

Счѐтчики

Счетчиками называют последовательностные цифровые устройства, предназначенные для подсчета и запоминания числа импульсов, поданных в определенном временном интервале на его счетный вход.

Помимо счетного входа счетчики могут еще иметь входы асинхронный или синхронной установки начальных состояний.

По характеру изменения состояний счетчика счетными импульсами различают:

- суммирующие,
- вычитающие и
- реверсивные счетчики.

По способу организации переносов между разрядами их можно разделить на счетчики с

- последовательным,
- сквозным,
- параллельным и
- комбинированным переносом.

Счетчики с последовательным и сквозным переносом называют асинхронными,

Счетчики с параллельным переносом — синхронными.

Обычно счетчик содержит один или несколько идентичных разрядов, построенных на основе двоичных триггеров. Количество различных состояний разряда счетчика является его классификационным признаком, согласно которому счетчики называют

- двоичными,

Основными техническими параметрами счетчиков являются

- коэффициент пересчёта и
- быстродействие.

Коэффициент пересчёта представляет собой число различных устойчивых состояний счетчика и если каждый счетный импульс переводит счетчик в новое состояние, то равно максимальному числу импульсов, которое счетчик может просчитать и запомнить без повторения состояний.

Быстродействие счетчика определяется максимальной частотой следования счетных импульсов f_{\max} , регистрируемых счетчиком без сбоев, максимальной частотой переключения состояний счетчика $t_{\text{сч.макс}}$ и временем установки состояний счетчика $t_{\text{уст}}$, определяемое как максимальный временной интервал от момента поступления счетного импульса до момента перехода всех разрядов счетчика в новое устойчивое состояние.

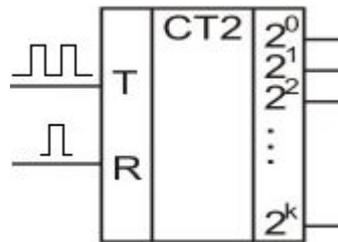


Рисунок 1 – УГО асинхронного счетчика

Асинхронные счётчики с последовательным переносом

В асинхронных счётчиках отсутствует общая для всех разрядов синхронизация и переход разрядов в новые состояния происходит последовательно разряд за разрядом, начиная от входного, на который поступают счетные импульсы.

Процесс двоичного счёта может быть описан посредством таблицы последовательных чисел, в которой каждое число соответствует определённому состоянию счётчика.

Состояния трехразрядного счётчика приведены в таблице 1:

Таблица

1

| Номер состояния | Q_2 | Q_1 | Q_0 | T_0 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

На вход счётчика поступает последовательность счётных сигналов T_0 .

Из таблицы следует, что изменение состояния младшего разряда Q_0 связано с изменением единичного значения сигнала счета T_0 на нулевое ($1 \rightarrow 0$), а изменение состояния каждого последующего разряда связано с изменением единичного состояния на нулевое ($1 \rightarrow 0$) предыдущего разряда.

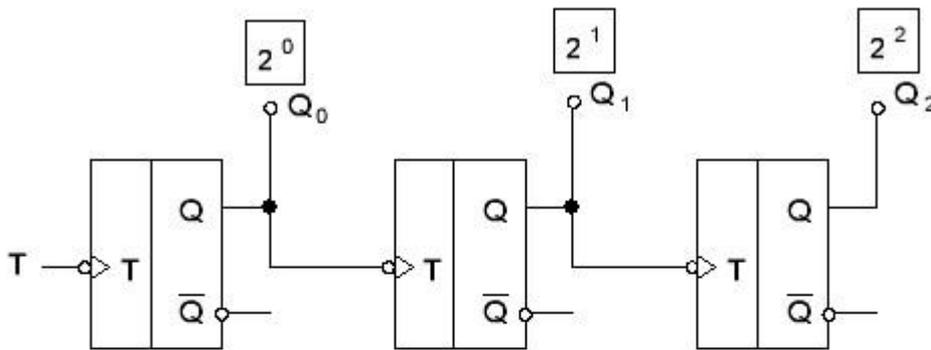
Прямой счёт. Суммирующий счётчик

$$Q_0^{t+1} = \overline{Q_0^t} \cdot T_0^t + Q_0^t \cdot \overline{T_0^t} = Q_0^t \oplus T_0^t,$$

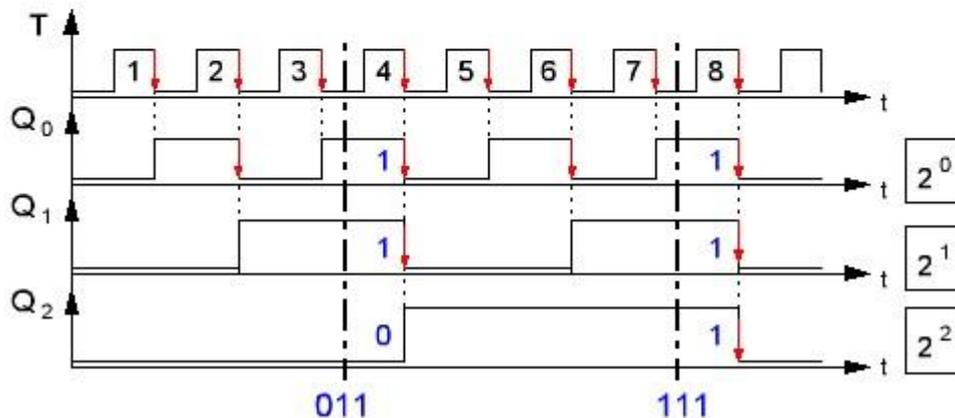
$$Q_1^{t+1} = \overline{Q_1^t} \cdot Q_0^t + Q_1^t \cdot \overline{Q_0^t} = Q_1^t \oplus Q_0^t,$$

$$Q_2^{t+1} = \overline{Q_2^t} \cdot Q_1^t + Q_2^t \cdot \overline{Q_1^t} = Q_2^t \oplus Q_1^t.$$

Уравнения для каждого разряда соответствуют уравнениям **асинхронного счётного T-триггера**.



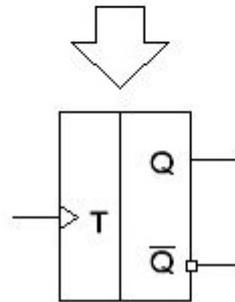
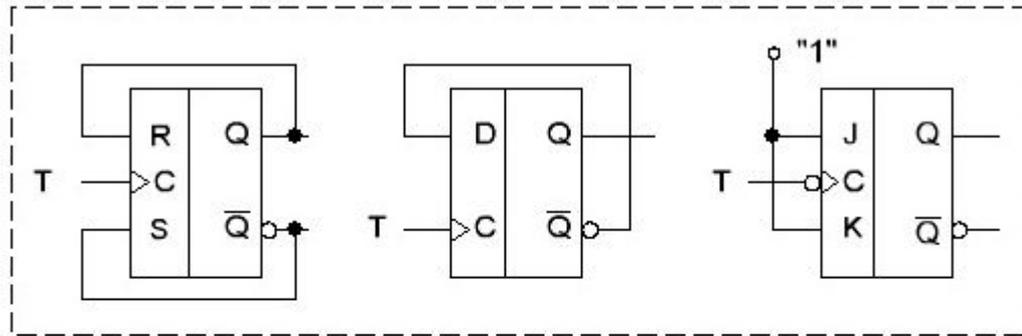
В простейшем случае **двоичный счётчик** может быть образован из **асинхронных T-триггеров, соединенных последовательно**.



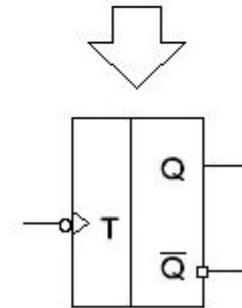
Сигналы счёта поступают на вход триггера младшего разряда счетчика.

Рисунок 2 – Трёхразрядный асинхронный суммирующий счётчик

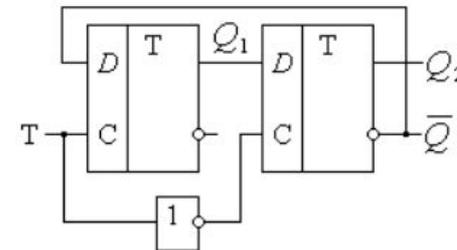
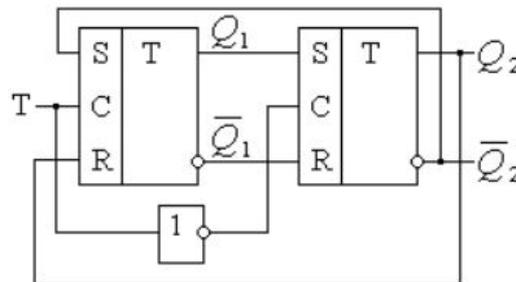
Способы получения Т-триггера из типовых триггеров



Срабатывание: **по переднему фронту**
фронту



по заднему



Реализация Т-триггера на базе двухступенчатой структуры RS- и D-триггера

Обратный счёт. Вычитающий счётчик

$$Q_1^{t+1} = \overline{Q_1^t} \cdot \overline{Q_0^t} + Q_1^t \cdot Q_0^t = \overline{Q_1^t \oplus Q_0^t},$$

$$Q_2^{t+1} = \overline{Q_2^t} \cdot \overline{Q_1^t} + Q_2^t \cdot Q_1^t = \overline{Q_2^t \oplus Q_1^t}.$$

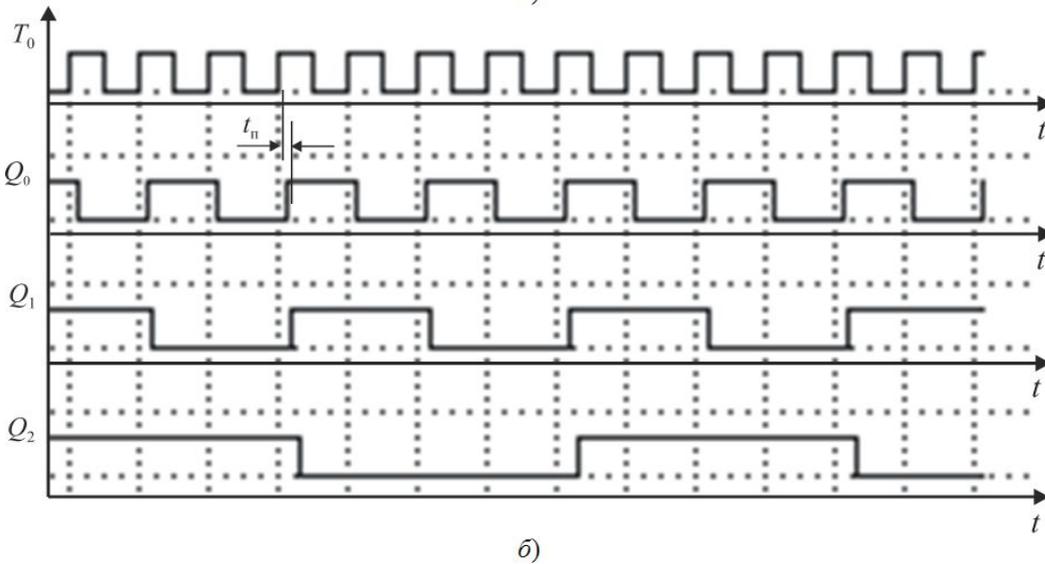
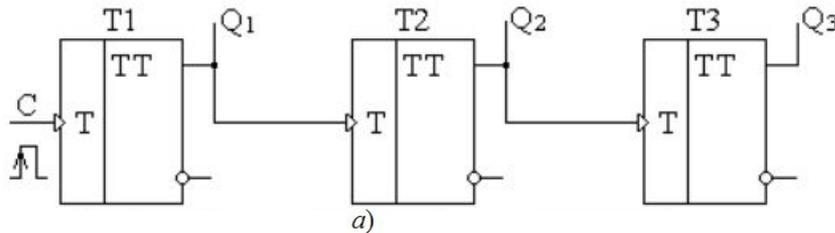


Рисунок 2 – Трёхразрядный асинхронный вычитающий счётчик

Состояния 3-разрядного вычитающего счётчика

| Номер состояния | Q_2 | Q_1 | Q_0 |
|-----------------|-------|-------|-------|
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 0 | 1 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 1 |
| 7 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |

Исходным состоянием счётчика служит единичное состояние всех разрядов. При этом изменение состояния младшего разряда (Q_0) осуществляется так же, как и для прямого счётчика, т. е. с приходом каждого счетного сигнала.

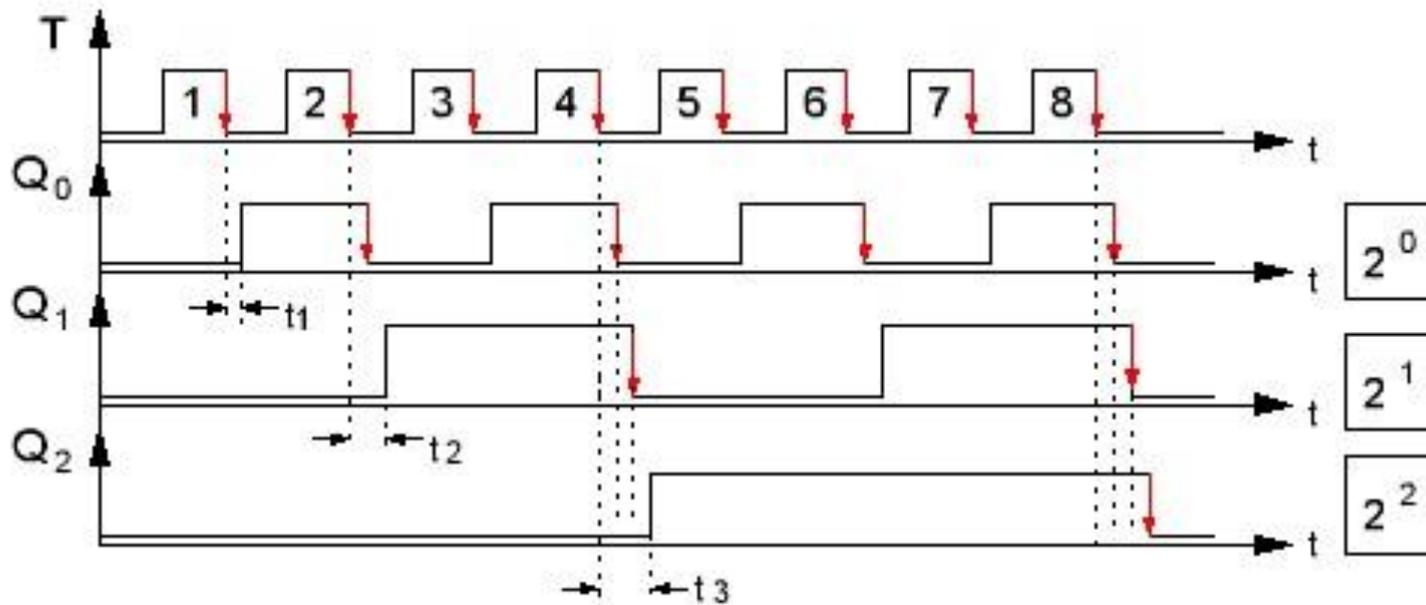


Рисунок 3 – Накапливающаяся задержка переключения разрядов у асинхронного счётчика

Максимальная частота работы счётчика с последовательным переносом **определяется максимально допустимой частотой переключения его младшего разряда.**

Для двухступенчатых триггерных схем, на которых обычно строятся T -триггеры, частота следования сигналов счета составляет:

$$F_{\text{сч}} \leq 1/(t_{\text{сч}} + t_{\text{п}}).$$

где $t_{\text{сч}}$ – длительность счётного импульса; $t_{\text{п}}$ – время переключения второй ступени триггерной схемы.

Числа, формируемые счётчиком, могут быть выведены из него в параллельной форме посредством одновременного опроса состояния всех разрядов счётчика. Такой **опрос** может происходить **только в паузе между сигналами счёта**, т. е. после того, как завершился переходной процесс, связанный с переключением триггерных схем.

В этом случае **минимальный период следования** счётных импульсов должен быть увеличен на **время**, необходимое для **полного переключения** всех N разрядов счетчика **и опроса**

$$T_{\text{сч}} \geq t_{\text{сч}} + N \cdot t_{\text{п}} + t_{\text{опр}}.$$

где $t_{\text{опр}}$ – длительность сигнала опроса.

Для ускорения процесса счёта в счётчике необходимо, чтобы изменение состояний отдельных разрядов происходило не последовательно, а непосредственно вслед за приходом очередного счётного сигнала.

Счетчик со сквозным переносом

На примере трёхразрядного счётчика (табл. 1) составим логические уравнения состояний отдельных разрядов, учитывающие состояния более младших разрядов:

$$Q_1^{t+1}$$

| | $\overline{Q_0} \cdot \overline{T_0}$ | $\overline{Q_0} \cdot T_0$ | $Q_0 \cdot T_0$ | $Q_0 \cdot \overline{T_0}$ |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| $\overline{Q_1}^t$ | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Q_1^t | 1 | 1 | 0 | 1 |

для 2-го разряда

$$Q_1^{t+1} = \overline{Q_1}^t \cdot \overline{T_0}^t + \overline{Q_1}^t \cdot \overline{Q_0}^t + \overline{Q_1}^t \cdot Q_0^t \cdot T_0^t = \overline{Q_1}^t \cdot (\overline{Q_0}^t \cdot T_0^t) + \overline{Q_1}^t \cdot (\overline{Q_0}^t \cdot T_0^t) = \overline{Q_1}^t \oplus (\overline{Q_0}^t \cdot T_0^t) = \overline{Q_1}^t \oplus (T_1^t \cdot T_0^t)$$

$$Q_2^{t+1}$$

где $T_1^t = Q_0^t$

| | $\overline{Q_0} \cdot \overline{T_0}$ | $\overline{Q_0} \cdot T_0$ | $Q_0 \cdot T_0$ | $Q_0 \cdot \overline{T_0}$ |
|---|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| $\overline{Q_2}^t \cdot \overline{Q_1}^t$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\overline{Q_2}^t \cdot Q_1^t$ | 0 | 0 | 1 | 0 |
| $Q_2^t \cdot \overline{Q_1}^t$ | 1 | 1 | 0 | 1 |
| $Q_2^t \cdot Q_1^t$ | 1 | 1 | 1 | 1 |

для 3-го разряда

где $T_2^t = Q_1^t \cdot Q_0^t = T_1^t \cdot Q_1^t$

$$Q_2^{t+1} = \overline{Q_2}^t \cdot \overline{Q_1}^t \cdot \overline{Q_0}^t \cdot T_0^t + \overline{Q_2}^t \cdot \overline{Q_1}^t \cdot Q_0^t \cdot T_0^t + \overline{Q_2}^t \cdot Q_1^t \cdot \overline{Q_0}^t \cdot T_0^t + \overline{Q_2}^t \cdot Q_1^t \cdot Q_0^t \cdot T_0^t = \overline{Q_2}^t \cdot (\overline{Q_1}^t \cdot \overline{Q_0}^t \cdot T_0^t) + \overline{Q_2}^t \cdot (\overline{Q_1}^t \cdot Q_0^t \cdot T_0^t) + \overline{Q_2}^t \cdot (Q_1^t \cdot \overline{Q_0}^t \cdot T_0^t) + \overline{Q_2}^t \cdot (Q_1^t \cdot Q_0^t \cdot T_0^t) = \overline{Q_2}^t \oplus (T_2^t \cdot T_0^t)$$

В общем случае для i -го разряда счетчика можно записать:

$$\begin{cases} Q_{i-1}^{t+1} = Q_{i-1}^t \oplus (Q_{i-2}^t \cdot T_{i-2}^t \cdot T_0^t), \\ T_i^t = Q_{i-1}^t \cdot T_{i-1}^t. \end{cases} \quad (1)$$

или
$$Q_{i-1}^{t+1} = Q_{i-1}^t \oplus (Q_{i-2}^t \cdot Q_{i-3}^t \cdot \dots \cdot Q_0^t \cdot T_0^t). \quad (2)$$

Счетчик, разряды которого построены в соответствии с уравнениями (1), носит название **счетчик со сквозным переносом**.

Такой счетчик может быть построен на синхронных T -триггерах.

При этом на синхронизирующий вход этих триггеров заводится счетный сигнал T_0 , а на счетные входы – сигнал T_i .

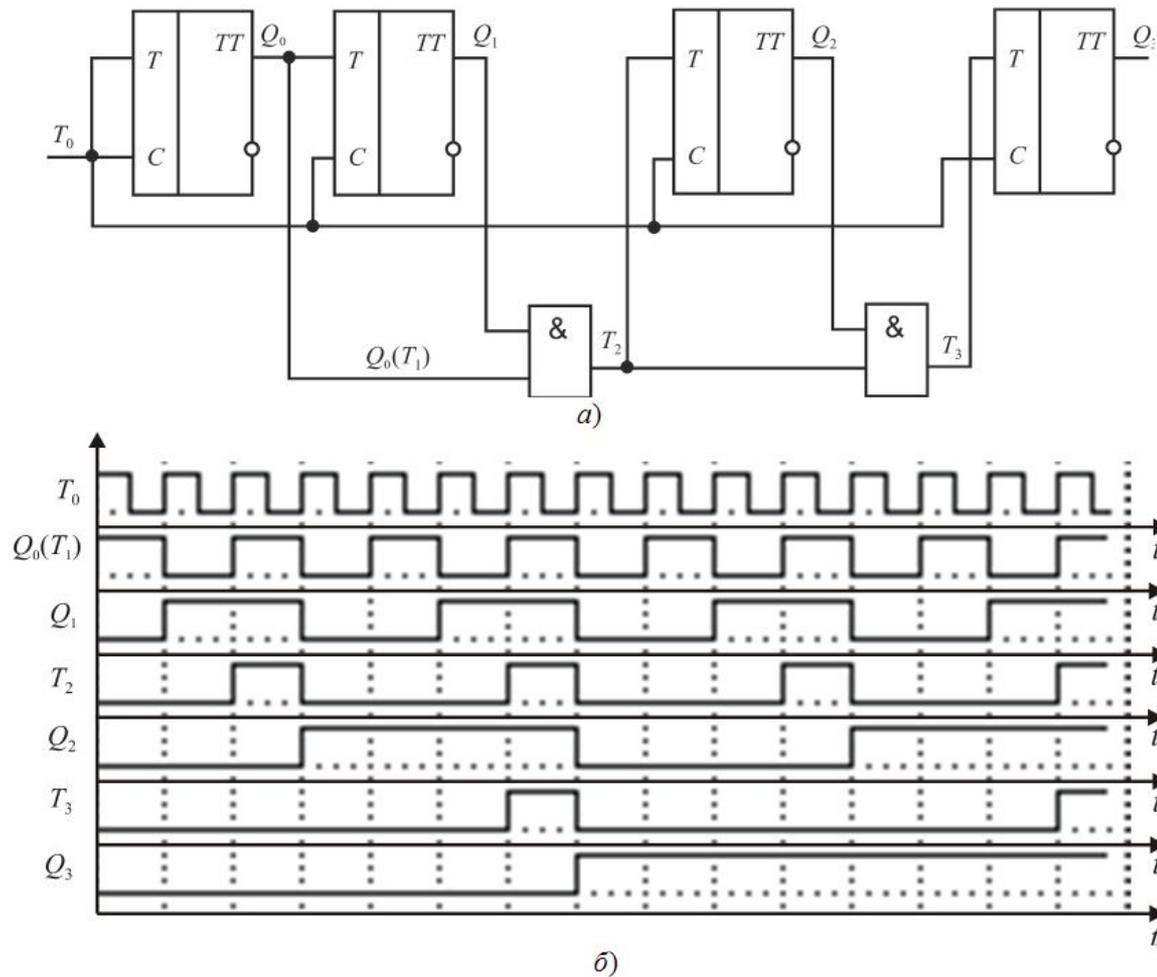


Рисунок 4 – Четырехразрядный счетчик со сквозным переносом

Максимальная частота работы такого счетчика

$$F \leq 1/[t_{\Pi} + (N - 2)t_{3P}].$$

равна
 где t_{3P} – задержка в схеме сквозного переноса;

t_{Π} – время переключения триггера.

Счётчик с параллельным переносом

Счётчик с параллельным переносом строится в соответствии с уравнением (2).

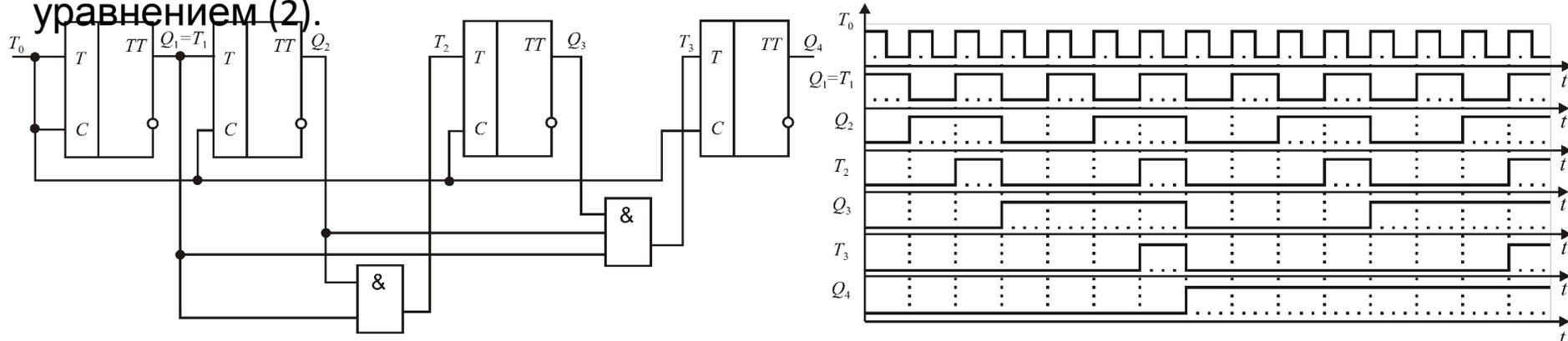


Рисунок 5 – 4-х разрядный счётчик с параллельным переносом и его временная диаграмма его работы

Из временной диаграммы следует, что **изменение состояния всех триггеров счётчика происходит одновременно.**

Частота работы счётчика определяется из уравнения:

$$F_{\text{сч}} \leq 1/(t_{\text{сч}} + t_{\text{п}}).$$

где $t_{\text{сч}}$ – длительность счетного импульса;

$t_{\text{п}}$ – время переключения второй ступени триггерной схемы.

Разрядность счетчика с параллельным переносом ограничивается возможностями логических элементов:

коэффициентом разветвления и коэффициентом объединения по входу “И”.

Счетчики с групповым переносом

Для преодоления ограничений схемы формирования параллельного переноса, которые не позволяют построить схему счетчика с заданным числом разрядов, счетчик разбивается на группы.

Перенос между группами может осуществляться как последовательно, так и параллельно.

Для последовательного формирования переноса между группами необходимо, чтобы каждая группа вырабатывала сигнал условия прохождения переноса через группу $T_{j \text{ гр}}$.

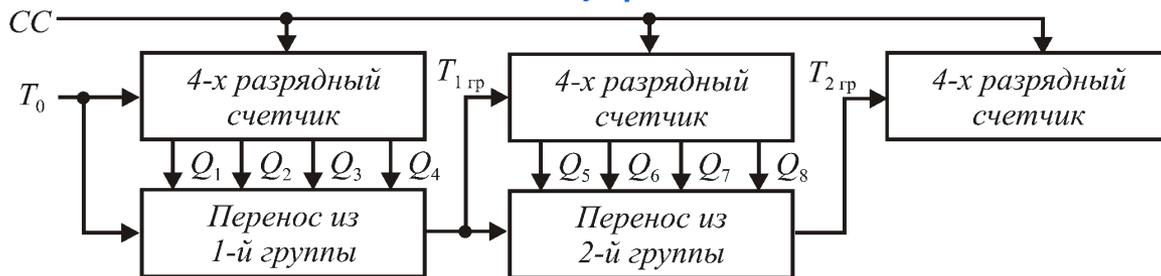


Рисунок 6 – Структурная схема 12-разрядного счетчика с групповым последовательным переносом между 4-разрядными группами.

Таким сигналом является логическое произведение сигналов с выходов разрядов установленных в единичное состояние и сигнала переноса из предыдущей группы:

$$T_{j \text{ гр}} = T_{j-1 \text{ гр}} Q_k \cdot Q_{k+1} \cdot \dots \cdot Q_l$$

где j – номер группы; k – младший разряд в группе; l – старший разряд в группе.

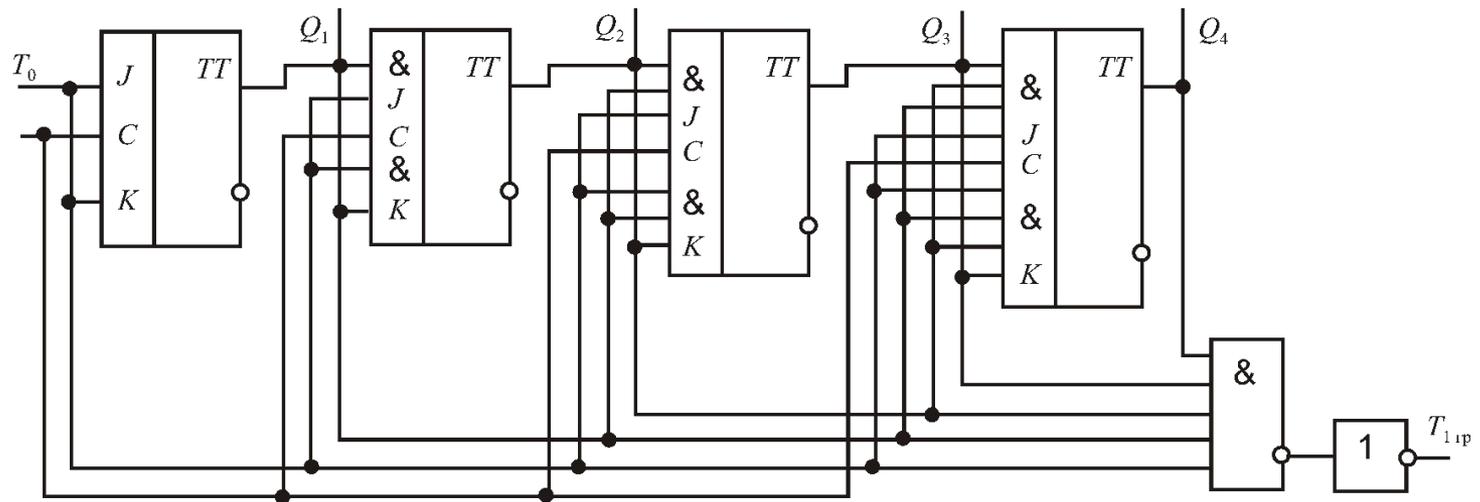


Рисунок 7 – Пример одного элемента группы – четырехразрядный счетчик с параллельным переносом на *JK*-триггерах.

На схеме счётчика показаны цепи формирования переноса в следующую группу.

Максимальная частота работы счетчика практически **определяется частотой работы одной триггерной схемы.**

При **параллельном** или **одновременном формировании переноса между группами** сигнал переноса формируется, как логическое произведение счетного сигнала T_0 и сигналов с выходов всех предшествующих разрядов установленных в «ЛОГ.1» :

$$T_{j \text{ гр}} = T_0 \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_i,$$

где Q_i – сигнал с единичного выхода старшего разряда.

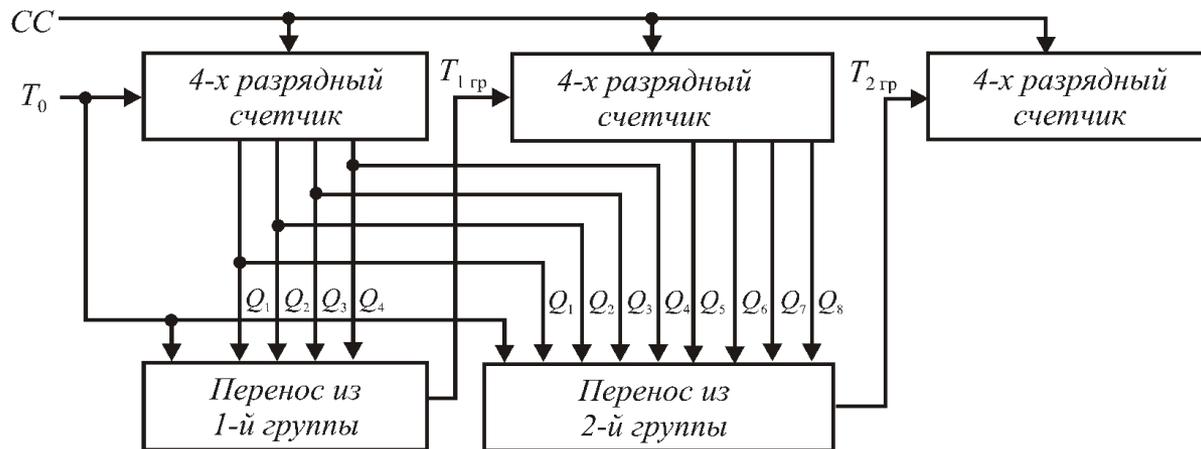


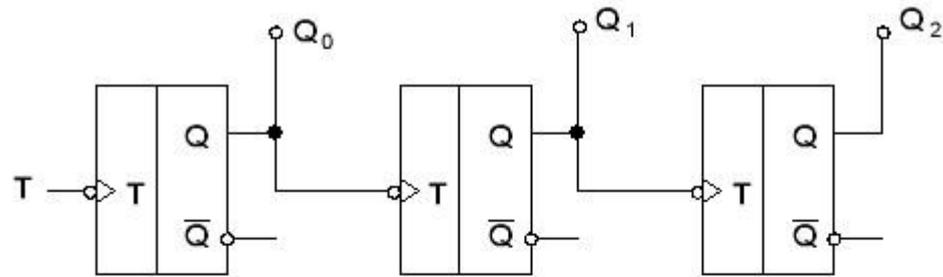
Рисунок 8 – Структурная схема 12-разрядного счетчика с параллельным групповым переносом между 4-разрядными группами.

Максимальная частота счетчика с одновременным переносом определяется соотношением:

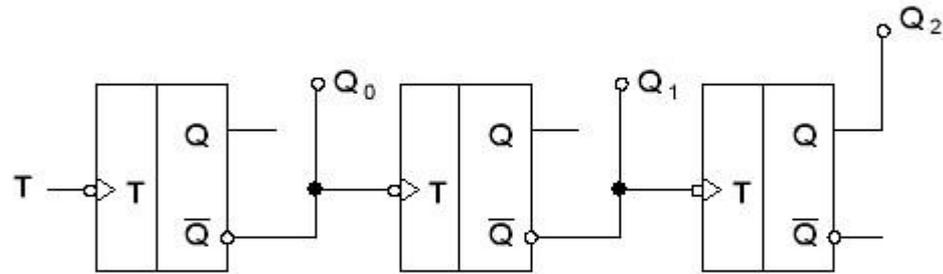
$$F \leq 1/(t_{\text{п}} + t_{3\text{Р}}).$$

Реверсивный счетчик

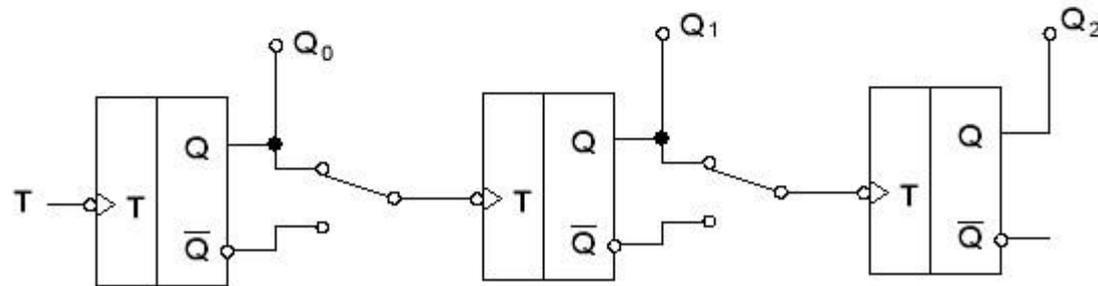
Реверсивный счётчик позволяет производить как сложение, так и вычитание поступающих сигналов.



3-х разрядный
суммирующий счётчик



3-х разрядный
вычитающий счётчик



3-х разрядный
реверсивный счётчик

Для реализации механизма коммутации сигналов применяется дополнительная комбинационная схема.

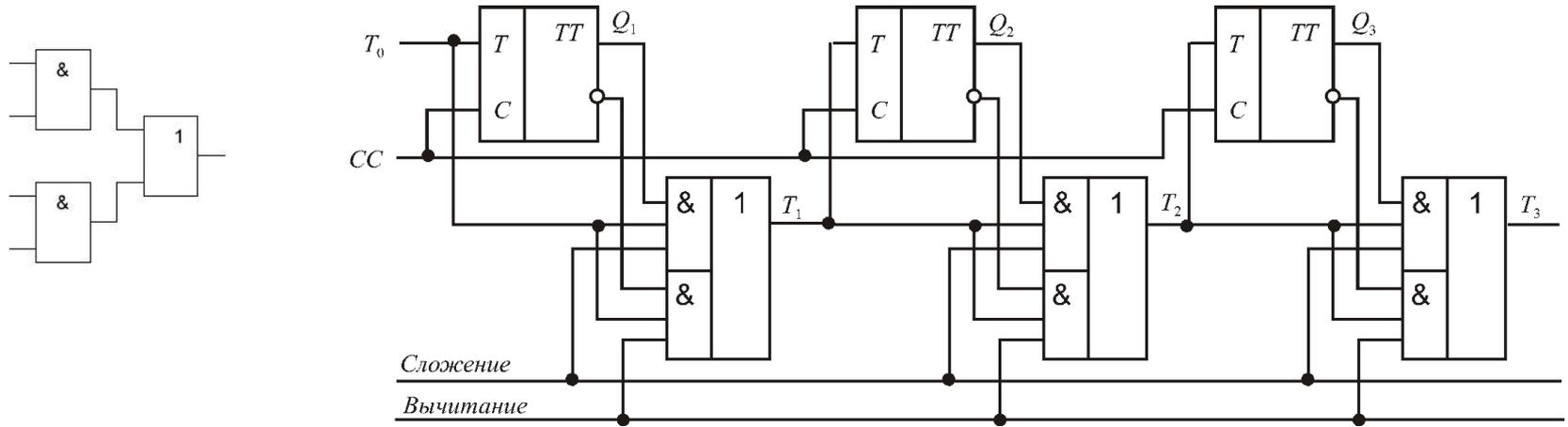


Рисунок 9 – Четырёхразрядный реверсивный счетчик с последовательным переносом
 Положительные числа представлены в прямом коде.
 Отрицательные числа представляются в счетчике в виде дополнения до 2^N , где N – число разрядов в счетчике.

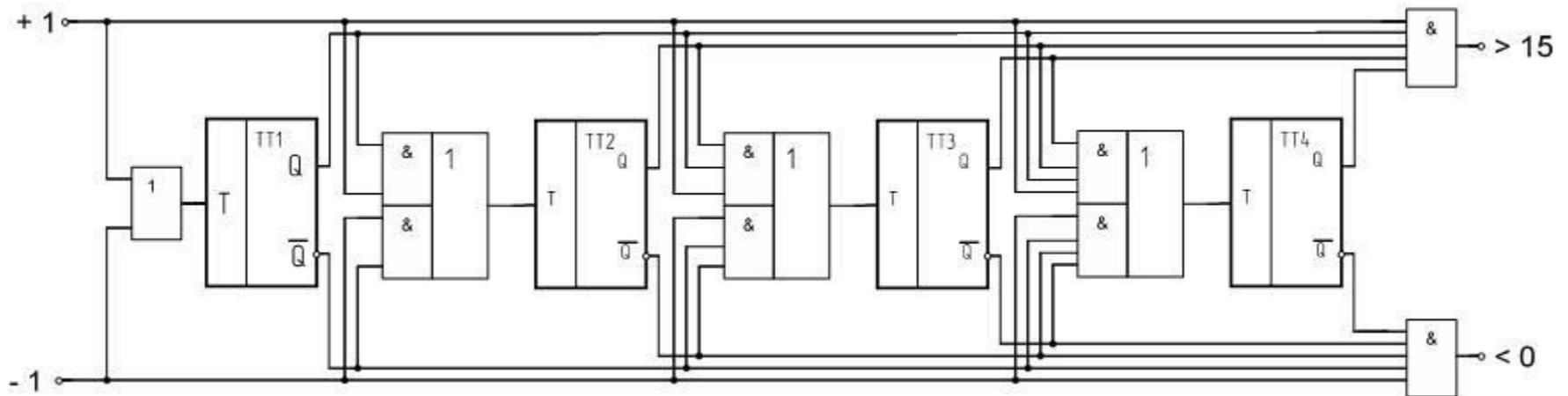
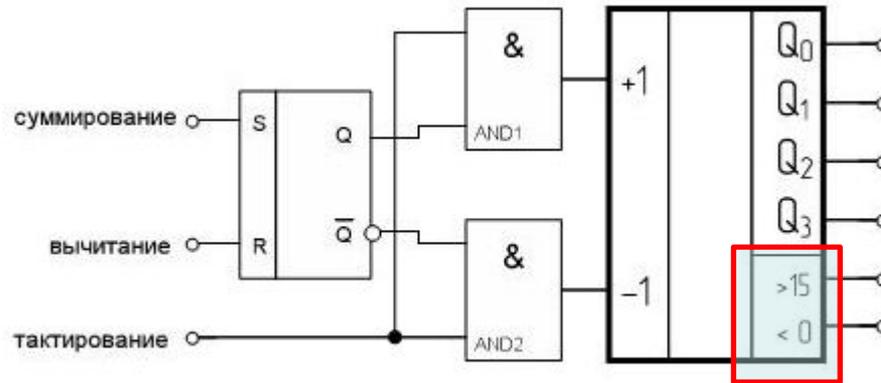


Рисунок 10 – Реверсивный счетчик с параллельным переносом

Некоторые счётчики с параллельным переносом, выпускаемые в виде ИС, имеют помимо основных выходов – дополнительные, обозначаемые, например, “≥9”, “≥15”, “≤0”.



Сигнал “1” появляется на выходе “≥9” или “≥15” при заполнении счётчика. Следовательно, на этом выходе формируется сигнал переноса в следующий счётчик.

На другом выходе “≤0”, сигнал “1” появляется при заполнении всех разрядов счётчика “0” и является сигналом займа из предыдущего счётчика в режиме вычитания.