

УДК 004.312.42

## УСТОЙЧИВЫЕ И НЕУСТОЙЧИВЫЕ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО RS-ТРИГГЕРА

**Жеребцов С.И.; Макаров И.А.**, к.ф.м.н., НИИ дальней радиосвязи,  
E-mail: makalu76@mail.ru, Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена модель функционирования RS-триггера и граф-схема его переходов, учитывающие наличие задержек срабатывания логических элементов, входящих в его схему. Продемонстрировано, что при общем количестве возможных состояний триггера равном шестнадцати в реальных условиях его применения при обеспечении удержания сигналов на входах триггера в течение времени, требуемого для перехода из одного устойчивого состояния в другое, количество рабочих состояний уменьшается до двенадцати, пять из которых устойчивые и семь неустойчивые.

**Ключевые слова:** асинхронный RS-триггер, граф-схема триггера, устойчивые и неустойчивые состояния триггера.

## THE STABLE AND UNSTABLE STATES OF THE ASYNCHRONOUS RS-TRIGGER

**Zherebtsov S.I.; Makarov I.A.**, PhD., Institute of Long Distance Radiocommunication,  
E-mail: makalu76@mail.ru, Moscow, Russia.

**Abstract.** The RS-trigger operation model and graph-scheme of its transitions taking into account the presence of delays tripping logic elements within its schema was considered. It is demonstrated that the total number of possible states of the flip-flop is sixteen in real conditions of using, while ensuring retention signals on the trigger for the time required to transition from one stable state to another, the number of operating states is reduced to twelve, five of which are stable and seven unstable.

**Keywords:** asynchronous RS-trigger, trigger graph-scheme, stable and unstable trigger states.

### Введение

Одним из базовых элементов цифровой вычислительной техники является RS-триггер, который представляет собой устройство, составленное из пары одинаковых двухвходовых логических элементов И-НЕ (или ИЛИ-НЕ), один из входов каждого из которых свободен и является одним из входов управления триггера, а другой вход соединен с выходом парного элемента. Эти же выходы логических элементов одновременно являются и выходами триггера [1-14]. Несмотря на широкое распространение RS-триггера и важную роль, которую он занимает в вычислительной технике, последовательный анализ принципов его функционирования до недавнего времени не проводился. В работе [15] впервые построена полная граф-схема RS-триггера, содержащая пять устойчивых состояний, включая так называемое «запрещённое» состояние, которому в технической литературе соответствует «запрещённая» комбинация входных сигналов на входах триггера. Такой анализ стал

возможным благодаря введению понятия состояния триггера, включающего не только состояния выходных линий, но и входных. При этом оказались не рассмотрены вопросы, касающиеся деталей переходов триггера из одного устойчивого состояния в другое при изменении комбинации входных сигналов, включая прохождение триггера через неустойчивые состояния пока не сработали логические элементы схемы. В работе [14] отмечались переходные процессы в RS-триггере, однако в отсутствие понятия полного состояния и при ограничении на «запрещённую» комбинацию воздействующих входных сигналов, такой подход не позволил построить полную граф-схему переключений между состояниями триггера. В данной статье предложена модель переходов между устойчивыми и неустойчивыми состояниями, учитывающую задержку срабатывания логических элементов, которая понимается как задержка появления результата выполнения логического преобразования в логических элементах, входящих в схему триггера, относительно момента изменения состояний сигналов на отдельном входе (или на нескольких входах этих элементов).

### Устойчивые и неустойчивые состояния асинхронного RS-триггера

Рассмотрим RS-триггер на примере схемы, построенной на двух логических элементах И-НЕ (Рис. 1). Присвоим логическим элементам номера 1 и 2 и обозначим сигнальные линии  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  как показано на рис. 1а), а выходы обозначим как  $1$  и  $0$ . В статье [14] было показано, что количество полных устойчивых состояний у такого устройства, учитывающих одновременное состояние входных и внутренних (выходных) линий, насчитывается пять:  $\overline{SR}10 = 0011, 0110, 1001, 1101, 1110$ .

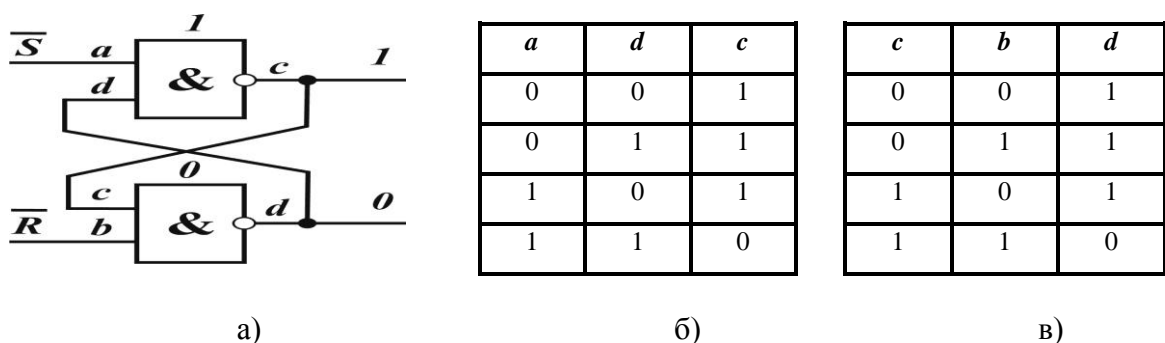


Рис. 1 Схема асинхронного RS-триггера, построенная на двух элементах И-НЕ (а) и их таблицы истинности (б, в).

Для уточнения поведения RS-триггера будем учитывать наличие в реальных логических элементах конечного (не равного нулю) времени срабатывания, в связи с чем общее количество состояний RS-триггера, оказывается более пяти, причём новые состояния являются неустойчивыми. Увеличение количества учитываемых при анализе

поведения триггера факторов необходимым образом ведёт к введению некоторых ограничений, обеспечивающих формирование чётких границ применимости получившейся модели. Перечислим эти условия в данном случае:

1. Условие «длительного» удержания очередного состояния входа после его изменения: длительность воздействующих сигналов, подаваемых на входы триггера, и сохранение установленного их состояния должно быть больше времени перехода триггера из одного устойчивого состояния в другое соответствующее такому воздействию, то есть больше времени срабатывания всех логических элементов на всём пути распространения этого входного воздействия по схеме рассматриваемого устройства;

2. Условие «быстрого» изменения входного сигнала: длительность изменения входных сигналов с нуля на единицу или с единицы до нуля должно быть много меньше времени срабатывания каждого из логических элементов триггера, что эквивалентно требованию обеспечения переключения входа без ввода этого элемента в режим линейного усиления входного сигнала;

3. Условие отсутствия «других» задержек (вне логических элементов): задержка сигнала на внутренних проводящих линиях триггера считается равной нулю, а также наличие реактивных составляющих (ёмкости и индуктивности) всех цепей не учитываются.

Для трёхвыводного логического элемента И-НЕ количество потенциально возможных состояний равно  $2^3 = 8$ . Количество состояний двух не соединённых логических элементов И-НЕ составляет 64 различных комбинаций, однако если выходную линию каждого из логических элементов соединить с одной из входных линий смежного логического элемента (как в RS-триггере), то количество возможных состояний такого устройства окажется равным 16, из которых 5 являются устойчивыми. Соответствующие состояния RS-триггера приведены в Таблице 1. Рассмотрим далее, каким образом и при каких условиях с учётом вышеуказанных ограничений эти состояния могут достигаться.

Таблица 1. Состояния RS-триггера.

	Состояние линий триггера						Неустойчивые состояния триггера $\overline{SR10}$	Устойчивые состояния триггера $\overline{SR10}$
	И-НЕ элемент 1			И-НЕ элемент 0				
	$a$	$d$	$c$	$c$	$b$	$d$		
	0	0	0	0	0	0	0000	
	0	1	0	0	0	1	0001	
	0	0	1	1	0	0	0010	

	0	1	1	1	0	1		<b>0011</b>
	0	0	0	0	1	0	0100	
	0	1	0	0	1	1	0101	
	0	0	1	1	1	0		<b>0110</b>
	0	1	1	1	1	1	0111	
	1	0	0	0	0	0	1000	
<b>0</b>	1	1	0	0	0	1		<b>1001</b>
<b>1</b>	1	0	1	1	0	0	1010	
<b>2</b>	1	1	1	1	0	1	1011	
<b>3</b>	1	0	0	0	1	0	1100	
<b>4</b>	1	1	0	0	1	1		<b>1101</b>
<b>5</b>	1	0	1	1	1	0		<b>1110</b>
<b>6</b>	1	1	1	1	1	1	1111	

### Граф-схема переходов между состояниями RS-триггера

Состояния и переходы удобно представить в виде граф-схемы, где состояния – вершины графа - отображаются кружочками, маркированными кодом состояния ( $\overline{SR}10$ ), а переходы – дугами, соединяющими их.

Для удобства пользования граф-схемой будем соблюдать следующие правила соединения вершин графа:

1) Из каждого устойчивого состояния выходят 4 дуги потому, что возможны 4 комбинации состояния двух входных переменных S и R, а описание поведения системы в каждом из своих состояний должно быть полным для всей группы возможных событий на ее входах. При этом каждая дуга должна приводить или в другое состояние или в то же самое (удерживающая дуга). Количество входящих дуг – не менее одной;

2) В связи с приведёнными выше ограничениями переход (выход) из неустойчивых состояний однозначно определён единственной входной комбинацией сигналов, при которой был выполнен вход в это состояние;

3) Для рассматриваемого устройства получающийся граф должен быть связным и ни одно из состояний его не должно быть тупиковым (не иметь выхода) – в том числе по причине не быстрой смены комбинаций сигналов на входах;

4) Должны быть приведены все возможные дуги-переходы. Суммарное количество дуг-переходов не может превышать количество устойчивых состояний

умноженное на 4 плюс количество неустойчивых состояний, умноженное на два (если не учитывать расщеплённые переходы);

5) Итоговая граф-схема контролируется на симметрию.

Подробное описание построения полной граф-схемы переходов между устойчивыми состояниями RS-триггера давалось ранее в [14], поэтому здесь приведём её без пояснений, но с учётом введённого выше ограничения, что сигналы на входах триггера меняются «мгновенно» (рис. 2).

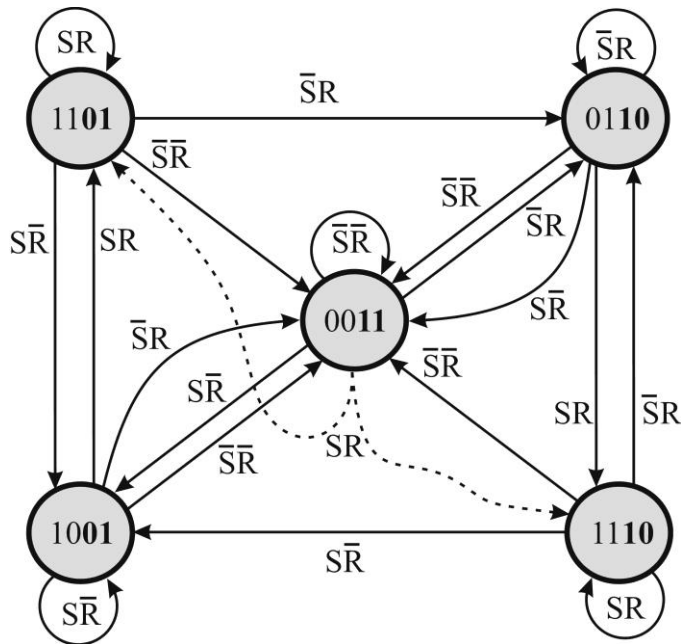


Рис 2. Граф-схема переходов RS-триггера, включающая только устойчивые состояния.

Дополнительно уточним, что для данной схемы код, вписанный в вершину графа (состояние), не является условием входа в это состояние, а иллюстрирует только то, что обозначаемая таким образом комбинация сигналов (входных и выходных) для данного состояния является удерживающей. Фактически это означает, что неустойчивые состояния триггера в схеме рис. 2 присутствуют неявно в отличие от следующей граф-схемы RS-триггера, которая построена аналогичным образом, но включает особенности последовательных смен устойчивых состояний триггера через неустойчивые (рис. 3).

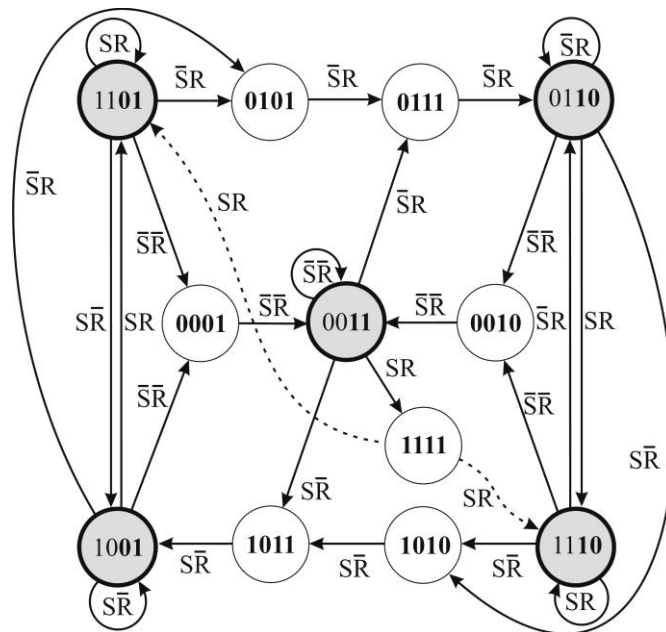


Рис. 3. Граф-схема переходов RS-триггера, включающая устойчивые состояния (выделены серым цветом) и неустойчивые состояния (выделены белым цветом) и переходы между ними.

В качестве примера проиллюстрируем, как модифицируется исходная граф-схема, включающая только устойчивые состояния, и происходит переход из одного устойчивого состояния  $\overline{SR}10=1101$  в другое устойчивое состояние  $\overline{SR}10=0110$ . Пусть изначально триггер находился в состоянии  $\overline{SR}10=1101$ , что означает отсутствие возбуждающих сигналов на обоих входах триггера. После подачи возбуждающего сигнала, соответствующего уровню логического нуля на вход S, триггер переходит в неустойчивое состояние  $\overline{SR}10=0101$ , которое будет сохраняться в течение времени, пока не сработает логический элемент И-НЕ1. До тех пор состояние входных линий  $c$  и  $d$  на втором логическом элементе И-НЕ0 будет сохраняться ( $c=0$ ,  $b=1$ ). После срабатывания И-НЕ1 на его выходе появится сигнал с уровнем логической 1, состояние входных линий  $c$  и  $d$  на втором логическом элементе И-НЕ0 поменяется на  $c=1$ ,  $b=1$ , и триггер перейдет в следующее неустойчивое состояние  $\overline{SR}10=0111$ , из которого он выйдет в состояние  $\overline{SR}10=0110$  при срабатывании второго логического элемента И-НЕ0. В дальнейшем при удержании на входах триггера логических сигналов  $S=0$  и  $R=1$  состояние триггера  $\overline{SR}10=0110$  не изменяется. рассмотрение данного перехода из одного устойчивого состояния в другое показало, что время переключения триггера составляет две задержки одного логического элемента, а выходы триггера переключаются несинхронно, и первым переключается выход того логического элемента, на который приходит переключаящий входной сигнал, то есть

для RS-триггера, выполненного на элементах И-НЕ это выход, меняющий 0 на 1. Все остальные переходы могут быть рассмотрены аналогично.

Заметим, что две пары взаимных переходов из одного устойчивого состояния в другое и обратно ( $0110 \leftrightarrow 1110$  и  $1001 \rightarrow 1101$ ) не порождают неустойчивых состояний триггера, так как логические элементы при таких переходах не срабатывают. На этих переходах меняются только входные сигналы.

Особо следует рассмотреть переход триггера из состояния  $\overline{\overline{SR}}10 = 0011$  в одно из двух устойчивых состояний (1110 или 1101) при одновременной смене сигналов на его входах из состояния  $SR=00$  в состояние  $SR=11$ . Непосредственно после такой смены триггер переходит в неустойчивое состояние  $\overline{\overline{SR}}10 = 1111$ , и дальнейшее его поведение зависит от того, какой логический элемент сработает быстрее: если И-НЕ1, то триггер перейдёт в состояние 1101, если же И-НЕ0, то – в 1110.

Заметим, что в результате модификации исходной граф-схемы количество состояний, вошедших в новую граф-схему RS-триггера, получено 12 (5 устойчивых и 7 неустойчивых). Формально допустимые согласно таблицы 1 неустойчивые состояния  $\overline{\overline{SR}}10 = 0000, 0100, 1000, 1100$  достигаются, только если нарушаются указанные выше условия по длительности воздействующих на триггер сигналов.

В самом деле, пусть триггер находился изначально в устойчивом состоянии  $\overline{\overline{SR}}10 = 0011$  и на входы триггера подали одновременно  $S=1$  и  $R=1$ . Как было показано выше, если один из логических элементов сработал быстрее другого, то триггер перейдёт в одно из устойчивых состояний 1110 или 1101. Однако если предположить, что оба логических элемента сработали одновременно, то триггер, формально говоря, может попасть из неустойчивого состояния 1111 в неустойчивое состояние 1100, при этом, поскольку логические элементы срабатывают одновременно, то на следующем шаге триггер опять перейдёт в состояние 1111 и т.д., что говорит о возможности возникновения в триггере колебательного процесса в таких гипотетических условиях. Если теперь в моменты времени, когда триггер переходит в состояние 1100 поменять пару воздействующих сигналов на входах триггера с  $SR=11$  на одну из трёх возможных других комбинаций ( $SR = 00, 01, 10$ ), то получим переходы в оставшиеся не включёнными в граф-схему неустойчивые состояния ( $\overline{\overline{SR}}10 = 0000, 0100, 1000, 1100$ ) с последующим переходом в соответствующие им устойчивые ( $\overline{\overline{SR}}10 = 0011, 0110, 1001$ ) при условии удержания этой новой пары воздействующих сигналов на входах триггера. Таким образом, четыре неустойчивых состояния RS-триггера  $\overline{\overline{SR}}10$

= 0000, 0100, 1000, 1100 могут достигаться при соблюдении условий одновременного срабатывания логических элементов, входящих в состав триггера и при допущении возможности смены воздействующих сигналов на этапе нахождения триггера в неустойчивом состоянии. В реальности одновременное срабатывание логических элементов не реализуется, что может быть показано, но не в рамках логики, а при рассмотрении процессов в триггере, как аналоговом устройстве, состоящем из двух инвертирующих усилителей, соединённых в кольцо [16]. В данном случае для полного понимания происходящих в рассматриваемой схеме процессов необходимо применять подходы, сформированные еще на заре развития аналоговых систем, а не только опираться на формальные логические рассуждения. В то же время, даже в рамках описываемой модели триггера, в которой воздействующие сигналы на его входах не меняются до перехода в новое устойчивое состояние, такие состояния оказываются недостижимыми.

Анализируя полученную граф-схему RS-триггера, можно заключить, что наличие попутных неустойчивых состояний по траектории конкретного перехода на итоговое состояние этого перехода не влияет. Такое влияние возможно только лишь при «неправильном» использовании триггера, а именно при нарушении указанных выше ограничений, следовательно, для практического применения достаточно первой граф-схемы, учитывающей только устойчивые состояния триггера, в то время как полная граф-схема с неустойчивыми состояниями важна для понимания происходящих переходных процессов в ней.

### **Выводы**

Впервые приводится полная граф-схема функционирования асинхронного RS-триггера, учитывающая задержки срабатывания логических элементов и позволяющая наглядно проследить последовательность смены его состояний. Показано, что, хотя потенциально возможных состояний у асинхронного RS-триггера 16, но 4 из них ( $\overline{SR}10 = 0000, 0100, 1000, 1100$ ) достигаются в особом случае при достаточно быстрой смене пары воздействующих входных сигналов ( $SR = 00, 01, 10$ ), на этапе временного прохождения триггера через неустойчивое состояние  $\overline{SR}10=1100$ . Если же длительность воздействующих сигналов больше времени перехода из одного устойчивого состояния триггера в другое, а это и есть нормальный режим функционирования RS-триггера, то эти состояния ( $\overline{SR}10 = 0000, 0100, 1000, 1100$ ) не достигаются. Таким образом заключено, что полный набор всех состояний асинхронного RS-триггера включает 12 состояний, из которых 5 устойчивых и 7



неустойчивых. При этом введение в исходную граф-схему неустойчивых состояний сохраняет траектории переходов из одного устойчивого состояния в другое, что позволяет при практическом применении RS-триггера использовать упрощённую граф-схему, содержащую только устойчивые состояния.

### Список литературы

1. Сапожников В.В., Сапожников В.В. Методы синтеза надежных автоматов. Ленинград, "Энергия", Ленинградское отделение, 1980 г.
2. Зельдин Е.А. Триггеры. М.: «Энергоатомиздат», 1983. — С. 96.
3. Сергеев Н.П., Вашкевич Н.П. Основы вычислительной техники: Учеб. пособие для электротехн. спец. вузов. – М.: «Высшая школа» 1988. – 311 с.
4. Стрыгин В.В., Щарев Л.С. Основы вычислительной микропроцессорной техники и программирования. М.: «Высшая школа», 1989. – 479 с.
5. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 528 с.
6. Новожилов О.П. Основы цифровой техники. Учебное пособие: - М.: «Радиософт» 2004. – 528 с.
7. Китаев Ю.В. Основы цифровой техники. Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО, 2007, 87 с.
8. Иноземцев В.А. Изучение элементной базы цифровой техники - Брянск: Издательство БГУ, 2002. - 110 с.
9. Григорьев Б. И. Элементная база и устройства цифровой техники. Учебное пособие: СПб: НИУ ИТМО, 2012 - 85с.
10. Потехин В.А. Схемотехника цифровых устройств. Учебное пособие: - Томск: «В-Спектр» 2012. – 287 с.
11. Браммер Ю.А. Импульсные и цифровые устройства: Учеб. для студентов электрорадиоприборостроительных сред. спец. учеб. заведений: – М.: Высш. шк., 2003. – 351 с.
12. Ключков Г.Л. Цифровые устройства и микропроцессоры: Учебник. – Воронеж: ВИРЭ, 2005. – 320с.
13. Шарапов А.В. Микроэлектроника: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2007. — 158 с.
14. Алексеенко А.Г., Основы микросхемотехники. М.: Юнимедиастиль, 2002. – 448 с.
15. Жеребцов С.И., Макаров И.А., Полное множество устойчивых состояний асинхронного RS-триггера// Электронный сетевой научно-методический журнал «Вестник МГТУ МИРЭА», 2014, том 1, № 2, с. 147-159.
16. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. Учебное пособие: – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. - 915 с.