Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный Исследовательский Университет ИТМО" Мегафакультет Компьютерных Технологий и Управления Факультет Программной Инженерии и Компьютерной Техники



Вариант №2 Лабораторная работа 1

по дисциплине

'Функциональная схемотехника'

Выполнил Студент группы Р33102 **Лапин Алексей Александрович** Преподаватель: Васильев С.Е.

Содержание

1	Цели работы:	3
2	Задание	3
3	Отчет о выполнении заданий части 1:	4
	3.1 Схема разработанного вентиля NAND	4
	3.2 Символ вентиля и схема тестирования	4
	3.3 Временная диаграмма процесса тестирования вентиля	5
	3.4 Результат измерения задержки распространения сигнала через вентиль.	6
	3.5 Максимальная частота работы вентиля	7
	3.6 Постройте БОЭ на базе созданного вентиля согласно варианту задания.	8
	3.7 Создайте символ для построенного БОЭ	13
	3.8 Проведите моделирование работы схемы и определите задержку распро-	
	странения сигнала через БОЭ	14
	3.9 Результат измерения задержки распространения сигнала через БОЭ	16
	3.10 Максимальная частота работы БОЭ	19
4	Отчет о выполнении заданий части 2:	22
	4.1 Код разработанного модуля БОЭ	22
	4.2 Код разработанного тестового окружения	23
	4.3 Временная диаграмма процесса тестирования БОЭ	25
5	Выводы	28
	5.1 LTspice	28
6	Vivado	28

1 Цели работы:

- 1. Получить базовые знания о принципах построения цифровых интегральных схем с использованием технологии КМОП.
- 2. Познакомиться с технологией SPICE-моделирования схем на транзисторах.
- 3. Получить навыки описания схем базовых операционных элементов (БОЭ) комбинационного типа на вентильном уровне с использованием языка описания аппаратуры Verilog HDL.

2 Задание

Лабораторная работа состоит из двух частей.

Первая часть посвящена проектированию цифровых вентилей на полевых транзисторах, построению схем на базе вентилей и знакомству с технологией SPICE моделирования. Первая часть работы выполняется в программном пакете LTspice. При построении схем вентилей необходимо использовать КМОП-транзисторы с параметрами из файла, предоставленного преподавателем (см. раздел «Основы работы в среде LTspice»).

Вторая часть посвящена знакомству с языком описания аппаратуры Verilog HDL, изучению особенностей его использования для описания схем на вентильном уровне и приобретению навыков тестирования таких схем. Вторая часть работы выполняется с использованием Vivado Simulator, входящего в пакет Vivado Design Suite (см. раздел «Основы работы в среде Vivado Design Suite»).

Вариант: 2

Логический базис: NAND

БОЭ: Полный четырехразрядный компаратор

3 Отчет о выполнении заданий части 1:

3.1 Схема разработанного вентиля NAND

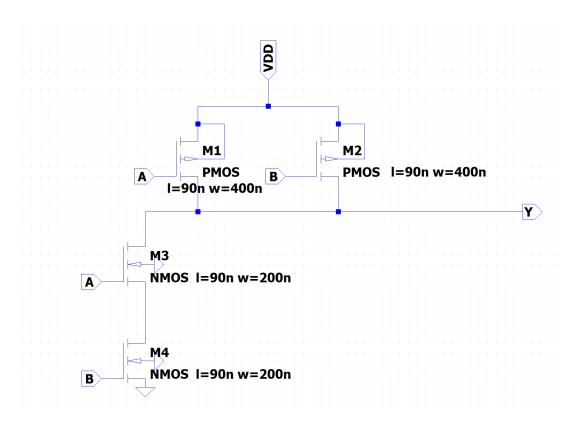


Рис. 1: Схема разработанного вентиля NAND

3.2 Символ вентиля и схема тестирования

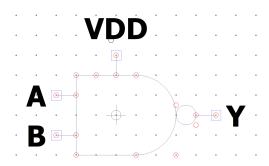


Рис. 2: Символ вентиля

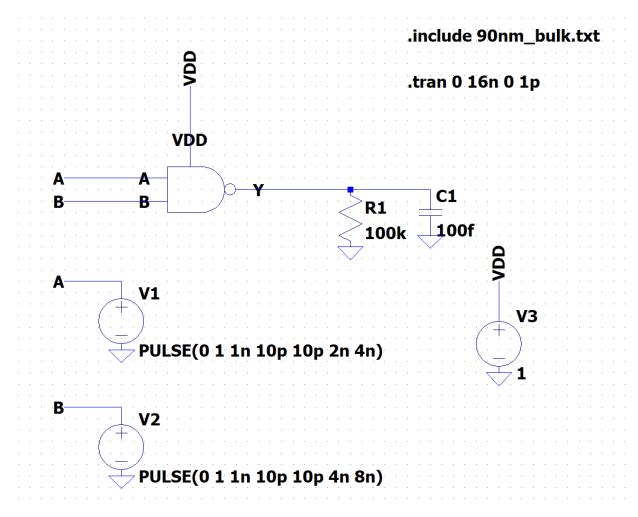


Рис. 3: Схема тестирования

3.3 Временная диаграмма процесса тестирования вентиля

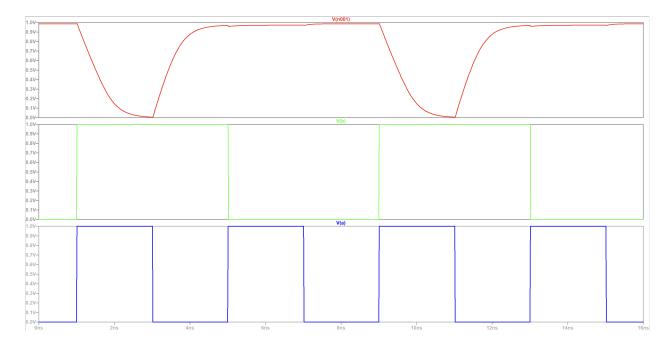


Рис. 4: Временная диаграмма процесса тестирования вентиля

3.4 Результат измерения задержки распространения сигнала через вентиль

Задержка распространения - максимальное время от начала изменения входа до момента, когда все выходы достигнут установившихся значений. Измеряется она между точками перехода входным и выходным сигналом уровня 50%.

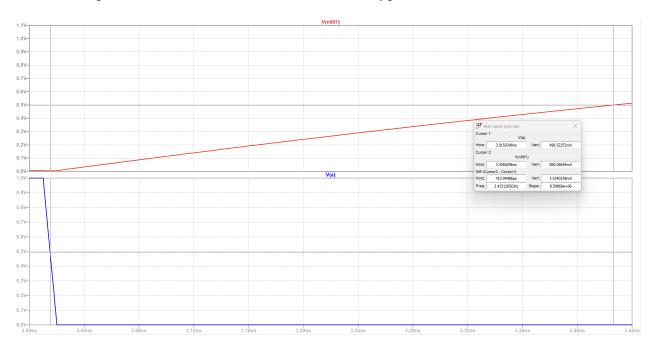


Рис. 5: Подсчет задержки распространения сигнала для 0-1 на выходе

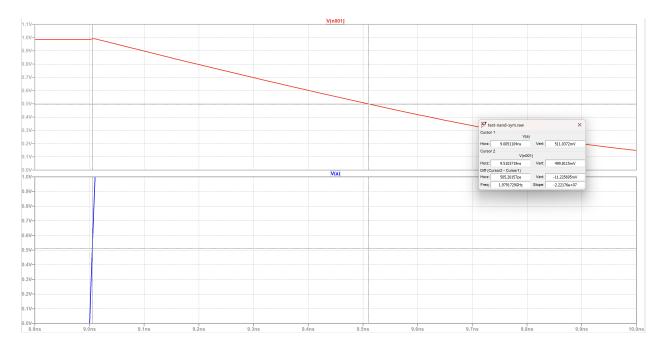


Рис. 6: Подсчет задержки распространения сигнала для 1-0 на выходе

 $t_{pd}=t_2-t_1=3.426-3.015=0.411$ нс—задержка распространения сигнала для 0-1 на выходе $t_{pd}=t_2-t_1=9.510-9.005=0.505$ нс—задержка распространения сигнала для 1-0 на выходе



Рис. 7: Время спада от 0.9 до 0.1

3.5 Максимальная частота работы вентиля

Высчитывается как время спада(фронта) от 0.1 до 0.9 (0.9 до 0.1) уровня на выходе вентиля, и от этого времени высчитывается частота:

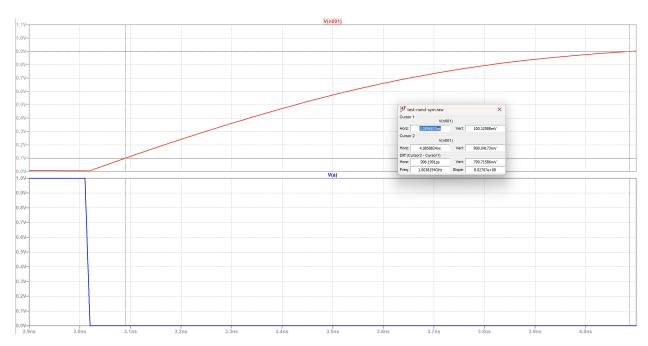


Рис. 8: Время фронта от 0.1 до 0.9

$$t_{10}=9.098-10.130=1.031$$
нс — для спада
$$t_{01}=4.086-3.089=0.996$$
нс — для фронта

Тогда частота спада/фронта:

$$u_{\mathrm{спада}} = rac{1}{t_{10}} = rac{1}{1.031} = 0.970 \Gamma \Gamma$$
ц

$$u_{\text{фронта}} = \frac{1}{t_{01}} = \frac{1}{0.996} = 1.004 \Gamma \Gamma \eta$$

Тогда максимальная частота работы вентиля:

$$u_{\text{max}} = \min(\nu_{\text{спада}}, \nu_{\text{фронта}}) = \min(0.970, 1.004) = 0.970 \Gamma \Gamma \text{ц}$$

3.6 Постройте БОЭ на базе созданного вентиля согласно варианту задания.

Полный четырех разрядный компаратор.

$$(A = B) - \overline{A}\overline{B} \vee A\overline{B} = \overline{\overline{A}\overline{B}} \wedge \overline{\overline{A}\overline{B}} = \overline{(\overline{A} \mid B)(A \mid \overline{B})} = \overline{(\overline{A} \mid B) \mid (A \mid \overline{B})}$$

$$(A < B) - \overline{A}B = \overline{\overline{A}\overline{B}} = \overline{(\overline{A} \mid B)}$$

$$(A > B) - A\overline{B} = \overline{\overline{A}\overline{B}} = \overline{(\overline{A} \mid \overline{B})}$$

$$\overline{A} = (A \mid A)$$

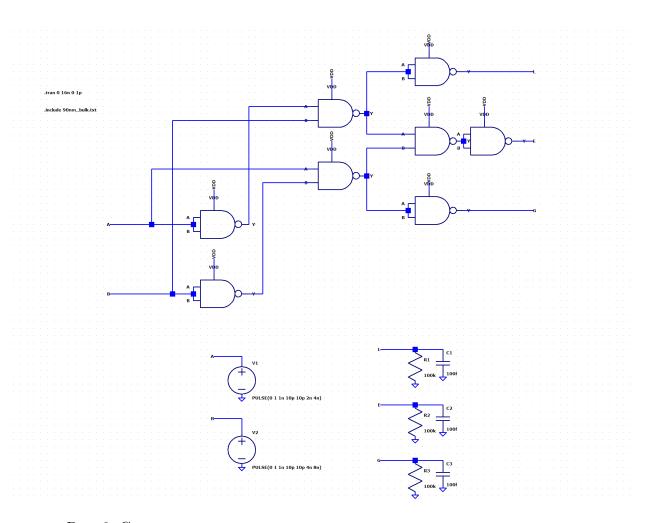


Рис. 9: Схема полного компаратора с двумя одноразрядными входами

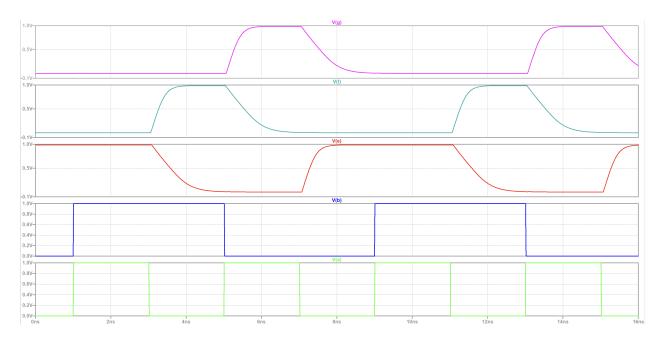


Рис. 10: Тестирование полного компаратора с двумя одноразрядными входами

Чтобы уменьшить количество обозначений на схеме, сделаем символ полного компаратора с двумя одноразрядными входами

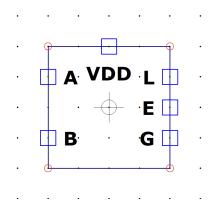


Рис. 11: Символ полного компаратора с двумя одноразрядными входами

Будем делать последовательный компаратор, поэтому добавим входы наращивания разрядности.

$$A \wedge B = (A \mid B) \mid (A \mid B)$$
$$A \vee B = (A \mid A) \mid (B \mid B)$$

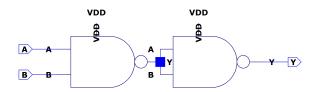


Рис. 12: Схема and

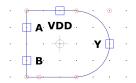


Рис. 13: Символ and

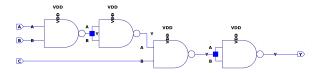


Рис. 14: Схема and3

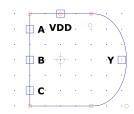


Рис. 15: Символ and3

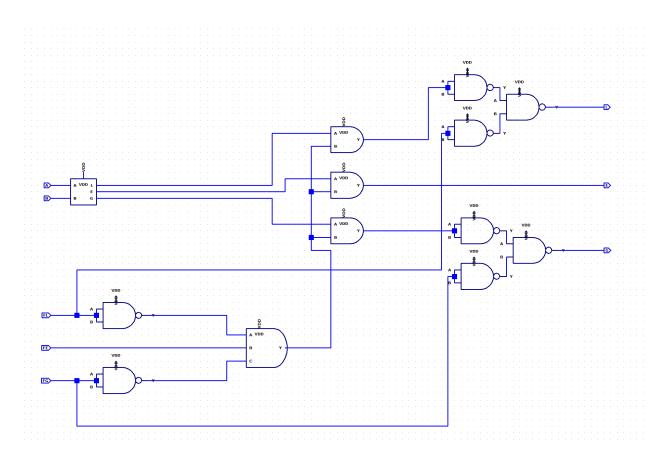


Рис. 16: Схема полного компаратора с двумя одноразрядными входами и входами наращивания разрядности

Чтобы не пугать людей, сделаем ещё символ для полного компаратора с двумя одноразрядными входами и входами наращивания разрядности:

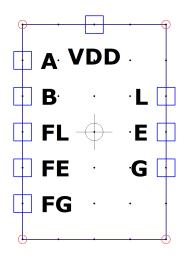


Рис. 17: Символ полного компаратора с двумя одноразрядными входами и входами наращивания разрядности

Подключим компараторы в последовательную цепочку, чтобы получить полный четырехразрядный компаратор. Насладимся красатой получившейся схемы, не забывая про тестирование на каждом из этапов.

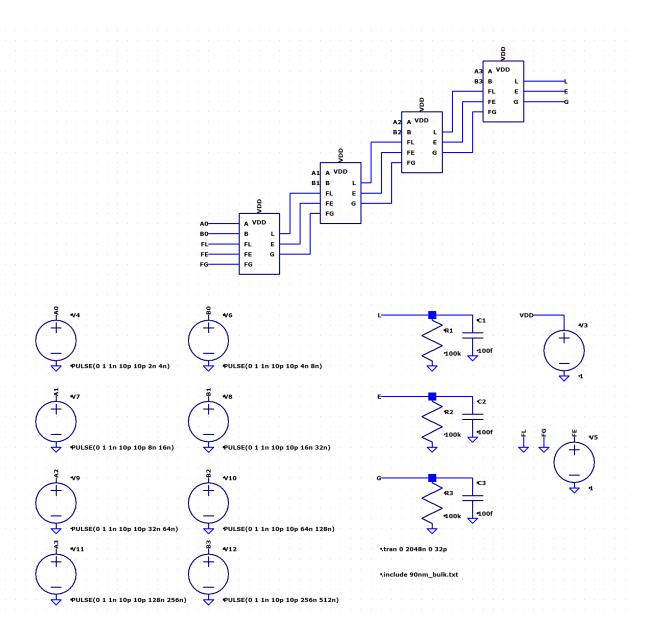


Рис. 18: Схема полного четырехразрядного компаратора

3.7 Создайте символ для построенного БОЭ.

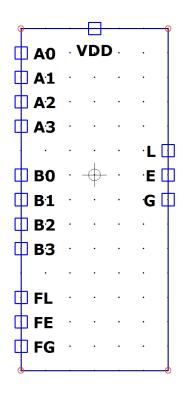


Рис. 19: Символ полного четырехразрядного компаратора

3.8 Проведите моделирование работы схемы и определите задержку распространения сигнала через БОЭ.

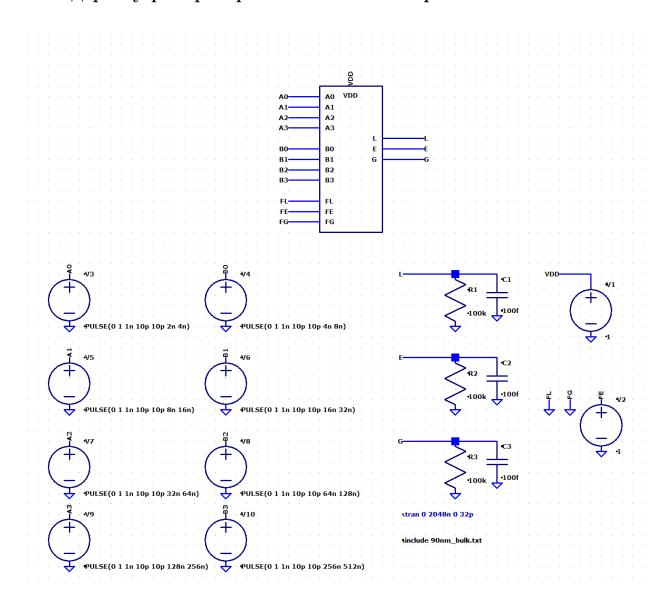


Рис. 20: Схема тестирование полного четырехразрядного компаратора

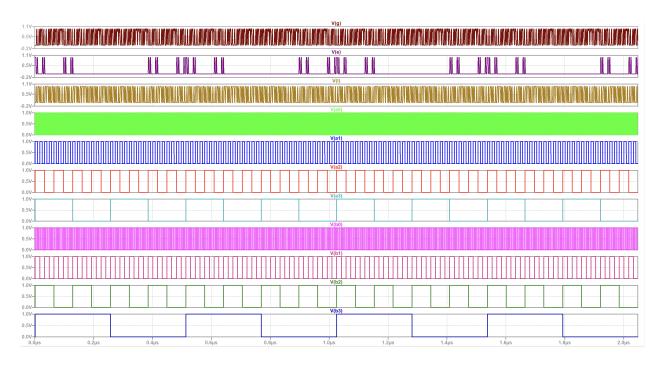


Рис. 21: Все возможные состояния.

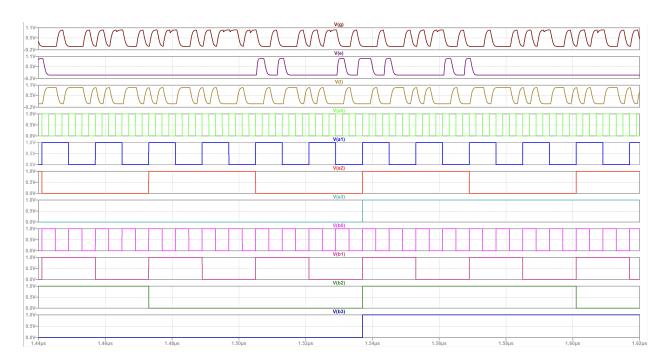


Рис. 22: Рассмотрим поближе. Видим, что компаратор выдает верные значения

3.9 Результат измерения задержки распространения сигнала через БОЭ

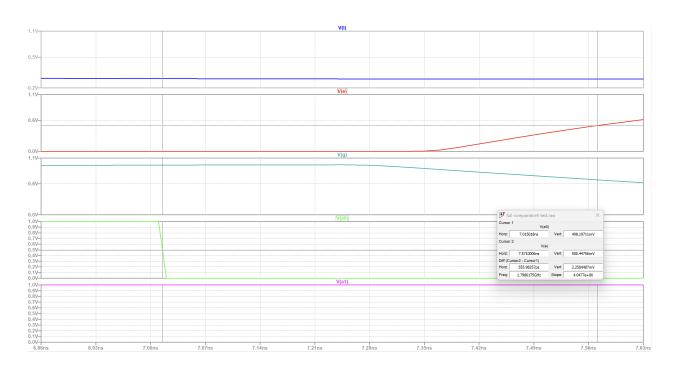


Рис. 23: Подсчет задержки распространения сигнала для 0-1 на выходе equal

$$t_{\rm pd} = 7.571 - 7.015 = 0.556ns$$

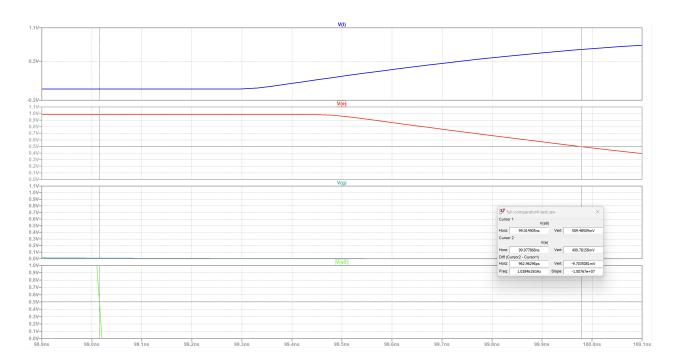


Рис. 24: Подсчет задержки распространения сигнала для 1-0 на выходе equal

$$t_{\rm pd} = 99.977 - 99.015 = 0.963ns$$

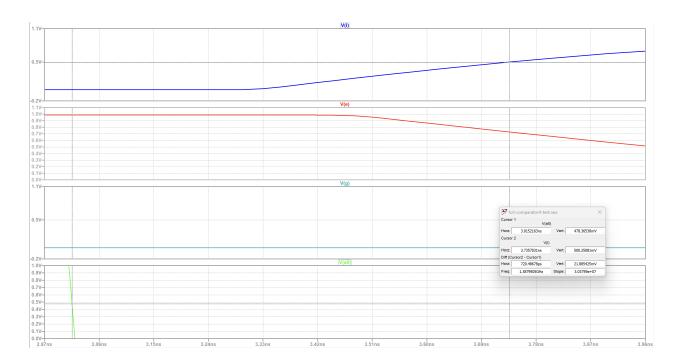


Рис. 25: Подсчет задержки распространения сигнала для 0-1 на выходе less

$$t_{\rm pd} = 3.736 - 3.015 = 0.720ns$$

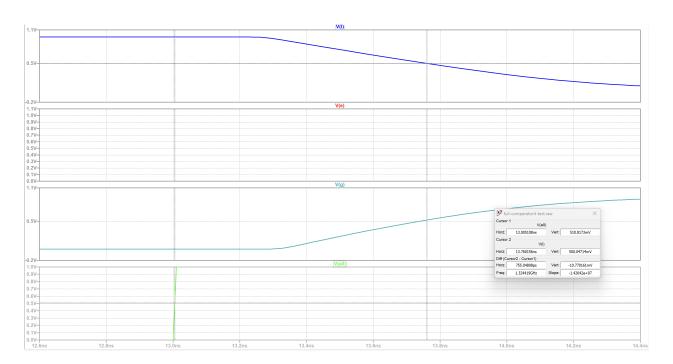


Рис. 26: Подсчет задержки распространения сигнала для 1-0 на выходе less

$$t_{\rm pd} = 13.760 - 13.005 = 0.755ns$$

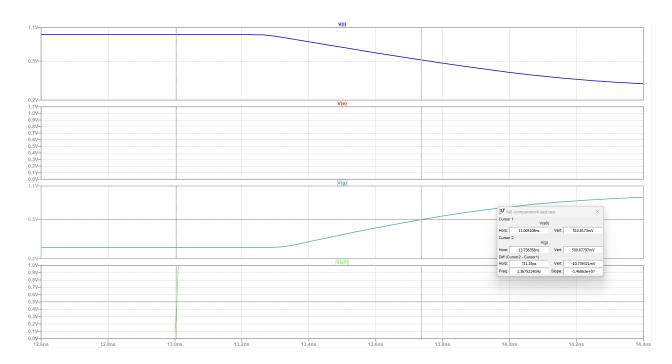


Рис. 27: Подсчет задержки распространения сигнала для 0-1 на выходе greater

$$t_{\rm pd} = 13.736 - 13.005 = 0.731ns$$

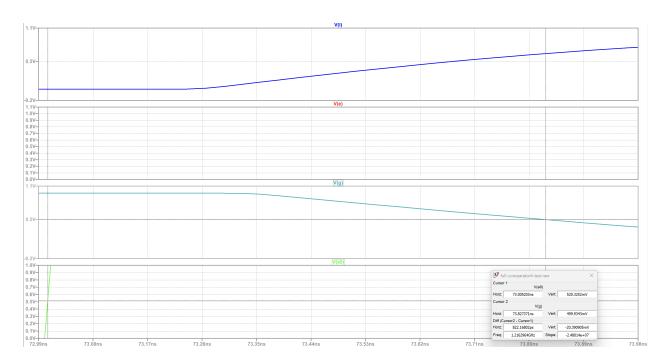


Рис. 28: Подсчет задержки распространения сигнала для 1-0 на выходе greater

$$t_{\rm pd} = 73.827 - 73.005 = 0.822ns$$

3.10 Максимальная частота работы БОЭ.

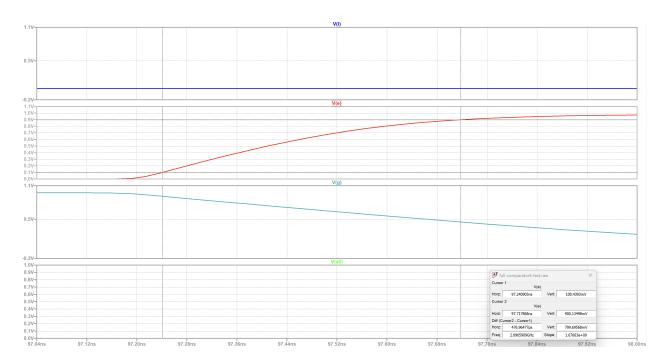


Рис. 29: Время фронта от 0.9 до 0.1 для equal

$$t_{\rm фронта_{\rm eq}} = 97.718 - 97.241 = 0.477 ns$$

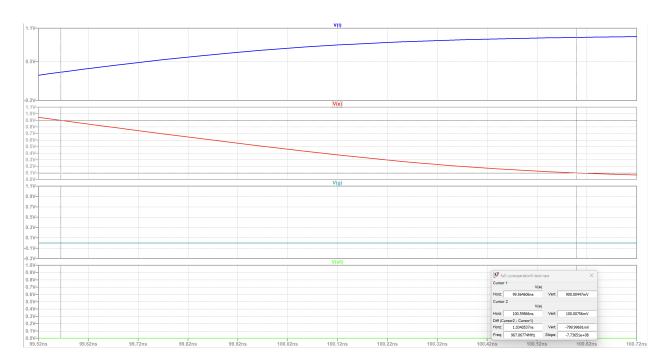


Рис. 30: Время спада от 0.1 до 0.9 для equal

$$t_{\rm chada_{\rm eq}} = 100.599 - 99.565 = 1.034 ns$$

$$t_{\rm фронта_{\rm gt}} = 102.396 - 101.68 = 0.716 ns$$

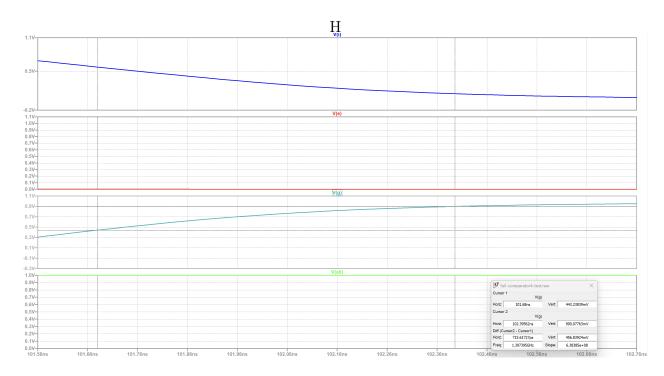


Рис. 31: Время фронта от 0.9 до 0.1 для greater

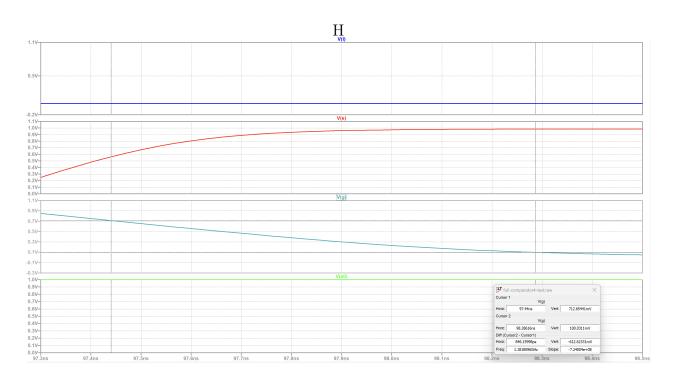


Рис. 32: Время спада от 0.1 до 0.9 для greater

$$t_{\rm cna, da_{gt}} = 98.286 - 97.44 = 0.846 ns$$

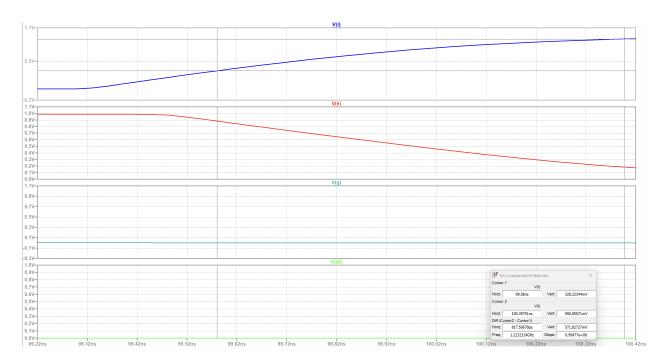


Рис. 33: Время фронта от 0.9 до 0.1 для less

$$t_{\text{фронта}_{\text{lt}}} = 100.398 - 99.58 = 0.818ns$$

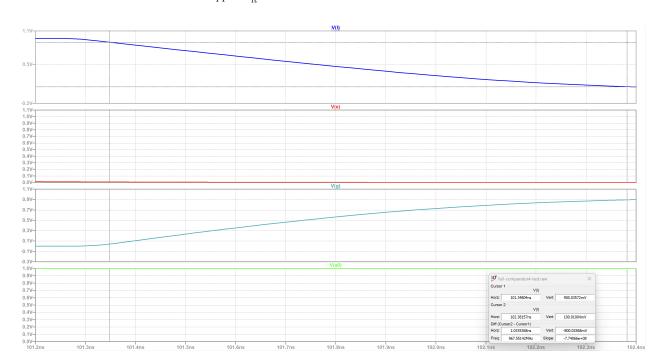


Рис. 34: Время спада от 0.1 до 0.9 для less

$$t_{\rm chada_{lt}} = 102.382 - 101.348 = 1.034ns$$

Тогда максимальная частота схемы:

$$\nu_{\rm max} = \frac{1}{{\rm max}(t)} = \frac{1}{1.034} = 0.967 \Gamma \Gamma {\rm II}$$

4 Отчет о выполнении заданий части 2:

4.1 Код разработанного модуля БОЭ

```
1 'timescale 1ns / 1ps
3 module full_comparator(
      input wire a, b,
      output wire 1, e, g
6
7 wire not_a, not_b;
8 wire v1_1, v1_2, v2_1;
10 nand(not_a, a, a);
11 nand(not_b, b, b);
12 nand(v1_1, not_a, b);
13 nand(v1_2, not_b, a);
14
15 nand(1, v1_1, v1_1);
16
17 nand(v2_1, v1_1, v1_2);
18 nand(e, v2_1, v2_1);
19
20 nand(g, v1_2, v1_2);
21
22 endmodule
23
24 module and2(
      input wire a, b,
25
      output wire out
26
      );
27
28 wire ab;
29 nand(ab, a, b);
30 nand(out, ab, ab);
31
32 endmodule
33
34 module and3(
      input wire a, b, c,
35
      output wire out
37
      );
39 wire ab, not_ab, abc;
40 nand(ab, a, b);
41 nand(not_ab, ab, ab);
42 nand(abc, not_ab, c);
43 nand(out, abc, abc);
44 endmodule
45
46 module or2(
47
      input wire a, b,
      output wire out
      );
49
```

```
50 wire not_a, not_b;
51 nand(not_a, a, a);
52 nand(not_b, b, b);
53
54 nand(out, not_a, not_b);
  endmodule
55
56
57 module full_comparator_seq(
      input wire a, b, fl, fe, fg,
58
      output wire 1, e, g
59
60 );
61
62 wire not_fl, not_fg, fc_l, fc_e, fc_g, add3_out, andl_out, andg_out;
63 nand(not_fl, fl, fl);
64 nand(not_fg, fg, fg);
66 full_comparator fc_i(.a(a), .b(b), .l(fc_l), .e(fc_e), .g(fc_g));
  and3 and3_i(.a(not_fl), .b(fe), .c(not_fg), .out(add3_out));
67
68
69 and 2 and 2_i1(.a(fc_l), .b(add3_out), .out(andl_out));
70 and 2 and 2_i2(.a(fc_e), .b(add3_out), .out(e));
71 and 2 and 2_i3(.a(fc_g), .b(add3_out), .out(andg_out));
72
73 or 2 or _i1(.a(andl_out), .b(fl), .out(1));
74 or 2 or _i2(.a(andg_out), .b(fg), .out(g));
75
  endmodule
76
77
78
79
  module full_comparator4(
80
      input wire[0:3] a,
81
      input wire [0:3] b,
82
      input fl, fe, fg,
83
      output 1, e, g
84
      );
85
86 wire [2:0] fcsl_out, fcse_out, fcsg_out;
  full_comparator_seq
     fcs1(a[0],b[0],fl,fe,fg,fcsl_out[0],fcse_out[0],fcsg_out[0]);
88 full_comparator_seq
     fcs2(a[1],b[1],fcsl_out[0],fcse_out[0],fcsg_out[0],
     fcsl_out[1],fcse_out[1],fcsg_out[1]);
89 full_comparator_seq
     fcs3(a[2],b[2],fcsl_out[1],fcse_out[1],fcsg_out[1],
     fcsl_out[2],fcse_out[2],fcsg_out[2]);
90 full_comparator_seq
     fcs4(a[3],b[3],fcs1_out[2],fcse_out[2],fcsg_out[2],1,e,g);
  endmodule
```

4.2 Код разработанного тестового окружения

```
1 'timescale 1ns / 1ps //reference time / precision
```

```
2
3
4 module full_comparator4_tb;
5 //inputs
6 reg[3:0] a, b;
7 reg fl, fe, fg;
8 //outputs
9 wire 1:
10 wire e;
11 wire g;
12
13 // Unit under test (UUT)
14
15 full_comparator4 uut(a, b, fl, fe, fg, l, e, g);
16
17 //32 bit integer
18 integer i, j;
19
20 reg[3:0] expr_lt, expr_eq, expr_gt;
21
22 initial
23 begin
24 | \{f1, fe, fg\} = 3'b010;
      for (i = 0; i < 16; i = i + 1) begin
25
           a = i;
26
27
           for (j = 0; j < 16; j = j + 1) begin
               b = j;
28
               expr_lt = ( i < j );
29
               expr_eq = ( i == j );
30
               expr_gt = (i > j);
31
               #10;
32
               if (1 == expr_lt & e == expr_eq & g == expr_gt) begin
33
                    display("[CORRECT]: a = %d, b = %d, l = %d, e = %d,
34
                       g = %d'', a, b, 1, e, g);
               end else begin
35
                     $display("[INCORRECT]: a=%d, b=%d, expr_lt=%d,
36
                        expr_eq = %d, expr_gt = %d, l = %d, e = %d, g = %d",
                     a, b, expr_lt, expr_eq, expr_gt, l, e, g);
37
38
                end
           end
39
      end
40
41 $stop;
  end
42
43
45 endmodule
```

4.3 Временная диаграмма процесса тестирования БОЭ

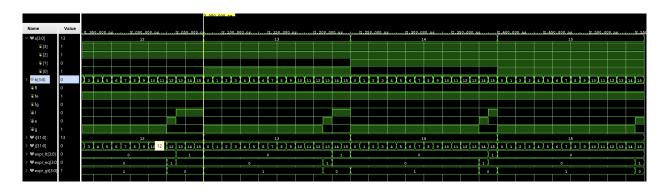


Рис. 35: Отрывок временная диаграммы процесса тестирования БОЭ

Логи

```
1 [CORRECT]:
                    6,
                        b
                             4, 1
                                     0,
                                         е
                                              0,
                                                 g
  [CORRECT]:
                        b
                          =
                                 1
                                   =
                                     0,
                                                 g
  [CORRECT]:
                    6,
                              6,
                                 1
                                     0,
              a =
                        b =
                                   =
                                         е
                    6,
  [CORRECT]:
              a
                        b
                          =
                              7,
                                 1
                                   =
                                     1,
                                         е
                                              0,
                              8,
                                 1 =
  [CORRECT]:
              a
                    6,
                        b
                          =
                                     1,
                                         е
                                              0,
  [CORRECT]:
                    6,
                        b
                              9,
                                 1
                                     1,
                                         е
  [CORRECT]: a =
                        b
                            10, 1
                                         е
                                 1
  [CORRECT]:
              a =
                    6,
                        b =
                            11,
                                   =
                                     1,
                                         е
                            12, 1 =
  [CORRECT]:
                    6, b =
                                     1,
              a =
                                         е
                    6,
10 [CORRECT]: a =
                            13, 1 = 1,
                                         е
                        b =
                                              0,
  [CORRECT]:
              a =
                    6, b =
                            14, 1 =
                                     1.
                                         е
  [CORRECT]: a =
                    6,
                            15,
                                 1 = 1,
                        b
                                         е
                              0,
                                 1
                                   = 0,
  [CORRECT]:
              a =
                    7,
                        b
                          =
                                         е
                    7,
                              1,
  [CORRECT]:
              a =
                        b
                          =
                                 1
                                   =
                                     0,
                                         е
15 [CORRECT]:
                    7,
                        b
                              2,
                                 1 = 0,
              a =
                         =
                                         е
                                              0,
16 [CORRECT]:
                    7,
                        b
                          =
                             3,
                                 1
              a =
                                   =
                                     0,
                                         е
                    7,
                              4,
                                 1
17 [CORRECT]:
              a =
                        b
                                   = 0,
                                         е
                    7,
  [CORRECT]:
              a =
                        b
                         =
                             5,
                                 1
                                     0.
                                         е
18
                    7,
                              6,
19 [CORRECT]:
               a =
                        b
                          =
                                 1
                                   =
                                     0,
                                         е
                    7,
                              7,
                                 1 = 0,
20 [CORRECT]:
              a =
                        b =
                                         е
  [CORRECT]:
              a =
                    7,
                        b
                         =
                             8,
                                 1
                                   = 1,
                                         е
21
22 [CORRECT]:
              a =
                    7,
                        b =
                             9,
                                 1 = 1,
                                         е
                                              0.
                                           =
                    7,
                       b =
                            10,
                                 1
  [CORRECT]:
              a =
                                     1,
                                         е
23
24 [CORRECT]:
              a =
                    7,
                        b
                            11, 1 =
                                     1,
                                         е
                            12,
                                 1 = 1,
25 [CORRECT]:
              a =
                    7,
                        b
                          =
                                         е
26 [CORRECT]: a =
                       b =
                            13, 1 = 1,
                    7,
                                         е
27 [CORRECT]: a =
                    7,
                            14,
                                 1 = 1,
                        b =
                                         е
                                              0,
                                     1,
28 [CORRECT]:
              a =
                    7,
                        b
                         =
                            15,
                                 1 =
                                         е
                                              0,
                                                      0
29 [CORRECT]:
              a =
                    8,
                        b
                              0, 1 = 0,
                                         е
                                              0,
  [CORRECT]:
                    8,
                        b
                              1,
                                 1
                                         е
30
                              2,
  [CORRECT]:
                                 1
                                   = 0,
              a =
                        b
                          =
                                         е
                                 1
32 [CORRECT]:
              a =
                    8,
                        b =
                              3,
                                   = 0,
                                         е
                                           =
                                              0,
                    8,
33 [CORRECT]:
                        b
                              4,
                                 1
                                   =
                                     0,
              a =
                         =
                                         е
                                           =
                                              0,
34 [CORRECT]:
              a =
                    8,
                        b =
                             5,
                                 1 = 0,
                                         е
                                             Ο,
                                           =
35 [CORRECT]:
                         =
                             6,
                                 1
              a
                    8,
                        b
                                   = 0.
                                         е
                                           = 0.
                    8,
                                          = 0, g
36 [CORRECT]:
              a =
                        b =
                             7,
                                 1 = 0,
                                         е
37 [CORRECT]: a =
                    8, b =
                             8, 1 = 0, e = 1, g =
```

```
9, 1 = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a =
                  8, b =
                  8, b = 10, l = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a =
  [CORRECT]: a =
                  8, b = 11, 1 = 1, e = 0, g = 0
                  8, b = 12, 1 = 1, e = 0, g =
  [CORRECT]: a =
41
                  8, b = 13, l = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a =
                  8, b = 14, 1 = 1, e = 0, g = 0
43 [CORRECT]: a =
  [CORRECT]: a =
                  8, b = 15, 1 = 1, e = 0, g = 0
                  9, b =
                          0, 1 = 0, e = 0, g = 1
45 [CORRECT]: a =
                  9, b =
                           1, 1 = 0, e = 0, g
  [CORRECT]: a =
46
 [CORRECT]: a =
                  9, b =
                          2, 1 = 0, e = 0, g = 1
                  9, b =
  [CORRECT]: a =
                           3, 1 = 0, e = 0, g =
                  9, b =
                           4, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a =
50 [CORRECT]: a =
                  9, b =
                           5, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a =
                  9, b =
                          6, 1 = 0, e = 0, g =
                                                1
51
                          7, 1 = 0, e = 0, g =
52 [CORRECT]: a =
                  9, b =
                          8, 1 = 0, e = 0, g = 1
                  9, b =
53 [CORRECT]:
             a =
                          9, 1 = 0, e = 1, g = 0
54 [CORRECT]: a =
                  9, b =
  [CORRECT]: a =
                  9, b = 10, 1 = 1, e = 0, g = 0
55
                  9, b = 11, 1 = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a =
56
                  9, b = 12, 1 = 1, e = 0, g = 0
57 [CORRECT]: a =
                  9, b = 13, 1 = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a =
58
                  9, b = 14, 1 = 1, e = 0, g = 0
59 [CORRECT]: a =
                 9, b = 15, l = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a =
60
  [CORRECT]: a = 10, b =
                          0, 1 = 0, e = 0, g = 1
62 [CORRECT]: a = 10, b =
                          1, 1 = 0, e = 0, g = 1
  [CORRECT]: a = 10, b =
                          2, 1 = 0, e = 0, g = 1
63
  [CORRECT]: a = 10, b =
                          3, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 10, b =
                          4, 1 = 0, e = 0, g =
65
  [CORRECT]: a = 10, b =
                          5, 1 = 0, e = 0, g =
                                                1
6, 1 = 0, e = 0, g = 1
68 [CORRECT]: a = 10, b =
                          7, 1 = 0, e = 0, g =
                                                1
69 [CORRECT]: a = 10, b =
                          8, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 10, b = 9, l = 0, e = 0, g
70
71 [CORRECT]: a = 10, b = 10, l = 0, e = 1, g = 0
72 [CORRECT]: a = 10, b = 11, l = 1, e = 0, g = 0
73 [CORRECT]: a = 10, b = 12, l = 1, e = 0, g = 0
  [CORRECT]: a = 10, b = 13, l = 1, e = 0, g = 0
74
  [CORRECT]: a = 10, b = 14, l = 1, e = 0, g = 1
75
76 [CORRECT]: a = 10, b = 15, l = 1, e = 0, g =
77 | [CORRECT]: a = 11, b =
                          0, 1 = 0, e = 0, g = 1
78 [CORRECT]: a = 11, b =
                          1, 1 = 0, e = 0, g = 1
79 | [CORRECT]: a = 11, b =
                          2, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 11, b =
                          3, 1 = 0, e = 0, g =
80
81 | [CORRECT]: a = 11, b =
                          4, 1 = 0, e = 0, g =
82 [CORRECT]: a = 11, b =
                          5, 1 = 0, e = 0, g = 1
83 [CORRECT]: a = 11, b =
                          6, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 11, b =
                          7, 1 = 0, e = 0, g =
84
  [CORRECT]: a = 11, b =
                          8, 1 = 0, e = 0, g =
                                                1
85
86 [CORRECT]: a = 11, b =
                          9, 1 = 0, e = 0, g = 1
  [CORRECT]: a = 11, b = 10, l = 0, e = 0, g = 1
87
88 \mid [CORRECT]: a = 11, b = 11, l = 0, e = 1, g = 0
  [CORRECT]: a = 11, b = 12, l = 1, e = 0, g = 0
90 [CORRECT]: a = 11, b = 13, l = 1, e = 0, g = 0
```

```
[CORRECT]: a = 11, b = 14, l = 1, e = 0, g = 0
   [CORRECT]: a = 11, b = 15, l = 1, e = 0, g =
   [CORRECT]: a = 12, b =
                           0, 1 = 0, e = 0, g = 1
   [CORRECT]: a = 12, b =
                           1, 1 = 0, e = 0, g
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           2, 1 = 0, e = 0, g
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           3, 1 = 0, e = 0, g =
                                             g =
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           4, 1 = 0, e = 0,
97
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           5, 1 = 0, e = 0, g =
98
   [CORRECT]: a = 12, b =
                           6, 1 = 0, e = 0,
99
                                             g
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           7, 1 = 0, e = 0, g
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           8, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 12, b =
                           9, 1 = 0, e = 0, g =
102
  [CORRECT]: a = 12, b = 10, l = 0, e = 0, g =
103
   [CORRECT]: a = 12, b = 11, l = 0, e = 0, g
104
  [CORRECT]: a = 12, b = 12, l = 0, e = 1, g
105
  [CORRECT]: a = 12, b = 13, l = 1, e = 0, g = 0
106
  [CORRECT]: a = 12, b = 14, l = 1, e = 0, g = 0
107
   [CORRECT]: a = 12, b = 15, l = 1, e = 0, g = 0
108
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           0, 1 = 0, e = 0, g = 1
109
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           1, 1 = 0, e = 0, g = 1
110
   [CORRECT]: a = 13, b =
                           2, 1 = 0, e = 0, g = 1
111
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           3, 1 = 0, e = 0, g = 1
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           4, 1 = 0, e = 0, g =
113
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           5, 1 = 0, e = 0, g
                                                 1
114
                           6, 1 = 0, e = 0, g = 1
115 [CORRECT]: a = 13, b =
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           7, 1 = 0, e = 0,
                                             g =
116
  [CORRECT]: a = 13, b =
                           8, 1 = 0, e = 0, g =
117
   [CORRECT]: a = 13, b =
                           9, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 13, b = 10, l = 0, e = 0, g =
119
|120| [CORRECT]: a = 13, b = 11, l = 0, e = 0, g = 1
  [CORRECT]: a = 13, b = 12, l = 0, e = 0, g =
121
                                                 - 1
  [CORRECT]: a = 13, b = 13, l = 0, e = 1, g = 0
122
   [CORRECT]: a = 13, b = 14, l = 1, e = 0, g
123
  [CORRECT]: a = 13, b = 15, l = 1, e = 0, g = 0
                           0, 1 = 0, e = 0, g = 1
|125| [CORRECT]: a = 14, b =
  [CORRECT]: a = 14, b =
                           1, 1 = 0, e = 0, g = 1
126
  [CORRECT]: a = 14, b =
                           2, 1 = 0, e = 0, g =
127
   [CORRECT]: a = 14, b =
                           3, 1 = 0, e = 0,
                                            g
128
129 [CORRECT]: a = 14, b =
                           4, 1 = 0, e = 0, g =
|130| [CORRECT]: a = 14, b =
                           5, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 14, b =
                           6, 1 = 0, e = 0, g =
131
                           7, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 14, b =
132
  [CORRECT]: a = 14, b =
                           8, 1 = 0, e = 0, g
133
[CORRECT]: a = 14, b =
                           9, 1 = 0, e = 0, g =
  [CORRECT]: a = 14, b = 10, l = 0, e = 0, g = 1
135
  [CORRECT]: a = 14, b = 11, l = 0, e = 0, g = 1
  [CORRECT]: a = 14, b = 12, l = 0, e = 0, g =
137
  [CORRECT]: a = 14, b = 13, l = 0, e = 0, g =
                                                 1
138
| [CORRECT] : a = 14, b = 14, l = 0, e = 1, g = 0
  [CORRECT]: a = 14, b = 15, l = 1, e = 0, g = 0
140
                           0, 1 = 0, e = 0, g = 1
  [CORRECT]: a = 15, b =
  [CORRECT]: a = 15, b =
                           1, 1 = 0, e = 0, g = 1
142
[CORRECT]: a = 15, b =
                           2, 1 = 0, e = 0, g = 1
```

```
144 [CORRECT]: a = 15, b =
                            3, 1 = 0, e = 0,
  [CORRECT]:
              a = 15, b
                            4, 1 = 0,
145
                            5, 1 = 0, e
146 [CORRECT]: a = 15, b =
                               1 = 0, e = 0,
  [CORRECT]: a = 15, b =
                            6,
147
  [CORRECT]: a = 15, b
                         =
                            7, 1 = 0, e
                            8, 1 = 0, e = 0,
|149| [CORRECT]: a = 15, b =
  [CORRECT]: a = 15, b =
                            9, 1 = 0, e = 0,
150
  [CORRECT]: a = 15, b = 10, l = 0, e = 0,
151
  [CORRECT]: a = 15, b = 11,
                               1 = 0, e =
152
| [CORRECT] : a = 15, b = 12, 1 = 0, e = 0, 
|154| [CORRECT]: a = 15, b = 13, l = 0, e = 0,
| [CORRECT] : a = 15, b = 14, l = 0, e = 0, 
  [CORRECT]: a = 15, b = 15, l = 0, e = 1, g = 0
156
```

5 Выводы

5.1 LTspice

В ходе выполнения первой части лабораторной работы я получил фундаментальные знания о принципах построения цифровых интегральных схем с использованием КМОП-технологии. Это фундаментальное понимание включает в себя построение и реализацию логических функций с помощью КМОП-транзисторов, которые являются основными элементами современных цифровых интегральных схем. Кроме того, я познакомился с технологией SPICE-моделирования и симуляции, благодаря практическому использованию программы LTspice.

Входе лабораторной работы я построил и проанализировал схему полного компаратора, а также провел симуляцию и анализ временных диаграмм. Научился высчитывать задержку распространения сигнала и максимальную частоту работы схемы. Это позволило мне понять какие ограничения на частоту работы схемы существуют. Также я увидел сложность проектирования цифровых интегральных схем, и то зачем нужны средства автоматизации электронного проектирования, такие как LTspice и Vivado.

6 Vivado

В ходе выполнения второй части лабораторной работы были получены навыки разработки цифровых интегральных схем на языке описания аппаратуры Verilog HDL. Также я познакомился с программным обеспечением Vivado, которое позволяет проектировать цифровые интегральные схемы, а также проводить их симуляцию и тестирование. В ходе выполнения лабораторной работы я разработал модуль БОЭ и тестовое окружение для него, а также провел тестирование разработанного модуля. Таким образом, я получил навыки разработки цифровых интегральных схем на языке описания аппаратуры Verilog HDL, а также навыки работы с программным обеспечением Vivado.