

УДК 004.312.42

## ПОЛНОЕ МНОЖЕСТВО УСТОЙЧИВЫХ СОСТОЯНИЙ АСИНХРОННОГО RS-ТРИГГЕРА

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

**Аннотация.** В настоящей статье приводится полная граф-схема асинхронного RS-триггера, включающая все пять его устойчивых состояний и двадцать переходов между ними. Показано, что данный триггер не может считаться конечным автоматом из-за недетерминированного поведения. На примере работы одного из базовых и широко распространённых устройств цифровой вычислительной техники – D-триггера с динамическим входом, состоящего, по сути, из трёх RS-триггеров - показано, что так называемое «запрещённое» состояние RS-триггера используется как рабочее в данной конкретной схемной реализации и не может объявляться таковым априори на этапе рассмотрения всех его свойств.

**Ключевые слова:** асинхронный триггер, RS-триггер, карта Карно, состояние триггера, генератор одиночного импульса.

## THE FULL STABLE STATES GRAPH DIAGRAM OF ASYNCHRONOUS RS-TRIGGER

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

**Abstract.** This paper presents the full graph diagram asynchronous RS-trigger, including all five of his twenty stable states and transitions between them. It is shown that the trigger can not be considered due to non-deterministic finite automaton behavior. On the example of one of the basic and pervasive computing devices Digital - D-trigger with a dynamic entrance, consisting essentially of three RS-trigger - it is shown that the so-called «forbidden» state of the RS-trigger is working in a particular circuit realization and therefore can not be declared a priori those under consideration of all its properties.

**Keywords:** asynchronous RS trigger, D trigger, Karnaugh map, «forbidden» trigger state.

### Введение

В научно-технической литературе принято считать под состоянием триггера состояние только его выходных линий, что в дальнейшем закономерно приводит к упущению важных особенностей его функционирования. Наглядным примером является асинхронный RS-триггер [1-10], 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. Входы управления триггера принято обозначать буквами S – сигнал установки (Set) и R –

сигнал сброса (Reset), а выходы устройства  $Q$  и  $\overline{Q}$ . Свойство асинхронности обычно применяется к устройствам с детерминированным поведением (автоматам), сохраняющим устойчивое состояние после изменения входных сигналов и выполнения перехода из другого своего состояния [11] или из того же самого состояния (в этом случае переход описывает состояние удержания автомата в том же состоянии, в котором он уже находился). При этом сам переход может проходить через промежуточные неустойчивые состояния.

Рассмотрение данного простейшего триггера интересно и с исторической точки зрения. Прародитель этого устройства официально зарегистрирован патентом № 148582 У.Г. Икклза и Ф.У. Джордана от 21 июня 1918 г., а его практическая схема опубликована 5 августа 1920 г. в [12] и в статье [13] от 19 сентября 1919 года «Переключающее реле, использующее трёхэлектродные вакуумные лампы». Прогресс науки и техники стремительно ушел вперед, оставив без подробного рассмотрения принципы функционирования триггера, в которых одновременно сошлись и работают принципы таких наук как радиоэлектроника, дискретная математика, логика (булева алгебра), теория конечных автоматов. А описание регенеративного процесса переключения двухкаскадной схемы из одного устойчивого состояния в другое требует привлечения математического инструментария решений дифференциальных уравнений, учитывающего наличие в схеме реактивных элементов и шумов. Хотя рассматривать процесс переключения в аналоговом варианте на современном уровне развития техники и не требуется, но и логические функции этого устройства также упущены из рассмотрения. Поэтому данная статья и призвана восполнить имеющийся пробел.

### **Пять устойчивых состояний RS-триггера**

Рассмотрим известную схему RS-триггера на элементах И-НЕ (Рис. 1). Поскольку выход  $\overline{Q}$ , строго говоря, не является инверсией выхода  $Q$ , изменим обозначения выходов устройства на нейтральные **0** и **1** соответственно. Самим логическим элементам с этими выходами присвоим те же номера. Подсчитаем полные состояния получившегося устройства. Полное состояние устройства соответствует элементам множества  $A \times S$ , где  $A$  – множество состояний входов, а  $S$  – множество внутренних состояний [11]. В нашем случае внутренние состояния выведены в виде выходных сигналов, поэтому можно поступить проще и определить состояние нашей схемы как совокупность состояний всех ее сигнальных линий. Промаркируем все линии сигналов



Полные состояния асинхронного RS-триггера

№	Состояние линий триггера				И-НЕ элемент 1			$c = \overline{a \& b}$	И-НЕ элемент 0			$d = \overline{b \& c}$	Полное состояние триггера VII $\overline{SR}10$
	II				III			IV	V			VI	
I	a	b	c	d	a	d	c		c	b	d		
0	0	0	0	0	0	0	0	false	0	0	0	false	-
1	0	0	0	1	0	1	0	false	0	0	1	true	-
2	0	0	1	0	0	0	1	true	1	0	0	false	-
3	0	0	1	1	0	1	1	true	1	0	1	true	0011
4	0	1	0	0	0	0	0	false	0	1	0	false	-
5	0	1	0	1	0	1	0	false	0	1	1	true	-
6	0	1	1	0	0	0	1	true	1	1	0	true	0110
7	0	1	1	1	0	1	1	true	1	1	1	false	-
8	1	0	0	0	1	0	0	false	0	0	0	false	-
9	1	0	0	1	1	1	0	true	0	0	1	true	1001
10	1	0	1	0	1	0	1	true	1	0	0	false	-
11	1	0	1	1	1	1	1	false	1	0	1	true	-
12	1	1	0	0	1	0	0	false	0	1	0	false	-
13	1	1	0	1	1	1	0	true	0	1	1	true	1101
14	1	1	1	0	1	0	1	true	1	1	0	true	1110
15	1	1	1	1	1	1	1	false	1	1	1	false	-

Переходы между устойчивыми состояниями RS-триггера

Состояния и переходы удобно представить в виде граф-схемы, где состояния – вершины графа - отображаются кружочками, маркированными номером состояния, а переходы – дугами, соединяющими их. Для удобства пользования такой граф-схемой приведём простые правила соединения вершин графа:

1) Из каждого 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) При одновременной смене состояния входных переменных может существовать несколько путей, по которым может произойти переход, т.к. одновременность изменения сигналов на входе устройства ни теорией и ни практикой не гарантируется одновременность срабатывания вычислителей логических функций. При неодновременном их срабатывании дуги-переходы ведут в различающиеся друг от друга состояния и, в конечном итоге, могут завершиться в разных конечных (устойчивых) состояниях, что случается в устройствах с недетерминированным поведением;

- 3) Для рассматриваемого устройства получающийся граф должен быть связным и ни одно из состояний его не должно быть тупиковым (не иметь выхода);
- 4) Должны быть приведены все возможные дуги-переходы. Суммарное количество дуг-переходов не может превышать количество состояний умноженное на 4;
- 5) Итоговая граф-схема контролируется на симметрию.

Итак, приведем последовательное изложение построения граф-схемы RS-триггера. Нарисуем в виде кружочков пять состояний с номерами **0011**, **0110**, **1001**, **1101** и **1110**, в которых позиции по порядку их записи соответствуют состоянию входных и выходных переменных  $S$ ,  $R$ ,  $1$  и  $0$ . Располагать кружочки можно произвольно. В нашем случае состояние, в котором на вход устройства поданы инверсии обоих входных сигналов и при этом на обоих выходах устройства имеются сигналы логической единицы, поместим в центре квадрата, а оставшиеся четыре состояния – по его углам (рис. 3).

Соединим дугами переходов кружочки-состояния. Каждую дугу помечаем номером и комбинацией входных сигналов  $S$  и  $R$ , вызвавших переход. При этом руководствуемся следующими рассуждениями:

- дуга 0. Отражает удержание в обычном, так называемом, исходном состоянии **1101**, при котором инверсии входных сигналов  $S$  и  $R$  отсутствуют и триггер сохраняет на выходе 0 состояние логической 1, а выход 1 находится в противоположном состоянии. Условный термин. В некоторых автоматах явным образом в этом случае могут присутствовать сигналы возбуждения, вызвавшие переход элементов памяти автомата в данное состояние и не исчезнувшие после переключения в него. Для нашего простейшего случая комбинация входных сигналов – две логические единицы – хотя и не содержит явных признаков воздействия на триггер, но является удерживающей, поскольку все оставшиеся комбинации приводят к переключению в другие состояния. Кроме этого обязательно рисуем эту дугу для полноты учета исходящих из состояния количества дуг; - дуги 1, 2, 3. 4. Дуга 1 отражает появление инверсии сигнала  $S$  и переход в состояние **0110**, триггер переключает свои выходы в противоположное от предыдущего состояния. Комбинация входных сигналов 01 в данном случае является явно удерживающей. Поэтому рисуем и дугу 2.



Далее рассмотрим дуги перехода в центральное состояние **0011** и возврат из него:

- дуги 10, 11, 12, 13 и 20. Первые четыре дуги отражают переход из любого текущего состояния в состояние **0011**, в котором при наличии инверсий обоих входных сигналов **S** и **R** на обоих выходах триггера имеются сигналы логических единиц, а дуга 20 – удержание устройства в этом состоянии данной входной комбинацией;

- дуги 14 и 15. По этим дугам можно благополучно осуществить возврат соответственно в состояние **0110** и **1001** из состояния **0011**, если соответственно переводить в единичное состояние один из сигналов **R** или **S**;

- дуги 18 и 19. При одновременном переходе обоих входных сигналов **R** и **S** из состояния логического нуля в состояние логической единицы непредсказуемо возвращается в одно из двух возможных состояний – **1101** или **1110**. Причем слово «непредсказуемо» отражает тот факт, что средствами логики (а также и теории вероятности) нет возможности предсказать результат выполнения этого перехода. В данном случае мы имеем устройство с недетерминированным поведением. Кроме этого возникает трудность подсчета количества дуг-переходов. С точки зрения входных – это две дуги, а с точки зрения выходных из центрального состояния – одна дуга, порождаемая единственной комбинацией входных сигналов;

- дуга 16 отражает переход из состояния **1001** в **0110** при одновременной смене обоих входных сигналов **S** и **R** на противоположные. Причем, если в первом состоянии активным сигналом был сигнал **R**, и он обеспечивал формирование выходной комбинации в состоянии **Reset** – нулевой выход – логическая единица, а единичный – в состоянии **0**, то при противоположной входной комбинации выходы триггера переключаются в состояние противоположное своему предыдущему – **Set**. При рассмотрении возможной неодновременности срабатывания логических вычислителей для указанного перехода возможны еще два альтернативных пути – один через состояние **1101**, а другой через центральное **0011**. Заметим, что изменение выходного сигнала первого логического элемента за счет изменения сигнала **S** с инверсного (логический ноль) на прямое (логическая единица) происходит с задержкой на одном этом элементе, а изменение состояния выхода нулевого (нижнего) логического элемента произойдет только, когда на его верхний вход (линия *c*) поступит измененный сигнал от выхода первого. Таким образом, с учетом ещё одной задержки в нижнем элементе и с учетом понимания того, что задержка на двух элементах больше задержки на одном, через который входное воздействие было передано на вход другого, можно утверждать, что выход устройства, меняющий логическую единицу на логический ноль всегда запаздывает относительно другого, и для нашей граф-схемы можно дугу 16

закончить не в состоянии 0110, а в центральном состоянии 0011, откуда уже имеется путь по дуге 14 с такой же комбинацией входных сигналов, по которой и завершится переход в финишное состояние 0110.

- дуга 17 и две её альтернативные дуги из состояния 0110 в состояние 1001 аналогично дуге 16 заменяются последовательным переходом по дуге 17 в центральное состояние и последующим переходом по существующей дуге 15.

В итоге получается граф-схема всех возможных переходов RS-триггера, которая могла бы быть идеальной граф-схемой алгоритма функционирования конечного автомата, если бы только не «расщепленная» дуга-переход с номерами 18/19 из состояния одновременного возбуждения обоих входных сигналов в состояние одновременного их переключения в не активное состояние (Рис. 4). Для схемы, построенной из элементов И-НЕ – это переход из состояния входов 00 в состояние 11.

Поэтому, хотя в некоторых источниках и утверждается, что триггеры – это элементарные автоматы, содержащие элемент памяти и схему управления [4], на примере RS триггера видим, что наличие такого недетерминированного поведения не позволяет относить его к указанному классу устройств из-за того, что недетерминированные переходы невозможно ни описать в рамках теории автоматов, ни синтезировать формальными методами (если только не внесена ошибка в процедуру синтеза).

Дополнить полученную граф-схему RS-триггера можно картой Карно (Рис. 4). На приведенной карте учитывается последовательность естественных событий - смены состояний реального устройства: сначала происходит изменение входного сигнала (перемещение по горизонтали), после чего срабатывают логические вычислители (перемещение по вертикали) и изменяется состояние триггера.

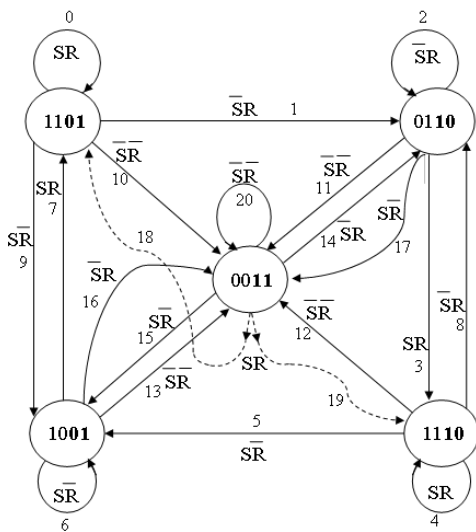


Рис. 3 Окончательная граф схема переходов между состояниями RS-триггера.



Например, для дуги 13 сначала меняется значение сигнала  $S$  (переход через среднюю вертикальную линию справа налево) со значения логической единицы на логический нуль, а затем уже срабатывает логический элемент, и меняется выходной сигнал на выходе  $1$  со значения логического  $0$  на значение логической  $1$  (переход через среднюю горизонталь сверху вниз).

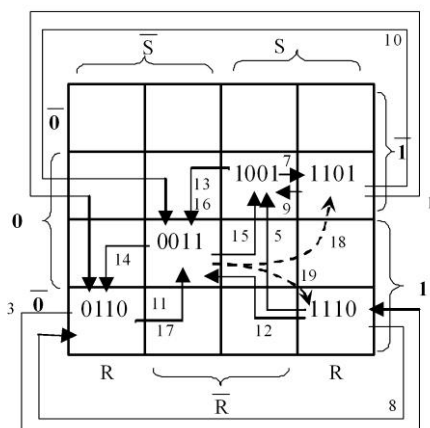


Рис. 4 Карта Карно RS-триггера.

С точки зрения классификации и ответа на вопрос: а чем же на самом деле является RS-триггер – логическим элементом, элементом памяти, простейшим автоматом или аналоговым устройством (?) – можно ответить так, что как аналоговый элемент мы его не рассматриваем до того момента, пока нам не необходимо достигнуть его предельного быстродействия – это дело специализированных отраслей микроэлектроники. Это и не простейший автомат, так-как можно нарисовать (на бумаге) граф-схемы и попроще, чем полученная здесь. Так же он не является автоматом, так как языком описания автоматов невозможно определить недетерминированные переходы. Это и не логический элемент (хотя и состоит из двух логических элементов), так как язык и инструментарий логики не способен разрешить задачу недетерминированного перехода. Кстати и теория вероятности в случае ненагруженного триггера (триггер с неприсоединенными своими выходами к какой-либо внешней цепи) тоже бессильна. Все свойства триггера как элемента памяти вытекают из его граф-схемы функционирования и просто являются следствием его схемотехнического воплощения.

Поэтому, на наш взгляд, наиболее правильным ответом на поставленный вопрос будет ответ: RS-триггер никак не может быть классифицирован и отнесен к какому-либо известному классу устройств. В момент его изобретения в неявном виде был

изобретен и новый класс устройств – триггер в его единственном воплощении — как соединение двух логических элементов, который может быть реализован в любом виде – в микроэлектронном, механическом, гидравлическом, пневматическом, в виде природных явлений (катаклизмов в том же числе), в виде бытовых, производственно-правовых, административных или межгосударственных договорных отношений и обязательств и т.д. и т.п. А поскольку принцип функционирования RS-триггера может воспроизводиться в столь различных проявлениях причинно-следственных закономерностей природы, общества и техники, крайне важно и необходимо знать, как же на самом деле он работает.

### **Незапрещённое «запрещённое» состояние RS-триггера**

Состояние RS-триггера, составленного из логических элементов И-НЕ, 0011 (когда на оба входа триггера одновременно подаются сигналы с уровнем соответствующим уровню сигнала возбуждения или переключения триггера) традиционно в литературе называют «запрещённым». В технической литературе это обстоятельство обычно комментируется следующим образом. Если подать на входы триггера одновременно сигналы  $S=R=1$ , то заранее сказать, в каком состоянии будут выходные линии невозможно. На приведённой выше граф-схеме рис. 3 это соответствует «расщепленной» дуге-переходу с номерами 18/19 и неопределённому переходу триггера в одно из двух устойчивых состояний (1101 или 1110). Однако из этого, так называемого «запрещённого» состояния есть ещё два перехода (детерминированных) по дугам 14 и 15 в устойчивые состояния 0110 и 1001 и соответствующих подаче комбинации входных сигналов  $S=0, R=1$  или  $S=1, R=0$  соответственно. Ясно, что рассматриваемое состояние RS-триггера, коль скоро оно имеется в данном устройстве, то оно может быть использовано в конкретных схемных реализациях, и поэтому не может объявляться «запрещённым» на этапе рассмотрения принципа работы триггера. Чтобы эта информация не показалась излишне «теоретизированной», можно было бы привести различные устройства, в состав которых входят RS-триггеры и некоторые из них за один цикл работы устройства проходят через это, так называемое «запрещённое» состояние, однако нам кажется методически показательным и наиболее наглядным было бы рассмотреть схему ещё одного триггера, одного из самых распространённых в цифровой вычислительной технике – D-триггера с динамическим входом.

Напомним определение D-триггера с динамическим входом – это триггер с двумя входами D - информационный и C - синхронизирующий и выходом (выходами) Q

( $Q\bar{Q}$ ), в котором запись производится при одном из двух возможных изменений логического уровня сигнала на входе С: с нуля на единицу (управление по переднему фронту) или с единицы на ноль (управление по заднему фронту) и зависит от конкретной схемы триггера. Записанный сигнал (1 бит информации), появляющийся на выходе Q, хранится до момента следующего такого же изменения сигнала С. Для определённости рассмотрим известную в литературе схему данного триггера с управлением по переднему фронту [5,10], построенного на шести логических элементах И-НЕ ( $D_1, \dots, D_6$ ) и имеющего дополнительные входные линии S и R для установки (или сброса) его в исходное состояние (см. рис. 5). Напомним, что трёхвходовые логические элементы И-НЕ имеют аналогичные таблицы истинности (рис. 1б, в), в которых состояние их выхода принимает значение **0** только в случае единичного состояния всех трех его входов.

В остальных случаях их выходы находятся в состоянии **1**. Соответствующие диаграммы работы искомого D-триггера приведены на рис. 6, а также имеются в технической литературе [5,10]. По сути D-триггер здесь состоит из трёх RS-триггеров. Обратим внимание на нижний в схеме RS-триггер, состоящий из логических элементов  $D_3$  и  $D_4$ . В соответствии с временной диаграммой работы D-триггера на рис. 6 существует четыре возможных режима, когда на входы данного RS-триггера одновременно подаются сигналы логического нуля ( $C=D=0$ ), и он находится в так называемом «запрещённом» состоянии. Выход из этого состояния, как и следовало ожидать, осуществляется подачей входных сигналов разной полярности ( $C=1, D=0$  или  $C=0, D=1$ ).

Таким образом, на примере конкретного широко используемого устройства цифровой вычислительной техники продемонстрировано, что один из входящих в его состав RS-триггеров за цикл работы устройства проходит через так называемое «запрещённое» состояние и не один раз. В силу сказанного выше для названия «запрещённым» состояния RS-триггера **0011** нет ни теоретических предпосылок, ни практических (технических и технологических). Уход от рассмотрения данного состояния может вести к потере важной информации об особенностях функционирования элементарного устройства под названием RS-триггер и, на наш взгляд, не в полной мере соответствует научно-методическим критериям подачи информации учащимся ВУЗов.

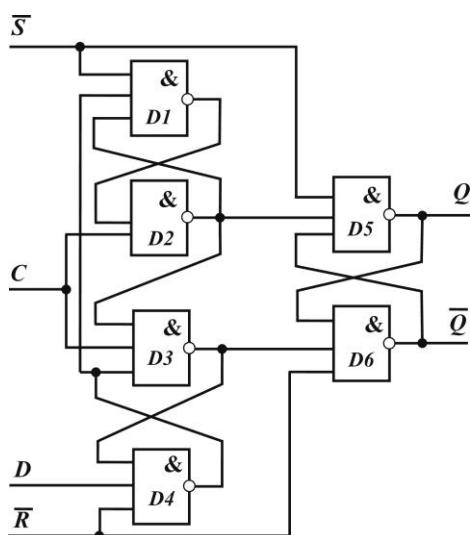


Рис. 5 Схема D-триггера с динамическим входом, построенного на логических элементах И-НЕ (управление по переднему фронту).

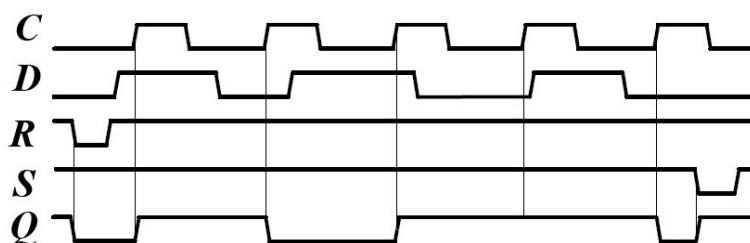


Рис. 6 Диаграммы работы D-триггера с динамическим входом, построенного на логических элементах И-НЕ (управление по переднему фронту).

## Выводы

С использованием понятия состояния устройства, учитывающего одновременное состояние как входных, так и выходных линий, построена полная граф-схема функционирования асинхронного RS-триггера и соответствующая ей карта Карно, включающие пять состояний и двадцать переходов между ними. Установлено, что данный триггер не может считаться конечным автоматом из-за наличия недетерминированного поведения (расщеплённой дуги-перехода из центрального состояния). Показана практическая реализуемость так называемого «запрещённого» состояния асинхронного RS-триггера на примере широко используемого устройства цифровой вычислительной техники (D-триггер). В связи с этим заключено, что для названия «запрещенным» искомого состояния RS-триггера нет ни теоретических предпосылок, ни практических. Игнорирование указанных особенностей триггера может вести к потере ключевой информации о работе устройства, а также снижать эффективность усвоения научно-методического материала учащимися технических ВУЗов.

### Список литературы

1. Зельдин Е.А. Триггеры. М.: «Энергоатомиздат», 1983. — С. 96.
2. Стрыгин В.В., Щарев Л.С. Основы вычислительной микропроцессорной техники и программирования. М.: «Высшая школа», 1989. – 479 с.
3. Алексеенко А.Г., Основы микросхемотехники. М.: ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2002. – 448 с.
4. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 528 с.
5. Сергеев Н.П., Вашкевич Н.П. Основы вычислительной техники: Учеб. пособие для электротехн. спец. вузов. – М.: «Высшая школа» 1988. – 311 с.
6. Китаев Ю.В. Основы цифровой техники. Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО, 2007, 87 с.
7. Новожилов О.П. Основы цифровой техники. Учебное пособие: - М.: «Радиософт» 2004. – 528 с.
8. Григорьев Б. И. Элементная база и устройства цифровой техники. Учебное пособие: СПб: НИУ ИТМО, 2012 - 85с.
9. Иноземцев В.А. Изучение элементной базы цифровой техники - Брянск: Издательство БГУ, 2002. - 110 с.
10. Потехин В.А. Схемотехника цифровых устройств. Учебное пособие: - Томск: «В-Спектр» 2012. – 287 с.
11. Сапожников В.В., Сапожников В.В. Методы синтеза надежных автоматов. Ленинград, "Энергия", Ленинградское отделение, 1980 г.
12. William Henry Eccles and Frank Wilfred Jordan, «Improvements in ionic relays». British patent number: GB 148582 (filed: 21 June 1918; published: 5 August 1920).
13. W. H. Eccles, F. W. Jordan A trigger relay utilizing three-electrode thermionic vacuum tubes. The Electrician, Vol. 83, P. 298 (19 September 1919). Перепечатано в Radio Review, Vol. 1, No. 3, P. 143—146 (December 1919).