**Основы статического временного анализа.**

**Часть 2.1: System Synchronous** **Input Delay Constraint.**

**Введение.**

Данная статья является продолжением серии статей по временным ограничениям в FPGA. Главная цель – познакомить начинающих разработчиков с основами статического временного анализа. Далее будет рассмотрен анализ при передачи данных в FPGA из внешнего устройства и показано два способа создания ограничений для входных сигналов.

1. **Цель временных ограничений для входных сигналов.**

В цифровых синхронных устройствах данные передаются между двумя триггерами, которые разделены комбинационной логикой. В предыдущей статье был представлен временной анализ для случая, когда оба триггера располагаются внутри FPGA [1]. Предполагается, что читатель уже знаком с такими понятиями, как ограничения на максимальное и минимальное время распространения, время установки и удержания триггера, *Slack* и т.д.

Обычно обрабатываемые данные пересылаются между FPGA и другими микросхемами, расположенными на той же печатной плате. Эти пути передачи также должны удовлетворять ограничениям по *Setup* и *Hold*, чтобы плата как единое целое могла работать корректно. Поэтому практически всегда для входных сигналов FPGA требуется вводить временные ограничения.

В качестве примера будем рассматривать устройство, схема которого показана рисунке 1. Помимо FPGA на плате присутствует микросхема 74HC595 [2], которая представляет из себя обычный регистр сдвига и часто поставляется в составе обучающих наборов для Arduino. Также на плате располагается генератор (OSC), формирующий тактовый сигнал   
для FPGA и 74HC595.

Данная конфигурация, при которой тактовый сигнал для источника и приемника данных поступает от внешнего генератора, называется System Synchronous. Другой вариант, когда источник помимо данных также формирует тактовый сигнал, называется Source Synchronous.

На рисунке 1 отмечены только те ножки микросхемы 74HC595, которые будут рассматриваться в последующем. Ножка SERсоответствует входу регистра сдвига, ножка QH’ – его выходу. Регистр сдвига тактируется сигналом, который поступает на ножку SRCLK. В дальнейшем микросхему 74HC595 для краткости будем иногда называть Device*.* Далее будет представлен временной анализ для передачи данных с выхода 74HC595 на вход FPGA. На рисунке 1 данный путь отмечен красным цветом.

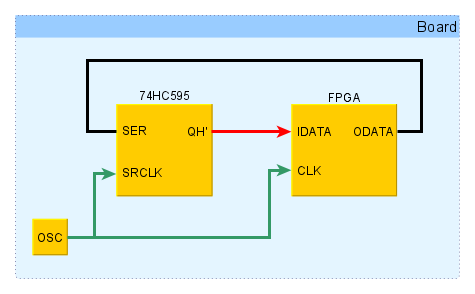


Рисунок 1. Схема соединения устройств на плате.

Также пусть в FPGA загружен простой проект, состоящий из двух триггеров и двух LUT, которые реализуют логическое отрицание. Схема проекта показана на рисунке 2.

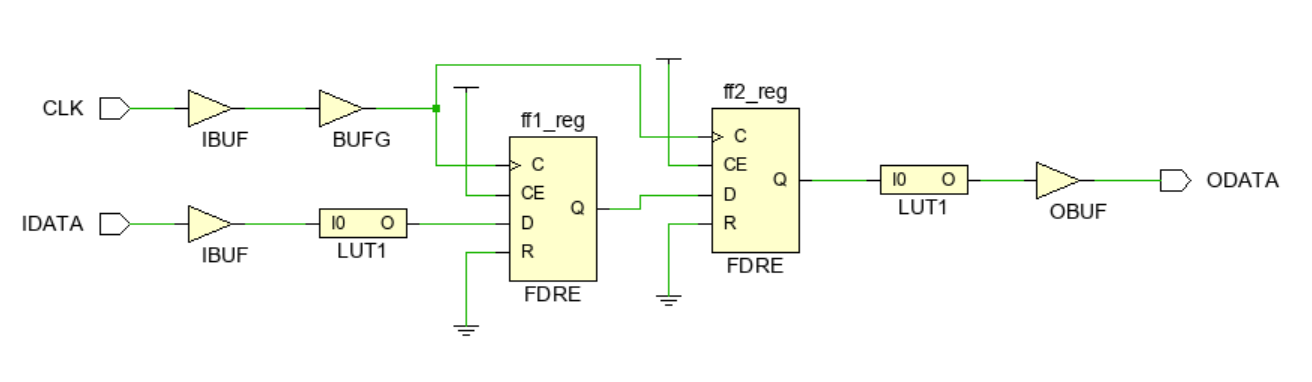


Рисунок 2. Схема FPGA проекта.

Описание проекта на System Verilog представлено ниже:

module top (

input  logic CLK,

    input  logic IDATA,

    output logic ODATA

);

    logic ff1, ff2;

    always\_ff@(posedge CLK)

       ff1 <= ~IDATA;

    always\_ff@(posedge CLK)

       ff2 <= ff1;

   assign ODATA = ~ff2;

endmodule

Данный проект не имеет какой-либо практической ценности, однако на его примере можно продемонстрировать, как проводится временной анализ для входных сигналов.

1. **Задержки при временном анализе для входных сигналов.**

Анализ передачи данных между Device и FPGA мало отличается от случая, рассмотренного в [1] для двух триггеров внутри FPGA. Особенностью является то, что запускающий триггер располагается в одном устройстве, а защелкивающий в другом. На рисунке 3 показан анализируемый путь, на который нанесены задержки для данных и тактового сигнала.

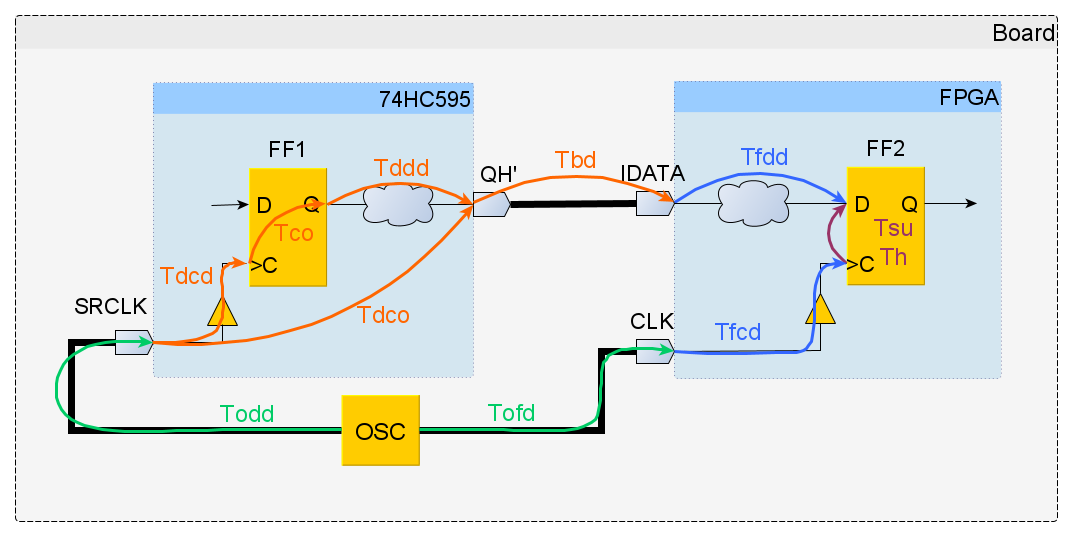


Рисунок 3. Путь с задержками для входных данных и тактового сигнала.

Ниже даны определения задержек, представленных на рисунке 3.

* *Todd* (***O****sc to* ***D****evice* ***D****elay*) – задержка тактового сигнала от генератора до ножки SRCLK микросхемы 74HC595;
* *Tofd* (***O****sc to* ***F****PGA* ***D****elay*) – задержка тактового сигнала от генератора до ножки CLK FPGA;
* *Tdcd* (***D****evice* ***C****lock* ***D****elay*) – задержка тактового сигнала от ножки SRCLK микросхемы 74HC595 до тактового входа запускающего триггера;
* *Tco* (***C****lock to* ***O****utput*) – интервал времени между приходом фронта на тактовый вход триггера и появлением данных на его выходе Q;
* *Tddd* (***D****evice* ***D****ata* ***D****elay*) – задержка распространения данных от запускающего триггера до ножки QH’ микросхемы 74HC595;
* *Tbd* (***B****oard* ***D****elay*) – задержка распространения данных по дорожкам платы между микросхемой 74HC595 и FPGA;
* *Tfcd* (***F****PGA* ***C****lock* ***D****elay*) – задержка тактового сигнала от ножки CLK FPGA до тактового входа защелкивающего триггера;
* *Tfdd* (***F****PGA* ***D****ata* ***D****elay*) – задержка распространения данных от ножки IDATA FPGA до защелкивающего триггера;
* *Tsu* (***S****et****U****p time*) – время установки триггера;
* *Th* (***H****old time*) – время удержания триггера.

Период тактового сигнала будем обозначать *Tclk*. Оранжевым и зеленым цветом на рисунке 3 представлены задержки для участков пути, которые располагаются вне FPGA. Данные задержки необходимо указать временному анализатору Vivado.

1. **Максимальное время распространения.**

Для начала рассмотрим, каким образом выполняется анализ для проверки ограничения на максимальное время распространения (*Setup*). Напомним, что временной анализ по *Setup* всегда проводится для самого пессимистичного случая, которому соответствует максимально задержанный запускающий фронт, максимально медленное распространение данных и максимально быстро распространяющийся защелкивающий фронт.

Сначала найдем фактическое время прибытия данных ко входу защелкивающего триггера, расположенного внутри FPGA, считая, что запускающий фронт появляется в нулевой момент времени. Уравнения для расчета представлены ниже (см. рисунок 3):

* Время прибытия фронта к запускающему триггеру внутри Device (***S****ource* ***С****lock* ***A****rrival time*):
* Задержка распространения данных (***D****ata* ***D****elay*):
* Время прибытия данных на вход защелкивающего триггера внутри FPGA (***D****ata* ***A****rrival time*):

Подставив (1) и (2) в уравнение для , получим:

Введем обозначение:

Задержка *Tdco* соответствует интервалу времени между приходом фронта на тактовый вход SRCLK микросхемы 75HC595 и появлением данных на ее выходе QH’.Уравнение для ***D****ata* ***A****rrival time* можно записать в виде:

Теперь вычислим требуемое время прибытия данных. Защелкивающий фронт появляется через один такт после запускающего фронта, поэтому ко времени прибытия фронта добавлен один период тактового сигнала.

* Время прибытия фронта к защелкивающему триггеру внутри FPGA (***D****estination* ***C****lock* ***A****rrival time*):
* Требуемое время прибытия данных (***D****ata* ***R****equired time*):

В предыдущем уравнении учитывается, что данные на входе защелкивающего триггера должны быть стабильны в течении времени *Tsu* до прихода фронта тактового сигнала.

При анализе по *Setup* величина запаса (*Slack*) вычисляется по формуле:

Если *Slack* принимаетотрицательное значение, то это указывает, что данные приходят на вход защелкивающего триггера позже, чем требуется. То есть,ограничение по *Setup* нарушено. Используя ранее полученные уравнения, можно записать полное выражение для расчета *Slack*:

1. **Минимальное время распространения.**

Теперь рассмотрим, как выполняется анализ для проверки ограничения на минимальное время распространения (*Hold*). При анализе по *Hold* считается, что задержки для запускающего фронта и данных имеют минимальное значение, а для защелкивающего фронта – максимальное.

Расчет фактического времени прибытия данных представлен ниже:

* Время прибытия фронта к триггеру внутри Device (***S****ource* ***С****lock* ***A****rrival time*):
* Задержка распространения данных (***D****ata* ***D****elay*):
* Время прибытия данных к триггеру внутри FPGA (***D****ata* ***A****rrival time*):

где, как и ранее,

Далее представлены уравнения для вычисления требуемого времени прибытия данных:

* Время прибытия фронта к защелкивающему триггеру внутри FPGA (***D****estination* ***C****lock* ***A****rrival time*):
* Требуемое время прибытия данных (***D****ata* ***R****equired time*):

Напомним, что защелкивающий фронт для предыдущих данных появляется в тот же момент времени, что и запускающий фронт для следующих данных. По этой причине в задержке распространения *Tdca* отсутствует слагаемое, равное периоду тактового сигнала. Также отметим, что слагаемое *Th* в уравнении для *Tdr\_max* учитывает, что данные не должны изменяться в течении времени удержания после защелкивающего фронта.

Уравнение для расчета *Slack* при анализе по *Hold* имеет вид:

Используя полученные выше результаты, выражение для *Slack* можно представить в виде:

1. **Первый способ создания временных ограничения в Vivado.**

Перейдем от теории к практике и рассмотрим первый способ создания временных ограничений для входных сигналов. Для начала разберемся с ограничениями для анализа по *Setup*.

В уравнении (1) слагаемые, выделенные зеленым и оранжевым цветом, неизвестны анализатору Vivado, так как они описывают задержки для участков пути вне FPGA. Также неизвестным является значение периода *Tclk*. Создание ограничений на период тактового сигнала с помощью команды create\_clock было рассмотрено в [1].

Для определенности будем считать, что напряжение источника питания микросхемы 74HC595 равно 4.5 В. Из таблицы 6.6 datasheet для 74HC595 [2] находим, что в этом случае максимальная рабочая частота равна 31 МГц. Пусть требуется, чтобы плата на рисунке 1 могла работать при частота тактового генератора (OSC) равной 10 МГц. Тогда ограничение на период тактового сигнала можно записать в виде:

# ограничение на период тактового сигнала

create\_clock -period 100 -name clk\_10MHz [get\_ports CLK]

Данная команда объявляет тактовый сигнал clk\_10MHz с периодом 100 нс, который поступает в FPGA через ножку CLK.

Объединим все оставшиеся неизвестные слагаемые из уравнения (1) в одну переменную *input\_delay\_max*. Тогда выражение для *Slack* можно переписать в виде:

где

В уравнении (3)слагаемые *Todd\_max*, *Tofd\_min* и *Tbd\_max* описывают задержки, обусловленные распространением сигнала по дорожкам печатной платы. Их значения зависят от многих факторов, например, материала подложки, длины дорожек, типа дорожек (полосковые,   
микрополосковые и т.д.).

Для каждого типа дорожек существуют приближенные выражения для вычисления скорости распространения сигнала. Зная скорость сигнала и длину дорожки, можно оценить задержку распространения. Примеры приближенных расчетов для различных типов дорожек можно найти в [3].

Будем считать, что мы смогли оценить минимальные и максимальные задержки распространения сигналов по дорожкам печатной платы. В качестве примера примем следующие значения в наносекундах: *Tbd\_max* = 0.6,  
 *Tbd\_min* = 0.5, *Todd\_max* = 0.4, *Todd\_min* = 0.2, *Tofd\_max* = 0.3 и   
*Tofd\_min* = 0.2. Значения задержек можно указать в файле с временными ограничениями (xdc-файл) в следующем виде:

# минимальное и максимальное время распространения данных по

# дорожкам платы

set Tbd\_max 0.6

set Tbd\_min 0.5

# минимальное и максимальное время распространения тактового сигнала

# от генератора до микросхемы 74HC595

set Todd\_max 0.4

set Todd\_min 0.2

# минимальное и максимальное время распространения тактового сигнала

# от генератора до FPGA

set Tofd\_max 0.3

set Tofd\_min 0.2

Рассмотрим задержку *Tdco* из уравнения (3), которая соответствует интервалу времени между приходом фронта на тактовый вход SRCLK микросхемы 75HC595 и появлением данных на ее выходе QH’. Ее значение можно получить из таблицы 6.7 datasheet для 74HC595 [2]. Данная задержка обозначена как *tpd* и при напряжении питания 4.5 В может изменяться от 17 до 32 нс. Эти значения также записываются в xdc-файл:

# задержка распространения между приходом тактового сигнала и

# появлением данных на выходе QH' микросхемы 74HC595

set Tdco\_max 32

set Tdco\_min 17

Теперь можно создать временное ограничение на входной сигнал для анализа по *Setup*. Для этого в файл с ограничениями нужно внести следующие команды [4]:

# временное ограничение для входного сигнала IDATA

set idelay\_max [expr $Todd\_max - $Tofd\_min + $Tdco\_max + $Tbd\_max]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz -max $idelay\_max [get\_ports IDATA];

В первой строке объявлена переменная idelay\_max, значение которой приравнивается *input\_delay\_max* из уравнения (3). Далее с помощью команды set\_input\_delay создается ограничение для входного сигнала.   
Опция -max $idelay\_max задает задержку для анализа по *Setup*. Конструкция [get\_ports IDATA] указывает, что ограничение накладывается на входной сигнал, поступающий в FPGA через ножку IDATA.

Важно отметить, что анализатору Vivado необходимо указать, каким сигналом тактируется запускающий триггер, так как он находится вне FPGA. Это делается с помощью опции -clock clk\_10MHz. Данный тактовый сигнал был создан ранее с помощью команды create\_clock. Защелкивающий триггер располагается внутри FPGA, поэтому временной анализатору его тактовый сигнал известен.

Аналогичным образом создаются ограничения для анализа по *Hold*. Объединив все неизвестные слагаемые в уравнении (2) в одну переменную, выражение для *Slack* можно записать в виде:

где

Команды, которые требуется добавить в xdc-файл, представлены ниже:

# временное ограничение для входного сигнала IDATA

set idelay\_min [expr $Todd\_min - $Tofd\_max + $Tdco\_min + $Tbd\_min]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz -min $idelay\_min [get\_ports IDATA];

Как и ранее, сначала объявляется переменная, значение которой равно *input\_delay\_min*, после чего с помощью команды set\_input\_delay создается временное ограничение. Опция –min указывает, что ограничение предназначено для проведения анализа по *Hold*.

Полное содержимое xdc-файла представлено ниже:

# задержка распространения между приходом тактового сигнала и

# появлением данных на выходе QH' микросхемы 74HC595

set Tdco\_max 32

set Tdco\_min 17

# минимальное и максимальное время распространения данных по

# дорожкам платы

set Tbd\_max 0.6

set Tbd\_min 0.5

# минимальное и максимальное время распространения тактового сигнала

# от генератора до микросхемы 74HC595

set Todd\_max 0.4

set Todd\_min 0.2

# минимальное и максимальное время распространения тактового сигнала # от генератора до FPGA

set Tofd\_max 0.3

set Tofd\_min 0.2

# ограничение на период тактового сигнала

create\_clock -period 100 -name clk\_10MHz [get\_ports CLK]

# временные ограничения для входного сигнала IDATA

set idelay\_max [expr $Todd\_max - $Tofd\_min + $Tdco\_max + $Tbd\_max]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz -max $idelay\_max [get\_ports IDATA];

set idelay\_min [expr $Todd\_min - $Tofd\_max + $Tdco\_min + $Tbd\_min]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz -min $idelay\_min [get\_ports IDATA];

Рассмотрим, как введенные ограничения будут отражены во временных отчетах, полученных после размещения и трассировки проекта. На рисунке 4 представлен раздел Summary для анализа по *Setup*, в котором указан источник сигнала (ножка IDATA), защелкивающий триггер (ff1\_reg), задержка данных внутри FPGA (Data Path Delay) и количество уровней логики   
(Logic Levels). Также можно увидеть полученный *Slack*, расфазировку   
(Clock Path Skew) и неопределенность (Clock Uncertainty) тактового сигнала.

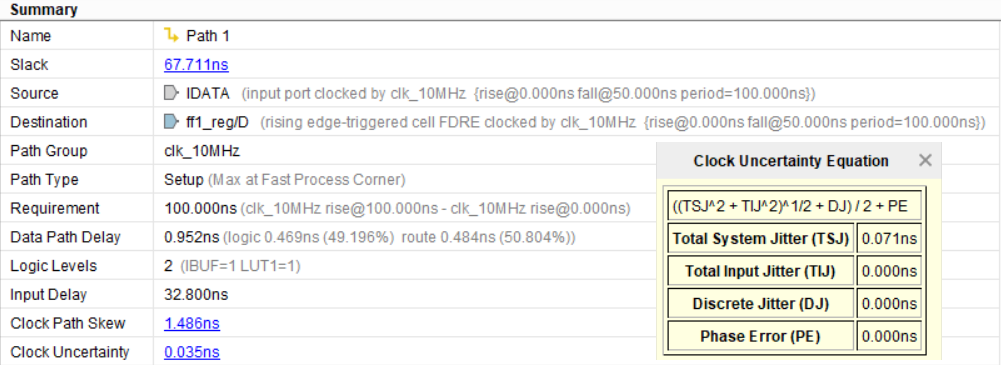
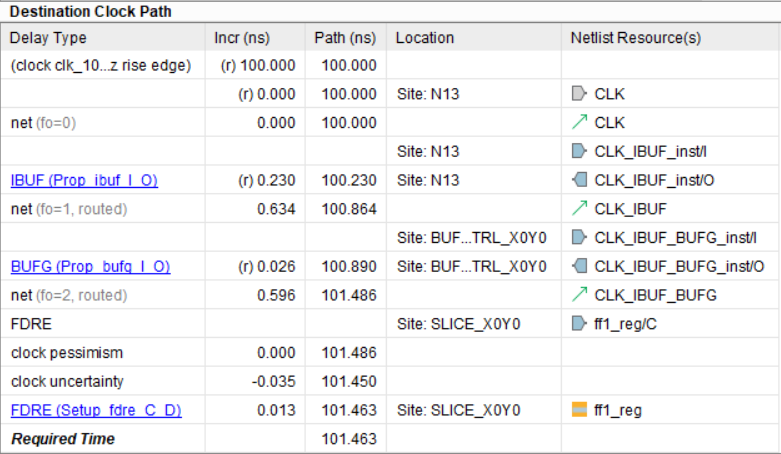
**

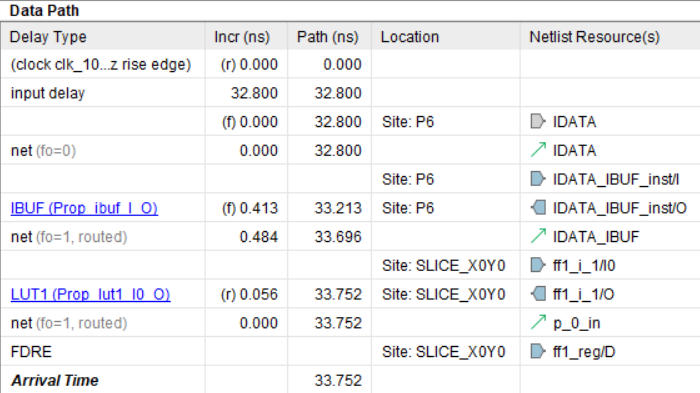
Рисунок 4. Общие сведения о входном пути (*Setup*).

На рисунках 5 и 6 показаны задержки для защелкивающего фронта и данных соответственно. Представленные результаты можно интерпретировать следующим образом. Из рисунка 5 получаем, что защелкивающий фронт приходит на ножку CLK FPGA в момент времени равный 100 нс. Далее он распространяется через входной и тактовый буферы и через 1.486 нс попадает на защелкивающий триггер. Учитывая время установки и неопределенность тактового сигнала, получаем, что данные должны достигнуть входа защелкивающего триггера через 101.463 нс.

**

Рисунках 5. Расчет требуемого времени прибытия данных (*Setup*).

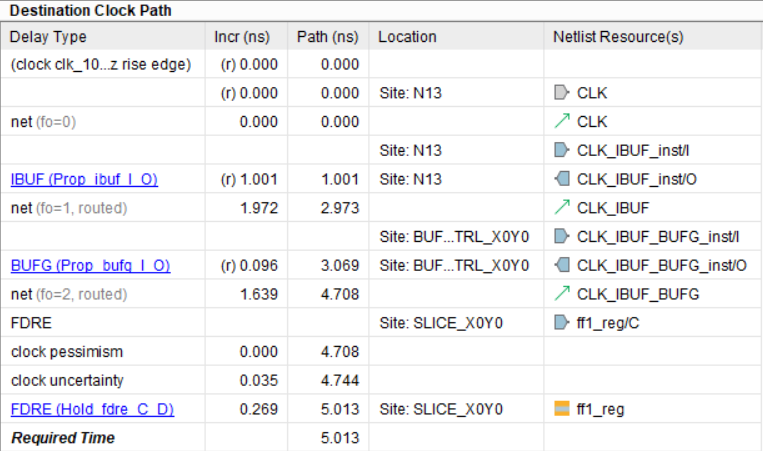
Чтобы попасть на ножку FPGA в момент времени 100 нс,   
защелкивающий фронт должен быть сформирован на выходе тактового генератора в 100 - *Tofd\_min* = 99.8 нс. Запускающий фронт появляется на один период раньше, то есть, когда время равно -0.2 нс. Через *Todd\_max* = 0.4 нс запускающий фронт дойдет до ножки SRCLK микросхемы 74HC595 и начнет передачу данных. Спустя еще *Tdco\_max + Tbd\_max* = 32.6 нс данные достигнут ножки IDATA FPGA. Это произойдет в -0.2 + 0.4 + 32.6 = 32.8 нс, что соответствует задержке *input delay* во второй строке рисунка 6.

**

Рисунках 6. Расчет фактического времени прибытия данных (*Setup*).

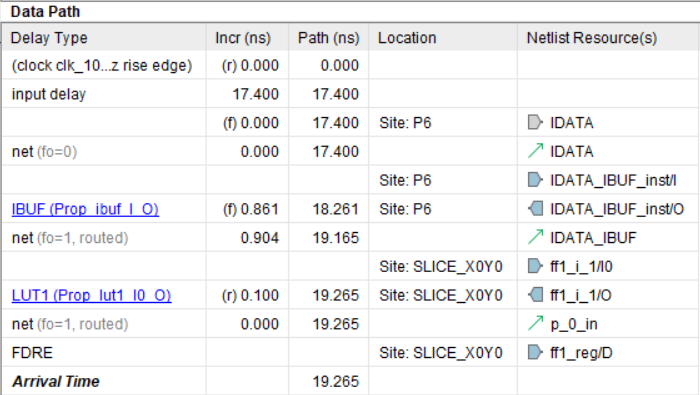
Внутри FPGA данные проходят через входной буфер и LUT и попадают на вход защелкивающего триггера в момент времени 33.752 нс. Отсюда получаем, что *Slack* равен 101.463 - 33.752 = 67.711 нс.

Ту же картину получаем для анализа по *Hold*. На рисунке 7 можно увидеть, что защелкивающий фронт достигает FPGA в нулевой момент времени. С учетом задержки распространения это означает, что он появился на выходе генератора на *Tofd\_max* нс раньше. Для анализа по *Hold* запускающий и защелкивающий фронты появляются одновременно,   
поэтому на вход SRCLK микросхемы 74HC595 фронт приходит в момент времени -*Tofd\_max* + *Todd\_min* = -0.3 + 0.2 = -0.1 нс.

**

Рисунках 7. Расчет требуемого времени прибытия данных (*Hold*).

Спустя *Tdco\_min* нс данные появятся на выходе QH’ микросхемы 74HC595. Далее они будут распространятся по дорожке платы в течении *Tbd\_min* нс и попадут на ножку IDATA FPGA. Это произойдет в момент времени -0.1 + 17 + 0.5 = 17.4 нс, что соответствует задержке *input delay* на рисунке 8.

**

Рисунках 8. Расчет фактического времени прибытия данных (*Hold*).

Данный подход прост тем, что достаточно представить все неизвестные задержки в виде одной величины *input\_delay*. Однако, как можно было увидеть, это приводит к тому, что интерпретация полученных результатов требует определенных усилий.

1. **Второй способ создания временных ограничения в Vivado.**

Теперь рассмотрим второй способ создания временных ограничений для входных сигналов. В xdc-файле можно отдельно указывать задержки распространения тактового сигнала по дорожкам печатной платы. Для этого используется команда set\_clock\_latency [4]:

# ограничение на период тактового сигнала, поступающего в FPGA

create\_clock -period 100 -name clk\_10MHz [get\_ports CLK]

# задержки распространения тактового сигнала от генератора до FPGA

set\_clock\_latency -source -early $Tofd\_min [get\_clocks clk\_10MHz]

set\_clock\_latency -source -late $Tofd\_max [get\_clocks clk\_10MHz]

C помощью команды create\_clock создается ограничение на период тактового сигнала, который поступает на ножку CLK FPGA. Далее первая команда set\_clock\_latency с опцией –early устанавливает значение минимальной задержки распространении равным *Tofd\_min*. Конструкция [get\_clocks clk\_10MHz] указывает тактовый сигнал, для которого формируются задержки.

Вторая команда set\_clock\_latency с опцией –late задает максимальное время распространения. Опция -source означает, что задержка указывается от источника тактового сигнала до ножки FPGA.

Так как задержка распространения до микросхемы 74HC595 отличаются от задержки до FPGA, в файле с временными ограничениями требуется создать еще один тактовый сигнал:

# ограничение на период виртуального тактового сигнала, поступающего

# в микросхему 74HC595

create\_clock -period 100 -name clk\_10MHz\_Dev

# задержки распространения тактового сигнала от генератора до

# микросхемы 74HC595

set\_clock\_latency -source -early $Todd\_min [get\_clocks clk\_10MHz\_Dev]

set\_clock\_latency -source -late $Todd\_max [get\_clocks clk\_10MHz\_Dev]

С помощью команды create\_clock создается тактовый сигнал с именем clk\_10MHz\_Dev и периодом 100 нс. Обратите внимание, что этот сигнал поступает только в микросхему 74HC595, поэтому команда get\_ports, указывающая ножку FPGA, не используется. Тактовый сигнал, который не попадает в FPGA, но присутствует на плате, называется виртуальным   
(virtual clock). Для виртуального сигнала clk\_10MHz\_Dev минимальная и максимальная задержки распространения заданы равными *Todd\_min*   
и *Todd\_max* соответственно.

Так как задержки для тактового сигнала уже установлены, уравнения для *input\_delay\_max* и *input\_delay\_min* упростятся и будут содержать только задержки распространения данных:

Временные ограничения для входного сигнала создаются с помощью команды set\_input\_delay в виде:

# временные ограничения для входного сигнала IDATA

set idelay\_max [expr $Tdco\_max + $Tbd\_max]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz\_Dev -max $idelay\_max [get\_ports IDATA];

set idelay\_min [expr $Tdco\_min + $Tbd\_min]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz\_Dev -min $idelay\_min [get\_ports IDATA];

Опция -max указывает, что задержки предназначены для анализа по *Setup*, а опция -min – для анализа по *Hold*. Обратите внимание, что теперь запускающий триггер, расположенный внутри микросхемы 74HC595, тактируется виртуальным сигналом, поэтому опция –clock задана с сигналом clk\_10MHz\_Dev. Полное содержимое xdc-файла представлено ниже:

# задержка распространения между приходом тактового сигнала и появлением

# данных на выходе QH' микросхемы 74HC595

set Tdco\_max 32

set Tdco\_min 17

# минимальное и максимальное время распространения данных по

# дорожкам платы

set Tbd\_max 0.6

set Tbd\_min 0.5

# минимальное и максимальное время распространения тактового сигнала от

# генератора до микросхемы 74HC595

set Todd\_max 0.4

set Todd\_min 0.2

# минимальное и максимальное время распространения тактового сигнала от

# генератора до FPGA

set Tofd\_max 0.3

set Tofd\_min 0.2

# ограничение на период тактового сигнала, поступающего в FPGA

create\_clock -period 100 -name clk\_10MHz [get\_ports CLK]

# задержки распространения тактового сигнала от генератора до FPGA

set\_clock\_latency -source -early $Tofd\_min [get\_clocks clk\_10MHz]

set\_clock\_latency -source -late $Tofd\_max [get\_clocks clk\_10MHz]

# ограничение на период виртуального тактового сигнала, поступающего

# в микросхему 74HC595

create\_clock -period 100 -name clk\_10MHz\_Dev

# задержки распространения тактового сигнала от генератора до

# микросхемы 74HC595

set\_clock\_latency -source -early $Todd\_min [get\_clocks clk\_10MHz\_Dev]

set\_clock\_latency -source -late $Todd\_max [get\_clocks clk\_10MHz\_Dev]

# временные ограничения для входного сигнала IDATA

set idelay\_max [expr $Tdco\_max + $Tbd\_max]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz\_Dev -max $idelay\_max [get\_ports IDATA];

set idelay\_min [expr $Tdco\_min + $Tbd\_min]

set\_input\_delay -clock clk\_10MHz\_Dev -min $idelay\_min [get\_ports IDATA];

Рассмотрим, что изменилось во временных отчетах при использовании данного способа создания ограничений. На рисунке 9 представлены общие сведения о входном пути для анализа по *Setup*. В третьей строке указано, что теперь запускающий триггер, который формирует входные данные для FPGA, тактируется виртуальным сигналом clk\_100MHz\_Dev.

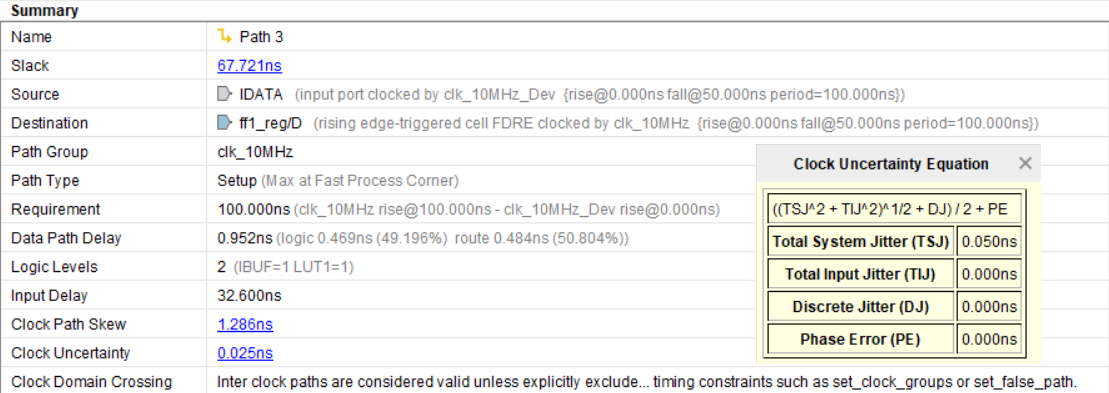
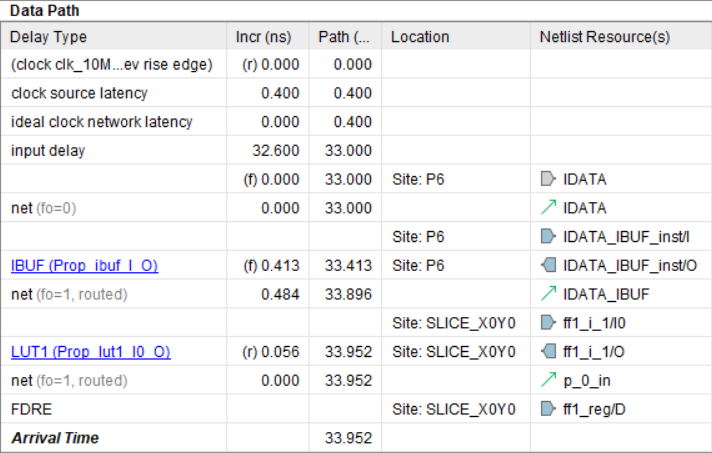
**

Рисунок 9. Общие сведения о входном пути (*Setup*).

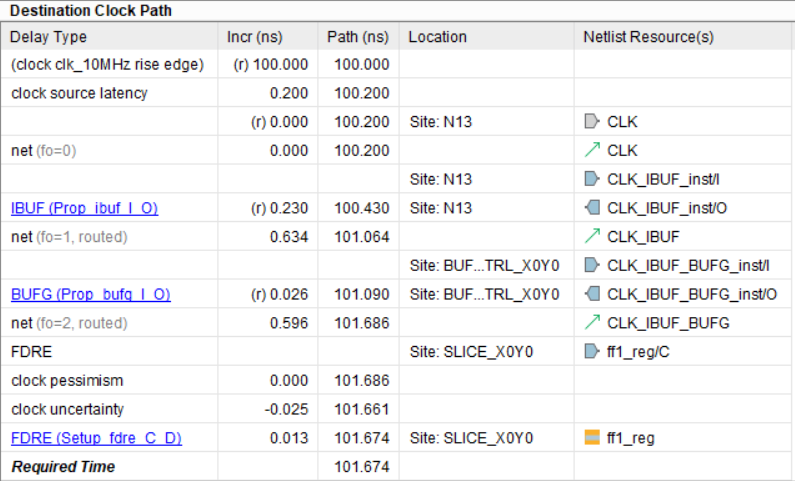
Расчет фактического времени прибытия данных показан на рисунке 10. Можно увидеть, что запускающий фронт появляется на выходе генератора в нулевой момент времени. Спустя 0.4 нс (clock source latency) тактовый сигнал поступает на микросхему 74HC595, что соответствует задержке *Todd\_max*.

**

Рисунках 10. Расчет фактического времени прибытия данных (*Setup*).

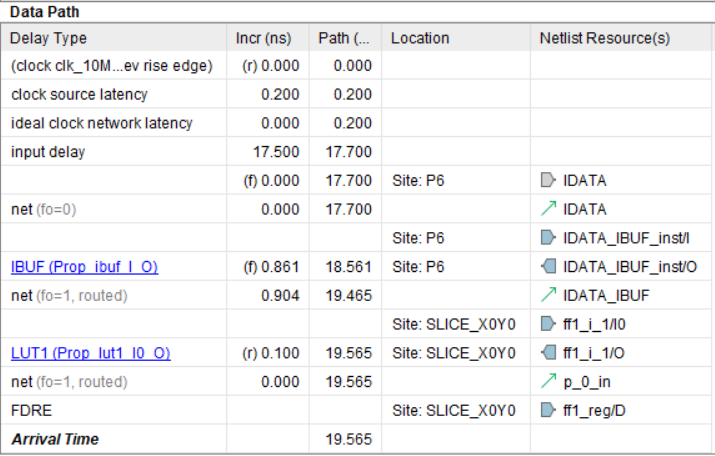
Еще через *Tdco\_max* + *Tbd\_max* = 32.6 нс данные достигнут ножки FPGA. Это произойдет в момент времени 32.6 + 0.4 = 33 нс. С учетом задержек распространения внутри FPGA фактическое время прибытия данных составит 33.952 нс.

Из рисунка 11 можно увидеть, что защелкивающий фронт тактового сигнала появляется на выходе генератора спустя один период в 100 нс. Через *Tofd\_min* = 0.2 нс этот фронт дойдет до FPGA, пройдет через входной и тактовый буферы и попадет на защелкивающий триггер. Требуемое время прибытия данных составляет 101.674 нс. Величина *Slack* для анализа по *Setup* равна 101.674 - 33.952 = 67.721 нс.

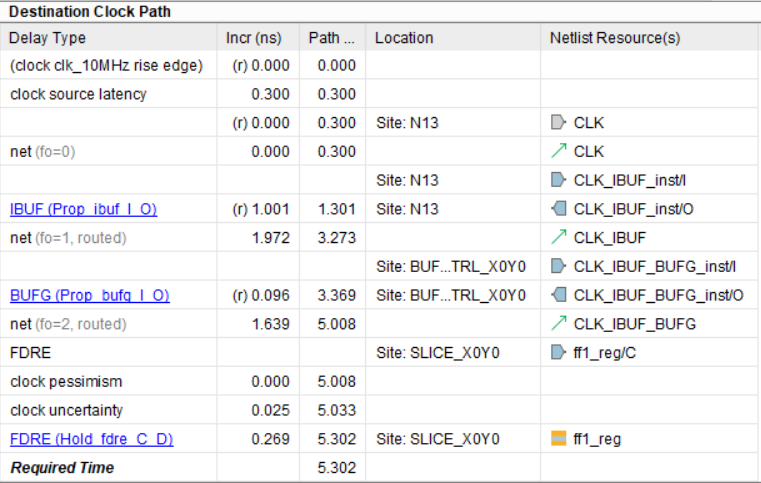
**

Рисунках 11. Расчет требуемого времени прибытия данных (*Setup*).

Для анализа по *Hold* на рисунке 12 можно увидеть, что запускающий фронт формируется на выходе генератора в нулевой момент времени. Через *Todd\_min* = 0.2 нс, он появится на входе SRCLK микросхемы 75HC595, а еще спустя *Tdco\_min* + *Tbd\_min* = 17.5 нс данные достигнут FPGA. В свои очередь защелкивающий фронт появится на выходе генератора также в нулевой момент времени и дойдет до ножки FPGA через *Tofd\_max* = 0.3 нс. Это можно увидеть на рисунке 13.

**

Рисунках 12. Расчет фактического времени прибытия данных (*Hold*).

**

Рисунках 13. Расчет требуемого времени прибытия данных (*Hold*).

Использование виртуальных тактовых сигналов для создания временных ограничений лучше отражает физическое распространение сигналов на плате и упрощает интерпретацию временных отчетов. Более того, данный способ рекомендуется Vivado. Если открыть вкладку XDC в Language Templates, то можно найти пример временных ограничений для входного сигнала:

# Rising Edge System Synchronous Inputs

#

# A Single Data Rate (SDR) System Synchronous interface is

# an interface where the external device and the FPGA use

# the same clock, and a new data is captured one clock cycle

# after being launched

#

# input      \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_            \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

# clock   \_\_|          |\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_|          |\_\_

#           |

#           |------> (tco\_min+trce\_dly\_min)

#           |------------> (tco\_max+trce\_dly\_max)

#         \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_      \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

# data    \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_XXXXXX\_\_\_\_\_ Data \_\_\_\_\_XXXXXXX

#

set input\_clock     <clock\_name>;  # Name of input clock

set tco\_max         0.000;         # Maximum clock to out delay

set tco\_min         0.000;         # Minimum clock to out delay

set trce\_dly\_max    0.000;         # Maximum board trace delay

set trce\_dly\_min    0.000;         # Minimum board trace delay

set input\_ports     <input\_ports>; # List of input ports

# Input Delay Constraint

set\_input\_delay -clock $input\_clock -max [expr $tco\_max + $trce\_dly\_max]

[get\_ports $input\_ports];

set\_input\_delay -clock $input\_clock -min [expr $tco\_min + $trce\_dly\_min]

[get\_ports $input\_ports];

В данном случае значение *input\_delay* задается в виде суммы задержек tco (*Tdco*) и trce\_dly (*Tbd*), что соответствует уравнениям (5). Заметим также, что если пренебречь задержками тактового сигнала *Todd* и *Tofd*, то оба представленных способа будет полностью эквивалентны.

1. **Несовпадающие значения *Slack*.**

В заключении рассмотрим следующий интересны момент. Можно увидеть, что значения *Slack*, представленные на рисунках 4 и 9, отличаются и равны 67.711 нс и 67.721 нс соответственно. Выясним из-за чего возникает разница в 0.01 нс. Рассмотрев временные отчеты, можно обнаружить, что причиной неодинаковых значений является неопределенность тактового сигнала (clock uncertainty).

Данная неопределенность обусловлена наличием джиттера. Значение общего джиттера *Ttsj* (***T****otal* ***S****ystem* ***J****itter*) рассчитывается по формуле [5]:

где *Tsjs* (***S****ystem* ***J****itter* ***S****ource*) – джиттер для запускающего триггера;   
*Tsjd* (***S****ystem* ***J****itter* ***D****estination*) – джиттер для защелкивающего триггера.

По умолчанию для тактовых сигналов, которые поступают в FPGA, значение *Tsj* принимается равным 0.05 нс. Тогда для первого способа создания временных ограничений получаем:

.

Неопределенность тактового сигнала равна 0.5 · *Ttsj* = 0.035 нс, что можно увидеть на рисунке 4.

Если используется второй способ, то один из тактовых сигналов является виртуальным, и его джиттер считается равным нулю. То есть в этом случае получаем, что *Tsj*s = 0 нс и *Ttsj* = *Tsjd* = 0.05 нс. Как показано на рисунке 9, неопределенность тактового сигнала равна 0.5 · *Ttsj* = 0.025 нс.

Чтобы значения *Slack* для обоих способов создания ограничений были равны, можно настроить величину джиттера с помощью команд set\_system\_jitter и set\_input\_jitter [4].

**Заключение.**

В данной статье был рассмотрен временной анализ для входных сигналов FPGA. Показан вывод уравнений статического временного анализа. Представлено два способа создания временных ограничений и рассказано о виртуальных тактовых сигналах. В следующей статье предполагается использовать тот же подход при рассмотрении временных ограничений для выходных сигналов – System Synchronous Output Delay.

**Ссылки.**

1. [Основы статического временного анализа. Часть 1: Period Constraint](https://fpga-systems.ru/static-timing-analysis-part-1-period-constraints)
2. [Datasheet 74HC595](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc595.pdf?ts=1634484237568&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
3. [How to Calculate Trace Length from Time Delay Value for High-speed Signals](https://www.zuken.com/en/blog/how-to-calculate-trace-length-from-time-delay-value-for-high-speed-signals/)
4. [Using Constraints (UG 903)](https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2013_1/ug903-vivado-using-constraints.pdf)
5. [Design Analysis and Closure Techniques (UG 906)](https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2017_3/ug906-vivado-design-analysis.pdf)