

НАДЕЖНОСТЬ ИЗБЫТОЧНОГО СИНХРОНИЗАТОРА ПРИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

В настоящей работе автор рассматривает результаты полемики в журнале IEEE Transaction on Computers [1-3], в которой оппоненты пришли к различным выводам относительно надежности избыточного синхронизатора. Известно, что надежность работы схем приема внешних сигналов для цифрового синхронного устройства имеет первостепенное значение. Одной из основных проблем здесь является привязка входных сигналов к тактовой последовательности, осуществляющей синхронизацию функционирования частей устройства, так как синхронное цифровое устройство обрабатывает правильно входные сигналы только в определенные интервалы времени. Синхронизатор — функциональный узел, который осуществляет сдвиг фронта входного сигнала к началу фазового периода (такта) и устанавливает длительность сигнала равным длительности периода, показан на рис. 1.

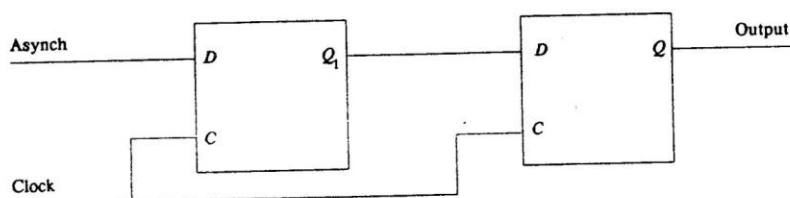


Рис. 1. Одиночный (простой) синхронизатор

Известной особенностью функционирования триггеров является возможность их зависания, или иначе метастабильная аномалия их поведения. Изменение сигналов на информационном входе триггера при действии фронта синхросигнала может быть причиной его аномального поведения. Более подробно это явление рассматривается в [4]. основополагающей теоретической работой в этом направлении является монография [5]. Метастабильным состояниям дискретных схем посвящены многие работы, из которых наиболее интересны [6, 7]. В [6] строится общая теория метастабильных состояний и рассматривается с этой точки зрения функционирование таких основных элементов цифровой схемотехники, как триггер-зашелка, триггер Шмитта. В [8] подчеркивается наличие электрически неустойчивых точек равновесия при переключении этих триггеров при рассмотрении вход-выходных характеристик составляющих их транзисторов.

Одним из способов повышения надежности систем является дублирование ее компонентов, т.е. увеличение избыточности ее аппаратной части для повышения ее отказоустойчивости. Вопросы влияния структуры системы на характеристики ее надежности при отказе некоторых ее частей рассматриваются в монографии [9].

Объектом дискуссии является избыточный синхронизатор, представленный на рис. 2. Комбинационная схема (КС) реализует булеву функцию $f(x_1, \dots, x_n)$, удовлетворяющую условиям $f(\bar{0}) = 0, f(\bar{1}) = 1$. Далее рассматривается функция f_M , которая является расширением f на широко используемый в логическом моделировании троичный алфавит $(0, M, 1)$, где M — неопределенное значение [10]. Определение ее осуществляется следующим образом. Пусть $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ — входной вектор с компонентами из набора значений $\{1, 0, M\}$, k из которых имеют значение M . Обозначим D_C множество из 2^k наборов $\bar{D} = (D_1, D_2, \dots, D_n)$, полученное из C путем замены значения компонента со значением M на 0 или 1. Пусть $B \in \{0, 1\}$, тогда $f_M(C) = B$, если $f(D) = B$ для всех D из D_C , и $f_M(C) = M$ в противном случае. В [1], рассматривая интервалы неопределенного значения на выходах входных триггеров избыточного синхронизатора (см. рис. 2), авторы показывают, что выход f комбинационной схемы имеет неопределенное значение X на интервале длиной $\Delta t > \min(t_2(k) - t_1(k))$, где $t_2(k), t_1(k)$ — границы диапазона неопределенного значения для выхода k -го триггера. В [2] автор из этого факта делает вывод, что вероятность метастабильного значения на выходе комбинационной схемы не меньше $\Delta t / T$ (T — длина тактового сигнала), и, следовательно, n -кратное дублирование входного сигнала не повышает надежность избыточного синхронизатора. Там же он объясняет противоположный результат оппонентов неправильно выбранной моделью функ-

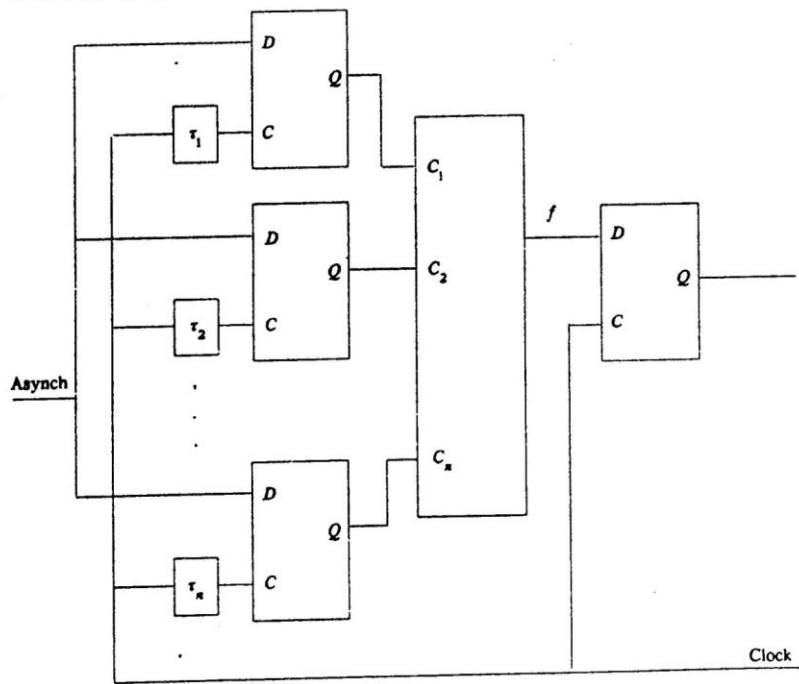


Рис. 2 Избыточный синхронизатор

ции распределения неопределенного значения на входах комбинационной схемы.

С другой стороны, оппоненты, используя модель Климана, показывают в [3], что вероятность метастабильного значения на выходе КС стремится к 0 с ростом n . Они также обращают внимание на то, что используемый при рассуждениях троичный алфавит статичен и не учитывает всей сложности переходного процесса. Поэтому под неопределенное значение N попадают нестабильные выбросы напряжения за границы логических значений 0 и 1. Влияние этих флуктуаций на результирующий выход комбинационной схемы избыточного синхронизатора учесть сложно и необходимо делать некоторые предположения. Сложность переходного процесса иллюстрирует рис. 5 в работе [6], авторы которой показывают, что вероятность метастабильной аномалии $P(M)$ может быть описана выражением

$$P(M) = P(\sup_s |V(s)| < V_T; t_d \leq t \leq T), \text{ т.е. для всех } s \quad |V(s)| < V_T.$$

Этим задача сводится к известной проблеме абсорбционного барьера в теории случайных процессов, рассматриваемой в [11].

Автор считает основной причиной неопределенного значения на выходе комбинационной схемы избыточного синхронизатора. Оппоненты, оперируя вероятностью метастабильного состояния выхода КС, не проводят разграничения между этим понятием, неразрывно связанным с метастабильным поведением (зависанием) триггеров, и понятием неопределенного значения, которое имеет более широкий объем. Неопределенное значение на выходе триггера (как и любого элемента) всегда имеет место при «нормальном» переходном процессе его переключения. Время переключения может затянуться при несоблюдении условий на характеристики входных сигналов (время предустановки и удержания). Это явление и вызывает употребление термина «метастабильный». Климан использует термин «metastable state» в применении к переходному процессу в общем. Поэтому свои результаты, полученные из моделей, в которых эти понятия не разделяются, оппоненты интерпретируют нечетко.

Необходимо учитывать, что наряду со статическими характеристиками функционирования цифровых элементов описывается динамическими характеристиками, как время перехода из состояния логической «0» в состояние логической «1» и обратно. Они обозначаются соответственно $t^{1,0}$ ($t^{0,1}$) [12, 13]. Этот переход в реальных устройствах не может быть мгновенным. В [3, стр. 1489] доказывалось, что вероятность метастабильного значения («probability of metastable failure») на выходе КС стремится к 0 с ростом n . Из эквивалентности понятий «метастабильное значение» и «неопределенное значение» следует парадоксальный вывод, что время переходного процесса на выходе КС стремится к 0, т.е. увеличивается ее быстроедействие. Именно это время «нормального» перехода с неопределенным значением выхода и является той частью неопределенного значения, которая не может быть меньше определенной величины, что и показывает Климан в работе [1]. В ней утверждается, что для стационарного закона функционирования преобразователя f_M время перехода системы из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние, эквивалентное времени перехода всех параметров, однозначно характе-

ризующих эти состояния, не меньше времени перехода любого из них, т.е. минимума времени переходов. Заметим, что нет запрета на существование преобразователей, у которых изменения выходов происходят быстрее, чем входы. Так, триггер Шмитта специально используется для обработки пологих фронтов, и переход на его выходе происходит быстрее, чем на входе.

Влияние возможного аномального пребывания выхода триггера в переходном процессе, обусловленное асинхронностью входных сигналов и невыполнением при этом требований к нормальному его функционированию, естественно можно уменьшить за счет дублирования входного сигнала в избыточном синхронизаторе. Именно это терминологически точно утверждается в [3]. Однако затем, как и Климан, не разделяя понятий «метастабильное состояние» и «неопределенное значение», считают этот результат, противоречащим выводам оппонента. Исходя из изложенного выше, автор считает, что различие параметров среды функционирования триггеров должно влиять на их ответную реакцию по отношению ко входному сигналу, и, следовательно, для избыточного синхронизатора имеет место обычное параллельное дублирование ненадежного канала. Это различие параметров среды функционирования триггеров в основном обусловлено сдвигом фронта входного сигнала относительно фронта синхронизирующей последовательности.

Поэтому уже двойное дублирование одиночного синхронизатора, т.е. использование двухвходового дизъюнктора (или конъюнктора) должно значительно понизить риск сбоя из-за метастабильного состояния триггеров. Следовательно, можно утверждать, что избыточный синхронизатор более надежен, чем одиночный, по отношению к возможному зависанию триггера приема асинхронного внешнего сигнала.

Необходимо подчеркнуть, что в работе рассматривается надежность избыточного синхронизатора с учетом только метастабильных состояний входящих в него триггеров и, следовательно, изложенные выводы не являются окончательными, так как не проводились разносторонние исследования его надежности в случае применения избыточности.

Автор считает уместным закончить статью цитатой из [14]: «математическое построение моделей превратилось в автокаталитический процесс, вследствие чего одни части системы моделируются преувеличенно точно, некоторые методики развиваются чрезмерно, а другие части системы из соображений математического удобства недопустимо сокращаются. Поэтому получаются противоположные выводы и парадоксальные результаты даже для достаточно простых систем».

О.І. Андрухін

НАДІЙНІСТЬ НАДМІРНОГО СИНХРОНІЗАТОРА ПРИ МЕТАСТАБІЛЬНИХ СТАНАХ ЙОГО КОМПОНЕНТІВ

Розглянуто проблему надійності надмірного синхронізатора при метастабільних станах його компонентів.

A.I. Andryukhin

RELIABILITY OR REDUNDANT SYNCHRONIZER
AT METASTABLE CONDITION OF ITS
COMPONENTS

Problem of reliability of redundant synchronizers at metastable condition of its components are considered.

1. Kleeman L., Cantoni A. Can redundancy and masking improve the performance of synchronizers? // IEEE Trans. on Computers. — 1986. — № 7. — P. 643–646.
2. Kleeman L. The jitter model for metastability and its application to redundant synchronizers // Ibid. — 1990. — № 7. — P. 930–942.
3. El-Atawy A., Naraghi Pour M. and Hedge M. Noise modelling effects in redundant synchronizers // Ibid. — 1993. — N 12. — P. 1487–1494.
4. Потемкин И.С. Функциональные узлы цифровой автоматики. — М: Энергоатомиздат, 1988. — 320 с.
5. Андронов А.А., Хайкин А.А., Витт С.Э. Теория колебаний. — М: Физматгиз, 1959. — 915 с.
6. Marino L.R. General theory of metastable operation // IEEE Trans. on Computers. — 1981. — N 2. — P. 107–115.
7. Kleeman L., Cantoni A. On the Unavoidability of Metastable Behavior in Digital Systems // Ibid. — 1987. — N 1. — P. 109–112.
8. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. — М: Высш. шк., 1991. — 622 с.
9. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, В.А. Заславский, И.А. Ушаков. — Киев.: Наук. думка, 1992. — 312 с.
10. Барашко А.С., Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Моделирование и тестирование дискретных устройств. — Киев: Наук. думка, 1992. — 285 с.
11. Дуб Дж. Вероятностные процессы. — М: Изд-во иностр. лит., 1965. — 605 с.
12. Соломатин Н.В. Логические элементы ЭВМ. — М: Высш. шк., 1987. — 144 с.
13. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. — М: Высш. шк., 1996.
14. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. — М: Мир, 1981. — 300 с.

Получено 25.09.96