

HY220

Εργαστήριο Ψηφιακών Κυκλωμάτων

Εαρινό Εξάμηνο
2023

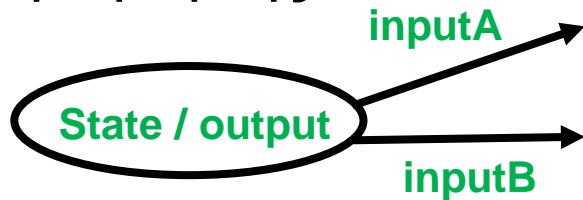
Μηχανές Πεπερασμένων
Καταστάσεων

FSMs

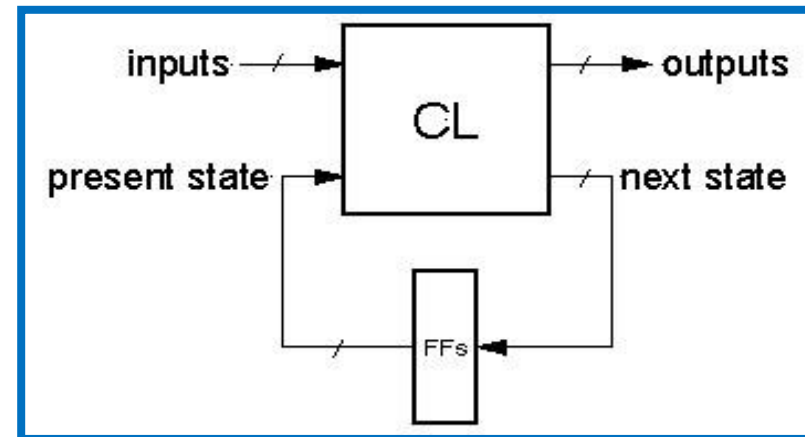
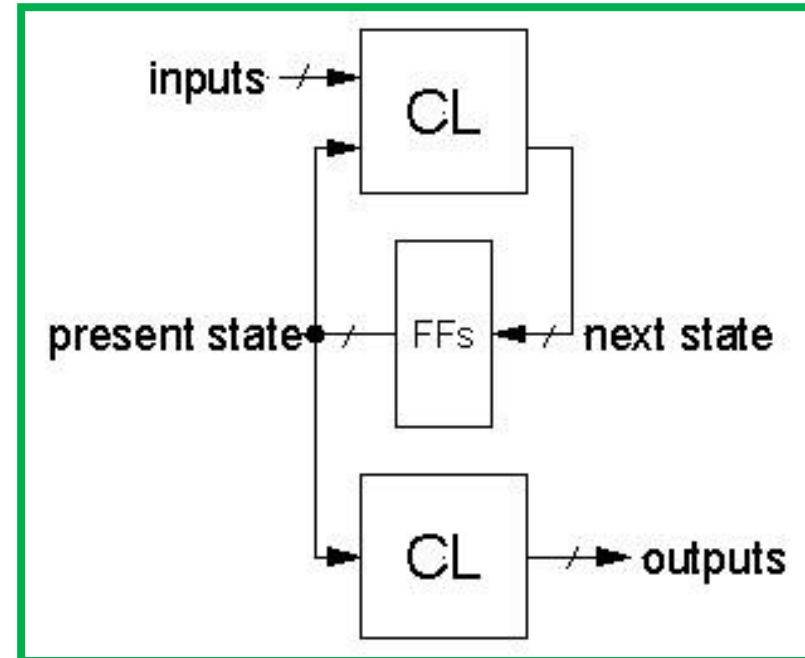
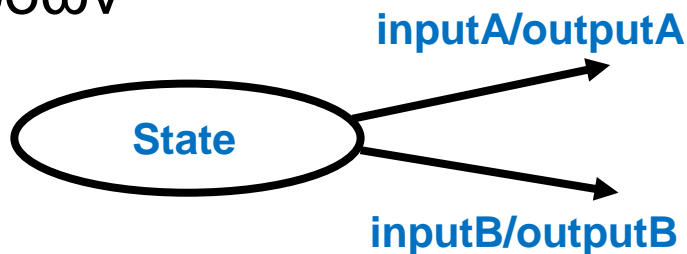
- Οι μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων Finite State Machines (FSMs)
 - πιο αφηρημένος τρόπος να εξετάζουμε ακολουθιακά κυκλώματα
 - είσοδοι, έξοδοι, τρέχουσα κατάσταση, επόμενη κατάσταση
 - σε κάθε ακμή του ρολογιού συνδυαστική λογική παράγει τις εξόδους και την επόμενη κατάσταση σαν συναρτήσεις των εισόδων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

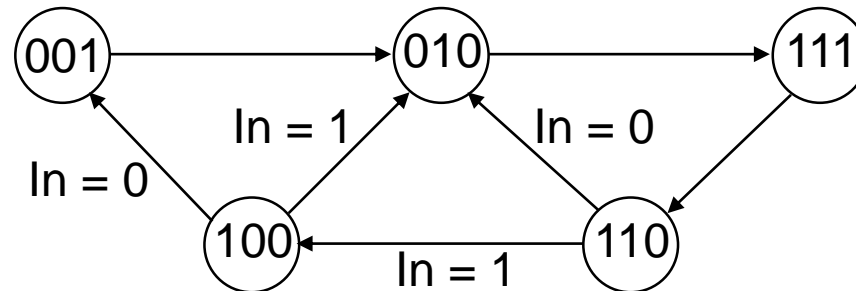


Βήματα Σχεδίασης

- 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

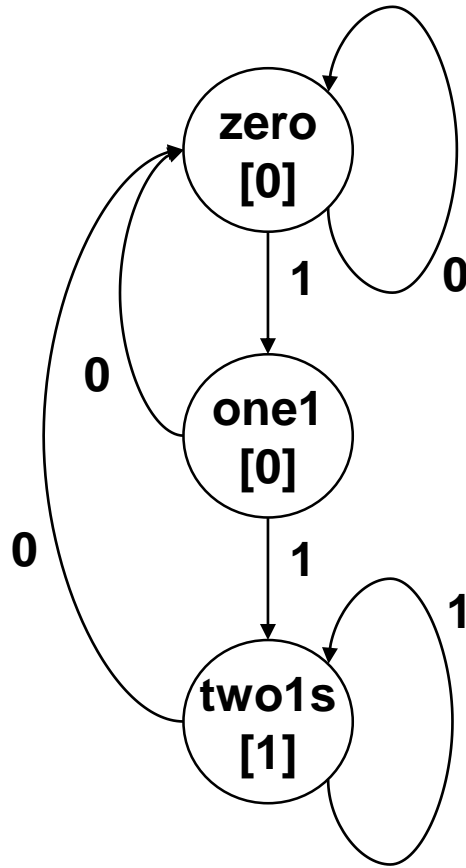
- Καταστάσεις: όλες οι πιθανές τιμές στα ακολουθιακά στοιχεία μνήμης (FFs)
- Μεταβάσεις: αλλαγή κατάστασης
- Αλλαγή τις κατάστασης με το ρολόι αφού ελέγχει την φόρτωση τιμής στα στοιχεία μνήμης (FFs)



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

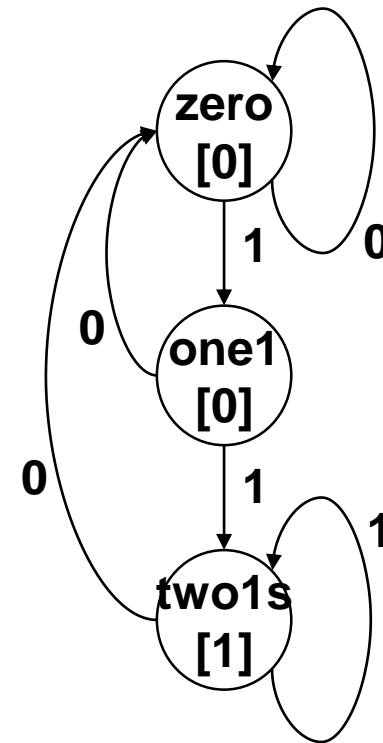
Παράδειγμα FSM - Reduce 1s

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



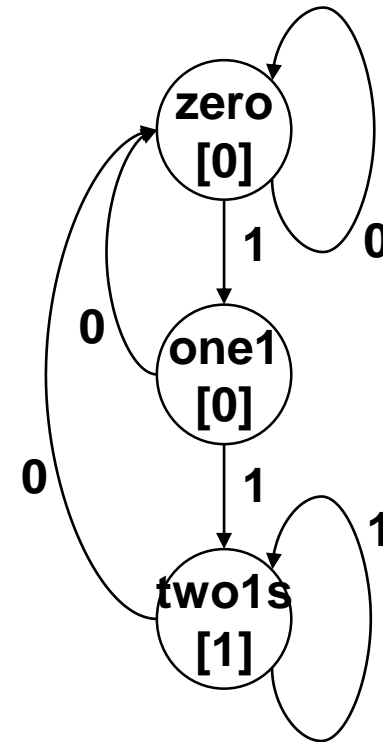
Moore FSM: General & State

```
module ReduceMoore(  
    input logic  clk,  
    input logic  rst,  
    input logic  in,  
    output logic out  
);  
logic [1:0]    current_state; // state register  
logic [1:0]    next_state;  
  
// State declarations  
parameter int  STATE_Zero    = 2'h0,  
              STATE_One1    = 2'h1,  
              STATE_Two1s   = 2'h2,  
              STATE_X       = 2'hX;  
  
// Implement the state register  
always_ff @( posedge clk) begin  
    if (rst) current_state <= STATE_Zero;  
    else    current_state <= next_state;  
end
```



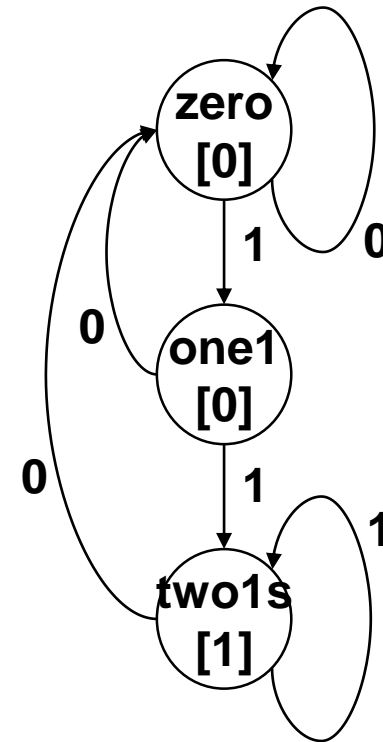
Moore FSM: Combinatorial

```
always_comb begin  
  next_state = current_state; // acts as the default/else  
  out = 1'b0; // default output  
  
  case (current_state)  
    STATE_Zero: begin // last input was a zero  
      if (in) next_state = STATE_One1;  
    end  
    STATE_One1: begin // we've seen one 1  
      if (in) next_state = STATE_Two1s;  
      else next_state = STATE_Zero;  
    end  
    STATE_Two1s: begin // we've seen at least 2 ones  
      out = 1;  
      if (~in) next_state = STATE_Zero;  
    end  
    default: begin // in case we reach a bad state  
      out = 1'bx;  
      next_state = STATE_Zero;  
    end  
  endcase  
end
```



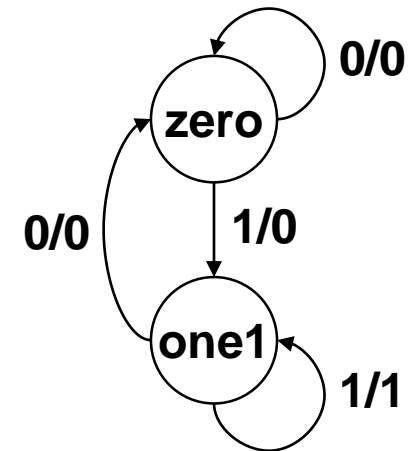
Moore FSM: SystemVerilog Enums

```
module ReduceMooreEnums (  
    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 } current_state, next_state;  
// alternative:  
// typedef enum logic [1:0] {  
//     STATE_Zero, STATE_One1, STATE_Two1s } FSM_State_t;  
// FSM_State_t current_state, next_state;  
  
// Implement the state register  
always_ff @( posedge clk) begin  
    if (rst) current_state <= STATE_Zero;  
    else     current_state <= next_state;  
end
```

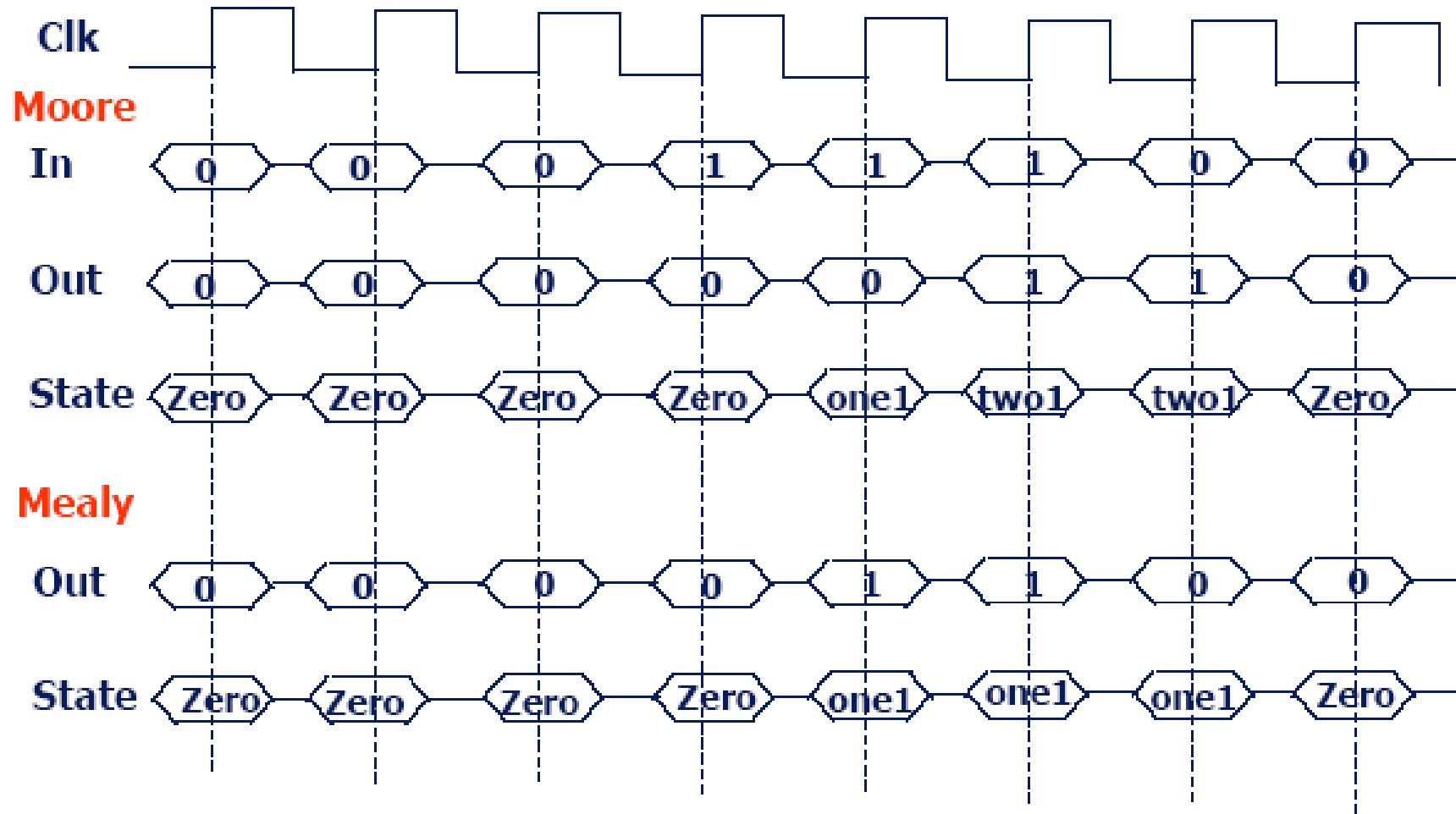


Mealy FSM

```
module ReduceMealy( input logic clk, rst, in, output logic out);  
  
    logic current_state; // state register  
    logic next_state;  
  
    parameter int STATE_Zero = 1'b0,  
                STATE_One1 = 1'b1;  
  
    always_ff @(posedge clk) begin  
        if (rst) current_state <= STATE_Zero;  
        else     current_state <= next_state;  
    end  
  
    always_comb begin  
        next_state = current_state;  
        out = 1'b0;  
        case (current_state)  
            STATE_Zero: if (in) next_state = STATE_One;  
            STATE_One1: begin // we've seen one 1  
                if (~in)  
                    next_state = STATE_One;  
                else  
                    next_state = STATE_Zero;  
                Out = In;  
            end  
        endcase  
    end  
  
endmodule
```



Moore vs Mealy

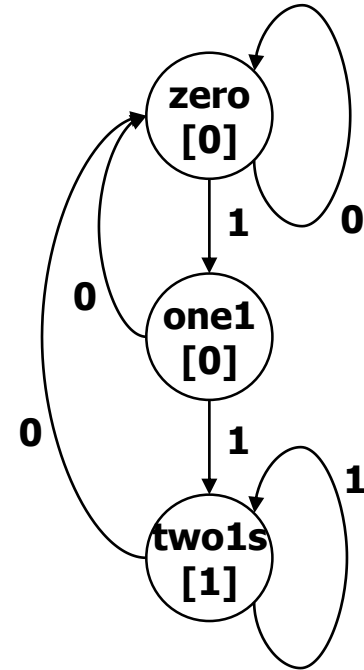


Moore vs Mealy Συμπεριφορά

- 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 logic clk,  
  input logic rst,  
  input logic in,  
  output logic out  
);  
  
  logic [1:0] state; // state register  
  parameter int zero = 0,  
              one1 = 1,  
              twols = 2;
```



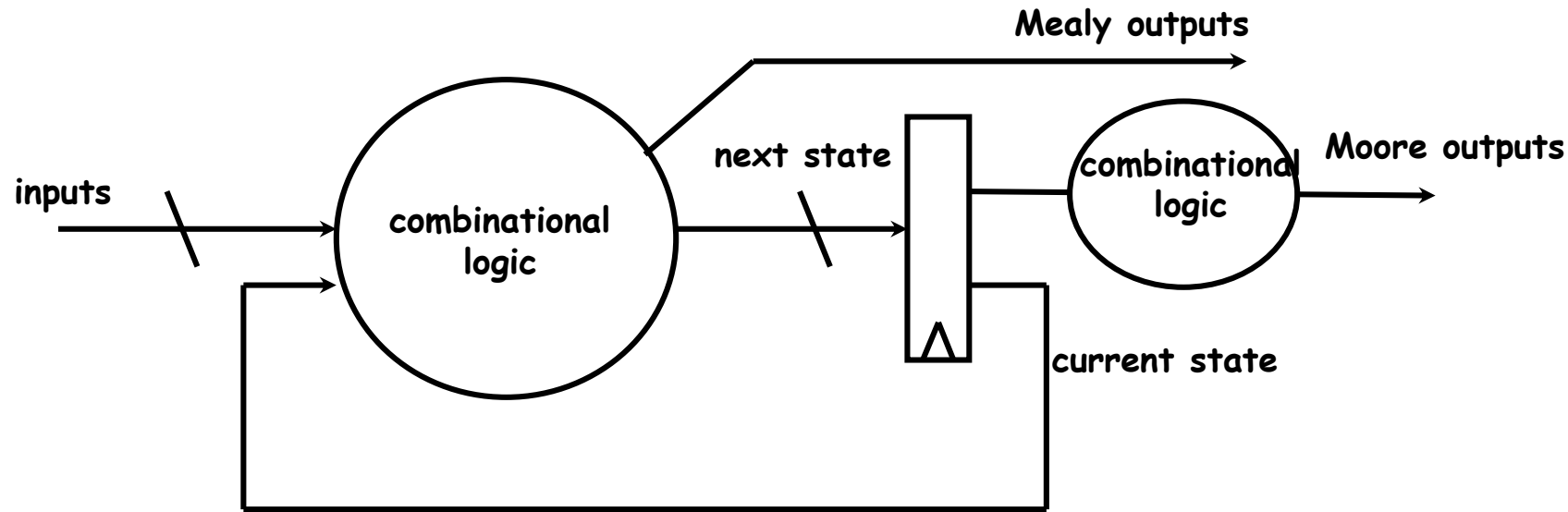
Moore Machine σε 1 always block (Bad Idea)

```
always_ff @(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

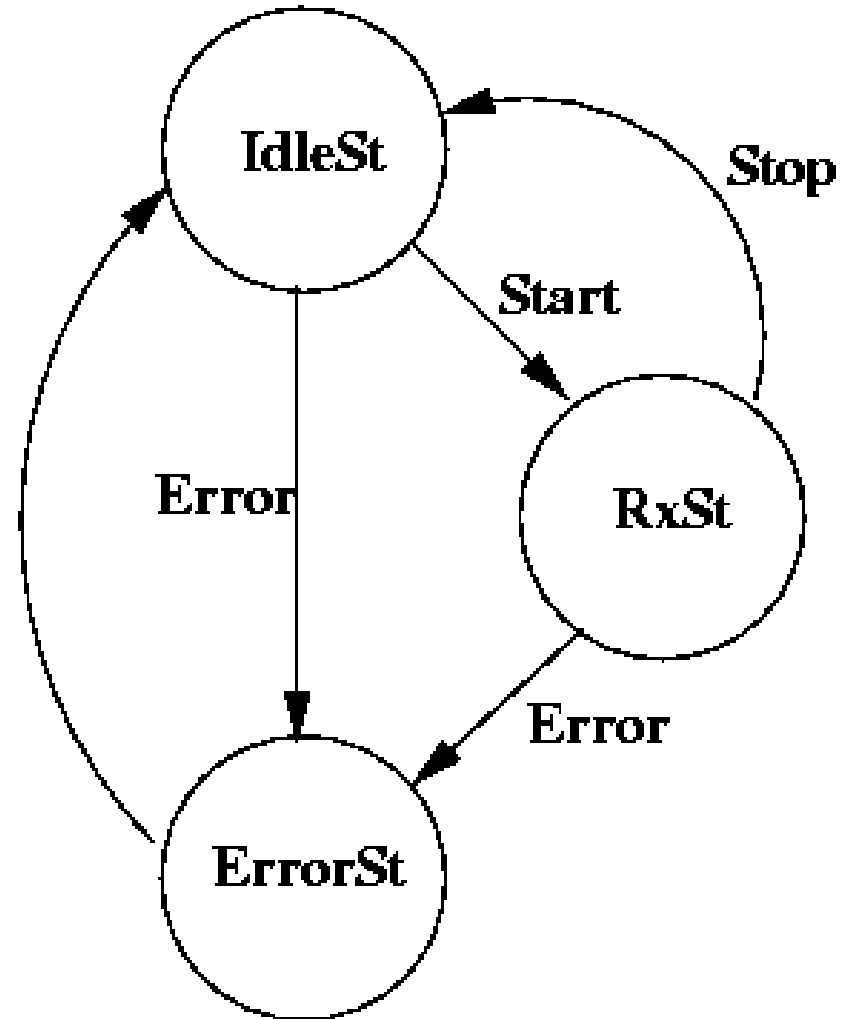
Υλοποίηση FSMs



- Προτεινόμενο στυλ υλοποίησης FSM

- Ο καταχωρητής κατάστασης σε ένα ξεχωριστό `always_ff`
 - `clocked` – πάντα `reset` – χρήση μόνο `non-blocking assignment`
- Η συνδυαστική λογική αλλαγής καταστάσεων σε `always_comb`
 - πάντα `default` – χρήση μόνο `blocking assignments`
- Έξοδοι είτε από `always_comb` της CL είτε από `wires`
 - χρήση μόνο `blocking assignments` (και σιγουρευτείτε για τις `default` τιμές)

Απλή FSM



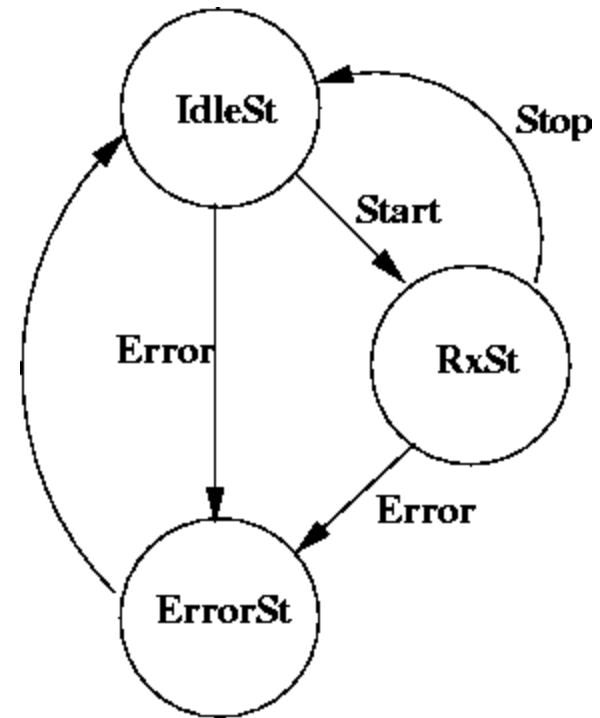
Απλή FSM (1/3)

```
module fsm( receive, start, stop,
            error, clk, reset_n);
//
parameter int C2Q = 1;
//
input  logic start, stop, error, clk, reset_n;
output logic receive;
//
parameter logic [1:0] IdleState    = 0,
                   ReceiveState = 1,
                   ErrorState     = 2;

//
logic [1:0] fsm_state, fsm_nxtstate;
//
always_ff @(posedge clk) begin
    if (~reset_n) fsm_state <= #C2Q IdleState;
    else          fsm_state <= #C2Q fsm_nxtstate;
end
```

Απλή FSM (2/3)

```
always_comb begin
  case(fsm_state)
    IdleState:
      begin
        if(error) fsm_nxtstate = ErrorState;
        else begin
          if(start) fsm_nxtstate = ReceiveState;
          else fsm_nxtstate = IdleState;
        end
      end
    ReceiveState:
      begin
        if(error) fsm_nxtstate = ErrorState;
        else begin
          if(stop) fsm_nxtstate = IdleState;
          else fsm_nxtstate = ReceiveState;
        end
      end
    ErrorState:
      fsm_nxtstate = IdleState;
    default:
      fsm_nxtstate = IdleState;
  endcase
end
```



Απλή FSM (3/3) – Οι έξοδοι

- The **Moore** Output

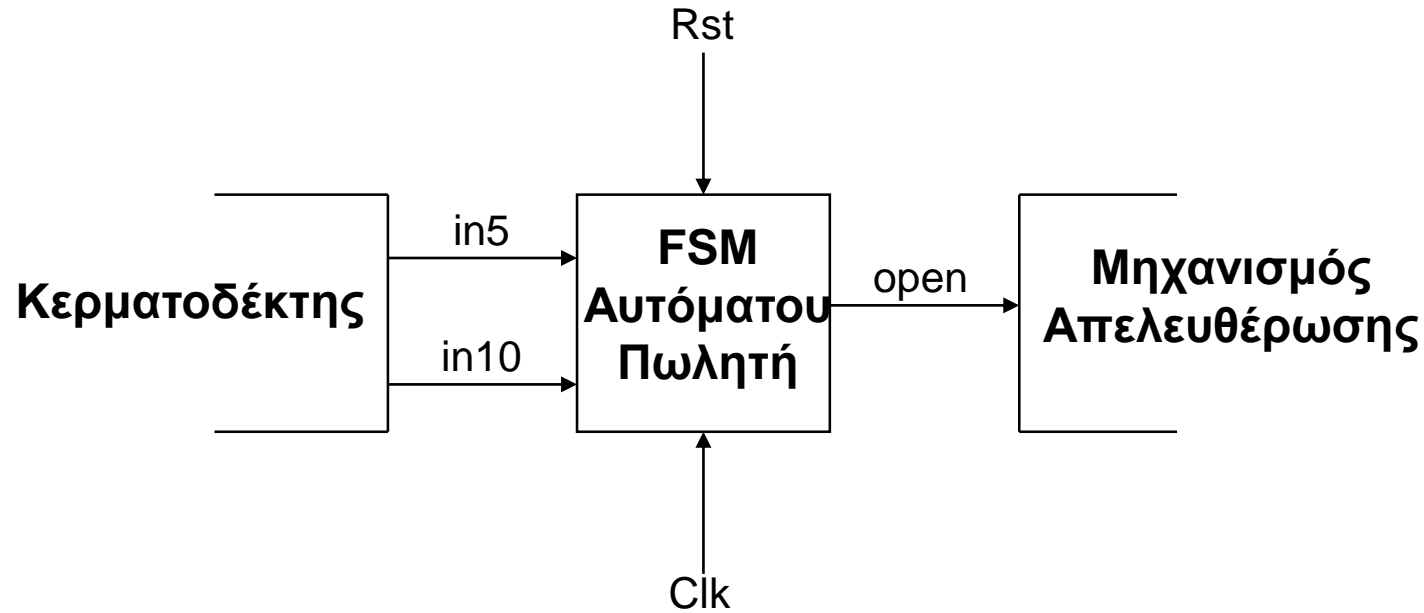
```
assign receive = fsm_state[0];  
// alternative:  
// assign receive = (fsm_state == ReceiveState);
```

- The **Mealy** Output

```
assign receive = ((fsm_state == IdleState ) & start) |  
                ((fsm_state == ReceiveState) & ~error & ~stop );  
  
// alternative: with blocking assignments  
// always_comb begin  
//   receive = 0; // default value for output  
//   if ((fsm_state == IdleState ) & start)           receive = 1;  
//   if ((fsm_state == ReceiveState) & ~error & ~stop ) receive = 1;  
// end
```

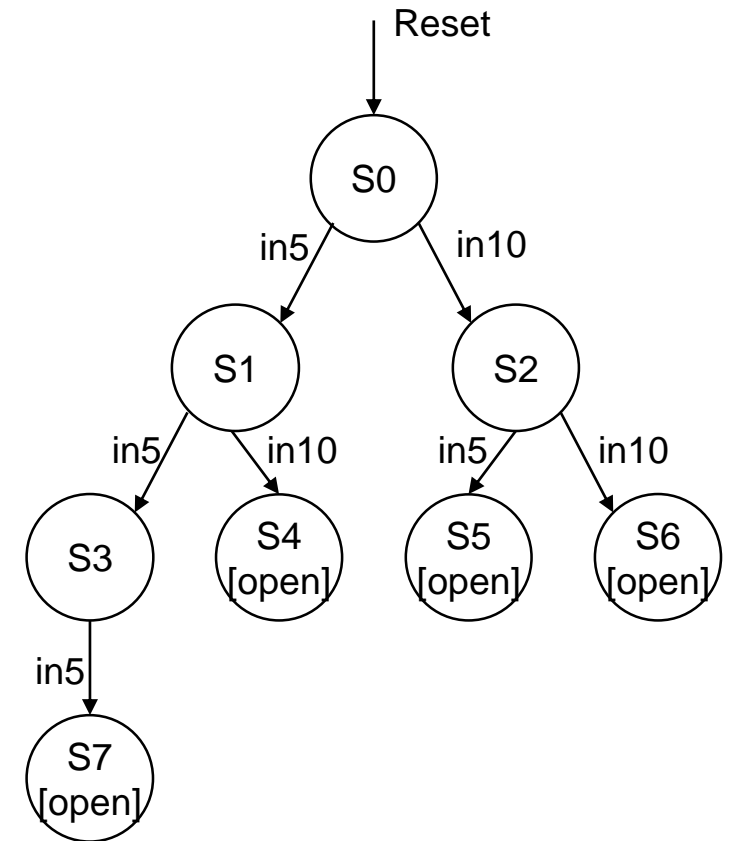
Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (1/5)

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



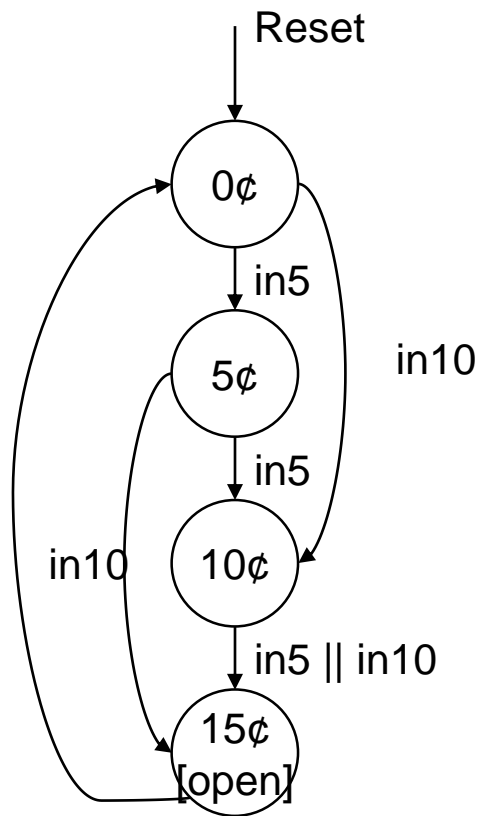
Παράδειγμα: «Αυτόματος Πωλητής» (2/5)

- Αναπαράσταση
 - Τυπικές εισοδοί:
 - 3 των 5¢
 - 5¢, 10¢
 - 10¢, 5¢
 - 2 των 10¢
 - Διάγραμμα Καταστάσεων:
 - Είσοδοι: 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
10¢	1	1	—	—
	0	0	10¢	0
	0	1	15¢	0
15¢	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)

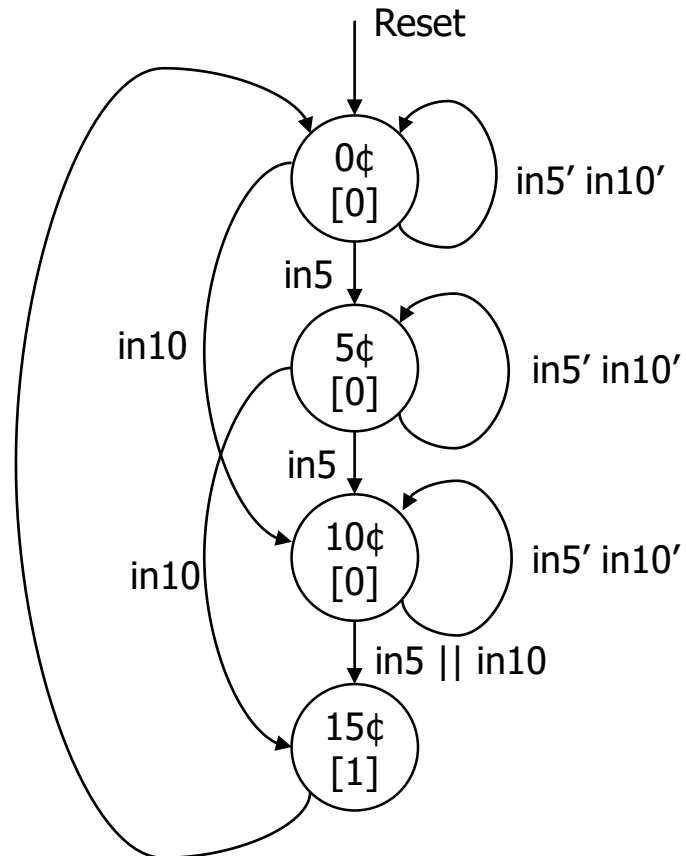
- Κωδικοποίηση Καταστάσεων – One-hot

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

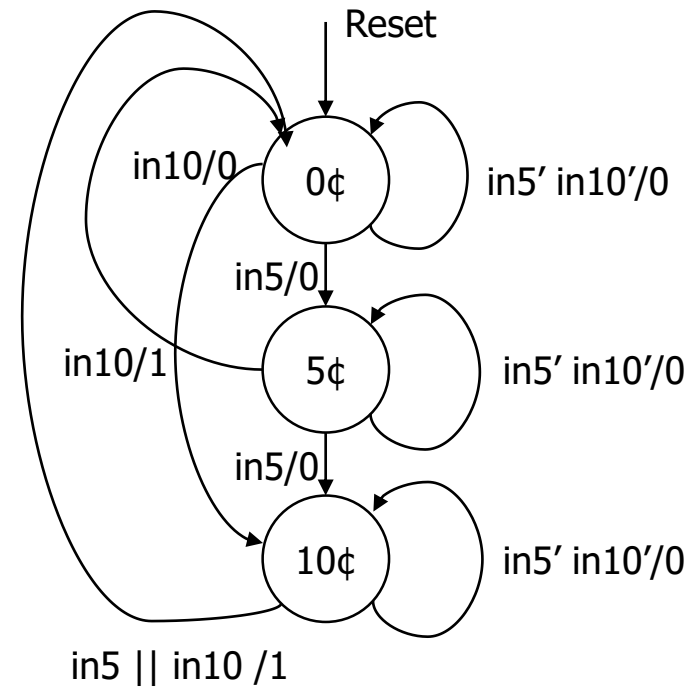
Moore machine

Έξοδοι από κατάσταση



Mealy machine

Έξοδοι στις μεταβάσεις

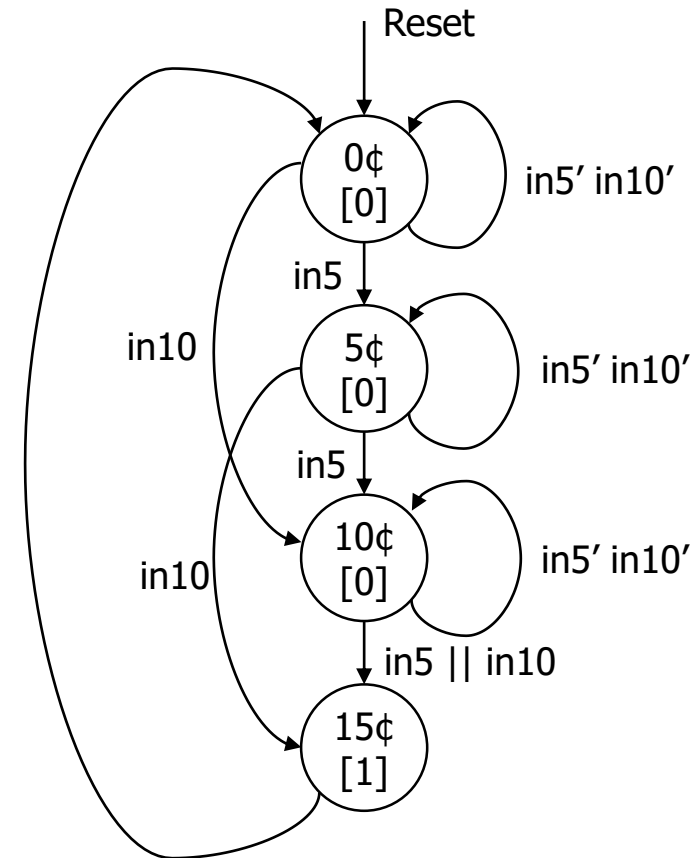


Moore Verilog FSM

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

  always_comb begin
    open = 0; // default output value
    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_ff @(posedge clk)
      if (rst) state <= zero;
      else state <= next_state;
  endmodule
```



Mealy Verilog FSM

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

  always_comb begin
    open = 0; // default output value
    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_ff @(posedge clk)
      if (~rst) state <= zero;
      else state <= next_state;
  endmodule
```

