Счётчики с произвольным порядком счёта

***Двоичными счётчиками с произвольным порядком счёта** называются такие счётчики, которые в процессе счёта могут принимать состояния, не соответствующие их представлению в двоичном коде.*

Существует множество способов построения таких счётчиков. Однако на практике наиболее часто применяются счётчики:

- с принудительным насчётом и
- с начальной установкой кода.

Счётчики, построенные такими способами, используются, в основном, в качестве *делителей частоты*.
В общем случае к разряду счётчиков с произвольным порядком счёта можно отнести все счётчики, работающие в специальных кодах, например,

- в коде Грея,
- двоично-десятичные счётчики в кодах:
  - 8421;
  - с избытком 3;
  - 2421 и т. д

Счётчики с принудительным насчётом

Особенность построения счётчиков с принудительным насчётом заключается в том, что в процессе счёта отдельные разряды принудительно устанавливаются в состояние 1.

Как правило, такие счётчики работают следующим образом:

1) сначала показания счётчика изменяются в естественной форме, начиная от 0 и заканчивая некоторым числом x < ($К_{сч}$ – 1);
2) с приходом очередного импульса счётчик вместо состояния (n + 1) принимает состояние (2^n – 1). В результате, следующим входным импульсом счётчик вернется в начальное состояние.

Практически, принудительный **насчёт осуществляется за счёт введения обратных связей со старших разрядов на младшие**, под действием которых соответствующие разряды счётчика, находящиеся в состоянии 0, вне очереди переключаются в состояние 1.
Обратные связи со старших разрядов на младшие, как правило, выполняются на асинхронные *S*-входы триггеров.

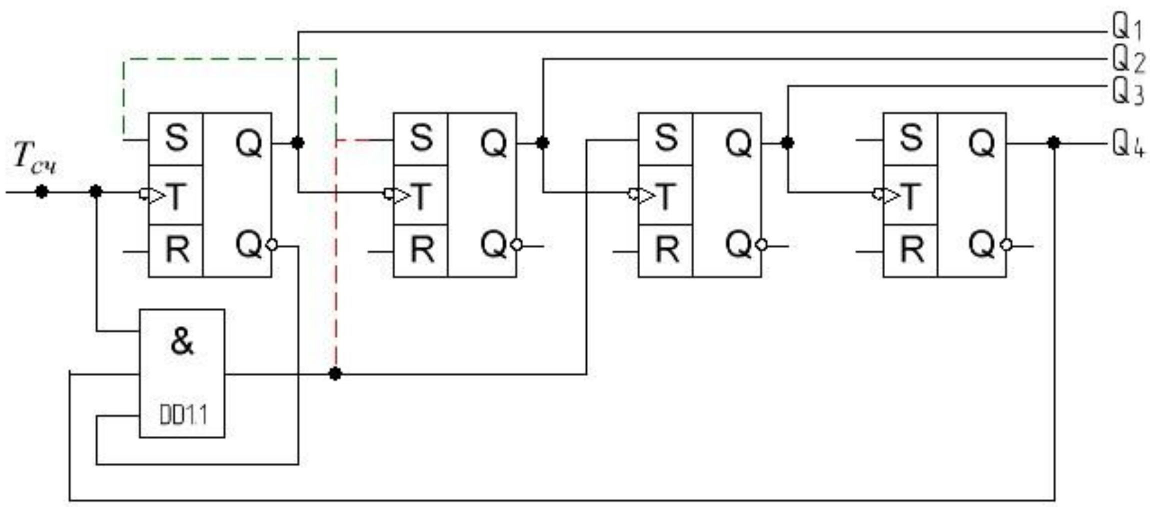
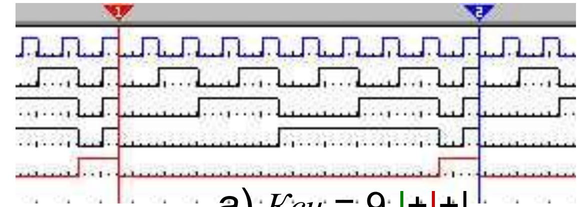
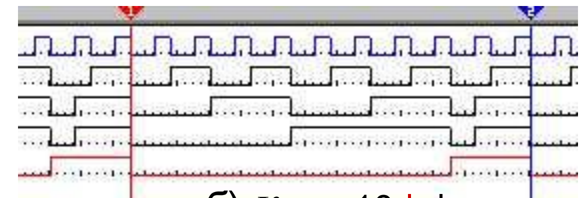


Рисунок 1 - Схема последовательного счётчика



а) *Kсч* = 9 |+|+|



б) *Kсч* = 10 |+|

в) *Kсч* = 12

На рисунке 1 показана схема счётчика построенного на *T*-триггерах по схеме асинхронного счётчика со последовательным переносом. Счётчик можно настроить на разные коэффициенты счёта: *Kсч* = 9 (*а*), 10 (*б*), 12 (*в*), Для исключения избыточных состояний чисел: 7 (*а*), 6 (*б*), 4 (*в*), введена обратная связь с выхода элемента DD1.1 на асинхронные входы *S* соответствующих разрядов ($0111_2 \rightarrow 7$, $0110_2 \rightarrow 6$, $0100_2 \rightarrow 4$).

Рассмотрим случай *Kсч* = 10. Во время первых восьми импульсов счётчик работает как суммирующий. С приходом девятого импульса на выходе вентиля DD1.1 формируется сигнал 1, поступающий на входы *S* второго и третьего разрядов соответственно. В результате, по окончании 9-го импульса все разряды счётчика окажутся в состоянии 1.

Таким образом, счётчик как бы насчитывает лишние шесть единиц, так как вместо очередного состояния 1001_2 сразу переходит в состояние 1111_2. Следующий десятый импульс возвращает счётчик в исходное состояние.

Счётчики с начальной установкой кода

Счётчики с начальной установкой кода, в общем случае, можно отнести к **счётчикам с принудительным насчётом**, у которых насчёт осуществляется не в процессе счёта, а посредством внешней установки счётчика в исходное состояние, соответствующее числу запрещенных состояний.

Принцип построения таких счётчиков рассмотрим на примере счётчика с *Kсч* = 10 (рисунок 2).

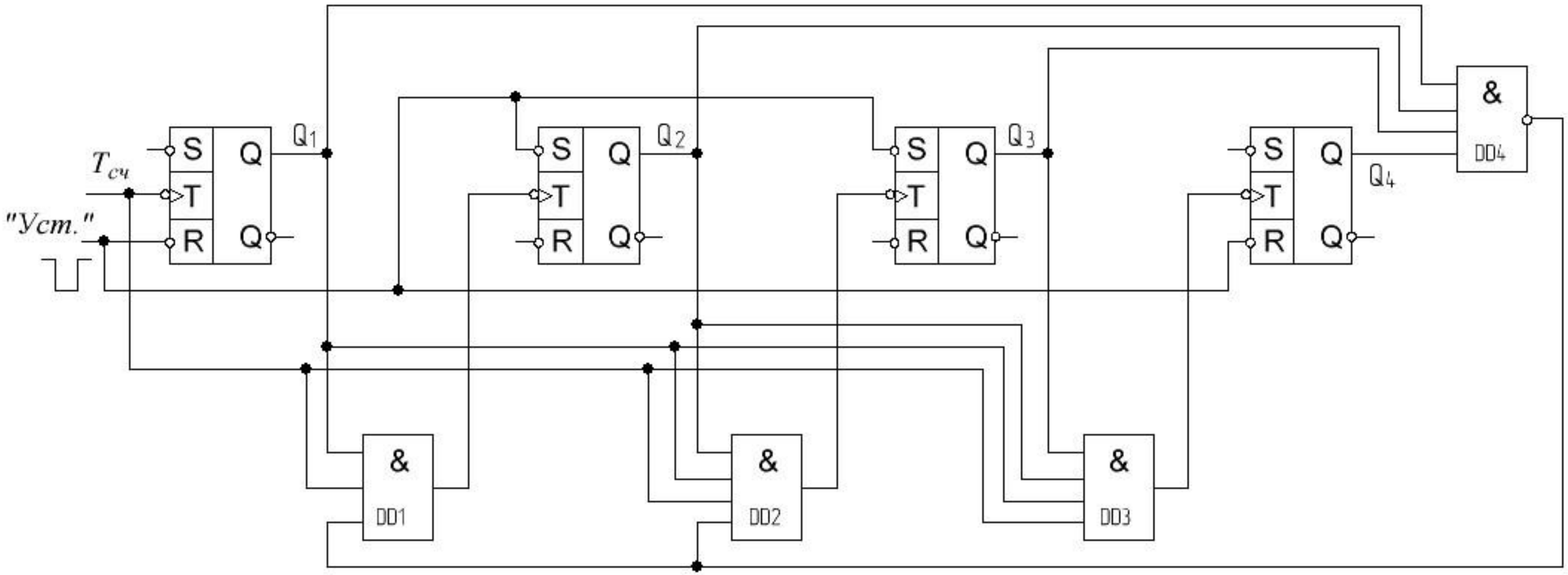


Рисунок 2 - Схема синхронного счётчика с *Kсч* = 10 и начальной установкой кода

В исходном состоянии по шине «Установка» в счётчике записывается, например, код 6_{10} или 0110_2, соответствующий числу запрещенных состояний

$$Gсч = 2^n - Kсч \qquad (1).$$

Такая установка осуществляется подачей сигнала с уровнем 0 на установочные входы *S* второго, третьего и на входы *R* первого и четвертого разрядов.
При поступлении сигналов на вход счётчика его показания будут изменяться от исходного кода 0110_2 до кода 1111_2 в порядке возрастания двоичных чисел. После окончания девятого импульса в счётчике установится код 1111_2, и на выходе вентиля *DD*4 сформируется уровень 0, закрывающий вентили *DD*1 и *DD*2 по одному входу. В результате, следующий по счёту десятый импульс поступит только на первый и четвертый разряды, и счётчик установится в начальный код 0110_2.

Пусть на основе схемы наказанной на рисунке 2 надо построить счётчик с $K_{сч}$ = 9, для чего, согласно выражению (1), необходимо исключить семь избыточных состояний.
Для этого следует выполнить обратную связь со схемы 4И-НЕ (*DD*4), дешифрирующей код 1111_2, на входы вентилей первого, второго и третьего разрядов и предварительно установить в счётчике код 0111_2.

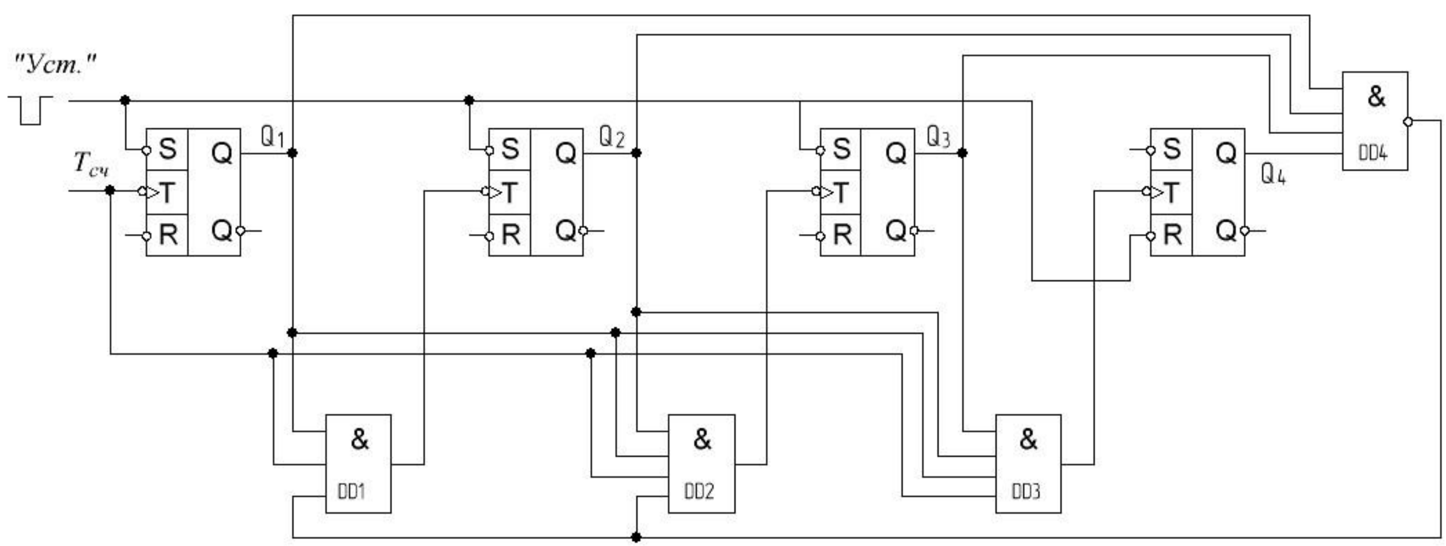


Рисунок 2а - Схема синхронного счётчика с $K_{сч}$ = 9 и начальной установкой кода 7

В общем случае для построения счётчика с заданным значением $K_{сч}$ по способу с начальной установкой кода, равного $G_{сч}$, необходимо:

- определить разрядность счётчика с $K_{сч}$ = 2^n, на основе которого должен выполняться счётчик с заданным значением $K_{сч}$;
- по выражению (1) определить число избыточных комбинаций и записать его в виде *n*-разрядного двоичного числа;
- выполнить связи с выхода элемента, дешифрирующего код (2^n – 1), через <u>операцию конъюнкции (И)</u> на счётные (или разрешающие − *V)* входы тех триггеров, которые должны находиться в состоянии 1, если в него записать двоичный код, равный числу *G* .

Адресные счётчики

В устройствах управления вычислительных систем и автоматики часто возникает задача произвольного задания адресов начала выполнения команд с последующим увеличением (модификаций) адреса команды на единицу.

Такие функции реализуются на **адресных счётчиках**, которые наряду со счётным входом имеют входы для параллельной записи информации.

Схема одного из вариантов такого счётчика показана на рисунке 3.

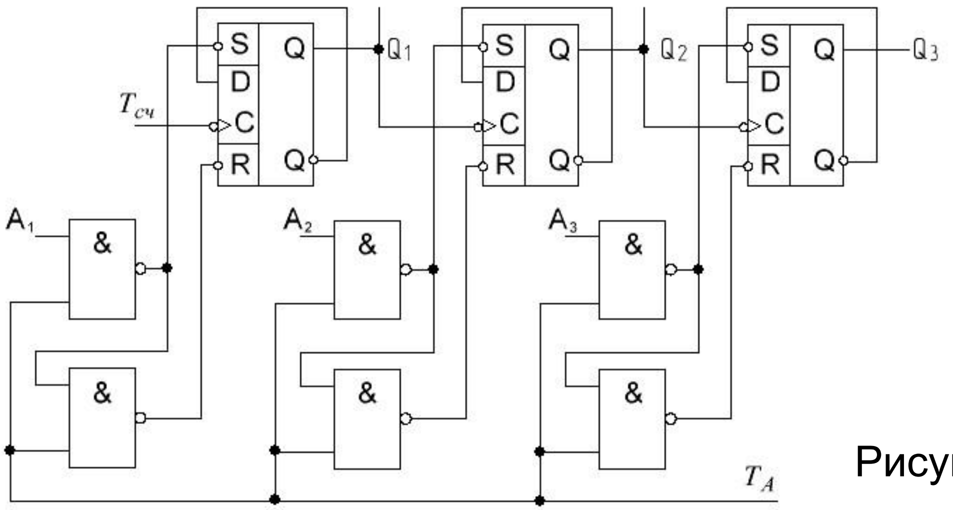


Рисунок 3 − Схема адресного счётчика

Счётчик выполнен на основе тактируемых *D*-триггеров, имеющих асинхронные входы *R* и *S* непосредственной установки триггера, которые можно использовать для организации адресных входов счётчика *A*1–*A*3.

Запись кода адреса в счётчик происходит при подаче импульсного сигнала на вход T_A, при этом на счётном входе сигнал должен отсутствовать.

Так, при адресном коде 101_2 (A1 = 1, A2 = 0, A3 = 1) и при поступлении сигнала на вход T_A в счётчик запишется код 101_2. В результате последующий счёт импульсов $Tсч$, поступающих на вход счётчика, начнется с кода 101_2.

Логические методы синтеза счётчиков

Логические (формальные) методы синтеза счётчиков так же, как и триггеров, основываются на применении теории конечных автоматов.

С помощью этой теории можно синтезировать любые типы счётчиков, в том числе счётчики с произвольным коэффициентом счёта. Однако методы синтеза наиболее эффективны в том случае, когда требуется счётчик, работающий в *специальных кодах*, либо кодирование состояний счётчика осуществляется произвольно. В этом случае рассмотренные выше схемотехнические способы построения счётчиков приемлемы, но требуют значительных временных затрат. Поскольку в наиболее общем случае целью всякого синтеза является не только разработка той или иной схемы, удовлетворяющей предъявленным к ней требованиям, но и *определение*, в некотором смысле, *оптимальной ее структуры*, то разработчик должен владеть как схемотехническими, так и логическими методами синтеза. Умелое применение обоих методов и их сопоставление позволит выбрать оптимальный вариант синтезируемой схемы.

Наиболее широко известный логический метод синтеза счётчиков основан на совместном решении прикладных уравнений счётчика с характеристическими уравнениями триггеров. Здесь используются, как правило, синхронные триггеры *RS-, T-, D-* и *JK*-типов, хотя принципиально возможно применение и других типов триггеров.

Синтез счётчика, как и триггеров, начинается с этапа абстрактного синтеза. В данном случае абстрактный синтез включает в себя следующие пункты:

1) определение числа элементов памяти (объем памяти автомата);
2) кодирование внутренних и выходных состояний автомата;
3) установление связи между входными, внутренними и выходными состояниями (описывается закон функционирования автомата).

1. Объем памяти автомата (то есть количество используемых триггеров) вычисляется по формуле.

$$n_{\text{р.сч}} = [\log_2 K_{\text{сч}}]^+, \qquad (2)$$

Два других пункта включают в себя:

- составление таблицы истинности, в которую заносятся внутренние состояния счётчика и порядок их изменения, а также
- состояния, в которые должен устанавливаться счётчик под воздействием входных сигналов.

Процедуру синтеза рассмотрим на ряде конкретных примеров применительно к синхронным счётчикам.

Пример 1. Синтезировать счётчик, считающий в такой последовательности:

0, 2, 4, 6, 7, 5, 3, 1, 0, 2, ...

счётчик имеет восемь состояний, следовательно, согласно выражению (2) для его построения потребуется три триггера, которые надо соединить так, чтобы выполнялась заданная последовательность переходов.

Обозначим эти триггеры через *A*, *B*, C. Предположим, что до прихода входного сигнала счётчик находится, например, в состоянии 0 (то есть все выходы триггеров $Q^n{}_A = Q^n{}_B = Q^n{}_C = 0$).

Тогда при поступлении 1-го входного импульса счётчик, в соответствии с заданными состояниями, должен перейти в состояние (0→2), соответствующее коду цифры $2_{10} = 010_2$ ($Q^n{}_A = 0$ $Q^n{}_B = 1$ $Q^n{}_C = 0$), второго должен перейти в состояние (2 → 4) ($Q^n{}_A = 1$ $Q^n{}_B = 0$ $Q^n{}_C = 0$) и так далее.

Словесное описание работы счётчика представим в виде табл. 1.

Здесь индексами $Q^n{}_A$, $Q^n{}_B$, $Q^n{}_C$ обозначены состояния счётчика до прихода входного сигнала (внутренние состояния автомата), а индексами $Q^{n+1}{}_A$, $Q^{n+1}{}_B$, $Q^{n+1}{}_C$ – состояния счётчика после прихода входного сигнала (выходные состояния автомата).

На этом этап абстрактного синтеза заканчивается.

Табл. 1

Состояние счетчика	Q^n_A	Q^n_B	Q^n_C	Q^{n+1}_A	Q^{n+1}_B	Q^{n+1}_C
1	0	0	0	0	1	0
2	0	1	0	1	0	0
3	1	0	0	1	1	0
4	1	1	0	1	1	1
5	1	1	1	1	0	1
6	1	0	1	0	1	1
7	0	1	1	0	0	1
8	0	0	1	0	0	0

Этап структурного синтеза включает в себя **составление прикладных уравнений триггеров**, их минимизацию, последующее совместное решение *характеристических* и *прикладных уравнений* и собственно составление функциональной схемы счётчика.

Прикладными называют уравнения, которые описывают поведение каждого триггера в момент t^{n+1} как функцию состояния всех триггеров в момент t^{n}.

Это уравнение записывается в виде

$$Q_i^{n+1} = f\left(Q_A^n,\ Q_B^n,\ Q_C^n,\ \ldots,\ Q_n^n\right).$$

Для рассматриваемого примера прикладные уравнения запишутся следующим образом:

$$Q_A^{n+1} = \left(\bar{Q}_A \cdot Q_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot \bar{Q}_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot Q_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot Q_B \cdot Q_C\right)^n;$$

$$Q_B^{n+1} = \left(\bar{Q}_A \cdot \bar{Q}_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot \bar{Q}_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot Q_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot \bar{Q}_B \cdot Q_C\right)^n;$$

$$Q_C^{n+1} = \left(Q_A \cdot Q_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot Q_B \cdot Q_C + Q_A \cdot \bar{Q}_B \cdot Q_C + \bar{Q}_A \cdot Q_B \cdot Q_C\right)^n.$$

После нанесения полученных уравнений на карты Карно (рисунок 4, а–в) проводится этап считывания.

Однако в данном случае считывание надо выполнять таким образом, чтобы полученное выражение в каждом из логических произведений обязательно содержало буквы (в прямом или инверсном виде), имеющие тот же индекс, что и у считываемого выражения. Например, если считывается выражение для $Q^n{}_A$ то в каждом из его членов должна присутствовать либо буква Q_A, либо *“не Q_A”*.

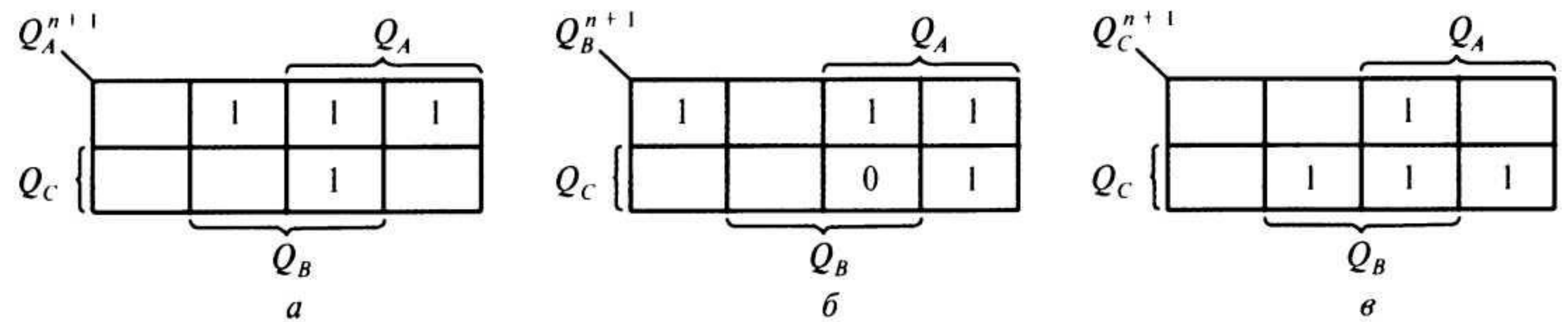


Рисунок 4 - Карты Карно синтезируемого счётчика на восемь состояний: *а* — для триггера *А;* *б* — для триггера *В, в* — для триггера С

В результате считывания получим:

$$Q_A^{n+1} = \bar{Q}_A \cdot Q_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot Q_B + \bar{Q}_C \cdot Q_A = \bar{Q}_A\left(Q_B \cdot \bar{Q}_C\right) + Q_A\left(Q_B + \bar{Q}_C\right);$$

$$Q_B^{n+1} = \bar{Q}_B \cdot \bar{Q}_C + Q_A \cdot \bar{Q}_B + Q_A \cdot Q_B \cdot \bar{Q}_C = \bar{Q}_B\left(Q_A + \bar{Q}_C\right) + Q_B\left(Q_A \cdot \bar{Q}_C\right);$$

$$Q_C^{n+1} = Q_B \cdot Q_C + Q_A \cdot Q_C + Q_A \cdot \bar{Q}_B \cdot \bar{Q}_C = \bar{Q}_C\left(Q_A \cdot Q_B\right) + Q_C\left(Q_A + Q_B\right).$$

Принимая во внимание, что у любого характеристического уравнения, описывающего поведение триггера, левая часть записывается в том же виде, что у прикладного уравнения, то применительно к триггеру *JK*-типа можно записать следующие системы уравнений:

$$J_A \cdot \bar{Q}_A + \bar{K}_A \cdot Q_A = \bar{Q}_A\left(Q_B \cdot \bar{Q}_C\right) + Q_A\left(Q_B + \bar{Q}_C\right);$$

$$J_B \cdot \bar{Q}_B + \bar{K}_B \cdot Q_B = \bar{Q}_B\left(Q_B + \bar{Q}_C\right) + Q_B\left(Q_A \cdot \bar{Q}_C\right);$$

$$J_C \cdot \bar{Q}_C + \bar{K}_C \cdot Q_C = \bar{Q}_C\left(Q_A \cdot Q_B\right) + Q_C\left(Q_A + Q_B\right).$$

Методом сравнения коэффициентов при буквах *Q* и *«не Q»* правых и левых частей уравнений находим выражения для входов *J*- и *K*- всех триггеров.

Из первого уравнения $J_A = Q_B \cdot \bar{Q}_C : \bar{K}_A = Q_B + \bar{Q}_C$

или $K_A = \overline{Q_B + \bar{Q}_C} = \bar{Q}_B \cdot Q_C$.

Из второго $J_B = Q_A + \bar{Q}_C;$

или $J_B = \overline{\overline{Q_A + \bar{Q}_C}} = \overline{\bar{Q}_A \cdot Q_C};$

$$\bar{K}_B = Q_A \cdot \bar{Q}_C,$$

откуда $K_B = \overline{Q_A \cdot \bar{Q}_C} = \bar{Q}_A + Q_C$.

Из третьего $J_C = Q_A \cdot Q_B : \bar{K}_C = Q_A + Q_B$

или $K_C = \overline{Q_A + Q_B} = \bar{Q}_A \cdot \bar{Q}_B$.

Далее на основании полученных выражений строится принципиальная схема счётчика с заданной последовательностью счёта (рисунок 5).

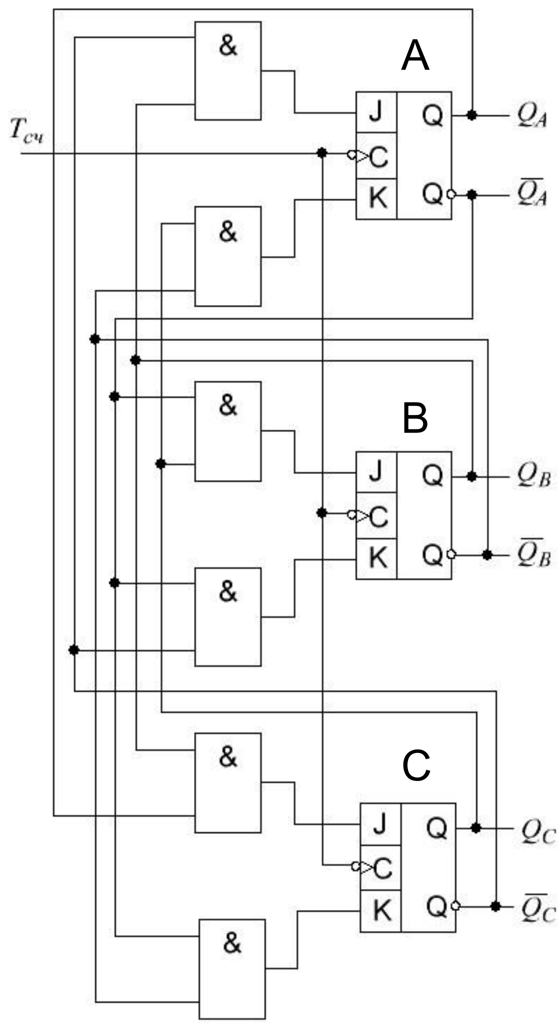


Рисунок 5 - Схема синтезированного счётчика работающего в заданной последовательности (0, 2, 4, 6, 7, 5, 3, 1)→0

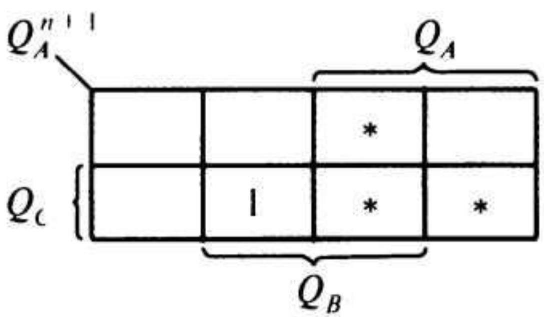
Пример 2. Синтезировать счётчик с $K_{сч}$ = 5, работающий в двоичном коде.

Согласно выражению (2) для построения счётчика требуется три триггера. Порядок переключения состояний счётчика приведен в табл. 2.

Табл.2

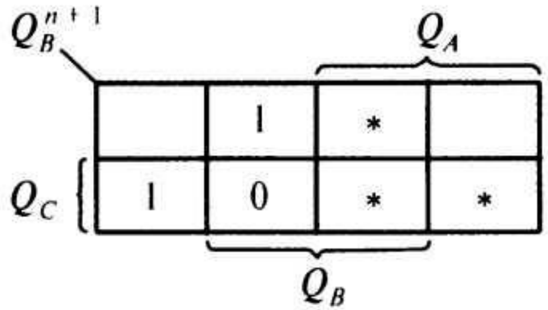
Состояние счетчика		Q_A^n	Q_B^n	Q_C^n	Q_A^{n+1}	Q_B^{n+1}	Q_C^{n+1}
Рабочие	1	0	0	0	0	0	1
	2	0	0	1	0	1	0
	3	0	1	0	0	1	1
	4	0	1	1	1	0	0
	5	1	0	0	0	0	0
Избыточные	6	1	0	1	*	*	*
	7	1	1	0	*	*	*
	8	1	1	1	*	*	*

В таком счётчике возможны три избыточных кода, которым соответствуют произвольные состояния триггеров, что отмечено знаком «*» в соответствующих строках столбцов Q^{n+1}.
На основании табл. 2 составляем карты Карно (рисунок 6, *а-в*) для выражений $Q^{n+1}{}_A$, $Q^{n+1}{}_B$ и $Q^{n+1}{}_C$.



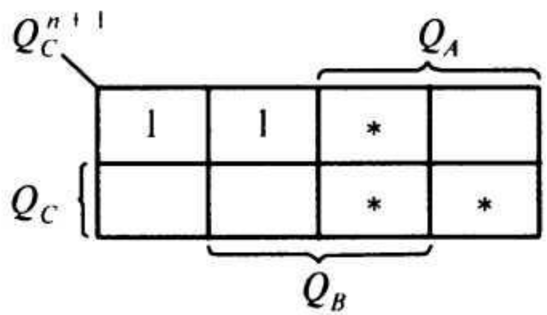
$$Q_A^{n+1} = Q_B \cdot Q_C \cdot \bar{Q}_A;$$

Рисунок 6*а* - Карта Карно двоичного счётчика с $K_{сч}$ = 5 для триггера *А*



$$Q_B^{n+1} = \bar{Q}_B \cdot Q_C + Q_B \cdot \bar{Q}_C;$$

Рисунок 6*б* - Карта Карно двоичного счётчика с $Kсч$ = 5 для триггера *B*



$$Q_C^{n+1} = \bar{Q}_A \cdot \bar{Q}_C.$$

Рисунок 6*в* - Карта Карно двоичного счётчика с $Kсч$ = 5 для триггера С

Записав систему уравнений

$$J_A \cdot \bar{Q}_A + \bar{K}_A \cdot Q_A = Q_B \cdot Q_C \cdot \bar{Q}_A + Q_A \cdot 0;$$

$$J_B \cdot \bar{Q}_B + \bar{K}_B \cdot Q_B = \bar{Q}_B \cdot Q_C + Q_B \cdot \bar{Q}_C;$$

$$J_C \cdot \bar{Q}_C + \bar{K}_C \cdot Q_C = \bar{Q}_C \cdot \bar{Q}_A + Q_C \cdot 0$$

и приравняв коэффициенты, найдем уравнения входов.

Из первого уравнения, приравняв коэффициенты при переменных Q_A и $/Q_A$, получим

$$J_A = Q_B \cdot Q_C; \quad \bar{K} = 0 \quad \text{или} \quad K = 1.$$

Из второго и третьего уравнений находим

$$J_B = Q_C: \ \bar{K}_B = \bar{Q}_C \quad \text{или} \quad K_B = Q_C,$$

$$J_C = \bar{Q}_A: \ \bar{K}_C = 0 \quad \text{или} \quad K_C = 1.$$

Далее на основании полученных выражений строится принципиальная схема счётчика с заданной последовательностью счёта (рисунке 7).

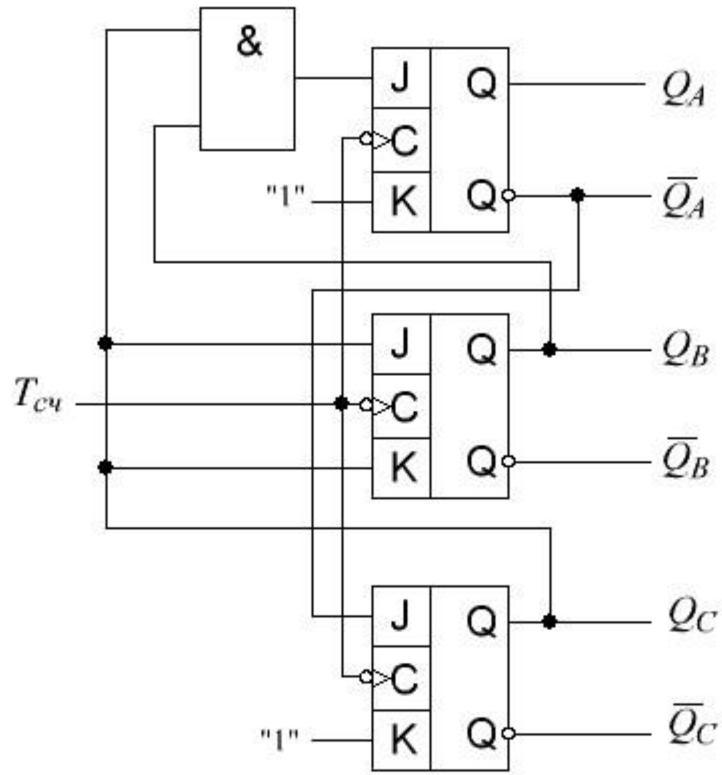


Рисунок 7 - Схема синтезируемого счётчика с $Kсч$ = 5 работающий в двоичном коде.

Безвентильные счётчики

Рассмотренные выше способы построения счётчиков с $K_{сч} \neq 2^n$, как правило, требуют применения дополнительных межразрядных логических элементов (*вентилей*).
В практике проектирования применяется так называемый **безвентильный** способ построения счётчиков с $K_{сч} * 2^n$. В основе построения таких счётчиков лежит известный принцип организации счёта по произвольному модулю на основе счётчиков по модулю 2^n+1, позволяющих увеличивать модуль счёта на единицу.

Для построения *безвентильного счётчика* с $K_{сч} * 2^n$ требуемое значение $K_{сч}$ необходимо представить в виде произведения сомножителей (групп), каждый из которых состоит из чисел степени 2 или степени 2 и добавочных единиц.

Например, число 27 можно представить в виде произведения трех сомножителей, каждый из которых является степенью 2 плюс 1:

$$27 = (2 + 1)(2 + 1)(2 + 1).$$

Это же число можно записать в виде двух сомножителей:

$$27 = (8 + 1) (2 + 1)$$

или в виде

$$27 = 2[4(2 + 1) + 1] + 1.$$

Согласно первому разбиению числа 27 необходимо иметь три счётчика по модулю $K_{сч} + 1$, где $K_{сч} = 2$.
Во втором случае необходимо иметь два счётчика по модулю $K'_{сч} + 1$ и $K_{сч} + 1$, где $K'_{сч} = 8$, $K_{сч} = 2$.
В третьем случае число 27 представлено в виде произведения двух сомножителей: цифры 2 ($K_{сч} = 2$), цифры в квадратных скобках ($K_{сч}$ – 13) и добавочной единицы.

Способ увеличения модуля счёта на 1 на примере счётчика по модулю 3 (2 + 1) на *JK*-триггерах показан на рисунке 8.

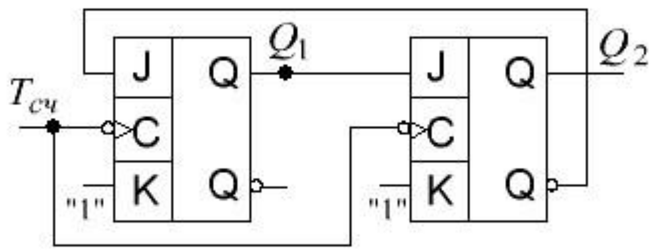


Рисунок 8 − Схема счётчика по модулю 3 на *JK*-триггерах

Исходное состояние счётчика нулевое ($Q_2 = Q_1 = 0$). В результате, первый разряд по входу $J = /Q_2 = 1$ подготовлен к переключению в состояние 1, а второй по входу $K = 1$ – к подтверждению нулевого состояния.

После окончания первого счётного импульса ($Tсч = 1 \rightarrow 0$) в счётчике установится код 01_2 ($Q_2 = 0$, $Q_1 = 1$).

После окончания второго импульса в счётчике установится код 10_2 ($Q_2 = 1$, $Q_1 = 0$), поскольку оба *JK*-триггера будут работать в режиме *T*-триггера.

Перед приходом третьего счётного импульса на входах *J* обоих триггеров присутствует уровень 0, а на входах *K* – уровень 1.

В результате, после окончания третьего импульса оба триггера по входам $K = 1$ установятся в 0.

Пример. Имея счётчик с $K_{сч} = 3$, построить счётчик с $K_{сч} = 27$.

Схемы счётчиков, изображенные на рисунке 9, *а*, *б*, соответствующие первому и второму разбиению числа 27, реализуются на шести *JK*-триггерах, а схема на рисунке 9, *в* (третье разбиение числа 27) – на семи.

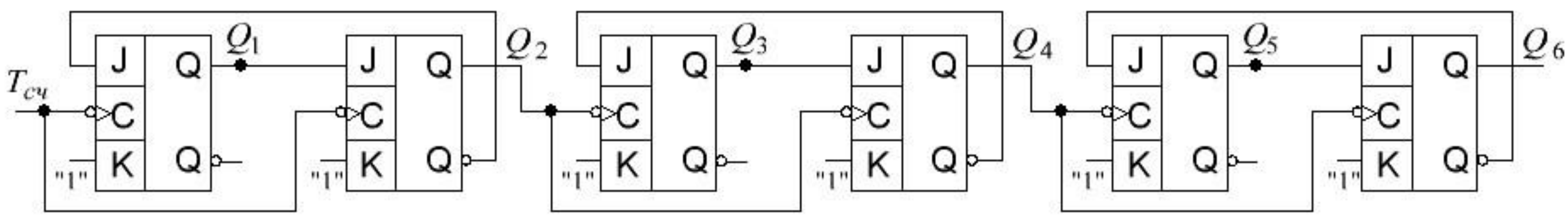


Рисунок 9*а* - Вариант разбиения счётчика с $K_{сч} = 27$
$27 = (2 + 1)(2 + 1)(2 + 1) = 3x3x3$

Примечание. счётчик с аналогичным значением $K_{сч}$, построенный по одному из описанных выше способов с применением вентилей, реализуется на пяти триггерах.

Увеличение модуля счёта какой-либо группы счётчика (промежуточный счётчик) **на 1 осуществляется на дополнительном (единичном) триггере *JK*-типа**.

Единичный JK-триггер, в отличие от всех других *JK*-триггеров своей группы, выполняющих функцию двоичного счёта и имеющих только по одному входу *J**, единичный *JK*-триггер **имеет число входов *J*, равное числу триггеров, предшествующих двоичных разрядов своей группы.**

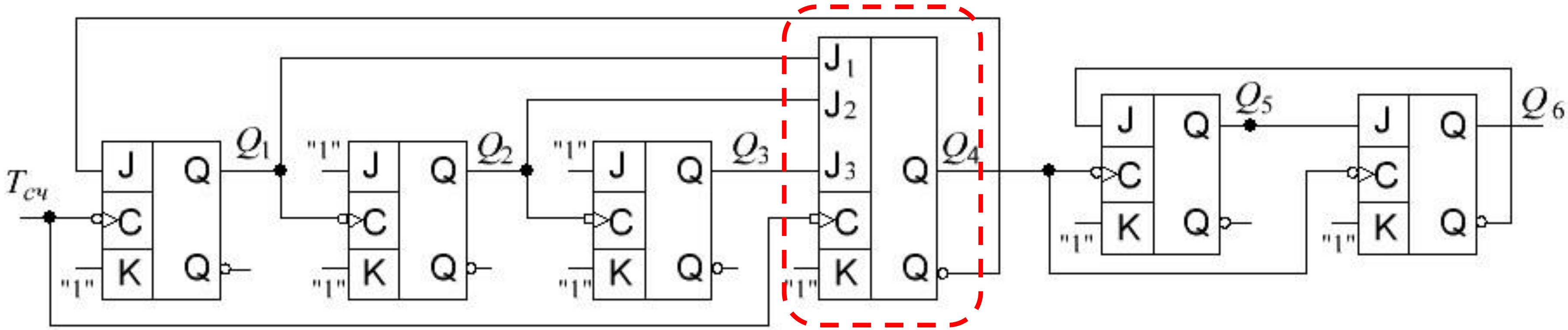


Рисунок 9*б* - Вариант разбиения счётчика с $Kсч$ = 27
27 = (8 + 1) (2 + 1) = 9x3

На вход ***K*** *единичного триггера* подаётся уровень 1, его тактирующий вход объединяется с тактирующим входом *JK*-триггера младшего разряда своей группы.
Выходы *Q* всех двоичных разрядов группы или внутренних групп подключаются к ***J*** входам *единичного триггера*, а выход ***«не Q»*** единичного триггера подключается ко входу ***J*** триггера младшего разряда своей группы. Выходом группы является выход ***Q*** единичного триггера. С выхода ***Q*** единичного триггера снимается сигнал для запуска следующей группы.

* (вообще говоря, этими триггерами, за исключением триггера первого, младшего разряда группы, могут быть и синхронные Т-триггеры срабатывающие по срезу синхросигнала)

Если единичный триггер служит для увеличения на 1 коэффициента счёта нескольких последовательно включенных групп и отдельных двоичных триггеров, каждый из которых в этом случае, условно, можно считать отдельной группой, то у единичного триггера число входов *J* должно равняться числу всех предшествующих групп и к этим входам необходимо подключить выходы *Q* всех предшествующих групп счётчика. Остальные связи единичного *JK*-триггера в схеме счётчика должны быть аналогичны ранее описанным.

Вариант такого применения единичного триггера показан на рисунке 9*в* для счётчика с $K_{сч}$ = 27.

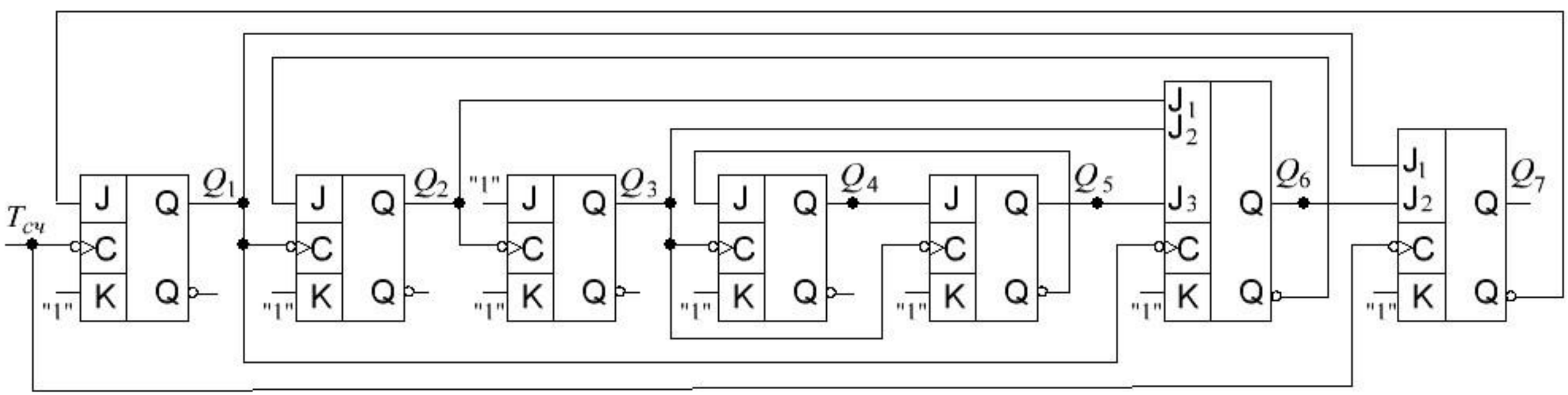


Рисунок 9*в* - Варианты разбиения счётчика с $K_{сч}$ = 27

27 = 27 = 2[4(2 + 1) + 1] + 1 = 2*13 + 1 = 26+ 1

$K_{сч}$	Число триггеров в безвентильном двоичном счетчике	Число триггеров в двоичном счетчике	Принцип разбиения на группы
32	5	5	32
33	6	6	32 + 1
34	6	6	2(16 + 1)
35	7	6	(4 + 1)[2(2 + 1) + 1]
36	8	6	4(2 + 1) (2 + 1) или 4(8 + 1)
37	7	6	4(2 + 1)(2 + 1) + 1 или 4(8 + 1) + 1
38	7	6	22(8 + 1) + 1
39	8	6	22(8 + 1) + 1 + 1
40	6	6	8(4 + 1)
41	7	6	8(4 + 1) + 1
42	7	6	2(2 + 1) [2(2 + 1) + 1]
43	8	6	2(2 + 1) [2(2 + 1) + 1] + 1
44	7	6	4[2(4 + 1) + 1]
45	7	6	(2 + 1) (2 + 1) (4 + 1) или (8 + 1) (4 + 1)
46	8	6	2{2[2(4 + 1) + 1] + 1}
47	9	6	2{2[2(4 + 1) + 1) + 1] + 1} + 1
48	6	6	16(2 + 1)
49	7	6	16(2 + 1) + 1
50	7	6	2(4 + 1) (4 + 1)
51	8	6	2(4 + 1)(4 + 1) + 1
52	7	6	4[4(2 + 1) + 1]
53	8	6	4[4(2 + 1) + 1] + 1
54	7	6	2(8 + 1) (2 + 1)
55	8	6	(4 + 1) 2 [(4 + 1) + 1] или 2 (8 + 1) (2 + 1) + 1
56	7	6	8[2(2 + 1) + 1]
57	8	6	8[2(2 + 1) + 1] + 1
58	8	6	2{4[(2 + 1) + 1] + 1}
59	9	6	2{4[2(2 + 1) + 1] + 1} + 1
60	7	6	4(2 + 1) (4 + 1)

Табл. 3.

В табл. 3 приведено разбиение на группы многоразрядных безвентильных счётчиков с *Kсч* > 32.

Анализируя графы 2 и 3, следует отметить, что число триггеров в безвентильных счётчиках увеличивается лишь на один или два (исключая схему с *Kсч* = 59) по сравнению с обычным способом их построения на счётных триггерах с дополнительными вентилями.

В ряде случаев безвентильные счётчики экономичнее счётчиков с вентилями. Например, счётчики с *Kсч* = 33, 34, 36, 40 и 48 требуют не менее двух дополнительных вентилей к шести счётным триггерам, в то время как их безвентильное исполнение требует только шесть триггеров *JK*-типа.

Несмотря на простоту синтеза счётчиков с $Kсч \neq 2^n$ по безвентильному способу, их **недостатки** весьма существенны.

К ним относятся:

- недвоичный порядок счёта;
- последовательное срабатывание разрядов и групп, объясняющее низкое быстродействие безвентильных счётчиков;
- большее по сравнению с двоичным счётчиком число разрядных триггеров на счётчик для большинства значений $Kсч$;
- необходимость применения в ряде случаев *JK*-триггеров с различным числом входов *J*.

Сдвигающие счётчики

Сдвигающие счётчики могут быть построены на основе сдвигающих регистров, регистров-сумматоров, специальных кольцевых схем.
Отличительная особенность сдвигающих счётчиков в том, что переход счётчика из одного состояния в другое осуществляется за счёт сдвига информации. Сдвиг информации происходит под действием сдвигающих (счётных) импульсов, поступающих на разряды счётчика.
Сдвигающие счётчики находят применение при построении пересчётных схем с небольшим коэффициентом счёта, синхронизирующих устройств и распределителей импульсов.

счётчики на кольцевых сдвигающих регистрах

Среди различных видов сдвигающих счётчиков этот класс счётчиков широко распространен в интегральной схемотехнике.
В зависимости от способа построения можно выделить следующие основные виды счётчиков на сдвигающих регистрах:

- с постоянно взвешенными кодами;
- на сдвигающих регистрах с перекрестными связями;
- на сдвигающих регистрах и дополнительных пересчётных схемах (совмещенных схемах);
- полиномиальные счётчики.

счётчики с постоянно взвешенными кодами

Особенностью таких счётчиков является постоянство сочетания единиц и нулей в разрядах регистра для каждого устойчивого состояния, принимаемого счётчиком в процессе счёта.

Простейшим счётчиком этого класса является счётчик вида $1/N$, построенный на основе кольцевого сдвигающего регистра однотактного действия, один из разрядов которого предварительно устанавливается в состояние 1.

После каждого счётного импульса осуществляется сдвиг 1 в регистре на один разряд, что характеризует новое состояние счётчика. Такой **счётчик осуществляет подсчёт сигналов по модулю N, т. е. $K_{сч} = N$.** Основным преимуществом такого счётчика является простота дешифрации его состояний и высокое быстродействие при выполнении регистра на синхронных *D-, RS-* или *JK*-триггерах.

Поскольку для N-разрядного счётчика требуется, соответственно, N-разрядных триггеров, то в качестве счётчиков такие схемы находят **ограниченное применение**.

Наиболее часто счётчики с постоянно взвешенными кодами применяются в качестве распределителей уровней или импульсов на N-каналов.

Так, если в исходном состоянии в кольцевой регистр записать две единицы, то каждое состояние счётчика будет кодироваться двумя единицами (состояния регистра 10100...0, 01010...0, …, 0…0101 и т. д.), т. е. получим счётчик вида $2/N$ с $K_{сч} = N$. При этом в зависимости от того, какие два разряда регистра предварительно установлены в 1, получим различные последовательности N-разрядных кодов.

Число таких последовательностей будет конечно и зависит от числа разрядов счётчика.

Например, для пятиразрядного сдвигающего регистра возможны две последовательности таких кодов:

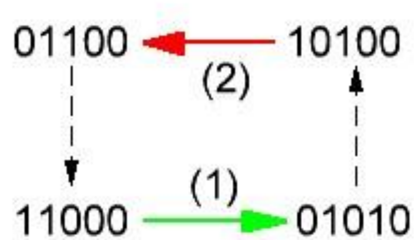
01100, 00110, 00011, 10001, 11000 или
01010, 00101, 10010, 01001, 10100.

Первая последовательность получается, если в исходном положении в состояние 1 установить второй и третий разряды регистра и затем подать серию из пяти счётных (сдвигающих) импульсов.

Вторая последовательность получается при установке в состояние 1 второго и четвертого разрядов и последующей подаче серии из пяти сдвигающих импульсов.

Поскольку в обеих последовательностях нет ни одного одинакового состояния, то, объединив их в одну, получим 10 устойчивых состояний.

Для такого режима работы необходимо, чтобы регистр из последнего состояния 11000_2 первой последовательности с приходом пятого сдвигающего импульса перешел в первое состояние 01010_2 второй последовательности и, наоборот, десятым импульсом сдвига из пятого состояния 10100_2 второй последовательности перешел в первое состояние первой последовательности 01100_2, то есть выполнил два перехода:



Для каждого из этих переходов левая 1 сдвигается нормальным образом, то есть из первого разряда переписывается во второй, а правая 1 либо совсем не сдвигается (2-й переход), либо должна сдвинуться через разряд (1-й переход).
Таким образом, **для объединения двух последовательностей** необходимо выполнить **специальный сдвиг** всякий раз, **когда первый разряд находится в состоянии 1**.

Когда первый разряд находится в состоянии 0, сдвиг осуществляется обычным образом, то есть из первого – во второй, из второго – в третий, из третьего – в четвертый и из пятого – в первый. Такой сдвиг часто называют «чистым», а схемы кольцевых регистров – регистрами с «чистым» сдвигом.

Схема счётчика 2/5 с $K_{сч}$ = 10 на тактируемых *D*-триггерах показана на рисунке 10.

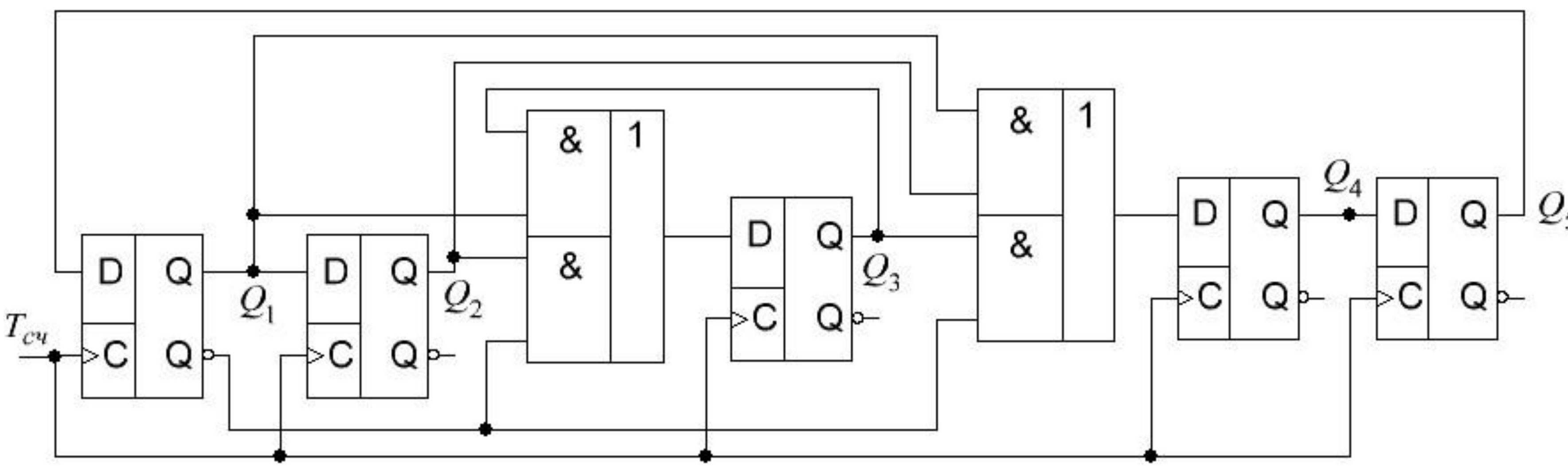


Рисунок 10 − Схема сдвигающего счётчика вида 2/5 с $K_{сч}$ = 10

Методика построения может быть распространена на любое число разрядов.

счётчики на регистрах с перекрестными связями

Счётчики на регистрах с перекрестными связями относятся к тому классу <u>сдвигающих счётчиков</u>, который находит широкое применение в интегральной схемотехнике, что объясняется простотой их выполнения.
Основой таких счётчиков является **кольцевой сдвигающий регистр**, у которого имеется одна перекрестная связь, обеспечивающая инверсную перезапись информации в один из разрядов регистра при прямой перезаписи информации во всех остальных разрядах.
При построении таких счётчиков применяются сдвигающие регистры как *однотактного*, так и *многотактного* действия.
Например, рассмотрим работу счётчика с $K_{сч}$ = 6 на регистре с перекрестной связью, выполненном на стробируемых *RS*-триггерах (рисунок 11).

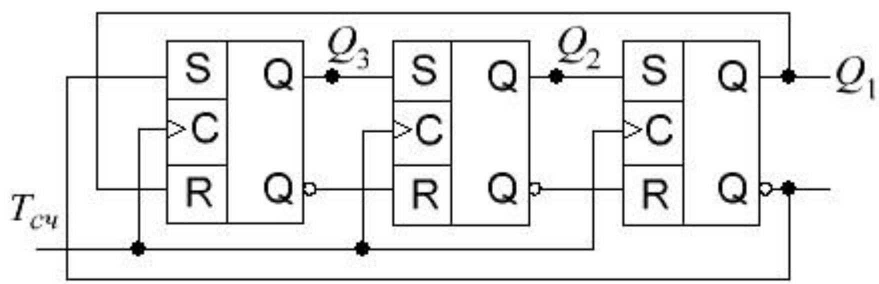


Рисунок 11 - Схемы счётчиков на регистрах с перекрестными связями с $K_{сч}$ = 6

Между вторым и первым, а также третьим и вторым разрядами выполнена прямая связь, а между первым и третьим разрядами – перекрестная. Следовательно, при поступлении счётных (сдвигающих) импульсов $T_{сч}$ на вход счётчика между вторым и первым, третьим и вторым разрядами будет происходить прямая, а между первым и третьим разрядами – инверсная перезапись информации.

Пусть в исходном состоянии в счётчике записан код 000_2 ($Q_3 = Q_2 = Q_1 = 0$).
В этом случае вентили на входах *R* второго и первого разрядов будут открыты, а вентили на входах *S* будут закрыты. У третьего разряда за счёт перекрестной связи будет открыт вентиль на входе *S* и закрыт вентиль на входе *R.*

1. <u>После окончания первого счётного импульса</u> счётчик перейдет в состояние, соответствующее коду 100_2 ($Q_3 = 1$, $Q_2 = 0$, $Q_1 = 0$).
2. <u>После окончания второго счётного импульса</u> произойдет очередной сдвиг информации на один разряд, и в счётчике установится код 110_2.
3. <u>Третий счётный импульс</u> установит счётчик в состояние 111_2.
4. <u>Четвертый импульс</u> установит третий разряд в 0 и подтвердит единичное состояние второго и первого разрядов (код счётчика 011_2).
5. <u>Пятый импульс</u> установит счётчик в состояние, соответствующее коду 001_2.
6. И, наконец, <u>после окончания шестого импульса</u> счётчик установится в исходное состояние, соответствующее коду 000_2.

Таким образом, рассмотренная схема имеет <u>шесть устойчивых состояний</u> и под действием импульсов, поступающих на ее вход, последовательно переходит из одного состояния в другое, обеспечивая счёт импульсов по модулю 6.

Для построения десятичного счётчика потребуется пятиразрядный кольцевой регистр с перекрестной связью, который последовательно будет принимать десять устойчивых состояний: 00000_2, 10000_2, 11000_2, 11100_2, 11110_2, 11111_2, 01111_2, 00111_2, 00011_2, 00001_2.
Такие схемы имеют четный коэффициент счёта $K_{сч} = 2N$, где N – число разрядов сдвигающего регистра. Они наиболее удобны для построения счётчиков с небольшим коэффициентом счёта (4-10).

Сдвигающие счётчики на основе регистров с перекрестной связью позволяют просто реализовать нечетный коэффициент счёта, т. е. с $K_{сч} = 2N – 1$.

Особенности структуры счётчиков с нечетным коэффициентом счёта рассмотрим на примере счётчика с $K_{сч}$ = 9, построенного на стробируемых *D*-триггерах (рисунок 12).

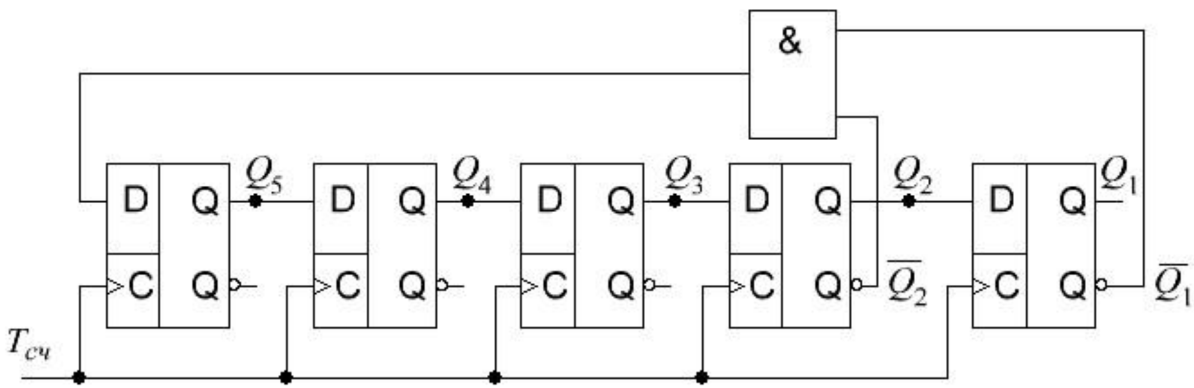


Рисунок 12 - Схемы счётчиков на регистрах с перекрестными связями с $K_{сч}$ = 9

Нечетный коэффициент счёта достигается введением дополнительного <u>вентиля И</u>, позволяющего исключить одно избыточное состояние. Вентиль И включен таким образом, что на первый его вход поступает уровень с инверсного выхода $/Q_1$, младшего разряда схемы, а на второй вход – уровень с инверсного выхода $/Q_2$ второго разряда счётчика. Выход вентиля И подключен ко входу пятого разряда счётчика.

При поступлении счётных импульсов, начиная с исходного кода 00000_2, счётчик последовательно проходит состояния 10000_2 (Q_5 = 1, $Q_4 = Q_3 = Q_2 = Q_1$ = 0), 11000_2 и т. д. до кода 11110_2.

При формировании уровня Q_0 = 0 закроется вентиль И, что будет эквивалентно поступлению на вход *D*5 уровня 0. В результате, дальнейший счёт будет характеризоваться последовательностью кодов 01111_2, 00111_2, 00011_2, 00001_2, и после окончания девятого импульса счётчик установится в исходное состояние 00000_2.

Нетрудно обнаружить, что из десяти последовательных состояний, которые должен был принять счётчик (рисунок 12), не имеющий вентиля И, исключено одно, соответствующее коду 11111_2.

Аналогично могут быть построены счётчики с любым нечетным коэффициентом счёта. При этом из счётчика может быть исключено любое состояние, необязательно соответствующее коду 11111_2. Последнее достигается включением вентильных схем между соответствующими разрядами регистров.

В общем случае однотактные счётчики с нечетным коэффициентом счёта могут быть построены и без применения дополнительного вентиля И, если в распоряжении разработчика имеются синхронные *D-*, *RS*- или *JK*-триггеры с несколькими информационными входами.

Например, счётчик с $K_{сч}$ = 9 на основе схемы на рисунке 12 можно построить без дополнительного вентиля И, если у этой схемы пятый разряд будет иметь два информационных входа *D* на один из которых будет поступать сигнал с плеча Q_2 на другой – с плеча Q_1.

Важным положительным свойством счётчиков на регистрах с перекрестными связями является их **высокое быстродействие и простота дешифрации состояний.**

Быстродействие определяется временем установки одного разряда, а дешифрация состояний осуществляется с помощью двухвходовых вентилей И.

Сдвигающие счётчики на совмещенных схемах

Совмещенные схемы сдвигающих счётчиков строятся на основе сдвигающих регистров и дополнительных пересчётных схем. Простейшими схемами этого вида счётчиков являются схемы удвоения. Один из вариантов такой схемы приведен на рисунке 13.

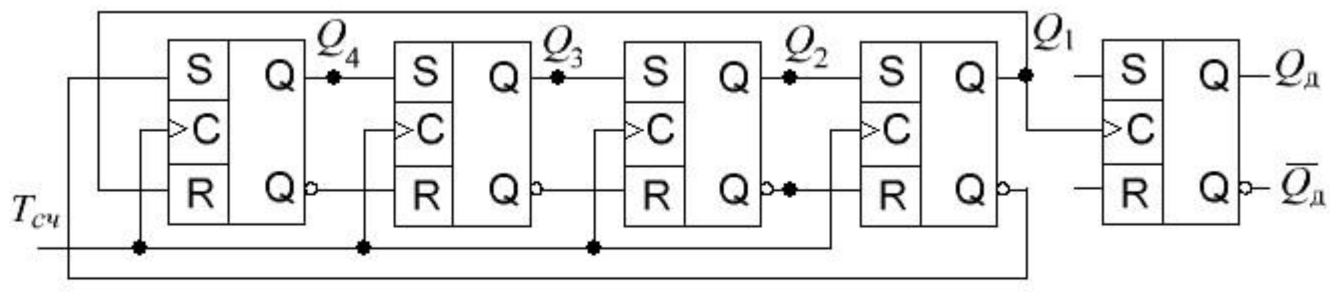


Рисунок 13 - Схема счётчика выполненная по совмещённой схеме

В состав входит 4-разрядный сдвигающий регистр с перекрестной связью и Т-триггер, счётный вход которого подключен к выходу разряда Q_1. В результате такого построения схема осуществляет пересчёт сигналов по модулю 16. Особенность ее работы состоит в том, что во время первых восьми состояний, принимаемых в ходе счёта, дополнительный счётный триггер находится в состоянии 0, а во время последующих восьми состояний – в состоянии 1. Таким образом, схема последовательно принимает 16 устойчивых состояний. После 16-го счётного импульса счётчик устанавливается в исходное состояние, соответствующее коду 0000,0. При этом коды чисел в счётчике, одно из которых больше другого на 8, будут отличаться лишь состоянием пятого дополнительного разряда. Код числа 1 соответствует состоянию 1000,0, а код числа 9 – состоянию 1000,1; код числа 5 – состоянию 0111,0, а код числа 13 – состоянию 0111,1 и т. д.

По числу триггеров такие схемы экономичнее счётчиков, выполненных только на регистрах с перекрестными связями.

Полиномиальные счётчики

В полиномиальных счётчиках устранен основной недостаток, присущий всем ранее рассмотренным регистровым счётчикам, – относительно малое число устойчивых состояний при заданном числе разрядов регистра.
Основой полиномиальных счётчиков являются **кольцевые сдвигающие регистры** на *сиинхронных D-* и *стробируемых D*-триггерах (соответственно многотактный и одно-тактный варианты счётчика) **и схема Исключающее** ИЛИ (сложение по модулю 2).

Применение схем Исключающее ИЛИ для передачи и преобразования информации между разрядами **является основным отличительным признаком** этого вида сдвигающих счётчиков.

Схема полиномиального счётчика показана на рисунке 14, где буквами a_0, a_1, a_2 ..., a_{n-1}, обозначены разрядные триггеры счётчика: знаком $\oplus$ – элемент Исключающее ИЛИ, буквами C_0, C_1, C_2, … C_{n-1} – коэффициенты-сомножители, принимающие только два значения (0 и 1) и фактически обозначающие наличие или отсутствие обратной связи на i-й элемент схемы Исключающее ИЛИ.

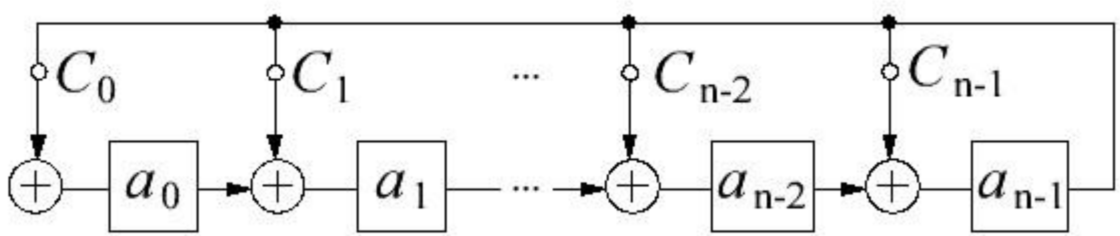


Рисунок 14 - Схема полиномиального счётчика

Наличие или отсутствие обратной связи на *i*-й элемент схемы Исключающее ИЛИ означает, что если $C_i = 0$, то обратная связь с выхода a_{n-1}, элемента (триггера) на вход схемы Исключающее ИЛИ, подключаемой к элементу a_i, отключена.
Если $C_i = 1$, то такая обратная связь включена.
При этом коэффициенты C_i являются константами, задаваемыми разработчиком при конструировании счётчика с необходимым значением *Ксч.*

Рассмотрим особенности построения полиномиального счётчика на конкретном примере.
Пример. Пусть число разрядных триггеров $N = 3$. Зададимся коэффициентами C_i ($i < 3$), $C_1 = 1$, $C_2 = 0$.
Схема счётчика, построенного в соответствии с заданными параметрами, показана на рисунке 15.

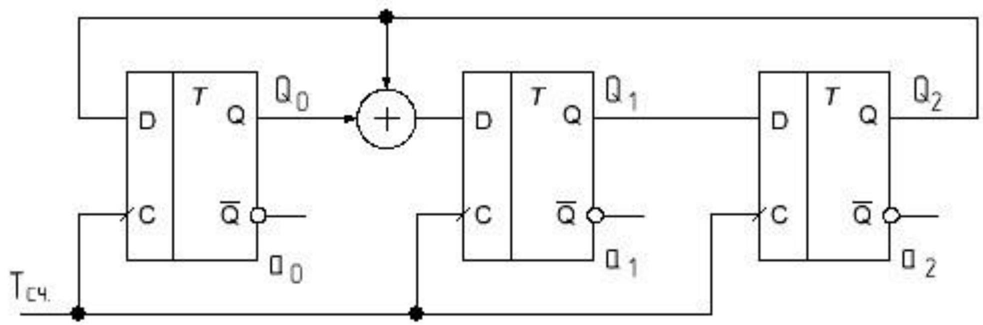


Рисунок 15 - Схема полиномиального счётчика с *Ксч* = 7

$a_1 = a_0 + a_2$; $a_2 = a_1$; $a_0 = a_2$

В исходном положении счётчик должен находиться в состоянии 001_2 ($a_0 = 0$; $a_1 = 0$; $a_2 = 1$), т. е. **нулевое состояние всех разрядов счётчика является запрещенным**. **Это относится ко всем полиномиальным счётчикам для любого *N*.**

Однако обычно в единичное состояние устанавливается либо первый ($a_0 = 1$), либо последний ($a_N = 1$) разряд счётчика.

Процесс счёта начинается с поступления сдвигающих (счётных) импульсов на вход счётчика, представляющих собой объединение тактовых входов всех триггеров.
После окончания первого счётного импульса счётчик установится в следующее состояние, соответствующее коду 110_2.
После второго счётного импульса в счётчике зафиксируется код 011_2 и так далее. Последующие состояния счётчика: 111_2, 101_2, 100_2, 010_2, 001_2.
счётчик имеет семь устойчивых состояний, то есть $Kсч = 2^{N-1}$.

В специальной литературе показано, что независимо от числа N (модифицированный счётчик с числом устойчивых состояний в пределах от $2^{N-1}-1$ до 2^{N-1} всегда получается на основе базового счётчика – счётчика с максимальным числом состояний, равным 2^{N-1} с применением одной схемы совпадения И с числом входов, равным N.

Сдвигающие счётчики, у которых связь между разрядами осуществляется с применением схемы **Исключающее ИЛИ**, часто называются **линейными полиномиальными счётчиками**.
счётчики, у которых связь между разрядами осуществляется с применением схем **Исключающее ИЛИ и вентиля И**, называются **нелинейными полиномиальными счётчиками.**

Необходимо отметить, что число разрядов полиномиального счётчика соответствует числу разрядов двоичного счётчика.