

10.6. Импульсные и цифровые электронные устройства

10.6.1. Цифровые электронные устройства и их сигналы

Электронный сигнал может быть чисто дискретным, например импульсы в детекторе частиц или «биты» информации, поступающие от ключа, клавиатуры или ЭВМ. В подобных случаях естественно и удобно использовать цифровую электронику, т. е. схемы, которые имеют дело с информацией, представленной в виде условных «единиц» или «нулей».

Полупроводниковые цифровые устройства объединяют обширную группу устройств, которые применяются в системах управления технологическими процессами при передаче информации в измерительной и вычислительной технике.

Различают импульсные устройства с несколькими устойчивыми и несколькими временно устойчивыми состояниями. В импульсном устройстве первого типа для изменения устойчивого состояния необходимо однократное внешнее воздействие, изменяющее его режим работы. В импульсном устройстве с временно устойчивыми состояниями происходит периодическое переключение без внешнего воздействия или его состояния восстанавливаются через некоторое время после внешнего воздействия.

Импульсные устройства с временно устойчивыми состояниями являются источниками импульсов, параметры которых и частота следования могут регулироваться в широких пределах.

Примером импульсных устройств с устойчивыми состояниями являются электронные *триггеры* и устройства хранения и обработки информации.

Таким образом, под цифровой электроникой понимаются такие схемы, для каждой точки которых можно определить, как правило, только два состояния электрической величины. Обычно в качестве контрольной электрической величины выбирают напряжение, уровень которого может быть ВЫСОКИМ или НИЗКИМ. Эти два состояния могут представлять различные "биты" информации, например, ключ замкнут или разомкнут, сигнал присутствует или отсутствует, уровень аналогового сигнала выше или ниже заданного предела, некоторое событие произошло или не произошло, требуется или не требуется выполнять некоторые действия и т.д.

Состояния ВЫСОКОГО и НИЗКОГО уровней некоторым заданным образом определяют «истинные» и «ложные» значения в булевой алгебре. Если в какой-либо точке схемы истинное значение определяет ВЫСОКИЙ уровень, то говорят, что эта сигнальная линия использует "положительную логику" и наоборот.

Значения напряжений, соответствующих ВЫСОКИМ и НИЗКИМ уровням, могут колебаться в некотором диапазоне. Например, состояние НИЗКОГО уровня может быть представлено любым значением напряжения от 0 до 0,8 В, и ВЫСОКИЙ уровень – любым значением напряжения в пределах от +2,0 до +5,5 В.

Такие широкие диапазоны выбраны для того, чтобы изготовитель микросхем имел в своем распоряжении определенный допуск, в пределах которого параметры схемы могут колебаться за счёт изменения температуры, нагрузки напряжения питания, а также под воздействием электронных шумов (паразитных сигналов) за счет ёмкостных связей, внешних наводок и т.п.

Получив сигнал, схема определяет, каков его уровень (ВЫСОКИЙ или НИЗКИЙ), и действует соответствующим образом. Если помеха не велика и не превращает 1 в 0 или наоборот, то все помехи отсеиваются на каждой ступени передачи сигнала, поскольку на выходе каждой цифровой схемы восстанавливаются «чистые» значения 1 или 0. В этом смысле цифровая электроника не подвержена влиянию помех и является идеальной.

10.6.2. Основные виды электронной логики

Для своевременного подключения и отключения необходимого оборудования в целях поддержания режимов технологических процессов необходимо принимать те или иные решения в зависимости от конкретных условий. Если наличие или отсутствие каждого условия отождествить с напряжением электрического сигнала различного уровня, то решения можно осуществить с помощью цифровых устройств на основе *логических элементов*.

Такие устройства реализуют логическое преобразование совокупности сигналов об условиях работы в совокупность сигналов управления технологическим процессом [11].

В настоящее время при разработке цифровых интегральных схем (ИС) наибольшее распространение получил ряд технологических решений, определяющих внутреннее схемотехническое исполнение цифровых схем:

- резисторно-транзисторная логика (РТЛ/RTL);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ/DTL);
- стандартная транзисторно-транзисторная логика 5В (ТТЛ/TTL);
- низковольтная транзисторно-транзисторная логика 2,5/3,3 В (НВТТЛ/LVTTL);
- транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ/TTLS);
- эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ/ECL);
- интегрально-инжекторная логика (И2Л/I2L);
- логика на комплементарных парах полевых МДП-транзисторов (КМОП/CMOS).

Сегодня наиболее широко используются следующие логики: ТТЛ, ТТЛШ, КМОП. Из всех логических элементов наибольшее быстродействие имеют элементы ЭСЛ, а элементы КМОП имеют наименьшее потребление, причем они же имеют лучшую нагрузочную способность. Самыми распространёнными на сегодняшний день являются ИС, реализующие ТТЛ и её разновидности. Интегральные схемы данного типа обладают средним быстродействием и средней потребляемой мощностью. Микросхемы ТТЛ первыми появились на рынке цифровых элементов. Позднее были освоены микросхемы типа КМОП, которые в свое время проигрывали биполярным схемам по быстродействию, но отличались высокой компактностью, энергетической экономичностью, высокой помехоустойчивостью, способностью работать при изменении питающего напряжения в широких пределах. Элементы КМОП по мере повышения их быстродействия стали все более вытеснять микросхемы ТТЛ, оставляя за ними схемотехнику буферных, согласующих и других элементов, которые должны сохранять высокое быстродействие при больших нагрузках. В современных микропроцессорных устройствах используются КМОП-логику.

В зависимости от схемотехнической реализации логических элементов сигналы на их входах и выходах имеют либо отличное от нуля напряжение (положительное или отрицательное), либо напряжение, близкое к нулю, которые принято условно *отождествлять с логической единицей* или *нулём*.

В случае со стандартной ТТЛ-логикой с напряжением питания 5 В логический ноль соответствует значению напряжения от 0 В до 0,8 В, а высокий логический уровень будет иметь напряжение от 2 до 5 В.

Входные пороги обычной КМОП- логики, определяются как $0,3 U_{пит}$ и $0,7 U_{пит}$, что соответствует значениям 1,5 и 3,5 В. Однако

большинство изготовленных по технологии КМОП логических микросхем, которые используются сегодня, совместимы по логическим порогам с микросхемами TTL и LVTTTL; эти пороги также доминируют среди стандартов для цифровых схем, работающих при напряжении питания 3,3 В и 5 В.

Сводка существующих стандартов уровней логических сигналов с использованием диаграммы показана на рис. 1. Здесь приведены минимальные и максимальные требуемые уровни входного и выходного напряжения, достоверно обеспечивающие высокий или низкий логические уровни. На столбцах диаграммы, соответствующим входному «I» или выходному «О» сигналу цифровой схемы, имеется три части. Нижняя часть показывает диапазон входного сигнала, который воспринимается как низкий логический уровень. Средняя часть показывает диапазон входного напряжения, в котором уровень сигнала не воспринимается гарантированно как низкий или высокий. Верхняя часть соответствует входному сигналу, который воспринимается как высокий логический уровень.

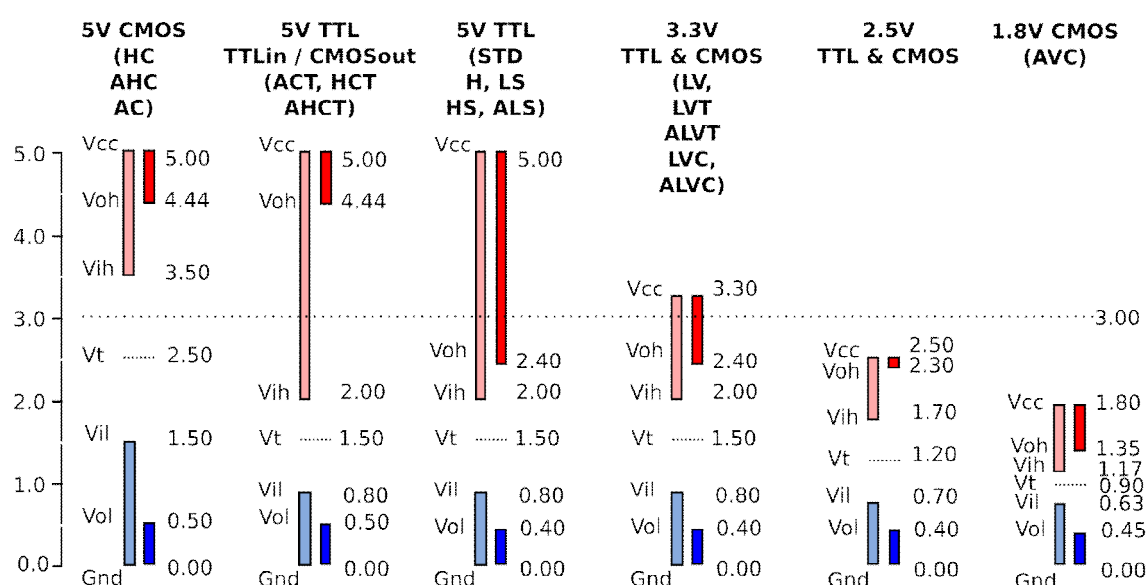


Рис. 1. Стандарты уровней логических сигналов

Приведённая классификация внутреннего схемотехнического исполнения цифровых схем охватывает не только дискретные логические элементы, но и более сложные цифровые устройства, в том числе микропроцессорные. Все они выпускаются в составе серий микросхем, каждый корпус которых может содержать несколько логических элементов или сложную цифровую схему.

Серия микросхем – это совокупность микросхем, характеризующихся общим технологическими и схемотехническими решениями. Ниже приведены примеры серий отечественных микросхем, реализуемых на разных типах электронной логики:

- ТТЛ – К155, КМ155, К133, КМ133;
- ТТЛШ – 530, КР531, КМ531, К1531, 533, К555, КМ555, 1533, КР1533;
- ЭСЛ – 100, К500, К1500;
- КМОП – 564, К561, 1564, КР1554.

<https://chipinfo.pro/elements/chip/allrussianchips.shtml>.

При маркировке микросхем применяется буквенно-цифровой код. Классификацию и систему условных обозначений вновь разрабатываемых (в том числе дублирующие) интегральных схем устанавливает стандарт ОСТ 11073.915-2000. «Микросхемы интегральные. Классификация и система условных обозначений».

10.6.3. Логические элементы

Логические элементы и схемы могут работать в режимах положительной логики и отрицательной логики. При этом работу логического элемента можно описать зависимостью логического значения выходного сигнала F от совокупности логических значений входных сигналов x . Такую зависимость принято представлять *таблицей истинности*.

Для любых логических преобразований достаточно иметь три базовых элементарных логических элемента, выполняющих операции: логическое отрицание (логическое НЕ): инвертор (рис.10.67, *а*); логическое сложение (логическое ИЛИ): дизъюнктор (рис.10.67, *б*); логическое умножение (логическое И): конъюнктор (рис.10.67, *в*).

На практике часто используется расширенный набор логических элементов. К ним относятся: стрелка Пирса (ИЛИ-НЕ), штрих Шеффера (И-НЕ); импликация, запрет, равнозначность (рис. 10.68).

На базе логических элементов построены такие устройства, как *шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры*.

Шифратор (кодер) преобразует сигнал на одном из его входов в n -разрядное двоичное число. При появлении сигнала логической единицы на одном из десяти входов на четырёх выходах шифратора будет присутствовать соответствующее двоичное число.

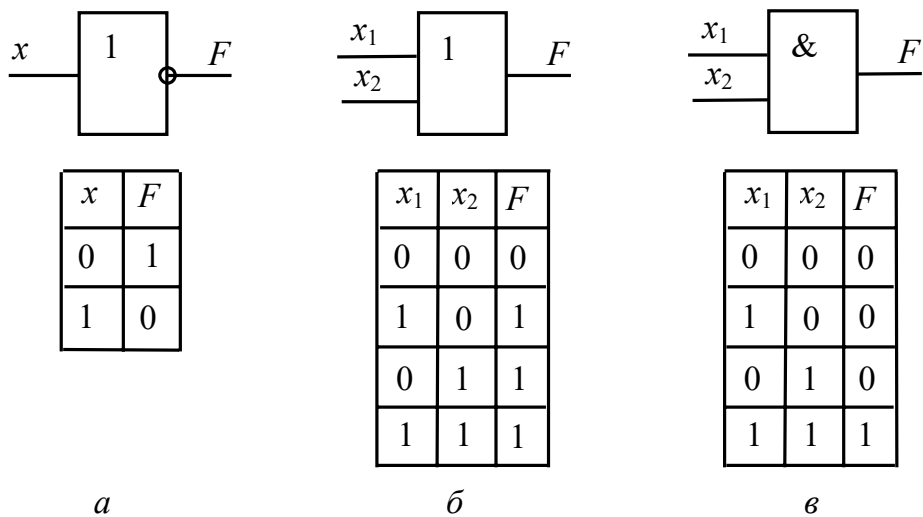


Рис. 10.67. Обозначения и таблицы истинности основных логических элементов: *а* – НЕ; *б* – ИЛИ; *в* – И

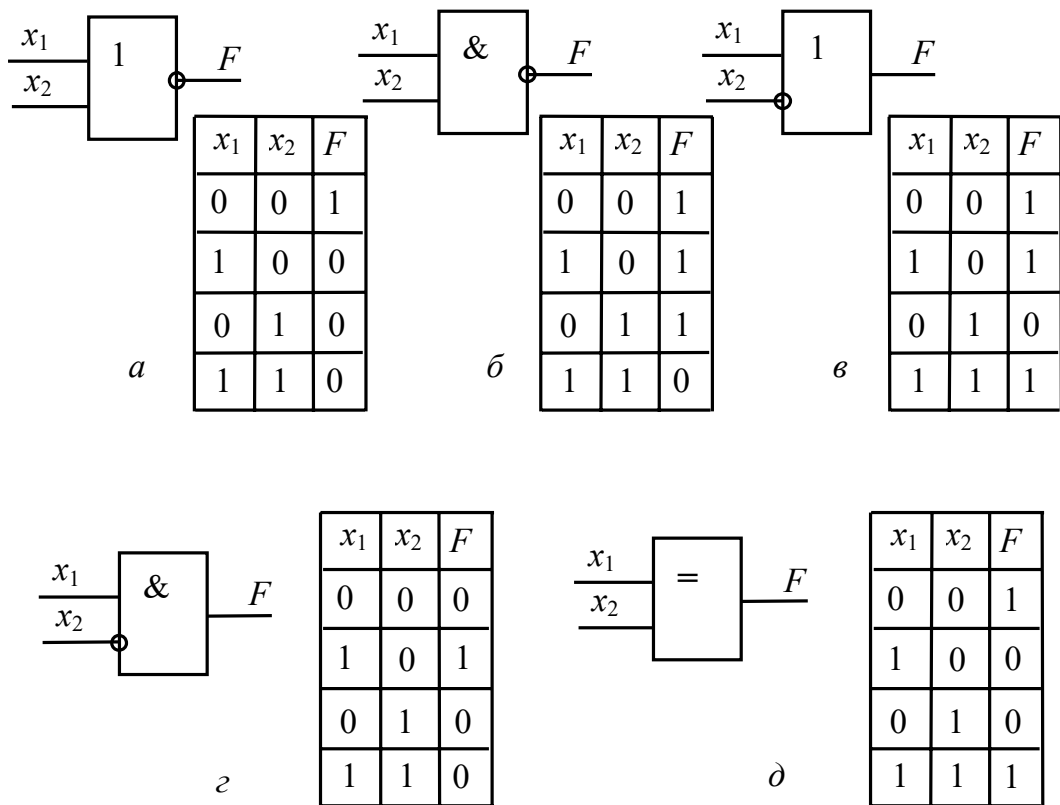


Рис. 10.68. Обозначения и таблицы истинности логических элементов: *а* – ИЛИ-НЕ; *б* – И-НЕ; *в* – импликация; *г* – запрет; *д* – равнозначность

Дешифратор (декодер) преобразует код, поступающий на его n - входов, в сигнал логической единицы только на одном из его выходов. Дешифратор n -разрядного двоичного числа имеет 2^n выходов.

Различные типы дешифраторов применяются в схемах цифровой индикации информации. Особенно широко применяются дешифраторы, преобразующие информацию в код для семисегментных индикаторов.

Мультиплексор – это устройство, обеспечивающее соединение одного из информационных входов с выходом. Номер информационного входа, который соединяется с выходом, задаётся в двоичном коде на адресных входах. Если мультиплексор имеет n адресных входов, то в нём может быть 2^n информационных входов. Мультиплексор позволяет передавать по одной коммуникационной линии или каналу одновременно несколько различных потоков данных.

Демультимплексор – это устройство, обеспечивающее соединение одного из информационных выходов с одним входом. Номер информационного выхода, который соединяется с входом, задаётся в двоичном коде на адресных входах. Если демультимплексор имеет n адресных входов, то в нём может быть 2^n информационных выходов.

Разновидностью логического элемента «ИЛИ-НЕ» является *сумматор*. Основной элементарной операцией, выполняемой над кодами чисел в цифровых устройствах, является арифметическое сложение. Сумматор – логический операционный узел, выполняющий арифметическое сложение двух чисел.

При арифметическом сложении выполняются и другие дополнительные операции: учёт знаков чисел, выравнивание порядков слагаемых и тому подобное. Указанные операции выполняются в арифметико-логических устройствах, ядром которых являются сумматоры.

10.6.4. Триггеры

Триггерами называются импульсные устройства с двумя устойчивыми состояниями, которым соответствуют различные значения напряжений на информационных выходах. Они применяются в счётчиках импульсов напряжения, делителях частоты следования импульсов напряжения и т.д. [11, 14].

По способу управления триггеры делятся на асинхронные и синхронные. В *асинхронных триггерах* переключение из одного устойчивого состояния в другое осуществляется под действием определённой совокупности импульсов напряжения на управляющих входах.

В *синхронных триггерах* такое переключение возможно только при совпадении во времени определённой совокупности импульсов напряжения на управляющих входах и импульса напряжения на входе синхронизации (тактового импульса).

Различают несколько типов триггеров: *RS*-, *T*-, *D*-, *JK*- и др., названия которых отражают принятые обозначения для управляющих входов. Триггеры обычно реализуются на основе логических элементов и выпускаются в виде микросхем.

Выделяют *однотактные* (обозначение *T*) и *двухтактные* (обозначение *TT*) триггеры. Однотактные триггеры переключаются по переднему фронту тактового импульса, а двухтактные – по его заднему фронту. Триггеры имеют два взаимоинверсных выхода: *прямой Q* и *инверсный $\bar{Q}$* . Триггер находится в единичном состоянии, когда $Q = 1$; $\bar{Q} = 0$, и в нулевом, когда $Q = 0$; $\bar{Q} = 1$.

На рис. 10.69 показана логическая схема, условное обозначение и таблица состояний *RS-триггера*, выполненного на логических элементах ИЛИ-НЕ. Этот триггер имеет два управляющих входа: *R* и *S*.

Вход, по которому триггер устанавливается в единичное состояние, называют входом *S* (от англ. *set* – установка), а в нулевое – входом *R* (*reset* – сброс). Если $S = 1$; $R = 0$, то триггер переходит в единичное состояние; при $S = 0$, $R = 1$ – в нулевое состояние. При установке на входах логических нулей ($S = 0$; $R = 0$) триггер сохраняет предыдущее состояние. Такую комбинацию входных сигналов называют нейтральной, или «памятью». Если на входы одновременно поступают единичные сигналы ($S = 1$; $R = 1$), то на обоих выходах появляются логические нули $Q = 0$; $\bar{Q} = 0$ и триггер утрачивает свои свойства, поскольку под воздействием внутренних факторов он может равновероятно перейти как в единичное, так и в нулевое состояние. Такая комбинация входных сигналов является запрещённой для триггера – «запрет».

Построенный на элементах ИЛИ-НЕ и переключающийся единичными сигналами *RS-триггер называют триггером с прямыми входами*, *RS-триггер, выполненный на базовых элементах И-НЕ, – триггером с инверсными входами*. Чтобы *RS-триггер* на логических элементах И-НЕ вырабатывал те же сигналы, что и триггер с прямыми входами, необходимо подавать на его входы инверсные сигналы.

Синхронный *RS-триггер* отличается от асинхронного наличием входа *C* для синхронизирующих тактовых импульсов. Переключение этого триггера под действием сигналов на входах *R* и *S* происходит только при появлении высокого уровня на тактовом входе *C*.

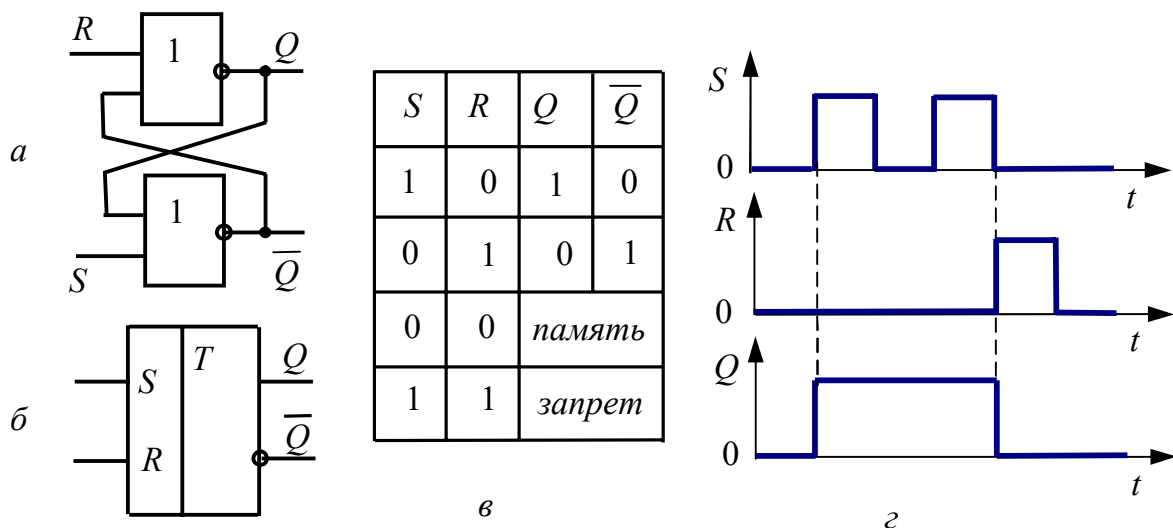


Рис. 10.69. Асинхронный RS -триггер с прямыми входами:
 a – логическая схема; b – условное обозначение;
 v – таблица состояний; z – временные графики

T -триггер, или *счётный триггер*, имеет только один управляющий вход T (рис. 10.70, a) и его переключение происходит в момент поступления очередного входного импульса. Счётным он называется потому, что подсчитывает количество импульсов, поступивших на его вход.

T -триггер может быть выполнен на основе двухтактного D -триггера с динамическим управлением путём соединения инверсного выхода со входом D (рис. 10.70, b).

Период повторения выходных импульсов T -триггера в два раза больше периода повторения входных импульсов (рис. 10.70, $в$). Поскольку частота следования выходных импульсов в этом случае уменьшается вдвое, то T -триггеры широко используются в делителях частоты, также T -триггеры используются при построении схем различных счётчиков.

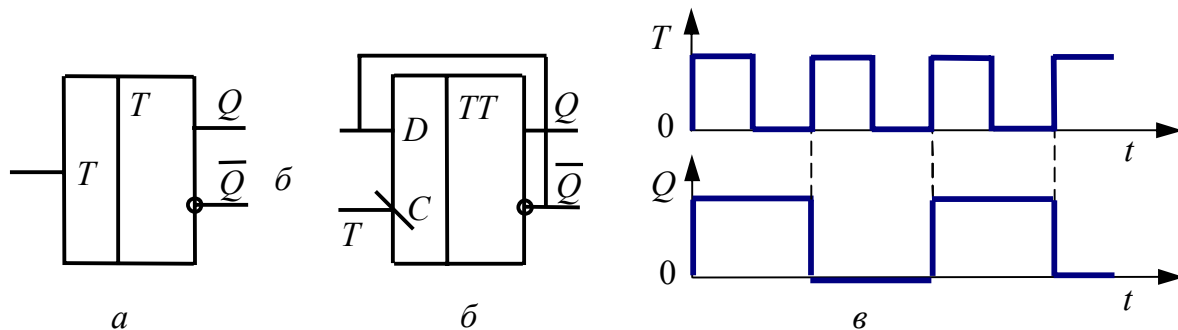


Рис. 10.70. T -триггер:
 a – условное обозначение; b – схема из D -триггера; $в$ – временные графики

D-триггер имеет прямые или инверсные установочные входы R и S , один управляющий вход D (*delay* – задержка) и вход синхронизации C (*clock* – фиксация времени) (рис. 10.71, *а*). Входы R и S служат для предварительной установки D -триггера в нулевое или единичное состояние ($Q = 0$ или $Q = 1$). Сигнал на управляющем входе $D = 1$ или $D = 0$ устанавливает триггер в устойчивое состояние с одноимённым значением на прямом информационном выходе $Q = 1$ или $Q = 0$ только при одновременном действии импульса положительной полярности на входе синхронизации C (рис. 10.71, *б*), т.е. у D -триггеров с потенциальным управлением информация со входа D переписывается на выход Q в течение времени, при котором синхросигнал активен $C = 1$. В D -триггерах с динамическим входом C информация записывается только в течение перепада напряжения на входе C .

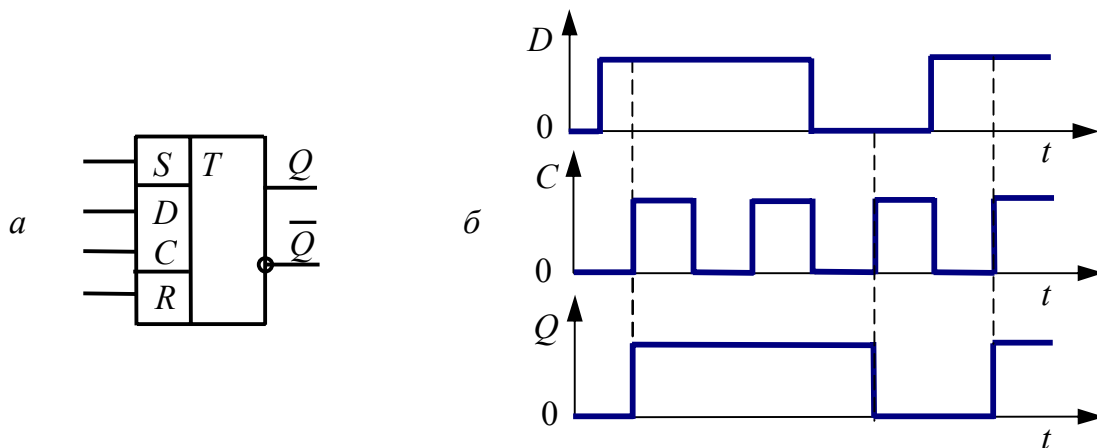


Рис. 10.71. D -триггер:
а – условное обозначение; *б* – временные графики

Так как информация на выходе остаётся неизменной до прихода очередного импульса синхронизации, D -триггер называют также *триггером с запоминанием информации* или *триггером-защёлкой*.

JK -триггер имеет два управляющих входа J (*jump* – прыжок), K (*kill* – отключение), входы R и S принудительной установки триггера в состояние 0 или 1, вход синхронизации C (рис. 10.72, *а*). JK -триггер называют универсальным потому, что на его основе с помощью несложных коммутационных преобразований можно получить RS - и T -триггеры, а если между входами J и K включить инвертор, то получится схема D -триггера.

Таблица состояний JK -триггера представлена на рис. 10.72, *б*. Если сигнал $C = 1$, то JK -триггер функционирует как RS -триггер с прямыми входами, при этом вход J предназначен для установки триггера в состояние 1, а вход K – в состояние 0. Комбинация сигналов $J = 1$ и $K = 1$

не является запрещённой для JK -триггера – в этом случае независимо от исходного состояния триггера происходит его переключение на противоположное (т.е. выполняется операция инверсии) в течение действия переднего фронта импульса синхронизации положительной полярности. При этом частота изменения напряжения на выходе триггера в два раза меньше частоты импульсов синхронизации (рис. 10.72, в). Если $J = 0$; $K = 0$, то исходное состояние триггера под действием импульса синхронизации не изменится.

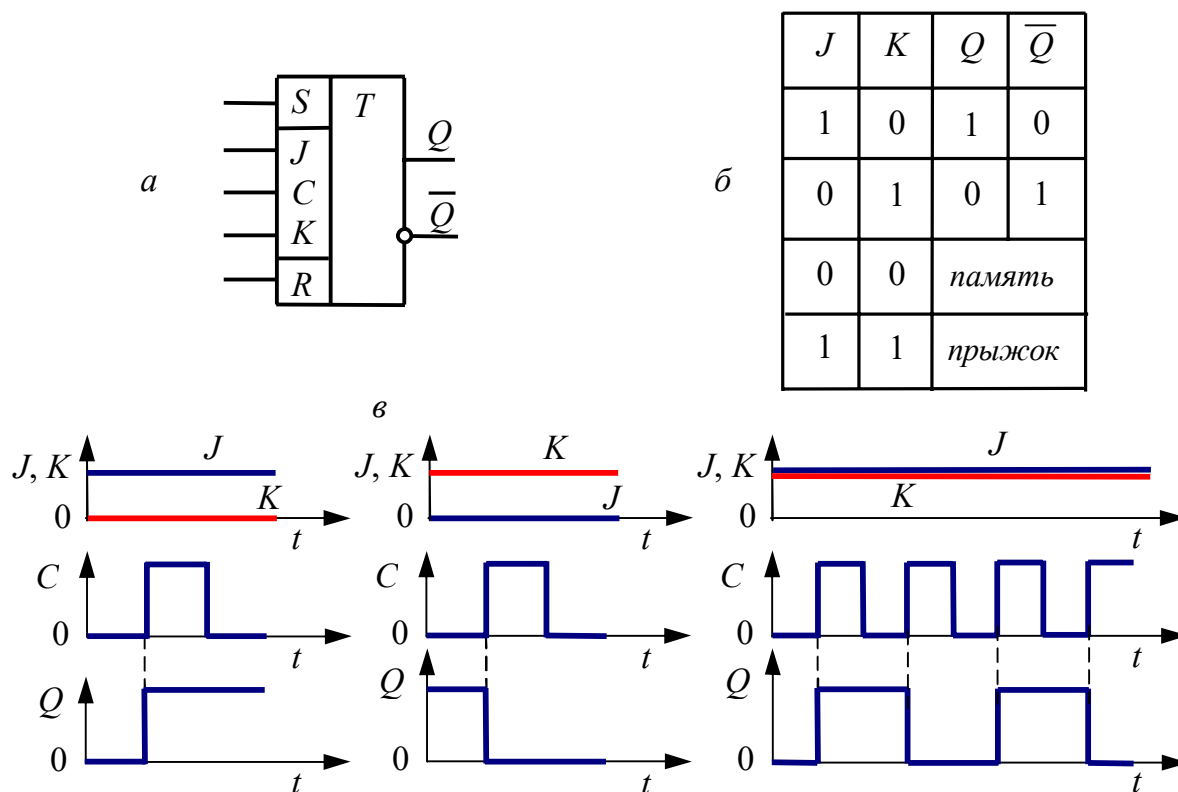


Рис. 10.72. JK -триггер:

а – условное обозначение; *б* – таблица состояний; *в* – временные графики

Контрольные вопросы и задания

1. Как происходит формирование импульсов напряжения?
2. В чём состоит отличие импульсных устройств с несколькими устойчивыми и устройств с несколькими временно устойчивыми состояниями?
3. Назовите области применения логических элементов.
4. Что называют логическим нулём? Логической единицей? Что такое таблица истинности логического элемента?
5. Перечислите логические элементы. Составьте для логических элементов таблицы истинности.

6. Для чего применяют мультивибратор, одновибратор?
7. Какие устройства называют триггерами?
8. Как происходит формирование сигнала на выходе асинхронного (синхронного) триггера?
9. Как происходит формирование сигнала на выходе одноктактных (двухтактных) триггеров?
10. Изобразите RS -триггер и его таблицу состояний.
11. Какой триггер называют счётным?
12. Изобразите временные графики, поясняющие работу D -триггера.
13. Изобразите JK -триггер и его таблицу состояний. Как можно использовать JK -триггер в схемах делителей частоты?

10.7. Программируемые устройства. Микропроцессоры

Программируемые цифровые и логические устройства представляют собой универсальные технические средства для создания электронных устройств различного назначения. Они основаны на применении *арифметико-логического устройства* (АЛУ) [11].

АЛУ выполняет арифметические и логические операции над входными величинами A и B в двоичном коде в зависимости от сигналов на управляющих входах M , S_0 , S_1 , S_2 , S_3 и на входе переноса P_0 из внешних цепей (рис. 10.73). Результат операции определяется совокупностью сигналов на выходах F и на переносе P_4 из старшего разряда. При $M = 0$ выполняются арифметические операции (сложение A и B , сложение A и B с добавлением P_0 в младший разряд и т.д.), а при $M = 1$ – логические операции. Комбинация сигналов S_0 , S_1 , S_2 , S_3 определяет, какая именно операция выполняется.

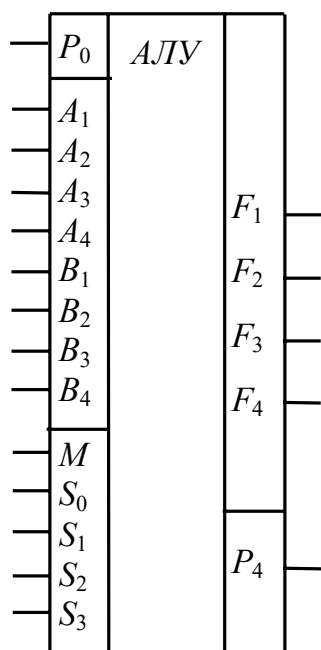


Рис. 10.73. Арифметико-логическое устройство

Несмотря на разнообразие операций, выполняемых АЛУ, они имеют недостатки: отсутствуют операции умножения, деления и т.д. Эта ограниченность преодолена в микропроцессорах.

Микропроцессор – это информационное устройство, реализованное в виде большой интегральной схемы, которое по программе, задаваемой управляющими сигналами, обрабатывает информацию, т.е. реализует операции: арифметические, логические, ввода, вывода и т.д.

Универсальные микропроцессоры предназначены для решения задач цифровой обработки различного типа информации от инженерных расчётов до работы с базами данных, не связанных жесткими ограничениями на время выполнения задания. К ним относятся известные микропроцессоры фирм Intel и AMD.

Однокристалльные микроконтроллеры предназначены для использования в системах промышленной и бытовой автоматики. Особенностью микроконтроллеров является размещение на одном кристалле, помимо центрального процессора, внутренней памяти и большого набора периферийных устройств, необходимых для реализации цифровой системы управления минимальной конфигурации. В состав микроконтроллеров входят: процессор (как правило, целочисленный), задающее устройство команд, задающее устройство данных, генератор тактовых сигналов, программируемые устройства для связи с внешней средой (контроллер прерывания, таймеры-счетчики, разнообразные порты ввода/вывода), иногда аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и т.д. В некоторых источниках этот класс микропроцессоров называется однокристалльными микроЭВМ.

В настоящее время две трети всех производимых микропроцессорных схем в мире составляют однокристалльные микроЭВМ, причём почти две трети из них имеет разрядность, не превышающую 16 бит. К классу однокристалльных микроконтроллеров прежде всего относятся микропроцессоры серий MCS-51 фирмы Intel, AVR фирмы Atmel и аналогичные микропроцессоры других производителей, архитектура которых стандартна.

Секционированные (разрядно-модульные) микропроцессоры – это микропроцессоры, предназначенные для построения специализированных процессоров. Они представляют собой микропроцессорные секции относительно небольшой (от 2 до 16) разрядности с пользовательским доступом к микропрограммному уровню управления и средствами для объединения нескольких секций (отечественные микропроцессоры серий К589 и 585).

Такая организация позволяет спроектировать процессор необходимой разрядности со специализированной системой команд. Из-за своей малой разрядности микропроцессорные секции могут быть по-

строены с использованием быстродействующих технологий. Совокупность всех этих факторов обеспечивает возможность создания процессора, наилучшим образом ориентированного на заданный класс алгоритмов как по системе команд и режимам адресации, так и по форматам данных.

Процессоры цифровой обработки сигналов, или цифровые сигнальные процессоры, представляют собой бурно развивающийся класс микропроцессоров, предназначенных для решения задач цифровой обработки сигналов – обработки звуковых сигналов, изображений, распознавания образов и т. д.

Основные характеристики микропроцессоров:

- разрядность: определяется максимальной разрядностью целочисленных данных, обрабатываемых за 1 такт, то есть фактически разрядностью арифметико-логического устройства (АЛУ);
- виды и форматы обрабатываемых данных;
- система команд, режимы адресации операндов;
- ёмкость прямоадресуемой оперативной памяти: определяется разрядностью шины адреса;
- частота внешней синхронизации;
- производительность.

Упрощённая структурная схема микропроцессора представлена на рис. 10.74.

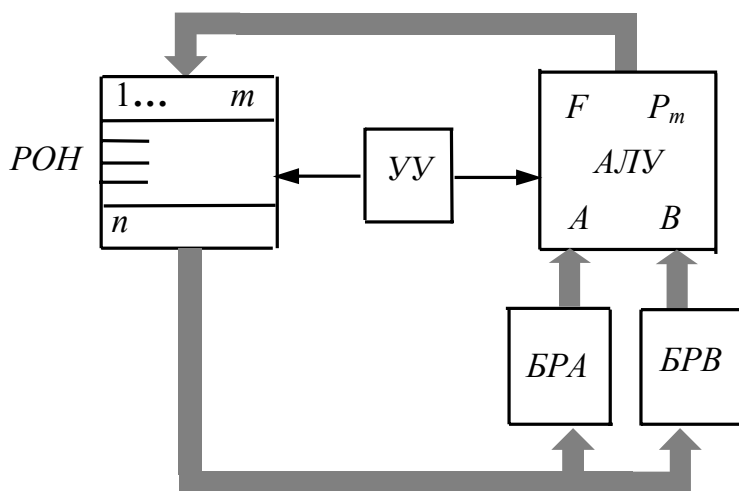


Рис. 10.74. Структурная схема микропроцессора

Микропроцессор состоит из АЛУ и совокупности *n* параллельных регистров по *t* разрядов общего назначения (РОН) для хранения

двоичных чисел, используемых в процессе вычислений. В состав микропроцессора также входят два параллельных *буферных регистра (БР)*, предназначенных для кратковременного хранения чисел *A* и *B* во время выполнения операций *АЛУ*, и *устройство управления (УУ)*, которое задаёт режимы работы всех элементов микропроцессора.

При работе микропроцессора числа *A* и *B*, над которыми выполняется операция, передаются по магистрали последовательно из *РОН* в буферные регистры *БРА* и *БРВ*. Затем по команде *АЛУ* производит указанную операцию, а результат её по внутренней магистрали передаётся в *РОН*. Обычно для этой цели выделяется отдельный регистр *РОН*, называемый аккумулятором, в котором ранее записанное число стирается. Например, сложение трёх чисел выполняется таким образом: сначала складываются первые два числа и результат записывается в *РОН*, затем в *АЛУ* поступает результат этого сложения и третье число, вычисляется окончательный результат и записывается в *РОН*.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое устройство является основой программируемых цифровых и логических устройств?
2. Приведите обозначение и назовите назначение входов и выходов арифметико-логического устройства.
3. Какое устройство называют микропроцессором?
4. Перечислите основные типы микропроцессоров.
5. В чём отличие микроконтроллеров от микропроцессоров?
6. Какова область применения микроконтроллеров?
7. Перечислите основные характеристики микропроцессоров.
8. Чем определяется разрядность микропроцессора?
9. Изобразите структурную схему микропроцессора и поясните порядок его работы.