

УДК 004.312.42

ПОЛНАЯ ГРАФ-СХЕМА УСТОЙЧИВЫХ СОСТОЯНИЙ D-ТРИГГЕРА С ДИНАМИЧЕСКИМ ВХОДОМ

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

Аннотация. Впервые приводится полная граф-схема устойчивых состояний D-триггера с динамическим входом, включающая все варианты его переключений при любых комбинациях логических сигналов на его входах. Применительно к триггеру вводится новое определение его состояния, зависящего от состояний всех его входных и внутренних линий. Такой подход позволяет выделить восемь различных состояний D-триггера, вместо двух, традиционно приводимых в технической литературе. Полученная граф-схема триггера позволяет наглядно отслеживать возможные режимы его работы, получать соответствующие временные диаграммы и поэтому может быть полезна с научно-методической точки зрения.

Ключевые слова: D-триггер с динамическим входом, состояние триггера, граф-схема переходов.

THE FULL STABLE STATES GRAPH DIAGRAM OF THE D-TRIGGER WITH DYNAMIC ENTRANCE

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

Annotation. First time, a full graph diagram of stable states of D-trigger with a dynamic entrance, including all variants of its operations at any combination of logic signals at its inputs. Applied to the trigger a new definition of its state depending on the states of all its input and internal lines. This approach allows us to identify eight different states of D-entrance, instead of two, traditionally given in the technical literature. The resulting graph diagram trigger allows visually monitor possible modes of operation, obtain the appropriate timing diagrams and can therefore be useful to the scientific and methodological point of view.

Keywords: D-trigger with dynamic entrance, trigger state, the scheme of navigation.

Введение

Прогресс в фундаментальной науке стимулирует развитие и появление новых технологий и наоборот – стремление заполучить новые технологии рождает потребность в новых фундаментальных исследованиях. Однако такая бинарная модель научно-технического прогресса имеет недостатки. В ней не учтена третья, педагогическая составляющая, без которой, на наш взгляд такой прогресс невозможен. Грамотный педагогический подход необходим для преемственности такого развития и заключается в своевременном понятном изложении достижений науки и техники всем

интересующимся членам общества. В данной статье рассмотрим основы функционирования одного из базовых элементов вычислительной и цифровой техники - D-триггера - включая те из них, которые до сих пор, к сожалению, обходили вниманием.

Триггерами называют класс устройств, выходные логические сигналы которых – ноль или единица – могут сохраняться в течение сколь угодно долгого времени и изменяться под воздействием входных сигналов. С точки зрения логики, дискретной математики и теории конечных автоматов триггер не обязан быть электронным устройством - он может быть и механическим (например, однокнопочный выключатель, гидроклапан и т.п., а также некоторые природные процессы ведут себя как триггеры, и могут в этих случаях описываться методами теории катастроф). Данный класс включает в себя устройства, которые существенно различаются между собой по способам управления и поведения. По способу управления триггеры подразделяют на две большие группы – динамические и статические (потенциальные). Динамический триггер представляет устройство, состояние которого устанавливается при смене состояния на его синхронизирующем входе. Здесь слово «устанавливается» подразумевается в смысле записи нового входного значения информационного сигнала, причем вновь записанное значение может оказаться равным предыдущему. В статическом же триггере состояние выхода устанавливается в зависимости от установившегося на синхронизирующем входе логического сигнала, логического уровня или потенциала.

В научно-технической литературе к настоящему времени сложился определённый стиль описания принципов работы триггеров. Под состоянием триггера условились считать состояние только его выходных линий, что ведёт зачастую к неполному описанию основ их функционирования [1-9]. В качестве примера в данной статье предлагается анализ логической схемы D-триггера с динамическим входом – одного из самых распространённых в вычислительной технике устройств, - у которого традиционно насчитывают два устойчивых состояния, тогда как на самом деле их восемь.

Будем рассматривать D-триггер с минимальным набором его сигнальных (входных и выходных) линий, то есть триггер, имеющий информационный вход D, вход синхронизации С и один выход. Наличие второго выхода у рассматриваемого устройства, являющегося инверсией первого, для анализа особенностей его функционирования ничего дополнительного не даёт и поэтому в дальнейшем рассмотрении не участвует, хотя на обычных схемах, например на схемах конкретных

типов микросхем, может присутствовать. Заметим, что в технической литературе авторы обычно избегают давать прямые определения D-триггера, описывая только его свойства [1-4]. Так, например, в [4] вместо определения просто говорится, что D-триггер берёт своё название от слова «Delay» - задержка, из-за того, что состояние его входа передаётся на выход, но с задержкой, определяемой тактовым сигналом. Нельзя утверждать, что данное пояснение ошибочно, но неподготовленного читателя в заблуждение оно ввести может, поскольку вызвано скорее не свойством триггера, а особенностью его применения.

Например, «задержка» проявляется в том, что D-триггер запоминает информацию по переднему фронту синхронизирующего импульса и результат запоминания появляется на выходах этого триггера по этому же фронту с задержкой на срабатывание его внутренних логических элементов, но считывание, то есть последующая обработка информации появившейся на выходе триггера, производится по заднему фронту сигнала С, из-за чего и появляется задержка между этапами обработки на полтакта сигнала С. При этом нельзя путать классический D-триггер с динамическим входом с триггерами, организованными по двухступенчатой схеме. По двухступенчатой схеме может быть построен любой тип триггера. В этом случае, действительно, такие схемы имеют внутреннюю задержку передачи входной информации на выход, равную половине такта синхронизирующего сигнала. Такие триггеры в схемах помечаются двумя буквами **ТТ** вместо одной **Т**.

Встречаются и более подробные определения – D-триггером называется триггер с одним информационным входом, работающий так, что сигнал на выходе после переключения равен сигналу на входе D до переключения [3]. Но и в этом определении остаётся элемент недосказанности, поэтому дадим здесь следующее, на наш взгляд, более строгое определение D-триггера с динамическим входом в предположении, что понятия «триггер», «запись» и «хранение» (информации) уже определены:

D-триггер с динамическим входом – это триггер с двумя входами D - информационный и С - 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.

Данного словесного описания оказывается достаточно, чтобы вывести из него все остальные свойства и принципы функционирования рассматриваемого устройства. При

этом возможны два пути: первый - по описанию «черного ящика» с тремя сигнальными линиями логическим путем вывести граф-схему, по которой происходит смена состояний устройства и затем произвести формальный синтез его схемы, после чего приступить к анализу этой схемы; или второй - взять уже известную схему этого устройства и по ней, применяя уже упомянутый подход (метод) получить искомое. Для первого пути требуется погрузиться в логику с привлечением причинно-следственных закономерностей явлений, происходящих в «черном ящике» (если только этот ящик не волшебный и подчиняется этим закономерностям) и после построения граф-схемы применить методологию формального синтеза из теории конечных автоматов, что уводит нас далеко в сторону от поставленной задачи - получения свойств уже известного устройства. Поэтому выбираем второй путь.

Из приведённого определения следует, что возможность следующей записи появляется только после возврата сигнала С в исходное состояние. Поскольку выходное состояние D-триггера в соответствующем временном промежутке остаётся неизменным, его ещё называют триггером с запоминанием данных или триггером-защёлкой (защёлкой называют устройство, которое в режиме «не хранить», определяемым уровнем сигнала на синхронизирующем входе пропускает сквозь себя информацию и фиксирует последнее состояние своей выходной линии в режиме «хранение» при переключении сигнала на синхронизирующем входе в противоположное состояние). Вместе с тем, из-за неоправданно сложной схемы D-триггера для выполнения такой простой функции, собственно функцию «защёлки» в реальных цифровых устройствах обычно выполняют по другим, более простым схемам.

Как уже говорилось выше, управление D-триггером с динамическим входом может осуществляться как передним фронтом импульса, так и задним. В применяемых в России условных обозначениях D-триггеров направление кривой черты на входе С показывает, по какому фронту происходит срабатывание триггера: по переднему фронту – прямая косая черта (рис. 1а), по заднему – обратная косая черта (рис. 1б).



Рис.1 Условное обозначение D-триггера с динамическим входом:
а) - управление передним фронтом импульса, б) - управление задним фронтом импульса.

Следует отметить, что существует некоторая путаница в этом вопросе, заключающаяся в том, что существующие логические схемы и соответствующие микросхемы, а так же и логические элементы библиотек программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), построенные по двухступенчатой схеме, предусматривают применение такого же способа обозначения синхронизирующего входа S , для того чтобы с помощью него показывать, по какому фронту этого сигнала информация с выходов первичной ступени обработки или запоминания данного логического элемента передается во вторую его ступень и далее поступает на его выходы, в то время как переключение внутренней первой ступени происходит по противоположному фронту [10]. Ранее отмечалось, что имеется обозначение, уточняющее тип элемента - для одноступенчатого триггера предусматривается обозначение T , а для такого же двухступенчатого - TT . В настоящее время, работая с различными логическими элементами, имеющими обозначения, выполненные в соответствии со стандартами разных стран и производителей, приходится каждый раз уделять повышенное внимание этому вопросу, так как для одноступенчатых схем переключение элемента и появление информации на выходах происходит по одному фронту. При этом выходной сигнал имеет естественную задержку своего появления на выходе относительно входного синхросигнала на величину задержки одного, двух или трёх внутренних логических элементов.

Полный набор устойчивых состояний D-триггера

Схемы D-триггеров с динамическим входом с управлением по переднему или заднему фронту импульса аналогичны и отличаются только логическими элементами, на базе которых они сконструированы: на элементах И-НЕ – по переднему фронту импульса, на элементах ИЛИ-НЕ – по заднему соответственно. Поэтому далее для определённости и, при этом, не теряя общности рассуждений, рассмотрим функционирование D-триггера на примере первой из них.

Схема D-триггера состоит из шести логических элементов И-НЕ, соединенных по схеме, приведенной на рис. 2. Элементы И-НЕ пронумерованы римскими числами от I до VI, а линии – латинскими буквами (**a**, **b**, **c**, **d**, **e**, **f**, **g**, **h**). Синхронизирующая линия **c** дополнительно обозначена буквой **S**, информационная линия **d** – буквой **D**, а выходная линия **g** триггера – буквой **Q**.

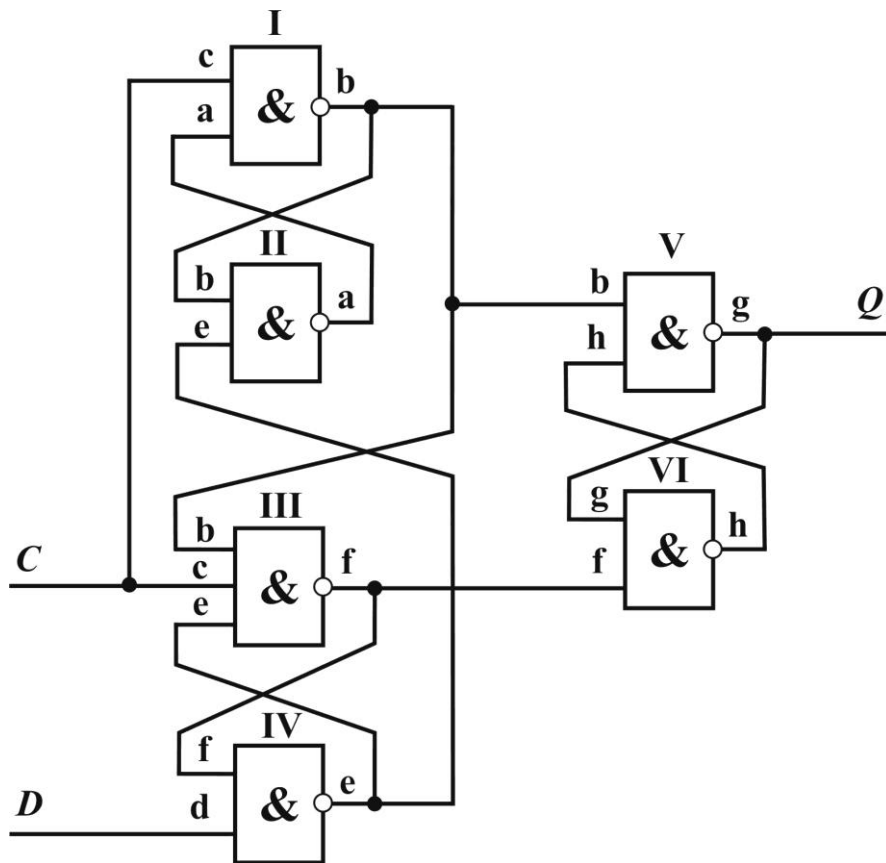
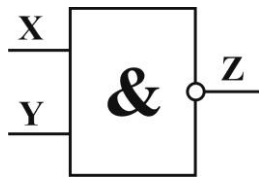


Рис. 2. Схема D-триггера с динамическим входом выполненная на элементах И-НЕ.

Напомним таблицу истинности двухвходового логического элемента И-НЕ (рис. 3).



а)

X	Y	Z
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

б)

в)

$$Z = \overline{X \cdot Y}$$

Рис. 3. Логический элемент И-НЕ (а), его таблица истинности (б) и логическое выражение в булевой алгебре (в).

Трёхвходовый элемент III имеет аналогичную таблицу, в которой состояние его выхода **f** принимает значение **0** только в случае единичного состояния всех трех его входов **b, c, e**. В остальных случаях его выход находится в состоянии **1**.

Исходя из нашего подхода к рассмотрению принципов работы триггеров, под состоянием триггера следует понимать совокупное состояние всех его линий. В рассматриваемом D-триггере имеется 8 линий, состояние каждой из которых может быть 0 или 1. Если бы эти линии были независимы, то общее количество состояний было бы равно $2^8 = 256$. Однако между ними имеются связи через логические элементы **I, II, . . . VI**. Для данного количества состояний можно выполнить ручной перебор всех комбинаций, или же воспользоваться возможностями таких программ как Microsoft Excel, «умеющих» выполнять логические вычисления. В результате получим всего 8 реально существующих состояний D-триггера (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Состояния сигнальных линий D-триггера.

№ состояния триггера	a	b	c	d	e	f	g	h
0	0	1	0	0	1	1	0	1
1	0	1	0	0	1	1	1	0
2	1	1	0	1	0	1	0	1
3	1	1	0	1	0	1	1	0
4	0	1	1	0	1	0	0	1
5	1	0	1	0	1	1	1	0
6	0	1	1	1	1	0	0	1
7	1	0	1	1	0	1	1	0

В таблице №1 тёмным цветом выделены столбцы состояний всех внешних линий устройства – это две входных линии **c, d** и одна выходная **g**. Под состоянием D-триггера понимаем совокупное состояние этих линий, т.е. набор **c, d, g**. Для определённости переобозначим его в принятый в технической литературе **C, D, Q**, упорядочим состояния триггера в соответствии с порядковыми весами коэффициентов C, D, Q в двоичном представлении числа CDQ ($2^2, 2^1$ и 2^0 соответственно) и пронумеруем получившиеся состояния от 0 до 7 (см. Таблицу №2).

Таблица 2. Состояния D-триггера.

№ состояния триггера	Состояние линий		
	C	D	Q
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Полная граф-схема устойчивых состояний D-триггера

Построим граф-схему состояний D-триггера, где состояния - вершины графа - будем обозначать кружочками с соответствующей маркировкой CDQ, а переходы – дугами, соединяющими их. При построении графа используем простые правила соединения вершин графа:

- Из каждого состояния выходят не более четырёх дуг (потому, что возможны четыре комбинации состояний двух входных переменных C и D);
- Каждая дуга должна приводить или в другое состояние или в то же самое, в этом случае дуга называется удерживающей при соответствующей комбинации входных сигналов;
- Количество входящих дуг – не менее одной и сверху не ограничивается;
- Для рассматриваемого устройства (по практике его применения) получающийся граф должен быть связным и ни одно из состояний его не должно быть тупиковым – не имеющим выхода;
- Должны быть приведены все рабочие дуги переходов;
- Граф-схема контролируется на симметрию.

Начинается построение с рисования выходящих дуг – по четыре из каждой вершины графа. Каждая из этих дуг должна прийти в другую или в эту же вершину. Граф-схема строится до тех пор, пока не останется ни одной незамкнутой с двух сторон дуги. Для нахождения вершины, в которую приведёт дуга необходимо проследить по схеме последовательность срабатывания логических элементов по соответствующей этой дуге комбинации входных сигналов. Например, при исходном состоянии схемы **abcdefgh = 01001110** переход сигнала C из 0 в 1 приводит к последовательности срабатываний логических элементов в ней и переходу через череду неустойчивых состояний в конечное устойчивое состояние схемы (см. Таблицу 3):

Таблица 3. Последовательность срабатываний логических элементов.

	a	b	c	d	e	f	g	h
сработал элемент III (неустойчивое состояние схемы)	0	1	1	0	1	0	1	0
сработал элемент VI (неустойчивое состояние схемы)	0	1	1	0	1	0	1	1
сработал элемент V (устойчивое состояние схемы)	0	1	1	0	1	0	0	1

Итоговая полная граф-схема переходов между устойчивыми состояниями D-триггера приведена на рис. 4. В приведённой схеме штрих-пунктирной линией отмечены переходы, которые происходят при одновременном изменении состояний входных линий C и D. Заметим, что такая граф-схема, насколько нам известно,

приводится впервые [1-10]. Полная граф-схема D-триггера может быть упрощена ввиду того, что одновременное изменение состояний входных линий C и D на практике не применяется, то есть разработчики устройств, в которых применяется D-триггер организуют их работу таким образом, чтобы подобных ситуаций не возникало. При их неодновременном срабатывании конечные состояния триггера могут отличаться и зависеть от того, какая линия изменила состояние первой.

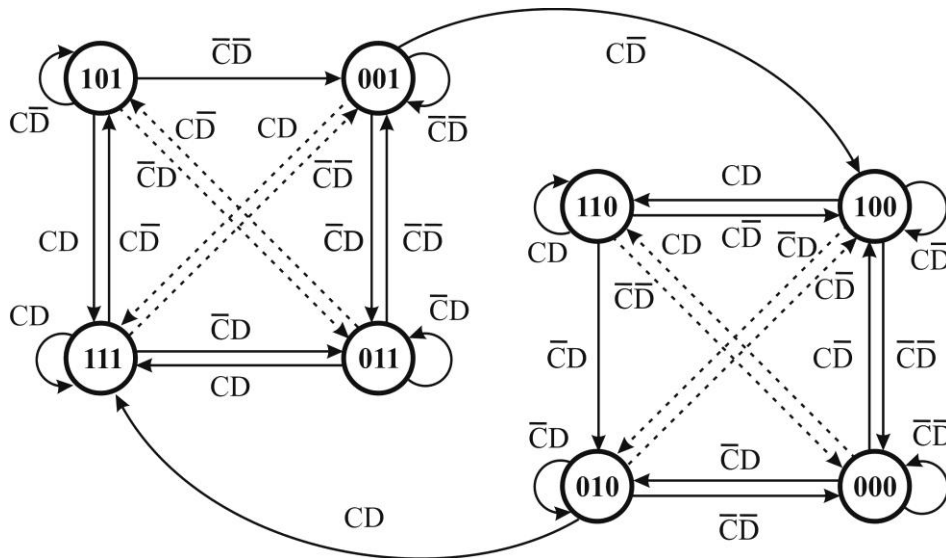


Рис. 4 Полная граф-схема переходов между состояниями D-триггера.

В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим переход из состояния **001** в **111** (см. рис. 4). При «одновременной» подаче на входные линии $C=1$ и $D=1$ триггер перейдет в состояние **111**. Однако если первым изменится состояние линии C с 0 на 1, а D будет сохранять пока значение 0, то сначала произойдет переход в **100**, а потом - при появлении на входе D значения 1, произойдет переход в устойчивое состояние **110**. Если же сначала изменится состояние линии D с 0 на 1, то триггер перейдет в состояние **011**, а потом – при изменении состояния линии C с 0 на 1 – в устойчивое состояние **111**. В этом случае конечное состояние совпадает с состоянием, в котором оказывается триггер при «одновременном» изменении состояний входных линий C и D. Ввиду такой неоднозначности работы D-триггера на практике такие переходы стараются тем или иным способом не допустить, поэтому приведённую граф-схему переходов можно упростить, исключив штрих-пунктирные переходы (см. рис. 5).

Возвращаясь к началу статьи, посмотрим, как можно воспользоваться приведённой граф-схемой. Из рис. 5 наглядно видно, что если начальное состояние линии C было равно 0, а потом изменилось до 1, то состояние линии D передалось на выход триггера Q (переходы **001**→**100**, **010**→**111**, **011**→**111**, **000**→**100**). В тех же

случаях, когда состояние линии С менялось с 1 до 0 состояние на выходе триггера оставалось неизменным, независимо от состояния линии D (например, переходы **101**→**001**, **111**→**011**, **110**→**010**, **100**→**000**). Именно поэтому данный триггер является триггером с динамическим входом, управляемым по переднему фронту.

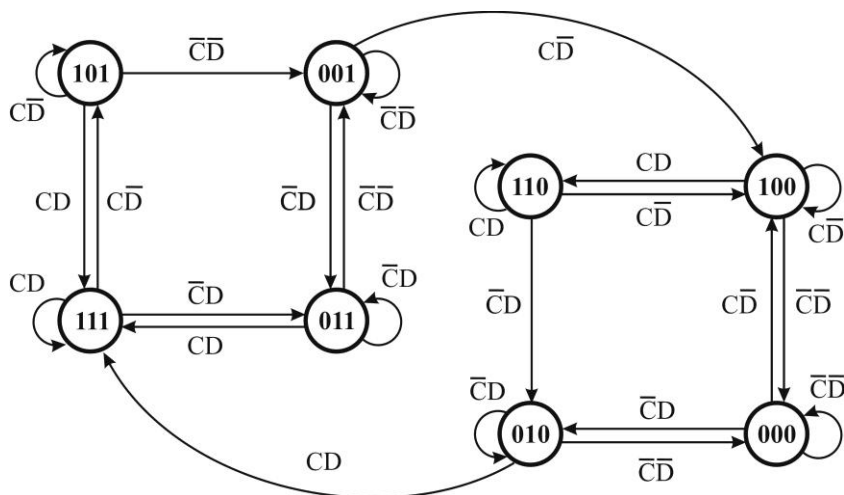


Рис. 5 Практическая граф-схема переходов между состояниями D-триггера.

Заключение

Впервые построена полная граф-схема устойчивых состояний D-триггера с динамическим входом, включающая все возможные варианты его переключений (пути переходов из состояния в состояние) при всех возможных ситуациях, складывающихся на его входных и выходных линиях. Приведено полное словесное определение D-триггера. Впервые относительно триггера вводится новое определение его состояния, зависящего от состояний всех его входных и внутренних линий. Такой подход позволяет выделить восемь различных состояний D-триггера, а не два, традиционно приводимых в технической литературе. Полученная граф-схема триггера позволяет просто отслеживать возможные режимы его работы и наглядно получать временные диаграммы, для чего достаточно пройти по соответствующим путям переходов в такой схеме. При этом переключения, происходящие во внутренних логических элементах триггера и прослеживание изменений всех участвующих в переключениях обратных связей не требуется. В заключение, ещё раз отметим, что для реальной работы с D-триггером достаточно упрощенной граф-схемы, а для анализа всех возможных ситуаций можно использовать полную граф-схему.

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. Сапожников В.В. Методы синтеза надежных автоматов. Ленинград, "Энергия", Ленинградское отделение, 1980 г.