



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«МИРЭА - Российский технологический университет»

РТУ МИРЭА

---

Институт Информационных Технологий  
Кафедра Вычислительной Техники (ВТ)

**ОТЧЁТ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ № 2**

«Основы статического временного анализа»

по дисциплине

«Схемотехника устройств компьютерных систем»

Выполнил студент группы  
ИВБО-08-22

Стецюк В.В.

Принял ассистент кафедры ВТ

Дуксин Н.А.

Практическая работа выполнена

«\_\_»\_\_\_\_\_2024 г.

«Зачтено»

«\_\_»\_\_\_\_\_2024 г.

Москва 2024

## **АННОТАЦИЯ**

Данная работа включает в себя 7 рисунков, 2 листинга и 4 формулы.  
Количество страниц в работе — 13.

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Реализация модуля согласно персональному варианту .....	5
1.1 Реализация функции и анализ задействованных для этого аппаратных ресурсов.....	5
1.2 Создание файла проектных ограничений .....	6
2 Анализ показателя Slack.....	7
2.1 Значения WNS и WHS, рассчитанные в Vivado .....	7
2.2 Ручной расчёт показателя Slack по Setup .....	7
2.3 Ручной расчёт показателя Slack по Hold .....	9
2.4 Гистограммы Slack по Setup и Hold .....	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	12
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	133

## ВВЕДЕНИЕ

В данной практической работе необходимо согласно персональному варианту [1-2] произвести расчёт для параметра WNS и WHS (для случая анализа по Hold и по Setup) для спроектированного устройства [3].

Персональный вариант:  $a - b \ll c * d$

# 1 РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ СОГЛАСНО ПЕРСОНАЛЬНОМУ ВАРИАНТУ

## 1.1 Реализация функции и анализ задействованных для этого аппаратных ресурсов

Название модуля верхнего уровня – «main». Модуль имеет 32-разрядные входные порты «a», «b», «c» и «d», входным «clk» - синхросигнал, а также 32-разрядный выходной порт «out». С помощью оператора непрерывного присваивания «assign» к выходному порту «res» подключается результат выражения  $a - b \ll c * d$ .

Далее объявляются 32 битные регистры «ffa», «ffb», «ffc», «ffd» и «ff2». С помощью оператора непрерывного присваивания «assign» на выход «out» подаётся значение «ff2».

Дальше в блоке «always», работающему по переднему фронту синхросигнала, регистрам «ffa», «ffb», «ffc», «ffd» присваиваются соответствующие входные значения «a», «b», «c» и «d», а регистру «ff2» присваивается результат  $ffa - ffb \ll ffc * ffd$ .

Код модуля представлен в Листинге 1.1.

*Листинг 1.1 – Реализация модуля верхнего уровня*

```
module main(  
    input [31:0] a, b, c, d,  
    input clk,  
    output [31:0] out  
);  
  
reg [31:0] ffa, ffb, ffc, ffd, ff2;  
assign out = ff2;  
  
always @(posedge clk)  
begin  
    ffa <= a;  
    ffb <= b;  
    ffc <= c;  
    ffd <= d;  
    ff2 <= ffa - ffb << ffc * ffd;  
end  
  
endmodule
```

## 1.2 Создание файла проектных ограничений

В файле проектных ограничений создаётся объект тактового генератора с частотой 100 МГц.

Содержимое файла представлено в Листинге 1.2.

*Листинг 1.2 – Файл проектных ограничений*

```
create_clock -add -name clock -period 10.00 -waveform {0 5} [ get_ports { clk  
} ]
```

## 2 АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЯ SLACK

### 2.1 Значения WNS и WHS, рассчитанные в Vivado

Произведем синтез и имплементацию, чтобы получить значения WNS и WHS. Результат представлен на Рисунке 2.1.

Design Timing Summary

Setup	Hold	Pulse Width
Worst Negative Slack (WNS): -0,332 ns	Worst Hold Slack (WHS): 0,584 ns	Worst Pulse Width Slack (WPWS): 4,500 ns
Total Negative Slack (TNS): -8,069 ns	Total Hold Slack (THS): 0,000 ns	Total Pulse Width Negative Slack (TPWS): 0,000 ns
Number of Failing Endpoints: 32	Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0
Total Number of Endpoints: 64	Total Number of Endpoints: 64	Total Number of Endpoints: 97

Рисунок 2.1 – Значения WNS и WHS схемы

### 2.2 Ручной расчёт показателя Slack по Setup

Slack по Setup рассчитывается по Формуле 2.1.

$$Slack = T_{dcd} + T_{clk} - T_{su} - T_{scd} - T_{dd} \quad (2.1)$$

где  $T_{dcd}$  – время распространения синхросигнала до второго триггера,

$T_{clk}$  – период синхросигнала,

$T_{su}$  – время Setup триггера,

$T_{scd}$  – время распространения синхросигнала до первого триггера,

$T_{dd}$  – время распространения данных.

Посчитаем показатель Slack для первого пути по данным, предоставленным в Vivado (Рисунки 2.2 и 2.3).

Source Clock Path					
Delay Type	Incr (ns)	Path ...	Location	Netlist Resource(s)	
(clock clock rise edge)	(r) 0.000	0.000			
	(r) 0.000	0.000	Site: N15	clk	
net (fo=0)	0.000	0.000		clk	
<a href="#">IBUF (Prop_ibuf I O)</a>	(r) 0.948	0.948	Site: N15	clk_IBUF_inst/O	
net (fo=1, routed)	2.016	2.963		clk_IBUF	
<a href="#">BUFG (Prop_bufg I O)</a>	(r) 0.096	3.059	Site: BUF...TRL_X0Y0	clk_IBUF_BUFG_inst/O	
net (fo=99, routed)	1.723	4.782		clk_IBUF_BUFG	
DSP48E1			Site: DSP48_X0Y41	ff21_0/CLK	
Data Path					
Delay Type	Incr (ns)	Path (...)	Location	Netlist Resource(s)	
<a href="#">DSP48E1 (Prop_ds...1_CLK PCOUT[47])</a>	(r) 4.206	8.988	Site: DSP48_X0Y41	ff21_0/PCOUT[47]	
net (fo=1, routed)	0.002	8.990		ff21_0_n_106	
<a href="#">DSP48E1 (Prop_dsp48e1_PCIN[47] PI0)</a>	(r) 1.518	10.508	Site: DSP48_X0Y42	ff21_1/P[0]	
net (fo=2, routed)	0.893	11.401		ff21_1_n_105	
<a href="#">LUT2 (Prop_lut2 I0 O)</a>	(r) 0.124	11.525	Site: SLICE_X8Y102	ff2[31]_i_34/O	
net (fo=1, routed)	0.000	11.525		ff2[31]_i_34_n_0	
<a href="#">CARRY4 (Prop_carry4_S[11] O[2])</a>	(r) 0.578	12.103	Site: SLICE_X8Y102	ff2_reg[31]_i_17/O[2]	
net (fo=1, routed)	0.734	12.837		ff2_reg[31]_i_17_n_5	
<a href="#">LUT5 (Prop_lut5 I0 O)</a>	(r) 0.301	13.138	Site: SLI...X11Y103	ff2[31]_i_6/O	
net (fo=1, routed)	0.655	13.793		ff2[31]_i_6_n_0	
<a href="#">LUT6 (Prop_lut6 I3 O)</a>	(r) 0.124	13.917	Site: SLI...X10Y103	ff2[31]_i_1_comp/O	
net (fo=32, routed)	0.524	14.441		ff2[31]_i_1_n_0	
FDRE			Site: SLI...X10Y102	ff2_reg[14]/R	
<b>Arrival Time</b>		14.441			

Рисунок 2.2 – Данные о времени распространения сигналов

Destination Clock Path					
Delay Type	Incr (ns)	Path (...)	Location	Netlist Resource(s)	
(clock clock rise edge)	(r) 10.000	10.000			
	(r) 0.000	10.000	Site: N15	clk	
net (fo=0)	0.000	10.000		clk	
<a href="#">IBUF (Prop_ibuf I O)</a>	(r) 0.814	10.814	Site: N15	clk_IBUF_inst/O	
net (fo=1, routed)	1.911	12.725		clk_IBUF	
<a href="#">BUFG (Prop_bufg I O)</a>	(r) 0.091	12.816	Site: BUF...TRL_X0Y0	clk_IBUF_BUFG_inst/O	
net (fo=99, routed)	1.515	14.331		clk_IBUF_BUFG	
FDRE			Site: SLICE_X10Y102	ff2_reg[14]/C	
clock pessimism	0.337	14.668			
clock uncertainty	-0.035	14.633			
<a href="#">FDRE (Setup fdre_C_R)</a>	-0.524	14.109	Site: SLICE_X10Y102	ff2_reg[14]	
<b>Required Time</b>		14.109			

Рисунок 2.3 – Данные о времени распространения сигналов

Из таблицы «Source Clock Path» получим значение  $T_{scd}$ , равное 4,782. Просуммировав значения столбца «Incr (ns)» таблицы «Data Path», получим значение  $T_{dd}$ , равное 9,659. Просуммировав значения столбца «Incr (ns)» с 3 по 7 строки таблицы «Destination Clock Path», получим значение  $T_{dcd}$ , равное 4,331.



Значение  $T_{su}$ , равное 0,524, представлено в предпоследней строке таблицы «Destination Clock Path».

Подставим данные значения в Формулу 2.1. Получим значение Slack в Формуле 2.2.

$$Slack = 4,331 + 10 - 0,524 - 4,782 - 9,659 = -0,634 \quad (2.2)$$

Вычисленный вручную Slack отличается от значения, рассчитанного в Vivado, на 0,302, потому что в Vivado дополнительно учитываются значения «clock pessimism» и «clock uncertainty».

### 2.3 Ручной расчёт показателя Slack по Hold

Slack по Hold рассчитывается по Формуле 2.3.

$$Slack = T_{scd} + T_{dd} - T_{dcd} - T_h \quad (2.3)$$

где  $T_{dcd}$  – время распространения синхросигнала до второго триггера,

$T_{clk}$  – период синхросигнала,

$T_h$  – время Hold триггера,

$T_{scd}$  – время распространения синхросигнала до первого триггера,

$T_{dd}$  – время распространения данных.

Посчитаем показатель Slack для одиннадцатого пути по данным, предоставленным в Vivado (Рисунки 2.4 и 2.5).

Source Clock Path					
Delay Type	Incr (ns)	Path (ns)	Location	Netlist Resource(s)	
(clock clock rise edge)	(r) 0.000	0.000			
	(r) 0.000	0.000	Site: N15	clk	
net (fo=0)	0.000	0.000		clk	
<a href="#">IBUF (Prop ibuf I O)</a>	(r) 0.177	0.177	Site: N15	clk_IBUF_inst/O	
net (fo=1, routed)	0.640	0.817		clk_IBUF	
<a href="#">BUFG (Prop bufg I O)</a>	(r) 0.026	0.843	Site: BUF...TRL_X0Y0	clk_IBUF_BUFG_inst/O	
net (fo=99, routed)	0.574	1.416		clk_IBUF_BUFG	
FDRE			Site: SLICE_X13Y99	ffb_reg[7]/C	
Data Path					
Delay Type	Incr (ns)	Path ...	Location	Netlist Resource(s)	
<a href="#">FDRE (Prop fdre C Q)</a>	(r) 0.141	1.557	Site: SLICE_X13Y99	ffb_reg[7]/Q	
net (fo=1, routed)	0.157	1.714		ffb[7]	
<a href="#">LUT2 (Prop lut2 I1 O)</a>	(r) 0.045	1.759	Site: SLICE_X14Y98	ff2[12]_i_6/O	
net (fo=1, routed)	0.000	1.759		ff2[12]_i_6_n_0	
<a href="#">CARRY4 (Prop ...y4 S[3] O[3])</a>	(r) 0.064	1.823	Site: SLICE_X14Y98	ff2_reg[12]_i_4/O[3]	
net (fo=5, routed)	0.121	1.944		ff210_in[7]	
<a href="#">LUT5 (Prop lut5 I3 O)</a>	(r) 0.111	2.055	Site: SLICE_X13Y99	ff2[10]_i_2/O	
net (fo=4, routed)	0.259	2.314		ff2[10]_i_2_n_0	
<a href="#">LUT6 (Prop lut6 I5 O)</a>	(r) 0.045	2.359	Site: SLI...X13Y103	ff2[7]_i_1/O	
net (fo=1, routed)	0.000	2.359		ff2[7]_i_1_n_0	
FDRE			Site: SLI...X13Y103	ff2_reg[7]/D	
<b>Arrival Time</b>		2.359			

Рисунок 2.4 – Данные о времени распространения сигналов

Destination Clock Path					
Delay Type	Incr (ns)	Path ...	Location	Netlist Resource(s)	
(clock clock rise edge)	(r) 0.000	0.000			
	(r) 0.000	0.000	Site: N15	clk	
net (fo=0)	0.000	0.000		clk	
<a href="#">IBUF (Prop ibuf I O)</a>	(r) 0.365	0.365	Site: N15	clk_IBUF_inst/O	
net (fo=1, routed)	0.695	1.060		clk_IBUF	
<a href="#">BUFG (Prop bufg I O)</a>	(r) 0.029	1.089	Site: BUF...TRL_X0Y0	clk_IBUF_BUFG_inst/O	
net (fo=99, routed)	0.841	1.931		clk_IBUF_BUFG	
FDRE			Site: SLICE_X13Y103	ff2_reg[7]/C	
clock pessimism	-0.246	1.684			
<a href="#">FDRE (Hold fdre C D)</a>	0.091	1.775	Site: SLICE_X13Y103	ff2_reg[7]	
<b>Required Time</b>		1.775			

Рисунок 2.5 – Данные о времени распространения сигналов

Из таблицы «Source Clock Path» получим значение  $T_{scd}$ , равное 1,416. Просуммировав значения столбца «Incr (ns)» таблицы «Data Path», получим значение  $T_{ad}$ , равное 0,943. Просуммировав значения столбца «Incr (ns)» с 3 по 7 строки таблицы «Destination Clock Path», получим значение  $T_{dcd}$ , равное 1,931.

Значение  $T_h$ , равное 0,091, представлено в предпоследней строке таблицы «Destination Clock Path».

Подставим данные значения в Формулу 2.3. Получим значение Slack в Формуле 2.4.

$$Slack = 1,416 + 0,943 - 1,931 - 0,091 = 0,337 \quad (2.4)$$

Вычисленный вручную Slack отличается от значения, рассчитанного в Vivado, на 0,247, потому что в Vivado дополнительно учитываются значение «clock pessimism».

## 2.4 Гистограммы Slack по Setup и Hold

Гистограммы Slack по Setup и Hold представлены на Рисунке 2.6 и Рисунке 2.7 соответственно.

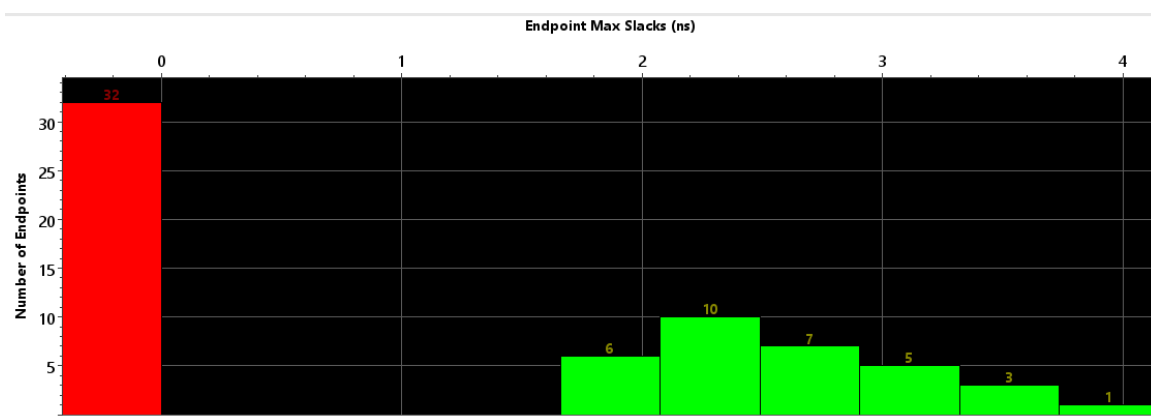


Рисунок 2.6 – Гистограмма Slack по Setup

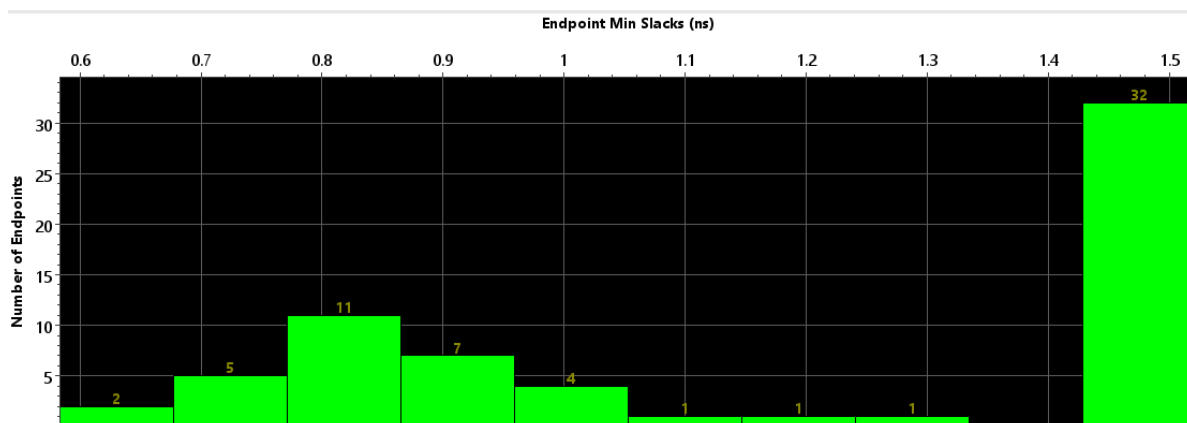


Рисунок 2.7 – Гистограмма Slack по Hold

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе практической работы произведен расчёт для параметров WNS (Worst Negative Slack) и WHS (Worst Hold Slack) при анализе по Setup и по Hold для спроектированного устройства в САПР Vivado, произведен ручной расчет тех же параметров, рассмотрены Slack гистограммы для анализа по Setup и по Hold, в соответствии с персональным вариантом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методические указания по ПР № 2 — URL: [https://online-edu.mirea.ru/pluginfile.php?file=%2F1225653%2Fmod\\_assign%2Fintroattachment%2F0%2F%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_2.pptx&forcedownload=1](https://online-edu.mirea.ru/pluginfile.php?file=%2F1225653%2Fmod_assign%2Fintroattachment%2F0%2F%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_2.pptx&forcedownload=1) (Дата обращения: 12.03.2024).

2. Смирнов С.С. Информатика [Электронный ресурс]: Методические указания по выполнению практических и лабораторных работ / С.С. Смирнов — М., МИРЭА — Российский технологический университет, 2018. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

3. Тарасов И.Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 538 с.: ил.