1 = 1,  
             two1s = 2;
```



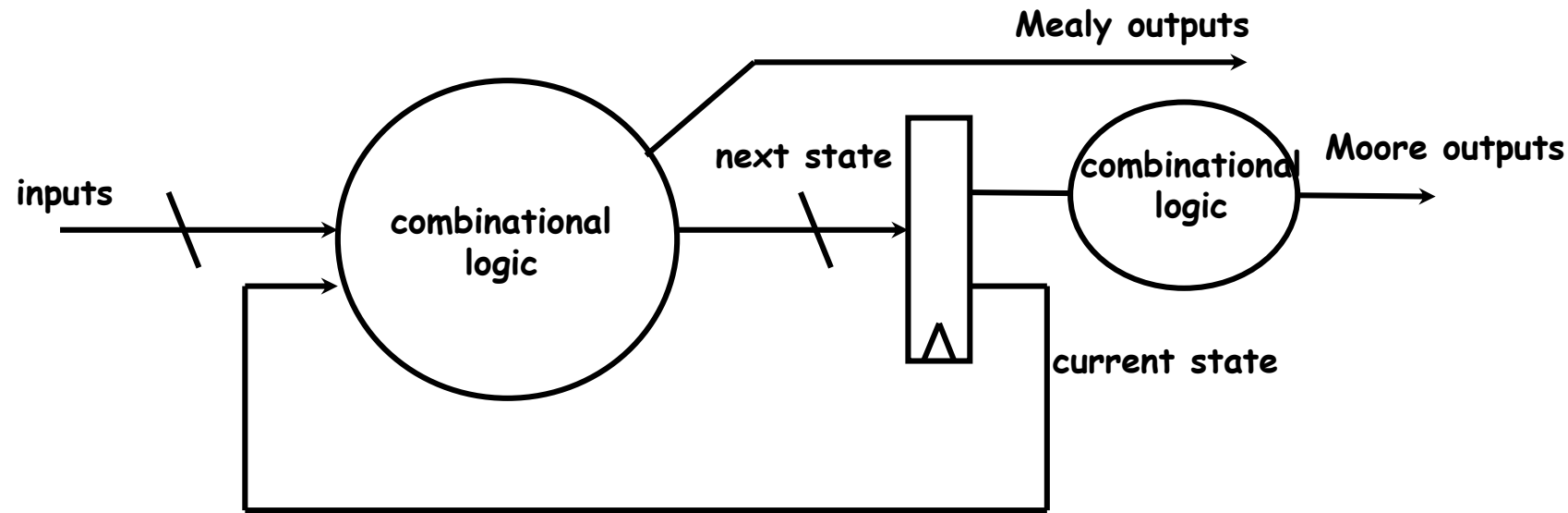
Moore Machine σε 1 always block (Bad Idea)

```
always @(posedge clk)
  case (state)
    zero: begin
      out <= 0;
      if (in) state <= one1;
      else state <= zero;
    end
    one1:
      if (in) begin
        state <= two1s;
        out <= 1;
      end else begin
        state <= zero;
        out <= 0;
      end
    two1s:
      if (in) begin
        state <= two1s;
        out <= 1;
      end else begin
        state <= zero;
        out <= 0;
      end
    default: begin
      state <= zero;
      out <= 0;
    end
  endcase
endmodule
```

Οι έξοδοι είναι καταχωρητές

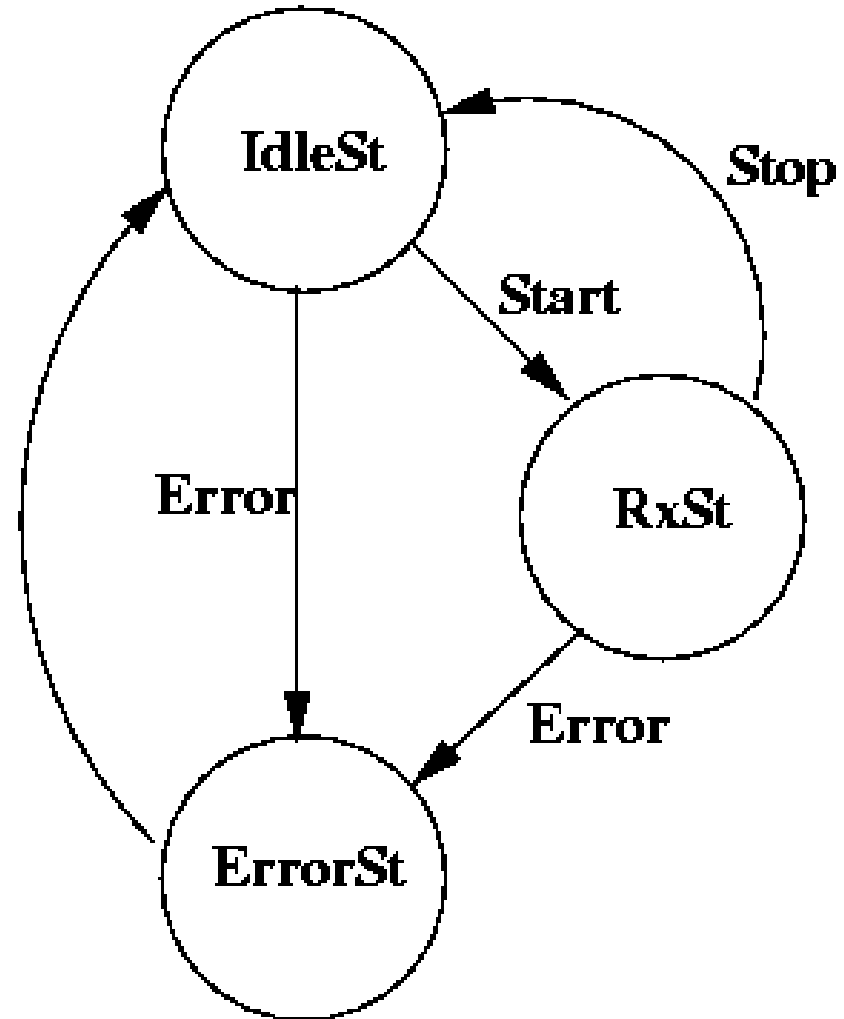
Μπερδεμένο!!!
Η έξοδος αλλάζει στον επόμενο κύκλο

Υλοποίηση FSMs



- Προτεινόμενο στυλ υλοποίησης FSM
 - Η συνδυαστική λογική καταστάσεων σε always block (πάντα default)
 - Ο καταχωρητής κατάστασης σε ένα ξεχωριστό always block (clocked – πάντα reset)
 - Έξοδοι είτε από το always της CL είτε από wires

Απλή FSM



Απλή FSM (1/3)

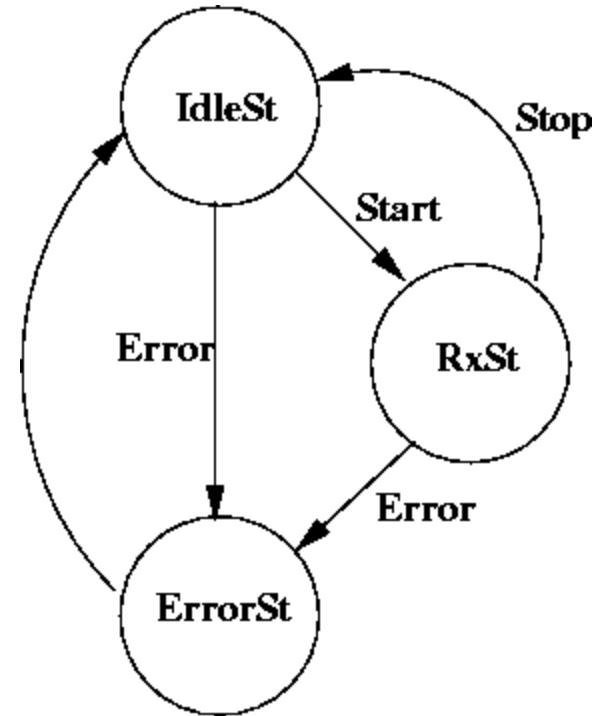
```
module fsm( Receive, Start, Stop,
           Error, Clk, Reset_);
//
input  Start, Stop, Error, Clk, Reset_n;
output Receive;
//
parameter [1:0] IdleState      = 0,
              ReceiveState     = 1,
              ErrorState       = 2;

//
reg [1:0] FSMstate, nxtFSMstate;
//
always @(posedge Clk) begin
    if (~Reset_n) FSMstate <= #`dh IdleState;
    else          FSMstate <= #`dh nxtFSMstate;
end

//
always @(FSMstate or Start or Stop or Error) begin
//
    case (FSMstate)
```

Απλή FSM (2/3)

```
IdleState:
begin
  if (Error)    nxtFSMstate <= ErrorState;
  else begin
    if (Start)  nxtFSMstate <= ReceiveState;
    else       nxtFSMstate <= IdleState;
  end
end
//
ReceiveState:
begin
  if (Error)    nxtFSMstate <= ErrorState;
  else begin
    if (Stop)   nxtFSMstate <= IdleState;
    else       nxtFSMstate <= ReceiveState;
  end
end
//
ErrorState :  nxtFSMstate <= IdleState;
//
default    :  nxtFSMstate <= IdleState;
//
endcase
end
```



Απλή FSM (3/3) – Οι έξοδοι

- The **Moore** Output

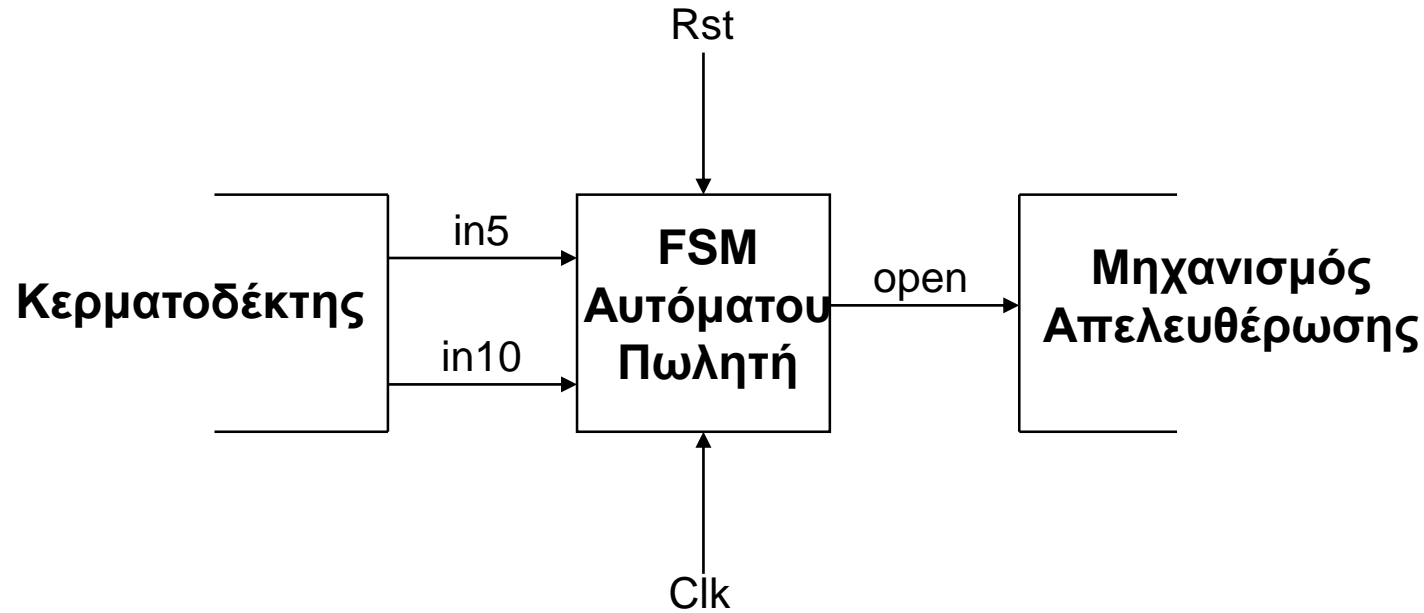
```
wire Receive = FSMstate[0];
```

- The **Mealy** Output

```
wire Receive =  
    ((FSMstate == IdleState ) & Start) |  
    ((FSMstate == ReceiveState) & ~Error & ~Stop );
```

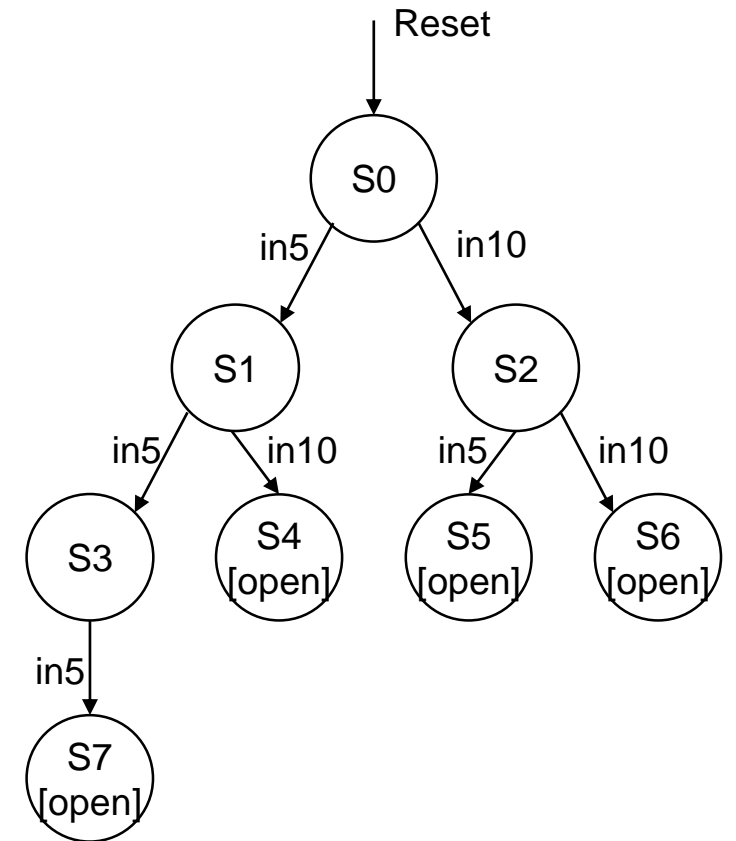
Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (1/5)

- Βγάζει αναψυκτικό όταν βάλουμε 15 λεπτά του €
- Κερματοδέκτης για νομίσματα των 5 και 10 λεπτών του €
- Δεν δίνει ρέστα!



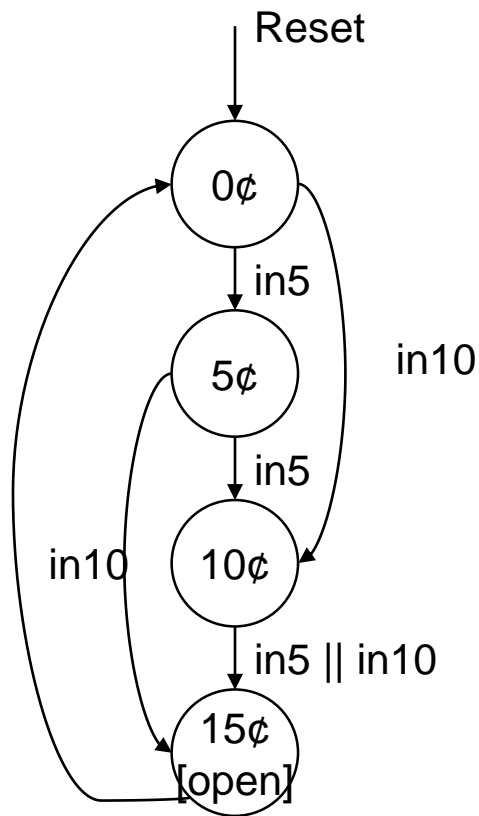
Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (2/5)

- Αναπαράσταση
 - Τυπικές εισοδοί:
 - 3 των 5¢
 - 5¢, 10¢
 - 10¢, 5¢
 - 2 των 10¢
 - Διάγραμμα Καταστάσεων:
 - Είσοδοί: in5, in10, reset, clock
 - Έξοδοι: open
 - Assumptions:
 - in5 και in10 εμφανίζονται για 1 κύκλο
 - Μένουμε στην ίδια κατάσταση αν δεν έρθει είσοδος
 - Όταν έρθει reset πάμε στην αρχική κατάσταση



Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (3/5)

- Ελαχιστοποίηση καταστάσεων - επαναχρησιμοποίηση



present state	inputs		next state	output open
	in10	in5		
0¢	0	0	0¢	0
	0	1	5¢	0
	1	0	10¢	0
	1	1	—	—
5¢	0	0	5¢	0
	0	1	10¢	0
	1	0	15¢	0
	1	1	—	—
10¢	0	0	10¢	0
	0	1	15¢	0
	1	0	15¢	0
	1	1	—	—
15¢	—	—	0¢	1

symbolic state table

Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (4/5)

- Κωδικοποίηση Καταστάσεων – Τυπική

pres. state		inputs		next state		output
Q1	Q0	in10	in5	D1	D0	open
0	0	0	0	0	0	0
		0	1	0	1	0
		1	0	1	0	0
		1	1	–	–	–
0	1	0	0	0	1	0
		0	1	1	0	0
		1	0	1	1	0
		1	1	–	–	–
1	0	0	0	1	0	0
		0	1	1	1	0
		1	0	1	1	0
		1	1	–	–	–
1	1	–	–	0	0	1

Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (5/5)

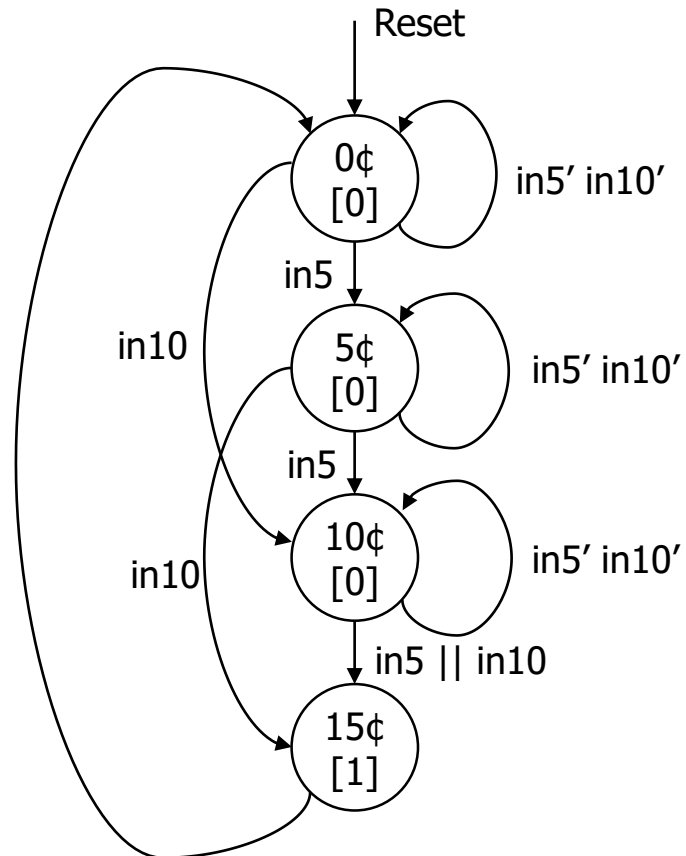
- Κωδικοποίηση Καταστάσεων – One-hot

present state				inputs		next state				output
Q3	Q2	Q1	Q0	in10	in5	D3	D2	D1	D0	open
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
				0	1	0	0	1	0	0
				1	0	0	1	0	0	0
				1	1	-	-	-	-	-
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
				0	1	0	1	0	0	0
				1	0	1	0	0	0	0
				1	1	-	-	-	-	-
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
				0	1	1	0	0	0	0
				1	0	1	0	0	0	0
				1	1	-	-	-	-	-
1	0	0	0	-	-	0	0	0	1	1

Διαγράμματα καταστάσεων – Moore and Mealy

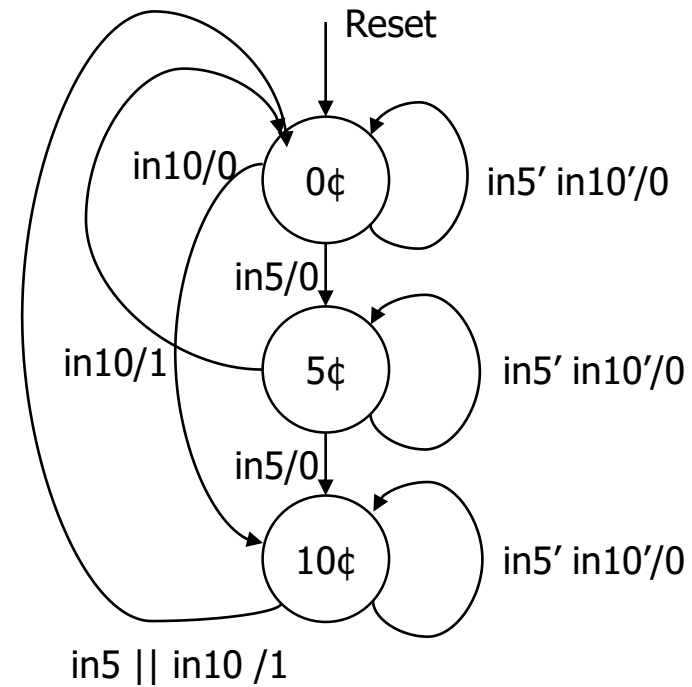
Moore machine

Έξοδοι από κατάσταση



Mealy machine

Έξοδοι στις μεταβάσεις



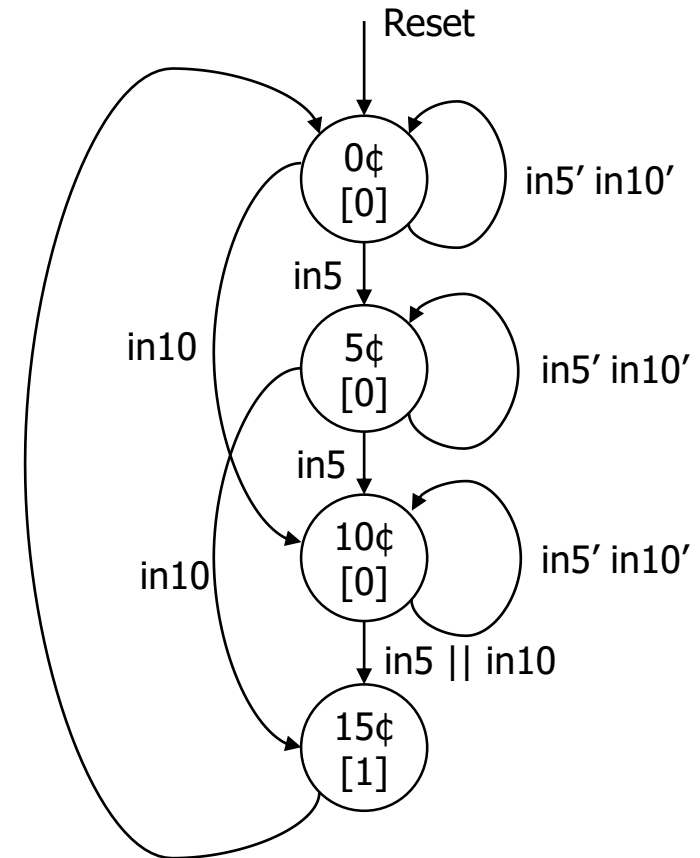
Moore Verilog FSM

```
module vending (open, clk, Rst, in5, in10);
  input clk, Rst, in5, in10;
  output open;
  reg open; reg [1:0] state; // state register
  reg [1:0] next_state;
  parameter zero = 0, five = 1, ten = 2, fifteen = 3;

  always @(in5 or in10 or state)
    case (state)
      zero: begin
        if (in5) next_state = five;
        else if (in10) next_state = ten;
        else next_state = zero;
        open = 0;
      end
      ...
      fifteen: begin
        next_state = zero;
        open = 1;
      end
      default: begin
        next_state = zero;
        open = 0;
      end
    endcase

  always @(posedge clk)
    if (Rst) state <= zero;
    else state <= next_state;

endmodule
```



Mealy Verilog FSM

```

module vending (open, Clk, Rst, in5, in10);
  input Clk, Rst, in5, in10;
  output open;
  reg open; reg [1:0] state;          // state register
  reg [1:0] next_state;
  parameter zero = 0, five = 1, ten = 2, fifteen = 3;

  always @(in5 or in10 or state)
    case (state)
      zero: begin
        open = 0;
        if (in10) next_state = ten;
        else if (in5) next_state = five;
        else next_state = zero;
      end
      five: begin
        if (in5) begin
          next_state = ten;
          open = 0;
        end
        else if (in10) begin
          next_state = zero;
          open = 1;
        end
        else begin
          next_state = five;
          open = 0;
        end
      end
    endcase

  always @(posedge clk)
    if (Rst) state <= zero;
    else state <= next_state;
endmodule

```

