

# Лабораторный практикум

«Проектирование цифровых устройств с помощью  
Verilog HDL»

# Лабораторная работа №1

## Введение в Verilog HDL

### 1.1 Возникновение языков описания цифровой аппаратуры

Цифровые устройства — это устройства, предназначенные для приёма и обработки цифровых сигналов. Цифровыми называются сигналы, которые можно рассматривать в виде набора дискретных уровней. В цифровых сигналах информация кодируется в виде конкретного уровня напряжения. Как правило выделяется два уровня — логический «0» и логическая «1».

Цифровые устройства стремительно развиваются с момента изобретения электронной лампы, а затем транзистора. Со временем цифровые устройства стали компактнее, уменьшилось их энергопотребление, возрасла вычислительная мощность. Так же разительно возросла сложность их структуры.

Графические схемы, которые применялись для проектирования цифровых устройств на ранних этапах развития, уже не могли эффективно использоваться. Потребовался новый инструмент разработки, и таким инструментом стали языки описания аппаратной части цифровых устройств (Hardware Description Languages, HDL), которые описывали цифровые структуры формализованным языком, чем-то похожим на язык программирования.

Совершенно новый подход к описанию цифровых схем, реализованный в языках HDL, заключается в том, что с помощью их можно описывать не только структуру, но и поведение цифрового устройства. Окончательная структура цифрового устройства получается путём обработки таких смешанных описаний специальной программой — синтезатором.

Такой подход существенно изменил процесс разработки цифровых устройств, превратив громоздкие, тяжело читаемые схемы в относительно простые и доступные описания поведения.

В данном курсе мы рассмотрим язык описания цифровой аппаратуры Verilog HDL — один из наиболее распространённых на текущий момент. И начнём мы с разработки наиболее простых цифровых устройств — логических вентилях.

## 1.2 HDL описания логических вентилях

Логические вентили реализуют функции алгебры логики: И, ИЛИ, Исключающее ИЛИ, НЕ. Напомним их таблицы истинности:

$a$	$b$	$a \cdot b$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 1.1: И

$a$	$b$	$a \oplus b$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица 1.3: Исключающее ИЛИ

$a$	$b$	$a b$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 1.2: ИЛИ

$a$	$\bar{a}$
0	1
1	0

Таблица 1.4: НЕ

Начнём знакомиться с Verilog HDL с описания логического вентиля «И». Ниже приведен код, описывающий вентиль с точки зрения его структуры:

```

1 module and_gate(
2     input a,
3     input b,
4     output result)
5
6 assign result = a & b;
7
8 endmodule

```

Листинг 1.1: Модуль, описывающий вентиль «И»

Описанный выше модуль можно представить как некоторый «ящик», в который входит 2 провода с названиями «*a*» и «*b*» и из которого выходит один провод с названием «*result*». Внутри этого блока результат выполнения операции «И» (в синтаксисе Verilog записывается как «&») над входами соединяют с выходом.

Схематично изобразим этот модуль:

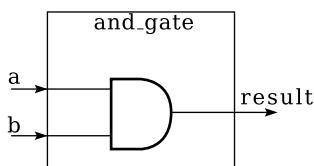


Рис. 1.1: Структура модуля «and\_gate»

Аналогично опишем все оставшиеся вентили:

```

1 module or_gate(
2     input a,
3     input b,
4     output result)
5
6 assign result = a | b;
7
8 endmodule

```

Листинг 1.2: Модуль, описывающий вентиль «ИЛИ»

```

1 module xor_gate(
2     input a,
3     input b,
4     output result)
5
6 assign result = a ^ b;
7
8 endmodule

```

Листинг 1.3: Модуль, описывающий вентиль  
«Исключающее ИЛИ»

```

1 module not_gate(
2     input a,
3     output result)
4
5 assign result = ~a;
6
7 endmodule

```

Листинг 1.4: Модуль, описывающий вентиль «НЕ»

В проектировании цифровых устройств логические вентили наиболее часто используются для формулировки и проверки сложных условий, например:

```

1 if ( (a & b) | (~c) ) begin
2     ...
3 end

```

Листинг 1.5: Пример использования логических вентиляей

Условие будет выполняться либо когда *не* выполнено условие «с», либо когда одновременно выполняются условия «а» и «b». *Здесь и далее под условием понимается логический сигнал, отражающий его истинность.*

В качестве входов, выходов и внутренних соединений в блоках могут использоваться шины — группы проводов. Ниже приведен пример работы с шинами:

```

1 module bus_or(
2     input  [7:0] x,
3     input  [7:0] y,
4     output [7:0] result);
5
6 assign result = x | y;
7
8 endmodule

```

Листинг 1.6: Модуль, описывающий побитовое «ИЛИ» между двумя шинами

Это описание описывает побитовое «ИЛИ» между двумя шинами по 8 бит. То есть описываются восемь логических вентилей «ИЛИ», каждый из которых имеет на входе соответствующие разряды из шины «x» и шины «y».

При использовании шин можно в описании использовать конкретные биты шины и группы битов. Для этого используют квадратные скобки после имени шины:

```

1 module bitwise_ops(
2     input  [7:0] x,
3     output [4:0] a,
4     output      b,
5     output [2:0] c);
6
7 assign a = x[5:1];
8 assign b = x[5]  | x[7];
9 assign c = x[7:5] ^ x[2:0];
10
11 endmodule

```

Листинг 1.7: Модуль, демонстрирующий битовую адресацию шин

Такому описанию соответствует следующая структурная схема, приведённая на Рис. 1.2



Рис. 1.2: Структура модуля «bitwise\_ops»

Впрочем, реализация ФАЛ с помощью логических вентилях не всегда представляется удобной. Допустим нам нужно описать таблично-заданную ФАЛ. Тогда описания этой функции при помощи логических вентилях нам придётся сначала минимизировать её и только после этого, получив логическое выражение (которое, несмотря на свою минимальность, не обязательно является коротким), сформулировать его с помощью языка Verilog HDL. Как видно, ошибку легко допустить на любом из этих этапов.

Одно из главных достоинств Verilog HDL — это возможность описывать поведение цифровых устройств вместо описания их структуры.

Программа-синтезатор анализирует синтаксические конструкции поведенческого описания цифрового устройства на Verilog HDL, проводит оптимизацию и, в итоге, вырабатывает структуру, реализующую цифровое устройство, которое соответствует заданному поведению.

Используя эту возможность, опишем таблично-заданную ФАЛ на Verilog HDL:

```

1 module function(
2     input x0,
3     input x1,
4     input x2,
```

```

5   output reg y);
6
7   wire [2:0] x_bus;
8   assign x_bus = {x2, x1, x0};
9
10  always @(xbus) begin
11      case (xbus)
12          3'b000: y <= 1'b0;
13          3'b010: y <= 1'b0;
14          3'b101: y <= 1'b0;
15          3'b110: y <= 1'b0;
16          3'b111: y <= 1'b0;
17          default: y <= 1'b1;
18      endcase;
19  end;
20
21  endmodule;

```

Листинг 1.8: Пример описания таблично-заданной ФАЛ на Verilog HDL

Описание, приведённое выше, определяет  $y$ , как таблично-заданную функцию, которая равна нулю на наборах 0, 2, 5, 6, 7 и единице на всех остальных наборах.

Остановимся подробнее на новых синтаксических конструкциях:

Описание нашего модуля начинается с создания трёхбитной шины «x\_bus» на строке 7.

После создания шины «x\_bus», на она подключается к объединению проводов «x2», «x1» и «x0» с помощью оператора assign как показано на Рис. 1.3.

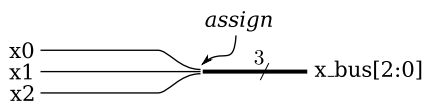


Рис. 1.3: Действие оператора **assign**

Затем начинается функциональный блок **always**, на котором мы остановимся подробнее.

Verilog HDL описывает цифровую аппаратуру, которая су-



шествует вся одновременно, но инструменты анализа и синтеза описаний являются программами и выполняются последовательно на компьютере. Так возникла необходимость последовательной программе «рассказать» про то, какие события приводят к срабатыванию тех или иных участков кода. Сами эти участки называли процессами. Процессы обозначаются ключевым словом **always**.

В скобках после символа @ указывается так называемый *список чувствительности процесса*, т.е. те сигналы, изменение которых должно приводить к пересчёту результатов выполнения процесса.

Например, результат ФАЛ надо будет пересчитывать каждый раз, когда изменился входной вектор (любой бит входного вектора, т.е. любая переменная ФАЛ). Эти процессы можно называть блоками, или частями будущего цифрового устройства.

Новое ключевое слово **reg** здесь необходимо потому, что в выходной вектор происходит запись, а запись в языке Verilog HDL разрешена только в «регистры» — специальные «переменные», предусмотренные в языке. Данная концепция и ключевое слово **reg** будет рассмотрено гораздо подробнее в следующей лабораторной работе.

Оператор **<=** называется оператором *неблокирующего присваивания*. В результате выполнения этого оператора то, что стоит справа от него, «помещается» («кладется», «перекладывается») в регистр, который записан слева от него. Операции неблокирующего присваивания происходят одновременно по всему процессу.

Оператор **case** описывает выбор действия в зависимости от анализируемого значения. В нашем случае анализируется значение шины «x\_bus». Ключевое слово **default** используется для обозначения всех остальных (не перечисленных) вариантов значений.

Константы и значения в языке Verilog HDL описываются следующим образом: сначала указывается количество бит, затем после апострофа с помощью буквы указывается формат и, сразу за ним, записывается значение числа в этом формате.

Возможные форматы:

- b – бинарный, двоичный;

- h – шестнадцатеричный;
- d – десятичный.

Немного расширив это описание, легко можно определить не одну, а сразу несколько ФАЛ одновременно. Для упрощения записи сразу объединим во входную шину все переменные. В выходную шину объединим значения функций:

```

1 module decoder(
2     input  [2:0] x,
3     output [3:0] y);
4
5 reg [3:0] decoder_output;
6 always @(x) begin
7     case (x)
8         3'b000: decoder_output <= 4'b0100;
9         3'b001: decoder_output <= 4'b1010;
10        3'b010: decoder_output <= 4'b0111;
11        3'b011: decoder_output <= 4'b1100;
12        3'b100: decoder_output <= 4'b1001;
13        3'b101: decoder_output <= 4'b1101;
14        3'b110: decoder_output <= 4'b0000;
15        3'b111: decoder_output <= 4'b0010;
16    endcase;
17 end;
18
19 assign y = decoder_output;
20
21 endmodule;
```

Листинг 1.9: Описание дешифратора на языке Verilog HDL

Теперь нам удалось компактно записать четыре функции, каждая от трёх переменных:

$$\begin{aligned}
 y_0 &= f(x_2, x_1, x_0); \\
 y_1 &= f(x_2, x_1, x_0); \\
 y_2 &= f(x_2, x_1, x_0); \\
 y_3 &= f(x_2, x_1, x_0).
 \end{aligned}$$

Но, если мы посмотрим на только что описанную конструк-

цию под другим углом, мы увидим, что это описание можно трактовать следующим образом: «поставить каждому возможному входному вектору  $x$  в соответствие заранее определенный выходной вектор  $y$ ». Такое цифровое устройство называют *дешифратором*.

На Рис. 1.4 показано принятое в цифровой схемотехнике обозначение дешифратора.

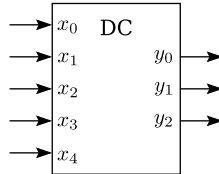


Рис. 1.4: Графическое обозначение дешифратора

Заметим, что длины векторов не обязательно должны совпадать, а единственным условием является полное покрытие всех возможных входных векторов, что, например, может достигаться использованием условия **default** в операторе **case**.

Дешифраторы активно применяются при разработке цифровых устройств. В большинстве цифровых устройств в явном или неявном виде можно встретить дешифратор.

Рассмотрим еще один интересный набор ФАЛ:

```

1  module decoder(
2      input [2:0] a,
3      input [2:0] b,
4      input [2:0] c,
5      input [2:0] d,
6      input [1:0] s,
7      output reg [2:0] y);
8
9  always @(a,b,c,d,s) begin
10     case (s)
11         3'b00:    y <= a;
12         3'b01:    y <= b;
13         3'b10:    y <= c;
14         3'b11:    y <= d;
15         default:  y <= a;

```

```

16   endcase;
17   end;
18
19   endmodule;

```

Листинг 1.10: Описание мультиплексора на языке Verilog HDL

Что можно сказать об этом описании? Выходной вектор  $y$  — это результат работы трёх ФАЛ, каждая из которых является функцией 6 переменных. Так,  $y_0 = f(a_0, b_0, c_0, d_0, s_1, s_0)$ .

Анализируя оператор **case**, можно увидеть, что главную роль в вычислении значения ФАЛ играет вектор  $s$ , в результате проверки которого выходу ФАЛ присваивается значение «выбранной» переменной.

Получившееся устройство называется *мультиплексор*.

Мультиплексор работает подобно коммутирующему ключу, замыкающему выход с выбранным входом. Для выбора входа мультиплексору нужен сигнал управления.

Графическое изображение мультиплексора приведено на Рис. 1.5

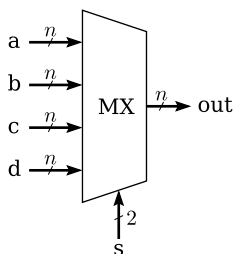


Рис. 1.5: Графическое обозначение мультиплексора

Особенно хочется отметить, что на самом деле никакой «проверки» сигнала управления не существует и уж тем более не существует «коммутации», ведь мультиплексор — это таблично-заданная ФАЛ. Результат выполнения этой ФАЛ выглядит так, как будто происходит «подключение» «выбранной» входной шины к выходной.

Приведём для наглядности таблицу, задающую ФАЛ для одного бита выходного вектора (число ФАЛ в мультиплексоре и,

следовательно, число таблиц, равняется числу бит в выходном векторе). Для краткости выпишем таблицу наборами строк вида:  $f(s_1, s_0, a_0, b_0, c_0, d_0) = y_0$  в четыре столбца.

Обратите внимание, что в качестве старших двух бит входного вектора для удобства записи и анализа мы выбрали переменные «управляющего» сигнала, а выделение показывает какая переменная «поступает» на выход функции  $f$ :

$f(000000) = 0$	$f(010000) = 0$	$f(100000) = 0$	$f(110000) = 0$
$f(000001) = 0$	$f(010001) = 0$	$f(100001) = 0$	$f(110001) = 1$
$f(000010) = 0$	$f(010010) = 0$	$f(100010) = 1$	$f(110010) = 0$
$f(000011) = 0$	$f(010011) = 0$	$f(100011) = 1$	$f(110011) = 1$
$f(000100) = 0$	$f(010100) = 1$	$f(100100) = 0$	$f(110100) = 0$
$f(000101) = 0$	$f(010101) = 1$	$f(100101) = 0$	$f(110101) = 1$
$f(000110) = 0$	$f(010110) = 1$	$f(100110) = 1$	$f(110110) = 0$
$f(000111) = 0$	$f(010111) = 1$	$f(100111) = 1$	$f(110111) = 1$
$f(001000) = 1$	$f(011000) = 0$	$f(101000) = 0$	$f(111000) = 0$
$f(001001) = 1$	$f(011001) = 0$	$f(101001) = 0$	$f(111001) = 1$
$f(001010) = 1$	$f(011010) = 0$	$f(101010) = 1$	$f(111010) = 0$
$f(001011) = 1$	$f(011011) = 0$	$f(101011) = 1$	$f(111011) = 1$
$f(001100) = 1$	$f(011100) = 1$	$f(101100) = 0$	$f(111100) = 0$
$f(001101) = 1$	$f(011101) = 1$	$f(101101) = 0$	$f(111101) = 1$
$f(001110) = 1$	$f(011110) = 1$	$f(101110) = 1$	$f(111110) = 0$
$f(001111) = 1$	$f(011111) = 1$	$f(101111) = 1$	$f(111111) = 1$

# Лабораторная работа №2

## Регистры и счётчики

Функции цифровых устройств, естественно, не сводятся к реализации разнообразных ФАЛ. Нам хотелось бы использовать цифровые устройства для обработки информации, вычислений. Но для осуществления этих возможностей нам недостаёт элемента памяти, который мог бы хранить промежуточные результаты. Ведь невозможно сделать калькулятор, если нет возможности сохранить вводимые числа и результат вычисления.

Элемент памяти — один из самых важных элементов цифровых устройств. Чтобы не делать ошибок при разработке цифровых устройств, необходимо понять место этого узла, его идею и инструменты языка Verilog, связанные с ним.

Первый элемент памяти, который мы рассмотрим — это **защелка** (англ. latch).

Защелка является основой всех элементов памяти. Она состоит из двух элементов И-НЕ (или из двух элементов ИЛИ-НЕ, в зависимости от базиса, выбранного при проектировании), соединённых по следующей схеме:

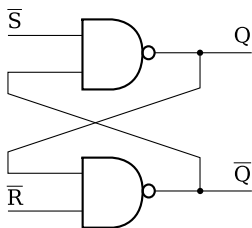


Рис. 2.1: Структура RS-защелки

У защелки два входа и два выхода. Входами являются сигналы «сброс» и «установка в единицу» или по-английски «reset»

и «set». В зависимости от элементов, из которых состоит защелка, полярность входных сигналов будет меняться. В базе И-НЕ сброс и установка происходят, когда соответственно сигналы R или S находятся в нуле, поэтому их обозначают как «не-сброс» и «не-установка», чтобы отразить этот факт. Выход защелки — это тот бит данных, который она хранит. Два выхода отличаются полярностью — один из них инвертирует хранимый бит. Ниже приведена таблица со всеми возможными комбинациями входных сигналов и временная диаграмма работы защелки.

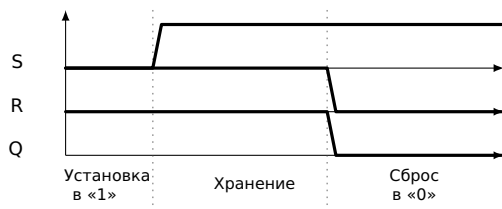


Рис. 2.2: Временная диаграмма работы RS-защелки

Опишем защелку на языке Verilog, опираясь на её структуру, которую мы рассмотрели выше. Нам понадобятся два входа, два выхода и два элемента И-НЕ, которые мы опишем с помощью операций И (оператор `&`) и НЕ (оператор `~`).

```

1  module latch_struct(
2  input nR,
3  input nS,
4  output Q,
5  output nQ);
6
7  assign Q = ~(nS & nQ);
8  assign nQ = ~(nR & Q);
9
10 endmodule;
```

Листинг 2.1: Описание RS-защелки на языке Verilog HDL

Элемент памяти нам, прежде всего, нужен для хранения данных. Для того, чтобы защелкой стало удобнее пользоваться, немного изменим схему подключения управляющих сигнала-

ЛОВ.

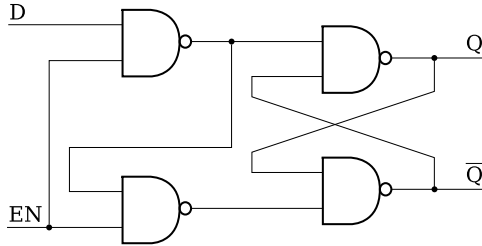


Рис. 2.3: Структура D-защелки

Защелка теперь будет работать следующим образом: при высоком уровне на входе «разрешить работу» («enable») данные со входа «данные» («data») будут проходить через защелку на выход, при низком уровне на входе «разрешить работу» защелка будет сохранять на выходе последнее значение со входа «данные», которое было до переключения сигнала «разрешить работу». Работа такой защелки показана на временной диаграмме ниже.

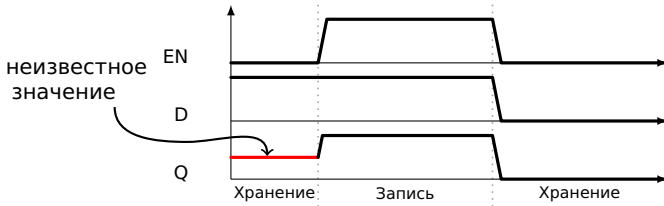


Рис. 2.4: Временная диаграмма работы D-защелки

Как мы уже говорили, использовать структурные описания не всегда удобно. В большинстве случаев использовать поведенческое описание намного эффективнее. Поведенческое описание часто формулируется гораздо лаконичнее, и, так как его легче понять человеку, улучшается читаемость кода и уменьшается вероятность ошибок при его написании.

```
1 module d-latch_behav(  
2   input d,  
3   input en,  
4   output reg q);
```



```

5
6 always @(en, d) begin
7     if (en) q <= d;
8 end
9
10 endmodule;

```

Листинг 2.2: Поведенческое описание D-защелки на языке Verilog HDL

Если добавить к этой схеме еще две защелки, то можно привязать изменение «содержимого» защелки к переходу управляющего сигнала из «0» в «1», то получим следующую структуру:

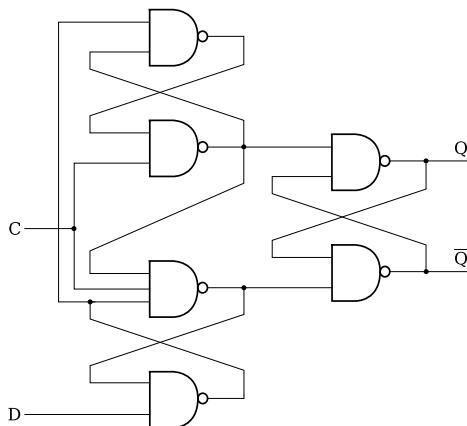


Рис. 2.5: Структура D-триггера

Эту схему можно немного доработать, введя управляющие сигналы сброса, установки в единицу и разрешения работы. Упрощенно такая схема изображается следующим образом.

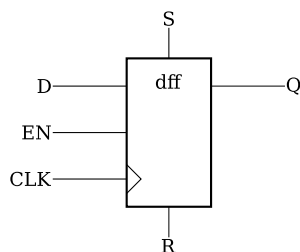


Рис. 2.6: Графическое обозначение D-триггера

Эта схема получила широчайшее применение в цифровой схемотехнике и называется d-триггер (от слова «data» — данные). Ниже приведена временная диаграмма работы d-триггера.

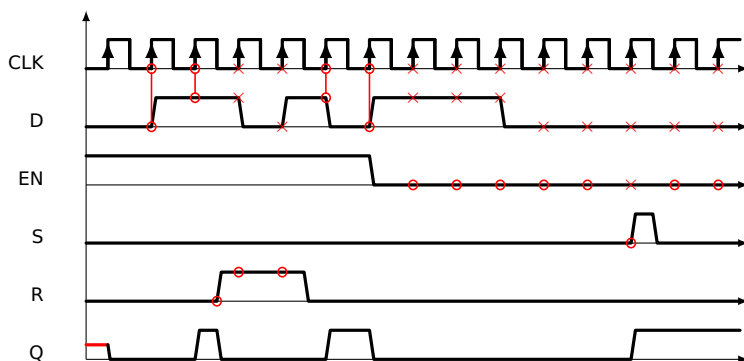


Рис. 2.7: Пример работы регистра

Заметим, что сигнал S называют «тактирующим» сигналом или «сигналом синхронизации». Обычно в роли этого сигнала выступает сигнал от внешнего источника (чаще всего кварцевого резонатора) со стабильной частотой. А сами цифровые устройства, для работы которых необходим сигнал синхронизации, называют синхронными.

Сигнал синхронизации играет очень большую роль в цифровых устройствах. Прежде всего, он необходим для того, чтобы избежать непредсказуемого и нестабильного поведения триггеров в цифровых устройствах.

```

1 module d-flipflop_behav(
2   input d,
3   input clk,
4   input rst,
5   input en,
6   output reg q);
7
8   always @(posedge clk or posedge rst) begin
9     if (rst) q <= 0;
10    else if (en) q <= d;
11  end
12
13 endmodule;

```

Листинг 2.3: Описание D-триггера на языке Verilog HDL

В описании появилось новое ключевое слово `posedge`. Оно используется только в списке чувствительности блока `always` и означает событие перехода сигнала, имя которого стоит после этого ключевого слова, из состояния «0» в состояние «1».

Ключевое слово `posedge` было введено прежде всего для того, чтобы описывать схемы, содержащие триггеры. Ведь триггеры, как мы уже говорили, могут менять своё состояние только в момент положительного фронта (англ. *positive edge*) сигнала синхронизации.

Добавление в список чувствительности события `posedge rst` позволяет описать поведение триггера в момент асинхронного сброса: как только случается переход `rst` из «0» в «1» срабатывает блок `always` и проверка условия `if (rst)` дает положительный результат, триггер сбрасывается в «0».

Если объединить несколько триггеров в группу, то получится то, что в цифровой схемотехнике называют «регистр».

```

1 module register_behav(
2   input [7:0] d,
3   input clk,
4   input rst,
5   input en,
6   output reg [7:0] q);
7

```

```

8  always @(posedge clk or posedge rst) begin
9      if (rst) q <= 0;
10     else if (en) q <= d;
11 end
12
13 endmodule;

```

Листинг 2.4: Описание регистра на языке Verilog HDL

Элементы памяти позволяют нам сохранять информацию для дальнейшей обработки или хранить готовый результат вычисления, хранить промежуточные результаты.

Запомните описание регистра. Оно используется при проектировании практически любого цифрового устройства с помощью Verilog.

Необходимо отметить важную концепцию языка Verilog. **Переменные типа reg могут быть изменены только в пределах одного блока always. Переменные доступны для проверки в любом из блоков, но изменять их значение можно только в одном из них.**

```

1  reg a;
2  reg b;
3
4  always @(posedge clk) begin
5      if (in < 5) a <= in;
6  end
7
8  always @(posedge clk) begin
9      if (n > 5) begin
10         b <= in;
11         a <= in - 5; //ошибка!!!
12     end
13     else b <= a;
14 end

```

Листинг 2.5: Пример присвоения значения переменной а разных блоках always на языке Verilog HDL

Одной из простейших, и в тоже время широко распространённой, цифровой схемой на основе регистров является счёт-

чик.

Счётчик считает количество тактов, которое прошло с момента его обнуления.

Такая простая схема, тем не менее, используется практически в каждом цифровом устройстве. Как будет показано дальше, счётчик легко можно доработать таким образом, чтобы отсчитывались не такты, а какие-то события. Например, событиями могут быть: нажатие кнопки, принятие пакета данных, срабатывание датчика, выполнение какого-то условия (периодическое) и другое.

Итак, для того чтобы реализовать счетчик нам понадобится регистр и сумматор. Причем сумматор будет складывать значение, хранящееся в регистре с константой (в нашем случае единицей) а результат сложения будет поступать на вход регистра.

В результате получим следующую схему:

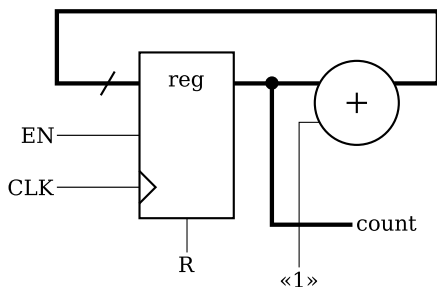


Рис. 2.8: Структура восьмибитного счетчика

На временной диаграмме ниже хорошо видно как работает счётчик:

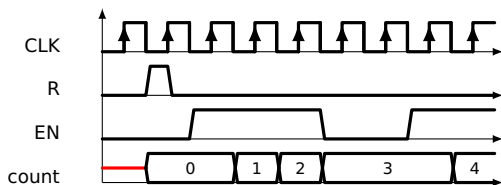


Рис. 2.9: Пример работы регистра

Опишем поведение такого счётчика на Verilog.

```
1 module counter_8bit(  
2   input clk,  
3   input en,  
4   input rst,  
5   output reg [7:0] counter);  
6  
7   always @(posedge clk or posedge rst) begin  
8     if (rst) counter <= 0;  
9     else if (en) counter <= counter + 1;  
10  end  
11  
12 endmodule;
```

Листинг 2.6: Описание восьмибитного счетчика на языке Verilog HDL

Для того чтобы можно было подсчитывать события, а не переходы сигнала синхронизации из «0» в «1» понадобится ввести еще одну схему. Её смысл и назначение заключается в следующем: нам необходимо из асинхронного события получить синхронный сигнал единичной длительности. Тогда, подавая такой сигнал на вход enable счётчика, мы сможем считать количество произошедших событий.

Ниже представлена схема, позволяющая сделать это:

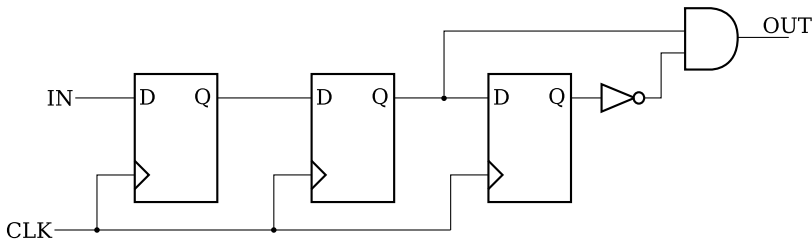


Рис. 2.10: Структура регистра на D-триггерах

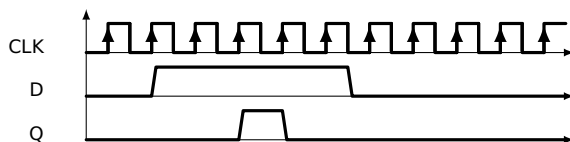


Рис. 2.11: Пример работы регистра

Естественно такая схема работает только тогда, когда входной сигнал изменяется с частотой меньшей, чем частота синхронизации.

Сигнал out в таком случае подключается к входу enable счётчика.

## 2.1 Задание лабораторной работы

Описать на языке Verilog цифровое устройство, функционирующее согласно следующим принципам:

1. Ввод информации происходит с переключателей SW[9:0] и кнопок KEY[0], KEY[1]. Внешний источник сигнала синхронизации: CLK50;
2. KEY[1] должна функционировать как общий асинхронный сброс устройства;
3. При нажатии на KEY[0] записывать данные с SW[9:0] в десятиразрядный регистр;
4. Содержимое десятиразрядного регистра выводить на LEDR[9:0];
5. При нажатии на KEY[0] увеличивать 8-ми разрядный счётчик нажатий на 1, если произошло событие, указанное в индивидуальном задании студента;
6. Содержимое счётчика выводить в шестнадцатеричной форме на HEX0 и HEX1 (цифры с 0 до 9 и буквы A, B, C, D, E, F)

Выполнив описание модуля на языке Verilog необходимо построить временные диаграммы его работы с помощью САПР Altera Quartus.

Привязать входы модуля к переключателям SW, отладочной платы, а выход к шине HEX0[6:0], получить прошивку для

ПЛИС и продемонстрировать её работу.

## 2.2 Пример индивидуального задания

Событием является наличие 3 и более единиц на SW[9:0] в момент записи в регистр.

```
1  reg sw_event;  
2  always @(SW) begin  
3      if ((SW[0] + SW[1] + SW[2] + SW[3]  
4          + SW[4] + SW[5] + SW[6] + SW[7]  
5          + SW[8] + SW[9]) > '4d3) sw_event <= '1b1;  
6      else sw_event <= '1b0;  
7  end  
8  
9  reg [2:0] event_sync_reg;  
10 wire synced_event;  
11 assign synced_event = event_sync_reg[1]  
12                      & ~event_sync_reg[0];  
13  
14 always @(posedge CLK50) begin  
15     event_sync_reg[2] <= sw_event;  
16     event_sync_reg[1:0] <= event_sync_reg[2:1];  
17 end
```

Листинг 2.7: Решение индивидуального задания  
(фрагмент кода лабораторной работы)

## 2.3 Вопросы к защите лабораторной работы

1. Какие элементы памяти вы изучили в данной лабораторной работе?
2. Чем отличается RS-защелка от D-защелки?
3. Какие входы могут быть у триггера? Перечислите все и назовите их функции.



4. Какие блоки вашего цифрового устройства синхронные? Какие нет? Почему?
5. Какой фрагмент вашего кода описывает вывод значения счетчика на семи сегментный индикатор? Как называется эта цифровая схема?
6. Продемонстрируйте код реализующий индивидуальное задание.
7. Покажите в коде лабораторной код счётчика.
8. Что такое сигнал синхронизации?

# Лабораторная работа №6

## FLASH память

### 3.1 Виды энергонезависимой памяти

Ни один из блоков цифровых устройств, которые мы рассмотрели ранее не способен хранить информацию при отсутствии питания.

Чтобы решить эту проблему, на заре вычислительной техники, данные в цифровое устройство после подачи питания загружали с таких носителей, как перфокарты и, позже, магнитные ленты. Ещё позже для этих целей были разработаны накопители на гибких магнитных дисках — дискетах и жёстких магнитных дисках — «HDD». На данный момент для хранения данных при отсутствии питания наиболее широко применяется FLASH-память.

Энергонезависимые накопители информации обладают как преимуществами, так и недостатками по сравнению с энергонезависимой RAM-памятью.

Как правило, энергонезависимая память существенно уступает по скорости работы RAM-памяти. Это ограничение удалось преодолеть только недавно: в 2016 году была представлена постоянная память, где информация хранится в виде спина электрона. Такая память по скорости работы не уступает современной RAM-памяти, такой как DDR5. Но подобная память ещё долгое время будет недоступна для рядового пользователя из-за высокой стоимости.

### 3.2 Принципы работы FLASH-памяти

В качестве элемента хранения информации FLASH-память

использует транзистор с плавающим затвором. Состояние затвора определяет бит хранимой информации.

На Рис.3.1 схематично изображена структура такого транзистора.

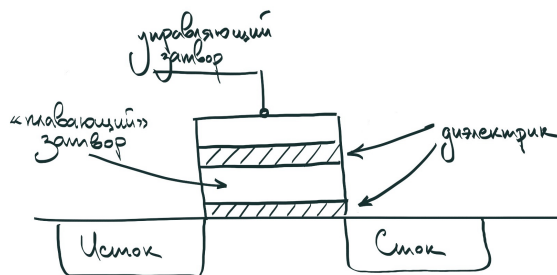


Рис. 3.1: Транзистор с плавающим затвором

Как вы видите, он содержит два затвора: управляющий и плавающий. Плавающий затвор — это полупроводника, который полностью окружён диэлектриком. При этом плавающий затвор способен накапливать электроны. От величины накопленного заряда меняется «лёгкость» с которой транзистор открывается — т.е. величина напряжения «управляющий затвор—исток», при котором через транзистор начнёт течь ток. Чем больше электронов находятся в плавающем затворе, тем «легче» открывается транзистор — ток начинает протекать через него при меньшем напряжении «управляющий

затвор—исток».

Для хранения информации используют следующий принцип, проиллюстрированный на Рисунке 3.2): чтобы считать информацию, на управляющий затвор подаётся напряжение чтения — среднее между самым сильным и самым слабым напряжением, способным открыть затвор. Если транзистор открывается, значит в плавающем затворе были электроны и мы считаем, что в нём записано значение «0», если не открывается, значит электронов в плавающем затворе нет и записано значение «1».

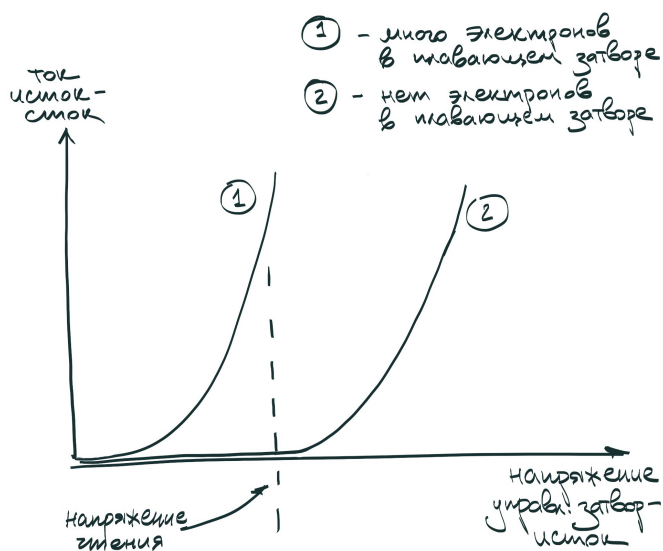


Рис. 3.2: Чтение значение из транзистора с плавающим затвором

Осталось понять как можно «заставить» электроны попадать в плавающий затвор, ведь он изолирован диэлектриком. Не вдаваясь в подробности скажем, что если подать достаточно высокое напряжение «управляющий затвор—сток», то

у электронов хватит энергии, чтобы «перескочить» диэлектрик и попасть в плавающий затвор. А если изменить полярность этого напряжения, то можно «выгнать» электроны наружу (см. Рис.??).

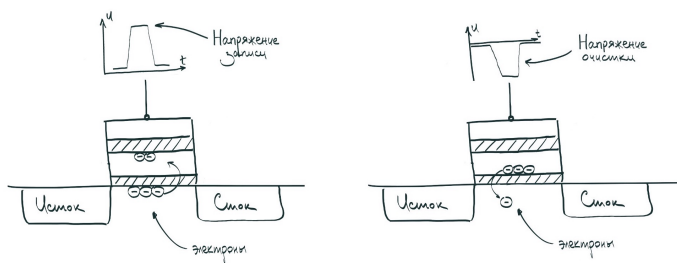


Рис. 3.3: Изменение состояния плавающего затвора

Самое важное в этой идее то, что если электроны попали в плавающий затвор они не могут самостоятельно покинуть его через диэлектрик и будут оставаться там в течении многих лет. Таким образом и достигается сохранение записанной информации при отсутствии питания.

Теперь мы знаем, что для того чтобы записать или считать информацию из FLASH-памяти надо использовать большую разность потенциалов. Но на самом деле транзистор устроен таким образом, что энергия, необходимая чтобы «загнать» электроны в плавающий затвор меньше энергии, необходимой, чтобы их «выгнать». Это делается чтобы при чтении значения электроны не покидали плавающий затвор.

При такой организации становится сложно обеспечить очистку каждого транзистора в отдельности, поэтому обычно стирается целая группа ячеек.

### 3.3 Особенности FLASH-памяти

Из-за особенностей транзистора с плавающим затвором, которые мы рассмотрели можно выделить следующие харак-

терные черты FLASH-памяти:

- Запись значения возможна только из логической «1» в логический «0»;
- Удаление информации возможно только из группы ячеек одновременно (сектора);
- Удаление и запись информации приводят к деградации ячеек памяти;
- Чтение также приводит к деградации ячеек памяти, но в меньшей степени.

### 3.4 Структура FLASH-памяти

На Рисунке 3.4 изображена общая структура FLASH-памяти. Как видно она практически не отличается от RAM-памяти: из ячеек строится матрица, контролируемая управляющим блоком. А сам управляющий блок обеспечивает коммуникацию с внешними устройствами, дешифрацию адреса и управление записью и чтением массива элементов памяти. Подключение FLASH-памяти и управление ей со стороны цифрового устройства полностью зависит от того, как реализован блок управления — доступ к содержимому FLASH-памяти может быть синхронный или асинхронный, по последовательной или параллельной шине, с разделением шин адреса и данных или без него.

## 2. Block Diagram

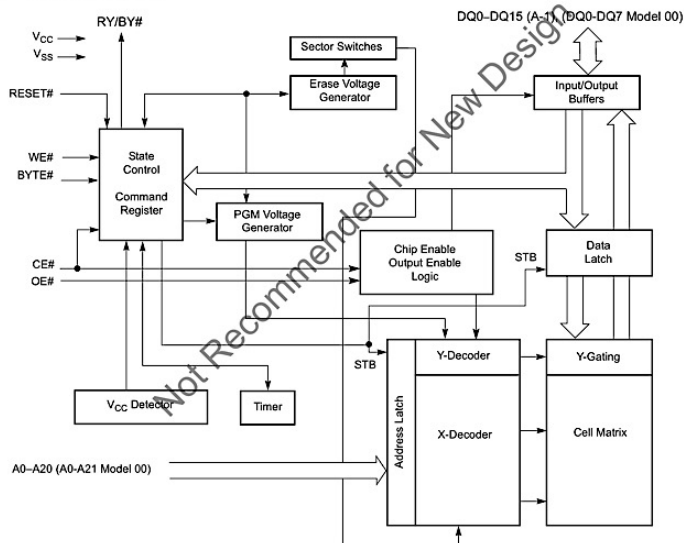


Рис. 3.4: Структура flash-памяти S29AL032D

## 3.5 Микросхема FLASH-памяти S29AL032D

Для практического знакомства с FLASH-памятью мы спроектируем контроллер микросхемы S29AL032D. Именно эта микросхема установлена на отладочной плате Altera DE1.

Основным источником информации о любой микросхеме служат технические условия (англ. datasheet). В этом документе содержатся все необходимые сведения для использования микросхемы: электрические параметры, размеры и тип корпуса, информация о выводах, и многие другие сведения. В том числе datasheet содержит данные о протоколах информационного обмена.

В нашем случае микросхема уже подключена, поэтому из всего datasheet нас, в первую очередь, интересует каким образом необходимо взаимодействовать с этой микросхемой, чтобы записать или считать данные.

Для разработки контроллера следует ознакомиться со следующими разделами документа:

- 11. Commands Definitions;
- 12. Write Operation Status;
- 17. AC Characteristics.

Далее будут приведены необходимые выдержки из документа, однако настоятельно рекомендуем ознакомиться с ним.

### 3.5.1 Проектирование контроллера S29AL032D

Как мы уже знаем, контроллер предназначен для обмена информацией с внешними цифровыми устройствами. Он должен предоставлять удобный, простой интерфейс и обеспечивать все необходимые взаимодействия с устройством. В таком случае другие блоки могут использовать один и тот же контроллер.

Чтобы начать разработку контроллера, нужно ответить важные вопросы: как должен работать наш контроллер и как он должен управляться?

Если мы хотим работать с памятью, то для нас наиболее важными являются операции записи и чтения данных. Тогда наиболее удобным для нас был бы уже знакомый интерфейс, похожий на RAM-память: данные для записи, данные для чтения, адрес и управляющие сигналы.

Теперь, когда мы определились с тем, как мы будем управлять контроллером, нам нужно понять как он должен взаимодействовать с самой микросхемой FLASH-памяти. Для этого изучим операции записи и чтения, описанные в datasheet S29AL032D.

### 3.5.2 Операция чтения

Чтение данных из микросхемы S29AL032D не требует ника-



кой дополнительной подготовки. Временная диаграмма чтения приведена в пункте 17.2 datasheet и представлена на Рис.??

[Picture goes here]

Времена, указанные на диаграмме, приведены в Табл. 3.2

Обозн.	Описание	Min	Max
$t_{RC}$	Продолжительность цикла чтения	70нс	90нс
$t_{ACC}$	Задержка Адрес — Данные	70нс	90нс
$t_{CE}$	Задержка Выбор Чипа — Данные	70нс	90нс

Таблица 3.1: Временные характеристики операции чтения S29AL032D

Чтобы выполнить операцию чтения, нам нужно повторить эту временную диаграмму и соблюсти все временные интервалы. Но как это сделать?

Каким образом можно выдержать указанные временные интервалы?

Мы уже знаем, что единственным источником информации о времени для цифрового устройства может являться только сигнал синхронизации, частота которого заранее известна.

Привяжем времена, упомянутые в Таблице 3.2 к тактовому сигналу частоты 50 МГц, которым тактируется устройство. При этом учтём, что некоторые задержки могут быть равны нулю.

Полученная временная диаграмма показана на Рис. ??

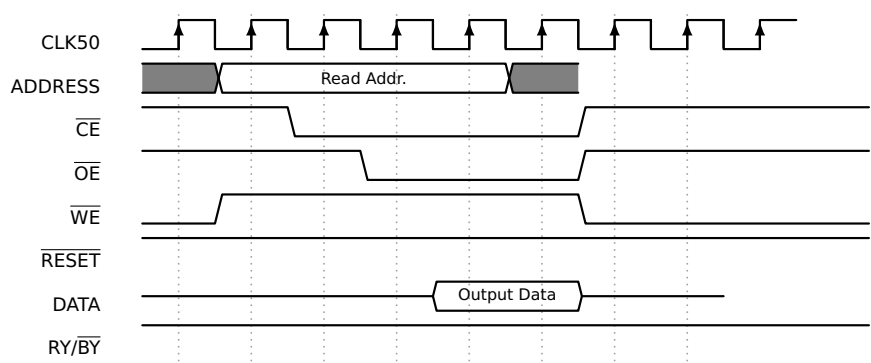


Рис. 3.5: Временная диаграмма операции чтения шины PCI

### 3.5.3 Операция записи

Обычно запись во FLASH-память — более сложная операция, чем чтение. Многие производители используют для записи специальные последовательности команд, защищая таким образом память от случайной записи.

Согласно datasheet S29AL032D (разделы 7 и 11) для того, чтобы осуществить запись нужного значения во FLASH-память, необходимо выполнить следующую последовательность из 4-х операций записи:

- Записать данные AA по адресу AAA;
- Записать данные 55 по адресу 555;
- Записать данные A0 по адресу AAA;
- Записать нужные данные по нужному адресу.

Временная диаграмма одной операции записи приведена в пункте 17.2??? datasheet и представлена на Рис.??, а её временные характеристики приведены в Табл. ??.

[Picture goes here]

Обозн.	Описание	Min	Max
$t_{RC}$	Продолжительность цикла чтения	70нс	90нс
$t_{ACC}$	Задержка Адрес — Данные	70нс	90нс
$t_{CE}$	Задержка Выбор Чипа — Данные	70нс	90нс

Таблица 3.2: Временные характеристики операции чтения S29AL032D

Аналогично операции чтения, привяжем форму и времена временной диаграммы записи к тактовому сигналу, частотой 50 МГц. Полученная диаграмма, представлена на Рис. ??

[Picture goes here]

Также согласно datasheet, данные записываются не мгновенно. На то, чтобы провести операцию записи одного слова требуется порядка 11 мкс. Что приблизительно соответствует 550 тактам на частоте 50 МГц.

Также крайне важно, что при записи данных микросхема S29AL032D может менять значение с «1» на «0», но не наоборот!

Чтобы поменять значение с «0» на «1» требуется очистка целого фрагмента памяти, называемого сектором, либо пол-

ная очистка всей микросхемы!

Значит, для того, чтобы мы могли полноценно пользоваться микросхемой S29AL032D нам потребуется реализовать в контроллере функции очистки.

### 3.5.4 Операция очистки

Для очистки выбранного сектора необходимо выполнить следующую последовательность операций:

- Записать данные AA по адресу AAA;
- Записать данные 55 по адресу 555;
- Записать данные 80 по адресу AAA;
- Записать данные AA по адресу AAA;
- Записать данные 55 по адресу 555;
- Записать данные 30 по адресу сектора, который необходимо очистить.

Операция очистки сектора занимает существенное время, и пока она не закончится, невозможно произвести запись или чтение из FLASH-памяти.

Операция полной очистки отличается только последним значением: для полной очистки данные 30 записываются по адресу AAA.

В datasheet на S29AL032D приведены следующие значения:

- Очистка сектора - до NN мкс.
- Полная очистка микросхемы - до NNN мкс.

### 3.5.5 Статус операции

Для того, чтобы контролировать завершение операций записи и очистки, а также отслеживать ошибки, которые могут возникнуть в процессе их выполнения необходимо получить информацию о статусе операции. Способы получения этой информации и её содержание приведены в разделе 12 datasheet. Далее мы отметим наиболее важные для нас моменты.

Так как на отладочном стенде Altera DE1, которым мы пользуемся для проведения лабораторных работ, не разведён сигнал BUSY микросхемы S29AL032D, то единственным способом

получения статуса является чтение информации из адреса, по которому производилась запись.

Если операция удачно завершена — то будет получено значение, из указанного адреса. Для операции записи оно должно совпадать с тем, которое мы хотели записать, а для операции очистки должно содержать только единицы (8'hFF).

Если операция ещё не завершена, то биты [7:2] считанного значения будут содержать информацию о статусе операции. Расшифровка значений этих битов приведена в Табл. ??

До окончания операции записи DQ[7] будет иметь значение противоположное записываемому («0» при очистке) - это основной признак того, что полученные данные отражают статус операции. Информация о битах статусного пакета приведена в Таблице ??

Обратите внимание, что при повторном чтении некоторые биты статусного пакета меняют своё значение на противоположное. Это сделано, чтобы убедиться, что операция чтения выполняется корректно и микросхема не «зависла».

В информации о статусе операции есть важный признак: бит DQ[4] является признаком того, что время операции превысило максимально допустимое. Если этот бит принимает значение «1», то во время операции произошла какая-то ошибка. В подавляющем большинстве случаев это происходит при попытке записи в ячейку памяти, уже содержавшую какое-то значение.

### 3.5.6 Проектирование контроллера Flash (продолжение)

Теперь, когда мы познакомились с операциями, которые предстоит выполнять контроллеру, мы можем продолжить его проектирование.

Контроллер должен обеспечивать чтение, запись и очистку микросхемы. Для этого он должен последовательно обмениваться данными и производить проверку статуса операций. Значит в качестве его основы следует применить конечный автомат. Ведь именно конечный автомат позволяет нам разделить режимы работы и реализовать алгоритмы работы в циф-

ровых устройствах.

Начнём проектировать конечный автомат с начального состояния — состояния бездействия. Будем постепенно наращивать его сложность и степень детализации, уточняя некоторые особенности.

Из состояния бездействия возможны три различных перехода: операция чтения, операция записи и операция очистки. После окончания этих операций автомат снова возвращается в состояние бездействия.

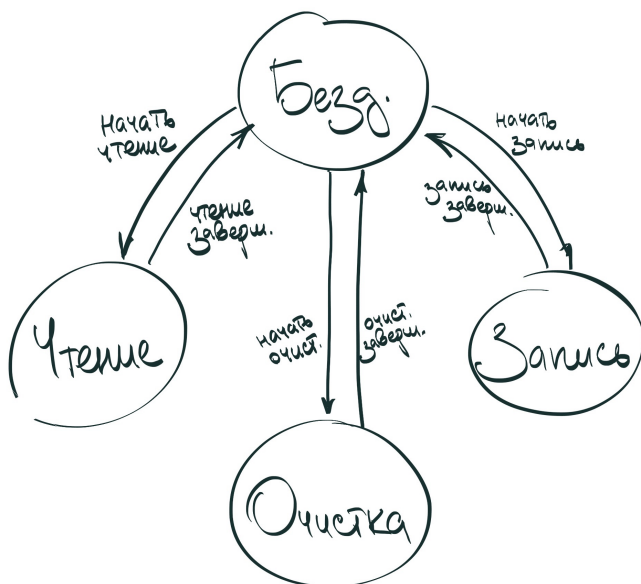


Рис. 3.6: Управляющий конечный автомат контроллера S29AL032D

Прежде всего, нас интересуют сложные операции «запись» и «очистка». Выделим их основные этапы.

Как уже говорилось, чтобы записать данные во FLASH-память требуется провести с ней четыре обмена. Но на этом

нельзя заканчивать операцию, ведь необходимо дождаться окончания записи. Также надо учесть, что во время записи могут возникнуть ошибки.

Для контроля статуса операции нам нужно считать данные из адреса, по которому производится запись и проанализировать их.

Аналогичные рассуждения справедливы и для операции очистки. Отразим все эти замечания в состояниях конечного автомата (см. Рисунок 3.7).

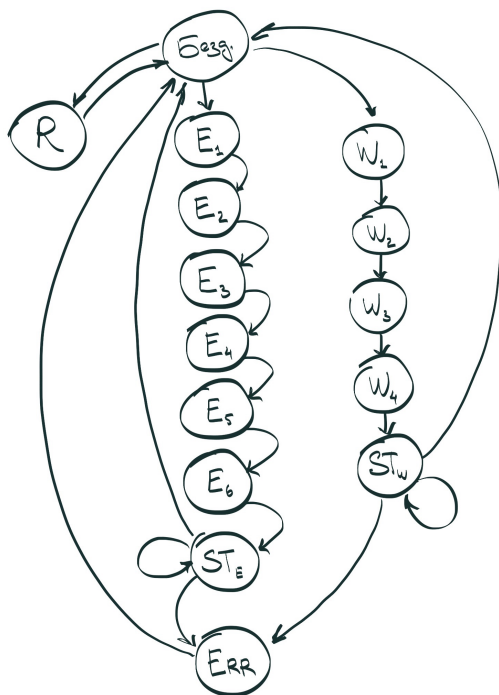


Рис. 3.7: Доработанный управляющий конечный автомат контроллера S29AL032D

Раньше мы не разделяли эти состояния  $W_1...W_4, ST_w$  и всё вместе называли «запись». Но, постепенно уточняя детали, мы разбили сложную операцию на более простые этапы.

Первое, что бросается в глаза в получившемся графе —

это многократное повторение операций записи в состояниях  $W_1...W_4$  и  $E_1...E_6$ . Повторение операции чтения менее заметно: она происходит в состояниях  $R$  и  $ST_W, ST_E$  (так как используется для проверки статуса).

Также можно постараться выделить анализ статуса  $ST_W$  и  $ST_E$  в состояние, общее для веток записи и очистки.

Тогда структура конечного автомата приобретает вид, показанный на Рисунке 3.8

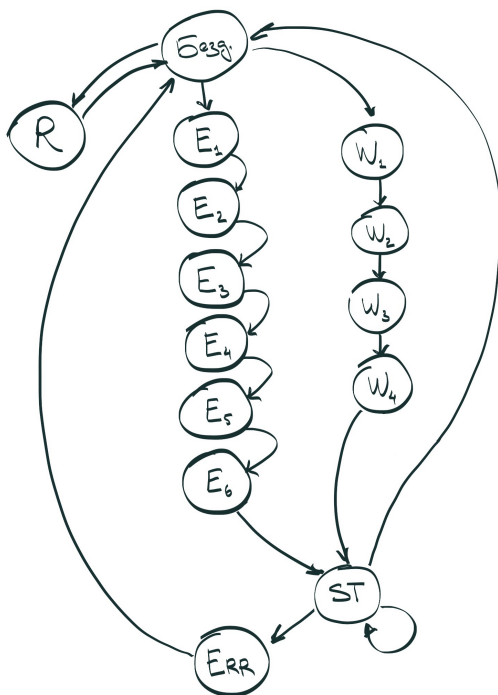


Рис. 3.8: Конечный автомат контроллера S29AL032D с общим состоянием проверки статуса

### 3.5.7 Реализация операций чтения и записи

Можем ли мы выделить операции чтения и записи и реализовать их отдельно, чтобы затем использовать их как показано

на графе переходов?

Чтобы понять это, сначала ответим на вопрос как вообще возможно реализовать эти операции.

Для того, чтобы провести чтение, необходимо развернуть временную диаграмму, привязанную к тактовому сигналу, которую мы получили на Рисунке ???. Аналогичная временная диаграмма для записи была представлена на Рисунке ??.

Как мы уже обсуждали, схема которую можно использовать для разделения событий во времени — это конечный автомат. Например, чтобы реализовать операцию чтения, разобьём временную диаграмму чтения на этапы, и поставим каждому этапу в соответствие уникальное состояние, как представлено на Рис. ???

Мы могли бы добавить эти состояния в конечный автомат, который мы уже начали проектировать, но тогда нам пришлось бы каждое из состояний  $ST$ ,  $RD$ ,  $W_1...W_4$  и  $E_1...E_6$ , разбить на несколько состояний. Это привело бы к ненужному усложнению структуры конечного автомата и аппаратной избыточности.

Вместо этого мы можем сделать отдельные небольшие блоки, которые будут выполнять эти операции и, таким образом, разделить конечные автоматы автоматы.

Нам надо будет только предусмотреть, что для использования этих блоков надо предусмотреть механизмы запуска операции и сигнализации о окончании работы блока.

Сигналом запуска для таких блоков будет признак того, что основной автомат находится в состоянии «чтение» или «запись», соответственно, а сигнал окончания работы будет выработываться в состоянии «завершено».

Теперь, когда мы оформили все основные идеи и общую структуру контроллера, можно преступить к его реализации на Verilog HDL.

### 3.5.8 Реализация контроллера микросхемы S29AL032D на языке Verilog HDL

Как всегда, начнём проектировать с интерфейса будущего контроллера — его входов и выходов. Так как контроллер бу-



дет обеспечивать доступ к памяти, мы хотели сделать его интерфейс похожим на интерфейс RAM-памяти. Но нам придётся ввести дополнительные сигналы для того, чтобы реализовать операцию очистки и индикацию ошибок.

Нам будет достаточно одного входа для адреса, так как мы не можем одновременно производить чтение и запись во flash-память.

Теперь опишем основной управляющий конечный автомат и мини-автомат чтения. Мини-автомат записи опишите самостоятельно.

Наладим связь между автоматами. Для этого определим управляющие сигналы (воздействия):

Начнём описывать исполняющую логику, которая будет задействована в различных состояниях: