

# Цифровые автоматы – общие сведения



**Автомат** — математическая модель дискретного устройства

Автомат описывается набором множеств:

$\mathbf{A} = \{a_1 \dots a_N\}$  — множество значений **состояний** устройства

$\mathbf{Z} = \{z_1 \dots z_N\}$  — множество значений входных управляющих сигналов

$\mathbf{W} = \{w_1 \dots w_N\}$  — множество значений выходных сигналов

$\delta$  — функция переходов от текущего состояния  $a_n$  в следующее состояние  $a_{n+1}$

$\lambda$  — функция зависимости выходов от значений  $a_n$  и  $z_n$

$a_1$  — начальное состояние автомата

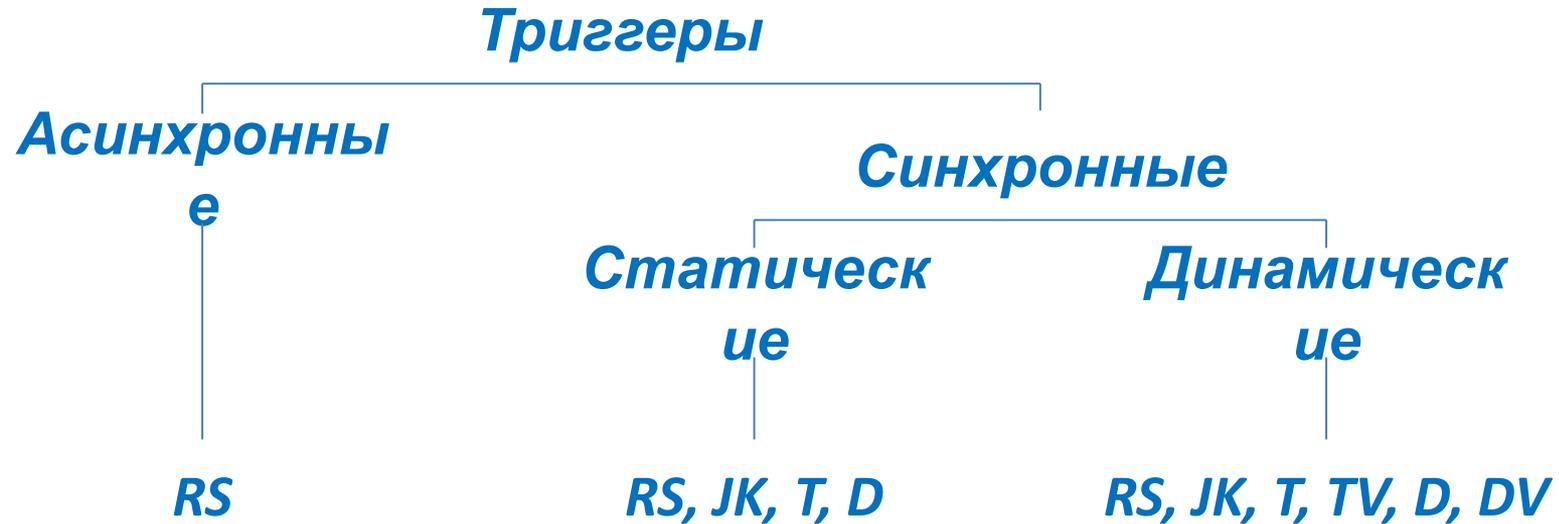
**Автомат Мура**

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \delta(a_n, z_n) \\ w_n &= \lambda(a_n, z_n) \end{aligned}$$

**Автомат Мура**

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \delta(a_n, z_n) \\ w_n &= \lambda(a_n) \end{aligned}$$

# Классификация триггеров



**Переключаются по изменениям на управляющих входах**

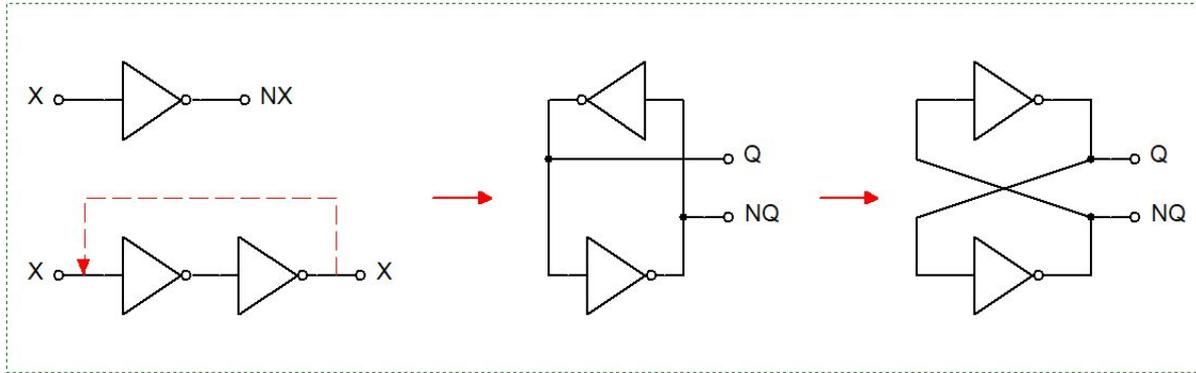
**Переключаются по изменениям на управляющих входах при разрешающем значении синхросигнала**

**Устанавливаются в момент переключения синхросигнала**

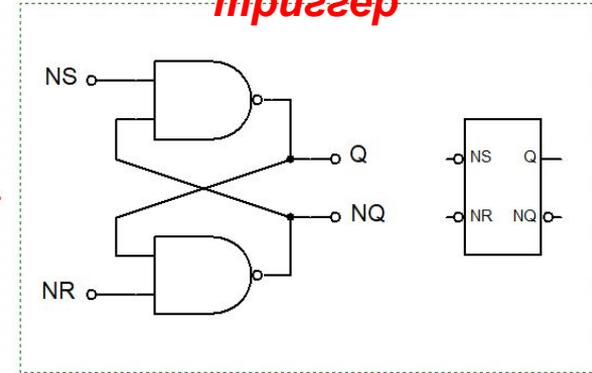
# Базовые КМОП триггерные схемы

## Происхождение

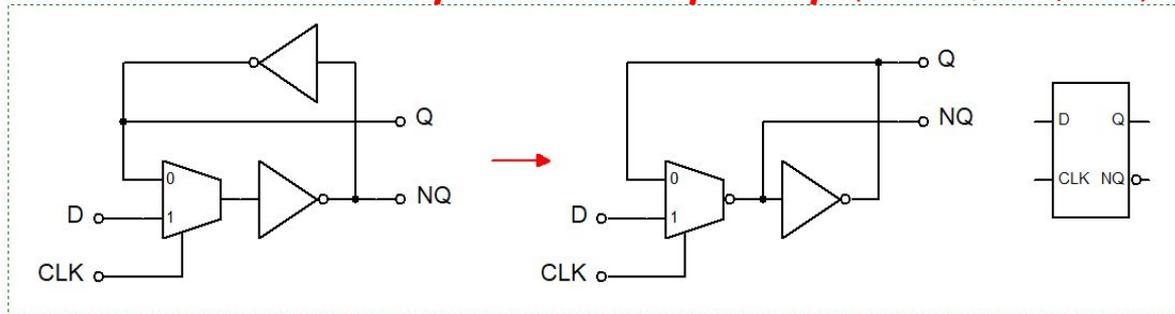
### Бистабильная ячейка



### Асинхронный RS-триггер



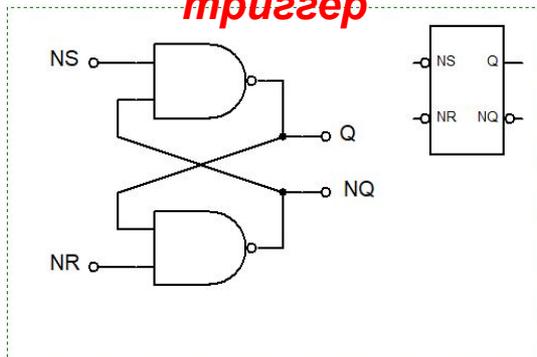
### Синхронный D-триггер (D-latch, защелка)



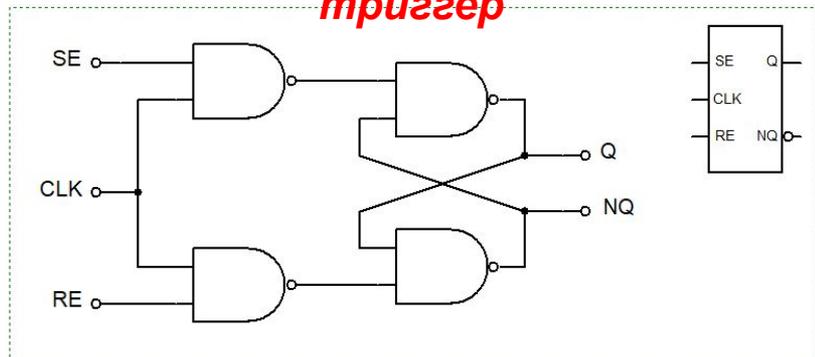
# Базовые КМОП триггерные схемы

## Ввод синхросигнала

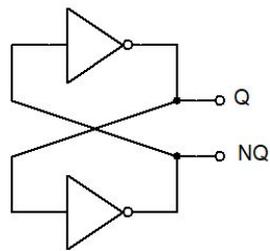
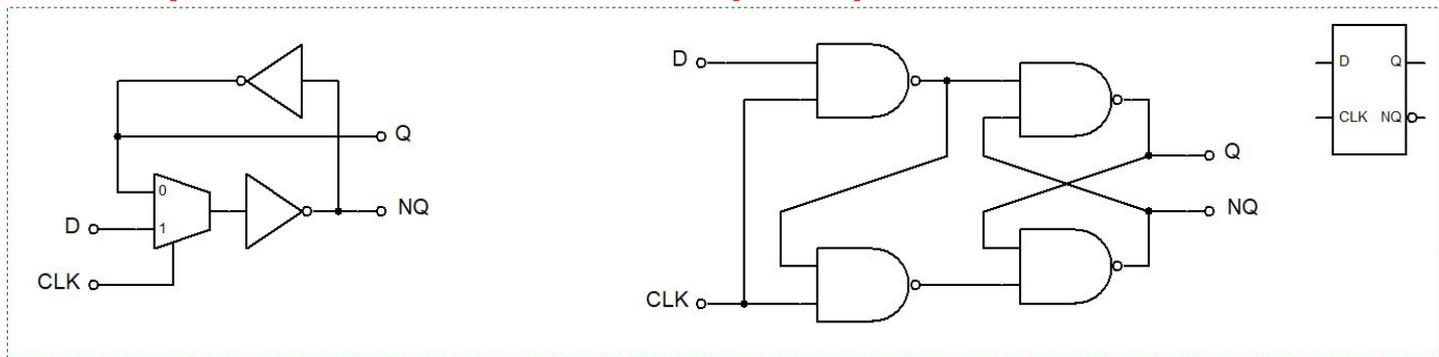
### Асинхронный RS-триггер



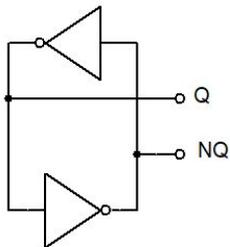
### Синхронный статический RS-триггер



### Синхронный статический D-триггер



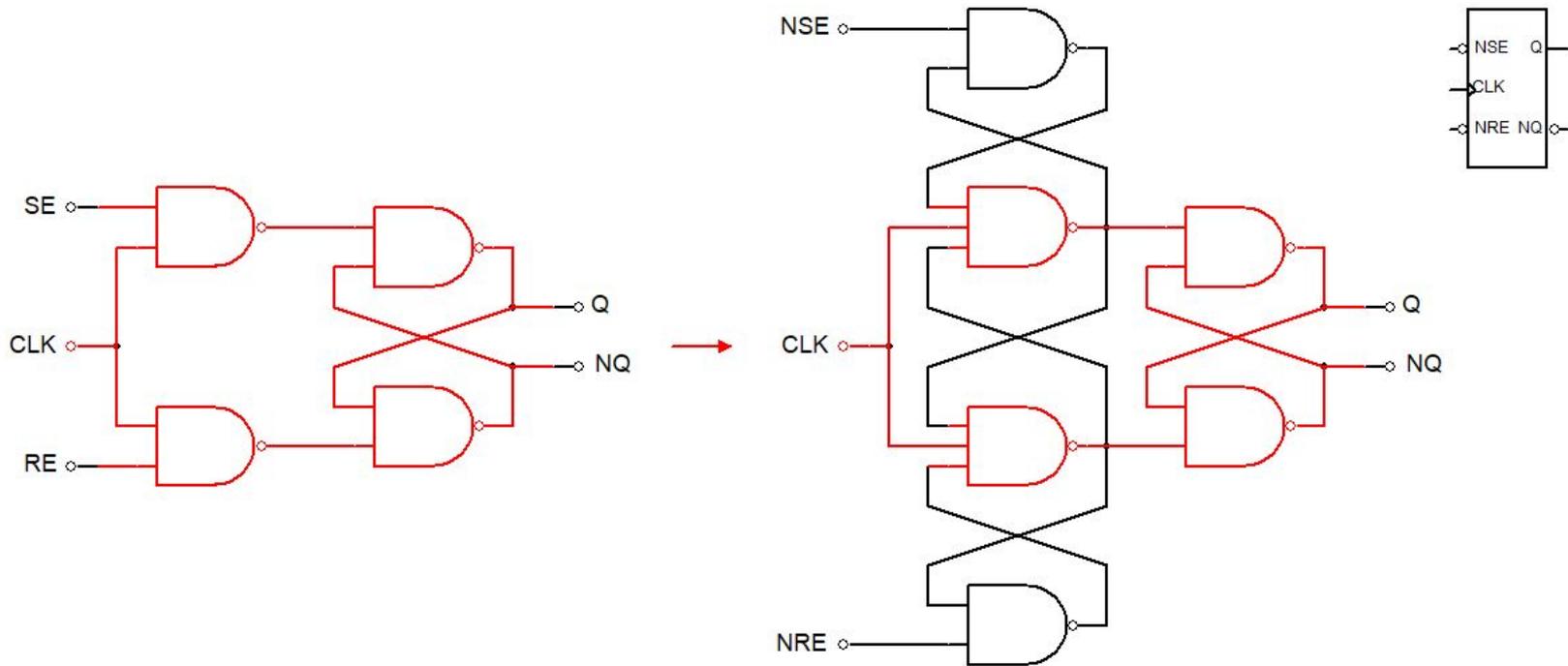
### Бистабильная ячейка



# Базовые КМОП триггерные схемы

## Динамическая синхронизация с помощью коммутируемых ячеек

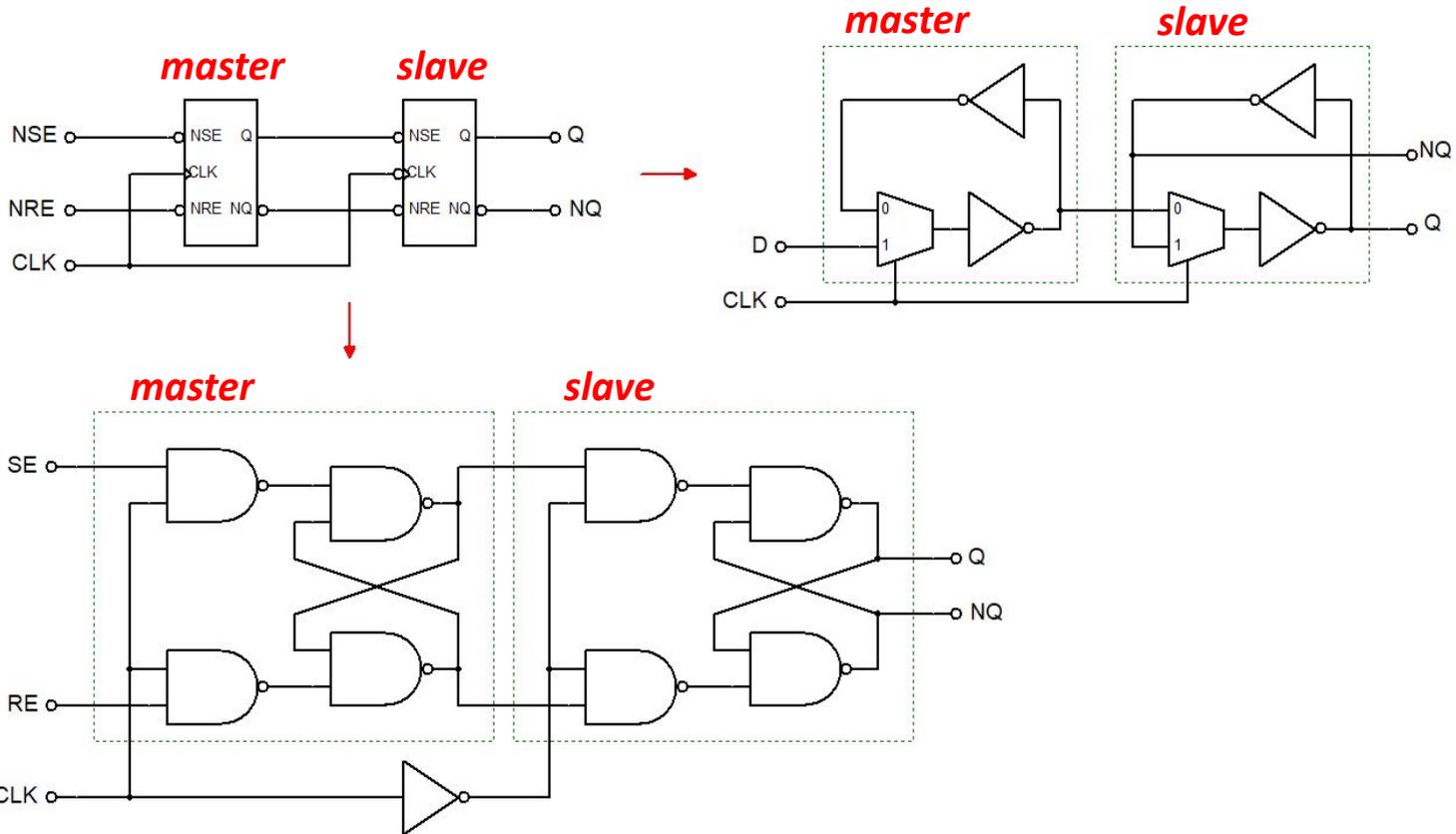
### Синхронный динамический RS-триггер



# Базовые КМОП триггерные схемы

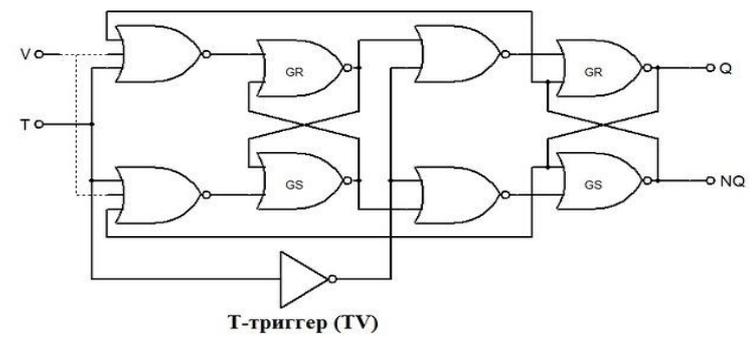
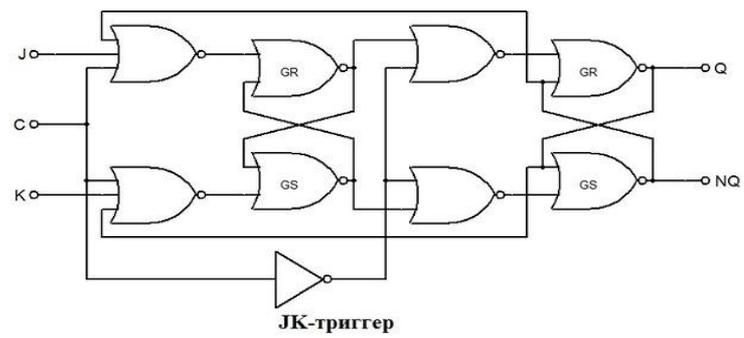
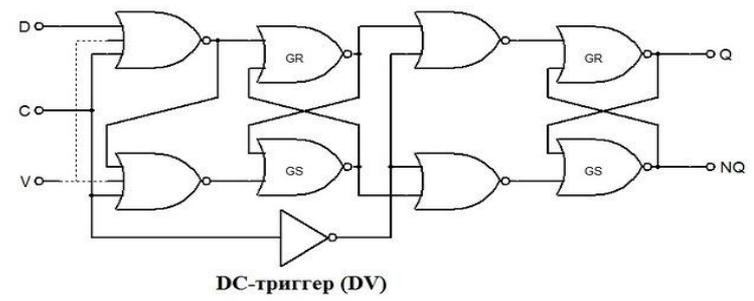
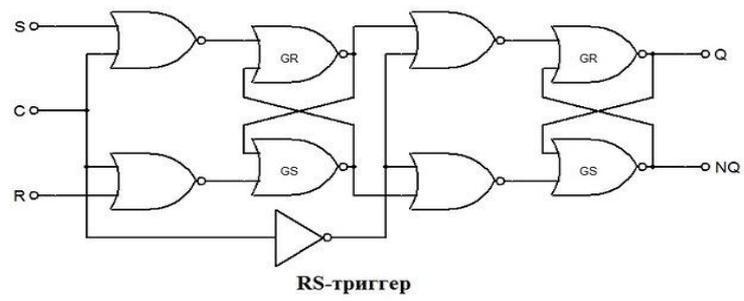
## Двухступенчатая динамическая синхронизация

(master-slave = ведущий-ведомый = flip-flop)



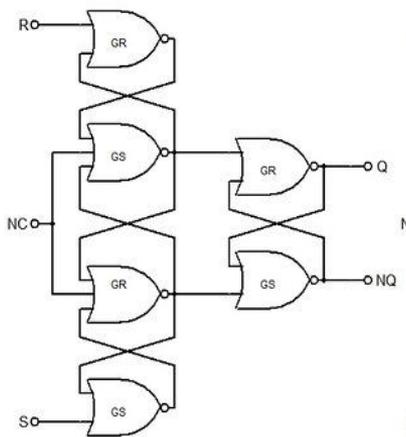
# Схемы триггеров

## Двухступенчатые динамические триггеры (Master-Slave)

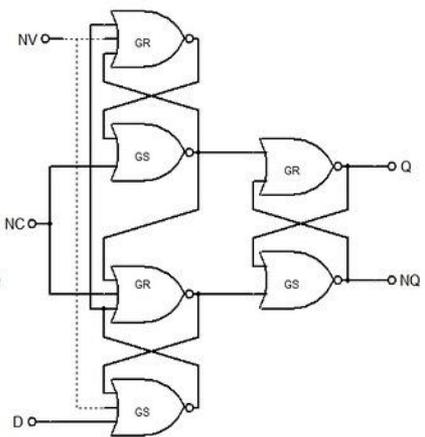


# Схемы триггеров

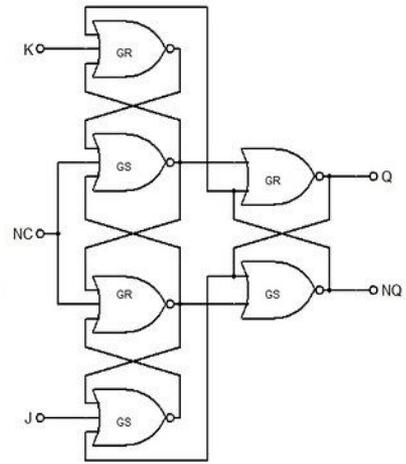
## Динамические триггеры на коммутируемых ячейках



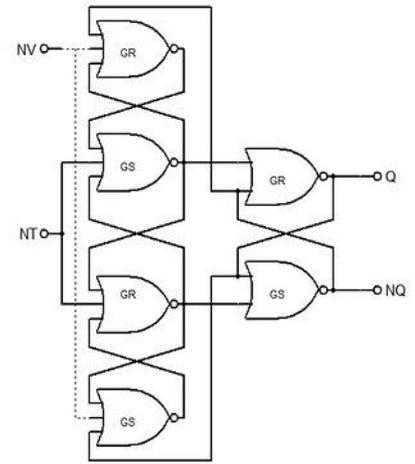
RS-триггер



DC-триггер (DV)



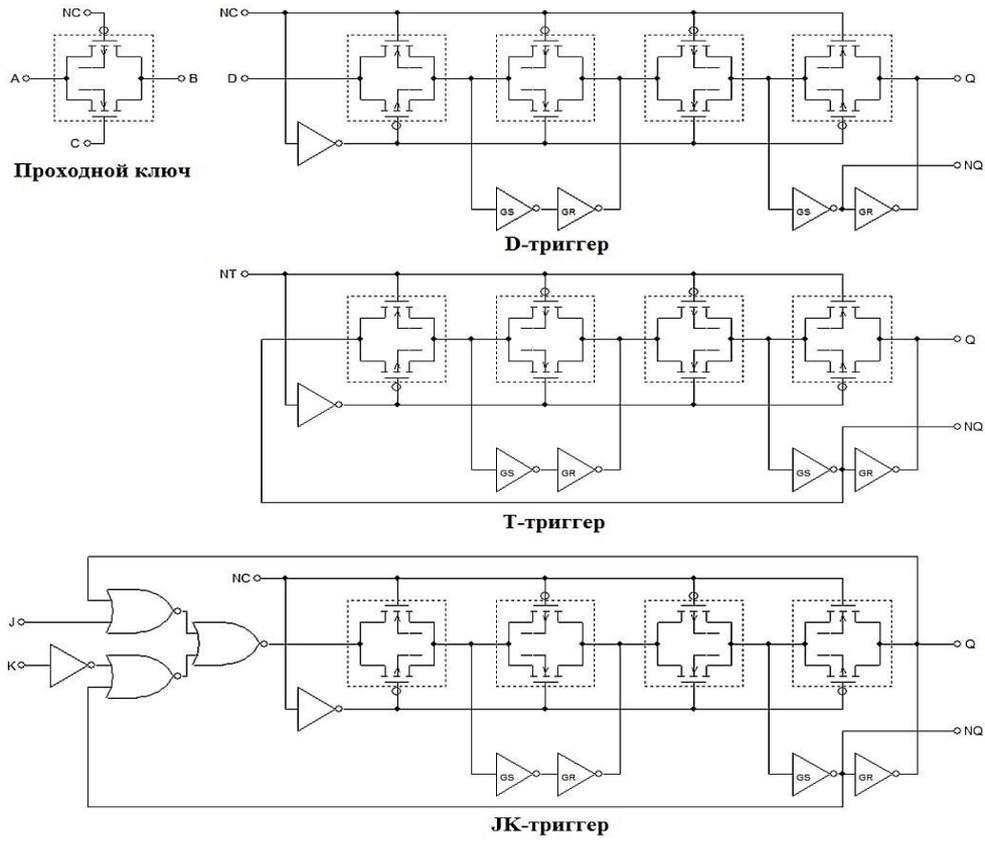
JK-триггер



T-триггер (TV)

# Схемы триггеров

## Триггеры типа Master-Slave на проходных ключах



сделать в 2020-2021г.

Поправить JK

# Словарь и характеристическое уравнение RS триггера

Текущее значение	RS триггер								След. значение
	R	S							
$Q_n$	R	S							$Q_{n+1}$
0	X	0							0
0	0	1							1
1	1	0							0
1	0	X							1

$$Q_{n+1} = S + \bar{R} \cdot Q_n$$

$$Q_{n+1} = (S + \bar{R} \cdot Q_n) \cdot C + \bar{C} \cdot Q_n$$

сделать в 2020-2021г.

Дополнить диаграммами сигналов

\*) "Словарь" определяет необходимые значения функций возбуждения для обеспечения перехода триггера из текущего значения в следующее

\*\*) Во всех таблицах активный уровень равен 1

# Словарь и характеристическое уравнение JK триггера

Текущее значение			JK триггер					След. значение
			K	J				
$Q_n$			K	J				$Q_{n+1}$
0			X	0				0
0			X	1				1
1			1	X				0
1			0	X				1

$$Q_{n+1} = J \cdot \bar{Q}_n + \bar{K} \cdot Q_n$$

$$Q_{n+1} = (J \cdot \bar{Q}_n + \bar{K} \cdot Q_n) C + \bar{C} \cdot Q_n$$

сделать в 2020-2021г.

Дополнить диаграммами сигналов

# Словарь и характеристическое уравнение D триггера

Текущее значение					D тр-р			След. значение
$Q_n$					D			$Q_{n+1}$
0					0			0
0					1			1
1					0			0
1					1			1

$$Q_{n+1} = D$$

$$Q_{n+1} = D \cdot C + \bar{C} \cdot Q_n$$

*сделать в 2020-2021г.*

*Дополнить диаграммами сигналов*

# Словарь и характеристическое уравнение TV триггера

Текущее значение					TV тр-р			След. значение
$Q_n$					V			$Q_{n+1}$
0					0			0
0					1			1
1					1			0
1					0			1

$$Q_{n+1} = \bar{Q}_n \cdot V + \bar{V} \cdot Q_n$$

$$Q_{n+1} = \bar{Q}_n \cdot V \cdot T + (\bar{V} + \bar{T}) \cdot Q_n$$

сделать в 2020-2021г.

Дополнить диаграммами сигналов

# Словарь и характеристическое уравнение DV триггера

Текущее значение							DV триггер		След. значение
	Q <sub>n</sub>	0	0	1	1	X	D	V	Q <sub>n+1</sub>
0							X	0	0
0							0	1	0
0							1	1	1
1							0	1	0
1							X	0	1
1							1	1	1

$$Q_{n+1} = D \cdot V + \bar{V} \cdot Q_n$$

$$Q_{n+1} = D \cdot V \cdot C + (\bar{V} + \bar{C}) \cdot Q_n$$

сделать в 2020-2021г.

Дополнить диаграммами сигналов

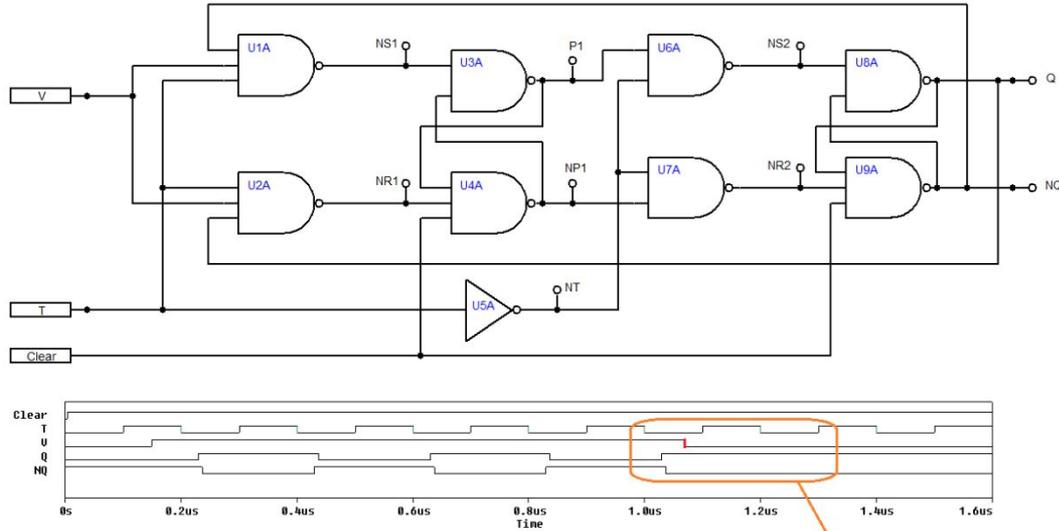
# Сводный словарь триггеров

Текущее значение	RS триггер		JK триггер		D тр-р	TV тр-р	DV триггер		Следующее значение
	R	S	K	J	D	V	D	V	
$Q_n$	R	S	K	J	D	V	D	V	$Q_{n+1}$
0	X	0	X	0	0	0	X 0	0 1	0
0	0	1	X	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	X	0	1	0	1	0
1	0	X	0	X	1	0	X 1	0 1	1

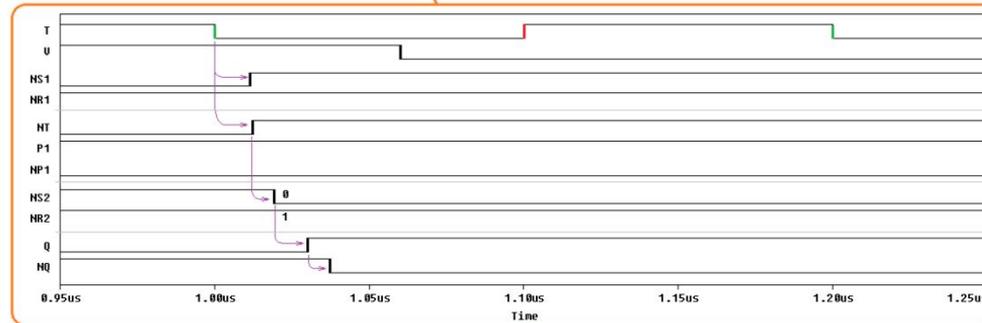


# Захват единицы (нуля) в MS-триггерах 17

(«лишнее» переключение триггера)

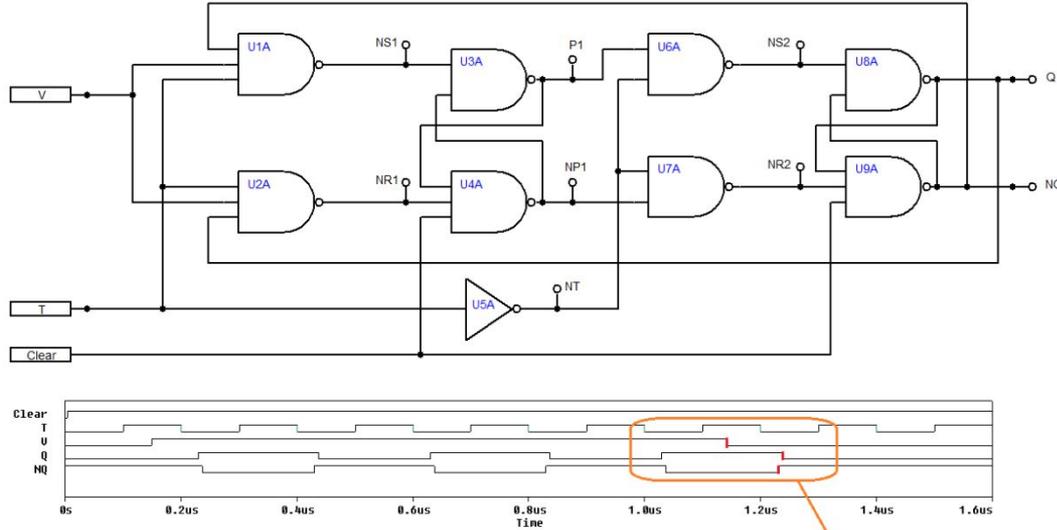


**TV-триггер m-s типа:**  
Нормальная работа при запрещающем переключении V в первой половине периода тактового сигнала.



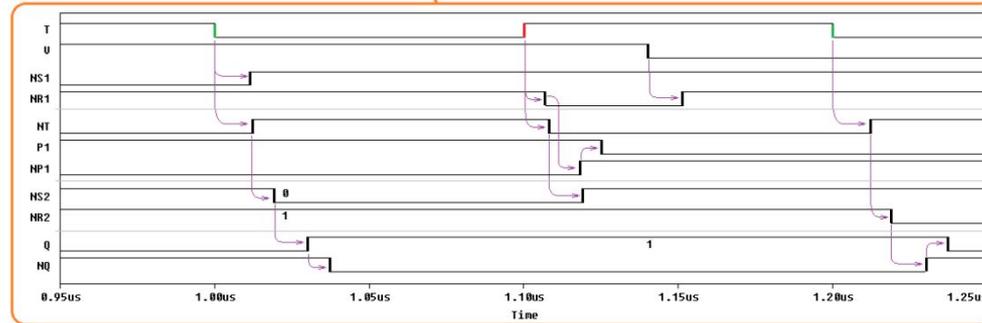
# Захват единицы (нуля) в MS-триггерах 18

(«лишнее» переключение триггера)



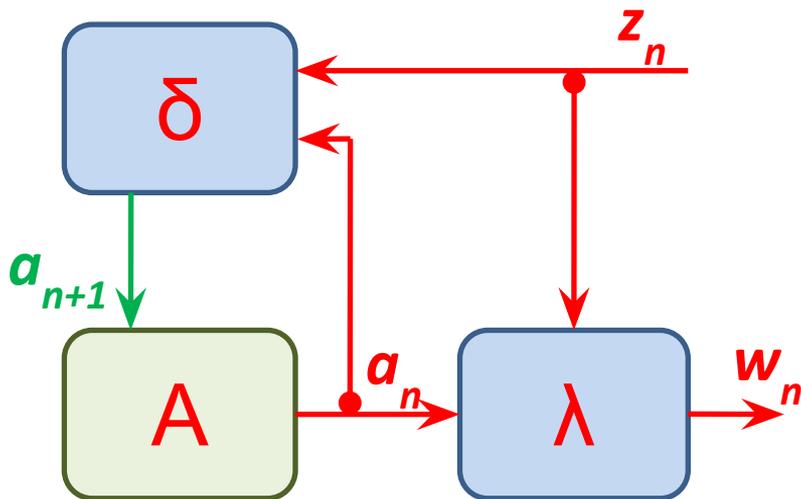
**TV-триггер m-s типа:**  
**«Захват единицы»**  
**при запрещающем**  
**переключении V во**  
**второй половине**  
**периода тактового**  
**сигнала**

**В каких еще**  
**триггерах**  
**срабатывает**  
**эффект**  
**захвата?**



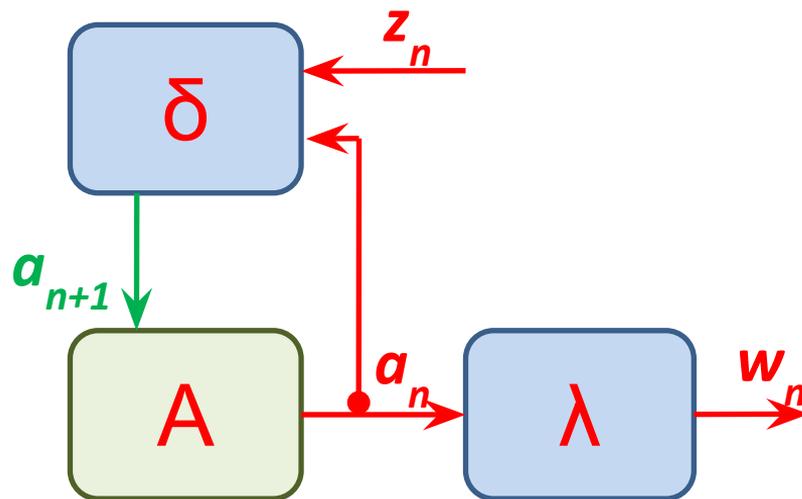
## Автомат Мили

$$a_{n+1} = \delta(a_n, z_n)$$
$$w_n = \lambda(a_n, z_n)$$

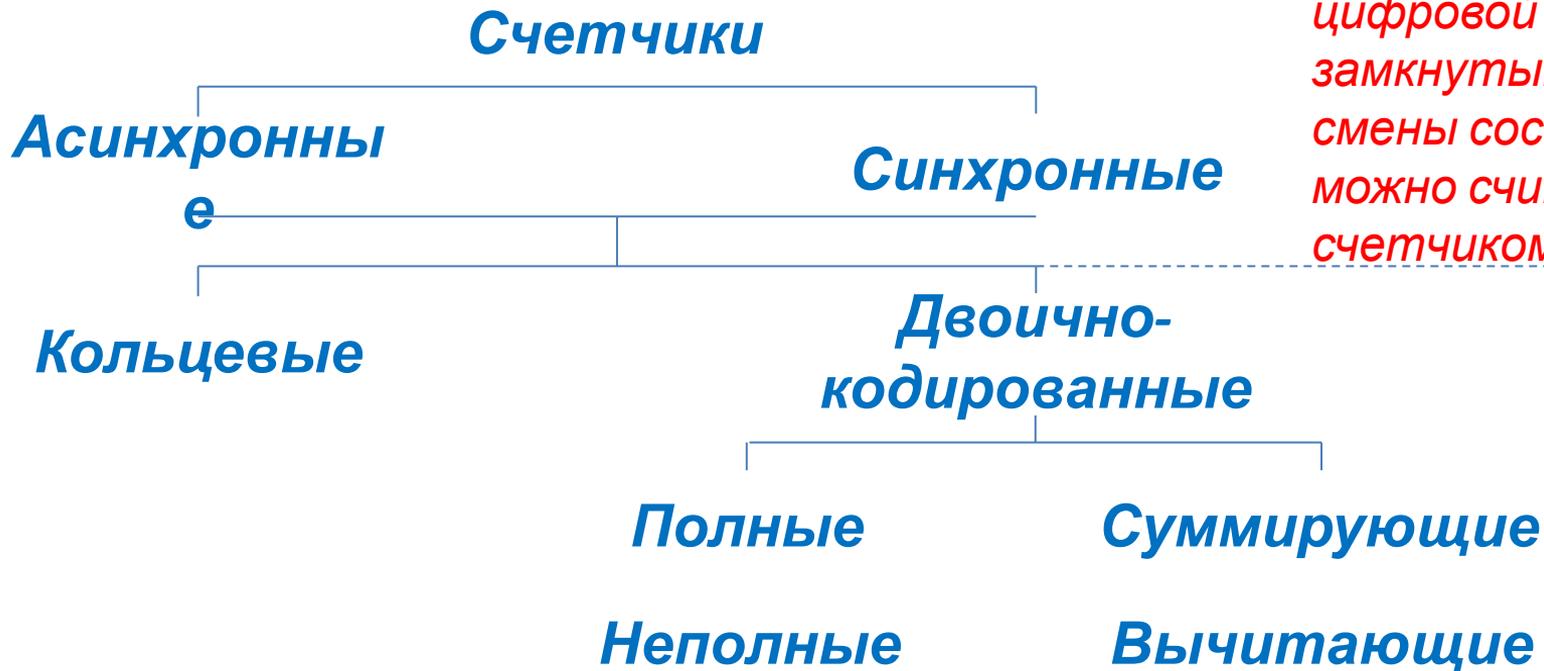


## Автомат Мура

$$a_{n+1} = \delta(a_n, z_n)$$
$$w_n = \lambda(a_n)$$

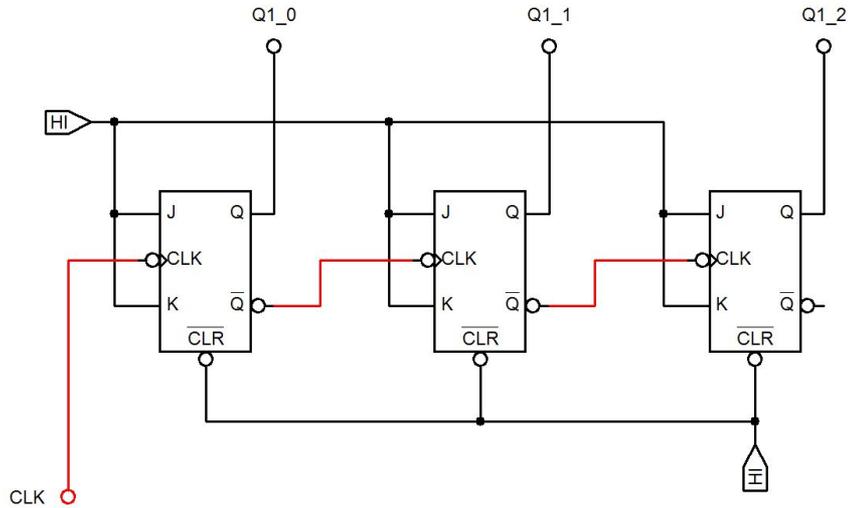


# Классификация счетчиков



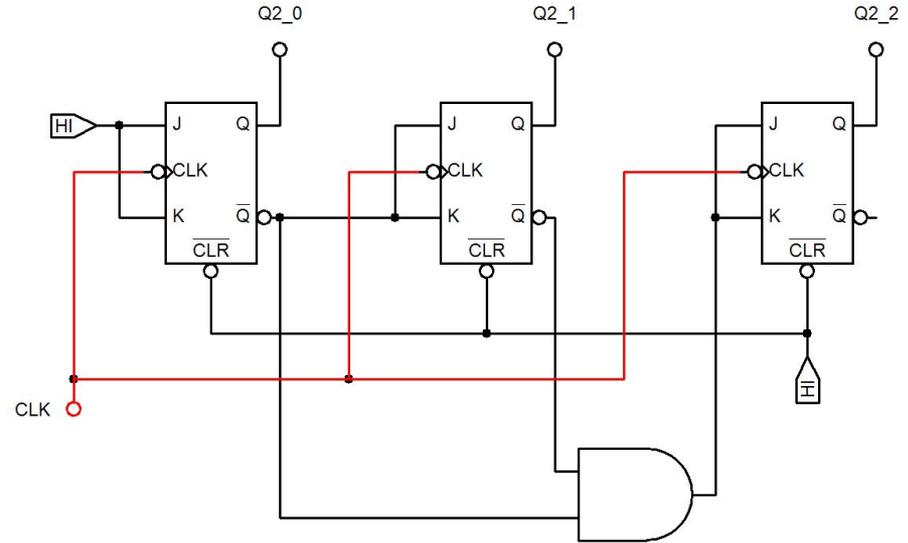
☀ Вообще, любой цифровой автомат с замкнутым циклом смены состояний можно считать счетчиком.

# Полные счетчики (Делители частоты)



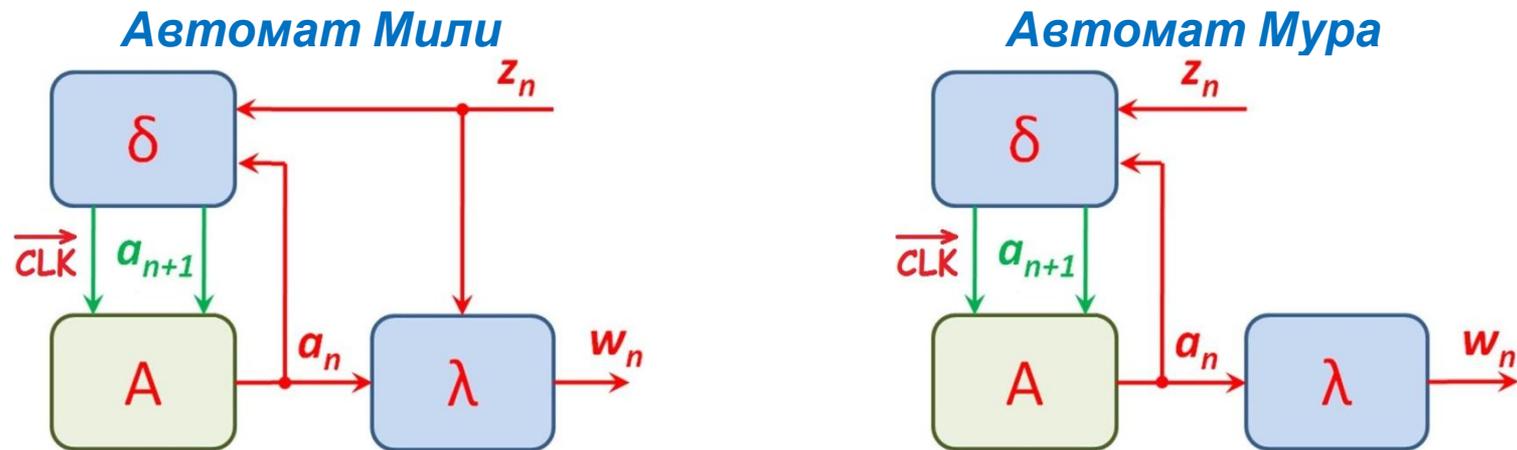
**Асинхронный**

$$V_i = 1$$
$$C_0 = CLK \quad C_i = !Q_{i-1}$$



**Синхронный**

$$V_0 = 1 \quad V_i = V_{i-1} \cdot !Q_{i-1}$$
$$C_i = CLK$$



$\delta(A, Z)$  – комбинационная логика

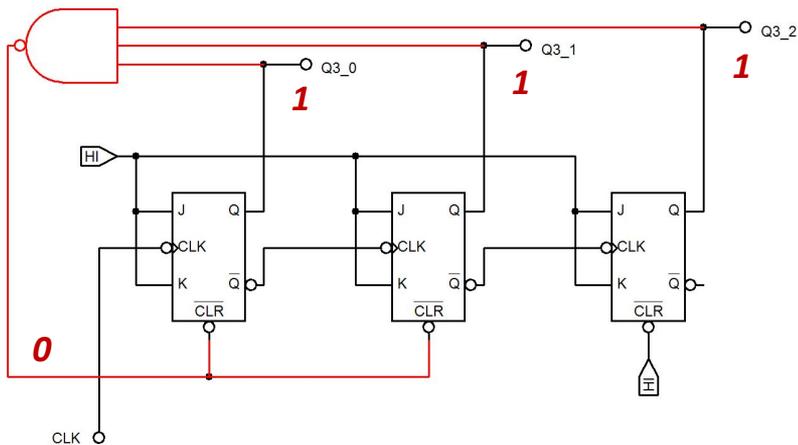


разность логических путей, «гонки» сигналов

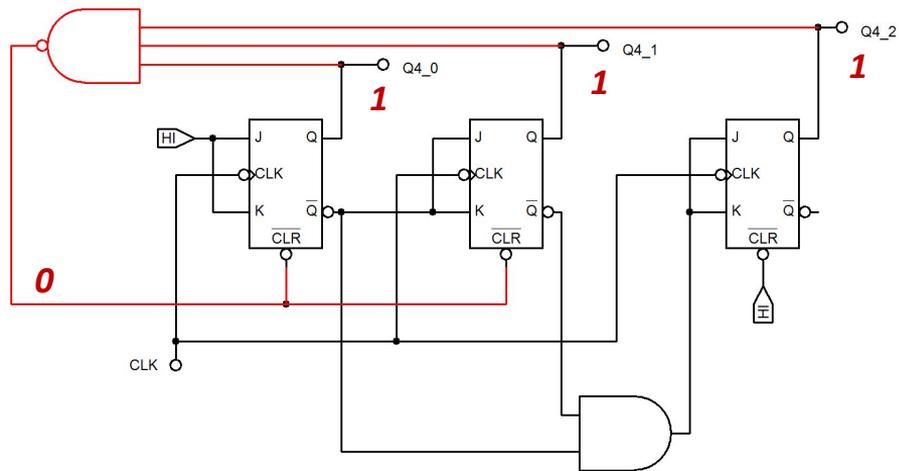


**риски сбоев в асинхронных автоматах**

# Не полные счетчики с асинхронным сбросом



Асинхронный



Синхронный

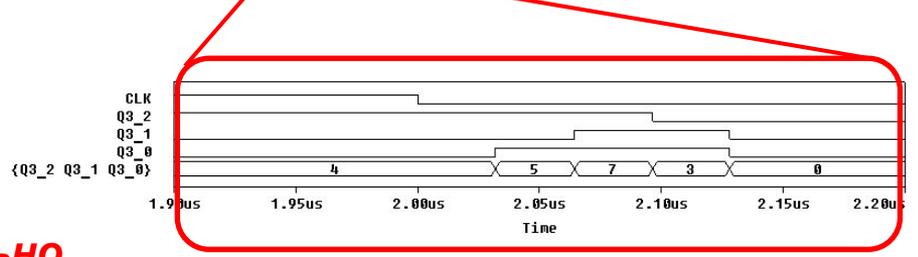
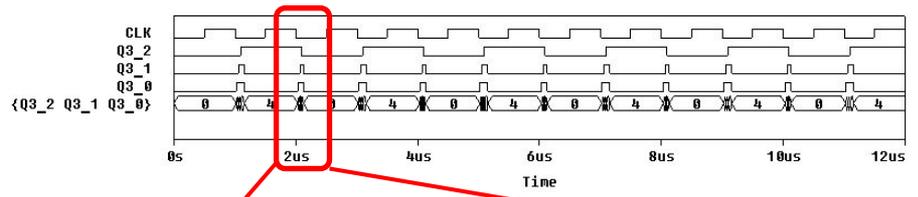
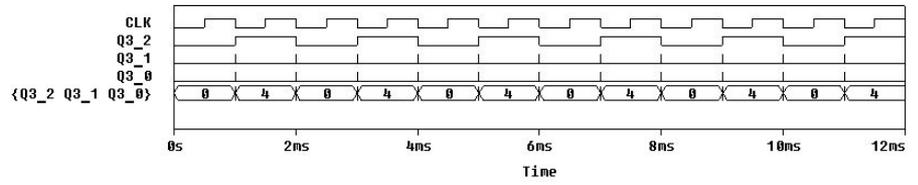
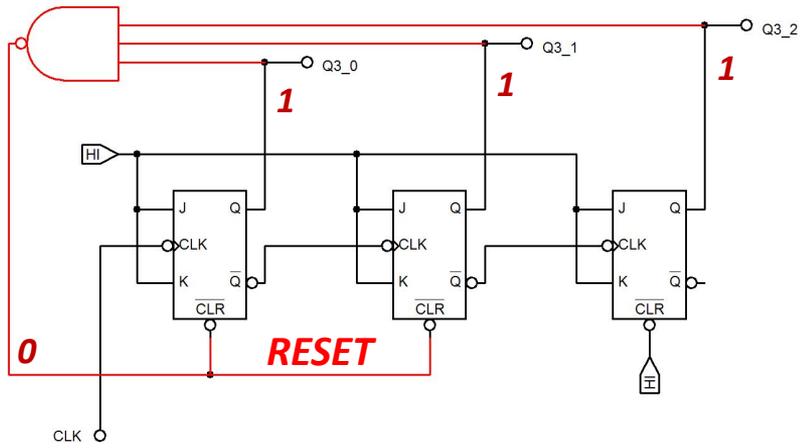
**Пример: вычитающий счетчик с модулем счета 5**

Установка в значение  $Q_{n+1} = 4$  происходит при  $Q = 7$

**НО в жизни не все так просто (см. следующий слайд)**



# Не полные счетчики с асинхронным сбросом



Ожидаемый счет

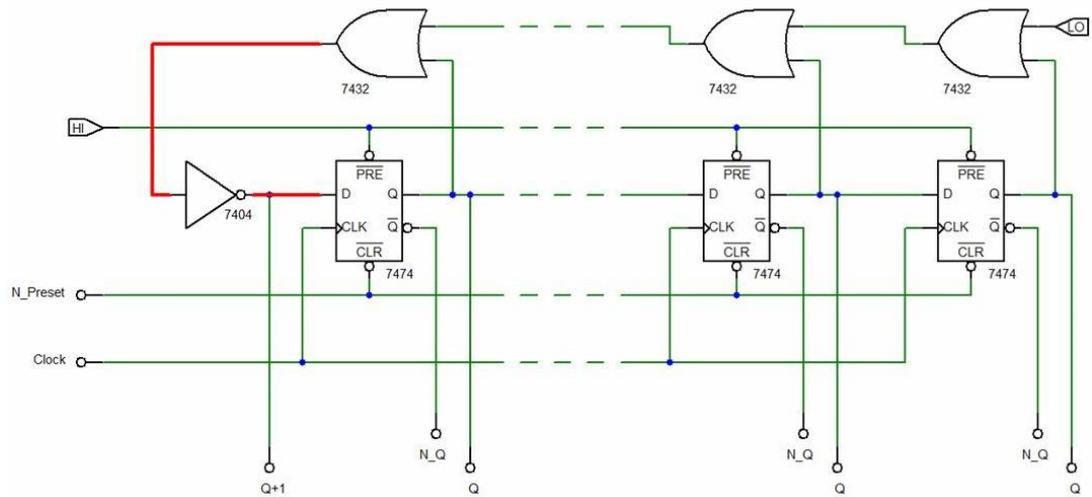
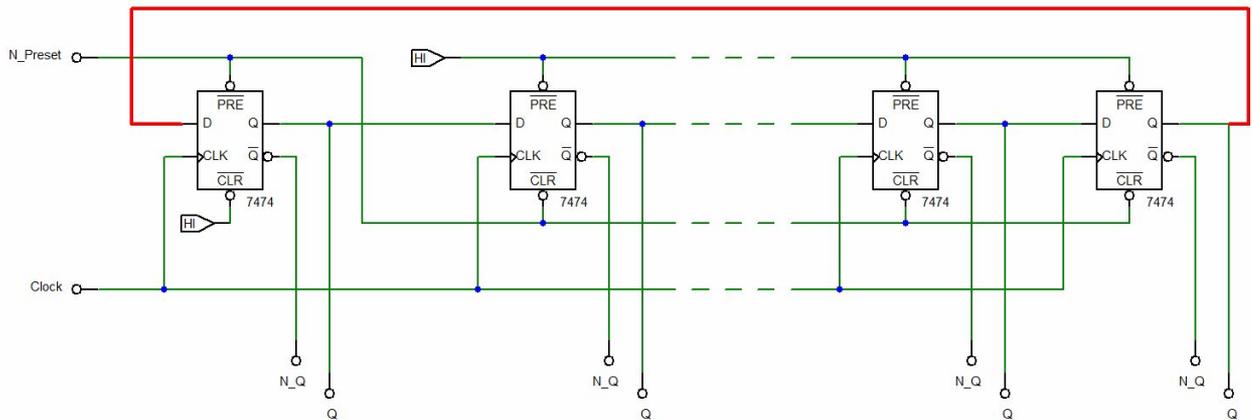
4 → 3 → 2 → 1 → 0 → 4 → ...

НО переключение  $Q_i$  идет последовательно

4<sup>Q<sub>0</sub></sup> → 5<sup>Q<sub>1</sub></sup> → 7<sup>Q<sub>2</sub></sup> → 3 → 0 → 4 → ...

RESET<sub>0,1</sub>

# Кольцевой счетчик (счетчик в коде "1 из N", унитарный счетчик)



## Вариант 1:

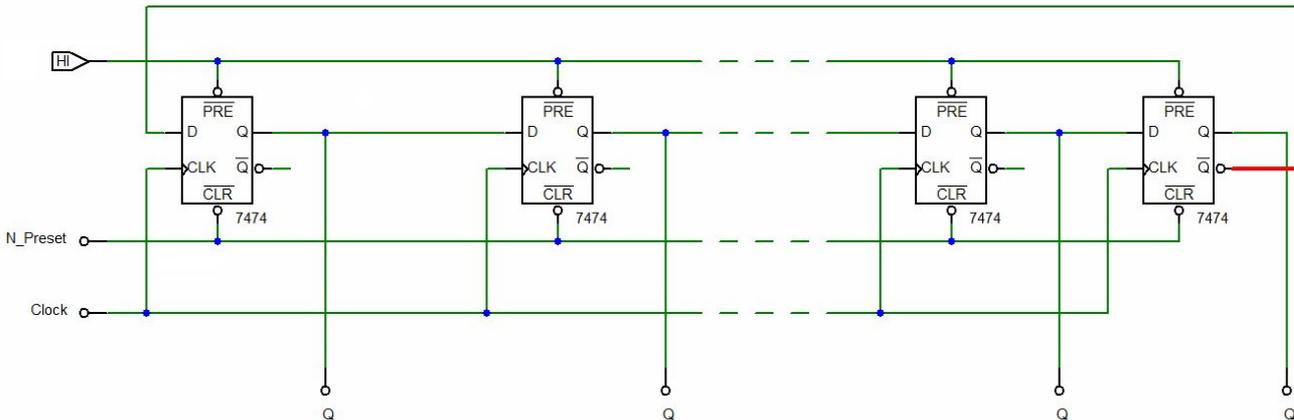
- на базе сдвигового регистра
- N состояний → N триггеров
- обязательная инициализация
- риск неустраняемых ошибок

## Вариант 2:

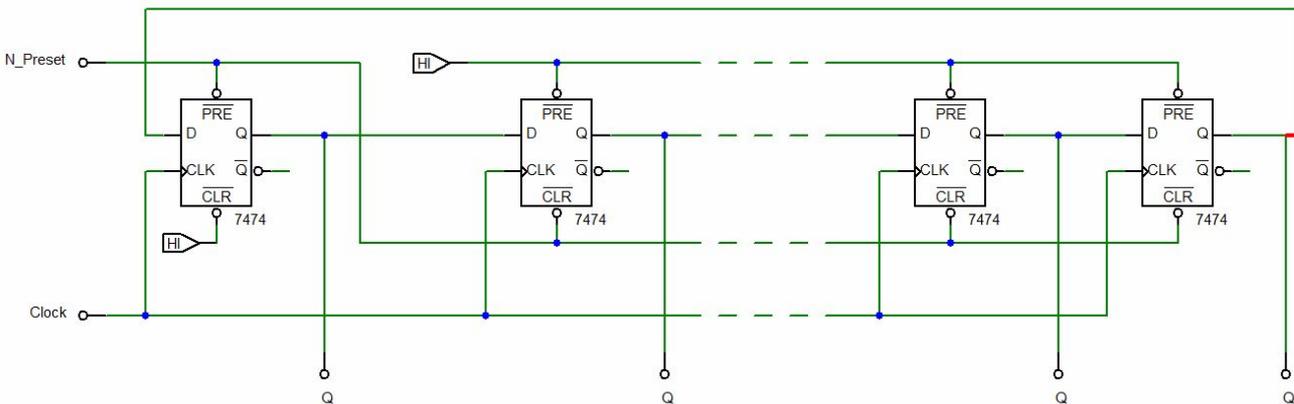
- на базе сдвигового регистра
- Автомат Мура:  $F_j = Q_{j-1}$ ;
- N состояний → N-1 триггеров
- ???
- автоматический вход в рабочий цикл за  $\leq N-2$  тактов (автоматическое исправление ошибок)

Автомат Мили:  $F = Q$  :

# Счетчик Джонсона и кольцевой счетчик на его основе



## Сравнение с кольцевым счетчиком на базе регистра

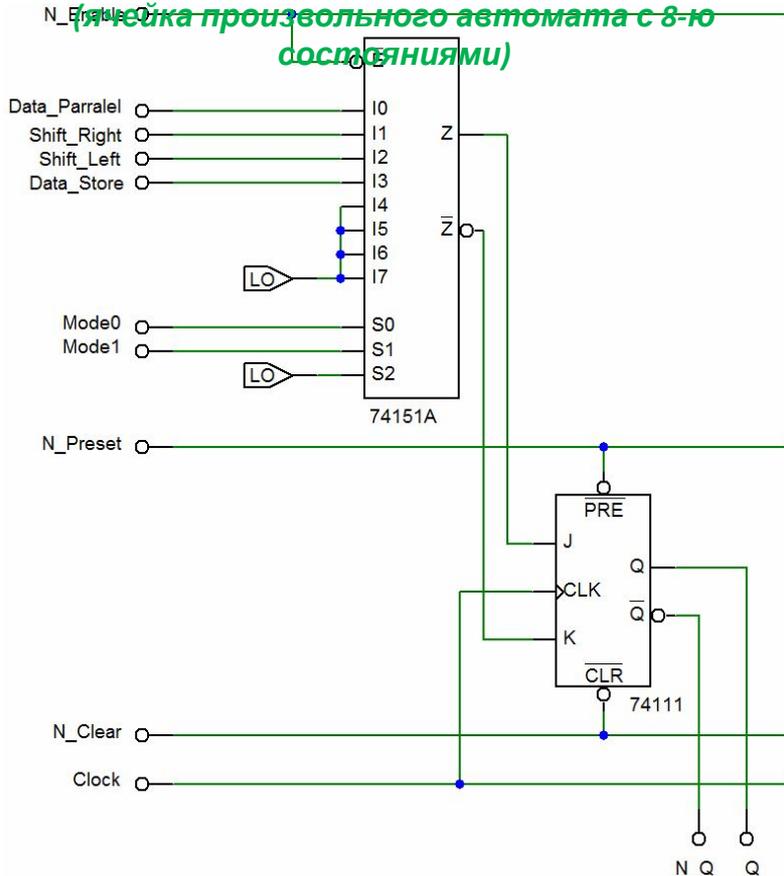


### Счетчик Джонсона:

- на базе сдвигового регистра
- $N$  состояний  $\rightarrow N/2$  триггеров
- обязательная инициализация
- риск неустранимых сбоев типа "лишние 1/0"
- на базе счетчика Джонсона
- $N$  состояний  $\rightarrow N/2$  триггеров
- риск неустранимых сбоев типа "лишние 1/0"
- простое получение выходных функций  $G_i$

# Регистры

## Базовая ячейка универсального регистра



## Регистры сдвига

$Shift\_Right_i - Q_{i-1}$      $Shift\_Right_0 - Data\_IN$

$Shift\_Left_i - Q_{i+1}$      $Shift\_Left_N - Data\_IN$

## Параллельный регистр

MUX режимов параллельной записи и хранения

$Data\_Parralel_i = Data_i$

$Data\_Store_i = Q_i$

## Реверсивный регистр

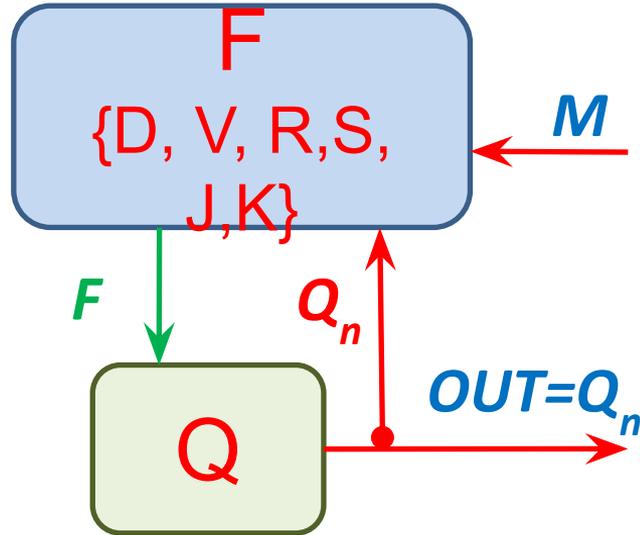
MUX режимов сдвига

## Универсальный регистр (см. рисунок)

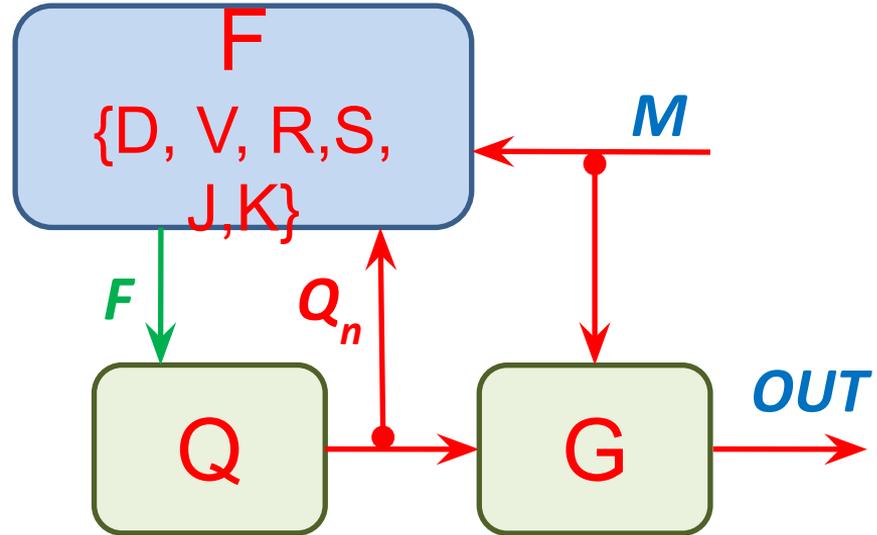
MUX режимов сдвига, параллельной записи и режима хранения

## Структурная схема автомата

как автомат Мура



как автомат Мили



$Q$  – набор ячеек памяти, хранящих текущее внутреннее состояние автомата (триггеры)

$F$  – комбинационный блок управления, определяющий следующее состояние (функции возбуждения триггеров)

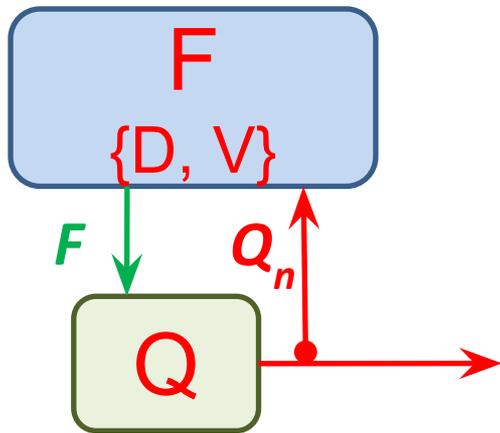
$G$  – комбинационный блок, формирующий набор выходных сигналов

# Сводный словарь триггеров

Текущее значение	RS триггер		JK триггер		D тр-р	TV тр-р	DV триггер		Следующее значение
	R	S	K	J	D	V	D	V	
$Q_n$	R	S	K	J	D	V	D	V	$Q_{n+1}$
0	X	0	X	0	0	0	X 0	0 1	0
0	0	1	X	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	X	0	1	0	1	0
1	0	X	0	X	1	0	X 1	0 1	1



# Полные двоично-кодированные счетчики. Функции возбуждения



• На базе TV-триггера:

$$V_i^{\overline{1}i\overline{e}i} = \prod_{j=0}^{i-1} Q_j$$

• На базе D-триггера:

$$D_i^{\overline{1}i\overline{e}i} = Q_i \square \prod_{j=0}^{i-1} Q_j$$

$Q_n$	V	D	$Q_{n+1}$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	1	0	0
1	0	1	1

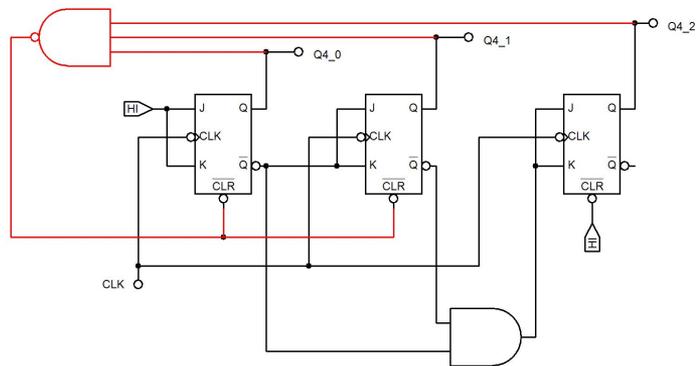
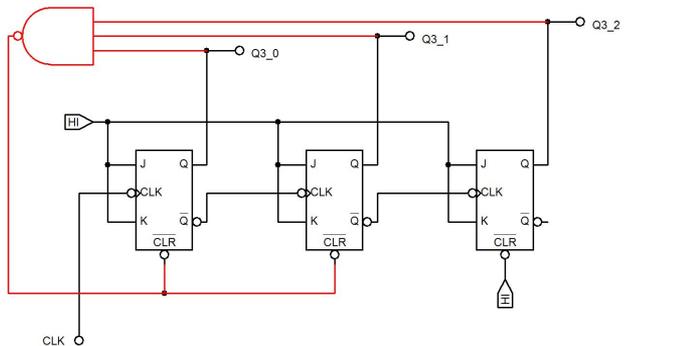
☀ Какой тип автомата на структурной схеме?

☀ Направление счета при указанных  $F_i$ ?

☀ Составить все варианты  $F_i$  для RS и JK триггеров

по «словарям» с учетом произвольных значений X

# Неполные двоично-кодированные счетчики. Методы синтеза



## 1 Асинхронная установка/сброс

- простое решение
- **обязательное появление «лишнего» состояния**
- **риск появления ложных импульсов в комбинационной логике сброса**
- **рассинхронизация выходных сигналов**

## Функция сброса:

$CLR = m_N$  – минтерм СДНФ, соответствующий значению  $Q$ , при появлении которого требуется сбросить счетчик



Как соотносятся  $N$  и величина модуля счета?

# Неполные двоично-кодированные счетчики. Методы синтеза

## 2 Синхронная установка/сброс

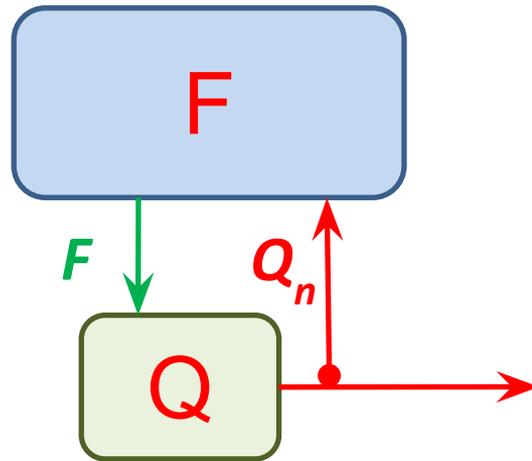
- простое решение
- нет «лишнего» состояния
- ложные импульсы в комбинационной логике сброса не мешают работе
- разсинхронизация выходных сигналов

$$F_i = F_i^{\text{полн}} \cdot \overline{\text{CLR}} + F_i^{\text{clr}} \cdot \text{CLR}$$

$\text{CLR} = m_N$  – функция сброса

$F^{\text{clr}}$  – значение функции возбуждения, приводящее к сбросу

★ Как соотносятся  $N$  и величина модуля счета?



# Неполные двоично-кодированные счетчики.

## Методы синтеза

### 2 Синхронная установка/сброс

(продолжение)

Примеры:

#### • Счетчик на D-триггерах

$$D_i^{clr}=0 \rightarrow D_i=D_i^{полн} \cdot \overline{CLR}$$

$$(D_i=D_i^{полн} \cdot \overline{CLR}+D_i^{clr} \cdot CLR=D_i^{полн} \cdot \overline{CLR}+0 \cdot CLR=D_i^{полн} \cdot \overline{CLR})$$

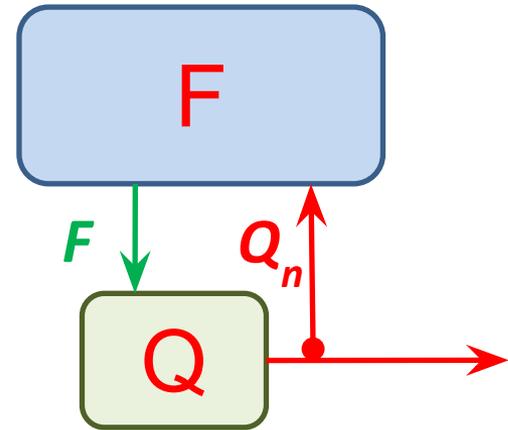
#### • Счетчик на TV-триггерах

$$V_i^{clr}=Q_i \rightarrow V_i=V_i^{полн} \cdot \overline{CLR}+Q_i \cdot CLR$$

$$V_i^{clr}=1 \rightarrow V_i=V_i^{полн}+CLR$$

$$(V_i=V_i^{полн} \cdot \overline{CLR}+Q_i \cdot CLR=V_i^{полн} \cdot \overline{CLR}+1 \cdot CLR=V_i^{полн} \cdot \overline{CLR}+CLR+V_i^{полн} \cdot CLR=V_i^{полн}+CLR)$$

$$V_i^{clr}=0 \rightarrow V_i=V_i^{полн} \cdot \overline{CLR}$$



$Q_n$	V	D	$Q_{n+1}$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	1	0	0
1	0	1	1

# Неполные двоично-кодированные счетчики.

## Методы синтеза

### 3 Исключение лишних состояний

Модификация функции сброса

$$CLR = f(Q \geq m_N) = \overline{f(Q < m_N)}$$

### 4 Исключение части лишних состояний

Модификация функции сброса

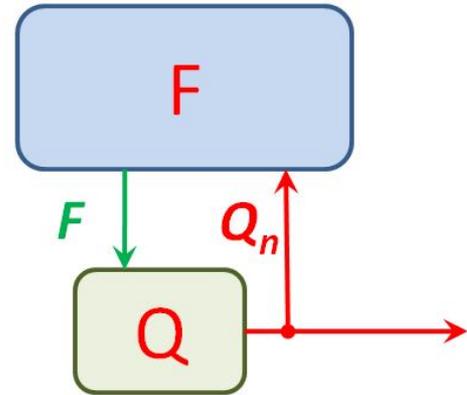
Упрощение CLR методом минимизации по к.Карно

**Пример:** суммирующий счетчик с  $K_{сч}=10$

$CLR^2 = Q_3 \cdot Q_2 \cdot Q_1 \cdot Q_0$  – все X в к.Карно заменить нулем

$CLR^3 = Q_3 \cdot (Q_2 + Q_1 + Q_0)$  – все X в к.Карно заменить единицей

$CLR^4 = Q_3 \cdot Q_0$  – МДНФ, только выделенные X заменить единицей



$Q_3Q_2 \backslash Q_1Q_0$	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	0	0
11	X	X	X	X
10	0	1	X	X



Возможны ли «зависания» автомата при попадании в «лишние» состояния?

# Неполные двоично-кодированные счетчики. Методы синтеза

## 5 Прямой синтез функций возбуждения

а – Минимизация по картам Карно (Вейча)

Пример: суммирующий счетчик с Ксч

б – Анализ алгоритма работы автомата

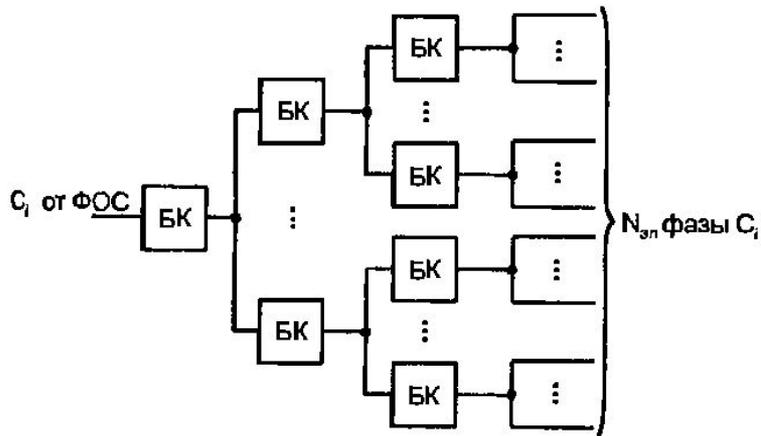
Пример:  $D_n = (Q_n + 1) \cdot CLR$

в – Другие методы

$Q_n$	$Q_n$	$D3$	$V2$	$R1 S1$	$K0 J0$	$Q_{n+1}$
0	0000	0	0	X 0	X 1	0001
1	0001	0	0	0 1	1 X	0010
2	0010	0	0	0 X	X 1	0011
3	0011	0	1	1 0	1 X	0100
4	0100	0	0	X 0	X 1	0101
5	0101	0	0	0 1	1 X	0110
6	0110	0	0	0 X	X 1	0111
7	0111	0	1	1 0	1 X	1000
8	1000	1	0	X 0	X 1	1001
9	1001	1	0	0 1	1 X	0000
-	больше 9	X	X	X X	X X	XXXX

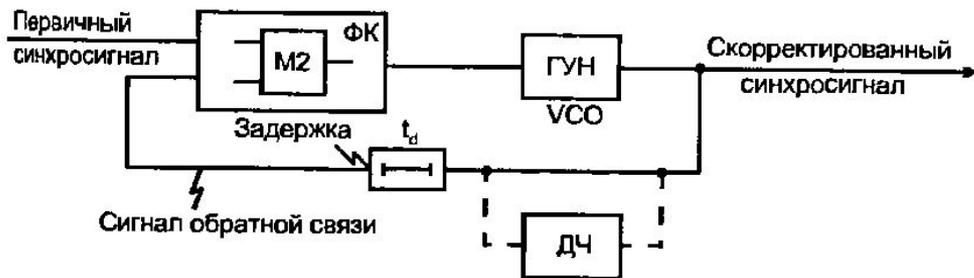


Возможны ли «зависания» автомата при попадании в «лишние» состояния?



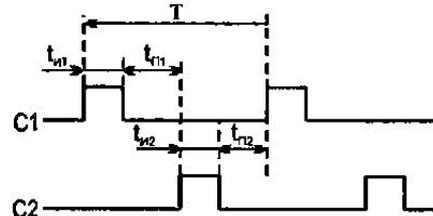
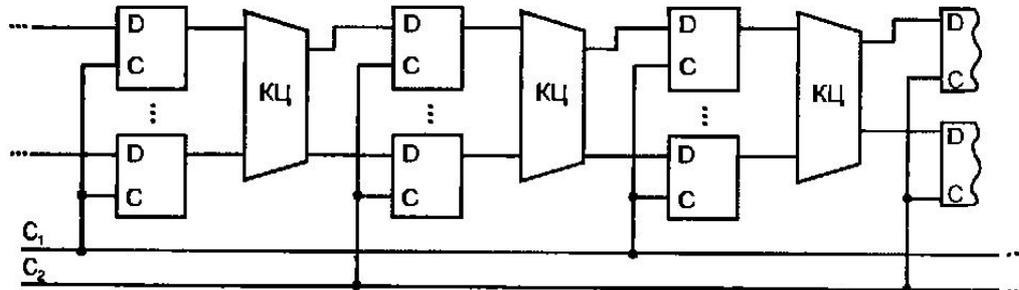
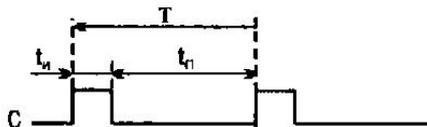
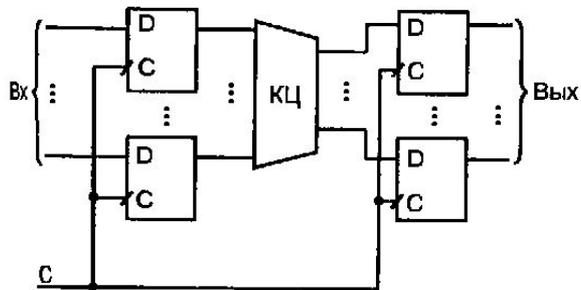
Простое размножение тактового сигнала:

- **простая схема с промежуточной регенерацией формы тактового сигнала**
- **накопление рассинхронизации на неоднородностях элементов и разностях физических длин проводников**



ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты:

- **автокоррекция периода синхросигнала**
- **аналоговая схема → постоянное потребление**



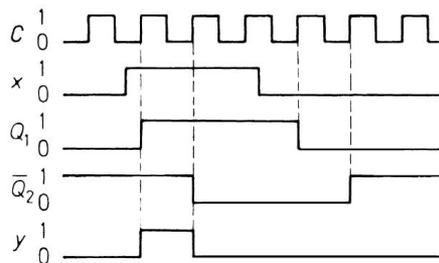
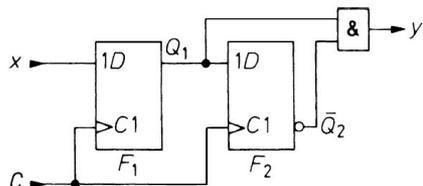
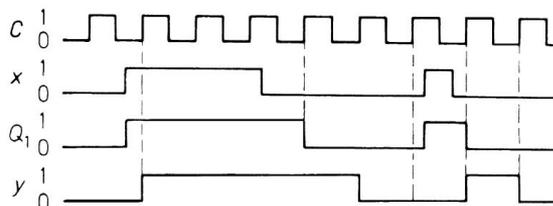
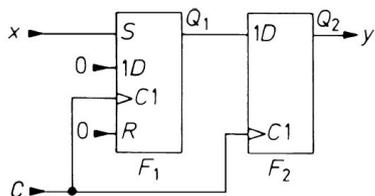
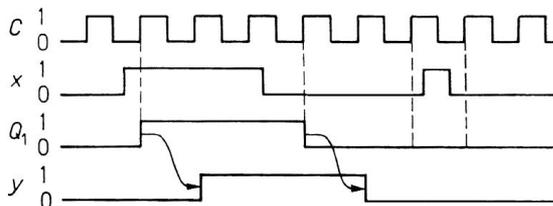
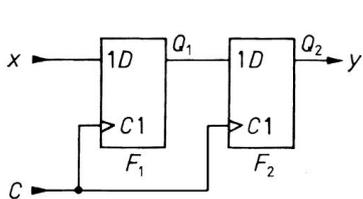
## Однофазная:

- строго динамические триггеры
- строгие интервалы между фазами ЦОС

## Двухфазная (многофазная):

- могут использоваться триггеры-защелки
- можно варьировать интервалы между фазами ЦОС
- необходимо формирование системы

Почему ограничен выбор триггеров и сигналов



## Синхронизация информационных сигналов

- Подавление метастабильных состояний добавочным триггером
- Подавление коротких импульсов данных
- Нормирование длины импульсов

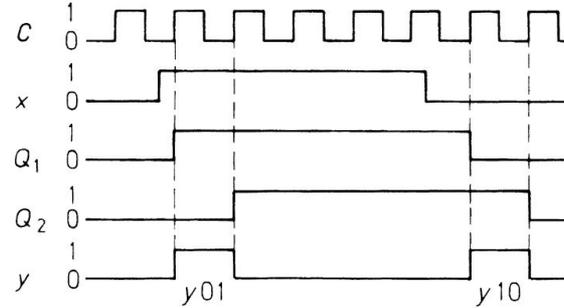
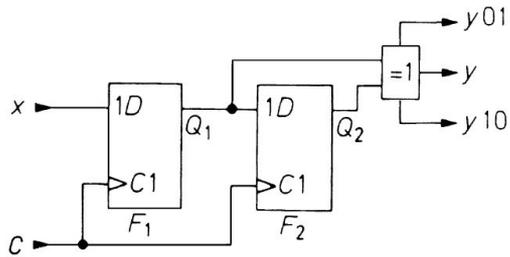
## Синхронизация информационных сигналов

- Подавление метастабильных состояний добавочным триггером
- Расширение коротких импульсов данных
- Нормирование длины импульсов

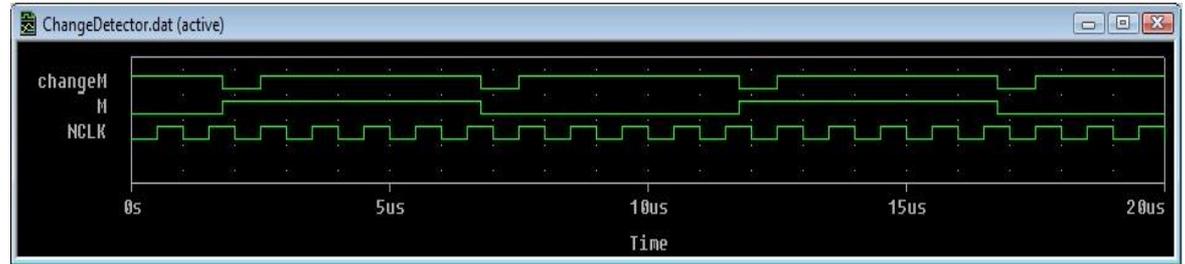
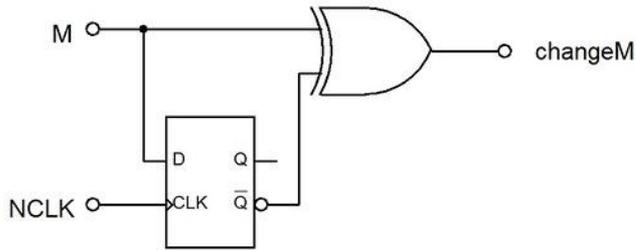
## Вариант схемы одновибратора

- Формирование одиночного импульса стандартной длины в ответ на импульс данных неопределенной длины

## Детектор переключения сигнала



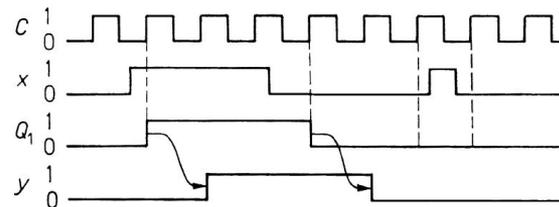
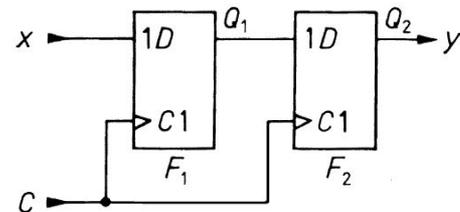
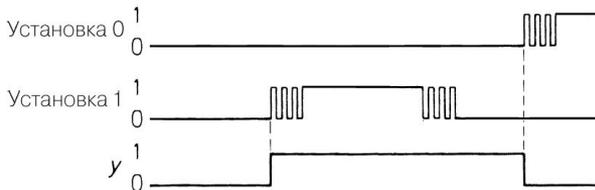
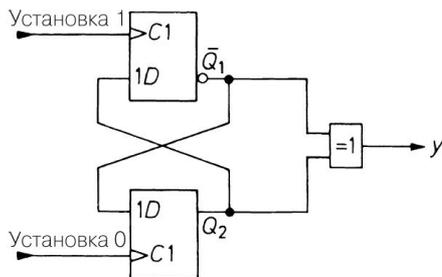
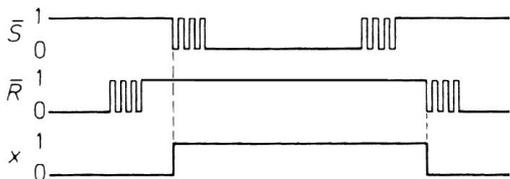
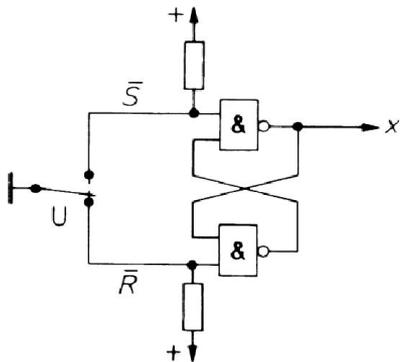
$y_{01}$  – переключение  $X$  из 0 в 1  
 $y_{10}$  – переключение  $X$  из 1 в 0  
 $Y$  – любое переключение  $X$



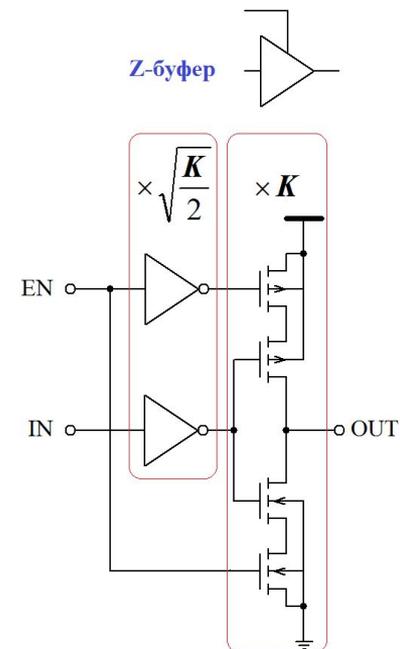
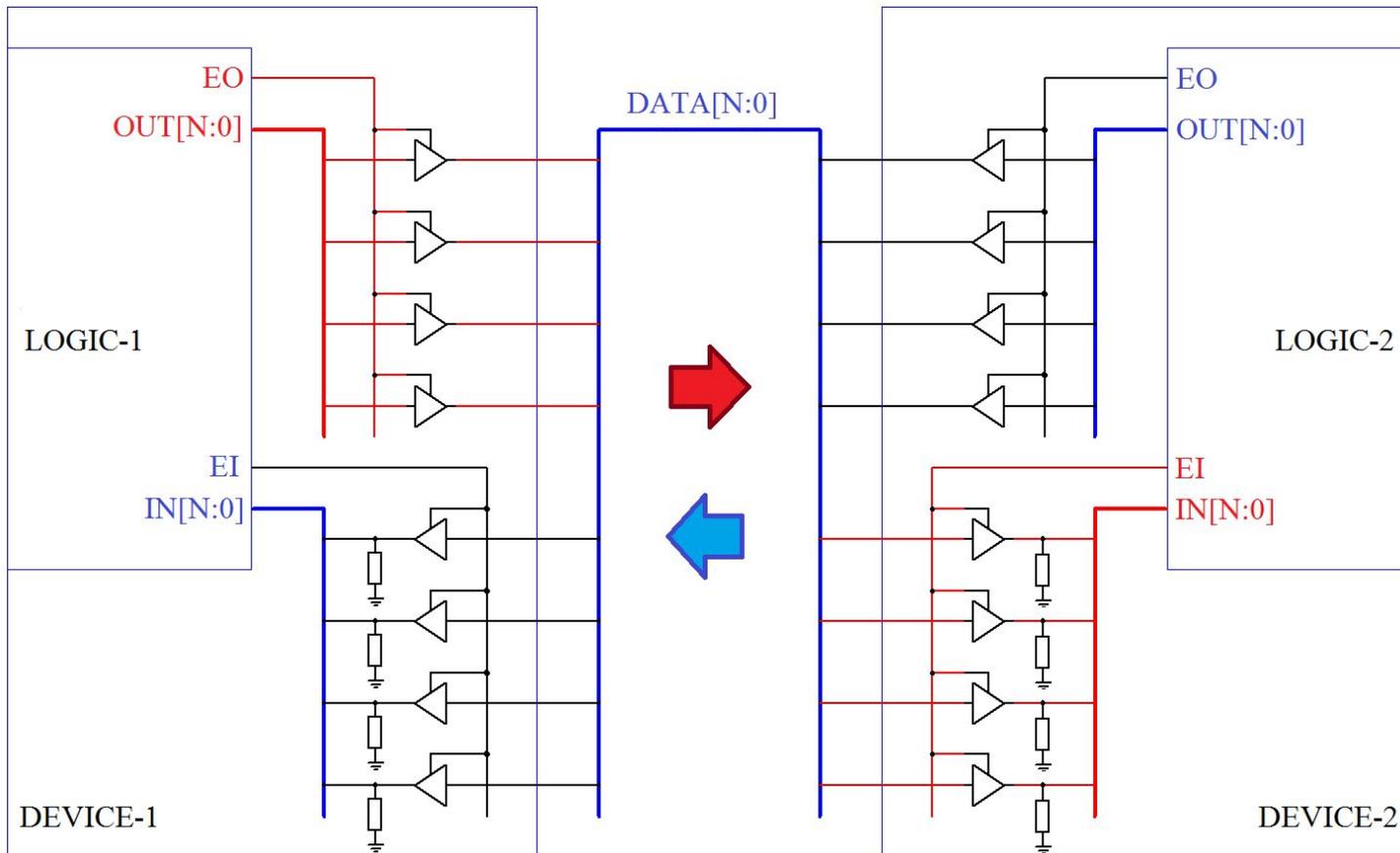
 **Применение: Асинхронный сброс(установка) при переключении режима автомата**

# Некоторые специальные применения триггеров

## Устранение дребезга контактов механических переключателей



# Двухнаправленный обмен данными. Общие шины



# Двухнаправленный обмен данными. Общие шины

