

Языки описания схем

mk.cs.msu.ru → Лекционные курсы → Языки описания схем

Блок 24

Verilog:

Синтаксический сахар
и ещё несколько возможностей языка

Лектор:

Подымов Владислав Васильевич

E-mail:

valdus@yandex.ru

ВМК МГУ, 2024/2025, осенний семестр

Вступление

На данный момент про \mathcal{V} рассказано всё необходимое для реализации **любой** цифровой схемы в поддерживаемом фрагменте языка, за исключением нескольких особых случаев:

- ▶ Схемы с высоким импедансом
 - ▶ *(это будет в конце курса)*
- ▶ RAM и ROM
 - ▶ *(в этом курсе они не пригодятся, и это в целом несложно, в стандарте всё явно написано)*

Кроме того, рассказано всё необходимое для реализации **сценариев выполнения** схемы с выводом в консоль и генерацией диаграмм сигналов в рамках отладки

Но помимо «всего необходимого» в языке предусмотрены конструкции и возможности, делающие реализацию и отладку схемы не только возможной, но и *(до некоторой степени)* удобной

Неявное объявление типа `wire`

Как упоминалось ранее, в \mathcal{V} можно использовать точки, не объявляя их, и такие точки по умолчанию имеют тип `wire`

Эта возможность дополняется и другой, позволяющей избежать многократного повторения слова `wire` во всевозможных объявлениях

Во многих случаях там, где должно быть написано слово `wire`, можно не писать это слово, если рядом стоят другие ключевые слова, применяющиеся вместе с `wire`

Например:

```
input <точка>; = input wire <точка>;
```

```
output <точка>; = output wire <точка>;
```

```
input [msb:lsb] <точка>; = input wire [msb:lsb] <точка>;
```

```
output [msb:lsb] <точка>; = output wire [msb:lsb] <точка>;
```

Инициализация точек

В \mathcal{V} можно писать код, схожий с инициализацией переменных в C/C++

Для переменных смысл этих конструкций близок к C/C++ ,
а для соединений — не очень

Такая инициализация может считаться
сокращением для типовых конструкций:

$\langle \text{тип переменной} \rangle \langle \text{точка} \rangle = \langle \text{выражение} \rangle;$	=
--	---

$\langle \text{тип переменной} \rangle \langle \text{точка} \rangle;$
 $\text{initial } \langle \text{точка} \rangle = \langle \text{выражение} \rangle;$

$\langle \text{тип соединения} \rangle \langle \text{точка} \rangle = \langle \text{выражение} \rangle;$	=
--	---

$\langle \text{тип соединения} \rangle \langle \text{точка} \rangle;$
 $\text{assign } \langle \text{точка} \rangle = \langle \text{выражение} \rangle;$

Директивы, комментарии

```
'include <имя файла>
'define <имя макроса> <текст макроса>
'define <имя макроса>(<аргументы>) <текст макроса>
'undef <имя макроса>
'ifdef <имя макроса>
'ifndef <имя макроса>
'elsif <имя макроса>
'else
'endif
// <однострочный комментарий> \n
/* <многострочный комментарий> */
```

Всё это устроено как в C/C++ с поправкой на «'» вместо «#»

Тип `integer`

`integer`

Это тип переменных, во многом аналогичный `reg`-шинам

Основные особенности (и отличия от `reg`-шины):

- ▶ Ширина точек этого типа — неспецифицированная не менее 32
- ▶ Значения этого типа знаковые
- ▶ Переменные этого типа не отображаются ни в какие точки схемы, но значения этого типа можно использовать в выражениях
 - ▶ *Строго говоря, мнения о поддерживаемости этого типа расходятся: здесь пересказаны предложения из программного стандарта, а в стандарте синтеза сказано «`integer` поддерживается» без пояснений*

Тип integer

Пример: следующие два фрагмента кода эквивалентны в аппаратном смысле

```
reg [8:0] in1, in2, in3, o;  
integer sum;  
always @* begin  
    sum = in1 + in2;  
    if(sum > in3) o = sum;  
    else o = in1;  
end
```

```
reg [8:0] in1, in2, in3, o;  
always @* begin  
    if(in1 + in2 > in3) o = in1 + in2;  
    else o = in1;  
end
```

Именованные блоки и локальные объявления

Каждой составной команде и, более широко, каждому блоку кода, обрамлённому словами `begin-end`, можно присвоить **имя**, сделав этот блок **именованным**:

```
begin : <имя>
    ...
end
```

В начале именованного блока можно объявлять **локальные переменные**.
Значения локальных переменных

- ▶ можно изменять и использовать внутри блока и
- ▶ нельзя изменять и использовать вовне блока
 - ▶ Точнее, можно с получением доступа через имена экземпляров и блоков аналогично **именам полей структур в C/C++** (через точку), но это неподдерживаемая возможность

Коллизии имён локальных переменных в иерархии блоков (областей видимости) разрешаются **так же, как и в C/C++**

Именованные блоки и локальные объявления

Пример: следующие два фрагмента кода эквивалентны в аппаратном смысле

```
reg [8:0] in1, in2, in3, o;  
integer sum;  
always @* begin  
    sum = in1 + in2;  
    if(sum > in3) o = sum;  
    else o = in1;  
end
```

```
reg [8:0] in1, in2, in3, o;  
always @* begin : some_name  
    integer sum;  
    sum = in1 + in2;  
    if(sum > in3) o = sum;  
    else o = in1;  
end
```

Процедурные циклы

```
for(<переменная> = <выражение (начальное значение)>;  
    <выражение (условие продолжения цикла)>;  
    <переменная> = <выражение (следующее значение)>  
    ) <команда>
```

Внутри процедур можно записывать и такие **циклы** со смыслом как в C/C++ и с ограниченным по сравнению с C/C++ синтаксисом

Цикл поддерживается только в том случае, если множество значений *переменной*, перебираемых в цикле, определено **статически** (на этапе компиляции; ~ **constexpr** в C/C++)

Есть и другие виды циклов (repeat, forever, while), но все они не поддерживаются, и поэтому здесь подробно не обсуждаются

Процедурные циклы

Пример

Подсхема, разворачивающая задом наперёд шину x ширины 8 и направляющая результат в шину y, может быть реализована так:

```
reg [7:0] x, y;  
always @(posedge clk) begin : some_name  
    integer i;  
    for(i = 0; i < 8; i = i + 1)  
        x[i] <= y[7-i];  
end
```

Функции

```
function automatic <тип функции> <имя функции>;  
    <объявления входов и точек>  
    <команда>  
endfunction
```

Объявления входов — это объявления точек с ключевым словом `input`

При вызове функции (как в C/C++, и используемом в выражениях)

- ▶ аргументы — это *входы* в порядке их объявления, и
- ▶ возвращается значение указанного «*типа функции*»:
«`[<msb>:<lsb>]`», «`signed [<msb>:<lsb>]`» или «`integer`»

За исключением сказанного про входы,

все *объявления точек* в функции считаются **локальными**

Имя функции используется в команде как имя выходной переменной, в которую функцией возвращается значение

Команда должна быть составлена так, чтобы выполняться целиком в одном регионе и с полным однозначным определением результата

Функции

```
function automatic <тип функции> <имя функции>;  
    <объявления входов и точек>  
    <команда>  
endfunction
```

Пример

Функция, возвращающая максимум двух чисел ширины 5:

```
function automatic [4:0] my_max;  
    input [4:0] x, y;  
    if(x >= y) my_max = x;  
    else my_max = y;  
endfunction
```

Использование этой функции:

```
assign z = u + my_max(3, v);
```

Функции

```
function automatic <тип функции> <имя функции>;  
    <объявления входов и точек>  
    <команда>  
endfunction
```

В функции могут вызываться другие функции — в т.ч. рекурсивно, но поддерживается только рекурсия со «статической глубиной»

Функции поддерживаются только в таком виде, как на слайде, но для симуляции могут писаться и без ключевого слова `automatic`

Это ключевое слово означает, что все локальные переменные функции должны «создаваться» при каждом вызове функции

Если это ключевое слово опущено, то

- ▶ такая функция не поддерживается и
- ▶ локальные переменные создаются один раз для всех вызовов (как *static* в C/C++)

Возведение в степень и логарифмирование

$$x ** y$$

Это операция возведения x в степень y , поддерживаемая в двух случаях (а в остальных неподдерживаемая):

1. x — это константа 2

► $2 ** y$ — это $(00 \dots 01 \underbrace{00 \dots 0}_y)$

2. x и y — константы

$$\text{clog}_2(x)$$

Это округление вверх логарифма x по основанию 2

Эта функция довольно полезна — например, для преобразования ширины шины в наименьшую ширину числа для индексации этой шины

К сожалению, строго говоря, в \mathcal{V} эта функция не поддерживается

Но всё же ввиду полезности она обычно поддерживается на практике

Поэтому будем считать эту функцию поддерживаемой

Массивы

В \mathcal{V} можно объявлять (как в C++) многомерные массивы точек с явным указанием константных границ индексации:

- ▶ Массив из 4-х проводов, индексация с нуля
`wire arr[0:3];`
- ▶ Массив из 3-х reg-шин ширины 5, индексация с тройки
`reg [4:0] arr[3:5];`
- ▶ Двумерный массив (3x3) reg-значений,
первая индексация с нуля, вторая — с единицы
`reg arr[0:2][1:3];`
- ▶ Двумерный массив wire-шин ширины 5 того же размера
и с той же индексацией, что и в предыдущем пункте
`wire [4:0] arr[0:2][1:3];`

Массивы в качестве портов модулей запрещены

Массивы

Пример: параллельный регистр ширины 8, выходная шина которого «собирается» из внутреннего двумерного массива шин ширины 2

```
module register (input clk, input [7:0] in, output [7:0] out);  
    reg [1:0] arr[0:1][1:2];  
    always @(posedge clk)  
        {arr[0][1], arr[0][2], arr[1][1], arr[1][2]} <= in;  
    assign out = {arr[0][1], arr[0][2], arr[1][1], arr[1][2]};  
endmodule
```

Параметры

При разработке схемы может появиться необходимость реализовать много *похожих* схем

Например: параллельный регистр ширины 2;
параллельный регистр ширины 3; параллельный регистр ширины 4; ...

Хотелось бы один раз реализовать параллельный регистр произвольной ширины с уточнением этой ширины в экземплярах

Для таких целей в \mathcal{V} включены **параметры** модулей

Параметр во многом похож на переменную, **но** значение параметра можно задать **только**

- ▶ в объявлении этого параметра (значение по умолчанию) и
- ▶ в объявлении экземпляра модуля (значение не по умолчанию)

Значение параметра в выражениях считается **константным** (как **constexpr** в C/C++)

Параметры

Объявление *параметра* заданного *типа* и со значением по умолчанию, определяющимся заданным *константным выражением*, устроено так:

```
parameter <тип> <имя параметра> = <константное выражение>;
```

Тип можно опустить, и тогда подразумевается тип *выражения*

Замечание: тип целочисленных констант (0, 1, 2, ...) — integer

Под одним ключевым словом «parameter» можно объявлять и несколько параметров аналогично объявлению нескольких точек:

```
parameter P1 = 1, P2 = 2, P3 = 3;
```

Параметры

Вставка экземпляра модуля с параметрами устроена так:

```
<имя модуля> #(<назначения параметров через запятую>)  
<имя экземпляра> (<назначения портов>);
```

<назначение параметра> ::=

```
.<имя параметра>(<константное выражение>)
```

Если имя параметра не встречается в *назначениях*,
то используется значение параметра по умолчанию

Если текст «#(...)» отсутствует,
то используются значения всех параметров по умолчанию

Параметры

Пример: параллельный регистр ширины 8 (reg8), составленный из параллельных регистров (register) ширины 3 и ширины 5

```
module register(clk, d, q);  
    parameter W = 3;  
    input clk;  
    input [W-1:0] d;  
    output reg [W-1:0] q;  
    always @(posedge clk) q <= d;  
endmodule
```

```
module reg8(input clk, input [7:0] d, output [7:0] q);  
    register          r1(.clk(clk), .d(d[2:0]), .q(q[2:0]));  
    register #(.W(5)) r2(.clk(clk), .d(d[7:3]), .q(q[7:3]));  
endmodule
```

Параметры

Параметры, как и порты, можно задать в «шапке» объявления модуля:

```
module <имя модуля>  
#(<список параметров>) (<назначения портов>);
```

Список параметров — это набор объявлений параметров с «,» вместо «;»

Пример: следующие два фрагмента кода эквивалентны

```
module register(clk, in, out);  
    parameter W = 3;  
    input clk; input [W-1:0] in; output reg [W-1:0] out;
```

```
module register #(parameter W = 3)  
    (input clk, input [W-1:0] in, output reg [W-1:0] out);
```

Локальные параметры

При разработке «серьёзных» схем оказываются полезными параметры, изменение значений которых при вставке экземпляра **недопустимо**

Например, это параметры,

- ▶ значения которых однозначно определяются значениями других параметров
- ▶ в которых разработчик модуля сохранил технические детали («тонкие настройки»), изменение которых может привести к неэффективной работе модуля и ошибкам

В таких случаях принято использовать **локальные параметры**: в их объявлении вместо «parameter» пишется «**localparam**»

Для ясности параметры, объявленные при помощи слова parameter, будем называть **внешними**

Аналогия между параметрами и точками:

порты	←	все точки	→	точки, не являющиеся портами
внешние параметры	←	все параметры	→	локальные параметры

Блоки генерации

Иногда в код хочется/необходимо вставить много однотипных экземпляров с похожими назначениями портов

Например, параллельный регистр ширины 4 можно было бы реализовать так (*но не делайте так!*):

```
module Dff(input clk, input d, output reg q);  
    always @(posedge clk) q <= d;  
endmodule
```

```
module register(input clk, input [3:0] d, output [3:0] q);  
    Dff d0(.clk(clk), .d(d[0]), .q(q[0]));  
    Dff d1(.clk(clk), .d(d[1]), .q(q[1]));  
    Dff d2(.clk(clk), .d(d[2]), .q(q[2]));  
    Dff d3(.clk(clk), .d(d[3]), .q(q[3]));  
endmodule
```

Вставку таких похожих друг на друга экземпляров можно сделать более компактной и наглядной при помощи **блоков генерации**

Блоки генерации

```
genvar i;  
generate  
    for(i = 0; i < 4; i = i + 1)  
        Dff d(.clk(clk), .d(in[i]), .q(out[i]));  
endgenerate
```

genvar

Это тип переменных, аналогичный `integer`
и используемый в выражениях блоков генерации

generate
...
endgenerate

Это **блок генерации**, внутри которого записывается
последовательность команд генерации

Слова «`generate`» и «`endgenerate`» можно опускать,
но не рекомендуется, чтобы не запутаться в собственном коде

Блоки генерации

```
genvar i;  
generate  
    for(i = 0; i < 4; i = i + 1)  
        Dff d(.clk(clk), .d(in[i]), .q(out[i]));  
endgenerate
```

Основные **команды генерации**:

- ▶ Такое же объявление, как и в теле модуля (точек, параметров, процесса, экземпляра, ...)
 - ▶ **выполнение** команды: объявление добавляется в тело модуля
- ▶ Составная команда (begin-end), цикл (for), ветвление (if), выбор (case), как в теле процедуры, но с командами генерации вместо процедурных команд
 - ▶ **выполнение** команды такое же, как у процедурной команды

Все имена, объявленные внутри блока генерации, **локальны** для этого блока

Блоки генерации

```
genvar i;  
generate  
    for(i = 0; i < 4; i = i + 1)  
        Dff d(.clk(clk), .d(in[i]), .q(out[i]));  
endgenerate
```

Цикл блока генерации

```
for(<переменная> = <выражение (начальное значение)>;  
    <выражение (условие продолжения цикла)>;  
    <переменная> = <выражение (следующее значение)>  
    ) <команда>
```

отличается от процедурного цикла только тем, что

- ▶ *переменная* должна иметь тип `genvar` и
- ▶ записывается *команда* генерации вместо процедурной

Для цикла блока генерации должны соблюдаться те же ограничения однозначности/константности/статичности перебора, что и для процедурного цикла

Блоки генерации

```
genvar i;  
generate  
    for(i = 0; i < 4; i = i + 1)  
        Dff d(.clk(clk), .d(in[i]), .q(out[i]));  
endgenerate
```

Выполнение цикла:

- ▶ согласно заданию цикла перебираются значения *переменной*
- ▶ на очередной итерации перебора в *команду генерации* подставляется текущее значение *переменной*, и *команда* выполняется

Блоки генерации

Отличия **ветвления** и **выбора** в блоке генерации от процедурных **ветвления** и **выбора**:

- ▶ все переменные, используемые в условиях (условие ветвления, выражения выбора — главное и в случаях) должны иметь тип `genvar`
- ▶ на месте процедурной команды записывается команда генерации
- ▶ выполнение процедурной команды заменяется на выполнение команды генерации

Блоки генерации

Другой пример: в зависимости от значения параметра `revx`,

- ▶ либо в шину `y` пересылается значение шины `x`,
а в шину `v` — зеркально отражённое значение шины `u`,
- ▶ либо в шину `v` пересылается значение шины `u`,
а в шину `y` — зеркально отражённое значение шины `x`

```
parameter revx = 0;
wire [7:0] x, y, u, v;
genvar i;
generate
  for(i = 0; i < 8; i = i + 1)
    if(revx) begin
      assign y[i] = x[7-i];
      assign v[i] = u[i];
    end
    else begin
      assign y[i] = x[i];
      assign v[i] = u[7-i];
    end
  end
endgenerate
```