

VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY HO CHI MINH CITY  
HO CHI MINH CITY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
FACULTY OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

—oo—



---

BÀI TẬP CHƯƠNG 5

## Thiết Kế Hệ Tuần Tự

---

SUPERVISOR: Nguyễn Trung Hiếu

SUBJECT: Digital design and verification

GROUP: 04

**List of Members**

| STT | MSSV    | Họ Và Tên         | Lớp |
|-----|---------|-------------------|-----|
| 1   | 2213874 | Nguyễn Thanh Tùng | L01 |
| 2   | 2210780 | Nguyễn Đại Đồng   | L01 |
| 3   | 2213496 | Nguyễn Quốc Tín   | L01 |

Ho Chi Minh City, ..../20..

# Mục lục

|              |           |
|--------------|-----------|
| <b>Câu 1</b> | <b>1</b>  |
| a) . . . . . | 1         |
| b) . . . . . | 3         |
| c) . . . . . | 4         |
| d) . . . . . | 5         |
| e) . . . . . | 6         |
| <b>Câu 2</b> | <b>15</b> |
| a) . . . . . | 16        |
| b) . . . . . | 17        |
| c) . . . . . | 18        |
| d) . . . . . | 20        |
| <b>Câu 3</b> | <b>24</b> |
| a) . . . . . | 24        |
| b) . . . . . | 28        |
| c) . . . . . | 29        |
| d) . . . . . | 32        |
| e) . . . . . | 49        |
| <b>Câu 4</b> | <b>50</b> |
| a) . . . . . | 51        |
| b) . . . . . | 52        |
| c) . . . . . | 53        |
| d) . . . . . | 54        |

## Danh sách hình vẽ

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Lưu đồ giải thuật của thuật toán $A/B$ . . . . .                     | 1  |
| 2  | Sơ đồ khái tổng quát của module thực hiện thuật toán $A/B$ . . . . . | 1  |
| 3  | Thiết kế HighLevel FSM. . . . .                                      | 4  |
| 4  | DataPath của bộ chia. . . . .  | 5  |
| 5  | Ripple Carry Add/Sub 16 bit. . . . .                                 | 6  |
| 6  | Control_Unit của bộ chia. . . . .                                    | 6  |
| 7  | Dạng sóng của testbench mô phỏng khối thực hiện phép chia. . . . .   | 14 |
| 8  | Giải thuật sử dụng. . . . .  | 15 |
| 9  | Tổng quan kết nối thiết kế. . . . .                                  | 16 |
| 10 | Máy trạng thái bậc cao. . . . .                                      | 17 |
| 11 | Bộ so sánh nhỏ hơn. . . . .  | 18 |
| 12 | Datapath. . . . .  | 19 |
| 13 | Control Unit FSM. . . . .  | 20 |
| 14 | Dạng sóng lúc bắt đầu. . . . .                                       | 23 |
| 15 | Dạng sóng lúc hoàn thành. . . . .                                    | 23 |
| 16 | Yêu cầu của bộ nhớ. . . . .  | 24 |
| 17 | Flowchart của thuật toán Selection Sort. . . . .                     | 25 |
| 18 | Thiết kế tổng quan của module <b>Selection_Sort</b> . . . . .        | 27 |
| 19 | Lưu đồ trạng thái của module <b>Selection_Sort</b> . . . . .         | 28 |
| 20 | Thiết kế tổng quan của module <b>DataPath_Unit</b> . . . . .         | 30 |
| 21 | Sóng ngõ ra tổng quan của module test. . . . .                       | 49 |
| 22 | Ví dụ. . . . .   | 50 |
| 23 | Giải thuật sử dụng. . . . .  | 50 |
| 24 | Tổng quan kết nối của thiết kế. . . . .                              | 51 |
| 25 | Máy trạng thái bậc cao. . . . .                                      | 52 |

|    |                                   |    |
|----|-----------------------------------|----|
| 26 | Datapath. . . . .                 | 53 |
| 27 | Control Unit FSM. . . . .         | 54 |
| 28 | Dạng sóng lúc bắt đầu. . . . .    | 58 |
| 29 | Dạng sóng lúc hoàn thành. . . . . | 59 |

## Danh sách bảng

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Kết quả chạy giải thuật. . . . .                            | 2  |
| 2 | Bảng mô tả các tín hiệu. . . . .                            | 3  |
| 3 | Bảng các trường hợp đặc biệt (Special Cases). . . . .       | 7  |
| 4 | Bảng tín hiệu I/O của module <code>max_min</code> . . . . . | 16 |
| 5 | Bảng I/O của module <code>Selection_Sort</code> . . . . .   | 27 |
| 6 | I/O table for module <code>clear_even</code> . . . . .      | 51 |

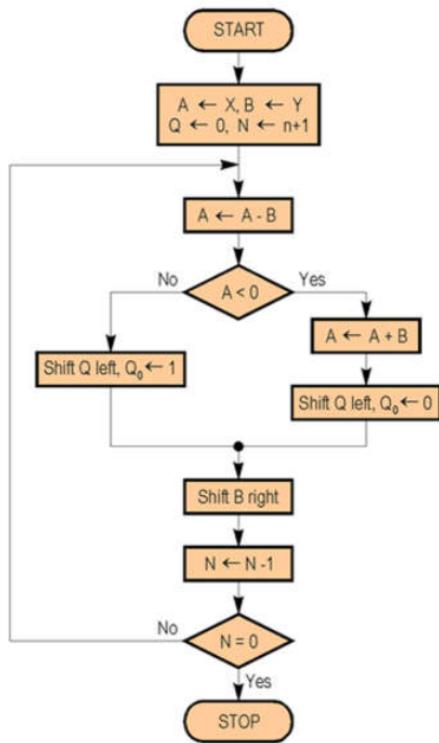
## List of Listings

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Module <code>divider8_top</code> . . . . .                             | 7  |
| 2  | Module <code>div_ctrl</code> . . . . .                                 | 8  |
| 3  | Module <code>alu16</code> . . . . .                                    | 9  |
| 4  | Module <code>div_dp</code> . . . . .                                   | 9  |
| 5  | Module <code>eq8</code> . . . . .                                      | 11 |
| 6  | Kết quả test của module thực hiện phép chia. . . . .                   | 11 |
| 7  | HDL mô tả bộ so sánh bé hơn có dấu. . . . .                            | 20 |
| 8  | HDL mô tả thiết kế tìm số lớn nhất và nhỏ nhất. . . . .                | 21 |
| 9  | Chương trình tạo giá trị ngẫu nhiên ban đầu cho bộ nhớ. . . . .        | 22 |
| 10 | Chương trình kiểm định thiết kế. . . . .                               | 23 |
| 11 | Kết quả kiểm định cho thiết kế bộ tìm số lớn nhất và nhỏ nhất. . . . . | 23 |
| 12 | Doạn chương trình C của giải thuật Selection Sort. . . . .             | 24 |
| 13 | Doạn code nguyên mẫu của giải thuật Selection Sort. . . . .            | 26 |
| 14 | Doạn code chỉnh sửa của giải thuật Selection Sort. . . . .             | 26 |
| 15 | Kết quả so sánh 2 cách viết của Selection Sort. . . . .                | 26 |
| 16 | Module <code>Selection_Sort</code> . . . . .                           | 33 |

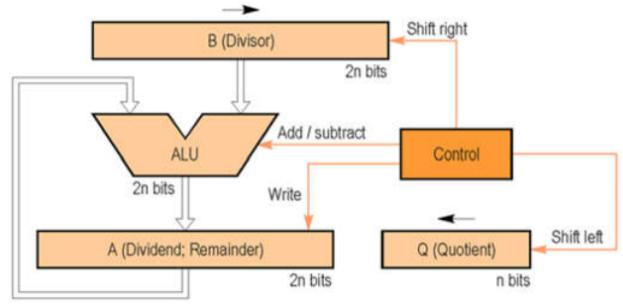
|    |  |    |
|----|--|----|
| 17 | Module SinglePort_RAM. . . . .   | 34 |
| 18 | Module Control_unit. . . . .   | 35 |
| 19 | Module Data_path. . . . .  | 38 |
| 20 | Module Block_Addr. . . . .   | 40 |
| 21 | Module Block_Read_data. . . . .  | 41 |
| 22 | Module Block_Write_data. . . . .   | 42 |
| 23 | Module RAM_addr. . . . .   | 43 |
| 24 | Module RAM_read_data. . . . .  | 43 |
| 25 | Module RAM_write_data. . . . .   | 44 |
| 26 | Module SS_detect_edge. . . . .   | 45 |
| 27 | Module Update_I. . . . .   | 45 |
| 28 | Module Update_J. . . . .   | 46 |
| 29 | Module Update_MIN. . . . .   | 47 |
| 30 | Kết quả sau khi kiểm định lại chức năng của module. . . . .                                    | 47 |
| 31 | HDL mô tả thiết kế xóa các phần tử có giá trị chẵn trong một mảng dữ liệu. . . . .             | 54 |
| 32 | Chương trình tạo giá trị ngẫu nhiên ban đầu cho bộ nhớ. . . . .                                | 56 |
| 33 | Chương trình kiểm định thiết kế. . . . .   | 56 |
| 34 | Kết quả kiểm định cho thiết kế xóa các phần tử có giá trị chẵn trong một mảng dữ liệu. . . . . | 56 |

# Câu 1

Để thực hiện chia hai số  $A$  cho  $B$ , ta có lưu đồ giải thuật sau:



Hình 1: Lưu đồ giải thuật của thuật toán  $A/B$ .



Hình 2: Sơ đồ khối tổng quát của module thực hiện thuật toán  $A/B$ .

a ) Mô tả các bước chạy của giải thuật với ngõ vào  $A = 174$  và  $B = 25$ .

Bước 1: Khởi tạo và load số A (Dividend\_16 bits) và B (Divisor\_16 bits) vào thanh ghi.

Thực hiện căn chỉnh cho MSB\_B nằm cùng MSB\_A. Đồng thời, bắt đầu với thanh ghi Q (8 bit) = 0 và khởi tạo số vòng lặp bằng số bit Q + 1 (9 vòng).

Bước 2: Thực hiện  $A - B$  nếu  $bit\_borrow = 0$  và cập nhật  $A \leftarrow A - B$ . Hoặc thực hiện  $A + B$  nếu  $bit\_borrow = 1$  để restore A . Với Q (8\_bits) sẽ được cập nhật bằng cách shift left như sau:  $Q = \{regQ[6 : 0], \sim bit\_borrow\}$ ;

Bước 3: Shift right B và lặp lại quá trình  $A - B$  đến khi đủ số vòng lặp thì đó là kết quả cuối cùng.

Theo đề, với  $A = 174$  (1010\_1110) và  $B = 25$  (11001). Ta xác định được:

| Vòng lặp | Reg_A        | Reg_B                        | A - B                        | Borrow_flag | $Q = \{reg\_Q[6:0], \sim borrow\_flag\}$ |
|----------|--------------|------------------------------|------------------------------|-------------|--|
| (Init)   | Load A = 174 | Load B = $25 \ll 256 = 6400$ | Chưa thực hiện               |             | 0000_0000                                |
| 9        | 174          | 6400                         | $A - B < 0 \implies A = 174$ | 1           | 0000_0000                                |
| 8        | 174          | $B \gg 1 = 3200$             | $A - B < 0 \implies A = 174$ | 1           | 0000_0000                                |
| 7        | 174          | $B \gg 1 = 1600$             | $A - B < 0 \implies A = 174$ | 1           | 0000_0000                                |
| 6        | 174          | $B \gg 1 = 800$              | $A - B < 0 \implies A = 174$ | 1           | 0000_0000                                |
| 5        | 174          | $B \gg 1 = 400$              | $A - B < 0 \implies A = 174$ | 1           | 0000_0000                                |
| 4        | 174          | $B \gg 1 = 200$              | $A - B < 0 \implies A = 174$ | 1           | 0000_0000                                |
| 3        | 174          | $B \gg 1 = 100$              | $A - B > 0 \implies A = 74$  | 0           | 0000_0001                                |
| 2        | 74           | $B \gg 1 = 50$               | $A - B > 0 \implies A = 24$  | 0           | 0000_0011                                |
| 1        | 24           | $B \gg 1 = 25$               | $A - B < 0 \implies A = 24$  | 1           | 0000_0110                                |

Bảng 1: Kết quả chạy giải thuật.

Vậy sau 9 vòng lặp kết quả của  $A : B$  ( $174 : 25$ ) là  $Q = 0000_0110 = 6$  và dư  $R = 24$ .

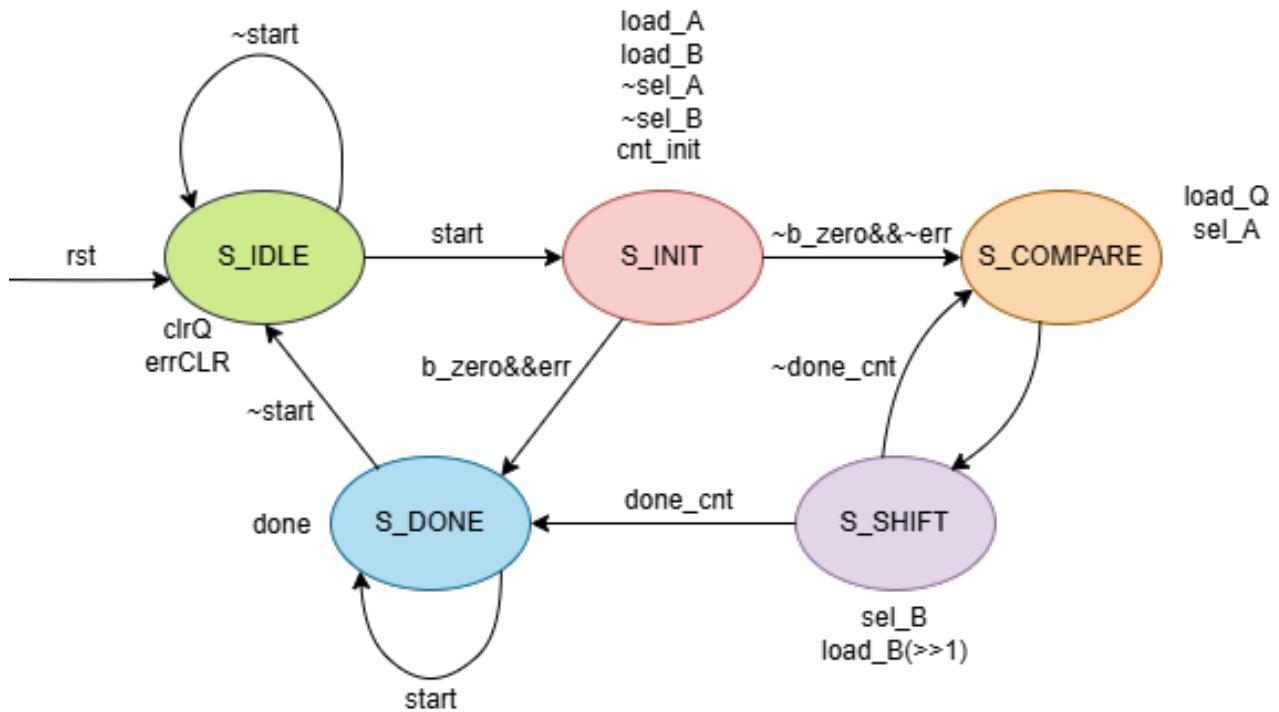
---

b ) Định nghĩa ngõ vào và ngõ ra của thiết kế, giả sử A và B là 2 số 8 bit (Yêu cầu phải có chân start và reset).

| Tên tín hiệu | I/O    | Độ rộng bit | Mô tả tín hiệu                   |
|--------------|--------|-------------|----------------------------------|
| clk          | Input  | 1           | Tín hiệu clock.                  |
| rst          | Input  | 1           | Reset tích cực cao.              |
| start        | Input  | 1           | Tín hiệu bắt đầu.                |
| A            | Input  | 8           | Dividend (Số bị chia).           |
| B            | Input  | 8           | Divisor (Số chia).               |
| Q            | Output | 8           | Quotient (Thương).               |
| R            | Output | 8           | Remainder (Dư).                  |
| done         | Output | 1           | Tín hiệu báo phép chia hoàn tất. |
| err          | Output | 1           | Tín hiệu lỗi khi Divisor = 0.    |

Bảng 2: Bảng mô tả các tín hiệu.

### c ) Thiết kế máy trạng thái bậc cao (High level FSM) của thiết kế.

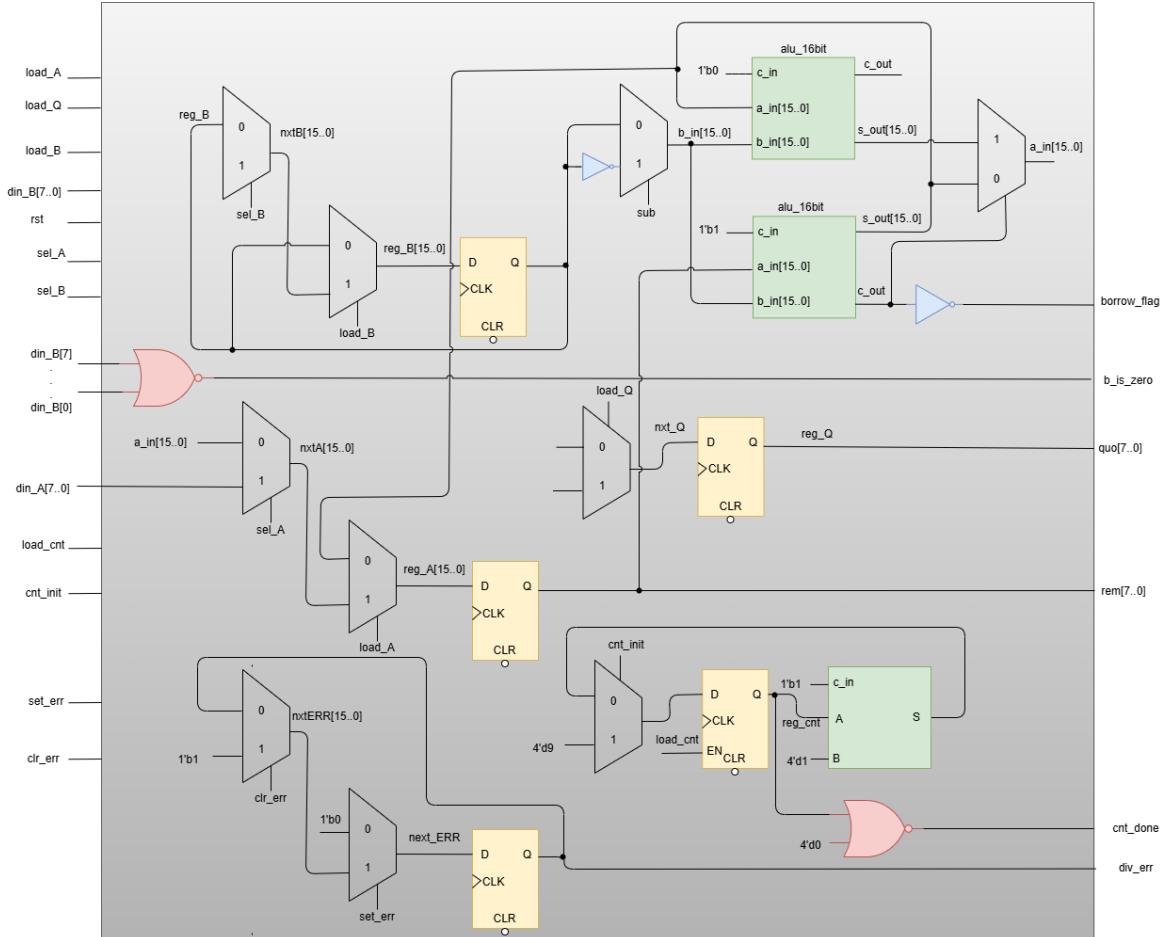


Hình 3: Thiết kế HighLevel FSM.

Trong đó:

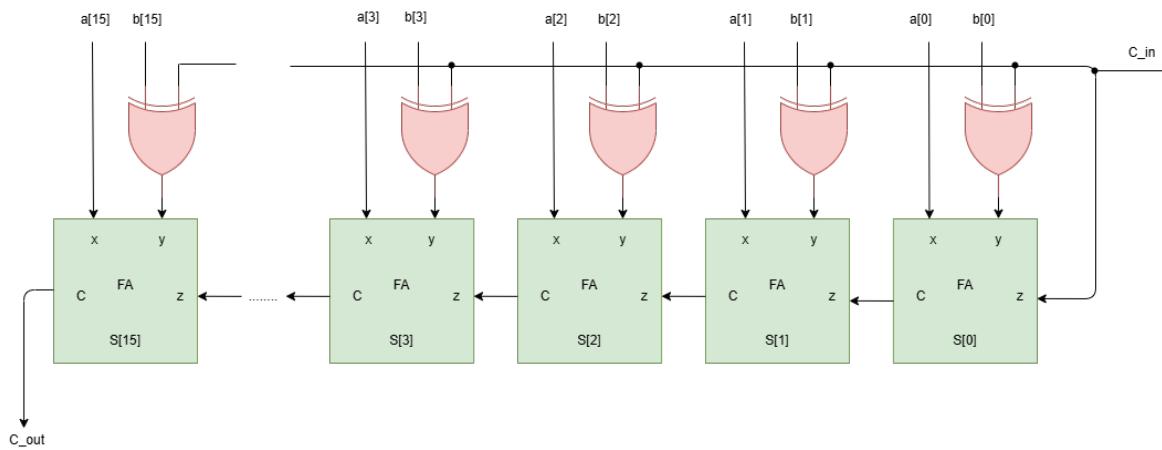
- **S\_IDLE**: Là trạng thái chờ khi reset, khi có tín hiệu start thì module sẽ hoạt động.
- **S\_INIT**: Trạng thái khởi tạo. Dùng để nạp dữ liệu ban đầu trước khi thực hiện tính toán và kiểm tra xem có error không.
- **S\_COMPARE**: Trạng thái thực hiện so sánh giá trị A và B. Từ đó, quyết định `borrow_flag` để thực hiện ghi kết quả mới vào A và Q.
- **S\_SHIFT**: Trạng thái này để Shift right B ( $B \gg 1$ ), đồng thời giảm counter được khởi tạo ở **S\_INIT** để chuẩn bị cho vòng lặp sau. Ngoài ra, kiểm tra xem đã thực hiện đủ vòng lặp hay chưa để quyết định chuyển đến **S\_COMPARE** hay **S\_DONE**.
- **S\_DONE**: Trạng thái đã hoàn thành phép chia.

d ) Thiết kế Datapath và Control Unit.



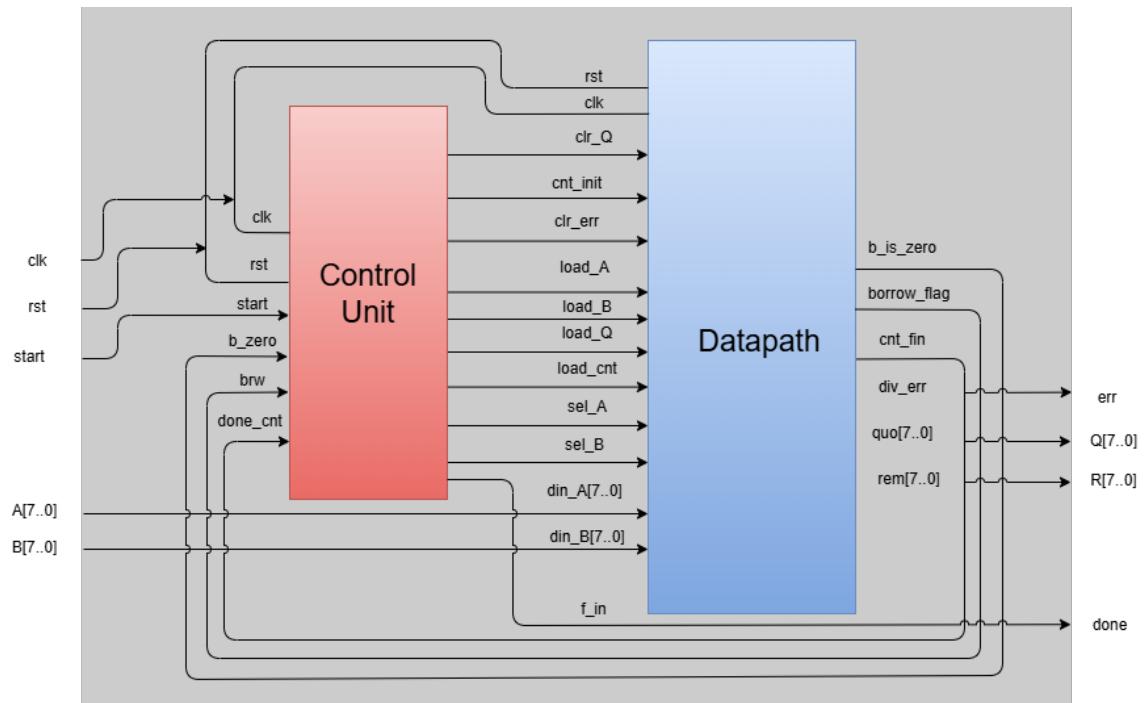
Hình 4: DataPath của bộ chia.

Trong đó, bộ alu\_16 bit được thiết kế theo kiểu Ripple Carry Add/Sub 16 bit:



Hình 5: Ripple Carry Add/Sub 16 bit.

Dựa vào đó, thiết kế Control Unit điều khiển Datapath như sau:



Hình 6: Control\_Unit của bộ chia.

### e ) Viết chương trình mô phỏng hoạt động của thiết kế.

Ngoài những trường hợp thực hiện phép chia bình thường, ta cần kiểm tra một vài đặc biệt để kiểm tra xem có đúng với thiết kế hay chưa.

| Special cases       | Q          | R          | error |
|---------------------|------------|------------|-------|
| $B = 0$             | Don't care | Don't care | 1     |
| $A = 0 \& B \neq 0$ | 0          | 0          | 0     |
| $A < B$             | 0          | A          | 0     |

Bảng 3: Bảng các trường hợp đặc biệt (Special Cases).

### 1. Code thực hiện chương trình.

```

1  module divider8_top (
2      input  logic      clk,
3      input  logic      rst,
4      input  logic      start,
5      input  logic [7:0] A,
6      input  logic [7:0] B,
7
8      output logic      done,
9      output logic      err,
10     output logic [7:0] Q,
11     output logic [7:0] R
12 );
13
14     logic lA, sAinit;
15     logic lB, sBinit;
16     logic lQ, cQ;
17     logic lCNT, cINIT;
18     logic eSET, eCLR;
19
20     logic b_zero, brw, cnt_done;
21
22     div_ctrl ctrl(
23         .clk(clk), .rst(rst),
24         .go(start),
25         .b_zero(b_zero),
26         .brw(brw),
27         .done_cnt(cnt_done),
28         .ldA(lA), .selA_init(sAinit),
29         .ldB(lB), .selB_init(sBinit),
30         .ldQ(lQ), .clrQ(cQ),
31         .ldCNT(lCNT), .cntINIT(cINIT),
32         .errSET(eSET), .errCLR(eCLR),
33         .fin(done)
34 );
35
36     div_dp dp(
37         .clk(clk), .rst(rst),
38         .din_A(A), .din_B(B),
39         .ld_A(lA), .sel_A_init(sAinit),
40         .ld_B(lB), .sel_B_init(sBinit),
41         .ld_Q(lQ), .clr_Q(cQ),
42         .ld_CNT(lCNT), .cnt_init(cINIT),
43         .set_err(eSET),
44         .clr_err(eCLR),
45         .b_is_zero(b_zero),
46         .borrow_flag(brw),
47         .cnt_fin(cnt_done),

```

```

48     .quo(Q),
49     .rem(R),
50     .div_err(err)
51   );
52 endmodule

```

Listing 1: Module divider8\_top.

```

1 module div_ctrl (
2   input logic clk,
3   input logic rst,
4   input logic go,
5   input logic b_zero,
6   input logic brw,
7   input logic done_cnt,
8
9   output logic ldA, selA_init,
10  output logic ldB, selB_init,
11  output logic ldQ, clrQ,
12  output logic ldCNT, cntINIT,
13  output logic errSET, errCLR,
14  output logic fin
15 );
16
17 typedef enum logic[2:0] {
18   S_IDLE = 3'd0,
19   S_INIT = 3'd1,
20   S_COMPARE = 3'd2,
21   S_SHIFT = 3'd3,
22   S_DONE = 3'd4
23 } st_t;
24
25 st_t st, nxt;
26
27 always_ff @(posedge clk or posedge rst)
28   if (rst) st <= S_IDLE;
29   else      st <= nxt;
30
31 always_comb begin
32   nxt = st;
33   ldA=0; selA_init=0;
34   ldB=0; selB_init=0;
35   ldQ=0; clrQ=0;
36   ldCNT=0; cntINIT=0;
37   errSET=0; errCLR=0;
38   fin=0;
39
40   case(st)
41
42     S_IDLE: begin
43       clrQ = 1;
44       errCLR = 1;
45       if (go)
46         nxt = S_INIT;
47     end
48
49     S_INIT: begin
50       selA_init = 1; ldA = 1;
51       selB_init = 1; ldB = 1;
52       ldCNT = 1; cntINIT = 1;
53       clrQ = 1;
54       errCLR = 1;
55       if (b_zero) begin

```

```

56           errSET = 1;
57           nxt = S_DONE;
58       end else begin
59           nxt = S_COMPARE;
60       end
61   end

62
63   S_COMPARE: begin
64       ldA = 1;
65       ldQ = 1;
66       nxt = S_SHIFT;
67   end

68
69   S_SHIFT: begin
70       ldB = 1;
71       ldCNT = 1;
72       if (done_cnt) nxt = S_DONE;
73       else nxt = S_COMPARE;
74   end

75
76   S_DONE: begin
77       fin = 1;
78       if (!go) nxt = S_IDLE;
79   end

80
81   endcase
82 end
83 endmodule

```

Listing 2: Module `div_ctrl`.

```

1 module alu16 (
2     input logic [15:0] a_in,
3     input logic [15:0] b_in,
4     input logic         sub,
5     output logic [15:0] s_out,
6     output logic         carry_out
7 );
8     logic [15:0] b_sel;
9     logic         c_in;
10
11    assign b_sel = sub ? ~b_in : b_in;
12    assign c_in  = sub ? 1'b1 : 1'b0;
13
14    assign {carry_out, s_out} = a_in + b_sel + c_in;
15 endmodule

```

Listing 3: Module `alu16`.

```

1 module div_dp (
2     input logic      clk,
3     input logic      rst,
4     input logic [7:0] din_A,
5     input logic [7:0] din_B,
6
7
8     input logic      ld_A,
9     input logic      sel_A_init,
10    input logic      ld_B,
11    input logic      sel_B_init,
12    input logic      ld_Q,
13    input logic      clr_Q,

```

---

```

14     input  logic      ld_cnt,
15     input  logic      cnt_init,
16     input  logic      set_err,
17     input  logic      clr_err,
18
19
20     output logic      b_is_zero,
21     output logic      borrow_flag,
22     output logic      cnt_fin,
23
24
25     output logic [7:0] quo,
26     output logic [7:0] rem,
27     output logic      div_err
28 );
29
30
31     logic [15:0] regA;
32     logic [15:0] regB;
33     logic [7:0]  regQ;
34     logic [3:0]  regCNT;
35     logic         regERR;
36
37
38     eq8 chkB (.x(din_B), .zero(b_is_zero));
39
40
41     logic [15:0] alu_res;
42     logic         alu_cout;
43
44     alu16 alu1 (
45       .a_in(regA),
46       .b_in(regB),
47       .sub(1'b1),
48       .s_out(alu_res),
49       .carry_out(alu_cout)
50 );
51
52
53     assign borrow_flag = ~alu_cout;
54
55
56     logic [15:0] alu_restore;
57     alu16 alu2 (
58       .a_in(alu_res),
59       .b_in(regB),
60       .sub(1'b0),
61       .s_out(alu_restore),
62       .carry_out()
63 );
64
65
66     logic [15:0] nxtA;
67     assign nxtA =
68       sel_A_init ? {8'd0, din_A} :
69       (borrow_flag ? alu_restore : alu_res);
70
71
72     logic [15:0] nxtB;
73     assign nxtB =
74       sel_B_init ? {din_B, 8'd0} : (regB >> 1);
75
76
77     logic [7:0] nxtQ;

```

```

78     assign nxtQ = {regQ[6:0], ~borrow_flag};
79
80
81     logic [3:0] nxtCNT;
82     assign nxtCNT = regCNT - 1;
83     assign cnt_fin = (regCNT == 4'd1);
84
85
86     logic nxtERR;
87     assign nxtERR = set_err ? 1'b1 :
88                     clr_err ? 1'b0 :
89                     regERR;
90
91
92     always_ff @(posedge clk or posedge rst) begin
93         if (rst) begin
94             regA <= 0;
95             regB <= 0;
96             regQ <= 0;
97             regCNT <= 0;
98             regERR <= 0;
99         end else begin
100            if (ld_A) regA <= nxtA;
101            if (ld_B) regB <= nxtB;
102
103            if (clr_Q) regQ <= 8'd0;
104            else if (ld_Q) regQ <= nxtQ;
105
106            if (ld_cnt) begin
107                if (cnt_init) regCNT <= 4'd9;
108                else regCNT <= nxtCNT;
109            end
110
111            regERR <= nxtERR;
112        end
113    end
114
115    assign quo = regQ;
116    assign rem = regA[7:0];
117    assign div_err = regERR;
118
119 endmodule

```

Listing 4: Module `div_dp`.

```

1 module eq8 (
2     input logic [7:0] x,
3     output logic      zero
4 );
5     assign zero = (x == 8'd0);
6 endmodule

```

Listing 5: Module `eq8`.

- Để tạo giá trị ngẫu nhiên (`$unrandom_range(0, 255)`) trong bộ nhớ để mô phỏng.

```

# =====
#      STARTING ADVANCED DIVIDER TESTBENCH
# =====
# 

```

```
# [PASS] A=174 B=25 | Q=6 R=24
# [PASS] A=0 B=25 | Q=0 R=0
# [PASS] [DIV0] A=37 B=0 detected
# [PASS] [DIV0] A=0 B=0 detected
# [PASS] A=10 B=25 | Q=0 R=10
# [PASS] A=50 B=50 | Q=1 R=0
# [PASS] A=231 B=124 | Q=1 R=107
# [PASS] A=156 B=28 | Q=5 R=16
# [PASS] A=232 B=167 | Q=1 R=65
# [PASS] A=22 B=196 | Q=0 R=22
# [PASS] A=0 B=89 | Q=0 R=0
# [PASS] A=248 B=251 | Q=0 R=248
# [PASS] A=17 B=162 | Q=0 R=17
# [PASS] A=252 B=165 | Q=1 R=87
# [PASS] A=222 B=150 | Q=1 R=72
# [PASS] A=144 B=23 | Q=6 R=6
# [PASS] A=222 B=131 | Q=1 R=91
# [PASS] A=134 B=20 | Q=6 R=14
# [PASS] A=205 B=92 | Q=2 R=21
# [PASS] A=79 B=178 | Q=0 R=79
# [PASS] A=151 B=255 | Q=0 R=151
# [PASS] A=30 B=172 | Q=0 R=30
# [PASS] A=44 B=228 | Q=0 R=44
# [PASS] A=158 B=133 | Q=1 R=25
# [PASS] A=178 B=155 | Q=1 R=23
# [PASS] A=82 B=173 | Q=0 R=82
# [PASS] A=49 B=24 | Q=2 R=1
# [PASS] A=153 B=192 | Q=0 R=153
# [PASS] A=2 B=140 | Q=0 R=2
# [PASS] A=225 B=136 | Q=1 R=89
# [PASS] A=47 B=53 | Q=0 R=47
# [PASS] A=20 B=15 | Q=1 R=5
# [PASS] A=17 B=45 | Q=0 R=17
# [PASS] A=72 B=215 | Q=0 R=72
# [PASS] A=29 B=193 | Q=0 R=29
# [PASS] A=245 B=152 | Q=1 R=93
# [PASS] A=130 B=130 | Q=1 R=0
# [PASS] A=113 B=193 | Q=0 R=113
# [PASS] A=21 B=83 | Q=0 R=21
# [PASS] A=126 B=143 | Q=0 R=126
# [PASS] A=57 B=94 | Q=0 R=57
# [PASS] A=56 B=171 | Q=0 R=56
# [PASS] A=161 B=122 | Q=1 R=39
# [PASS] A=24 B=129 | Q=0 R=24
# [PASS] A=184 B=129 | Q=1 R=55
# [PASS] A=225 B=248 | Q=0 R=225
# [PASS] A=162 B=47 | Q=3 R=21
```

```
# [PASS] A=13 B=151 | Q=0 R=13
# [PASS] A=56 B=67 | Q=0 R=56
# [PASS] A=193 B=77 | Q=2 R=39
# [PASS] A=26 B=117 | Q=0 R=26
# [PASS] A=201 B=214 | Q=0 R=201
# [PASS] A=211 B=1 | Q=211 R=0
# [PASS] A=214 B=137 | Q=1 R=77
# [PASS] A=42 B=191 | Q=0 R=42
# [PASS] A=224 B=15 | Q=14 R=14
# [PASS] A=165 B=212 | Q=0 R=165
# [PASS] A=63 B=163 | Q=0 R=63
# [PASS] A=126 B=89 | Q=1 R=37
# [PASS] A=125 B=78 | Q=1 R=47
# [PASS] A=24 B=186 | Q=0 R=24
# [PASS] A=226 B=219 | Q=1 R=7
# [PASS] A=51 B=19 | Q=2 R=13
# [PASS] A=252 B=113 | Q=2 R=26
# [PASS] A=189 B=130 | Q=1 R=59
# [PASS] A=137 B=41 | Q=3 R=14
# [PASS] A=129 B=94 | Q=1 R=35
# [PASS] A=173 B=87 | Q=1 R=86
# [PASS] A=148 B=168 | Q=0 R=148
# [PASS] A=125 B=116 | Q=1 R=9
# [PASS] A=168 B=74 | Q=2 R=20
# [PASS] A=175 B=89 | Q=1 R=86
# [PASS] A=77 B=161 | Q=0 R=77
# [PASS] A=30 B=28 | Q=1 R=2
# [PASS] A=254 B=72 | Q=3 R=38
# [PASS] A=37 B=106 | Q=0 R=37
# [PASS] A=73 B=206 | Q=0 R=73
# [PASS] A=0 B=51 | Q=0 R=0
# [PASS] A=195 B=254 | Q=0 R=195
# [PASS] A=94 B=187 | Q=0 R=94
# [PASS] A=27 B=138 | Q=0 R=27
# [PASS] A=65 B=59 | Q=1 R=6
# [PASS] A=237 B=8 | Q=29 R=5
# [PASS] A=121 B=33 | Q=3 R=22
# [PASS] A=196 B=126 | Q=1 R=70
# [PASS] A=172 B=147 | Q=1 R=25
# [PASS] A=178 B=136 | Q=1 R=42
# [PASS] A=143 B=6 | Q=23 R=5
# [PASS] A=3 B=214 | Q=0 R=3
# [PASS] A=181 B=69 | Q=2 R=43
# [PASS] A=252 B=233 | Q=1 R=19
# [PASS] A=176 B=255 | Q=0 R=176
# [PASS] A=1 B=189 | Q=0 R=1
# [PASS] A=170 B=32 | Q=5 R=10
```

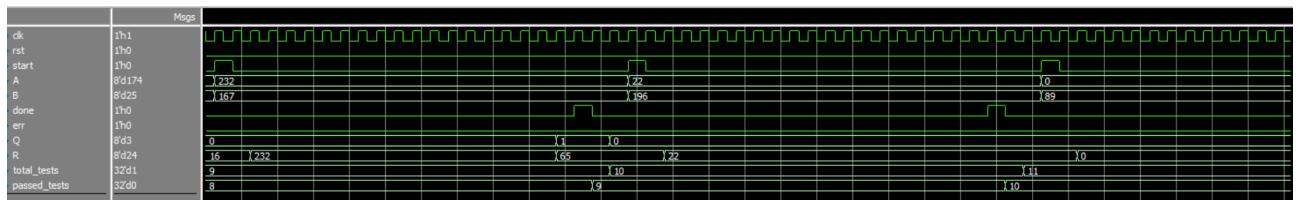
```

# [PASS] A=11 B=217 | Q=0 R=11
# [PASS] A=210 B=45 | Q=4 R=30
# [PASS] A=133 B=79 | Q=1 R=54
# [PASS] A=248 B=172 | Q=1 R=76
# [PASS][DIV0] A=196 B=0 detected
# [PASS] A=120 B=116 | Q=1 R=4
# [PASS] A=61 B=56 | Q=1 R=5
# [PASS] A=89 B=128 | Q=0 R=89
# [PASS] A=203 B=5 | Q=40 R=3
# [PASS] A=85 B=224 | Q=0 R=85
# [PASS] A=53 B=253 | Q=0 R=53
# [PASS] A=175 B=44 | Q=3 R=43
#
# =====
# SUMMARY
# Total : 106
# Passed : 106
# Failed : 0
# =====
# ALL TESTS PASSED
# ** Note: $finish : D:/Div/top/testbench.sv(134)
#     Time: 23935 ns Iteration: 1 Instance: /tb_divider
# 1
# Break in Module tb_divider at D:/Div/top/testbench.sv line 134

```

Listing 6: Kết quả test của module thực hiện phép chia.

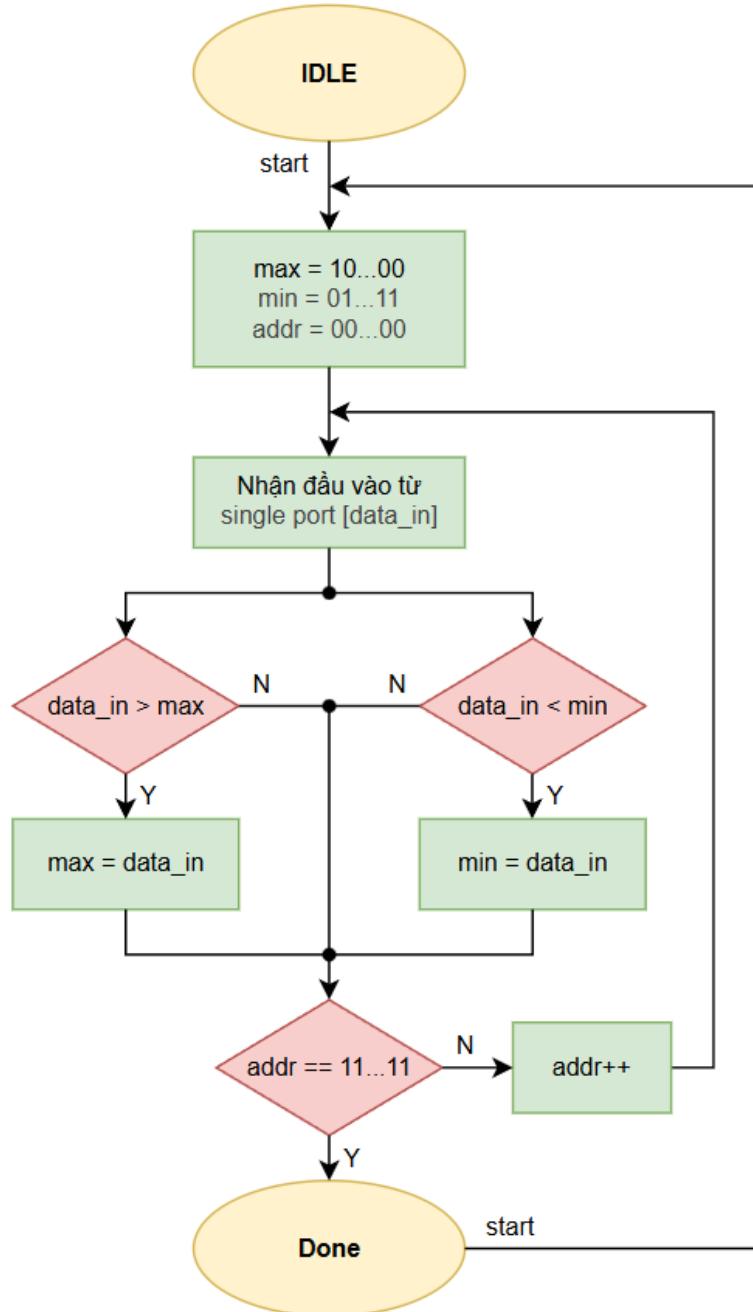
### 3. Waveform và kết quả chạy testbench.



Hình 7: Dạng sóng của testbench mô phỏng khôi thực hiện phép chia.

## Câu 2

Thiết kế phần cứng dùng để tìm giá trị lớn nhất và nhỏ nhất trong một mảng dữ liệu. Giả sử mảng được lưu trong bộ nhớ Single Port và quá trình đọc/ghi diễn ra đồng bộ theo Clk và hoàn thành trong 1 Clk.



Hình 8: Giải thuật sử dụng.

## a ) Định nghĩa ngõ vào và ra của thiết kế, vẽ kết nối của thiết kế với bộ nhớ (Yêu cầu phải có chân start và reset).

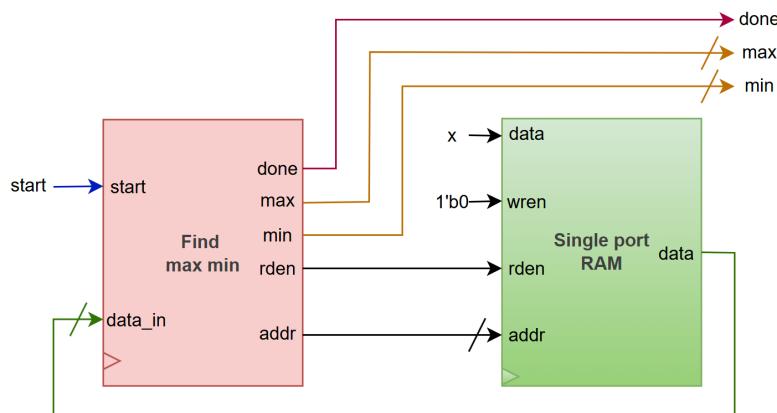
Đề bài không đề cập đến xử lý cho dạng dữ liệu có dấu hoặc không dấu nên nhóm chọn xử lý ở dạng có dấu bù 2.

Hệ thống được thiết kế cần có các tín hiệu:

| Tên tín hiệu | IO     | Độ rộng                              | Mô tả                                   |
|--------------|--------|--------------------------------------|---|
| clk          | Input  | 1                                    | Tín hiệu clock                          |
| rst_n        | Input  | 1                                    | Reset tích cực mức thấp                 |
| start        | Input  | 1                                    | Tín hiệu bắt đầu hoạt động              |
| rden         | Output | 1                                    | Tín hiệu cho phép đọc dữ liệu từ bộ nhớ |
| addr         | Output | $\lceil \log_2(\text{DEPTH}) \rceil$ | Địa chỉ đọc dữ liệu                     |
| data_in      | Input  | signed [WIDTH-1:0]                   | Dữ liệu đầu vào từ bộ nhớ               |
| done         | Output | 1                                    | Tín hiệu kết thúc quá trình tìm max/min |
| max          | Output | signed [WIDTH-1:0]                   | Giá trị lớn nhất tìm được               |
| min          | Output | signed [WIDTH-1:0]                   | Giá trị nhỏ nhất tìm được               |

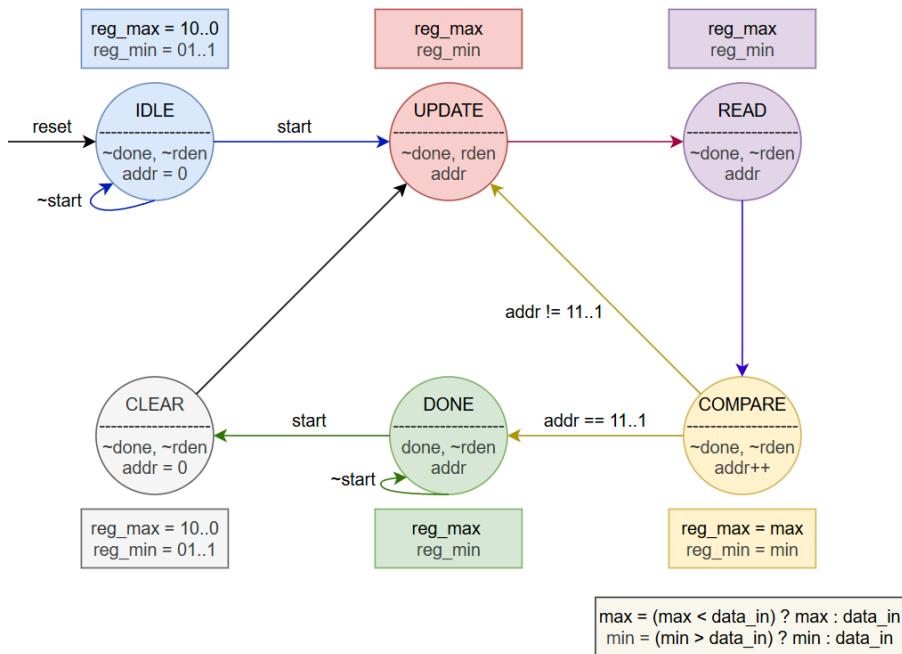
Bảng 4: Bảng tín hiệu I/O của module `max_min`

Các tín hiệu ngõ ra từ khối Find max min được kết nối như hình với các ngõ vào của khối bộ nhớ, riêng ngõ vào wren luôn ở mức thấp vì không cập nhật dữ liệu mới vào bộ nhớ.



Hình 9: Tổng quan kết nối thiết kế.

## b ) Thiết kế máy trạng thái bậc cao của thiết kế.



Hình 10: Máy trạng thái bậc cao.

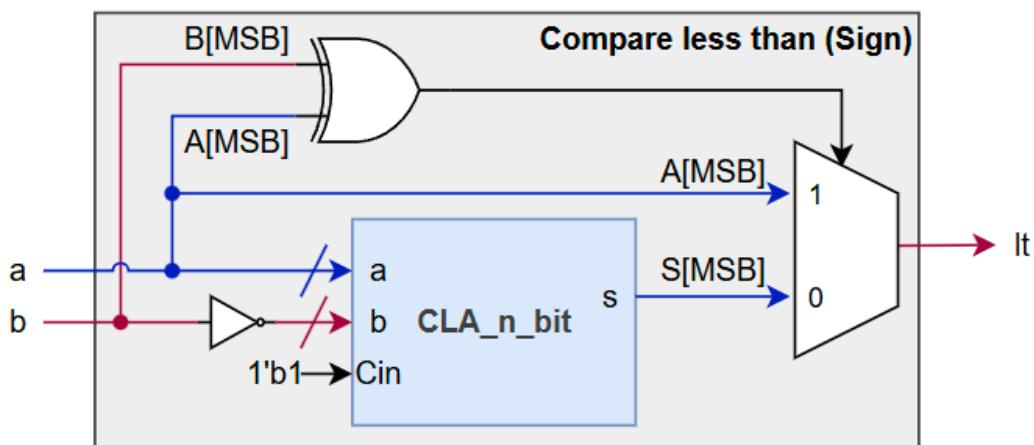
Thiết kế gồm 6 trạng thái chính:

- IDLE: là trạng thái ban đầu, khi reset sẽ luôn trở về trạng thái này, giá trị thanh ghi max sẽ được đặt là cực tiểu và thanh ghi min sẽ được đặt là cực đại, đây là trạng thái chờ ban đầu của hệ thống, khi có tín hiệu start sẽ chuyển sang trạng thái UPDATE.
- UPDATE: ở trạng thái này sẽ cập nhật các giá trị max, min và địa chỉ truy cập bộ nhớ mới được tính toán từ trạng thái COMPARE, đồng thời đưa ngõ ra rden lên mức cao để chuẩn bị nhận dữ liệu ngõ vào mới từ bộ nhớ.
- READ: đây là trạng thái chờ đọc vì ở đây bộ nhớ đọc đồng bộ, do đó cần phải đợi một chu kỳ để nhận dữ liệu đầu vào.
- COMPARE: ở trạng thái này, sẽ lấy tín hiệu đầu vào đếm so sánh với các dữ liệu trong thanh ghi max và min, nếu dữ liệu thỏa sẽ được cập nhật ở trạng thái kế tiếp, đồng thời cũng cập nhật địa chỉ mới ( $\text{addr} + 1$ ). Nếu đã so sánh hết dữ liệu trong bộ nhớ sẽ chuyển sang trạng thái DONE, ngược lại sẽ sang trạng thái UPDATE để chuẩn bị nhận dữ liệu mới từ bộ nhớ.

- DONE: là trạng thái thông báo việc tìm giá trị lớn nhất, nhỏ nhất hoàn tất, lúc này tín hiệu done sẽ tích cực mức cao (done chỉ mức cao ở trạng thái này). Nếu nhận được tín hiệu start mức cao sẽ chuyển sang trạng thái CLEAR, ngược lại sẽ giữ trạng thái hiện tại.
- CLEAR: trạng thái này đóng vai trò đặt lại giá trị thanh ghi max là cực tiểu và thanh ghi min là cực đại để chuẩn bị cho lần tìm giá trị lớn nhất, nhỏ nhất kế tiếp.

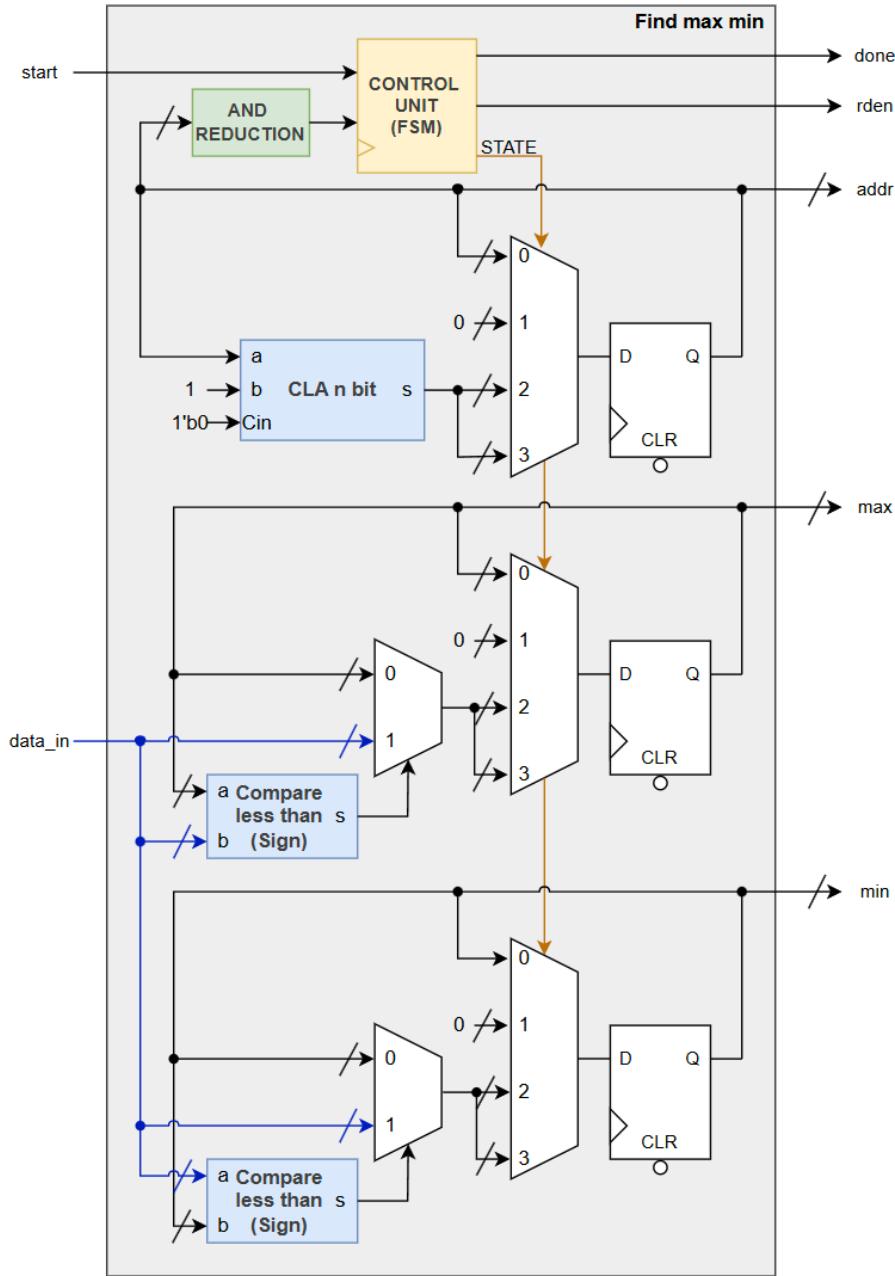
### c ) Thiết kế Datapath và Control Unit của thiết kế.

Dầu tiên, cần phải thiết kế khối so sánh với ngõ ra nhỏ hơn tích cực cao để so sánh các giá trị của ngõ vào so với giá trị trong 2 thanh ghi max, min.



Hình 11: Bộ so sánh nhỏ hơn.

Bộ so sánh gồm 1 bộ CLA để làm phép trừ tính toán giá trị chênh lệch giữa hai giá trị đầu vào a và b. Một cổng logic XOR 2 ngõ vào (là bit MSB của hai ngõ vào a, b) để xác định a, b có cùng dấu không. Tín hiệu ngõ ra cổng XOR sẽ được nối với tín hiệu lựa chọn của một bộ MUX 2 sang 1 để lựa chọn nếu a, b cùng dấu → sử dụng bit MSB của ngõ ra CLA, nếu a, b khác dấu thì sử dụng bit MSB của a làm cờ so sánh  $a < b$ .



Hình 12: Datapath.

Datapath của thiết kế gồm 3 khối MUX 4-1 để xác định giá trị cập nhật cho 3 thanh ghi dựa vào trạng thái hiện tại.

Ba thanh ghi gồm:

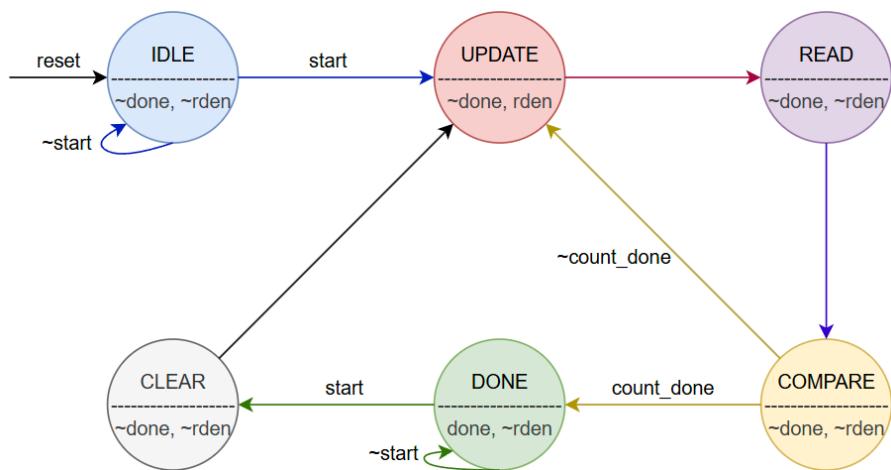
- Thanh ghi địa chỉ, đóng vai trò trỏ vào bộ nhớ, kết hợp với tín hiệu rden để lấy dữ liệu đầu vào.

- Thanh ghi max, lưu giá trị tối đa.
- Thanh ghi min, lưu giá trị cực tiểu.

Một bộ cộng để tăng địa chỉ truy cập bộ nhớ.

Hai bộ so sánh nhỏ hơn để đưa ra tín hiệu lựa chọn giữ giá trị thanh ghi max, min hoặc thay thế bằng giá trị đầu vào data\_in.

Một bộ AND Reduction để xác định địa chỉ đạt đến giá trị cuối của bộ nhớ, là điều kiện để chuyển từ trạng thái COMPARE sang trạng thái DONE.



Hình 13: Control Unit FSM.

#### d ) Viết chương trình mô phỏng hoạt động của thiết kế.

```

1 module lt_compare_sign #(
2     parameter WIDTH = 8
3 )(
4     input  logic [WIDTH - 1:0] i_a ,
5     input  logic [WIDTH - 1:0] i_b ,
6     output logic                  o_lt
7 );
8
9     logic [WIDTH - 1:0] s;
10
11    adder_flex_no_carry #(
12        .WIDTH(WIDTH)
13    ) compare_max (
14        .i_a      (i_a),
15        .i_b      (~i_b),
16        .i_cin   (1'b1),
17        .o_s      (s)
18    );
19
20    assign o_lt = (i_a[WIDTH-1] ^ i_b[WIDTH-1]) ? i_a[WIDTH-1] : s[WIDTH-1];

```

```
21
22 endmodule
```

Listing 7: HDL mô tả bộ so sánh bé hơn có dấu.

```
1 module max_min #(
2     parameter DEPTH = 128,
3     parameter WIDTH = 8
4 )(
5     input  logic          i_clk      ,
6     input  logic          i_rst_n   ,
7     input  logic          i_start    ,
8     output logic          o_rden    ,
9     output logic [${clog2(DEPTH)} - 1:0] o_addr   ,
10    input  logic signed [WIDTH      - 1:0] i_data   ,
11    output logic          o_done    ,
12    output logic signed [WIDTH      - 1:0] o_max    ,
13    output logic signed [WIDTH      - 1:0] o_min    ,
14 );
15
16 localparam DEPTH_S = DEPTH - 1;
17 localparam WIDTH_S = WIDTH - 1;
18
19 logic [WIDTH - 1:0] max, min;
20 logic flag_max, flag_min;
21
22 typedef enum logic[2:0] {
23     IDLE   ,
24     READ   ,
25     COMPARE ,
26     UPDATE  ,
27     DONE    ,
28     CLEAR
29 } e_state;
30
31 e_state pstate, nstate;
32 logic [$clog2(DEPTH) - 1:0] reg_count, count, count_add;
33
34 always_ff @(posedge i_clk, negedge i_rst_n) begin : blockName
35     if(~i_rst_n) pstate <= IDLE ;
36     else          pstate <= nstate;
37 end
38
39 always_comb begin
40     case(pstate)
41         IDLE   : nstate = i_start ? UPDATE : pstate;
42         UPDATE : nstate = (&reg_count) ? DONE : READ;
43         READ   : nstate = COMPARE;
44         COMPARE: nstate = UPDATE ;
45         DONE    : nstate = i_start ? CLEAR : pstate;
46         CLEAR   : nstate = UPDATE;
47         default: nstate = IDLE;
48     endcase
49 end
50
51 assign count  = (pstate == COMPARE) ? count_add : ((pstate == CLEAR) ? '0 : reg_count);
52 assign o_addr = count;
53
54 assign o_done = (pstate == DONE);
55 //assign o_rden = (pstate == UPDATE) | (pstate == IDLE);
56 assign o_rden = (pstate == UPDATE);
57
58 always_ff @(posedge i_clk, negedge i_rst_n) begin
```

```

59      if(~i_RST_N) begin
60          reg_count <= '0;
61          o_max      <= {1'b1, {WIDTH_S{1'b0}}};
62          o_min      <= {1'b0, {WIDTH_S{1'b1}}};
63      end
64      else begin
65          reg_count <= count;
66          o_max      <= max ;
67          o_min      <= min ;
68      end
69  end
70
71 adder_flex_no_carry #(
72     .WIDTH($clog2(DEPTH))
73 ) add_1 (
74     .i_a  (reg_count),
75     .i_b  ({DEPTH_S{1'b0}},1'b1),
76     .i_cin (1'b0),
77     .o_s   (count_add)
78 );
79
80 assign max = (pstate == COMPARE) ? (flag_max ? i_data : o_max) : ((pstate == CLEAR) ? {1'b1, {WIDTH_S{1'b0}}} : o_max);
81 assign min = (pstate == COMPARE) ? (flag_min ? i_data : o_min) : ((pstate == CLEAR) ? {1'b0, {WIDTH_S{1'b1}}} : o_min);
82
83 lt_compare_sign #(
84     .WIDTH(WIDTH)
85 ) compare_max (
86     .i_a (o_max),
87     .i_b (i_data),
88     .o_lt(flag_max) // a < b
89 );
90
91 lt_compare_sign #(
92     .WIDTH(WIDTH)
93 ) compare_min (
94     .i_a (i_data),
95     .i_b (o_min),
96     .o_lt(flag_min) // a < b
97 );
98
99 endmodule

```

Listing 8: HDL mô tả thiết kế tìm số lớn nhất và nhỏ nhất.

Để tạo giá trị ngẫu nhiên trong bộ nhớ để mô phỏng, nhóm chọn sử dụng `$urandom_range(,)`; mà System Verilog cung cấp.

```

1 localparam WIDTH_S = DW - 1;
2
3 golden_min = {1'b0, {WIDTH_S{1'b1}}};    // max 2^(n-1)
4 golden_max = {1'b1, {WIDTH_S{1'b0}}};    // min -2^(m-1)
5
6 for (i = 0; i < DEPTH; i++) begin
7     ram.mem[i] = $urandom_range(-2**WIDTH_S, 2**WIDTH_S - 1);
8
9     if (ram.mem[i] < golden_min) golden_min = ram.mem[i];
10
11    if (ram.mem[i] > golden_max) golden_max = ram.mem[i];
12
13 end

```

```

14 $display("Golden Min = %0d, Golden Max = %0d",
15 golden_min, golden_max);

```

Listing 9: Chương trình tạo giá trị ngẫu nhiên ban đầu cho bộ nhớ.

```

1 always @(posedge clk) begin
2   if (done) begin
3     $display("DUT Min = %0d, DUT Max = %0d", dut_min, dut_max);
4
5     if (dut_min === golden_min && dut_max === golden_max)
6       $display(">>> TEST PASS <<<");
7     else begin
8       $display(">>> TEST FAIL <<<");
9       $display("Expected Min=%0d Max=%0d", golden_min, golden_max);
10    end
11  end
12 end

```

Listing 10: Chương trình kiểm định thiết kế.

```

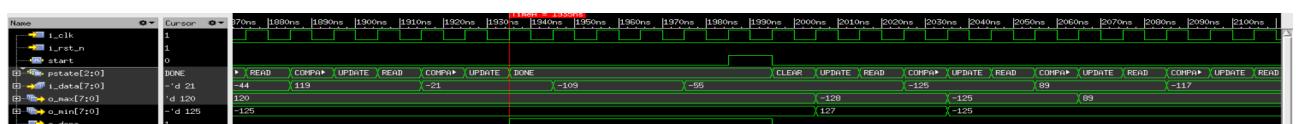
xcelium> run
Golden Min = -125, Golden Max = 120
DUT Min = -125, DUT Max = 120
>>> TEST PASS <<<
Simulation complete via $finish(1) at time 995 NS + 0
./01_tb/max_min_tb.sv:106                      $finish;

```

Listing 11: Kết quả kiểm định cho thiết kế bộ tìm số lớn nhất và nhỏ nhất.



Hình 14: Dạng sóng lúc bắt đầu.



Hình 15: Dạng sóng lúc hoàn thành.

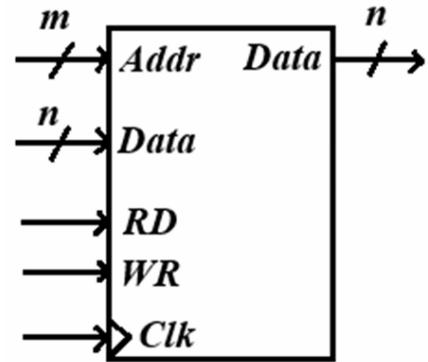
Kết luận: Máy trạng thái chuyển đúng so với dự tính, giá trị kết quả so sánh chính xác.

## Câu 3

Cho đoạn code C sau dùng để sắp xếp một mảng n phần tử theo thứ tự tăng dần sử dụng giải thuật *Selection Sort*:

```
1     int n = arr.size() - 1;
2     for(int i = 0; i < n; i++) {
3         min = i;
4         for(int j = i+1; j <= n; j++){
5             if(arr[j] < arr[min]){
6                 min = j;
7             }
8         }
9         swap(arr[i], arr[min]);
10    }
```

Listing 12: Đoạn chương trình C của giải thuật Selection Sort.

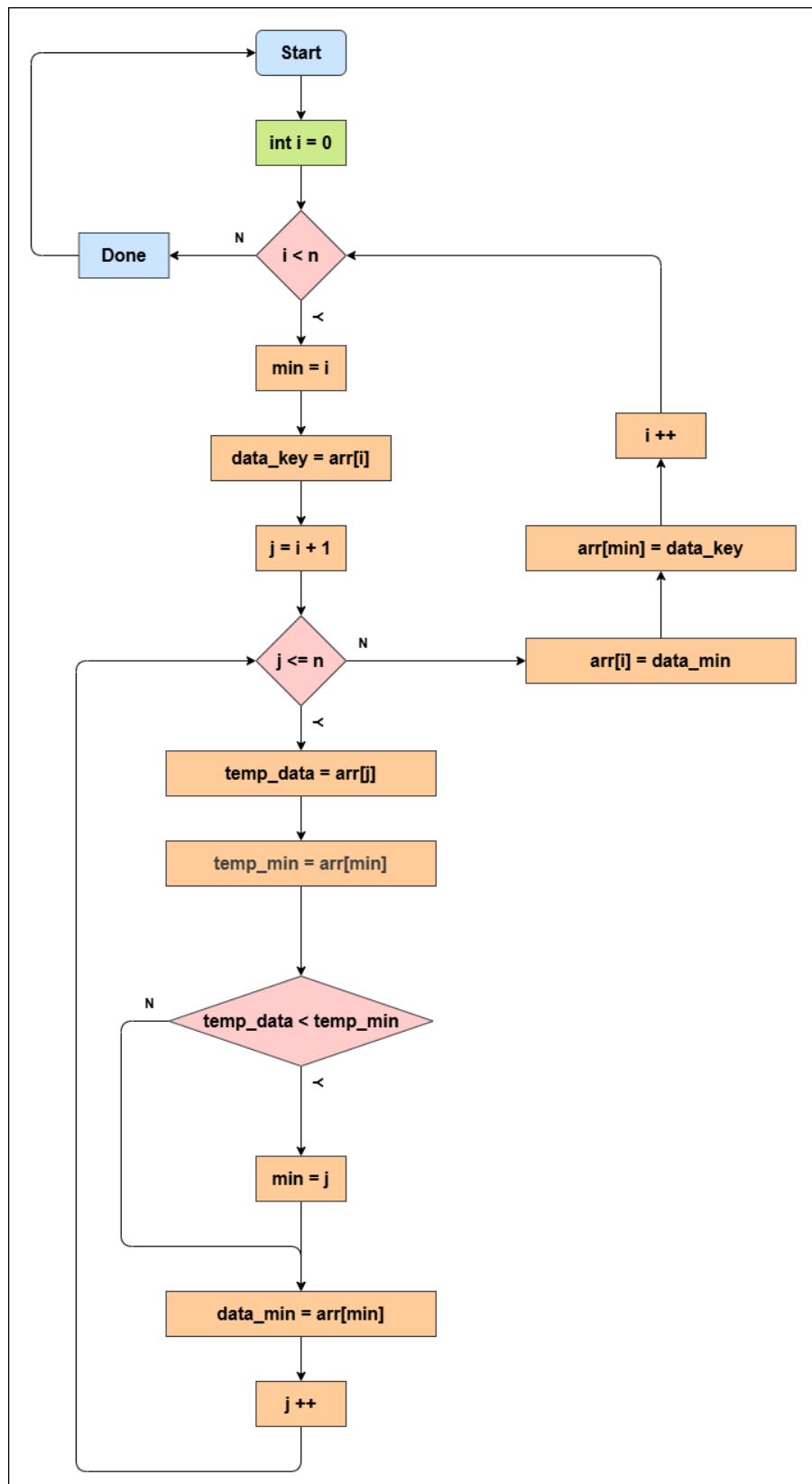


Hình 16: Yêu cầu của bộ nhớ.

Người ta muốn chuyển đổi giải thuật ở đoạn code 12 trên sang phần cứng để thực thi. Giả sử mảng được lưu trong bộ nhớ *Single Port* ở hình 16 và quá trình đọc/ghi diễn ra đồng bộ theo Clock và hoàn thành trong 1 Clock.

a ) Định nghĩa ngõ vào ra của thiết kế, vẽ kết nối của thiết kế của bộ nhớ (Yêu cầu phải có chân Start và Reset).

Ta tiến hành biểu diễn đoạn code 12 trên dưới dạng flowchart như sau:



Hình 17: Flowchart của thuật toán Selection Sort.

Từ hình 17, cho ta thấy được các dữ liệu được đọc trước và các dữ liệu có sẵn để có thể dễ dàng trong việc chuyển đổi từ giải thuật phần mềm qua phần cứng. Thực hiện kiểm chứng cách hoạt động của giải thuật theo flowchart và giải thuật gốc ở chương trình 12.

```

1     void selection_sort_standard(std::
2         vector<int> &arr){
3             int n = arr.size() - 1;
4             for(int i = 0; i < n; i++){
5                 int min = i;
6                 for(int j = i+1; j <= n; j++){
7                     if(arr[j] < arr[min]){
8                         min = j;
9                     }
10                }
11                std::swap(arr[i], arr[min]);
12            }
13        }
14    }
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

```

Listing 13: Đoạn code nguyên mẫu của giải thuật Selection Sort.

```

1     void selection_sort_cus(std::vector<
2         int> &arr){
3             int n = arr.size() - 1;
4             int min = 0;
5             int temp_data = 0;
6             int temp_min = 0;
7             int data_key = 0;
8             int data_min = 0;
9             for(int i = 0; i < n; i++){
10                 data_key = arr[i];
11                 min = i;
12                 for(int j = i + 1; j <= n; j++)
13                     temp_data = arr[j];
14                     temp_min = arr[min];
15                     if(temp_data < temp_min){
16                         min = j;
17                     }
18                     data_min = arr[min];
19                     arr[i] = data_min;
20                     arr[min] = data_key;
21             }
22         }
23

```

Listing 14: Đoạn code chỉnh sửa của giải thuật Selection Sort.

Kết quả cho ra là:

```

Finished reading file: ./tools/unsorted.txt
Check Selection_Sort Standard: PASS
Finish write file './Reports/COMPILE_REPORT/sorted_standard.txt'.
Check Selection_Sort Cus: PASS
Finish write file './Reports/COMPILE_REPORT/sorted_cus.txt'.

```

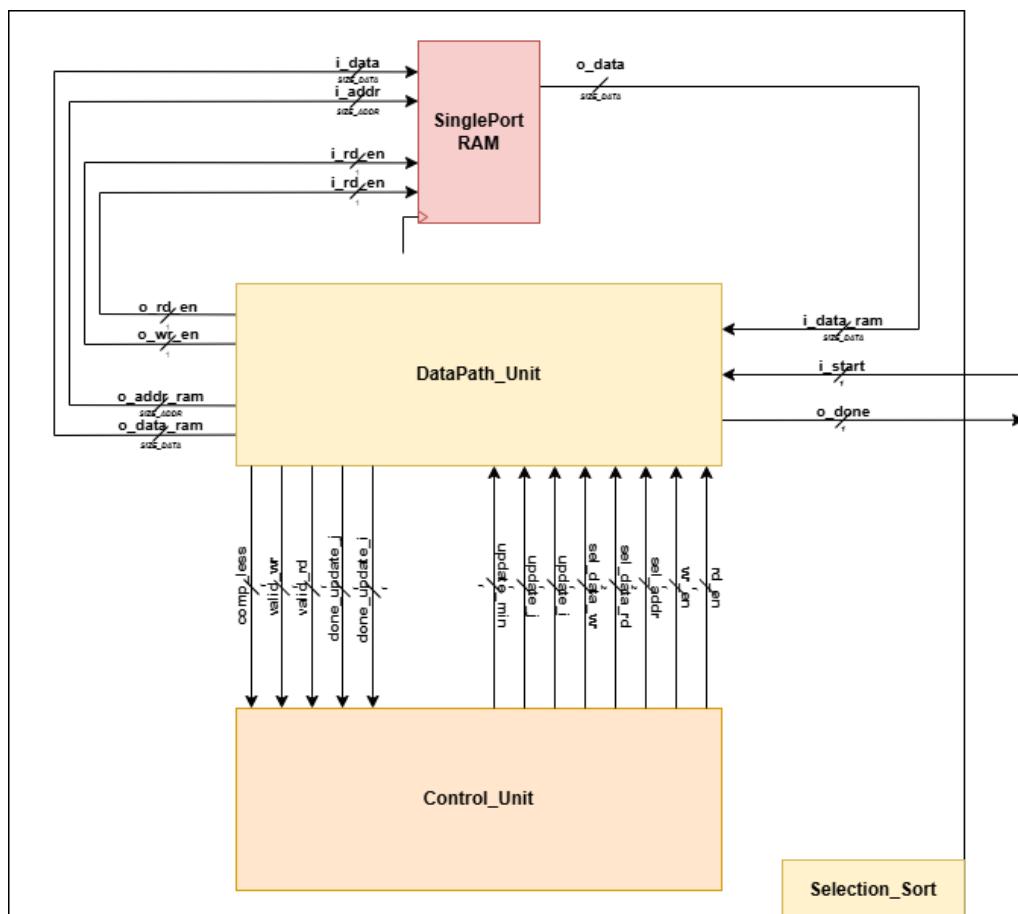
Listing 15: Kết quả so sánh 2 cách viết của Selection Sort.

Sau khi đã viết lại đoạn code cho dễ nhìn, tiếp đến sẽ định nghĩa lại ngõ vào và ra của module top chính ra Selection\_Sort như sau:

| Signal  | I/O    | Size | Functional                                     |
|---------|--------|------|--|
| i_clk   | Input  | 1    | Clock của toàn hệ thống.                       |
| i_RST_t | Input  | 1    | Tín hiệu reset của hệ thống với tích cực thấp. |
| i_start | Input  | 1    | Tín hiệu bắt đầu hoạt động của bộ.             |
| o_done  | Output | 1    | Tín hiệu cho biết được đã sắp xếp xong mảng.   |

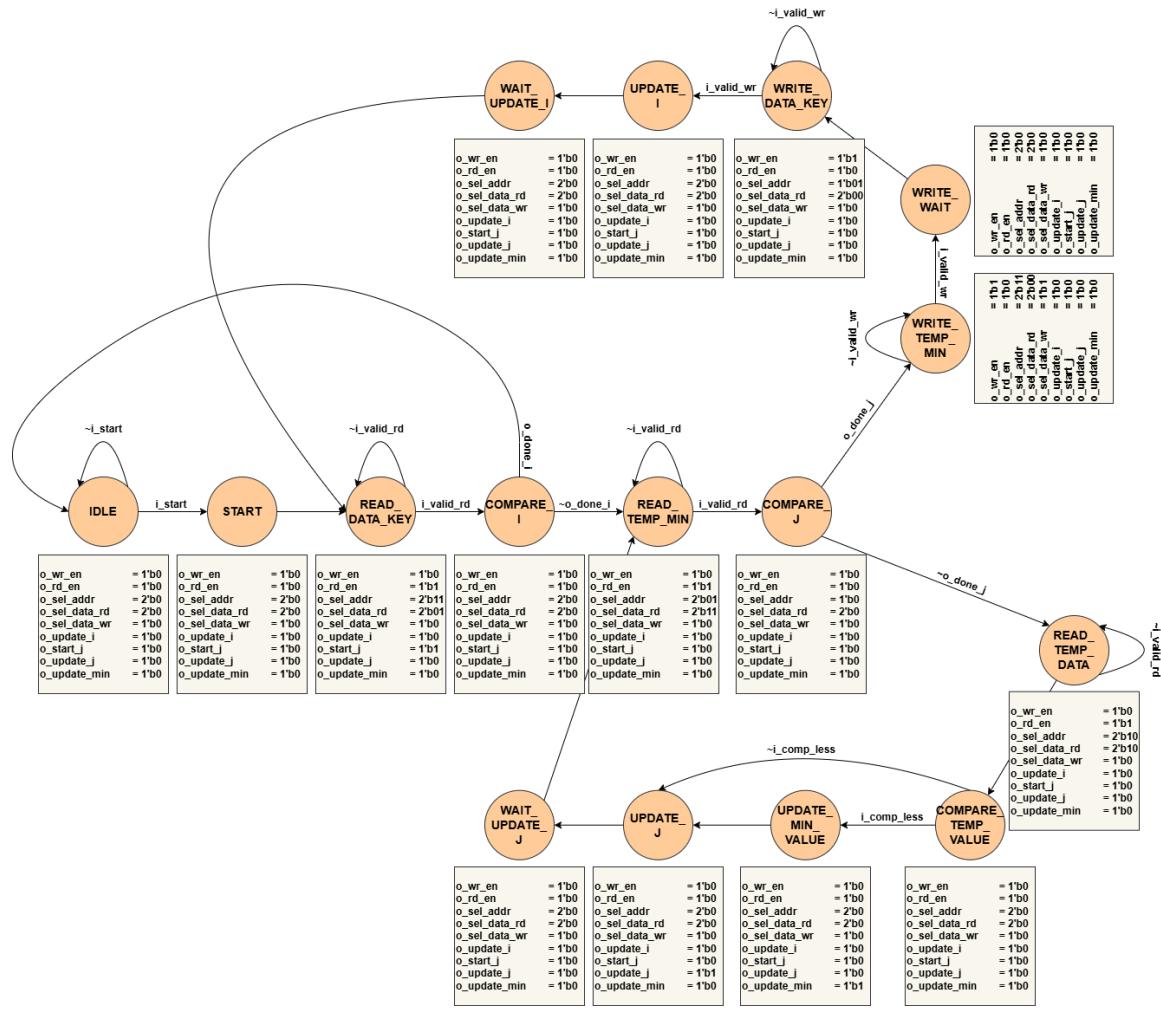
Bảng 5: Bảng I/O của module Selection\_Sort.

Từ đó, ta có thiết kế tổng quan của module Selection\_Sort:



Hình 18: Thiết kế tổng quan của module Selection\_Sort.

## b ) Thiết kế máy trạng thái bậc cao của thiết kế.



Hình 19: Lưu đồ trạng thái của module Selection\_Sort.

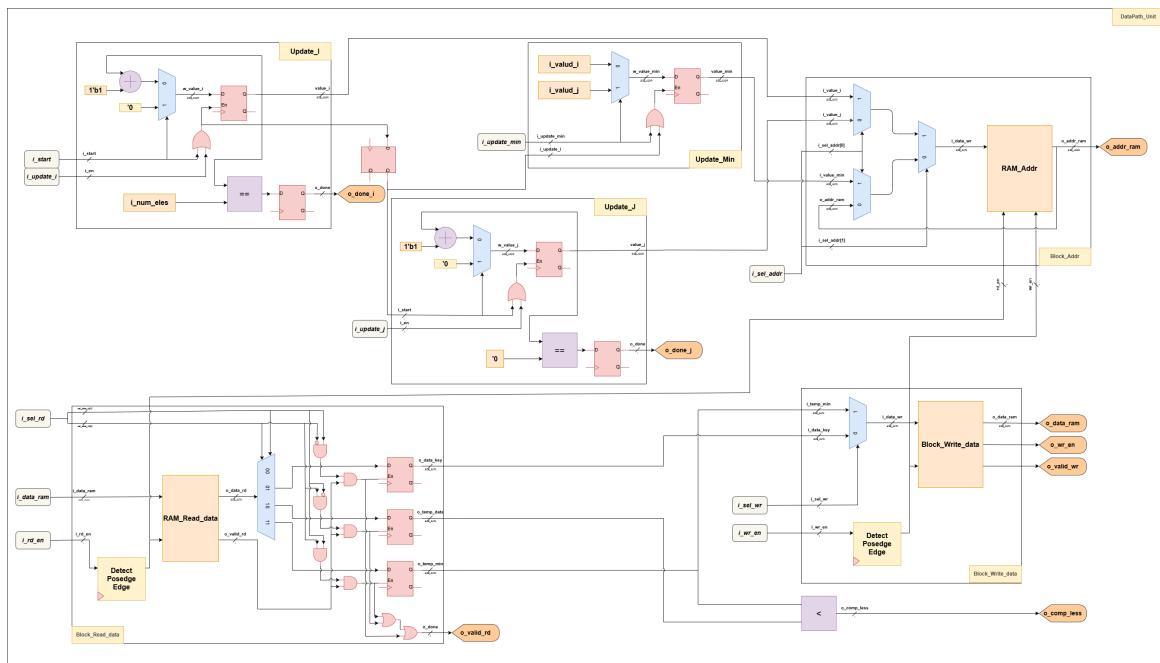
FSM gồm có 16 trạng thái như sau:

- **IDLE**: là trạng thái khởi tạo của module sau khi có reset, và chờ có tín hiệu  $i_{start}$  để module bắt đầu hoạt động.
- **START**: là trạng thái khởi tạo giá trị khởi tạo cho  $value\_i$ .
- **READ\_DATA\_KEY**: là đợi đọc dữ liệu tại vị trí đang xét (theo giá trị  $value\_i$ ).
- **COMPARE\_I**: là trạng thái kiểm tra vòng lặp (for) cho biến  $value\_i$  xem đã kết thúc quá trình sắp xếp dữ liệu trong mảng.
- **WAIT\_UPDATE\_J**: là trạng thái chờ cập nhật dữ liệu.
- **UPDATE\_J**: là trạng thái cập nhật dữ liệu.
- **UPDATE\_MIN\_VALUE**: là trạng thái cập nhật giá trị minimum.
- **COMPARE\_TEMP\_VALUE**: là trạng thái so sánh giá trị temporary với giá trị minimum.
- **READ\_TEMP\_DATA**: là trạng thái đọc dữ liệu temporary.
- **WRITE\_WAIT**: là trạng thái chờ ghi dữ liệu.
- **WRITE\_DATA\_KEY**: là trạng thái ghi dữ liệu key.
- **UPDATE\_I**: là trạng thái cập nhật dữ liệu.
- **WAIT\_UPDATE\_I**: là trạng thái chờ cập nhật dữ liệu.

- 
- **READ\_TEMP\_MIN**: là trạng thái đọc dữ liệu `temp_min` có mục đích để kiểm tra ra giá trị nhỏ nhất từ vị trí `value_i` đến cuối mảng.
  - **COMPARE\_J**: là trạng thái kiểm tra vòng lặp (for) cho biến `value_j` xem đã kết thúc quá trình dò giá trị trong mảng.
  - **READ\_TEMP\_DATA**: là trạng thái đọc dữ liệu theo giá trị của `value_j`.
  - **COMPARE\_TEMP\_VALUE**: là kiểm tra thử xem có giá trị nào nhỏ hơn tại vị trí tại giá trị nhỏ nhất hiện tại.
  - **UPDATE\_MIN\_VALUE**: là việc cập nhật vị trí cho vị trí min của dữ liệu.
  - **UPDATE\_J**: là trạng thái thực hiện việc tăng giá trị của `value_j`.
  - **WAIT\_UPDATE\_J**: là trạng thái chờ giá trị `value_j` cập nhật.
  - **WRITE\_TEMP\_MIN**: thực hiện ghi lại dữ liệu nhỏ nhất lại vị trí đang xét tại `value_i`.
  - **WRITE\_WAIT**: là trạng thái chờ dữ liệu ghi.
  - **WRITE\_DATA\_KEY**: thực hiện ghi lại giá trị ở tại `value_i` vào thẻ chõ của `value_min`.
  - **UPDATE\_I**: là trạng thái thực hiện việc tăng giá trị của `value_i`.
  - **WAIT\_UPDATE\_I**: là trạng thái chờ cập nhật cho giá trị `value_i`.

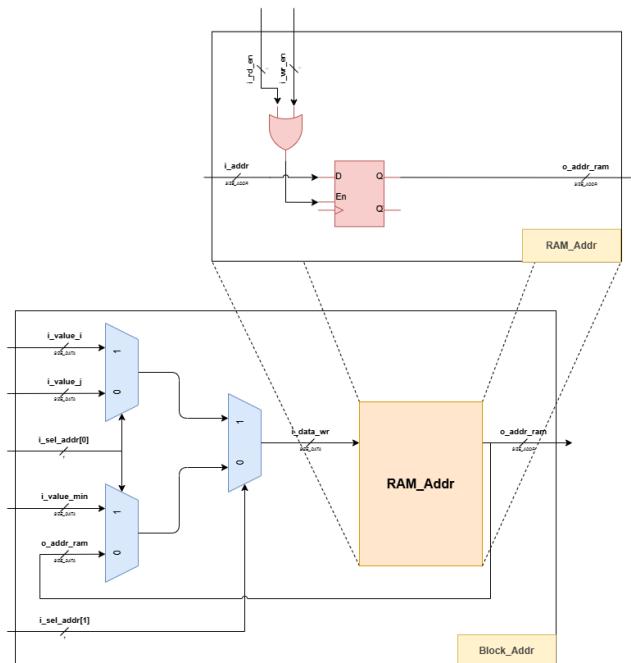
### c ) Thiết kế Datapath và Control Unit của thiết kế.

#### 1. Thiết kế DataPath:

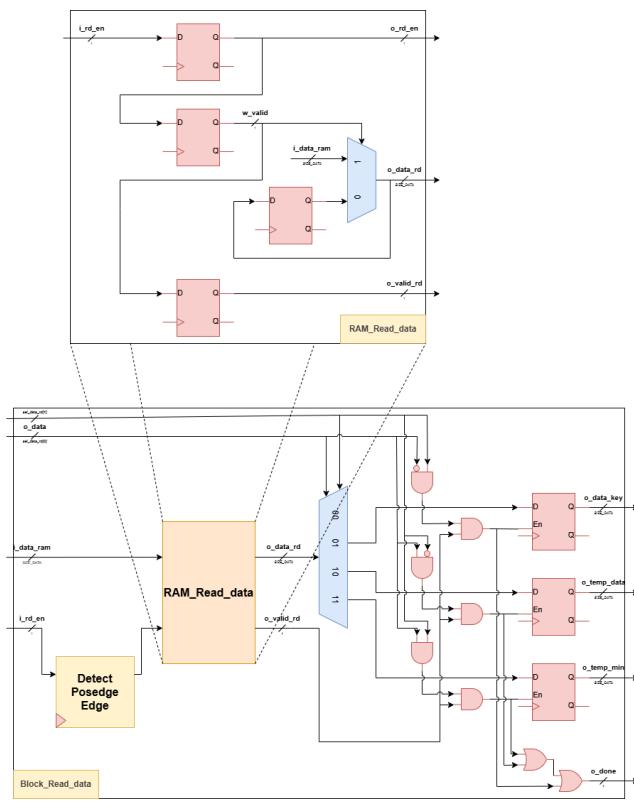


Hình 20: Thiết kế tổng quan của module DataPath\_Unit.

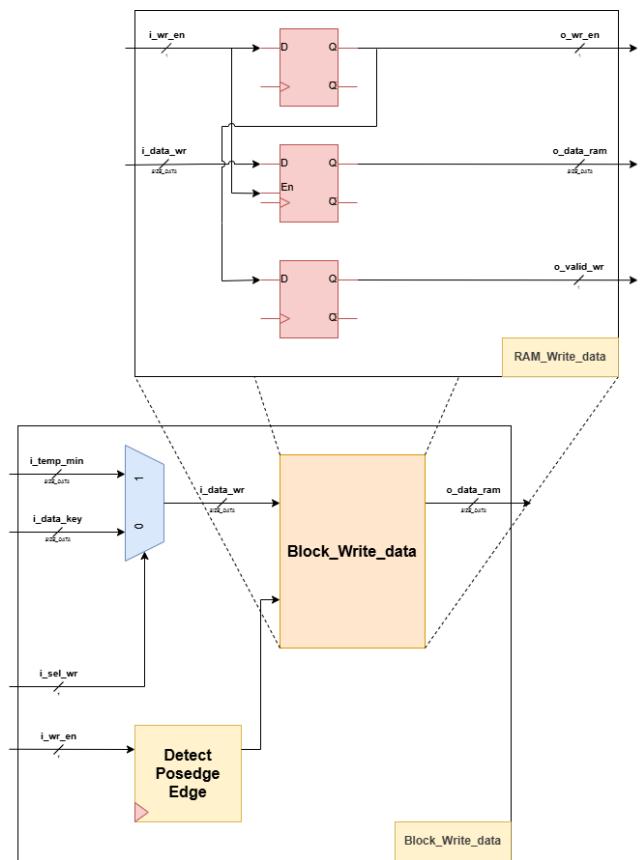
#### - RAM\_Addr:



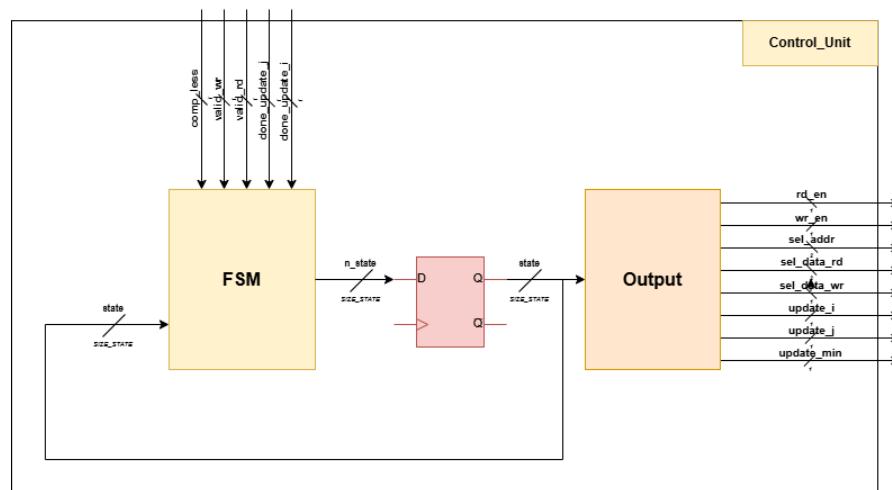
#### - RAM\_Read\_data:



- RAM\_Write\_data:



2. Thiết kế của Control\_Unit:



d ) Viết chương trình mô phỏng hoạt động của thiết kế.

1. Thiết kế tổng quan:

```

1 module Selection_Sort #(
2     parameter SIZE_ADDR      = 8 ,
3     parameter PATH_RAM      = "./../03_verif/Topmodule/tools/random_hex.txt",
4     parameter SIZE_DATA      = 8
5 )(
6     input logic                  i_clk      ,
7     input logic                  i_rst_n   ,
8     input logic                  i_start    ,
9     input logic [SIZE_ADDR-1:0]  i_num_elems ,
10    output logic                 o_done
11 );
12
13 logic w_rd_en;
14 logic w_wr_en;
15 logic [1:0] w_sel_addr;
16 logic [1:0] w_sel_data_rd;
17 logic      w_sel_data_wr;
18 logic w_update_i;
19 logic w_update_j;
20 logic w_update_min;
21
22 logic w_comp_less;
23 logic w_valid_wr;
24 logic w_valid_rd;
25 logic w_done_update_j;
26 logic w_done_update_i;
27
28 logic w_rd_en_ram;
29 logic w_wr_en_ram;
30 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_addr_ram;
31 logic [SIZE_DATA-1:0] w_i_data_ram;
32 logic [SIZE_DATA-1:0] w_o_data_ram;
33
34 Data_path #(
35     .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR),
36     .SIZE_DATA      (SIZE_DATA)
37 ) DATA_PATH_UNIT (
38     .i_clk          (i_clk),
39     .i_rst_n        (i_rst_n),
40     .i_num_elems   (i_num_elems),
41     .i_rd_en        (w_rd_en),
42     .i_wr_en        (w_wr_en),
43     .i_sel_addr    (w_sel_addr),
44     .i_sel_data_rd (w_sel_data_rd),
45     .i_sel_data_wr (w_sel_data_wr),
46     .i_start_i     (i_start), //i_state=>topmodule
47     .i_start_j     (),
48     .i_update_i    (w_update_i),
49     .i_update_j    (w_update_j),
50     .i_update_min  (w_update_min),
51     .i_data_ram   (w_o_data_ram),
52     .o_wr_en        (w_wr_en_ram),
53     .o_rd_en        (w_rd_en_ram),
54     .o_addr_ram   (w_addr_ram),
55     .o_data_ram   (w_i_data_ram),
56     .o_comp_less   (w_comp_less),
57     .o_valid_wr    (w_valid_wr),
58     .o_valid_rd    (w_valid_rd),
59     .o_done_j      (w_done_update_j),
60     .o_done_i      (w_done_update_i)
61 );
62
63 Control_unit CONTROL_UNIT (

```

```

64      .i_clk          (i_clk),
65      .i_rst_n        (i_rst_n),
66      .i_start         (i_start),
67      .i_comp_less    (w_comp_less),
68      .i_valid_wr     (w_valid_wr),
69      .i_valid_rd     (w_valid_rd),
70      .i_done_j       (w_done_update_j),
71      .i_done_sort    (w_done_update_i),
72      .o_wr_en        (w_wr_en),
73      .o_rd_en        (w_rd_en),
74      .o_sel_addr     (w_sel_addr),
75      .o_sel_data_rd  (w_sel_data_rd),
76      .o_sel_data_wr  (w_sel_data_wr),
77      .o_update_i     (w_update_i),
78      .o_start_j      (),
79      .o_update_j     (w_update_j),
80      .o_update_min   (w_update_min)
81  );
82
83 SinglePort_RAM #(
84   .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR),
85   .PATH_RAM       (PATH_RAM),
86   .SIZE_DATA      (SIZE_DATA)
87 ) RAM_UNIT (
88   .i_clk          (i_clk),
89   .i_rst_n        (i_rst_n),
90   .i_rd_en        (w_rd_en_ram),
91   .i_wr_en        (w_wr_en_ram),
92   .i_addr         (w_addr_ram),
93   .i_data         (w_i_data_ram),
94   .o_data         (w_o_data_ram)
95 );
96
97 always_ff @( posedge i_clk or negedge i_rst_n ) begin
98   if(~i_rst_n)
99     o_done  <= '0;
100   else
101     o_done  <= w_done_update_i;
102 end
103
104 endmodule

```

Listing 16: Module Selection\_Sort.

```

1 module SinglePort_RAM #(
2   parameter SIZE_ADDR = 8 ,
3   parameter PATH_RAM  = "./../03_verif/Topmodule/tools/random_hex.txt",
4   parameter SIZE_DATA = 8
5 )(
6   input logic          i_clk      ,
7   input logic          i_rst_n   ,
8   input logic          i_rd_en   ,
9   input logic          i_wr_en   ,
10  input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_addr   ,
11  input logic [SIZE_DATA-1:0] i_data   ,
12  output logic [SIZE_DATA-1:0] o_data
13 );
14
15 localparam DEPTH      = 1 << SIZE_ADDR; // 2^SIZE_ADDR
16 logic [SIZE_DATA-1:0] mem_unit [0:DEPTH-1];
17 initial begin
18   $readmemh(PATH_RAM, mem_unit);
19 end

```

```

20
21 always_ff @(posedge i_clk) begin : proc_write_data
22     if(i_wr_en) begin
23         mem_unit[i_addr]      <= i_data;
24     end
25 end
26 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin : proc_read_data
27     if(~i_rst_n) begin
28         o_data             <= '0;
29     end else if(i_rd_en) begin
30         o_data             <= mem_unit[i_addr];
31     end
32 end
33
34 endmodule

```

Listing 17: Module SinglePort\_RAM.

```

1  module Control_unit (
2      input logic          i_clk      ,
3      input logic          i_rst_n   ,
4      input logic          i_start    ,
5      input logic          i_comp_less ,
6      input logic          i_valid_wr ,
7      input logic          i_valid_rd ,
8      input logic          i_done_j   ,
9      input logic          i_done_sort ,
10     output logic        o_wr_en   ,
11     output logic        o_rd_en   ,
12     output logic [1:0] o_sel_addr ,
13     output logic [1:0] o_sel_data_rd ,
14     output logic        o_sel_data_wr ,
15     output logic        o_update_i  ,
16     output logic        o_start_j   ,
17     output logic        o_update_j   ,
18     output logic        o_update_min
19 );
20
21 typedef enum logic [3:0] {
22     IDLE      = 4'd0,
23     START     = 4'd1,
24     READ_DATA_KEY = 4'd2,
25     COMPARE_I  = 4'd3,
26     READ_TEMP_MIN = 4'd4,
27     COMPARE_J  = 4'd5,
28     READ_TEMP_DATA = 4'd6,
29     COMP_TEMP_VALUE = 4'd7,
30     UPDATE_MIN_VALUE = 4'd8,
31     UPDATE_J    = 4'd9,
32     WAIT_J     = 4'd10,
33     WRITE_TEMP_MIN = 4'd11,
34     WAIT_WRITE  = 4'd12,
35     WRITE_DATA_KEY = 4'd13,
36     UPDATE_I    = 4'd14,
37     WAIT_I     = 4'd15
38 } state_e;
39 state_e state, n_state;
40
41 always_comb begin : proc_next_state
42     case (state)
43         IDLE: begin
44             n_state = i_start ? START : IDLE;
45         end

```

```

46      START: begin
47          n_state = READ_DATA_KEY;
48      end
49      READ_DATA_KEY: begin
50          n_state = i_valid_rd ? COMPARE_I : READ_DATA_KEY;
51      end
52      COMPARE_I: begin
53          n_state = i_done_sort ? IDLE : READ_TEMP_MIN;
54      end
55      READ_TEMP_MIN: begin
56          n_state = i_valid_rd ? COMPARE_J : READ_TEMP_MIN;
57      end
58      COMPARE_J: begin
59          n_state = i_done_j ? WRITE_TEMP_MIN : READ_TEMP_DATA;
60      end
61      READ_TEMP_DATA: begin
62          n_state = i_valid_rd ? COMP TEMP VALUE : READ_TEMP_DATA;
63      end
64      COMP TEMP VALUE: begin
65          n_state = i_comp_less ? UPDATE_MIN_VALUE : UPDATE_J;
66      end
67      UPDATE_MIN_VALUE: begin
68          n_state = UPDATE_J;
69      end
70      UPDATE_J: begin
71          n_state = WAIT_J;
72      end
73      WAIT_J: begin
74          n_state = READ_TEMP_MIN;
75      end
76      WRITE_TEMP_MIN: begin
77          n_state = i_valid_wr ? WAIT_WRITE : WRITE_TEMP_MIN;
78      end
79      WAIT_WRITE: begin
80          n_state = WRITE_DATA_KEY;
81      end
82      WRITE_DATA_KEY: begin
83          n_state = i_valid_wr ? UPDATE_I : WRITE_DATA_KEY;
84      end
85      UPDATE_I: begin
86          n_state = WAIT_I;
87      end
88      WAIT_I: begin
89          n_state = READ_DATA_KEY;
90      end
91      default: begin
92          n_state = IDLE;
93      end
94  endcase
95 end
96 always_ff @( posedge i_clk or negedge i_rst_n ) begin : proc_update_state
97     if(~i_rst_n)
98         state    <= IDLE;
99     else
100        state   <= n_state;
101 end
102
103 always_comb begin : proc_output
104     // default values
105     o_wr_en       = '0;
106     o_rd_en       = '0;
107     o_sel_addr    = '0;
108     o_sel_data_rd = '0;
109     o_sel_data_wr = '0;

```

---

```

110     o_update_i      = '0;
111     o_start_j       = '0;
112     o_update_j      = '0;
113     o_update_min    = '0;
114
115     case (state)
116         READ_DATA_KEY: begin
117             o_start_j      = 1'b1;
118             o_rd_en        = 1'b1;
119             o_sel_addr     = 2'b11;
120             o_sel_data_rd = 2'b01;
121         end
122
123         COMPARE_I: begin
124             o_sel_addr     = 2'b00;
125             o_sel_data_rd = 2'b00;
126         end
127
128         READ_TEMP_MIN: begin
129             o_rd_en        = 1'b1;
130             o_sel_addr     = 2'b01;
131             o_sel_data_rd = 2'b11;
132         end
133
134         COMPARE_J: begin
135             o_sel_addr     = 2'b00;
136             o_sel_data_rd = 2'b00;
137         end
138
139         READ_TEMP_DATA: begin
140             o_rd_en        = 1'b1;
141             o_sel_addr     = 2'b10;
142             o_sel_data_rd = 2'b10;
143         end
144
145         COMP_TEMP_VALUE: begin
146             o_sel_addr     = 2'b00;
147             o_sel_data_rd = 2'b00;
148         end
149
150         UPDATE_MIN_VALUE: begin
151             o_sel_addr     = 2'b00;
152             o_sel_data_rd = 2'b00;
153             o_update_min  = 1'b1;
154         end
155
156         UPDATE_J: begin
157             o_sel_addr     = 2'b00;
158             o_sel_data_rd = 2'b00;
159             o_update_j    = 1'b1;
160         end
161
162         WAIT_J: begin
163             o_sel_addr     = 2'b00;
164             o_sel_data_rd = 2'b00;
165         end
166
167         WRITE_TEMP_MIN: begin
168             o_wr_en        = 1'b1;
169             o_sel_addr     = 2'b11;
170             o_sel_data_rd = 2'b00;
171             o_sel_data_wr = 1'b1;
172         end
173

```

```

174     UPDATE_I: begin
175         o_sel_addr      = 2'b00;
176         o_sel_data_rd  = 2'b00;
177         o_update_i     = 1'b1;
178     end
179
180     WRITE_DATA_KEY: begin
181         o_wr_en        = 1'b1;
182         o_sel_addr      = 2'b01;
183         o_sel_data_rd  = 2'b00;
184         o_sel_data_wr  = 1'b0;
185     end
186
187     default: begin
188         o_wr_en        = '0;
189         o_rd_en        = '0;
190         o_sel_addr      = '0;
191         o_sel_data_rd  = '0;
192         o_sel_data_wr  = '0;
193         o_update_i     = '0;
194         o_start_j      = '0;
195         o_update_j     = '0;
196         o_update_min   = '0;
197     end
198 endcase
199 end
200
201
202
203 endmodule

```

Listing 18: Module Control\_unit.

```

1 module Data_path #(
2     parameter SIZE_ADDR = 8,
3     parameter SIZE_DATA = 8
4 )(
5     input logic                  i_clk          ,
6     input logic                  i_rst_n       ,
7     input logic [SIZE_ADDR-1:0]   i_num_elems  ,
8
9     input logic                  i_rd_en       ,
10    input logic                  i_wr_en       ,
11    input logic [1:0]             i_sel_addr   ,
12    input logic [1:0]             i_sel_data_rd ,
13    input logic                  i_sel_data_wr ,
14    input logic                  i_start_i    , //i_state=>topmodule
15    input logic                  i_start_j    ,
16    input logic                  i_update_i   ,
17    input logic                  i_update_j   ,
18    input logic                  i_update_min ,
19
20    input logic [SIZE_DATA-1:0]   i_data_ram   ,
21    output logic                 o_wr_en      ,
22    output logic                 o_rd_en      ,
23    output logic [SIZE_ADDR-1:0]   o_addr_ram   ,
24    output logic [SIZE_DATA-1:0]   o_data_ram   ,
25
26    output logic                 o_comp_less  ,
27    output logic                 o_valid_wr   ,
28    output logic                 o_valid_rd   ,
29    output logic                 o_done_j    ,
30    output logic                 o_done_sort

```

---

```

31 );
32
33 logic [SIZE_ADDR-1:0] value_i;
34 logic w_o_en_i;
35 logic [SIZE_ADDR-1:0] value_j;
36 logic w_i_en_j;
37 logic [SIZE_ADDR-1:0] value_min;
38
39 logic w_en_temp_min;
40 logic [SIZE_DATA-1:0] w_temp_min;
41 logic w_en_temp_data;
42 logic [SIZE_DATA-1:0] w_temp_data;
43 logic w_en_data_key;
44 logic [SIZE_DATA-1:0] w_data_key;
45
46 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_addr_ram;
47 logic [SIZE_DATA-1:0] w_data_wr;
48 logic [SIZE_DATA-1:0] w_data_rd;
49
50 assign o_comp_less = w_temp_data < w_temp_min;
51
52 Update_I #(
53   .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR)
54 ) UPDATE_I_UNIT (
55   .i_clk          (i_clk),
56   .i_rst_n        (i_rst_n),
57   .i_num_elems    (i_num_elems),
58   .i_start        (i_start_i),
59   .i_en           (i_update_i),
60   .o_en           (w_o_en_i),
61   .o_value_i      (value_i),
62   .o_done         (o_done_sort)
63 );
64
65 always_ff @( posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
66   if(~i_rst_n)
67     w_i_en_j     <= '0;
68   else
69     w_i_en_j     <= w_o_en_i;
70 end
71
72 Update_J #(
73   .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR)
74 ) UPDATE_J_UNIT (
75   .i_clk          (i_clk),
76   .i_rst_n        (i_rst_n),
77   .i_num_elems    (i_num_elems),
78   .i_value_i      (value_i),
79   .i_start        (w_i_en_j),
80   .i_en           (i_update_j),
81   .o_en           (),
82   .o_value_j      (value_j),
83   .o_done         (o_done_j)
84 );
85
86 Update_MIN #(
87   .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR)
88 ) UPDATE_MIN_UNIT (
89   .i_clk          (i_clk),
90   .i_rst_n        (i_rst_n),
91   .i_value_i      (value_i),
92   .i_value_j      (value_j),
93   .i_update_i     (w_i_en_j),
94   .i_update_min   (i_update_min),

```

```

95      .o_addr_min      (value_min)
96  );
97
98  Block_Addr #(
99    .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR)
100 ) ADDR_RAM (
101   .i_clk          (i_clk),
102   .i_rst_n        (i_rst_n),
103   .i_rd_en        (i_rd_en),
104   .i_wr_en        (i_wr_en),
105   .i_sel_addr     (i_sel_addr),
106   .i_value_i      (value_i),
107   .i_value_j      (value_j),
108   .i_value_min    (value_min),
109   .o_addr_ram     (o_addr_ram)
110 );
111 Block_Read_data #(
112   .SIZE_DATA      (SIZE_DATA)
113 ) READ_RAM (
114   .i_clk          (i_clk),
115   .i_rst_n        (i_rst_n),
116   .i_rd_en        (i_rd_en),
117   .i_sel_data_rd  (i_sel_data_rd),
118   .i_data_ram     (i_data_ram),
119   .o_rd_en        (o_rd_en),
120   .o_temp_min     (w_temp_min),
121   .o_temp_data    (w_temp_data),
122   .o_data_key     (w_data_key),
123   .o_done         (o_valid_rd)
124 );
125 Block_Write_data #(
126   .SIZE_DATA      (SIZE_DATA)
127 ) WRITE_DATA (
128   .i_clk          (i_clk),
129   .i_rst_n        (i_rst_n),
130   .i_wr_en        (i_wr_en),
131   .i_sel_wr       (i_sel_data_wr),
132   .i_data_key     (w_data_key),
133   .i_temp_min     (w_temp_min),
134   .o_wr_en        (o_wr_en),
135   .o_data_ram     (o_data_ram),
136   .o_done         (o_valid_wr)
137 );
138
139 endmodule

```

Listing 19: Module Data\_path.

```

1 module Block_Addr #(
2   parameter SIZE_ADDR = 8
3 )(
4   input logic          i_clk      ,
5   input logic          i_rst_n   ,
6   input logic          i_rd_en   ,
7   input logic          i_wr_en   ,
8   input logic [1:0]    i_sel_addr,
9
10  input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_value_i ,
11  input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_value_j ,
12  input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_value_min,
13  output logic [SIZE_ADDR-1:0] o_addr_ram
14 );
15

```

```

16 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_addr_ram;
17
18 assign w_addr_ram = i_sel_addr[1] ? (i_sel_addr[0] ? i_value_i : i_value_j) : (i_sel_addr[0] ?
19   i_value_min : o_addr_ram);
RAM_addr #(
20   .SIZE_ADDR      (SIZE_ADDR)
21 ) RAM_ADDR_UNIT (
22   .i_clk          (i_clk),
23   .i_rst_n        (i_rst_n),
24   .i_rd_en        (i_rd_en),
25   .i_wr_en        (i_wr_en),
26   .i_addr_ram    (w_addr_ram),
27   .o_addr_ram    (o_addr_ram)
28 );
29
30 endmodule

```

Listing 20: Module `Block_Addr`.

```

1 module Block_Read_data #(
2   parameter SIZE_DATA = 8
3 )(
4   input logic           i_clk          ,
5   input logic           i_rst_n       ,
6   input logic           i_rd_en       ,
7   input logic [1:0]     i_sel_data_rd ,
8   input logic [SIZE_DATA-1:0] i_data_ram ,
9
10  output logic          o_rd_en       ,
11  output logic [SIZE_DATA-1:0] o_temp_min  ,
12  output logic [SIZE_DATA-1:0] o_temp_data ,
13  output logic [SIZE_DATA-1:0] o_data_key  ,
14  output logic          o_done        ,
15 );
16
17 logic [SIZE_DATA-1:0] w_data_ram;
18 logic w_valid_rd;
19
20 logic w_RST_SEL_data_rd;
21 logic [1:0] w_SEL_data_rd;
22
23 logic w_en_temp_min;
24 logic w_en_temp_data;
25 logic w_en_data_key;
26
27 logic w_i_rd_en;
28 SS_DETECT_EDGE #(
29   .POS_EDGE (1) // 1: posedge, 0: negedge
30 ) DETECT_EDGE (
31   .i_clk          (i_clk),
32   .i_rst_n        (i_rst_n),
33   .i_signal        (i_rd_en),
34   .o_signal        (w_i_rd_en)
35 );
36
37 assign w_RST_SEL_data_rd = (i_rst_n & ~o_done);
38 always_ff @(`posedge i_clk or `negedge w_RST_SEL_data_rd) begin
39   if(~w_RST_SEL_data_rd) begin
40     w_SEL_data_rd <= '0;
41   end else if(w_i_rd_en) begin
42     w_SEL_data_rd <= i_SEL_data_rd;
43   end
44 end

```

```

45
46 RAM_read_data #(
47   .SIZE_DATA      (SIZE_DATA)
48 ) RAM_READ_DATAA (
49   .i_clk          (i_clk),
50   .i_rst_n        (i_rst_n),
51   .i_rd_en        (w_i_rd_en),
52   .i_data_rd     (i_data_ram),
53   .o_rd_en        (o_rd_en),
54   .o_data_rd     (w_data_ram),
55   .o_valid        (w_valid_rd)
56 );
57
58 assign w_en_temp_min    = (w_sel_data_rd[1] & w_sel_data_rd[0]) & w_valid_rd;
59 assign w_en_temp_data   = (w_sel_data_rd[1] & ~w_sel_data_rd[0]) & w_valid_rd;
60 assign w_en_data_key    = (~w_sel_data_rd[1] & w_sel_data_rd[0]) & w_valid_rd;
61
62 always_ff @(`posedge i_clk or `negedge i_rst_n) begin
63   if(~i_rst_n) begin
64     o_temp_min    <= '0;
65   end else if(w_en_temp_min) begin
66     o_temp_min    <= w_data_ram;
67   end
68 end
69 always_ff @(`posedge i_clk or `negedge i_rst_n) begin
70   if(~i_rst_n) begin
71     o_temp_data   <= '0;
72   end else if(w_en_temp_data) begin
73     o_temp_data   <= w_data_ram;
74   end
75 end
76 always_ff @(`posedge i_clk or `negedge i_rst_n) begin
77   if(~i_rst_n) begin
78     o_data_key    <= '0;
79   end else if(w_en_data_key) begin
80     o_data_key    <= w_data_ram;
81   end
82 end
83 always_ff @(`posedge i_clk or `negedge i_rst_n) begin
84   if(~i_rst_n) begin
85     o_done         <= '0;
86   end else begin
87     o_done         <= (w_en_temp_min | w_en_temp_data | w_en_data_key);
88   end
89 end
90
91 endmodule

```

Listing 21: Module Block\_Read\_data.

```

1 module Block_Write_data #(
2   parameter SIZE_DATA = 8
3 )(
4   input logic          i_clk      ,
5   input logic          i_rst_n   ,
6   input logic          i_wr_en   ,
7   input logic          i_sel_wr  ,
8
9   input logic [SIZE_DATA-1:0] i_data_key ,
10  input logic [SIZE_DATA-1:0] i_temp_min ,
11
12  output logic         o_wr_en   ,
13  output logic [SIZE_DATA-1:0] o_data_ram ,

```

```

14     output logic          o_done
15 );
16
17 logic w_i_wr_en;
18 logic [SIZE_DATA-1:0] w_i_data_ram;
19 SS_detect_edge #(
20   .POS_EDGE    (1) // 1: posedge, 0: negedge
21 ) DETECT_EDGE (
22   .i_clk      (i_clk),
23   .i_rst_n   (i_rst_n),
24   .i_signal   (i_wr_en),
25   .o_signal   (w_i_wr_en)
26 );
27
28 assign w_i_data_ram = i_sel_wr ? i_temp_min : i_data_key;
29
30 RAM_write_data #(
31   .SIZE_DATA (SIZE_DATA)
32 ) RAM_WRITE_DATA (
33   .i_clk      (i_clk),
34   .i_rst_n   (i_rst_n),
35   .i_wr_en   (w_i_wr_en),
36   .i_data_wr (w_i_data_ram),
37   .o_wr_en   (o_wr_en),
38   .o_data_wr (o_data_ram),
39   .o_done    (o_done)
40 );
41
42 endmodule

```

Listing 22: Module Block\_Write\_data.

```

1 module RAM_addr #(
2   parameter SIZE_ADDR = 8
3 )(
4   input logic           i_clk      ,
5   input logic           i_rst_n   ,
6   input logic           i_rd_en   ,
7   input logic           i_wr_en   ,
8   input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_addr_ram ,
9   output logic [SIZE_ADDR-1:0] o_addr_ram
10 );
11 logic w_en;
12 assign w_en = i_rd_en | i_wr_en;
13 always_ff @( posedge i_clk or negedge i_rst_n ) begin
14   if(~i_rst_n) begin
15     o_addr_ram <= '0;
16   end else if(w_en) begin
17     o_addr_ram <= i_addr_ram;
18   end
19 end
20
21 endmodule

```

Listing 23: Module RAM\_addr.

```

1 module RAM_read_data #(
2   parameter SIZE_DATA = 8
3 )(
4   input logic           i_clk      ,
5   input logic           i_rst_n   ,
6   input logic           i_rd_en   ,

```

```

7      input logic [SIZE_DATA-1:0]      i_data_rd      ,
8      output logic                   o_rd_en       ,
9      output logic [SIZE_DATA-1:0]      o_data_rd      ,
10     output logic                   o_valid        ,
11   );
12
13 logic w_valid;
14 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
15   if(~i_rst_n) begin
16     o_rd_en     <= '0;
17   end else begin
18     o_rd_en     <= i_rd_en;
19   end
20 end
21 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
22   if(~i_rst_n) begin
23     w_valid     <= '0;
24     o_valid     <= '0;
25   end else begin
26     w_valid     <= o_rd_en;
27     o_valid     <= w_valid;
28   end
29 end
30 logic [SIZE_DATA-1:0] w_save_data;
31 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
32   if(~i_rst_n) begin
33     w_save_data <= '0;
34   end else begin
35     w_save_data <= o_data_rd;
36   end
37 end
38 assign o_data_rd = (w_valid) ? i_data_rd : w_save_data;
39 endmodule

```

Listing 24: Module RAM\_read\_data.

```

1 module RAM_write_data #(
2   parameter SIZE_DATA = 8
3 )(
4   input logic           i_clk      ,
5   input logic           i_rst_n   ,
6   input logic           i_wr_en   ,
7   input logic [SIZE_DATA-1:0] i_data_wr ,
8   output logic          o_wr_en   ,
9   output logic [SIZE_DATA-1:0] o_data_wr ,
10  output logic          o_done    ,
11 );
12
13 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
14   if(~i_rst_n) begin
15     o_wr_en     <= '0;
16   end else begin
17     o_wr_en     <= i_wr_en;
18   end
19 end
20 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
21   if(~i_rst_n) begin
22     o_done      <= '0;
23   end else begin
24     o_done      <= o_wr_en;
25   end
26 end
27 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin

```

```

28     if(~i_rst_n) begin
29         o_data_wr    <= '0;
30     end else if (i_wr_en) begin
31         o_data_wr    <= i_data_wr;
32     end
33 end
34 endmodule

```

Listing 25: Module RAM\_write\_data.

```

1 // POS_EDGE = 0 -> detect negedge edge
2 // POS_EDGE = 1 -> detect posedge edge
3 module SS_detect_edge #
4     parameter POS_EDGE = 1    // 1: posedge, 0: negedge
5 )(
6     input  logic i_clk,
7     input  logic i_rst_n,
8     input  logic i_signal,
9     output logic o_signal
10 );
11
12 logic w_p_signal, w_n_signal;
13
14 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
15     if (~i_rst_n)
16         w_p_signal <= 1'b0;
17     else
18         w_p_signal <= i_signal;
19 end
20
21 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin
22     if (~i_rst_n)
23         w_n_signal <= 1'b0;
24     else
25         w_n_signal <= w_p_signal;
26 end
27
28 generate
29     if (POS_EDGE) begin
30         assign o_signal = (~w_n_signal) & (w_p_signal);
31     end else begin
32         assign o_signal = (w_n_signal) & (~w_p_signal);
33     end
34 endgenerate
35
36 endmodule

```

Listing 26: Module SS\_detect\_edge.

```

1 module Update_I #
2     parameter SIZE_ADDR = 8
3 )(
4     input logic                  i_clk      ,
5     input logic                  i_rst_n   ,
6     input logic [SIZE_ADDR-1:0]  i_num_elems ,
7
8     input logic                  i_start    ,
9     input logic                  i_en      ,
10
11    output logic                 o_en      ,
12    output logic [SIZE_ADDR-1:0] o_value_i  ,
13    output logic                 o_done

```

```

14 );
15
16 logic w_start;
17 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_pre_value_i;
18 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_next_value_i;
19 logic w_pre_done;
20 logic w_enable;
21
22 assign w_start = i_start;
23 assign w_enable = w_start | (i_en & ~w_pre_done);
24 assign w_next_value_i = o_value_i + 1'b1;
25 assign w_pre_value_i = w_start ? ('0) : (w_next_value_i);
26
27 always_ff @( posedge i_clk or negedge i_rst_n ) begin : proc_output_value_i
28   if(~i_rst_n) begin
29     o_value_i <= '0;
30   end else if(w_enable) begin
31     o_value_i <= w_pre_value_i;
32   end
33 end
34
35 // assign w_pre_done = (w_pre_value_i == (i_num_elems));
36 assign w_pre_done = (o_value_i == (i_num_elems));
37 always_ff @( posedge i_clk or negedge i_rst_n ) begin : proc_done
38   if(~i_rst_n) begin
39     o_done <= '0;
40   end else begin
41     o_done <= w_pre_done;
42   end
43 end
44 // assign o_done = w_pre_done;
45
46 assign o_en = w_enable;
47
48 endmodule

```

Listing 27: Module Update\_I.

```

1 module Update_J #(
2   parameter SIZE_ADDR = 8
3 )( 
4   input logic          i_clk      ,
5   input logic          i_rst_n   ,
6   input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_num_elems ,
7   input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_value_i  ,
8
9   input logic          i_start    ,
10  input logic          i_en       ,
11
12  output logic         o_en       ,
13  output logic [SIZE_ADDR-1:0] o_value_j  ,
14  output logic         o_done     ,
15 );
16
17 logic w_start;
18 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_pre_value_j;
19 logic [SIZE_ADDR-1:0] w_next_value_j;
20 logic w_pre_done;
21 logic w_enable;
22
23 assign w_pre_done = (o_value_j == ('0));
24 assign w_start = i_start;
25 assign w_enable = w_start | (i_en & ~w_pre_done);

```

```

26 assign w_next_value_j = o_value_j + 1'b1;
27 assign w_pre_value_j = w_start ? (i_value_i+1'b1) : (w_next_value_j);
28
29 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin : proc_output_value_j
30   if(~i_rst_n) begin
31     o_value_j <= '0;
32   end else if(w_enable) begin
33     o_value_j <= w_pre_value_j;
34   end
35 end
36
37 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin : proc_done
38   if(~i_rst_n) begin
39     o_done <= '0;
40   end else begin
41     o_done <= w_pre_done;
42   end
43 end
44 // assign o_done = w_pre_done;
45
46 assign o_en = w_enable;
47
48 endmodule

```

Listing 28: Module Update\_J.

```

1 module Update_MIN #(
2   parameter SIZE_ADDR = 8
3 )(
4   input logic           i_clk      ,
5   input logic           i_rst_n   ,
6   input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_value_i ,
7   input logic [SIZE_ADDR-1:0] i_value_j ,
8
9   input logic           i_update_i ,
10  input logic           i_update_min ,
11
12  output logic [SIZE_ADDR-1:0] o_addr_min
13 );
14
15 logic w_en;
16 assign w_en = i_update_i | i_update_min;
17 always_ff @(posedge i_clk or negedge i_rst_n) begin : proc_output_addr_min
18   if(~i_rst_n) begin
19     o_addr_min <= '0;
20   end else if(w_en) begin
21     o_addr_min <= (i_update_min) ? i_value_j : i_value_i;
22   end
23 end
24
25 endmodule

```

Listing 29: Module Update\_MIN.

## 2. Kiểm định lại hoạt động của module:

```

Building instance specific data structures.
Loading native compiled code: ..... Done
Design hierarchy summary:
Instances Unique

```

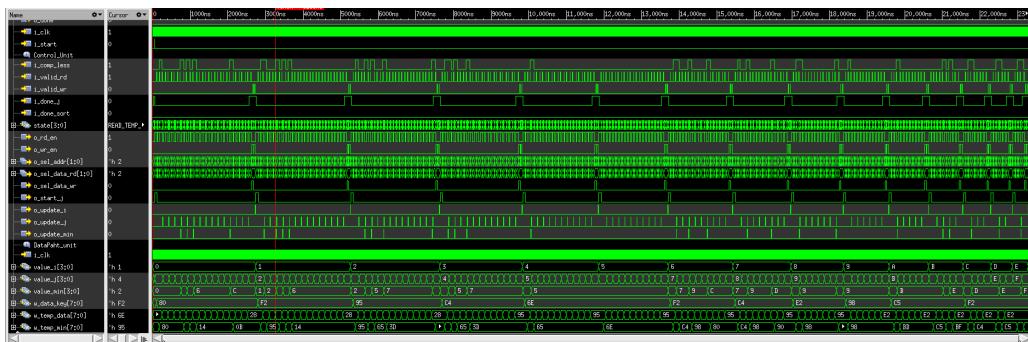
```

Modules:          16      15
Registers:       116     113
Scalar wires:    92      -
Vectored wires:  55      -
Always blocks:   29      27
Initial blocks:  3       3
Cont. assignments: 24      24
Pseudo assignments: 75      75
Simulation timescale: 1ps
Writing initial simulation snapshot: worklib.tb_Selection_Sort:sv
Loading snapshot worklib.tb_Selection_Sort:sv .....
Done
xmsim: *W,DSEM2009: This SystemVerilog design is simulated as per
IEEE 1800-2009 SystemVerilog simulation semantics. Use -
disable_sem2009 option for turning off SV 2009 simulation semantics.
xcelium> source /opt/cadence/XCELIUM2009/tools/xcelium/files/xmsimrc
xcelium> run
>>> Sending START...
>>> DONE received at time 23305000

===== RAM AFTER SORT =====
RAM[0] = 0b
RAM[1] = 14
RAM[2] = 28
RAM[3] = 3d
RAM[4] = 65
RAM[5] = 6e
RAM[6] = 80
RAM[7] = 90
RAM[8] = 95
RAM[9] = 98
RAM[10] = bd
RAM[11] = bf
RAM[12] = c4
RAM[13] = c5
RAM[14] = e2
RAM[15] = f2
>>> Saved sorted RAM to sorted_output.txt
Simulation complete via $finish(1) at time 23325 NS + 0
../Topmodule/tb_Selection_Sort.sv:71           $finish;
xcelium> exit
TOOL: xrun(64) 20.09-s001: Exiting on Dec 12, 2025 at 08:31:02 EST
(total: 00:00:01)

```

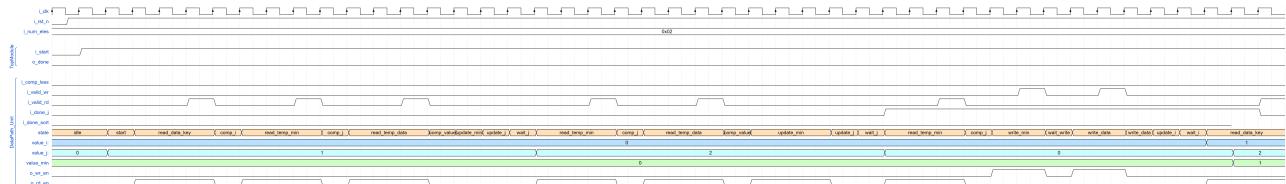
Listing 30: Kết quả sau khi kiểm định lại chức năng của module.



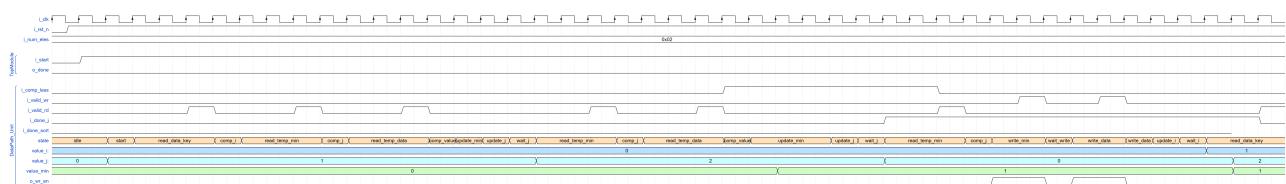
Hình 21: Sóng ngo ra tổng quan của module test.

e ) Giả sử vòng lặp  $i = 0$ , không có swap (hoán đổi) và vòng lặp  $i = 1$ , có swap. Vẽ dạng sóng từ lúc  $start = 1$  đến lúc hoàn thành vòng lặp  $i = 1$  của thiết kế.

1. Vòng lặp  $i = 0$  với không có swap:



2. Vòng lặp  $i = 0$  với có swap:



## Câu 4

Thiết kế phần cứng dùng xóa đi các phần tử có giá trị chẵn trong một mảng dữ liệu (mô tả ở ví dụ). Giả sử mảng được lưu trong bộ nhớ Single Port và quá trình đọc/ghi diễn ra đồng bộ theo Clk và hoàn thành trong 1 Clk.

Ví dụ: (... là dữ liệu từ các ô nhớ khác được chuyển xuống)

| Địa chỉ | Nội dung |
|---------|----------|
| 0x04    | 15       |
| 0x03    | 14       |
| 0x02    | 12       |
| 0x01    | 33       |
| 0x00    | 24       |

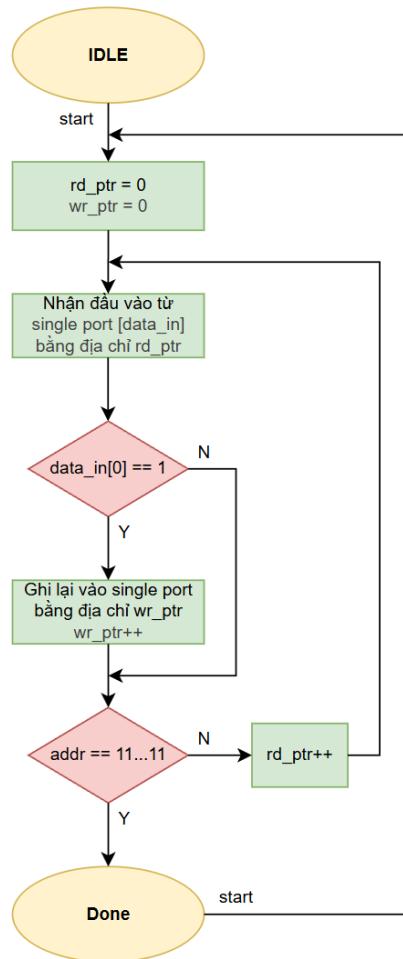
  

| Địa chỉ | Nội dung |
|---------|----------|
| 0x04    | ..       |
| 0x03    | ..       |
| 0x02    | ...      |
| 0x01    | 15       |
| 0x00    | 33       |

Trước khi thực hiện

Sau khi thực hiện

Hình 22: Ví dụ.



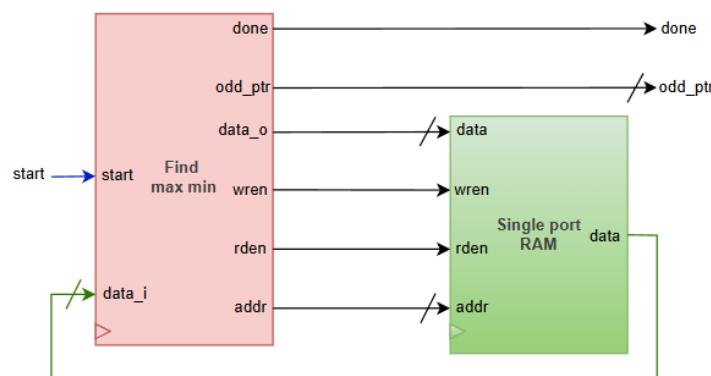
Hình 23: Giải thuật sử dụng.

a ) Định nghĩa ngõ vào và ra của thiết kế, vẽ kết nối của thiết kế với bộ nhớ (Yêu cầu phải có chân start và reset).

| Tên tín hiệu | IO     | Độ rộng      | Mô tả                                |  |
|--------------|--------|--------------|--------------------------------------|--|
| clk          | Input  | logic        | 1                                    | Tín hiệu clock                           |
| rst_n        | Input  | logic        | 1                                    | Reset tích cực mức thấp                  |
| start        | Input  | logic        | 1                                    | Tín hiệu bắt đầu hoạt động               |
| rden         | Output | logic        | 1                                    | Tín hiệu cho phép đọc dữ liệu từ bộ nhớ  |
| wren         | Output | logic        | 1                                    | Tín hiệu cho phép ghi dữ liệu từ bộ nhớ  |
| addr         | Output | logic        | $\lceil \log_2(\text{DEPTH}) \rceil$ | Địa chỉ đọc/ghi dữ liệu                  |
| i_data       | Input  | logic signed | WIDTH                                | Dữ liệu đầu vào từ bộ nhớ                |
| done         | Output | logic        | 1                                    | Tín hiệu kết thúc quá trình              |
| o_data       | Output | logic signed | WIDTH                                | Dữ liệu đầu ra, ghi lại số lẻ vào bộ nhớ |
| odd_ptr      | Output | logic        | $\lceil \log_2(\text{DEPTH}) \rceil$ | Khoảng dữ liệu hợp lệ trong bộ nhớ       |

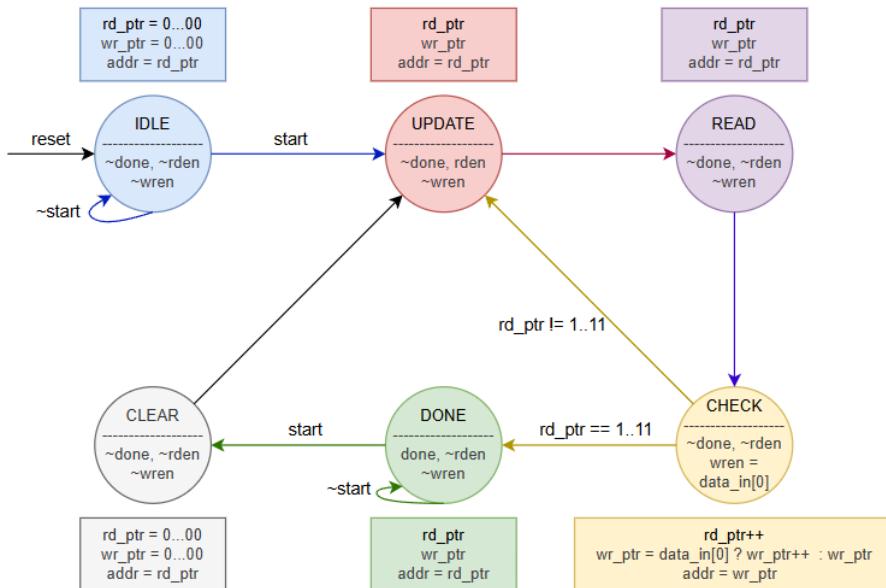
Bảng 6: I/O table for module `clear_even`

Khi lọc dữ liệu chẵn ra khỏi bộ nhớ, đồng thời dồn các giá trị lẻ về các địa chỉ thấp, điều này khiến một khoảng dữ liệu phía trên sẽ không còn hợp lệ sau khi thực hiện xong, tín hiệu odd\_ptr đóng vai trò giới hạn khoảng dữ liệu hợp lệ trong bộ nhớ (từ địa chỉ 0 đến odd\_ptr là các giá trị lẻ hợp lệ sau khi xóa các giá trị chẵn ra khỏi bộ nhớ).



Hình 24: Tổng quan kết nối của thiết kế.

## b ) Thiết kế máy trạng thái bậc cao của thiết kế.

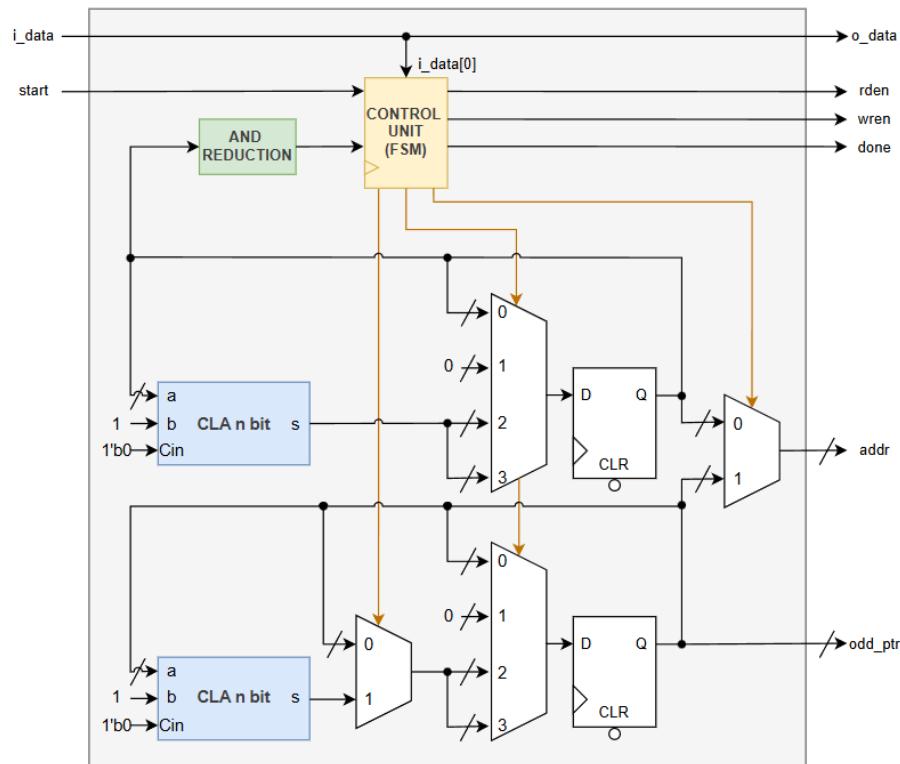


Hình 25: Máy trạng thái bậc cao.

- IDLE: là trạng thái ban đầu, khi reset sẽ luôn trở về trạng thái này, giá trị các thanh ghi mặc định là 0, đây là trạng thái chờ ban đầu của hệ thống, khi có tín hiệu start sẽ chuyển sang trạng thái UPDATE.
- UPDATE: ở trạng thái này sẽ cập nhật các giá trị hai thanh ghi con trỏ đọc/ghi mới được tính toán từ trạng thái CHECK, đồng thời đưa ngõ ra rden lên mức cao để chuẩn bị nhận dữ liệu ngõ vào mới từ bộ nhớ, địa chỉ đọc chứa trong thanh ghi rd\_ptr.
- READ: đây là trạng thái chờ đọc vì ở đây bộ nhớ đọc đồng bộ, do đó cần phải đợi một chu kỳ để nhận dữ liệu đầu vào.
- CHECK: ở trạng thái này, sẽ lấy LSB của tín hiệu đầu vào để xác định chẵn/lẻ. Khi là số lẻ sẽ tiến hành đưa ngõ ra wren lên mức cao để ghi vào bộ nhớ với địa chỉ chứa trong thanh ghi wr\_ptr đồng thời sẽ tăng giá trị wr\_ptr lên 1 ở trạng thái kế. Khi là số chẵn thì sẽ không ghi, không cập nhật giá trị thanh ghi ở chu kỳ kế. Thanh ghi rd\_ptr sẽ tăng thêm 1 ở trạng thái kế. Nếu đã xét hết dữ liệu trong bộ nhớ sẽ chuyển sang trạng thái DONE, ngược lại sẽ sang trạng thái UPDATE để chuẩn bị nhận dữ liệu mới từ bộ nhớ.
- DONE: là trạng thái thông báo việc hoàn tất, lúc này tín hiệu done sẽ tích cực mức cao (done chỉ mức cao ở trạng thái này). Nếu nhận được tín hiệu start mức cao sẽ chuyển sang trạng thái CLEAR, ngược lại sẽ giữ trạng thái hiện tại.

- CLEAR: trạng thái này đóng vai trò đặt lại giá trị các thanh ghi con trỏ là 0, chuẩn bị cho lần hoạt động kế tiếp.

### c ) Thiết kế Datapath và Control Unit của thiết kế.



Hình 26: Datapath.

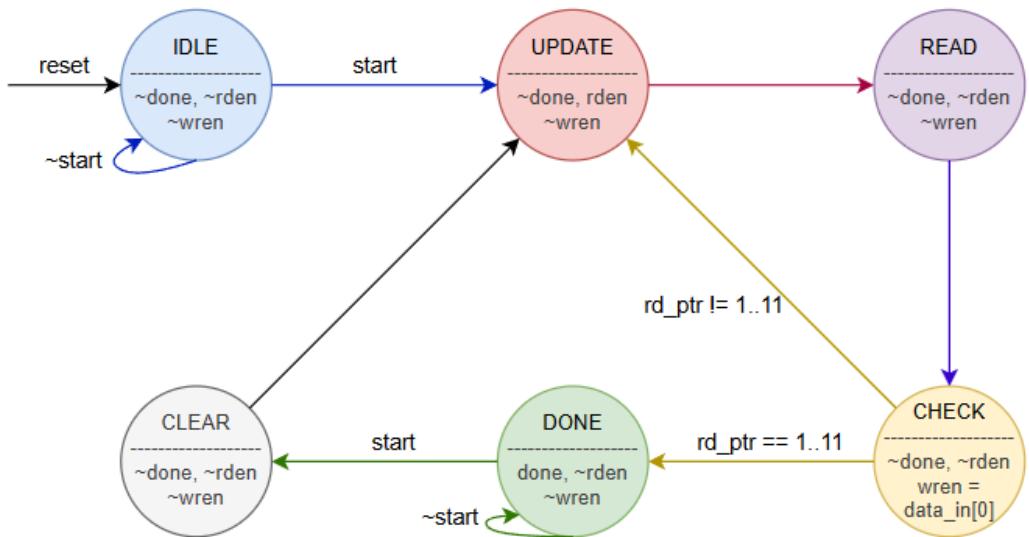
Datapath của thiết kế gồm 2 khối MUX 4-1 và 2 khối MUX 2-1 để xác định giá trị cập nhật cho 2 thanh ghi dựa vào trạng thái hiện tại và lựa chọn địa chỉ truy cập bộ nhớ.

Hai thanh ghi gồm:

- Thanh ghi địa chỉ con trỏ đọc rd\_ptr, đóng vai trò trỏ vào bộ nhớ, kết hợp với tín hiệu rden để lấy dữ liệu đầu vào.
- Thanh ghi địa chỉ con trỏ ghi wr\_ptr, đóng vai trò trỏ vào bộ nhớ, kết hợp với tín hiệu wren để lưu lại các phần tử lẻ.

Hai bộ cộng để cập nhật địa chỉ con trỏ đọc/ghi.

Một bộ AND Reduction để xác định địa chỉ đạt đến giá trị cuối của bộ nhớ, là điều kiện để chuyển từ trạng thái CHECK sang trạng thái DONE.



Hình 27: Control Unit FSM.

#### d ) Viết chương trình mô phỏng hoạt động của thiết kế.

```

1 module clear_even #(
2   parameter DEPTH = 32,
3   parameter WIDTH = 8
4 )(
5   input  logic          i_clk      ,
6   input  logic          i_rst_n   ,
7   input  logic          i_start   ,
8   output logic          o_rden    ,
9   output logic          o_wren   ,
10  output logic [${clog2(DEPTH)} - 1:0] o_addr   ,
11  input  logic signed [WIDTH - 1:0] i_data   ,
12  output logic          o_done    ,
13  output logic signed [WIDTH - 1:0] o_data   ,
14  output logic [${clog2(DEPTH)} - 1:0] o_odd_ptr
15 );
16
17 localparam DEPTH_S = DEPTH - 1;
18 localparam WIDTH_S = WIDTH - 1;
19
20 typedef enum logic [2:0] {
21   IDLE   ,
22   UPDATE ,
23   READ   ,
24   CHECK  ,
25   DONE   ,
26   CLEAR
27 } e_state;
28
29 e_state pstate, nstate;
30 logic [${clog2(DEPTH)} - 1:0] reg_rd_ptr, rd_ptr, rd_ptr_add, reg_wr_ptr, wr_ptr, wr_ptr_add;
31
  
```

---

```

32     logic odd_flag, count_end;
33     assign odd_flag = i_data[0];
34     assign count_end = (&reg_rd_ptr);
35
36     always_ff @(posedge i_clk, negedge i_rst_n) begin
37         if(~i_rst_n) pstate <= IDLE ;
38         else          pstate <= nstate;
39     end
40
41     always_comb begin
42         case(pstate)
43             IDLE : nstate = i_start ? UPDATE : pstate;
44             UPDATE : nstate = READ;
45             READ : nstate = CHECK;
46             CHECK : nstate = count_end ? DONE : UPDATE;
47
48             DONE : nstate = i_start ? CLEAR : pstate;
49             CLEAR : nstate = UPDATE;
50             default: nstate = IDLE;
51         endcase
52     end
53
54     always_ff @(posedge i_clk, negedge i_rst_n) begin
55         if(~i_rst_n) reg_rd_ptr <= '0;
56         else          reg_rd_ptr <= rd_ptr;
57     end
58
59     always_ff @(posedge i_clk, negedge i_rst_n) begin
60         if(~i_rst_n) reg_wr_ptr <= '0;
61         else          reg_wr_ptr <= wr_ptr;
62     end
63
64     assign o_rden = (pstate == UPDATE);
65     assign o_wren = (pstate == CHECK) ? odd_flag : 1'b0;
66     assign o_addr = (pstate == CHECK) ? reg_wr_ptr : reg_rd_ptr;
67
68     assign rd_ptr = (pstate == CHECK) ? rd_ptr_add : ((pstate == CLEAR) ? '0 : reg_rd_ptr);
69     assign wr_ptr = (pstate == CHECK) ? (odd_flag & ~count_end ? wr_ptr_add : reg_wr_ptr) : ((pstate ==
CLEAR) ? '0 : reg_wr_ptr);
70
71     assign o_data = i_data;
72
73     assign o_done = (pstate == DONE);
74
75     assign o_odd_ptr = reg_wr_ptr;
76
77     adder	flex_no_carry #(
78         .WIDTH($clog2(DEPTH))
79     ) add_1 (
80         .i_a    (reg_rd_ptr),
81         .i_b    ({DEPTH_S{1'b0}},1'b1),
82         .i_cin (1'b0),
83         .o_s    (rd_ptr_add)
84     );
85
86     adder	flex_no_carry #(
87         .WIDTH($clog2(DEPTH))
88     ) add_2 (
89         .i_a    (reg_wr_ptr),
90         .i_b    ({DEPTH_S{1'b0}},1'b1),
91         .i_cin (1'b0),
92         .o_s    (wr_ptr_add)
93     );
94

```

95 | endmodule

Listing 31: HDL mô tả thiết kế xóa các phần tử có giá trị chẵn trong một mảng dữ liệu.

Để tạo giá trị ngẫu nhiên trong bộ nhớ để mô phỏng, nhóm chọn sử dụng \$urandom\_range(,); mà System Verilog cung cấp.

```
1 localparam WIDTH_S = DW - 1;
2 logic signed [WIDTH-1:0] buffer [DEPTH-1:0];
3
4 for (int i = 0; i < DEPTH; i++) begin
5     ram.mem[i] = $urandom_range(-2*(WIDTH_S), 2*(WIDTH_S) - 1);
6     buffer[i] = '0;
7     if(ram.mem[i][0] == 0) $display("RAM[%5d] DATA_EVEN = %5d", i, ram.mem[i]);
8 end
9
10 $display("\n");
11
12 for (int i = 0; i < DEPTH; i++) begin
13     if(ram.mem[i][0]) begin
14         $display("RAM[%5d] DATA_ODD = %5d", i, ram.mem[i]);
15         buffer[odd] = ram.mem[i];
16         odd++;
17     end
18 end
19
20 $display("Odd number of numbers: %5d", odd);
```

Listing 32: Chương trình tạo giá trị ngẫu nhiên ban đầu cho bộ nhớ.

```
1 for(int i = 0; i < DEPTH; i++) begin
2     $display("RAM[%5d] = %5d", i, ram.mem[i]);
3     if(i >= odd_ptr) $display("[%4s] expect = %5d", (ram.mem[i] == buffer[i]) ? "TRUE" : "FAIL", buffer[i]);
4 };
5
6 $display("Odd address use: %5d", odd_ptr);
```

Listing 33: Chương trình kiểm định thiết kế.

```
xcelium> run
RAM [ 4] DATA_EVEN =      90
RAM [ 5] DATA_EVEN =     -30
RAM [ 8] DATA_EVEN =      96
RAM [ 10] DATA_EVEN =      50
RAM [ 11] DATA_EVEN =      58
RAM [ 12] DATA_EVEN =     -60
RAM [ 13] DATA_EVEN =     -20
RAM [ 16] DATA_EVEN =     -66
RAM [ 18] DATA_EVEN =     -88
RAM [ 19] DATA_EVEN =      76
RAM [ 20] DATA_EVEN =     -80
RAM [ 24] DATA_EVEN =      54
RAM [ 26] DATA_EVEN =     -76
```

```
RAM [ 28] DATA_EVEN = 46
RAM [ 29] DATA_EVEN = 74
```

```
RAM [ 0] DATA_ODD = -109
RAM [ 1] DATA_ODD = -57
RAM [ 2] DATA_ODD = 25
RAM [ 3] DATA_ODD = -73
RAM [ 6] DATA_ODD = 3
RAM [ 7] DATA_ODD = -45
RAM [ 9] DATA_ODD = -63
RAM [ 14] DATA_ODD = -47
RAM [ 15] DATA_ODD = 115
RAM [ 17] DATA_ODD = 49
RAM [ 21] DATA_ODD = -91
RAM [ 22] DATA_ODD = 53
RAM [ 23] DATA_ODD = -23
RAM [ 25] DATA_ODD = -71
RAM [ 27] DATA_ODD = -49
RAM [ 30] DATA_ODD = 45
RAM [ 31] DATA_ODD = -9
Odd number of numbers: 17
```

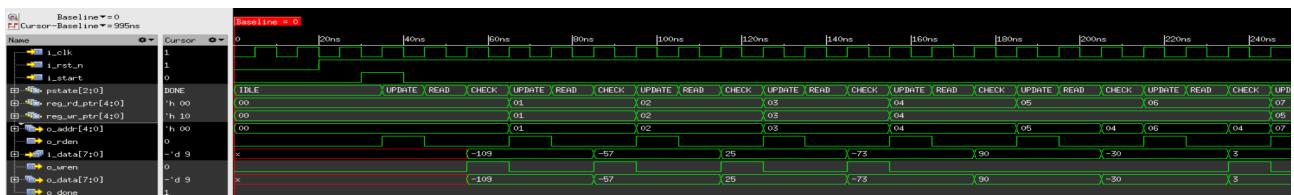
```
RAM [ 0] = -109
[TRUE] expect = -109
RAM [ 1] = -57
[TRUE] expect = -57
RAM [ 2] = 25
[TRUE] expect = 25
RAM [ 3] = -73
[TRUE] expect = -73
RAM [ 4] = 3
[TRUE] expect = 3
RAM [ 5] = -45
[TRUE] expect = -45
RAM [ 6] = -63
[TRUE] expect = -63
RAM [ 7] = -47
[TRUE] expect = -47
RAM [ 8] = 115
[TRUE] expect = 115
RAM [ 9] = 49
[TRUE] expect = 49
RAM [ 10] = -91
[TRUE] expect = -91
RAM [ 11] = 53
[TRUE] expect = 53
```

```

RAM[12] = -23
[TRUE] expect = -23
RAM[13] = -71
[TRUE] expect = -71
RAM[14] = -49
[TRUE] expect = -49
RAM[15] = 45
[TRUE] expect = 45
RAM[16] = -9
[TRUE] expect = -9
RAM[17] = 49
RAM[18] = -88
RAM[19] = 76
RAM[20] = -80
RAM[21] = -91
RAM[22] = 53
RAM[23] = -23
RAM[24] = 54
RAM[25] = -71
RAM[26] = -76
RAM[27] = -49
RAM[28] = 46
RAM[29] = 74
RAM[30] = 45
RAM[31] = -9
Odd address use:16
Simulation complete via $finish(1) at time 20040 NS + 0
../../../01_tb/clear_even_tb.sv:103          $finish;

```

Listing 34: Kết quả kiểm định cho thiết kế xóa các phần tử có giá trị chẵn trong một mảng dữ liệu.



Hình 28: Dạng sóng lúc bắt đầu.



Hình 29: Dạng sóng lúc hoàn thành.

Kết luận: Máy trạng thái chuyển đúng so với dự tính, các giá trị chẵn đã được lọc chính xác.