Общие сведения о счетчиках

Счётчики относятся к функциональным узлам последовательностного типа, логическое состояние которых определяется последовательностью поступления входных сигналов. Счётчики применяются в различных цифровых устройствах. Назначение счётчика очевидно: это подсчёт числа некоторых событий или временных интервалов, либо упорядочение событий в хронологической последовательности. Счётчики могут выполнять и другие функции, например, их можно использовать для адресации, в качестве делителей частоты и элементов памяти.

Счётчик характеризуются прежде всего ***модулем счёта*** (ёмкостью) М. Он переходит при поступлении входных сигналов из состояния в состояние, после каждых М сигналов возвращаясь к началу цикла. Счётчики классифицируют по значению модуля, направлению счёта, способу организации межразрядных связей, по способу подачи тактового импульса.

***По значению модуля счёта*** различают двоичные (*М=2n*), двоично-кодированные (с произвольным модулем, но кодированием состояний двоичными кодами), счётчики с одинарным кодированием и др.

***По направлению счёта*** счётчики делят на суммирующие (прямого счёта), вычитающие (обратного счёта) и реверсивные (с изменением направления счёта).

***По способу организации межразрядных связей*** различают счётчики с последовательным, параллельным и комбинированными переносами. Параллельные счётчики называют синхронными, а последовательные - асинхронными.

Цифровую схему, выполняющую функцию счёта, можно собрать из триггеров. Рассмотрим некоторые схемы счётчиков.

Счётчики со сквозным переносом

Процедура двоичного и десятичного счёта показана в табл. 13.1. Используя *4* двоичных разряда (*D*, *C*, *B* и *A*) можно считать от *0000* до *1111* (от *0* до *15* в десятичной системе). Столбец *А* соответствует самому младшему разряду, а столбец *D* самому старшему разряду. Если нужен счётчик, который считает от *0000* до *1111* (в двоичной системе), у него должно быть *16* различных выходных состояний, т.е. нужен счётчик с модулем *16*. На рис.13.1 показана схема счётчика по модулю *16*, составленная из *4* *JK*‑триггеров. Каждый *JK*‑триггер работает в режиме переключения (*J=K=1*). Пусть в начальный момент состояние выходов счётчика соответствует двоичному числу *0000* (счётчик очищен). При поступлении тактового импульса *1* на синхронизирующий вход (*C*) триггера *T1* этот триггер переключается (при прохождении среза импульса) и на индикаторе появляется двоичное число *0001*. Тактовый импульс *2* возвращает триггер *T1* в исходное состояние *0* (*Q=0*), что в свою очередь приводит к переключению триггера *T2* в состояние *1* (*Q=1*). На индикаторе появится число *0010*. Счёт продолжается: срез сигнала на выходе каждого триггера запускает следующий триггер.

Таблица 13.1.

Таблица двоичного и десятичного счета



Рис.13.1. Схема счетчика по модулю *16*

Из табл.13.1 видно, что цифры (*1* или *0*) в столбце *А* изменяется на каждом шаге счёта, т.е. триггер *T1* переключается с приходом каждого нового тактового импульса. Из столбца *В* видно, что триггер *T2* переключается в два раза реже триггера *T1*. Каждый более старший разряд «переключается» в *2* раза реже предыдущего.

На рис.13.2 показаны временные диаграммы при работе счётчика в процессе счёта до *10* (двоичное число *1010*).



Рис.13.2. Временные диаграммы работы счетчика по модулю *16*

Синхронизирующему входу состветствует верхняя диаграмма. Диаграммы для выходов *Q* триггеров *T1*, *T2*, *T3*, *T4* приведены ниже. Под диаграммами указаны двоичные числа, соответствующие различным состояниям счётчика. Из рис.13.2 видно, что тактовые импульсы запускают только триггер *T1*, триггер *T1* запускает триггер *T2*, триггер *T2* запускает триггер *T3* и т.д. Каждый триггер воздействует только на один (следующий за ним триггер), поэтому для переключения всех триггеров необходимо некоторое время. Например, на импульсе *8* (рис.13.2) тактовый импульс запускает триггер *T1*, вызывая его переключение в состояние *0*. Это в свою очередь приводит к переключению триггера *T2* из состояния *1* в состояние *0*. Затем точно также переключается *T3*. В момент установки на выходе *Q* триггера *T3* уровня логического *0* запускается триггер *T4*, который переключается из состояния *0* в состояние *1*. Таким образом, изменение состояний последовательно распространяется по цепочке триггеров. Рассматриваемый счётчик называют ***счётчиком со сквозным переносом***. Кроме этого данный счётчик можно назвать ***асинхронным***, поскольку предыдущий триггер вырабатывает для последующего тактовые импульсы. По направлению счёта счётчик, изображённый на рис.13.1 является суммирующим (прямого счёта).

Асинхронные счётчики по модулю *10*

Счётчик по модулю *10* считает от *0000* до *1001* (от *0* до *9* в десятичной системе), т.е. до черты в табл.13.1. Для построения такого счётчика трёх триггеров недостаточно (*10*>*23*), поэтому он содержит *4* триггера, но имеет обратные связи, останавливающие счёт при коде *9=1001*. На рис.13.3 показана схема счётчика по модулю *10*, в которую кроме *4* триггеров включён логический элемент И‑НЕ, для установки всех триггеров в нулевое состояние (очистки счетчика) с приходом десятого импульса.



Рис.13.3. Схема асинхронного счетчика по модулю *10*

Рассмотрим принцип работы данной схемы (рис.13.3). Из табл.13.1 видно, что за числом *1001* следует *1010* (*10* в десятичной системе). При подаче логической *1*, содержащейся в разрядах двоек и восьмерок двоичного числа *1010*, на входы элемента И‑НЕ, этот элемент подаст логический *0* на входы *R* четырех триггеров. Таким образом, все триггеры установятся в состояние *0* и счетчик снова начинает считать от *0000* до *1010*. Подобное использование логического элемента И‑НЕ позволяет создать счетчики с некоторыми другими значениями модуля. Счетчик, изображенный на рис.13.3 называют также декадным (десятичным) счетчиком.

Синхронные счетчики

В синхронных счетчиках все триггеры получают тактовый импульс одновременно, поскольку тактовые входы их соединяются параллельно. Такие триггеры переключаются практически одновременно. В асинхронных счетчиках каждый триггер вносит в процесс счета определенную задержку, поэтому младшие разряды результирующего кода появляются на выходах триггеров не одновременно, т.е. несинхронно с соответствующим тактовым импульсом. Например, для четырехразрядного асинхронного счетчика код *1111* появится на выходах триггеров уже после того, как поступит шестнадцатый тактовый импульс. Код *1111* сформируется не одновременно.

Рассмотрим схему *3*‑разрядного счетчика по модулю *8* (рис.13.4). Все синхронизирующие входы триггеров (*C*) соединены параллельно, тактовые импульсы поступают непосредственно на синхронизирующий вход каждого триггера.



Рис.13.4. Схема синхронного счетчика по модулю *8*

Последовательность двоичных чисел, проходимая счетчиком за один цикл счета (счетная последовательность) приведена в табл.13.2.

Таблица 13.2.

Счетная последовательность импульсов



Рассмотрим принцип работы данного счетчика в течение одного цикла счета. На каждом шаге цикла входной импульс поступает на синхронизирующий вход каждого триггера.

Импульс *1* — строка *2* табл.13.2. Переключается только триггер *T1*, поскольку только у него на входах *J* и *K* действует уровень логической *1*. *T1* переходит из состояния *0* в состояние *1*.

Результат: на выходе счетчика *001*.

Импульс *2* — строка *3*. Переключаются два триггера *T1* и *T2*, поскольку на входах *J* и *K* этих триггеров действует уровень логической *1*. *T1* переходит из состояния *1* в состояние *0*, *T2* — из состояния *0* в состояние *1*.

Результат: на выходе *010*.

Импульс *3* — строка *4*. Переключается только один триггер. *T1* переходит из состояния *0* в состояние *1*. *T2* не переключается, поскольку на входах *J* и *K* действует уровень логического *0*.

Результат: на выходе *011*.

Импульс *4* — строка *5*. Все триггеры меняют свое состояние на противоположное. *T1* и *T2* переходят из *1* в *0*. *T3* переключается из 0 в 1.

Результат: на выходе *100*.

Импульс *5* — строка *6*. Триггер *T1* переходит из состояния *0* в состояние *1*.

Результат: на выходе *101*.

Импульс *6* — строка *7*. Переключаются два триггера. *T1* переходит из *1* в *0*, *T2* - из *0* в *1*.

Результат: на выходе *110*.

Импульс *7* — строка *8*. Триггер *T1* переходит из состояния *0* в состояние *1*.

Результат: на выходе *111*.

Импульс *8* — строка *9*. Все триггеры меняют свое состояние, переходя из *1* в *0*.

Результат: на выходе *000*.

Следует заметить, что в данном счетчике *JK*‑триггеры используются как в режиме переключения (*J=K=1*), так и в режиме блокировки (*J=K=0*).

Вычитающие счетчики

Помимо суммирующих счетчиков (прямого счета), рассмотренных выше, существуют счетчики которые считают в обратном направлении - ***вычитающие***.

Рассмотрим схему асинхронного вычитающего счетчика по модулю *8* (рис.13.5).



Рис.13.5. Схема асинхронного вычитающего счетчика по модулю *1*

Отличие данной схемы от схемы суммирующего счетчика (рис.13.1) состоит в способе переноса сигнала от триггера к триггеру. В суммирующем счетчике синхронизирующий вход каждого триггера связан с прямым выходом *Q* предыдущего триггера. В вычитающем счетчике синхронизирующий вход каждого триггера связан с инверсным выходом предыдущего триггера. В счетчике изображенном на рис.13.5, перед началом счета в обратном направлении предусмотрена предварительная его установка в состояние *111* (десятичное число *7*) с помощью входа предустановки (*S*). Счетная последовательность двоичных чисел приведена в табл.13.3.



Таблица 13.3.

Счетная последовательность импульсов



Самоостанавливающиеся счетчики

Вычитающий счетчик, схема которого показана на рис.13.5 — счетчик циклического типа. Когда этот счетчик приходит в состояние *000*, он снова начинает счет с двоичного числа *111*. В некоторых случаях нужны счетчики, которые останавливаются, когда исчерпывается вся счетная последовательность. Рассмотрим, какие изменения нужно внести в схему вычитающего счетчика, чтобы счет прекращался при достижении состояния *000*.



Рис.13.6. Схема самоостанавливающегося счетчика

Из рис.13.6 видно, что для этого нужно ввести в схему логический элемент ИЛИ, который будет устанавливать на входах *J* и *K* триггера *T1* уровень логического *0*, когда на выходах (*C*, *B*, *A*) счетчика появится сигнал *000*. Если нужно начать новый цикл счета с двоичного числа *111*, на вход предустановки *S* следует подать уровень логического *0*.

Используя один логический элемент или их комбинацию, можно останавливать счет прямом и обратном направлении, на любом наперед заданном двоичном числе. Выход логического элемента нужно для этого присоединить к входам *J* и *K* первого триггера в асинхронном счетчике. При этом триггер *T1* переводится в режим хранения.

Счетчики — делители частоты

Одной из функций которую выполняют счетчики в цифровых системах, является деление частоты. Пример простой системы с делителем частоты показан на рис.13.7. Эта система составляет основу цифровых часов. Периодический сигнал электросети с частотой *50* Гц, сформированный в виде последовательности прямоугольных импульсов, подается на вход системы, которая делит частоту на *50*.



Рис.13.7. Система с делителем частоты

На выходе схемы имеем последовательность прямоугольных импульсов с частотой *1* Гц (*1* импульс в *1* сек). Это таймер секунд.

На рис.13.8 схематически изображен декадный счетчик, а на рис.13.9 приведены временные диаграммы для его синхронизирующего входа *C* и выхода *QD*, соответствующего двоичному разряду восьмерок.



Рис.13.8. Схема декадного счетчика



Рис.13.9. Временные диаграммы декадного счетчика

Из рис.13.9 видно, что *20* импульсов на входе счетчика преобразуются в *2* выходных импульса. Выполняется деление *20/2=10*. Снимая сигнал с входа *QD*, декадного счетчика, получим счетчик‑делитель на *10*. Т.е. частота выходного сигнала состовляет *1/10* частоты на входе счетчика.

Последовательно соединяя рассмотренный декадный счетчик (счетчик‑делитель на *10*) и по модулю *5* (счетчик‑делитель на *5*) получим схему, осуществляющую деления частоты на *50*. Структура такой схемы показана на рис.13.10. Последовательность прямоугольных импульсов с частотой *50* Гц поступает на вход счетчика - делителя на *5*, а с его выхода с частотой *10* Гц подается на вход счетчика‑делителя на *10*. На выходе схемы получим сигнал с частотой *1* Гц.



Рис.13.10. Структурная схема делителя частоты на *50*

Функция деления частоты используется в таких цифровых устройствах, как частотомер, осциллограф и т.п.

Интегральные схемы счетчиков

На рис.13.11 представлена схема четырехразрядного двоичного счетчика‑делителя на *2*, на *6* и на *12* (К155ИЕ4).



Рис.13.11. Схема четырехразрядного двоичного счетчика

Если подать тактовые импульсы с частотой *f* на вход *С1*, то на выходе *А* получим частоту *f/2*. Тактовые импульсы с частотой *f* на входе *С2* запускают делитель на *6* и на выходе *D* имеем частоту *f/6*. При этом на выходах *B* и *C* имеем импульсы с частотой *f/3*. На выводы *R1* и *R2* подаются команды сброса. Для построения счетчика с модулем деления *12*, требуется соединить делители на *1* и на *6*, соединив выход *А* со входом *С2*. На вход *С1* подается входная частота *f*, на выходе *D* получаем последовательность импульсов с частотой *f/12*.

Проектирование счетчиков

Рассмотрим пример структурного проектирования счетчиков. Выполним синтез структуры суммирующего синхронного (параллельного) счетчика по модулю *10* на *JK‑*триггерах. Следует отметить, что синхронные счетчики обычно строятся на базе *RS*, *JK*, *D*‑триггеров, синхронизируемых фронтом.

Для реализации счетчика требуется не менее *4* триггеров, поскольку трех триггеров недостаточно *23*<*10.* Чтобы получить структуру с минимальным числом триггеров, примем *m=4* (четырехразрядный счетчик). При этом *2m-M=24-10=6* состояний счетчика будут нештатаными. Рассмотрим таблицу состояний счетчика (табл. 13.4.), в которой в последних четырех столбцах показана функция переходов *F* для каждого разряда.

Таблица 13.4.

Таблица состояний счетчика



***Функция переходов*** показывает изменения (или сохранения) состояния разряда в зависимости от значений управляющих сигналов. Эта функция принимает следующие значения

переход из состояния *Qn=0* в *Qn+1=1*,



переход из состояния *Qn=1* в *Qn+1=0*,



сохранение состояния *Qn=Qn+1=0*,



сохранение состояния *Qn=Qn+1=1*.



Используя таблицу состояний счетчика (табл. 13.4) для каждого разряда представляем функцию переходов в виде карты Карно (рис. 13.12).



Рис. 13.12. Карты Карно для функции переходов

В клетках карты указываются значения функции переходов. Знаком «X» обозначаются безразличные наборы, которые соответствуют нештатным состояниям счетчика.

Определив для каждого из значений *FQ* соответствующие ему значения входных переменных *J* и *K*, получим ***словарь переходов*** *JK*‑триггера (табл. 13.5).

Таблица 13.5.

Словарь переходов *JK-*триггера



Используя словарь переходов *JK*‑триггера получаем карты Карно для функций входов *J‑* и *K‑*триггеров в каждом разряде (рис. 13.13).



Рис. 13.13. Карты Карно для входов *J* и *K* триггеров

На основание карт Карно произведем минимизацию функции входов. В результате объединения клеток, показанных на рис. 13.13, получим простые выражения для функции входов



Рассмотрим более подробно минимизацию функции *J4*. Эта функция имеет восемь безразличных наборов, обозначенных «X» на рис. 13.13. Доопределим функцию таким образом, чтобы она имела значения *J4=1* при *ABCD=1111*, выполним объединение клеток (рис. 13.13) и получим минимально дизъюктивную нормальную форму (МДНФ) в виде

*J4=ABC.*

В соответствие с полученными выражениями для функции входов построим декадный счетчик (рис. 13.14).



Рис. 13.14. Схема декадного счетчика

Из рис.13.14 видно, что схема декадного счетчика реализована на четырех триггерах и трех логических элементах И, два из которых имеют два входа и один имеет три входа. Счетчик, изображенный на рис. 13.14 является параллельным, т.к. все триггеры переключаются одновременно (синхронно).