



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ (ИУ6)

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ 09.03.01 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
НА ТЕМУ:

«Вычислитель SHA-256»

Студент ИУ6-62Б
(Группа)

(Подпись, дата) С.В. Астахов
(И.О. Фамилия)

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата) Т.А. Ким
(И.О. Фамилия)

2022 г.

ЗАДАНИЕ

Реферат

36 стр., 12 рис., 5 источников, 5 прил.

СХЕМОТЕХНИКА, ЭВМ, SHA-256, ХЕШ-ФУНКЦИЯ, ПЛИС, FPGA, ВЫЧИСЛИТЕЛЬ, VERILOG, XILINX.

Цель работы – проектирование и моделирование работы цифрового устройства, производящего расчет внутреннего цикла алгоритма хеширования SHA-256.

При проектировании решены следующие задачи: анализ объекта разработки на функциональном уровне, разработка функциональной схемы устройства, выбор ПЛИС для реализации устройства, описание устройства на языке Verilog, синтез RTL-схемы устройства, разработка принципиальной схемы обвязки ПЛИС, расчет потребляемой мощности и параметров быстродействия.

Результатом разработки является проект на языке Verilog, предназначенный для загрузки в ПЛИС, и набор конструкторской документации.

Содержание

Термины и определения	5
Перечень сокращений и обозначений	6
Введение	7
1 Анализ предметной области	8
2 Разработка электрической функциональной схемы	10
3 Разработка описания устройства на языке Verilog	11
3.1 Разработка вычислительного блока	11
3.2 Разработка блока памяти переменных	14
3.3 Разработка блока выходного буфера	15
3.4 Разработка блока управления	17
3.5 Разработка описания устройства	19
3.6 Синтез RTL-схемы	20
4 Разработка электрической принципиальной схемы	24
5 Проверка работоспособности и расчет характеристик схемы	25
5.1 Формирование тестовых значений	25
5.2 Моделирование работы схемы	26
5.3 Расчет параметров быстродействия и энергопотребления	27
Заключение	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	31
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Техническое задание	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Функциональная схема	33
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Принципиальная электрическая схема	34
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Временные диаграммы	35
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Перечень элементов	36

Термины и определения

RTL-схема — способ разработки (описания) синхронных цифровых интегральных схем, при применении которого работа схемы описывается в виде последовательностей логических операций, применяемых к цифровым сигналам (данным) при их передаче от одного регистра к другому (не описывается, из каких электронных компонентов или из каких логических вентилей состоит схема).

Testbench — модуль на языке описания аппаратуры, используемый для задания входных сигналов при моделировании работы устройства.

Мультиплексирование с разделением по времени — технология аналогового или цифрового мультиплексирования, в котором несколько сигналов или битовых потоков передаются одновременно как подканалы в одном коммуникационном канале.

Файл пользовательских ограничений (UCF-файл) — файл, используемый Xilinx ISE для задания параметров прошивки и конфигурации портов ввода-вывода ПЛИС.

Язык описания аппаратуры — специализированный компьютерный язык, используемый для описания структуры и поведения электронных схем, чаще всего цифровых логических схем.

Перечень сокращений и обозначений

ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема;

САПР — система автоматизированного проектирования;

ТЗ — техническое задание;

ШД — шина данных;

ШУ — шина управления.

Введение

В данной работе производится разработка проекта устройства, производящего расчет внутреннего цикла алгоритма хеширования SHA-256.

Устройство должно рассчитывать внутренний цикл алгоритма SHA-256 в соответствии с разделами 4-6 стандарта Secure Hash Standard [1].

Хеш-функции, в том числе SHA-256, применяются главным образом для вычисления контрольных сумм, работы с электронной подписью и построения уникальных идентификаторов для наборов данных. Широкое применение хеш-функций в современных информационных системах обуславливает актуальность работы [2].

Так как для одной итерации алгоритма необходим большой объем данных, было использовано мультиплексирование с разделением по времени. Также, в силу сложности устройства, оно было спроектировано с применением языка описания аппаратуры Verilog [3].

1 Анализ предметной области

Реализуемая данным устройством часть алгоритма SHA-256 может быть представлена в виде в виде схемы, представленной на рисунке 1, или псевдокода, приведенного в листинге 1.

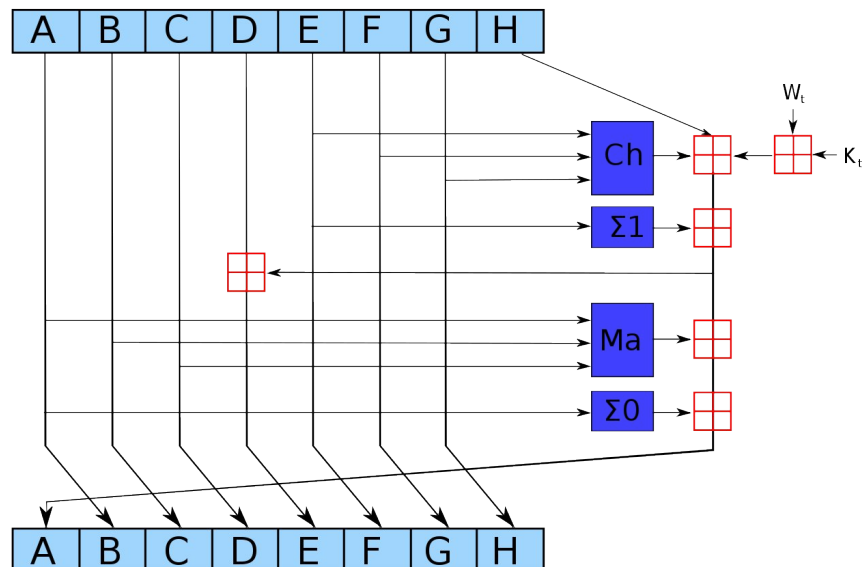


Рисунок 1 — схема одной итерации SHA-256

Листинг 1 – реализуемый алгоритм

```
k[0..63] :=
[0x428A2F98,
  // <...> еще 62 константы

0xC67178F2]

// Инициализация вспомогательных переменных:
a := h0
b := h1
c := h2
d := h3
e := h4
f := h5
g := h6
h := h7

// Основной цикл:
для i от 0 до 63
  Σ0 := (a rotr 2) xor (a rotr 13) xor (a rotr 22)
  Ma := (a and b) xor (a and c) xor (b and c)
  t2 := Σ0 + Ma
  Σ1 := (e rotr 6) xor (e rotr 11) xor (e rotr 25)
  Ch := (e and f) xor ((not e) and g)
  t1 := h + Σ1 + Ch + k[i] + w[i]
```



```
h := g
g := f
f := e
e := d + t1
d := c
c := b
b := a
a := t1 + t2
```

На основе представленного псевдокода можно заключить, что для аппаратной реализации алгоритма понадобятся:

- вычислительный блок;
- блоки памяти по 8 32-битных регистров для переменных и буферизации вывода;
- блок управления;
- мультиплексирующий блок (для разделения информационных сообщений и значений служебных переменных);
- блок постоянной памяти для хранения констант.

При этом, стоит отметить, что согласно техническому заданию (ТЗ), шина данных (ШД) должна иметь разрядность 32, поэтому необходимо использовать мультиплексирование с разделением по времени, чтобы инициализировать и считать все необходимые значения.

В силу большой разрядности переменных и сложности проектируемого устройства, было решено использовать для разработки язык описания аппаратуры. В качестве языка и САПРа для разработки были выбраны Verilog и Xilinx ISE соответственно. Эти средства обладают качественной и подробной документацией, широко распространены и имеют вариант распространения для некоммерческих целей.

2 Разработка электрической функциональной схемы

При анализе предметной области, было заключено, что устройство должно состоять из блока управления, блока памяти переменных, выходного буфера, мультиплексирующего блока и вычислительного блока.

Блок памяти переменных каждые 64 цикла исполнения алгоритма инициализируется извне, в остальных циклах он сохраняет значения полученные в предыдущем цикле. Поэтому данный блок должен иметь два информационных входа для соответствующих целей.

Мультиплексирующий блок в начале каждого раунда шифрования перенаправляет значения служебных переменных с информационного входа схемы в память. После этого данных блок перенаправляет значения информационных сообщений на вход вычислительного блока.

Вычислительный блок принимает на вход значения переменных из блока памяти переменных, значение очередной служебной константы и фрагмент информационного сообщения. Данный блок отвечает непосредственно за расчеты, описанные в стандарте SHA-256.

Выходной буфер принимает значения, полученные в ходе вычислений и передает их на выход устройства, а также в блок памяти переменных.

Блок памяти констант представляет из себя постоянную память, хранящую 64 служебных константы, которые необходимы для расчетов.

Блок управления на основе тактирующего сигнала генерирует необходимые сигналы выборки для блоков памяти, так как из-за большой разрядности все они имеют внутри себя схему выборки и для операций ввода-вывода используют мультиплексирование с разделением по времени.

Разработанная электрическая функциональная схема представлена на рисунке 2.

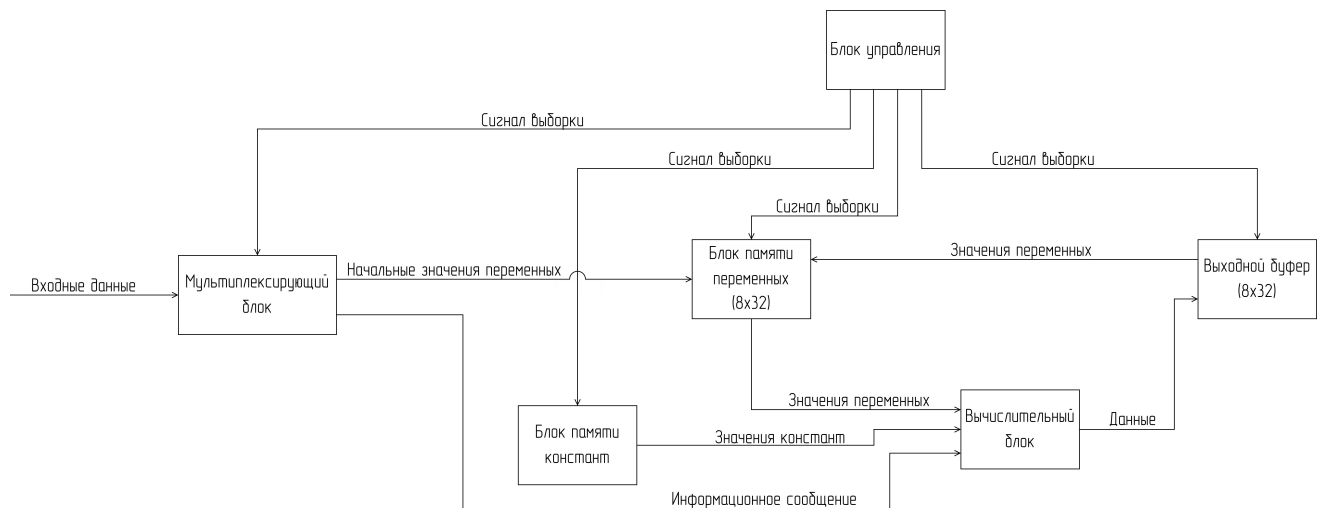


Рисунок 2 – функциональная схема устройства

3 Разработка описания устройства на языке Verilog

3.1 Разработка вычислительного блока

Вычислительный блок непосредственно реализует вычисления, описанные при анализе предметной области. Вычисления представляют собой расчет математических и побитовых логических операций.

Большинство из таких операций реализуется в языке Verilog с помощью операторов, однако модуль, реализующий побитовый сдвиг вправо понадобилось разработать самостоятельно. Так как сдвигать значения необходимо на различное число бит, этот модуль был параметризован посредством введения параметра N, содержащего число разрядов, на которые необходимо сдвинуть входное значение. Исходный код, описывающий данный модуль представлен в листинге 2.

Листинг 2 – модуль циклического сдвига вправо

```
`ifndef ROTR
`define ROTR

// OUT = NUM <<< N
module right_cyclic_shift #(parameter N=1)
    (num, out);

    input wire[31:0] num;
    output reg[31:0] out;

    integer i;
```

```

        always @* begin
            out = num;
            for(i=0; i<N; i=i+1) begin
                out[31:0] = {out[0], out[31:1]};
            end
        end
    end
endmodule

`endif

```

Далее, с использованием данного модуля, были описаны другие модули, реализующие функции, необходимые для расчета SHA-256. В качестве примера, в листинге 3 приведен код, реализующий расчет функции Сигма-0:

Листинг 3 – модуль расчета функции Сигма-0

```

`include "right_cyclic_shift.v"

// sigma0 := (a rotr 2) xor (a rotr 13) xor (a rotr 22)
module func_sigma0(in_A, func);

    input wire[31:0] in_A;
    output wire[31:0] func;

    wire[31:0] A2, A13, A22;

    right_cyclic_shift #(2)
    A2_node( .out (A2), .num (in_A));

    right_cyclic_shift #(13)
    A13_node( .out (A13), .num (in_A));

    right_cyclic_shift #(22)
    A22_node( .out (A22), .num (in_A));

    assign func = A2 ^ A13 ^ A22;

endmodule

```

Все подобные модули были собраны в единый модуль вычислительного блока, исходный код которого представлен в листинге 4.

Листинг 4 – исходный код вычислительного блока

```

`include "func_t1.v"
`include "func_t2.v"
module logic_module
    (in_A, in_B, in_C, in_D,
    in_E, in_F, in_G, in_H,

```

```

in_Ki, in_Wi,

out_A, out_B, out_C, out_D,
out_E, out_F, out_G, out_H);

    input wire [31:0] in_A, in_B, in_C,
    in_D, in_E, in_F, in_G, in_H;

    input wire [31:0] in_Ki, in_Wi;

    output [31:0] out_A, out_E;
    output wire [31:0] out_B, out_C, out_D,
        out_F, out_G, out_H;

    wire[31:0] wire_t1, wire_t2;

    assign out_H = in_G;
    assign out_G = in_F;
    assign out_F = in_E;

    assign out_D = in_C;
    assign out_C = in_B;
    assign out_B = in_A;

    func_t1 t1(.in_E(in_E), .in_F(in_F),
    .in_G(in_G),
    .in_H(in_H), .in_Ki(in_Ki), .in_Wi(in_Wi),
    .func(wire_t1));

    func_t2 t2(.in_A(in_A), .in_B(in_B),
    .in_C(in_C), .func(wire_t2));

    assign out_E = in_D + wire_t1;
    assign out_A = wire_t1 + wire_t2;

endmodule

```

Далее, к блоку вычислений был подключен блок памяти констант. С целью проверки правильности работы разработанных блоков, было произведено моделирование их работы. Результаты моделирования совпали с

результатами, полученными при ручном расчете по алгоритму из раздела 1 (подробнее см. в разделе 5.1).

Полученные временные диаграммы показаны на рисунке 3. Где round_n — порядковый номер цикла алгоритма, in_Wi — фрагмент информационного сообщения, in_A, ..., in_N — входные значения переменных, out_A, ..., out_N — выходные значения переменных (результаты).

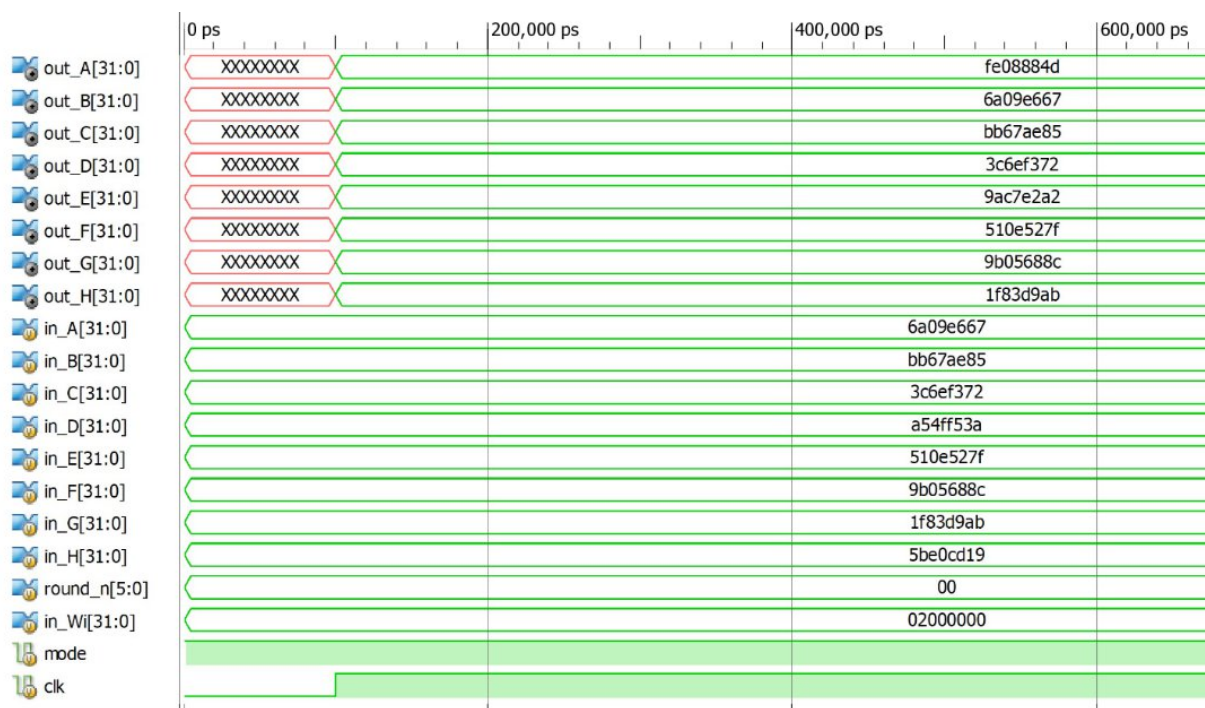


Рисунок 3 – временная диаграмма работы блока вычислений

3.2 Разработка блока памяти переменных

Так как в устройстве, согласно ТЗ, для ввода данных предусматривается 2 шины разрядностью 32 бита, необходимо было разработать блок памяти служебных переменных. Этот блок позволяет мультиплексировать по времени запись в память служебных переменных, для этой цели блок имеет встроенную схему выборки, на которую подается адрес вводимой константы (А - 0x01, В - 0x01, ..., Н - 0x08). Поступление адреса не из приведенного выше диапазона (например, адрес 0x00) означает, что необходимо взять значения всех служебных переменных из выходного буфера. Исходный код блока памяти переменных представлен в листинге 5.

Листинг 5 – исходный код блока памяти переменных

```
module mem_controller(  
    in_var, addr, clk,  
    in_A, in_B, in_C, in_D,  
    in_E, in_F, in_G, in_H,  
    out_A, out_B, out_C, out_D,  
    out_E, out_F, out_G, out_H,  
    en  
);  
  
    input wire [3:0] addr;  
    input wire [31:0] in_var;  
    input wire clk, en;  
  
    input wire [31:0] in_A, in_B, in_C, in_D,  
        in_E, in_F, in_G, in_H;  
    output reg [31:0] out_A, out_B, out_C, out_D,  
        out_E, out_F, out_G, out_H;  
  
    always @(posedge clk) begin  
        if (en == 1) begin  
            case(addr)  
                01: out_A <= in_var;  
                02: out_B <= in_var;  
                // <...>  
                08: out_H <= in_var;  
                default: begin  
                    out_A <= in_A;  
                    out_B <= in_B;  
                    // <...>  
                    out_H <= in_H;  
                end  
            endcase  
        end  
    end  
endmodule
```

3.3 Разработка блока выходного буфера

Результирующее значение хеш-функции SHA-256 формируется на основе значений служебных переменных. Так как выходные значения переменных необходимо мультиплексировать по времени, а также они нужны для вычисления следующих итераций, был разработан блок выходного буфера. Принцип его работы схож с принципом работы блока памяти

служебных переменных, однако в случае выходного буфера, мультиплексируется по времени информационный выход блока, а ввод данных осуществляется параллельно. Исходный код рассматриваемого блока приведен в листинге 6.

Листинг 6 – исходный код выходного буфера

```
module output_buffer(
    out_var, addr, clk, en,
    in_A, in_B, in_C, in_D,
    in_E, in_F, in_G, in_H,
    out_A, out_B, out_C, out_D,
    out_E, out_F, out_G, out_H
);
    input wire [3:0] addr;
    input wire clk;
    input wire en;
    output reg [31:0] out_var;

    output reg [31:0] out_A, out_B, out_C, out_D,
        out_E, out_F, out_G, out_H;

    reg [31:0] reg_A, reg_B, reg_C, reg_D,
        reg_E, reg_F, reg_G, reg_H;

    input wire [31:0] in_A, in_B, in_C, in_D,
        in_E, in_F, in_G, in_H;

    always @(posedge clk) begin
        if (en) begin
            $display("[v] Out mem A, B: %h %h",
                in_A, in_B);
            out_A <= in_A;
            out_B <= in_B;
            // <...>
            out_H <= in_H;

            reg_A <= in_A;
            reg_B <= in_B;
            // <...>
            reg_H <= in_H;
        end
        case(addr)
        01: out_var <= reg_A;
        02: out_var <= reg_B;
        // <...>
        08: out_var <= reg_H;
        endcase
    end
endmodule
```


После подключения блока вычислений, блока констант, блока памяти переменных и выходного буфера друг к другу, было произведено моделирование их совместной работы с целью проверки корректности их работы и уточнения поведения управляющих сигналов.

Полученные в ходе моделирования временные диаграммы приведены на рисунке 4.

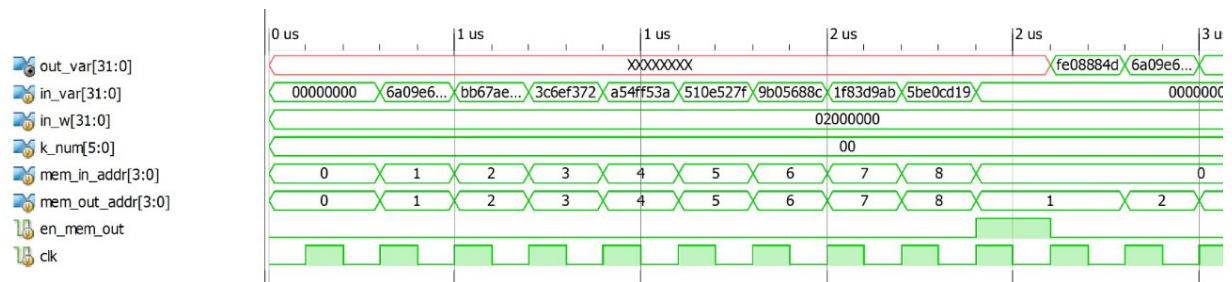


Рисунок 4 – временная диаграмма работы основных блоков

3.4 Разработка блока управления

Так как сочетания сигналов выборки полностью определяются последовательным номером исполняемого цикла алгоритма SHA-256, для обеспечения корректной работы блоков памяти и упрощения внешнего интерфейса устройства был разработан блок управления. Этот блок на основе тактового сигнала изменяет значение внутреннего счетчика. На основе значения внутреннего счетчика генерируются управляющие сигналы, соответствующие управляющим сигналам на рисунке 3 (за исключением начального адреса выходного буфера, который не оказывает влияния на корректность работы устройства). Исходный код данного блока приведен в листинге 7.

Листинг 7 – исходный код блока управления

```
module control_block(
    clk, reset, in_mem_addr, k_num,
    out_mem_addr, en_mem_out,
    en_mem_in
);

input wire clk;
input wire reset;
output reg [3:0] in_mem_addr;
```

```

output reg [3:0] out_mem_addr;
output reg [5:0] k_num;
output reg en_mem_out;
reg [10:0] n;
reg [10:0] n_buf;
output wire en_mem_in;

assign en_mem_in = 1;

always @(posedge clk or posedge reset) begin
    if (reset == 1) begin
        n <= 0;
        n_buf <= 0;
    end
    else begin
        if (clk == 1) begin
            n <= n + 1;
            if (n%9 != 0)
                n_buf <= n_buf + 1;
        end
        k_num = n/19;
        out_mem_addr <= n_buf%8 + 1;

        if (n%9 == 0)
            en_mem_out <= 1;
        else
            en_mem_out <= 0;

        if (n > 0)
            begin
                if (n < 9)
                    in_mem_addr <= n;
                else
                    in_mem_addr <= 0;
            end
        else
            in_mem_addr <= 0;
    end
end
endmodule

```

Результаты моделирования работы блока управления приведены на рисунке 5. Управляющие сигналы соответствуют ожидаемым.

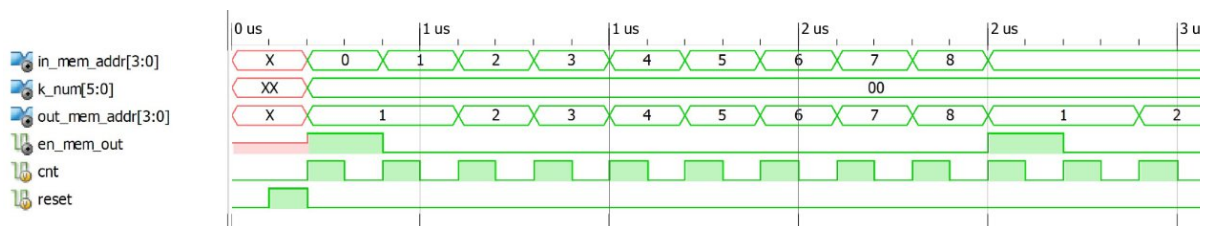


Рисунок 5 – временные диаграммы работы блока управления

3.5 Разработка описания устройства

После добавления мультиплексирующего блока, было разработано описание соединения блоков в проектируемом устройстве. Блоки памяти, вычислений, выходного буфера и констант были предварительно объединены в «главный блок». Описание проектируемого устройства приведено в листинге 8.

Листинг 8 – описание проектируемого устройства

```
`include "main_block.v"
`include "control_block.v"
`include "input_mux.v"

module asic2(
    clk, reset, in_data, out_var
);

    input wire clk, reset;
    input wire [31:0] in_data;
    output wire [31:0] out_var;

    wire [31:0] mux_w, mux_var;

    wire [5:0] _k_num;
    wire [3:0] _in_mem_addr,
        _out_mem_addr;
    wire _en_mem_out;
    wire _en_mem_in;

    input_mux mux(.addr(_in_mem_addr),
        .in_data(in_data),
        .out_w(mux_w),
        .out_var(mux_var)
    );

    main_block core(.in_var(mux_var),
        .in_w(mux_w), .out_var(out_var),
        .k_num(_k_num),
        .mem_in_addr(_in_mem_addr),
        .mem_out_addr(_out_mem_addr),
        .en_mem_out(_en_mem_out),
        .en_mem_in(_en_mem_in),
        .clk(clk)
    );

    control_block dispatcher(
        .clk(clk), .reset(reset),
        .in_mem_addr(_in_mem_addr),
```

```

        .k_num(_k_num) ,
        .out_mem_addr(_out_mem_addr) ,
        .en_mem_out(_en_mem_out) ,
        .en_mem_in(_en_mem_in)
    );
endmodule

```

3.6 Синтез RTL-схемы

На основе приведенных ранее исходных кодов с помощью Xilinx ISE была сгенерирована RTL-схема. На рисунке 6 представлена RTL-схема, развернутая до уровня основных блоков устройства.

На рисунке 7 показана более детальная RTL-схема вычислительного блока.

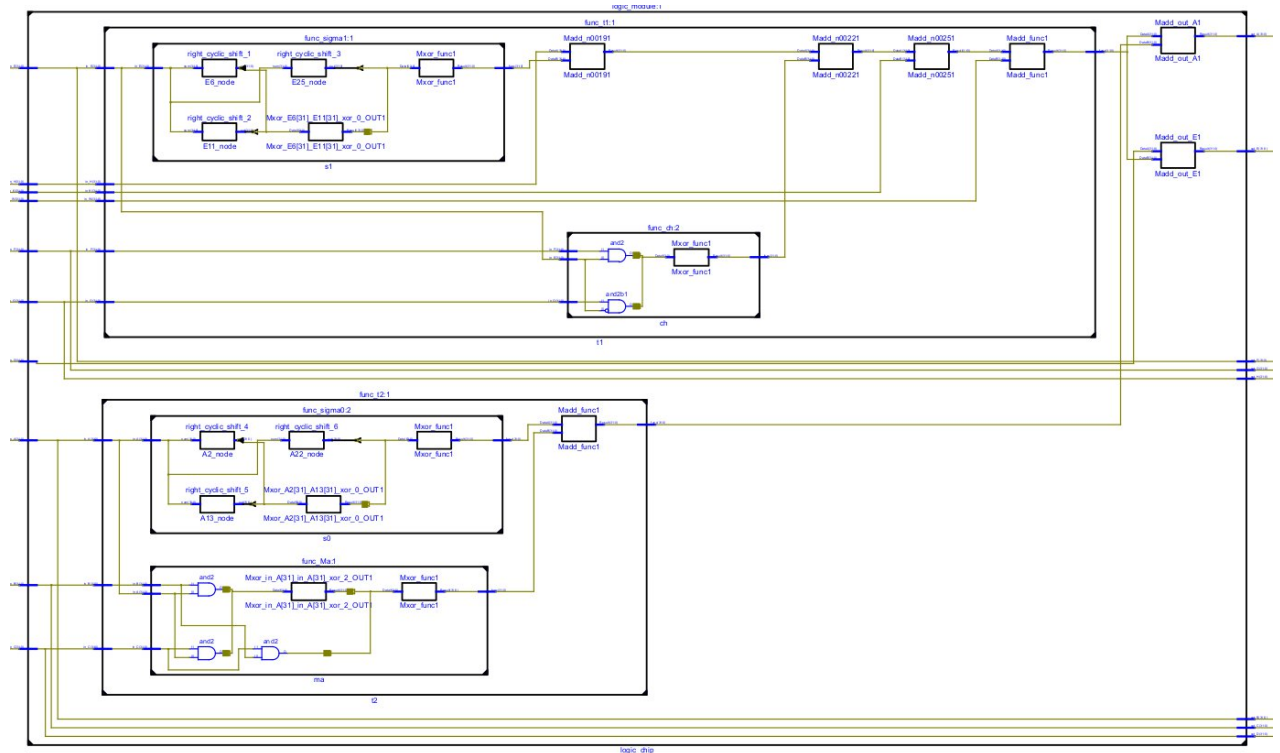


Рисунок 7 – RTL-схема вычислительного блока

На рисунках 8 и 9 приведены примеры RTL схем блоков, вычисляющих значение функций t1 и t2 соответственно. В состав блока, вычисляющего t1, среди прочего, входят блоки, вычисляющие функции Сигма-1 и Ch. В состав блока, вычисляющего t2, входят блоки, сдвигающие значения в шинах на заданное число разрядов.

На рисунке 10 представлен выходной буфер.

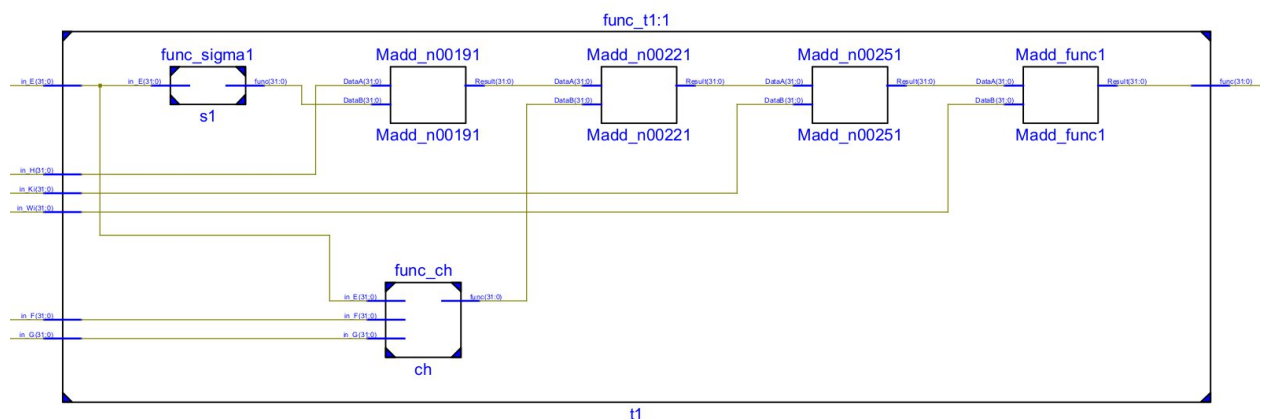


Рисунок 8 – блок вычисления функции t1

4 Разработка электрической принципиальной схемы

В качестве ПЛИС для прошивки проекта была выбрана ПЛИС Spartan-3 XC3S400. XC3S400 имеет 83 ввода-вывода общего назначения, что оптимально для решаемой задачи. Данная ПЛИС широко применяется и имеет качественную документацию [5].

Исходя из сведений, указанных в документации к ПЛИС, на принципиальной схеме был размещен нагрузочный резистор номиналом 51 Ом (СФ-100) и развязывающие конденсаторы (на каждый вход питания) номиналом 100 нФ (К53-14). Напряжение питания $VCC = 5\text{ В}$.

С помощью утилиты PlanAhead было задано соответствие между контактами ПЛИС и портами проекта. Работа с утилитой PlanAhead показана на рисунке 11.

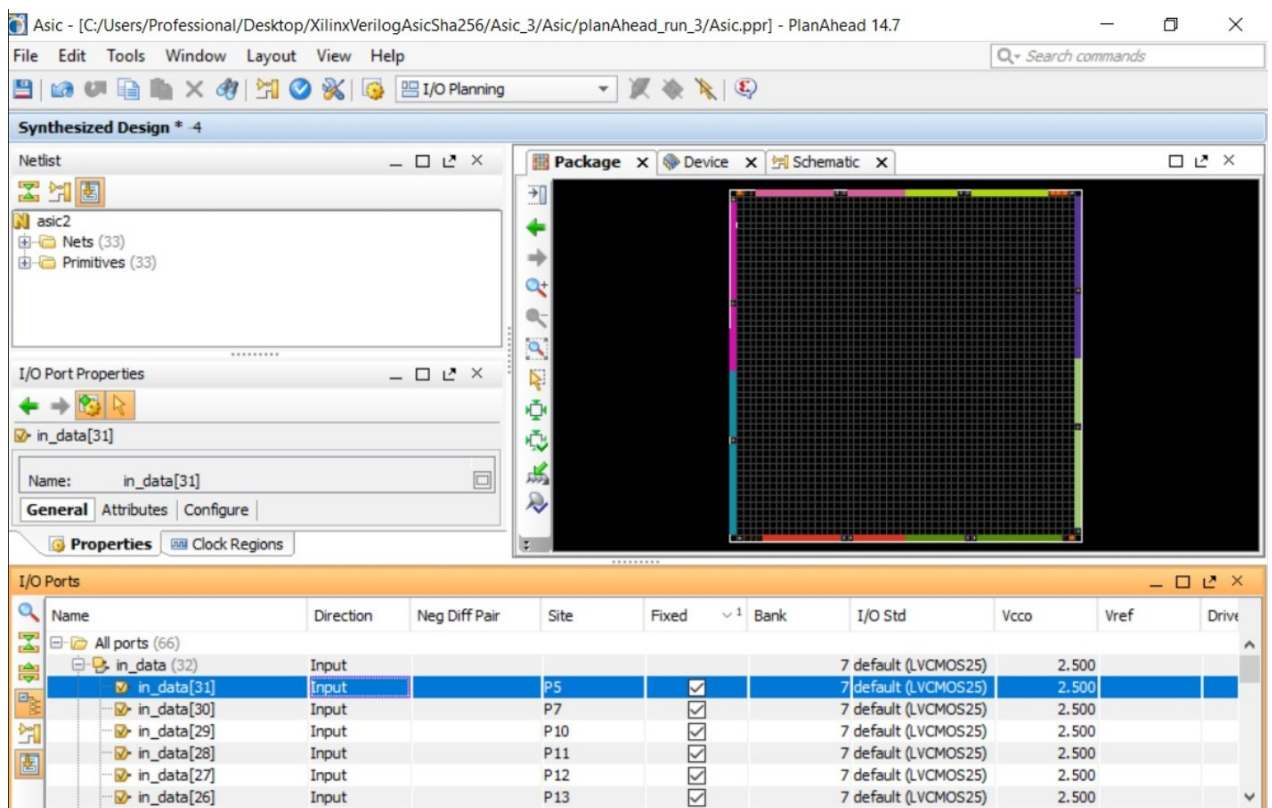


Рисунок 11 – работа с утилитой PlanAhead

Полученные в результате работы с утилитой PlanAhead соответствия портов проекта и контактов ПЛИС сохранены в виде UCF-файла. На основе этой информации разработана принципиальная схема (приложение В).

5 Проверка работоспособности и расчет характеристик схемы

5.1 Формирование тестовых значений

Предполагаемые результаты тестов были подсчитаны вручную на основе алгоритма, описанного в разделе 1. В качестве исходных значений были заданы стандартные значения для первой итерации SHA-256 и значение информационного сообщения $w[0] = 0x02000000$.

Начальные значения:

```
a = 0x6a09e667; b = 0xbb67ae85;  
c = 0x3c6ef372; d = 0xa54ff53a;  
e = 0x510e527f; f = 0x9b05688c;  
g = 0x1f83d9ab; h = 0x5be0cd19;  
k[0] = 0x428a2f98; w[0] = 0x02000000
```

Расчеты:

```
Σ0 = (a rotr 2) xor (a rotr 13) xor (a rotr 22) =  
= 0xda827999 xor 0x333b504f xor 0x27999da8 = 0xce20b47e
```

```
Ma = (a and b) xor (a and c) xor (b and c) =  
= 0x2a01a605 xor 0x2808e262 xor 0x3866a200 = 0x3a6fe667
```

```
t2 = Σ0 + Ma = 0xce20b47e + 0x3a6fe667 = 0x108909ae5
```

```
Σ1 = (e rotr 6) xor (e rotr 11) xor (e rotr 25) =  
= 0xfd443949 xor 0x4fea21ca xor 0x87293fa8 = 0x3587272b
```

```
Ch = (e and f) xor ((not e) and g) =  
= 0x1104400c xor 0xe818980 = 0x1f85c98c
```

```
t1 = h + Σ1 + Ch + k[0] + w[0] = 0x5be0cd19 + 0x3587272b +  
+ 0x1f85c98c + 0x428a2f98 + 0x02000000 = 0xf577ed68
```

Результаты:

```
h = g = 0x1f83d9ab  
g = f = 0x9b05688c  
f = e = 0x510e527f  
e = d + t1 = 0xa54ff53a + 0xf577ed68 = 0x9ac7e2a2  
d = c = 0x3c6ef372  
c = b = 0xbb67ae85  
b = a = 0x6a09e667  
a = t1 + t2 = 0xf577ed68 + 0x108909ae5 = 0xfe08884d
```

5.2 Моделирование работы схемы

Xilinx ISE предоставляет встроенный инструмент ISE Simulator для моделирования работы схем. Для проведения моделирования был написан тестовый модуль на Verilog (так называемый «testbench»). Исходный код этого модуля приведен в листинге 8. Полученные в результате временные диаграммы представлены в приложении Г.

Листинг 8 — тестовый модуль

```
module asic3_tb;

    // Inputs
    reg clk;
    reg reset;
    reg [31:0] in_data;

    // Outputs
    wire [31:0] out_var;

    // Instantiate the Unit Under Test (UUT)
    asic2 uut (
        .clk(clk),
        .reset(reset),
        .in_data(in_data),
        .out_var(out_var)
    );

    initial begin

        clk = 0;
        reset = 0;
        in_data = 0;

        #100; reset = 1; #100; reset = 0;

        #100; clk=1; #100; clk=0; #100; clk=1; #100; clk=0;

        // A
        in_data = 32'h6a09e667;
        #100; clk=1; #100; clk=0;

        // B
        in_data = 32'hbb67ae85;
        #100; clk=1; #100; clk=0;

        //
        // <...> ввод C, D, E, F, G, H
        //
```

```

        // output
        in_data = 32'h02000000;

        #100; clk=1; #100; clk=0;
        #100; clk=1; #100; clk=0;

        //
        // <...> повтор тактов 6 раз
        //

    end

endmodule

```

5.3 Расчет параметров быстродействия и энергопотребления

Параметры быстродействия рассчитаны при синтезе схемы с помощью встроенной утилиты Xilinx ISE. Отчет о быстродействии приведен ниже:

```

-----
Release 14.7 Trace (nt64)
Copyright (c) 1995-2013 Xilinx, Inc. All rights reserved.
-----
All values displayed in nanoseconds (ns)

Setup/Hold to clock clk

```

Source	Max Setup to clk (edge)	Process Corner	Max Hold to clk (edge)	Process Corner
in_data<0>	0.972 (R)	FAST	1.194 (R)	SLOW
in_data<1>	0.999 (R)	FAST	1.328 (R)	SLOW
in_data<2>	1.003 (R)	FAST	0.809 (R)	SLOW
in_data<3>	0.916 (R)	FAST	1.709 (R)	SLOW
in_data<4>	1.118 (R)	FAST	1.750 (R)	SLOW
in_data<5>	0.829 (R)	FAST	1.555 (R)	SLOW
in_data<6>	1.394 (R)	FAST	0.753 (R)	SLOW
in_data<7>	1.597 (R)	SLOW	1.043 (R)	SLOW
in_data<8>	1.403 (R)	FAST	1.241 (R)	SLOW
in_data<9>	1.845 (R)	SLOW	1.334 (R)	SLOW
in_data<10>	1.491 (R)	SLOW	1.333 (R)	SLOW
in_data<11>	1.078 (R)	FAST	1.446 (R)	SLOW
in_data<12>	1.088 (R)	FAST	1.348 (R)	SLOW
in_data<13>	1.276 (R)	FAST	1.463 (R)	SLOW
in_data<14>	0.996 (R)	FAST	1.887 (R)	SLOW
in_data<15>	0.840 (R)	FAST	2.124 (R)	SLOW
in_data<16>	0.831 (R)	FAST	1.999 (R)	SLOW
in_data<17>	0.258 (R)	FAST	1.996 (R)	SLOW
in_data<18>	1.001 (R)	FAST	1.388 (R)	SLOW
in_data<19>	0.419 (R)	FAST	1.956 (R)	SLOW
in_data<20>	0.678 (R)	FAST	1.624 (R)	SLOW

in_data<21>	0.252 (R)	FAST	2.058 (R)	SLOW
in_data<22>	0.611 (R)	FAST	1.822 (R)	SLOW
in_data<23>	0.275 (R)	FAST	2.311 (R)	SLOW
in_data<24>	0.490 (R)	FAST	2.117 (R)	SLOW
in_data<25>	0.364 (R)	FAST	2.081 (R)	SLOW
in_data<26>	0.362 (R)	FAST	2.085 (R)	SLOW
in_data<27>	0.666 (R)	FAST	2.144 (R)	SLOW
in_data<28>	0.323 (R)	FAST	2.485 (R)	SLOW
in_data<29>	0.535 (R)	FAST	2.192 (R)	SLOW
in_data<30>	0.476 (R)	FAST	2.382 (R)	SLOW
in_data<31>	0.489 (R)	FAST	2.200 (R)	SLOW
reset	1.564 (R)	FAST	1.493 (R)	SLOW
-----+-----+-----+-----+-----+				

Clock clk to Pad

	Max (slowest)	Process	Min (fastest)	Process
	clk (edge)	Corner	clk (edge)	Corner
Destination	to PAD		to PAD	
-----+-----+-----+-----+-----+				
out_var<0>	8.776 (R)	SLOW	3.796 (R)	FAST
out_var<1>	9.413 (R)	SLOW	4.239 (R)	FAST
out_var<2>	9.217 (R)	SLOW	4.061 (R)	FAST
out_var<3>	8.690 (R)	SLOW	3.731 (R)	FAST
out_var<4>	9.300 (R)	SLOW	4.173 (R)	FAST
out_var<5>	8.778 (R)	SLOW	3.811 (R)	FAST
out_var<6>	8.739 (R)	SLOW	3.792 (R)	FAST
out_var<7>	8.552 (R)	SLOW	3.680 (R)	FAST
out_var<8>	8.625 (R)	SLOW	3.793 (R)	FAST
out_var<9>	8.552 (R)	SLOW	3.672 (R)	FAST
out_var<10>	8.464 (R)	SLOW	3.628 (R)	FAST
out_var<11>	8.730 (R)	SLOW	3.860 (R)	FAST
out_var<12>	8.631 (R)	SLOW	3.732 (R)	FAST
out_var<13>	8.598 (R)	SLOW	3.797 (R)	FAST
out_var<14>	8.666 (R)	SLOW	3.741 (R)	FAST
out_var<15>	8.514 (R)	SLOW	3.718 (R)	FAST
out_var<16>	8.869 (R)	SLOW	3.959 (R)	FAST
out_var<17>	8.453 (R)	SLOW	3.643 (R)	FAST
out_var<18>	8.665 (R)	SLOW	3.763 (R)	FAST
out_var<19>	8.527 (R)	SLOW	3.656 (R)	FAST
out_var<20>	8.865 (R)	SLOW	3.903 (R)	FAST
out_var<21>	8.809 (R)	SLOW	3.870 (R)	FAST
out_var<22>	8.668 (R)	SLOW	3.766 (R)	FAST
out_var<23>	8.541 (R)	SLOW	3.740 (R)	FAST
out_var<24>	9.105 (R)	SLOW	4.054 (R)	FAST
out_var<25>	8.652 (R)	SLOW	3.734 (R)	FAST
out_var<26>	8.470 (R)	SLOW	3.635 (R)	FAST
out_var<27>	8.775 (R)	SLOW	3.841 (R)	FAST
out_var<28>	8.506 (R)	SLOW	3.660 (R)	FAST
out_var<29>	8.550 (R)	SLOW	3.668 (R)	FAST
out_var<30>	8.669 (R)	SLOW	3.760 (R)	FAST
out_var<31>	8.734 (R)	SLOW	3.820 (R)	FAST

-----+-----+-----+-----+-----+				
Clock to Setup on destination clock clk				
-----+-----+-----+-----+-----+				
	Src:Rise	Src:Fall	Src:Rise	Src:Fall
Source Clock	Dest:Rise	Dest:Rise	Dest:Fall	Dest:Fall
-----+-----+-----+-----+-----+				
clk	7.838	0.438		
-----+-----+-----+-----+-----+				

Задержки не превышают 10 нс, что позволяет схеме работать на частоте, указанной в ТЗ.

Параметры потребляемой мощности были рассчитаны с помощью утилиты xPower Analyser, входящей в состав САПР Xilinx ISE Design Suite. Результаты расчета приведены на рисунке 12.

On-Chip	Power (W)	Used	Available	Utilization (%)
Clocks	0.000	1	---	---
Logic	0.000	83	9312	1
Signals	0.000	133	---	---
I/Os	0.058	9	232	4
Leakage	0.082			
Total	0.141			

Supply Summary		Total	Dynamic	Quiescent
Source	Voltage	Current (A)	Current (A)	Current (A)
Vccint	1.200	0.028	0.001	0.026
Vccaux	2.500	0.019	0.001	0.018
Vcco25	2.500	0.024	0.022	0.002

Supply Power (W)		Total	Dynamic	Quiescent
		0.141	0.059	0.082

Thermal Properties		Effective TJA	Max Ambient	Junction Temp
		(C/W)	(C)	(C)
		26.1	81.3	28.7

Рисунок 12 – расчет потребляемой мощности

Потребляемая мощность ПЛИС равна 0.141 Вт. Номинальная мощность нагрузочного резистора равна 1 Вт.

Суммарная мощность равна 1.141 Вт, что соответствует требованиям ТЗ.

Заключение

В ходе выполнения курсовой работы были получены функциональная и принципиальная схемы устройства, а также временные диаграммы моделирования его работы.

Устройство представляет собой вычислитель внутреннего цикла алгоритма хеширования SHA-256.

Разработка описания, моделирование и расчет характеристик устройства производились с использованием языка описания аппаратуры Verilog в среде Xilinx ISE (включая встроенные утилиты PlanAhead и iSim).

По результатам моделирования и расчетов был сделан вывод, что устройство работает согласно требованиям ТЗ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quynh H. Dang, Secure Hash Standard (SHS) / Quynh H. Dang – Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2015. – 36 с.
2. Бегимбаева, О.А. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ХЕШ-ФУНКЦИЙ / О.А. Бегимбаева, Е.Е. Усатова, С.Е. Нысанбаева. – Алматы : № 5 (2021): "Известия НАН РК. Серия физико-математическая", 2021. – 100-110 с.
3. В.В. Рубанов. Обзор методов описания встраиваемой аппаратуры и построения инструментария кросс-разработки. Труды Института системного программирования РАН, том 15, 2008, стр. 7-40.
4. Попов А.Ю. Проектирование цифровых устройств с использованием ПЛИС. – М.: изд-во МГТУ, 2009. – 79 с.
5. Xilinx Inc., Spartan-3 FPGA Family Data Sheet — San Jose: Inc. XILINX, 2013. — 272 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Техническое задание
Листов 4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Функциональная схема
Листов 1

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Принципиальная электрическая схема
Листов 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Временные диаграммы
Листов 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Перечень элементов
Листов 1