

# Триггерные устройства

Знакомство со средой САПР БИС «Ковчег 3.04».....	1
Комбинационные схемы .....	2
<b>3</b> Триггерные устройства .....	<b>3</b>
Параллельные регистры .....	4
Делители частоты.....	5
Синхронные счётчики.....	6
Асинхронные счётчики.....	7
Пересчётные устройства.....	8

## Лабораторная работа 3: Триггерные устройства

3.1. Теоретические сведения .....	3-2
3.1.1. Определения и основные понятия.....	3-2
3.1.2. Общие положения .....	3-4
3.1.3. Классификация триггеров по функциональному назначению .....	3-4
3.1.4. Способы задания закона функционирования триггера.....	3-9
3.1.5. Асинхронные триггеры .....	3-9
3.1.6. Синхронные триггеры .....	3-39
3.2. Лабораторное задание .....	3-66
3.2.1. Пример индивидуального задания .....	3-66
3.2.2. Порядок выполнения работы на примере выполнения индивидуального задания .....	3-66
3.3. Перечень индивидуальных заданий .....	3-79

**Цель работы:** изучить типы триггерных устройств, овладеть навыками логического проектирования элементарных последовательностных автоматов на примере триггерных устройств, получить навыки работы с САПР БИС «Ковчег 3.04».

## 3.1. Теоретические сведения

### 3.1.1. Определения и основные понятия

**Триггером** называется простейшее последовательностное устройство (конечный автомат, схема с памятью), способное сохранять один бит информации и изменять его под воздействием входных сигналов.

**Триггерным устройством** называется триггер, закон функционирования которого отличается от законов стандартных (типовых) схем триггеров. Далее будет использоваться только термин «триггер».

Триггеры широко применяются при построении различных узлов цифровой радиоэлектронной аппаратуры: регистров, счётчиков, пересчётных устройств, накапливающих сумматоров, распределителей импульсов, устройств синхронизации и т.п. Впервые триггер под названием «катодное реле» описал в 1918 г. М.А. Бонч-Бруевич, а в 1919 г. У.Г. Икклз и Д.У. Джордан опубликовали практическую схему на электронных лампах. Сейчас разработаны и используются различные типы триггеров, изготавливаемых в виде дискретных микросхем малой степени интеграции, в составе схем средней, большой и сверхбольшой степени интеграции, в качестве библиотечных элементов при проектировании устройств на БМК и ПЛИС.

Инженер, работающий в области вычислительной техники, обязан знать методы проектирования как самих триггеров, так и различных схем на их основе. Так как все цифровые устройства работают в дискретном (машинном) времени, изменяя свои рабочие состояния под воздействием активных сигналов, остановимся сначала на этих основных понятиях.

**Состоянием** любого цифрового устройства называется совокупность конкретных значений выходов всех элементов памяти, входящих в состав этого устройства.

**Активным сигналом** называется сигнал, который обеспечивает выполнение необходимой микрооперации, например обнуление счётчика, запись в регистр входных данных, выполнение арифметической операции и т.п. В цифровых устройствах активными сигналами могут быть: уровень логического нуля — 0, уровень логической единицы — 1, переход  $0 \rightarrow 1$ , который в дальнейшем кратко будем писать как 01 и переход  $1 \rightarrow 0$ , записываемый как 10.

Понятие о **дискретном (машинном) времени** проиллюстрировано на рис. 3.1.

Предположим, что в цифровом устройстве используется однофазная система синхронизации. На рис. 3.1  $C$  (*clock* — часы, синхронизация) — выход системного тактового генератора, причём активным сигналом является переход 01 (фронт), на рис. 3.1 все активные сигналы помечены стрелками на переходах 01, которые совершаются в дискретные моменты времени  $t_0, t_1, t_2$  и т.д.,  $x$  — произвольная логическая переменная в какой-либо точке цифрового устройства, изменяющаяся под действием активного сигнала  $C$ . Интервал времени от момента  $t_0$ , включая

его, до момента  $t_1$ , не включая его, называется **временем состояния**  $t_0$  переменной  $x$ . Аналогично интервал времени от  $t_1$  до  $t_2$  называется временем состояния  $t_1$  переменной  $x$  и т.д.

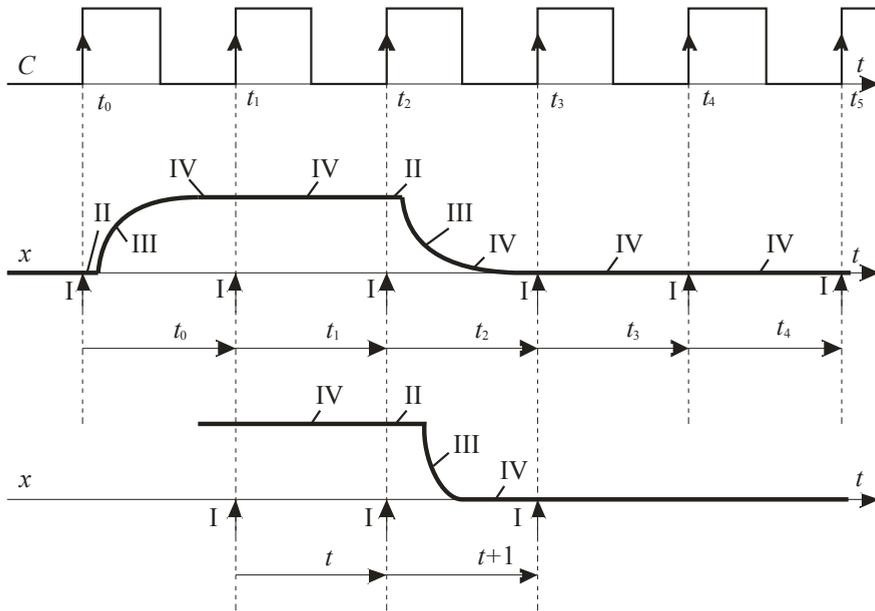


Рис. 3.1. Понятие о дискретном (машинном) времени

В общем случае время состояния включает в себя следующие составляющие:

I — факт возможности изменения переменной (он всегда соответствует моменту появления активного сигнала системного генератора), в рассматриваемом случае переходу 01 сигнала  $C$ ;

II — задержка переключения сигнала, в некоторых случаях эта составляющая отсутствует;

III — переходный процесс, который имеет место всегда, когда происходит смена состояния переменной  $x$ ;

IV — время стабильного состояния переменной  $x$ . В правильно спроектированной цифровой аппаратуре эта составляющая обязательно должна присутствовать. Другими словами, время состояния не должно изменяться в течение переходного процесса.

Из рис. 3.1 следует, что во времени состояния  $t_1$  отсутствуют составляющие II и III, так как переменная  $x$  не изменяется, сохраняя значение  $x = 1$ . Аналогично нет составляющих II и III во временах состояния  $t_3$  и  $t_4$ , так как переменная  $x$  не изменяется, сохраняя значение  $x = 0$ .

Нет необходимости анализировать поведение цифрового узла во всех временах состояния  $t_0, t_1, t_2; \dots$  Принято одно из времён состояния обозначать как время текущего состояния  $t$  (иногда его называют состоянием до переключения), тогда вслед за ним идёт время следующего состояния  $t + 1$  (иногда его называют состоянием после переключения) (см. рис. 3.1). Введение состояний  $t$  и  $t + 1$  позволяет легко описывать поведение во времени цифрового устройства аналитически.

### 3.1.2. Общие положения

Триггер как простейшее последовательностное устройство должен удовлетворять требованиям следующих общих положений.

1. Триггер имеет один выход и, следовательно, *два состояния выхода*.

2. В большинстве случаев выход представляется в парафазном виде:  $Q$  и  $\bar{Q}$ . Инверсный выход  $\bar{Q}$  является вспомогательным и служит лишь для упрощения построения различных схем, использующих выходной сигнал триггера.

3. Состояние триггера определяется прямым выходом  $Q$ . Говорят, что триггер находится в нулевом состоянии, если  $Q = 0$ , а  $\bar{Q} = 1$ ; триггер находится в единичном состоянии, если  $Q = 1$ , а  $\bar{Q} = 0$ .

*Примечание.* В некоторых технических реализациях цифровых устройств целесообразно за прямой выход принять выход  $\bar{Q}$ , а за инверсный —  $Q$ , причём этот факт должен быть чётко отражён в технической документации.

4. Триггер должен быть устойчивым устройством. В общем случае любое последовательностное устройство или конечный автомат, в том числе и триггер, будет устойчивым, если для всех разрешенных наборов входных потенциальных сигналов обеспечивается ситуация  $Q^{t+1} = Q^t$ . Если на каких-то неизменяющихся наборах возникает ситуация  $Q^{t+1} = \bar{Q}^t$ , то триггер вырождается в генератор, а это уже устройство совершенно другого класса.

5. Триггер должен обладать полной системой переходов выхода, т.е. *необходимость обеспечивать все возможные переходы выхода*  $Q$ :  $Q^t \rightarrow Q^{t+1}$ , а именно  $0 \rightarrow 0$ ,  $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 0$  и  $1 \rightarrow 1$  (кратко 00, 01, 10 и 11). Здесь  $Q^t$  — состояние выхода триггера в текущем машинном времени (состояние до переключения триггера);  $Q^{t+1}$  — состояние выхода триггера в следующем машинном времени (состояние после переключения триггера). Все четыре перехода выхода триггера нужно рассматривать как переключения. Полнота переходов выхода триггера обеспечивается тем, что любому переходу выхода триггера должен соответствовать хотя бы один переход между разрешёнными потенциальными наборами его входных сигналов.

### 3.1.3. Классификация триггеров по функциональному назначению

Функциональное назначение триггеров является его основным классификационным признаком. Оно может быть легко выявлено из представления триггера в качестве операционного устройства (рис. 3.2).

На рис. 3.2 обозначено:  $Q$  и  $\bar{Q}$  — парафазное представление выхода триггера,



$D$  — однобитовые внешние входные данные (*data*), которые могут быть записаны в триггер для хранения или последующей обработки. Вход  $D$  присутствует только у одного типа триггера ( $D$ -триггер).

Код микрооперации — двоичный код, определяющий, какую микрооперацию выполняет в данный момент времени триггер.  $D$ -вход принято называть *инфор-*

Рис. 3.2. Триггер как операционное устройство

*мационным входом триггера*, а разряды двоичного кода микрооперации — *функциональными входами*.

Рассмотрим микрооперации, которые может выполнять триггер.

1. Переходы выхода  $Q^t \rightarrow Q^{t+1} 00$  и  $11$  можно интерпретировать как микрооперацию «Режим хранения». Очевидно, что эту микрооперацию должен обеспечивать триггер любого типа, так как именно она делает его простейшим элементом памяти (запоминающей ячейкой). Аналитически эту микрооперацию можно представлять в следующем виде:  $Q^{t+1} = Q^t$ .

2. Переходы выхода  $Q^t \rightarrow Q^{t+1} 00$  и  $10$  можно интерпретировать как микрооперацию «Установка триггера в нулевое состояние» (сброс триггера). Переход  $00$  надо понимать так: триггер находился в нулевом состоянии и мы устанавливаем его в это же состояние, а переход  $10$  — так: триггер находился в единичном состоянии и мы устанавливаем его в нулевое состояние. Аналитически эту операцию можно представить в виде  $Q^{t+1} = 0$ .

3. Переходы выхода  $Q^t \rightarrow Q^{t+1} 11$  и  $01$  можно интерпретировать как микрооперацию «Установка триггера в единичное состояние» (установка триггера). Переход  $11$  надо понимать так: триггер находился в единичном состоянии и мы устанавливаем его в это же состояние, а переход  $01$  — так: триггер находился в нулевом состоянии и мы устанавливаем его в единичное состояние. Аналитически эту микрооперацию можно представить в виде  $Q^{t+1} = 1$ .

4. Переходы выхода  $Q^t \rightarrow Q^{t+1} 01$  и  $10$  можно интерпретировать как микрооперацию «Смена (изменение) состояния выхода триггера на противоположное (инверсное)». Аналитически эту микрооперацию можно представить в виде  $Q^{t+1} = \bar{Q}^t$ .

5. Переходы выхода  $Q^t \rightarrow Q^{t+1} 00, 10$  и  $11, 01$  можно интерпретировать как микрооперацию «Приём (запись в триггер) внешних однобитовых данных  $D$ », причём переходы  $00$  и  $10$  соответствуют записи в триггер  $D = 0$ , а переходы  $11$  и  $01$  — записи в триггер  $D = 1$ . Аналитически эту микрооперацию можно представить в виде  $Q^{t+1} = D^t$ .

Никаких других микроопераций триггер не может выполнять, в частности запись  $Q^{t+1} = \times$  (где  $\times$  — безразличное состояние выхода) нельзя рассматривать самостоятельной микрооперацией, так как эта запись подразумевает либо вторую, либо третью из рассмотренных выше микроопераций, а уравнение  $Q^{t+1} = D^t$  является просто разновидностью пятой микрооперации (запись в триггер обратного кода входных данных).

Полноту переходов выхода триггера можно обеспечить различной совокупностью (не обязательно минимальной) нескольких микроопераций из перечисленных выше пяти (табл. 3.1).

Из табл. 3.1 следует, что для реализации триггера, обладающего полной переходов его выхода, требуется выполнить либо две микрооперации (варианты  $b$  и  $c$ ), либо три (варианты  $a, e, f, h$ ), либо четыре (варианты  $d$  и  $g$ ), либо все пять (вариант  $k$ ). Разумеется, в таблице отражены не все возможные варианты совокупностей микроопераций.

Отметим, что варианты  $a, b$  и  $c$  являются минимальными (т.е. в них нельзя убрать какую-либо микрооперацию). Все остальные наборы не являются минимальными. Так, в наборе  $e$  можно убрать микрооперацию  $Q^{t+1} = 0$ . У вариантов  $b$  и  $c$  код микрооперации будет одноразрядным. Для варианта  $b$  этот вход кода микрооперации называют *тактовым входом* ( $C$  — *clock* — часы, синхронизация),

причём, когда на тактовом входе действует активный сигнал, данные с информационного входа  $D$  записываются в триггер, а когда на тактовом входе действует неактивный сигнал, триггер сохраняет своё предыдущее состояние. Триггер такого типа называют  **$D$ -триггером** ( $D$  — data — данные,  $D$  — drive — передача,  $D$  — delay — задержка). Итак,  $D$ -триггер может использоваться для приёма и хранения внешних данных либо для задержки данных на один такт. Последнее надо понимать следующим образом: данные, записанные в  $D$ -триггер в текущем такте  $t$ , могут быть считаны с выхода  $D$ -триггера в следующем такте  $t + 1$ .

**Таблица 3.1.** Совокупность микроопераций, обеспечивающая полноту переходов выхода триггера

Вариант набора, обеспечивающий полноту переходов выхода	Выполняемая микрооперация				
	1	2	3	4	5
	$Q^{n+1} = Q^n$	$Q^{n+1} = 0$	$Q^{n+1} = 1$	$Q^{n+1} = \bar{Q}^n$	$Q^{n+1} = D^n$
$a$	+	+	+		
$b$	+				+
$c$	+			+	
$d$	+	+	+	+	
$e$	+	+		+	
$f$	+		+	+	
$g$	+	+	+	+	
$h$	+	+			+
...	...				
$k$	+	+	+	+	+

Для варианта  $c$  однобитовый вход кода микрооперации называют **счётным входом  $T$**  ( $T$  — toggle — изменять состояние на противоположное), а триггер называют  **$T$ -триггером**, или **счётным**. При каждом активном сигнале на входе  $T$  такой триггер изменяет состояние выхода на противоположное, а при неактивном сигнале сохраняет своё предыдущее состояние.

У варианта  $a$  код микрооперации должен быть двухразрядным. Это следует из того, что  $n$ -разрядным двоичным кодом можно задать  $2^n$  различных микроопераций, выполняемых операционным устройством. Так же, как и для  $D$ - и  $T$ -триггеров, придадим двум разрядам кода микрооперации смысловое значение. Назовём один из разрядов входом установки триггера в нулевое состояние  $R$  (reset — сброс), а другой — входом установки триггера в единичное состояние

$S$  (set — установка), тогда микрооперации, отмеченные в табл. 3.1 для варианта  $a$ , будут выполняться для следующих значений входов  $R$  и  $S$ :

$Q^{t+1} = Q^t$  — оба входа  $R$  и  $S$  являются неактивными;

$Q^{t+1} = 0$  —  $R$ -вход активный, а  $S$ -вход неактивный;

$Q^{t+1} = 1$  —  $R$ -вход неактивный, а  $S$ -вход активный.

Теперь возникает вопрос: какую микрооперацию может выполнять триггер при действии на обоих входах двух активных сигналов? Ведь двухразрядный код микрооперации гарантирует возможность выполнения четырёх микроопераций, в то время как для обеспечения полноты переходов выхода варианта  $a$  достаточно трёх микроопераций. Возможны следующие варианты.

1.  $Q^{t+1} = \times$ , где  $\times$  — безразличное состояние выхода (либо 0, либо 1). Это следует из противоречия: нельзя триггер одновременно установить и в 0, и в 1, т.е. в данном случае набор  $R$ -вход — активный и  $S$ -вход — активный должен рассматриваться как запрещённый. Более строгое обоснование понятия «запрещённый» входной набор будет дано позже, после анализа конкретных схем триггеров. Триггер такого типа называется **RS-триггером**.

2.  $Q^{t+1} = 0$ . Триггер такого типа называют **R-триггером**, он устанавливается в нулевое состояние при двух наборах входных сигналов:  $R$ -вход — активный,  $S$ -вход — неактивный и  $R$ -вход — активный,  $S$ -вход — активный или, что то же самое,  $R$ -вход — активный, а значение сигнала на  $S$ -входе безразлично.

3.  $Q^{t+1} = 1$ . Триггер такого типа называют **S-триггером**, он устанавливается в единичное состояние при двух наборах входных сигналов:  $R$ -вход — неактивный,  $S$ -вход — активный и  $R$ -вход — активный,  $S$ -вход — активный или, что то же самое,  $S$ -вход — активный, а значение сигнала на  $R$ -входе безразлично.

4.  $Q^{t+1} = Q^t$ . Триггер такого типа называют **E-триггером** ( $E$  — exclusive — исключительный), он сохраняет свое предыдущее состояние при двух входных наборах входных сигналов:  $R$ -вход и  $S$ -вход одновременно либо неактивные, либо активные.

5.  $Q^{t+1} = \bar{Q}^t$ . Триггер такого типа называют **JK-триггером** (см. набор  $d$  в (табл. 3.1)). Вход  $J$  (*Jerk* — внезапное включение) эквивалентен входу  $S$ , а вход  $K$  (*kill* — внезапное отключение) эквивалентен входу  $R$ .

Для обозначения функциональных входов  $R$ -триггера будем использовать символы  $R_R$  и  $R_S$ , в которых большая буква соответствует типу триггера, а индекс говорит о функциональном назначении входа. (Возможен вариант  $R_R$  и  $S_R$ , где большая буква — функциональное назначение входа, а индекс — тип триггера.) Аналогично для  $S$ -триггера обозначим входы  $S_R$ ,  $S_S$  (либо  $R_S$ ,  $S_S$ ), для  $E$ -триггера —  $E_R$ ,  $E_S$  (либо  $R_E$ ,  $S_E$ ). В дальнейшем будем использовать обозначения:  $(R_R; R_S)$ ;  $(S_R; S_S)$ ;  $(E_R; E_S)$ .

Рассмотрим, как можно интерпретировать другие наборы микроопераций в табл.3.1. Набор  $e$  можно отнести к счётному триггеру, снабжённому **вспомогательным входом R «Установка в 0»**. Активный сигнал  $R$  будет устанавливать триггер в нулевое состояние независимо от сигнала на входе  $T$ . Набор  $f$  можно отнести к счётному триггеру, снабжённому **вспомогательным входом S «Установка в 1»**. Активный сигнал  $S$  будет устанавливать триггер в состояние 1 независимо от сигнала на входе  $T$ . Набор  $g$ , совпадающий с набором  $d$ , можно отнести к счётному триггеру, снабжённому двумя вспомогательными входами  $R$  и  $S$ . Набор  $h$  можно отнести к  $D$ -триггеру, снабжённому вспомогательным входом  $R$  и т.д. Набор  $k$  включает

в себя все пять микроопераций. Такой триггер, как операционное устройство, должен иметь трёхразрядный код микроопераций и информационный вход  $D$ . Однако реализовывать его как специальный тип триггера нет смысла (он и не реализован), так как *любое триггерное устройство, работающее по произвольному закону*, можно построить на базовых триггерах, к которым относят  $RS$ -,  $D$ -,  $T$ - и  $JK$ -триггеры.

Упомянутые выше *вспомогательные входы  $R$  и  $S$*  позволяют за один такт обнулить или установить в состояние 1 *все разряды сразу* многоразрядных регистровых структур (регистров, счётчиков, пересчётных устройств, накапливающих сумматоров и др.). Кроме вспомогательных входов  $R$  и  $S$  часто применяется вход  $V$  (*valve* — вентиль, клапан), разрешающий или запрещающий приём или прохождение сигналов  $D$ ,  $T$  и др. Существуют  $JK$ -триггеры, у которых сигналы  $J$  и  $K$  реализуются как конъюнкции трёх сигналов:  $J = J_1 J_2 J_3$  и  $K = K_1 K_2 K_3$ .

Подчеркнём ещё один важный момент. Рассматривая двухвходовый триггер как операционное устройство (например  $RS$ -триггер), можно в общем случае реализовать 24 различных схемы для одного из двух базисов (И-НЕ; ИЛИ-НЕ). Обосновывается это следующим образом. Первую (из четырёх) микрооперацию (неважно какую) можно закодировать любым из четырёх наборов входных сигналов  $RS$ , вторую микрооперацию — любым из оставшихся трёх наборов, третью микрооперацию — любым из оставшихся двух наборов и четвертую микрооперацию — четвертым набором, т.е. всего получается  $4! = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 24$  варианта схем. Выполнив процедуры структурного синтеза всех этих схем (здесь они полностью не рассматриваются), можно получить две схемы, построенные на двух вентилях (под вентилем будем понимать двухвходовый базисный элемент И-НЕ либо ИЛИ-НЕ), четыре схемы, выполненные на двух вентилях и одном инверторе, две схемы, построенные на двух вентилях и двух инверторах, четыре схемы, выполненные на трёх вентилях, восемь схем, построенных на трёх вентилях и одном инверторе, четыре схемы, выполненные на трёх вентилях и двух инверторах. Все эти 24 схемы будут устойчивыми и обеспечат полную систему переходов выходов триггера, однако среди них минимальная структура — это схема, выполненная на двух вентилях. Именно эту схему и называют *элементарной запоминающей ячейкой* и широко используют для построения всех типовых триггеров. Структуру такой ячейки получим ниже.

Другим по важности классификационным признаком является *способ воздействия функциональных входов триггера на состояние его выхода*. Если состояние выхода триггера изменяется непосредственно с изменением его функциональных входов, то он называется *асинхронным* (несинхронизируемым, нетактируемым). Если состояние выхода триггера изменяется только при появлении активного сигнала на специальном входе, называемом тактовым, то он называется *синхронным* (синхронизируемым, тактируемым). Если активным сигналом тактового входа является потенциал (логический уровень), то говорят, что триггер работает под управлением *статической синхронизации*, а если активным сигналом является переход (01 или 10), то триггер работает под управлением *динамической синхронизации*. Функциональные входы оказывают влияние на состояние выхода триггера лишь в течение действия активного сигнала на тактовом входе.

### 3.1.4. Способы задания закона функционирования триггера

Закон функционирования триггера может быть сформулирован словесным описанием, так как это сделано в разделе «Общие положения», таблицей переходов, учитывающей временные изменения выхода триггера, характеристическими уравнениями или уравнениями следующего состояния, в виде графа переходов, диаграммами двоичного решения (ациклическими направленными графами), в форме микропрограммного автомата.

Характеристические уравнения представляются в двух видах. Во-первых, в виде уравнения, отражающего закон функционирования триггера, причём в качестве переменных в нем выступают активные сигналы (а ими могут быть и уровни, и переходы). Во-вторых, в виде уравнения, отражающего внутреннюю структуру триггера в заданном схемотехническом базисе, причём в качестве переменных в нем выступают все сигналы как потенциальные уровни. Характеристическое уравнение, отражающее закон функционирования *асинхронного триггера*, в общем виде записывается так:

$$Q^{t+1} = f(Q^t; X^{t+1}).$$

Видно, что следующее состояние триггера  $Q^{t+1}$  является функцией текущего состояния триггера  $Q^t$  и сигналов  $X^{t+1}$  на функциональных входах в следующее состояние времени.

Характеристическое уравнение, отражающее закон функционирования *синхронного триггера*, в общем виде можно записать как:

$$Q^{t+1} = f(Q^t; X^t; C^{t+1}).$$

Видно, что следующее состояние триггера  $Q^{t+1}$  является функцией текущего состояния триггера  $Q^t$ , сигналов на функциональных входах в текущем состоянии  $X^t$  и активного тактового входа  $C^{t+1}$  в следующем состоянии времени. Здесь важно подчеркнуть, что сигналы на функциональных входах и тактовом входе не могут изменяться одновременно. Сигналы на функциональных входах должны иметь установившиеся значения в момент действия активного тактового сигнала как минимум за время предустановки  $t_{\text{пред}}$  (рис. 3.3).

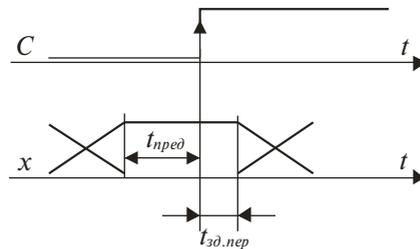


Рис. 3.3. Время предустановки и задержки переключения

### 3.1.5. Асинхронные триггеры

#### 3.1.5.1. RS-триггер

Определим структуру *RS*-триггера по следующим исходным данным: сигналы на *R*- и *S*-входах потенциальные; активным уровнем для обоих входов является уровень логической единицы, т.е. высокий потенциал для положительной логики, схема должна быть выполнена в базисе ИЛИ-НЕ. Закон функционирования зададим таблицей переходов (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Таблица переходов  $RS$ -триггера

Номер набора	$R^{t+1}$	$S^{t+1}$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$
0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	1	1	0
4	1	0	0	0	1
5	1	0	1	0	1
6	1	1	0	×	×
7	1	1	1	×	×

Пояснения к табл.3.2: в столбце «Номер набора» указаны десятичные цифры, эквивалентные как бы двоичным числам, соответствующим наборам логических переменных  $R^{t+1}$ ,  $S^{t+1}$ ,  $Q^{t+1}$ .  $Q^t$  и  $Q^{t+1}$  — прямой и инверсный выходы триггера в следующем состоянии. Набор  $R^{t+1}S^{t+1} = 00$  обеспечивает режим хранения, для которого  $Q^{t+1} = Q^t$ ; набор  $R^{t+1}S^{t+1} = 01$  обеспечивают установку триггера в 1, т.е.  $Q^{t+1} = 1$ ; набор  $R^{t+1}S^{t+1} = 10$  обеспечивает сброс триггера в 0, т.е.  $Q^{t+1} = 0$ , а набор  $R^{t+1}S^{t+1} = 11$  для  $RS$ -триггера является «запрещённым», поэтому значение выхода триггера на этом наборе нас не интересует, т.е. может быть безразличным (×).

Из табл. 3.2 видно, что на всех разрешённых наборах  $R^{t+1}S^{t+1}$  выполняется условие  $Q^{t+1} = Q^t$ , т.е.  $RS$ -триггер является устойчивым. Стрелки в столбце  $Q^{t+1}$  отражают переходный процесс при переключении триггера из неустойчивого состояния в устойчивое. Так как триггер устойчив, то его структурная схема будет определяться характеристическим уравнением, общая форма которого в данном случае имеет вид

$$Q^{t+1} = f(Q^t; R^{t+1}; S^{t+1}).$$

Рассматривая  $Q^{t+1}$  и  $\bar{Q}^{t+1}$  как функции алгебры логики, зависящие от переменных  $R^{t+1}$ ,  $S^{t+1}$  и  $Q^t$ , представим их в виде карт Карно (рис. 3.4).

Из рис. 3.4, а следует:

$$Q^{t+1} = S^{t+1} + \bar{R}^{t+1}Q^t, \quad (3.1)$$

а из рис. 3.4, б —

$$\bar{Q}^{t+1} = R^{t+1} + \bar{S}^{t+1}\bar{Q}^t. \quad (3.2)$$

Наличие «запрещённого» набора входов  $R^{t+1}S^{t+1} = 11$  запишем в виде следующего требования:

$$R^{t+1}S^{t+1} = 0.$$

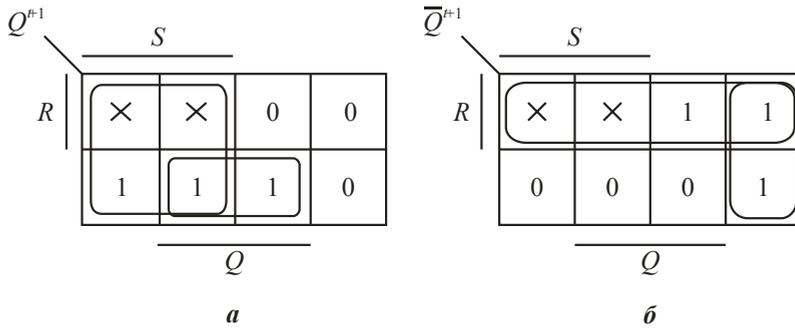


Рис. 3.4. Карты Карно для RS-триггера

Из уравнений (3.1) и (3.2) следует, что набор логических элементов И, ИЛИ, НЕ обеспечит построение структуры RS-триггера, но, так как в условии задано требование выполнения схемы в базисе ИЛИ-НЕ, преобразуем уравнения (3.1) и (3.2). Уравнение (3.1) запишем в следующем виде:

$$\overline{Q}^{t+1} = \overline{S^{t+1} + R^{t+1}Q^t} = \overline{S^{t+1}} \cdot \overline{R^{t+1} + Q^t}, \quad (3.3)$$

а уравнение (3.2) — в виде

$$\overline{Q}^{t+1} = \overline{R^{t+1} + \overline{S}^{t+1} \overline{Q}^t} = \overline{R^{t+1}} \cdot \overline{\overline{S}^{t+1} + \overline{Q}^t}. \quad (3.4)$$

Уравнения (3.3) и (3.4) отражают структуру RS-триггера в базисе ИЛИ-НЕ. Отметим также, что формально между целями  $Q^{t+1}$  и  $Q^t$  должна быть включена задержка для обеспечения устойчивого переключения, однако, учитывая, что сами элементы ИЛИ-НЕ обладают задержкой распространения сигнала, будем считать, что  $Q^{t+1}$  и  $Q^t$  — это одна и та же точка схемы в разные моменты времени. Тогда структуру RS-триггера можно представить в виде последовательного соединения двух элементов ИЛИ-НЕ, замкнутого само на себя (рис. 3.5, а).

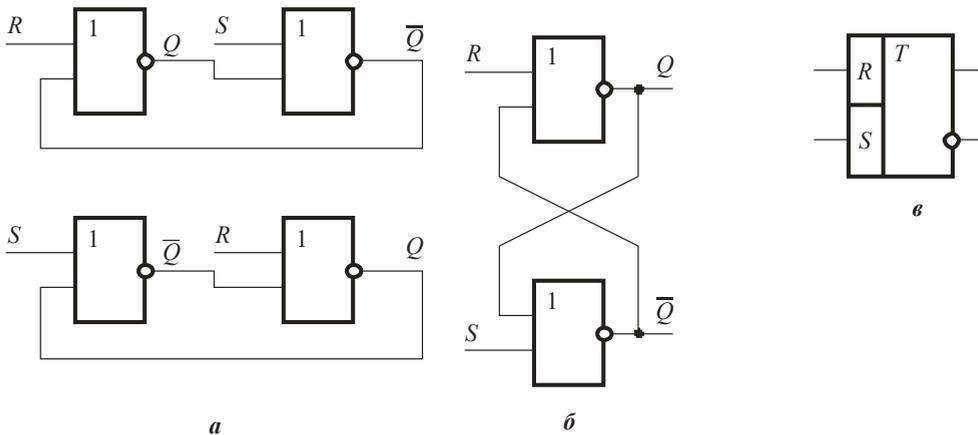


Рис. 3.5. Схема RS-триггера в базисе ИЛИ-НЕ (а, б) и его функциональное обозначение (в)

При  $R = S = 0$   $RS$ -триггер образует схему с положительной обратной связью или петлю, в состав которой (в общем случае) входит четное число инвертирующих элементов. Разорванная петля вырождается в комбинационную схему, для которой выполняются следующие условия: выходной сигнал равен входному; коэффициент передачи по напряжению от входа до выхода должен быть больше единицы (условие нормирования логических сигналов в цепочке инвертирующих логических элементов).

На рис. 3.5, б представлено общепринятое оформление схемы  $RS$ -триггера в базисе ИЛИ-НЕ, а на рис. 3.5, в — обозначение его как функционального узла с активными сигналами на входе «1». Одна буква  $T$  говорит о том, что в состав триггера входит одна элементарная ячейка.

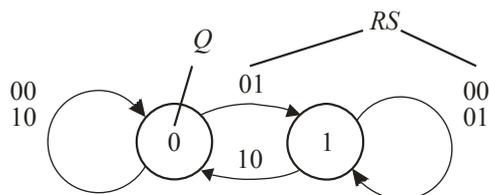


Рис. 3.6. Граф переходов  $RS$ -триггера (базис ИЛИ-НЕ)

На рис. 3.6 закон функционирования  $RS$ -триггера в базисе ИЛИ-НЕ представлен в виде графа переходов. Две вершины графа обозначают два состояния выхода  $Q$  триггера «0» и «1», а дуги графа (направленные ребра) — линиями, начинающимися у вершины и заканчивающимися у той же вершины (в этом случае дуга называется петлёй) или у другой. Дуги и петли характеризуют переходы выхода триггера, которые он совершает под воздействием сигналов  $R$  и  $S$ , причём рядом с дугой или петлёй записываются комбинации (наборы) входных сигналов. Отсутствие на графе переходов набора  $RS = 11$  говорит о том, что он является «запрещённым» набором.

Рассмотрим подробнее, почему этот набор называется «запрещённым». Во-первых, при подаче набора  $RS = 11$  в точках  $Q$  и  $\bar{Q}$  устанавливается одинаковый уровень «0» и триггер вырождается в два инвертора (нарушается парафазность представления выхода триггера). Во-вторых, поведение триггера при переходе от набора  $RS = 11$  к набору 00, т.е. при переходе в режим хранения, непредсказуемо. Это связано с тем, что логические элементы обязательно имеют разброс в величине задержки распространения сигналов (тем более что эти задержки зависят от внешних условий, от величины напряжения питания, от изменения нагрузки на логические элементы и т.д.), поэтому возможны два пути перехода от набора 11 к набору 00: первый путь 11–10–00 и второй путь 11–01–00. В первом случае триггер установится в нулевое состояние ( $Q = 0$ ;  $\bar{Q} = 1$ ), а во втором — в единичное состояние ( $Q = 1$ ;  $\bar{Q} = 0$ ). Во многих случаях такое неопределённое поведение недопустимо, поэтому такой набор и называется «запрещённым» в логико-математическом смысле, а не в схемотехническом.

Отметим, что табл. 3.2 можно представить и в более компактной форме (табл. 3.3), из которой следует  $Q^{t+1} = R^{t+1} \cdot S^{t+1} \cdot Q^t + R^{t+1} \cdot S^{t+1} + R^{t+1} \cdot S^{t+1}$ , если  $\times$  заменить на 1.

Таблица 3.3. Компактная таблица переходов RS-триггера

$R^{t+1}$	$S^{t+1}$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$
0	0	$Q^t$	$\bar{Q}^t$
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	$\times$	$\times$

После минимизации, используя правила склеивания и распределительный закон второго рода, получаем уравнение (3.1).

Аналогично можно записать  $\bar{Q}^{t+1} = \bar{R}^{t+1} \bar{S}^{t+1} \bar{Q}^t + R^{t+1} \bar{S}^{t+1} + R^{t+1} S^{t+1}$ , и после минимизации получаем уравнение (3.2).

Если выполнить все эти процедуры для RS-триггера в базисе И-НЕ с активными сигналами «0» на его входах, то получим аналогичные схемы (рис. 3.7).

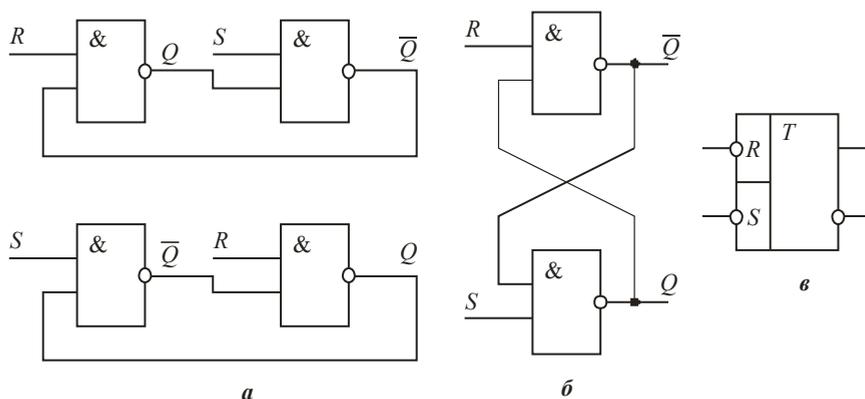


Рис. 3.7. Схемы RS-триггера в базисе И-НЕ (а, б) и его функциональное обозначение (в)

Эти же схемы можно получить, преобразовав уравнения (3.1) и (3.2) к базису И-НЕ. Проинвертировав дважды правые части уравнений (3.1) и (3.2) и применив правило де-Моргана, получаем

$$Q^{t+1} = S^{t+1} + \bar{R}^{t+1} Q^t = \bar{\bar{S}^{t+1}} \bar{\bar{R}^{t+1}} Q^t, \tag{3.5}$$

$$\overline{Q}^{t+1} = \overline{R^{t+1} + \overline{S^{t+1}} \overline{Q}^t} = \overline{R^{t+1}} \overline{\overline{S^{t+1}} \overline{Q}^t} \quad (3.6)$$

Инверсии у переменных  $R^{t+1}$  и  $S^{t+1}$  в уравнениях (3.5) и (3.6) говорят о том, что активными уровнями являются уровни «0», это отражено на рис. 3.7, в маленькими кружками у входов  $R$  и  $S$ .

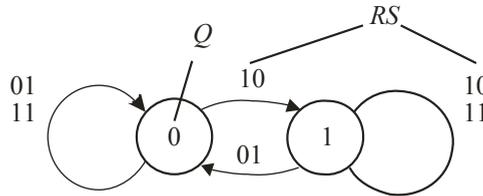


Рис. 3.8. Граф переходов RS-триггера (базис И-НЕ)

На рис. 3.8 представлен граф переходов RS-триггера в базисе И-НЕ. Отсутствие на графе набора  $RS = 00$  говорит о том, что этот набор является «запрещённым».

Таблицы переходов, графы переходов и характеристические уравнения позволяют определить состояние триггера  $Q^{t+1}$ , в которое он перейдёт в момент времени  $t + 1$ , если известны наборы входных сигналов и состояние триггера  $Q^t$  в текущем времени  $t$ .

При синтезе последовательностных схем, а именно более сложных триггеров, регистров, счётчиков, пересчётных устройств и т.п., требуется знать не только закон функционирования триггера, но и что надо подавать на входы триггера, чтобы он совершил *требуемый переход*. Эта информация представляется с помощью *характеристических таблиц*. Для RS-триггера в базисе ИЛИ-НЕ это табл. 3.4, а в базисе И-НЕ — табл. 3.5.

Таблица 3.4. Характеристическая таблица RS-триггера в базисе ИЛИ-НЕ

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	$t+1$	
	$R^*$	$S^*$
00	×	0
01	0	1
10	1	0
11	0	×
Базис ИЛИ-НЕ		

Таблица 3.5. Характеристическая таблица RS-триггера в базисе И-НЕ

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	$t+1$	
	$R^*$	$S^*$
00	×	1
01	1	0
10	0	1
11	1	×
Базис И-НЕ		

Входы  $R$  и  $S$  в табл. 3.4 и 3.5 обозначаются со звёздочкой, чтобы подчеркнуть, что это *функции возбуждения элементарной запоминающей ячейки*. Характеристические таблицы могут быть получены из таблиц переходов, характеристических уравнений или из графов переходов. Например, из табл. 3.2 видно, что переход  $Q^t \rightarrow Q^{t+1} 00$  присутствует на наборе  $R^{t+1}S^{t+1} = 00$  (режим хранения) и на наборе  $R^{t+1}S^{t+1} = 10$  (установка в 0). Отсюда следует, чтобы выход триггера совершил требуемый переход 00, безразлично, что подавать на вход  $R$  (символ  $\times$ ), а на вход  $S$  надо подать 0. Аналогично заполняются все строки в табл. 3.4 и табл. 3.5.

### 3.1.5.2. R-триггер

Задание на проектирование: пусть требуется синтезировать  $R$ -триггер в базе И-НЕ с активными входами  $R_R = 1$ ;  $R_S = 0$ . Обратите внимание, что активные входы триггеров заданы различными уровнями. Таблица переходов для такого триггера представлена как табл. 3.6.

**Таблица 3.6.** Таблица переходов  $R$ -триггера

Номер набора	$t+1$		$Q^t$	$Q^{t+1}$	$\bar{Q}^{t+1}$	$t+1$	
	$R_R$	$R_S$				$R^*$	$S^*$
0	0	0	0	1 ↘	0 ↘	1	0
1	0	0	1	1 ←	0 ←	1	×
2	0	1	0	0	1	×	1
3	0	1	1	1	0	1	×
4	1	0	0	0 ←	1 ←	×	1
5	1	0	1	0 ↘	1 ↘	0	1
6	1	1	0	0 ←	1 ←	×	1
7	1	1	1	0 ↘	1 ↘	0	1

Для удобства заполнения табл. 3.6 рекомендуется над столбцами  $R_R$  и  $R_S$  указать заданные активные уровни и в дальнейшем пользоваться термином «активный входной сигнал».

В строках с номером набора 0 и 1 (две верхние строки) набор входных сигналов  $R_R R_S = 00$ , причём  $R_R = 0$  не совпадает с заданным активным уровнем 1, следовательно, вход  $R_R$  будет неактивным, а  $R_S = 0$  совпадает с заданным активным уровнем 0, поэтому вход  $R_S$  будет активным, т.е. триггер установится в единицу и значение  $Q^{t+1}$  в двух верхних строках табл. 3.6 будет равно 1, а  $\bar{Q}^{t+1} = 0$ . Рассуждая аналогичным способом, заполняют столбцы  $Q^{t+1}$  и  $\bar{Q}^{t+1}$  во всех остальных строках.

Анализируя табл. 3.6, мы видим, что для всех разрешённых наборов  $R_R R_S$  выполняется условие  $Q^{t+1} = Q^t$ , а стрелками в столбце  $Q^{t+1}$  показаны процессы установления устойчивых состояний (переходные процессы при переключении выхода). Следовательно, характеристическое уравнение  $Q^{t+1} = f(R_R^{t+1}; R_S^{t+1}; Q^t)$  будет отражать структуру проектируемого триггера. Минимизируем функции  $Q^{t+1}$  и  $\bar{Q}^{t+1}$  с помощью карт Карно (рис. 3.9).

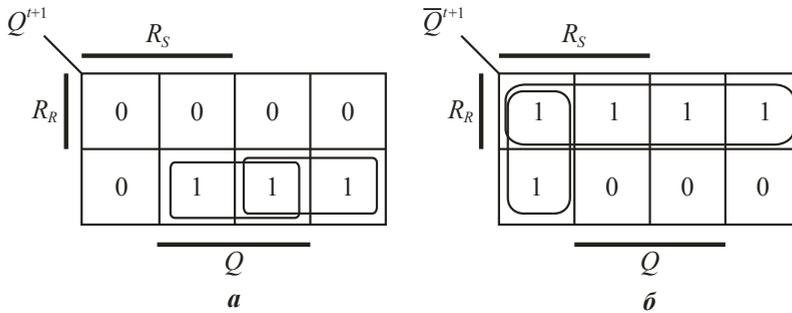


Рис. 3.9. Карты Карно для R-триггера

(Здесь и в дальнейшем будем опускать временные индексы у входных переменных  $R_R$ ;  $R_S$  и  $Q$ .) В результате получаем

$$Q^{t+1} = \bar{R}_R Q + \bar{R}_R \bar{R}_S; \tag{3.7}$$

$$\bar{Q}^{t+1} = R_R + R_S Q. \tag{3.8}$$

Преобразуем уравнение (3.7) в базис И-НЕ:

$$Q^{t+1} = \overline{\overline{\bar{R}_R Q} + \overline{\bar{R}_R \bar{R}_S}} = \overline{\overline{\bar{R}_R} Q + \overline{\bar{R}_R} \bar{R}_S}. \tag{3.9}$$

Отсюда следует, что для реализации данного триггера необходимо использовать три двухвходных элемента И-НЕ и два инвертора. Схема R-триггера приведена на рис. 3.10.

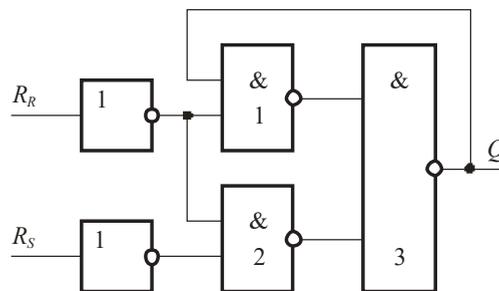


Рис. 3.10. Схема R-триггера, полученная по характеристическому уравнению

Из рис. 3.10 сразу не ясно, какая точка схемы будет соответствовать выходу  $\bar{Q}$ . Обратив внимание, что вентили 1 и 3 образуют петлю (замкнутую цепь из двух инвертирующих элементов с положительной обратной связью), преобразуем схему

к виду, показанному на рис. 3.11, из которого видно, что элементы 1 и 3 образуют  $RS$ -триггер в базе И-НЕ, следовательно, выходом  $\bar{Q}$  будет выход элемента 1.

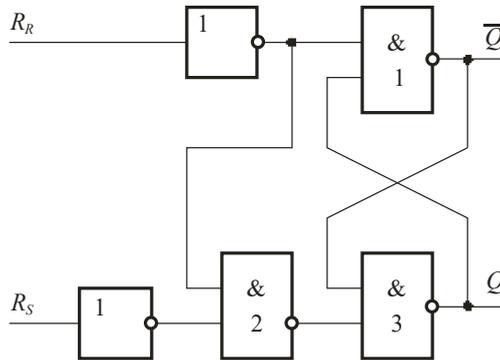


Рис. 3.11. Преобразованная схема  $R$ -триггера

Чтобы получить такую структуру из уравнения (3.8), последнее надо преобразовать следующим образом:

$$\overline{Q^{t+1}} = R_R + R_S \bar{Q} = \overline{\overline{(R_R + R_S)(R_R + \bar{Q})}} = \overline{\overline{R_R \bar{R}_S + R_R Q}} = \overline{\overline{R_R \bar{R}_S} \cdot \overline{\overline{R_R Q}}}$$

Откуда, инвертируя левую и правую части, получаем  $Q^{t+1} = \overline{\overline{R_R \bar{R}_S} \cdot \overline{\overline{R_R Q}}}$ , т.е. уравнение (3.9). Однако эти преобразования неочевидны, поэтому реализацию даже простой схемы, как в рассматриваемом случае, по характеристическому уравнению в настоящее время не используют. Вместо этого применяют так называемый **канонический метод синтеза**, суть которого для нашего примера отражена на рис. 3.12. При этом методе заранее выбирают элементарную запоминающую ячейку. В нашем случае это  $RS$ -триггер в базе И-НЕ. Комбинационной схемой (КС) формируем так функции возбуждения  $R^*$  и  $S^*$  выбранного  $RS$ -триггера, чтобы последний переключался от входных сигналов  $R_R$  и  $R_S$  по закону  $R$ -триггера. Этот метод даёт следующие преимущества: во-первых, сразу обеспечивается парафазное представление выхода  $R$ -триггера ( $Q$  и  $\bar{Q}$ ); во-вторых, синтез последовательностной схемы как единого целого заменяется синтезом комбинационной схемы, а эта задача решается очень просто.

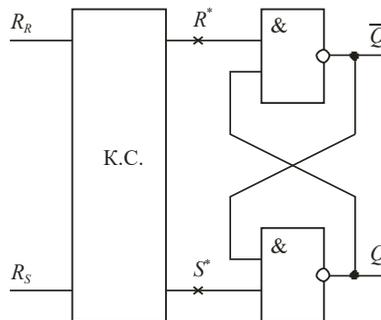


Рис. 3.12. Сущность канонического метода синтеза  $R$ -триггера

Теперь становится ясным назначение столбцов  $R^*$  и  $S^*$  в табл. 3.6. Рассматривая  $R^*$  и  $S^*$  как функции алгебры логики, зависящие от переменных  $R_R^{t+1}$ ,  $R_S^{t+1}$  и  $Q^t$ , минимизируем их, используя карты Карно (рис. 3.13). Столбцы  $R^*$  и  $S^*$  в табл. 3.6 заполняются с помощью характеристической таблицы (табл. 3.5).

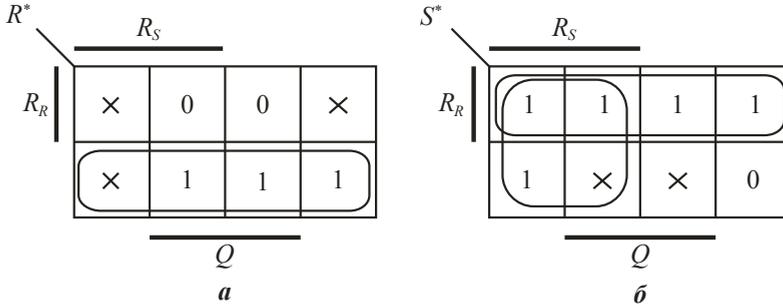


Рис. 3.13. Карты Карно для функции возбуждения R-триггера

Из рис. 3.13 следует:

$$R^* = \bar{R}_R; \tag{3.10}$$

$$S^* = R_R + R_S. \tag{3.11}$$

Представим выражение (3.11) в базисе И-НЕ:

$$S^* = \overline{\overline{R_R + R_S}} = \overline{\bar{R}_R \bar{R}_S}. \tag{3.12}$$

Уравнения (3.10) и (3.12) и основа схемы (рис. 3.12) полностью определяют структуру проектируемого R-триггера (рис. 3.14).

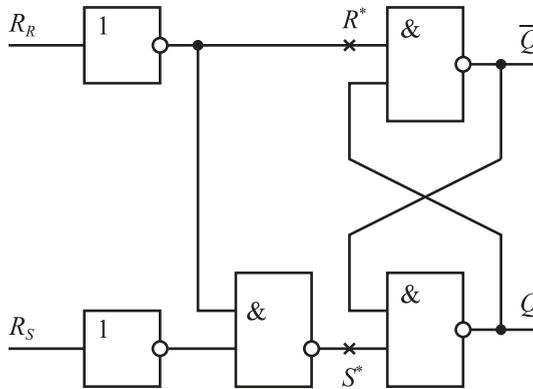


Рис. 3.14. Схема R-триггера

Сравните рис. 3.14 и рис. 3.11. Схемы полностью совпадают, но получена схема на рис. 3.14 крайне просто.

3.1.5.3. S-триггер

Пусть требуется разработать S-триггер в базе ИЛИ-НЕ с активными сигналами:  $S_R = 0$ ;  $S_S = 1$ . Закон функционирования данного триггера представим в виде таблицы табл. 3.7.

Таблица 3.7. Таблица переходов S-триггера

	0	1				
Номер набора	$S_R^{t+1}$	$S_S^{t+1}$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	$R^*$	$S^*$
0	0	0	0	0 ←	×	0
1	0	0	1	0 ↘	1	0
2	0	1	0	1 ↘	0	1
3	0	1	1	1 ←	0	×
4	1	0	0	0	×	0
5	1	0	1	1	0	×
6	1	1	0	1 ↘	0	1
7	1	1	1	1 ←	0	×

Столбцы  $R^*$  и  $S^*$  заполняются с использованием табл. 3.4. Минимизируем функции возбуждения  $R^*$  и  $S^*$  с помощью карт Карно (рис. 3.15).

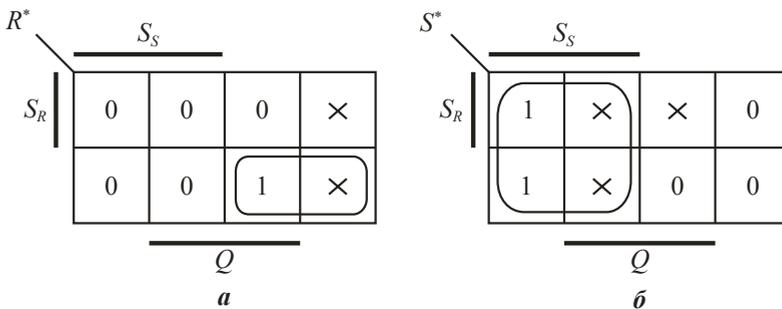


Рис. 3.15. Карты Карно для функций возбуждения S-триггера

Из карт Карно (рис. 3.15) следует:

$$R^* = \overline{S_R} \overline{S_S} = \overline{\overline{S_R} \overline{S_S}} = \overline{S_R + S_S}; \tag{3.13}$$

$$S^* = S_S. \tag{3.14}$$

Выражения (3.13) и (3.14) полностью определяют структуру проектируемого  $S$ -триггера (рис. 3.16).

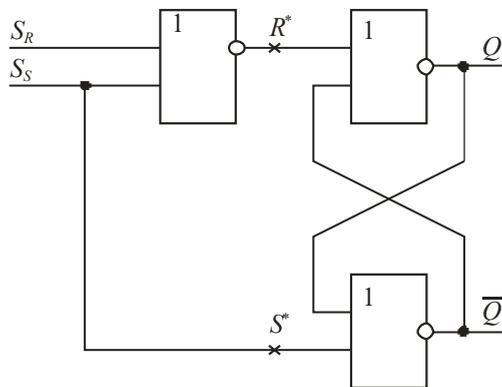


Рис. 3.16. Схема  $S$ -триггера

### 3.1.5.4. $E$ -триггер

Пусть требуется разработать  $E$ -триггер в базисе И-НЕ с активными сигналами:  $E_R = 0$ ;  $E_S = 0$ . Закон его функционирования представлен в табл. 3.8.

Таблица 3.8. Таблица переходов  $E$ -триггера

Номер набора	0					
	$E_R^{t+1}$	$E_S^{t+1}$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	$R^*$	$S^*$
0	0	0	0	0	×	1
1	0	0	1	1	1	×
2	0	1	0	0	×	1
3	0	1	1	0	0	1
4	1	0	0	1	1	0
5	1	0	1	1	1	×
6	1	1	0	0	×	1
7	1	1	1	1	1	×

Столбцы для функций возбуждения  $R^*$  и  $S^*$  заполнены с использованием табл. 3.5. Минимизируем  $R^*$  и  $S^*$  с помощью карт Карно (рис. 3.17).

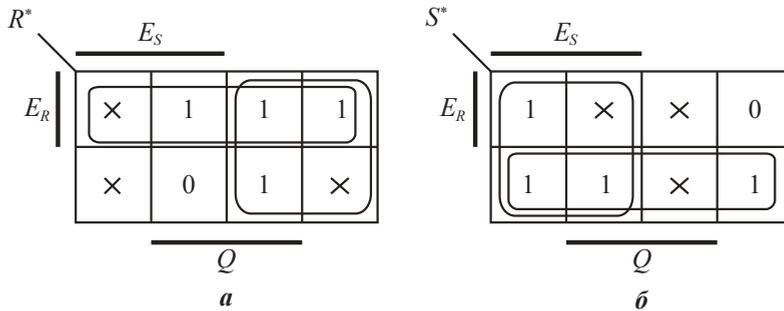


Рис. 3.17. Карты Карно для функций возбуждения  $E$ -триггера

Используя карты Карно, получаем

$$R^* = E_R + \overline{E_S} = \overline{\overline{E_R + \overline{E_S}}} = \overline{\overline{E_R} E_S}; \tag{3.15}$$

$$S^* = \overline{E_R} + E_S = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{E_R} + E_S}}}}}} = \overline{\overline{E_R} \overline{E_S}}. \tag{3.16}$$

Уравнения (3.15) и (3.16) отражают структуру проектируемого  $E$ -триггера, которая и приведена на рис. 3.18.

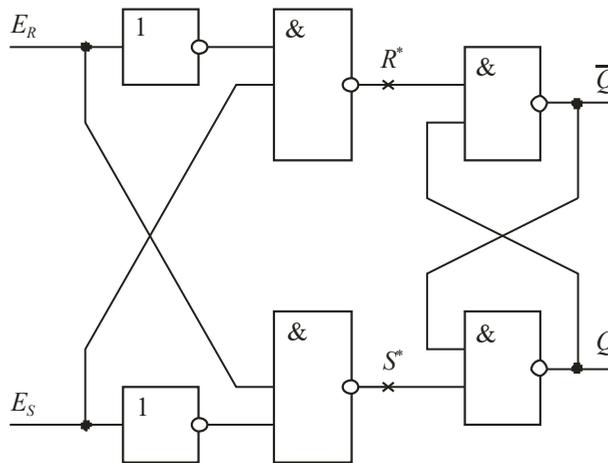


Рис. 3.18. Схема  $E$ -триггера

Попытаемся упростить эту структуру, используя другое покрытие неполностью определённых функций  $R^*$  и  $S^*$  в картах Карно, реализовав общее покрытие контуров в обеих картах. В картах Карно (рис. 3.19) таким общим покрытием является контур, содержащий две клетки.

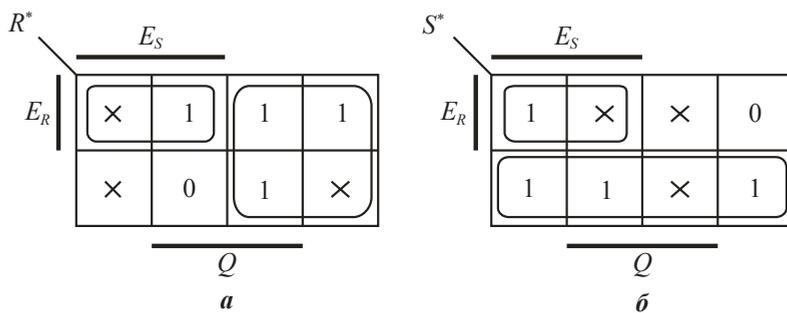


Рис. 3.19. Карты Карно для функций возбуждения  $E$ -триггера с другим вариантом покрытия

Из рис. 3.19 следует:

$$R^* = E_R E_S + \bar{E}_S = \overline{\overline{E_R E_S + \bar{E}_S}} = \overline{\overline{E_R E_S} \cdot \overline{\bar{E}_S}}; \quad (3.17)$$

$$S^* = E_R E_S + \bar{E}_R = \overline{\overline{E_R E_S + \bar{E}_R}} = \overline{\overline{E_R E_S} \cdot \overline{\bar{E}_R}}. \quad (3.18)$$

Схема, построенная по уравнениям (3.17) и (3.18), представлена на рис. 3.20.

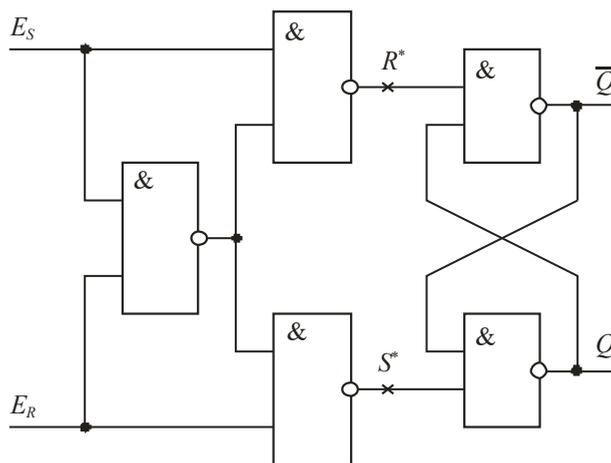


Рис. 3.20. Модернизированная схема  $E$ -триггера

Эта схема имеет преимущества перед схемой, показанной на рис. 3.18. Во-первых, в ней используются **пять однотипных** элементов вместо **шести разнотипных** элементов и, во-вторых, входные сигналы  $E_R$  и  $E_S$  представлены только в прямом виде (без инверсий).

### 3.1.5.5. JK-триггер

Пусть требуется разработать  $JK$ -триггер в базе И-НЕ с активными **уровнями** на входах «1». Закон функционирования представлен в табл. 3.9, из которой следует, что при наборе  $JK = 11$  триггер не имеет устойчивого состояния выхода

( $Q^{t+1} = \bar{Q}^t$ ), т.е.  $JK$ -триггер, реализованный на одной элементарной ячейке (одном  $RS$ -триггере), как рассмотренные выше  $S$ -,  $R$ - и  $E$ -триггеры, при  $JK = 11$  будет работать как кольцевой генератор. Из сказанного можно сделать вывод, что активными сигналами для асинхронного  $JK$ -триггера могут быть только **переходы**.

Таблица 3.9. Таблица переходов  $JK$ -триггера

Номер набора	1		1	
	$J^{t+1}$	$K^{t+1}$	$Q^t$	$Q^{t+1}$
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0

*Примечание.* Рассматривая в столбцах  $J^{t+1}$  и  $K^{t+1}$  табл. 3.9 символ 0 как обозначение неактивного сигнала и символ 1 как обозначение активного сигнала, получим с помощью карты Карно (рис. 3.21) характеристическое уравнение  $JK$ -триггера, отражающее **закон его функционирования**:

$$Q^{t+1} = J^{t+1}\bar{Q}^t + \bar{K}^{t+1}Q^t.$$

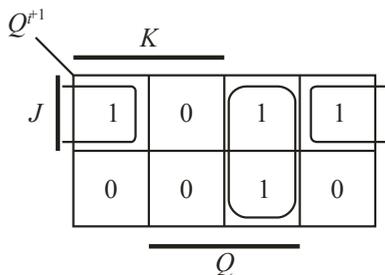


Рис. 3.21. Карта Карно для  $JK$ -триггера

Возникают два вопроса: во-первых, сколько нужно элементарных запоминающих ячеек, чтобы  $JK$ -триггер работал в соответствии с законом функциони-

рования, и, во-вторых, как должны быть соединены между собой элементарные ячейки, чтобы  $JK$ -триггер работал в соответствии с законом функционирования.

Ответы на эти вопросы даёт канонический метод синтеза цифровых автоматов. Каноническим (от слова *канон* — основа, закон, база) этот метод называется потому, что цифровой автомат синтезируется на базе заранее заданных элементарных запоминающих ячеек (элементарных автоматов в общем случае, например на базе  $RS$ -триггеров).

На первый вопрос даёт ответ *этап абстрактного синтеза*, а на второй — *этап структурного синтеза*. Применительно к синтезу триггеров на этих этапах выполняются следующие процедуры.

Этап абстрактного синтеза:

1. Формируется словесное описание закона функционирования триггера.
2. Оформляется первичная таблица переходов.
3. Определяются совместимые состояния первичной таблицы переходов и формируется диаграмма совместимых состояний.
4. Оформляется сокращённая таблица переходов, строится граф переходов.
5. Кодированы внутренние состояния триггера и (в случае необходимости) устраняются в графе переходов контуры с нечётным числом переходов.

Этап структурного синтеза:

1. Выбирается логический базис для элементарных запоминающих ячеек и комбинационных схем, реализующих их функции возбуждения.
2. Оформляется характеристическая таблица для выбранного типа элементарной запоминающей ячейки.
3. Составляется таблица функционирования, учитывающая изменения всех внутренних переменных во времени.
4. Минимизируются логические уравнения для функций возбуждения всех элементарных запоминающих ячеек.
5. Оформляется принципиальная схема триггера.
6. При необходимости минимизируется схема за счёт использования возможности различного доопределения неполностью определённых функций возбуждения элементарных запоминающих ячеек.

Если триггер проектируется как синхронный, то добавляется ещё одна процедура: схема дополняется входами синхронизации, установки и сброса, а входные сигналы реализуются как функции нескольких переменных, учитываются вопросы, связанные с рациональной трассировкой связей на кремниевом кристалле, если триггер реализуется в виде ИС, и т.п.

Покажем выполнение этих процедур на конкретном примере проектирования асинхронного  $JK$ -триггера. Рассмотрим этап абстрактного синтеза.

1. Выберем в качестве активного сигнала на входах  $J$  и  $K$  переход 10, тогда триггер будет устанавливаться в состояние 0 отрицательным переходом на входе  $K$ , а в состояние 1 — отрицательным переходом на входе  $J$  и менять свое состояние на противоположное при одновременном действии отрицательных переходов на входах  $J$  и  $K$ .

2. Оформляем первичную таблицу переходов. Так как неизвестно пока, сколько нужно элементарных запоминающих ячеек, чтобы обеспечить работу  $JK$ -триггера, предполагаем, что для каждого входного набора статических уровней на входах  $J$  и  $K$  будут существовать отличающиеся друг от друга (различные)

состояния с двумя значениями выхода триггера 0 и 1. Поскольку всего может быть четыре набора сигналов  $J$  и  $K$ , то в первоначальной таблице переходов будет восемь строк с устойчивыми состояниями. Эти состояния будем обозначать десятичными цифрами в скобках (или в кружках), а для удобства пользования таблицей рядом с цифрой в скобках будем указывать значение **выхода**  $JK$ -триггера 0 или 1. Первичная таблица, учитывающая только статические состояния триггера, будет выглядеть так, как показано в табл. 3.10.

**Таблица 3.10.** Первичная таблица переходов (статика)

Порядковый номер состояния	$JK$			
	00	01	10	11
1	(1), 0			
2	(2), 1			
3		(3), 0		
4		(4), 1		
5			(5), 0	
6			(6), 1	
7				(7), 0
8				(8), 1

Теперь надо учесть временные изменения состояний триггера под действием смены входных наборов сигналов  $J$  и  $K$ . Пусть на наборе  $JK = 00$  триггер находится в устойчивом состоянии (1), а значение его выхода равно 0, т.е.  $Q = 0$ . Затем набор входных сигналов стал  $JK = 01$ , что говорит о том, что сигнал  $J$  совершил переход 00, а  $K = 01$ . В соответствии со словесным описанием работы  $JK$ -триггера оба перехода неактивны по отношению к **выходу** триггера, поэтому останется  $Q = 0$ , а так как для набора  $JK = 01$  значение выхода 0 соответствует состоянию (3), то в первой строке в столбце  $JK = 01$  необходимо поставить цифру 3, но без скобок, что говорит о нахождении триггера в промежуточном (неустойчивом) состоянии (табл. 3.11).

Отметим, что переход в строке табл. 3.11 говорит о смене наборов входных сигналов, а переход в столбце — о смене неустойчивого состояния устойчивым, когда осуществляется изменение состояний внутренних элементарных запоминающих ячеек.

Таблица 3.11. Первичная таблица переходов (динамика)

Порядковый номер состояния	JK			
	00	01	10	11
1	(1), 0	3	5	7
2	(2), 1	4	6	8
3	1	(3), 0	5	7
4	1	(4), 1	5	8
5	2	4	(5), 0	7
6	2	4	(6), 1	8
7	2	4	5	(7), 0
8	1	4	5	(8), 1

Пусть на входах  $JK$  действовал набор 11, а затем он стал 00, что говорит о том, что на обоих входах одновременно действовали активные по отношению к выходу триггера сигналы, в результате чего значение выхода триггера изменится на противоположное. Поэтому в седьмой строке в столбце 00 надо указать неустойчивое состояние 2, а в восьмой строке — состояние 1. По аналогичной методике заполняются все строки в табл. 3.11.

3. Определяем совместимые состояния в первичной таблице переходов (см. табл. 3.11). Состояния (строки) называются совместимыми, если номера состояний, записанные в одних и тех же столбцах, совпадают или друг с другом, или с безразличным состоянием  $\times$  (для неполностью определённого цифрового автомата). Объединение цифр со знаком  $\times$  доопределяет последний.

При объединении строк (состояний) необходимо придерживаться следующего правила: если объединяются одинаковые номера состояний в скобках и без них, то результирующее состояние должно быть в скобках, если объединяются состояния, обозначенные знаком  $\times$ , и состояния, соответствующие какому-либо номеру, то в строке сокращённой таблицы пишется этот номер.

В общем случае строки можно объединять различными способами. Для удобства анализа вариантов построения сокращённой таблицы переходов используются диаграммы совместимых состояний. Точки на диаграмме отражают строки первичной таблицы переходов, пронумерованные в соответствии с номерами устойчивых состояний, содержащихся в этих строках. Если какие-либо строки могут быть объединены, то между соответствующими точками на диаграмме проводится линия. В нашем случае диаграмма совместимых состояний имеет вид,

представленный на рис. 3.22. Видно, что первоначальная таблица переходов имеет четыре пары совместимых внутренних состояний.

Вообще говоря, выполнив данную процедуру, мы ответили на вопрос: для реализации  $JK$ -триггера нужны две элементарные запоминающие ячейки, так как с их помощью можно закодировать четыре различных состояния, которые мы получили.

4. Оформляем сокращённую таблицу переходов, объединив совместимые состояния. Получаем табл. 3.12, в которой в качестве различных состояний взяты состояния с номерами 1, 2, 4 и 5.

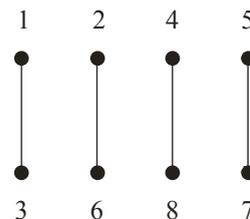


Рис. 3.22. Диаграмма совместимых состояний

Таблица 3.12. Сокращённая таблица переходов

Порядковый номер состояния	$JK$			
	00	01	10	11
1	(1),0	(1),0	5	5
2	(2),1	4	(2),1	4
4	1	(4),1	5/1	(4),1
5	2	4/2	(5),0	(5),0

Рассмотрим объединение четвертой и восьмой строк в табл. 3.11. В столбце с набором  $JK = 00$  в четвертой и восьмой строках стоит неустойчивое состояние 1, поэтому в объединённой строке (см. табл. 3.12), в строке с состоянием 4 записываем 1. В столбце с набором  $JK = 01$  в четвертой строке стоит устойчивое состояние (4), а в восьмой строке — неустойчивое состояние 4, поэтому в объединённой строке записываем (4), 1. В столбце с набором  $JK = 10$  в четвертой и восьмой строках стоит неустойчивое состояние 5, поэтому в объединённой строке табл. 3.12 записываем 5.

5. Строим граф переходов, соответствующий сокращённой таблице переходов (табл. 3.12). Данный граф приведён на рис. 3.23. В верхней половине кружка, которым обозначается вершина графа, записывается номер состояния, принятый в сокращённой таблице перехода, а в нижней половине — конкретный набор значений выходов двух элементарных запоминающих ячеек (двух внутренних переменных).

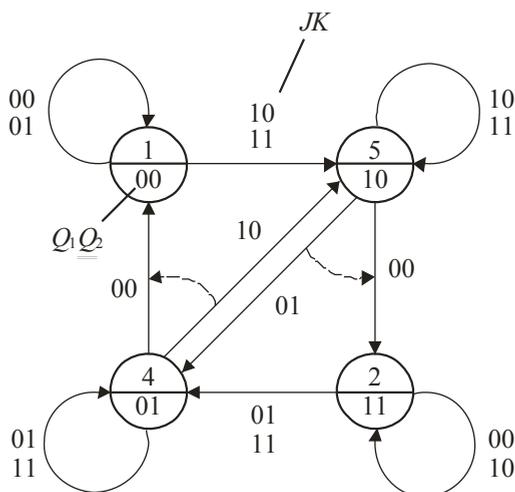


Рис. 3.23. Граф переходов  $JK$ -триггера

Из теории конечных автоматов известно, что когда две или более внутренние переменные одновременно изменяются в течение перехода из одного состояния в другое, то говорят, что имеет место состязание между изменяющимися переменными. Напомним, что состояние — это конкретный набор внутренних переменных. Если желаемое состояние зависит от порядка или последовательности изменений внутренних переменных, то говорят, что состязание критическое, а в противном случае — некритическое. Поэтому важнейшей процедурой при синтезе триггеров является представление внутренних состояний в виде наборов конкретных значений внутренних переменных — кодирование состояний. Способ кодирования, устраняющий состязания (гонки), называется противогоночным. При способе кодирования «соседнее кодирование состояний» состязания всегда отсутствуют, любые два последовательных состояния кодируются наборами, отличающимися состояниями лишь одной элементарной запоминающей ячейки. Соседнее кодирование можно применить только в том случае, если в графе переходов нет контуров с нечётным числом переходов. На рис. 3.23 есть два таких контура: 1-5-4-1 и 5-2-4-5. Контур с четырьмя переходами — 1-5-2-4-1. Закодируем способом «соседнее кодирование» все четыре состояния внутренних переменных триггера, не обращая внимание на наличие двух контуров с нечётным числом переходов (ниже будет показано, как они могут быть устранены). Прежде всего будем считать, что выход второй элементарной запоминающей ячейки  $Q_2$  является собственно выходом проектируемого  $JK$ -триггера. Так как в состоянии с номером 1 значение выхода равно 0, то состояние 1 может быть закодировано одним из наборов  $Q_1 Q_2$  00 или 10. Пусть мы выбрали набор  $Q_1 Q_2 = 00$ , тогда состояние 5 должно быть закодировано набором  $Q_1 Q_2 = 10$ , так как и в этом состоянии значение выхода равно 0. Ясно, что состояние 2 будет кодироваться набором  $Q_1 Q_2 = 11$ , а состояние 4 — 01.

Устраним теперь контуры с нечетным числом переходов. Из состояния 5, в котором триггер находится при наборах  $JK = 10$  или  $11$ , он может перейти в состояние 2 при смене  $JK$  на набор  $00$  или в состояние 4 при смене  $JK$  на набор  $01$ . Но так как и в состоянии 2, и в состоянии 4 значение выхода равно 1, а значение переменной  $Q_1$  нам безразлично (например, она нам недоступна, как в реальной ИС  $JK$ -триггера), то будем считать, что при смене  $JK$  на набор  $01$  мы перейдём в состояние 2, а не в состояние 4. Аналогично рассуждая, будем считать, что из состояния 4 при переходе к набору  $JK = 10$  перейдём в состояние 1, а не в 5, так как и в том и другом состоянии значения выхода триггера равны 0. Окончательный вид графа переходов  $JK$ -триггера приведён на рис. 3.24. На этом завершается этап абстрактного синтеза.

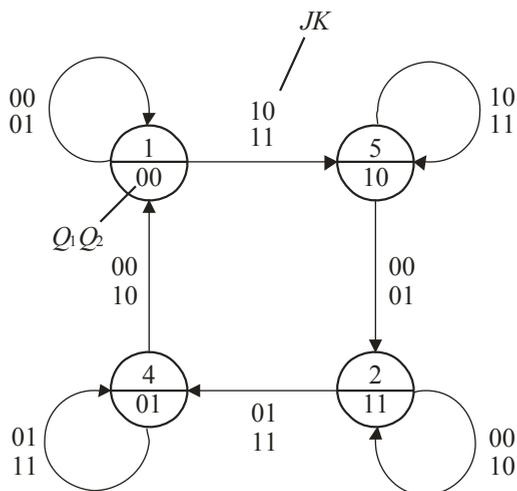


Рис. 3.24. Окончательный граф переходов  $JK$ -триггера

Рассмотрим этап структурного синтеза.

1. В качестве элементарных запоминающих ячеек выбираем  $RS$ -триггер в базисе И-НЕ (см. рис. 3.7), а в качестве логического базиса для реализации функций возбуждения  $RS$ -триггеров также выбираем И-НЕ.

2. Характеристическая таблица для выбранных ячеек приведена в табл. 3.5.

3. Таблица функционирования, учитывающая изменения всех внутренних переменных во времени, составляется на основе графа (см. рис. 3.24) и имеет вид табл. 3.13. Для заполнения четырёх правых столбцов в табл. 3.13 используется табл. 3.5.  $R_1^*$  и  $S_1^*$  — функции возбуждения первой элементарной запоминающей ячейки,  $R_2^*$  и  $S_2^*$  — второй.

**Таблица 3.13.** Таблица функционирования, учитывающая изменения всех внутренних переменных во времени

Номер набора	$J^{t+1}$	$K^{t+1}$	$Q_1^t$	$Q_2^t$	$Q_1^{t+1}$	$Q_2^{t+1}$	$R_1^{*t+1}$	$S_1^{*t+1}$	$R_2^{*t+1}$	$S_2^{*t+1}$
0	0	0	0	0	0	0	×	1	×	1
1	0	0	0	1	0	0	×	1	0	1
2	0	0	1	0	1	1	1	×	1	0
3	0	0	1	1	1	1	1	×	1	×
4	0	1	0	0	0	0	×	1	×	1
5	0	1	0	1	0	1	×	1	1	×
6	0	1	1	0	1	1	1	×	1	0
7	0	1	1	1	0	1	0	1	1	×
8	1	0	0	0	1	0	1	0	×	1
9	1	0	0	1	0	0	×	1	0	1
10	1	0	1	0	1	0	1	×	×	1
11	1	0	1	1	1	1	1	×	1	×
12	1	1	0	0	1	0	1	0	×	1
13	1	1	0	1	0	1	×	1	1	×
14	1	1	1	0	1	0	1	×	×	1
15	1	1	1	1	0	1	0	1	1	×

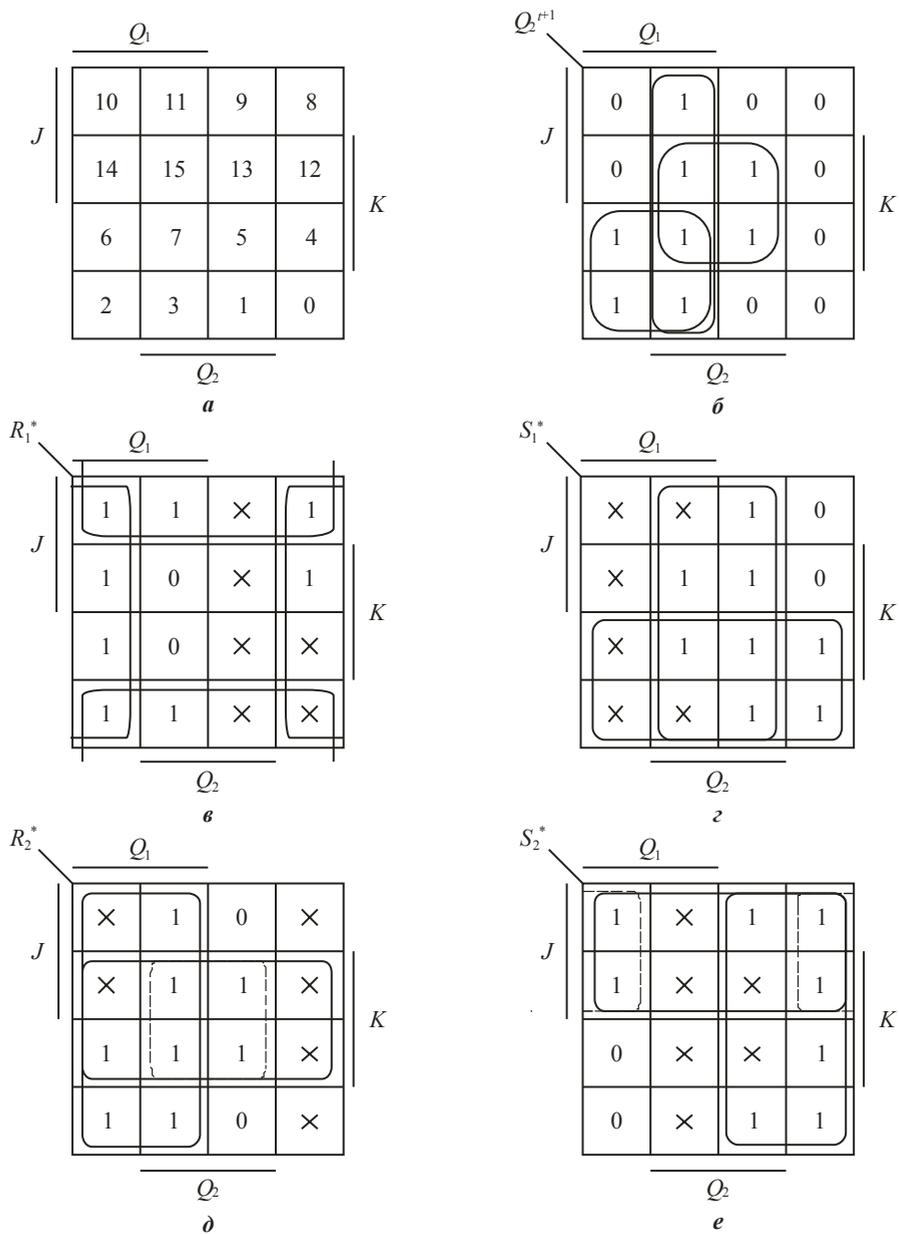


Рис. 3.25. Карты Карно для JK-триггера

4. Минимизируем выражения для  $R_1^*$ ;  $S_1^*$ ;  $R_2^*$  и  $S_2^*$ , используя карты Карно. Из рис. 3.25, в–е следует:

$$R_1^* = \overline{Q_2} + \overline{K} = \overline{Q_2 K}; \quad (3.19)$$

$$S_1^* = Q_2 + \bar{J} = \overline{\overline{Q_2}J}; \quad (3.20)$$

$$R_2^* = Q_1 + K = \overline{\overline{Q_1}\bar{K}}; \quad (3.21)$$

$$S_2^* = \bar{Q}_1 + J = \overline{\overline{Q_1}\bar{J}}. \quad (3.22)$$

Выражения (3.19)–(3.22) полностью отражают структуру *JK*-триггера, которая приведена на рис. 3.26.

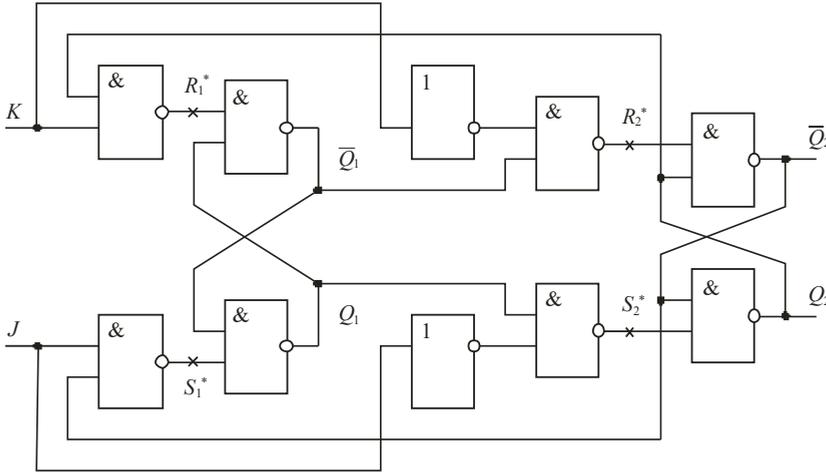


Рис. 3.26. Схема *JK*-триггера

5. Минимизируем схему, используя возможность различного доопределения функций возбуждения элементарных запоминающих ячеек. Из карты Карно (см. рис. 3.25, *д*), доопределив значения  $R_2^*$  на наборах 4 и 12 нулями и учитывая (3.19), найдём

$$R_2^* = Q_1 + Q_2K = Q_1 + \bar{R}_1^* = \overline{\overline{Q_1}R_1^*}. \quad (3.23)$$

Из карты Карно (см. рис. 3.25, *е*), доопределив значения  $S_2^*$  на наборах 11 и 15 нулями и учитывая (3.20), найдём

$$S_2^* = \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2J = \bar{Q}_1 + \bar{S}_1^* = \overline{\overline{Q_1}S_1^*}. \quad (3.24)$$

Выражения (3.19), (3.20), (3.23) и (3.24) полностью отражают структуру *JK*-триггера, приведённую на рис. 3.27. Полученные схемы (см. рис. 3.26 и 3.27) никогда не были реализованы в виде ИС из-за их существенного недостатка: любые переходы на входах *J* и *K* типа 0-1-0 или 1-0-1, в том числе и наведённые помехи, изменяют состояние выхода триггера, т.е. они очень ненадёжны в работе.

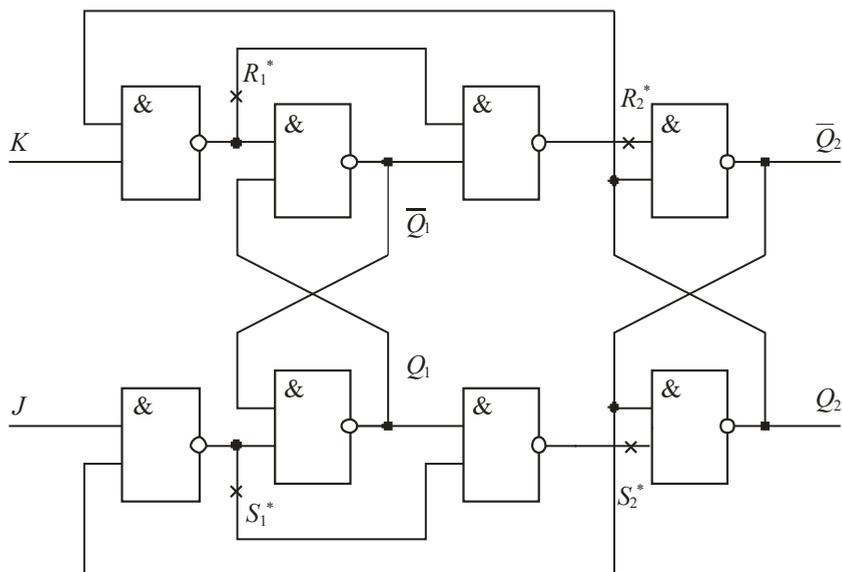


Рис. 3.27. Минимизированная схема  $JK$ -триггера

### 3.1.5.6. Счётный триггер ( $T$ -триггер)

Если предположить, что счётный триггер изменяет своё состояние на противоположное при установлении уровня 1 на  $T$ -входе, то закон его функционирования можно отобразить в табл. 3.14, из которой следует, что при  $T = 1$  триггер будет неустойчивым (вырождается в кольцевой генератор). Следовательно, активным сигналом на  $T$ -входе может быть только переход (01 или 10).

Таблица 3.14. Закон функционирования счётного триггера

Номер набора	$T^{n-1}$	$Q^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	0
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	1	0

Однако если в табл. 3.14 переменная  $T$  обозначает активный сигнал, то из неё можно получить характеристическое уравнение, отражающее закон функционирования:

$$Q^{t+1} = \bar{T}^{t+1}Q^t + T^{t+1}\bar{Q}^t = T^{t+1} \oplus Q^t, \quad (3.25)$$

Из выражения (3.25) видно, что триггер выполняет арифметическую операцию «сумма по *mod 2*» над входным сигналом  $T$  и выходным сигналом  $Q$  (считает их по *mod 2*), поэтому он и называется **счётным триггером**.

Покажем, как выполняются этапы канонического метода синтеза устойчивого  $T$ -триггера.

Рассмотрим этап абстрактного синтеза.

1. Пусть  $T$ -триггер изменяет своё состояние выхода на противоположное по переходу 10 на  $T$ -входе.

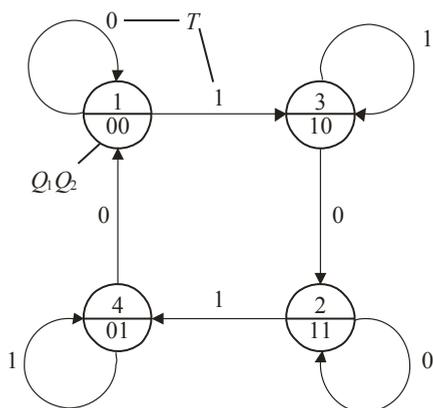
2. Определяем первичную таблицу переходов (табл. 3.15), которая заполняется по правилам, описанным при заполнении табл. 3.11.

**Таблица 3.15.** Первичная таблица переходов (динамика)

Порядковый номер состояния	$T$	
	0	1
1	(1),0	3
2	(2),1	4
3	2	(3),0
4	1	(4),1

В полученной таблице нет совместимых состояний, поэтому она окончательная, следовательно, этапы 3 и 4 отсутствуют.

5. Представим закон функционирования  $T$ -триггера в виде графа (рис. 3.28).



**Рис. 3.28.** Граф переходов  $T$ -триггера

6. Четыре внутренних состояния  $T$ -триггера закодируем наборами состояний двух элементарных запоминающих ячеек  $Q_1Q_2$ , причём выход ячейки  $Q_2$  будем рассматривать как выход  $T$ -триггера в целом. Здесь также применено противо-гоночное (соседнее) кодирование.

Этап структурного синтеза.

1. В качестве элементарных запоминающих ячеек выбираем  $RS$ -триггеры, выполненные в базисе И-НЕ. В этом же базисе будем реализовывать функции возбуждения элементарных запоминающих ячеек.

2. Характеристическая таблица выбранной элементарной запоминающей ячейки представлена табл. 3.5.

3. Таблица переходов (табл. 3.16), учитывающая временные изменения внутренних состояний, построена на основе анализа графа переходов (см. рис. 3.28) и характеристической таблицы (см. табл. 3.5).

**Таблица 3.16.** Таблица переходов, учитывающая временные изменения внутренних состояний

Номер набора	$T^{t+1}$	$Q_1^t$	$Q_2^t$	$Q_1^{t+1}$	$Q_2^{t+1}$	$R_1^{*t+1}$	$S_1^{*t+1}$	$R_2^{*t+1}$	$S_2^{*t+1}$
0	0	0	0	0	0	×	1	×	1
1	0	0	1	0	0	×	1	0	1
2	0	1	0	1	1	1	×	1	0
3	0	1	1	1	1	1	×	1	×
4	1	0	0	1	0	1	0	×	1
5	1	0	1	0	1	×	1	1	×
6	1	1	0	1	0	1	×	×	1
7	1	1	1	0	1	0	1	1	×

4. Воспользовавшись картами Карно (рис. 3.29), минимизируем функции возбуждения.

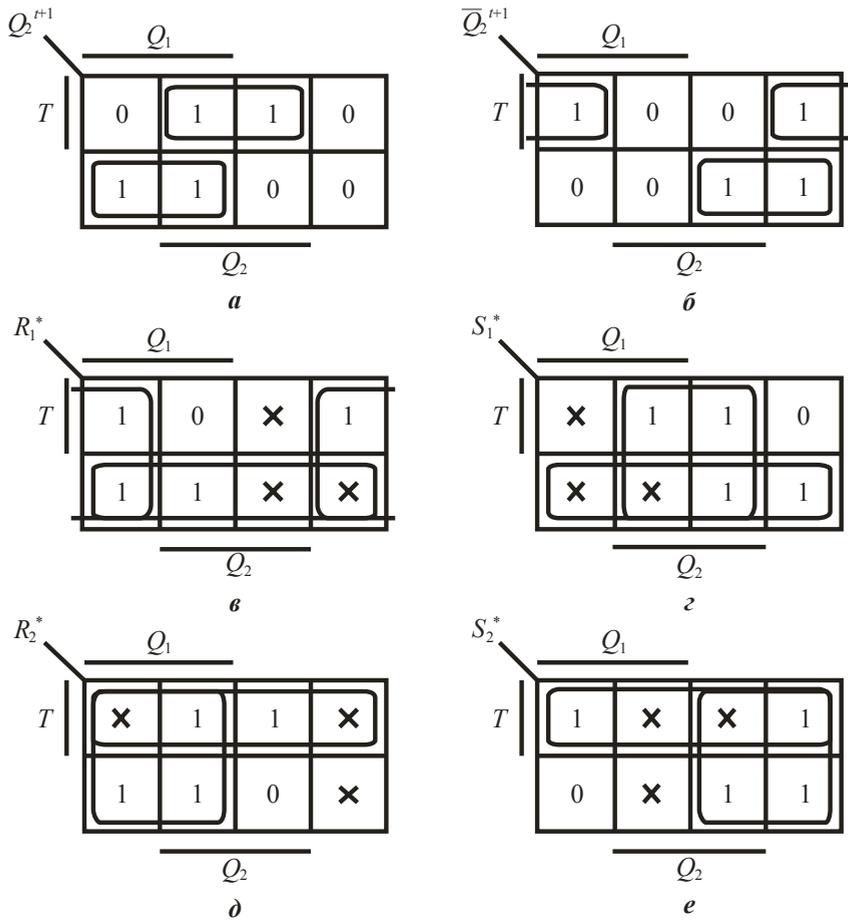


Рис. 3.29. Карты Карно для  $T$ -триггера

Из карт Карно (см. рис. 3.29,  $a$  и  $b$ ) можно записать

$$Q_2^{t+1} = T^{t+1}Q_2^t + \bar{T}^{t+1}Q_1^t; \tag{3.30}$$

$$\bar{Q}_2^{t+1} = T^{t+1}\bar{Q}_2^t + \bar{T}^{t+1}\bar{Q}_1^t. \tag{3.31}$$

Выражения (3.26)–(3.29) отражают структуру  $T$ -триггера, срабатывающего по переходу 10 (рис. 3.30).

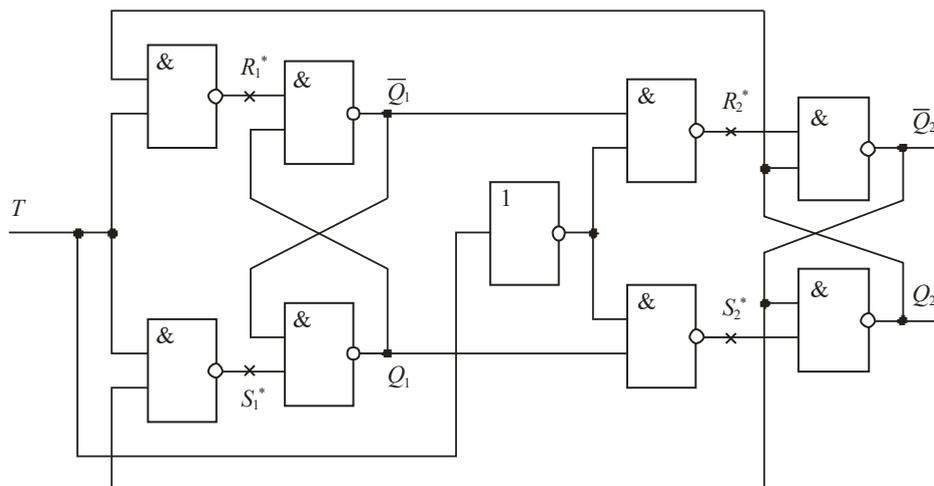


Рис. 3.30. Схема T-триггера (вариант 1)

Для минимизации схемы (вариант 1) воспользуемся *методом суперпозиции функций возбуждения и внутренних переменных*, позволяющим представить функции возбуждения через первичные функции возбуждения и внутренние переменные. *Первичные функции возбуждения* — функции, зависящие от внутренних переменных и входной переменной  $T$ . Примем за первичные функции возбуждения  $R_1^*$  и  $S_1^*$ , а функции возбуждения  $R_2^*$  и  $S_2^*$  определим как функции от  $R_1^*$ ;  $S_1^*$ ;  $Q_1$  и  $Q_2$ . Из карт Карно (см. рис. 3.29, д), доопределив значения  $R_2^*$  на наборе 4 нулём, получим, учитывая выражение (3.26),

$$R_2^* = TQ_2 + Q_1 = \overline{R_1^*} + Q_1 = \overline{\overline{R_1^*}} + Q_1 = \overline{R_1^* \overline{Q_1}}. \quad (3.32)$$

Из карты Карно (см. рис. 3.29, е), доопределив значение  $S_2^*$  на наборе 7 нулём, получим, учитывая выражение (3.27),

$$S_2^* = T\overline{Q_2} + \overline{Q_1} = \overline{S_1^*} + \overline{Q_1} = \overline{\overline{S_1^*}} + \overline{Q_1} = \overline{S_1^* Q_1}. \quad (3.33)$$

Выражения (3.28), (3.29), (3.32) и (3.33) полностью отражают структуру варианта 2 T-триггера (рис. 3.31).

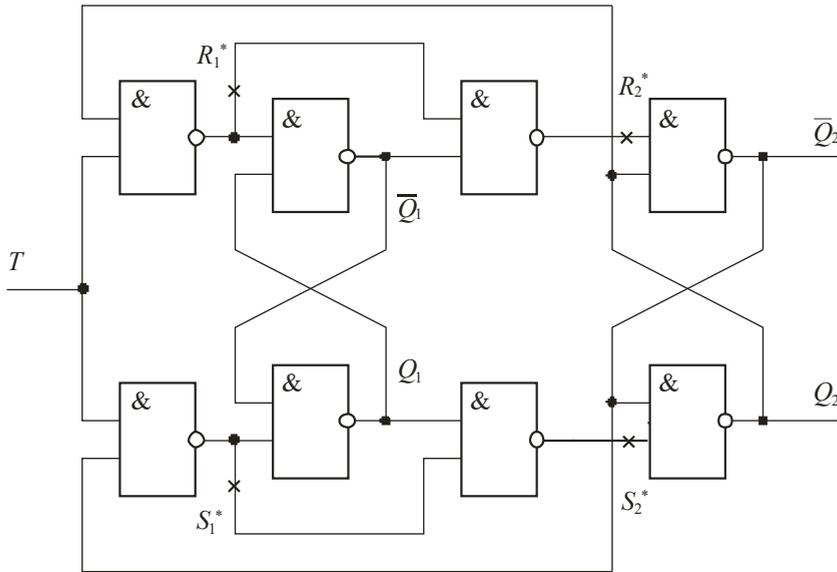


Рис. 3.31. Схема  $T$ -триггера (вариант 2)

Для минимизации схемы, показанной на рис. 3.30, устраним в функциях возбуждения  $R_1^*$  и  $S_1^*$  переменную  $Q_2$ . Используя уравнение (3.31), запишем выражение (3.26) в следующем виде:

$$R_1^* = \bar{T} + T\bar{Q}_2 + \bar{T} \cdot \bar{Q}_1 = \bar{T} + \bar{S}_1^* + \bar{R}_2^* = \overline{TS_1^* R_2^*}. \quad (3.34)$$

Используя уравнение (3.30), запишем выражение (3.25) в виде

$$S_1^* = \bar{T} + TQ_2 + \bar{T}Q_1 = \bar{T} + \bar{R}_1^* + \bar{S}_2^* = \overline{TR_1^* S_2^*}. \quad (3.35)$$

Выражения (3.32)–(3.35) полностью отражают структуру варианта 3  $T$ -триггера (рис. 3.32).

Поскольку здесь в явном виде присутствует только переменная  $Q_1$ , то, если её рассматривать в качестве выхода  $T$ -триггера, видно, что активным переходом на входе  $T$  является переход 01 (см. граф переходов на рис. 3.27).

Рассмотренные варианты  $T$ -триггера дают общее представление о методах их проектирования и не являются единственными.

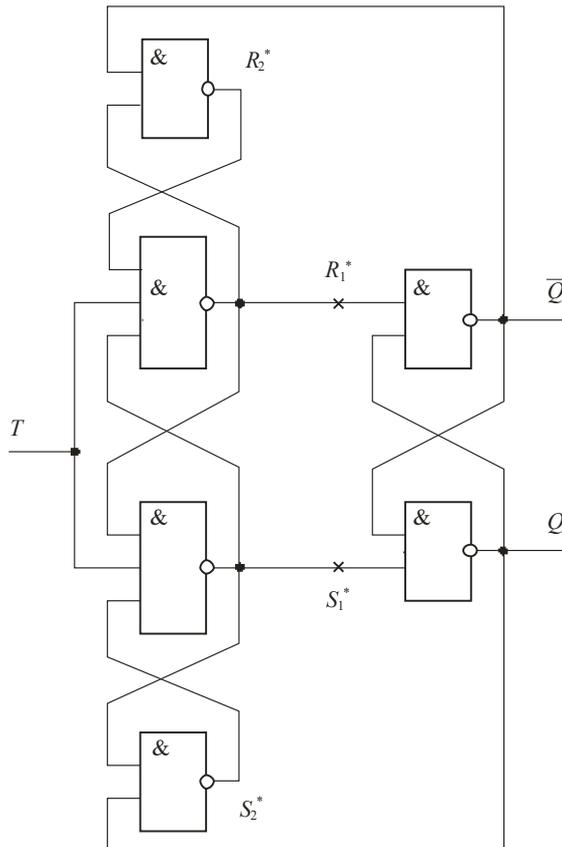


Рис. 3.32. Схема  $T$ -триггера (вариант 3)

### 3.1.6. Синхронные триггеры

Синхронные (тактируемые) триггеры можно рассматривать как особый тип асинхронных триггеров, у которых существуют определённые ограничения на возможность действия входных сигналов. Это позволяет существенно упростить синтез и анализ синхронных триггеров. В синхронных триггерах допускается изменять функциональные входные сигналы только в течение времени, когда тактовые импульсы блокируют входные цепи и предотвращают изменения состояния триггера (предполагается, что синхронный триггер должен изменять своё состояние под действием тактового импульса). Важное достоинство синхронных триггеров — маскирование эффектов задержек, обусловленных задержками распространения логических элементов и линий передачи сигналов. Последнее обстоятельство позволяет считать, что логические элементы и линии имеют нулевую задержку, а выходы и состояния триггера можно рассматривать только в фиксированные моменты времени. Эти допущения существенно упрощают анализ и синтез любых синхронных устройств.

Рассмотрим, как проектируются простейшие триггеры, тактируемые потенциалом.

## 3.1.6.1. Синхронный RS-триггер

Пусть активный сигнал на  $C$ -,  $R$ - и  $S$ -входах — уровень «1». Необходимо построить схему в базисе И-НЕ. Функционирование триггера представлено в табл. 3.17.

Таблица 3.17. Таблица переходов синхронного RS-триггера

Номер набора	1 1 1			$Q^t$	$Q^{t+1}$	$R^{*t+1}$	$S^{*t+1}$
	$C^{t+1}$	$R^t$	$S^t$				
0	0	0	0	0	0	×	1
1	0	0	0	1	1	1	×
2	0	0	1	0	0	×	1
3	0	0	1	1	1	1	×
4	0	1	0	0	0	×	1
5	0	1	0	1	1	1	×
6	0	1	1	0	0	×	1
7	0	1	1	1	1	1	×
8	1	0	0	0	0	×	1
9	1	0	0	1	1	1	×
10	1	0	1	0	1	1	0
11	1	0	1	1	1	1	×
12	1	1	0	0	0	×	1
13	1	1	0	1	0	0	1
14	1	1	1	0	×	×	×
15	1	1	1	1	×	×	×

При  $C = 0$  триггер сохраняет свое предыдущее значение, а при  $C = 1$  работает как обычный асинхронный RS-триггер. Значения  $R^*$  и  $S^*$  заполняются с помощью табл. 3.5.

Рассмотрим карты Карно (рис. 3.33).

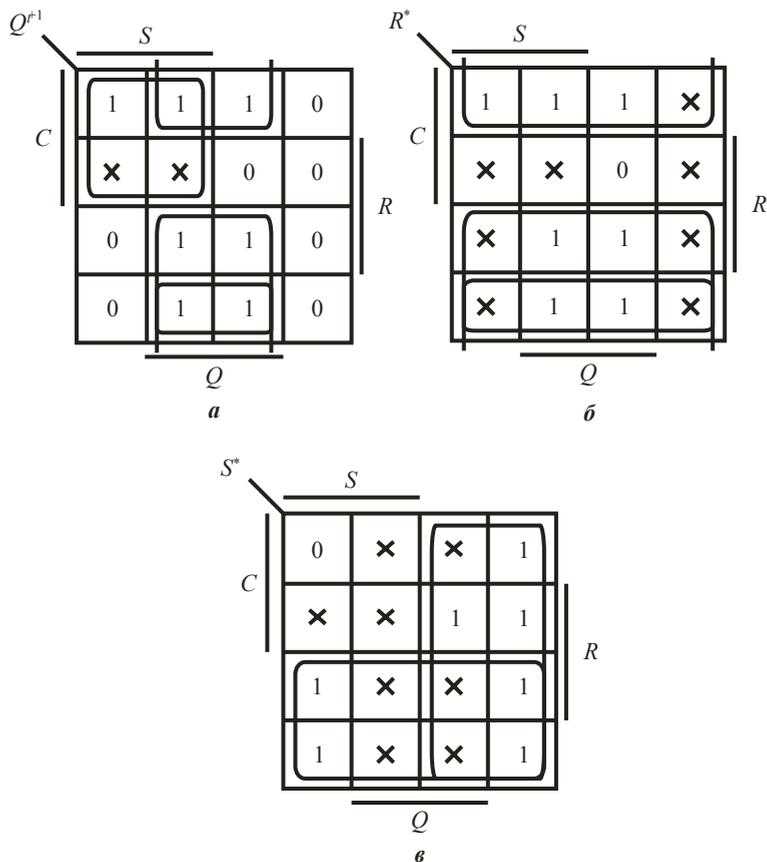


Рис. 3.33. Карты Карно для синхронного RS-триггера

Из карт Карно (рис. 3.33, а) следует:

$$Q^{t+1} = S^t C^{t+1} + \bar{R}^t Q^t + \bar{C}^{t+1} Q^t,$$

откуда при  $C = 1$  получим (3.1), а при  $C = 0$   $Q^{t+1} = Q^t$ .

Из карт Карно (см. рис. 3.33, б и в) следует:

$$R^* = \bar{C} + \bar{R} = \overline{CR}; \quad (3.36)$$

$$R^* = \bar{C} + \bar{R} = \overline{CR}. \quad (3.37)$$

Выражения (3.36) и (3.37) определяют структуру проектируемого триггера (рис. 3.34).

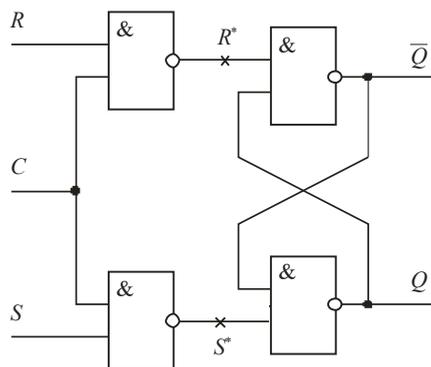


Рис. 3.34. Схема синхронного  $RS$ -триггера

### 3.1.6.2. Синхронный $R$ -триггер

Пусть активный сигнал на входе  $C = 0$ , на входе  $R_R = 0$ , на входе  $R_S = 1$ . Необходимо построить схему в базисе ИЛИ-НЕ. Функционирование триггера представлено в табл. 3.18.

Таблица 3.18. Таблица переходов синхронного  $R$ -триггера

Номер набора	0 0 1			$Q'$	$Q^{n+1}$	$R^*$	$S^*$
	$C$	$R_R$	$R_S$				
0	0	0	0	0	0	×	0
1	0	0	0	1	0	1	0
2	0	0	1	0	0	×	0
3	0	0	1	1	0	1	0
4	0	1	0	0	0	×	0
5	0	1	0	1	1	0	×
6	0	1	1	0	1	0	1
7	0	1	1	1	1	0	×
8	1	0	0	0	0	×	0
9	1	0	0	1	1	0	×
10	1	0	1	0	0	×	0
11	1	0	1	1	1	0	×
12	1	1	0	0	0	×	0
13	1	1	0	1	1	0	×
14	1	1	1	0	0	×	0
15	1	1	1	1	1	0	×

При  $C = 1$  триггер сохраняет своё значение, а при  $C = 0$  работает как обычный асинхронный  $R$ -триггер. Значения  $R^*$  и  $S^*$  заполняются с помощью табл. 3.4.

Построим карты Карно (рис. 3.35).

Из карт Карно (рис. 3.35, *a*) следует:

$$Q^{t+1} = C^{t+1}Q^t + \bar{C}^{t+1}R^tR^tS^t + R^tR^tQ^t,$$

откуда при  $C = 0$  получим  $Q^{t+1} = R_R(R_S + Q^t)$ , а при  $C = 1$   $Q^{t+1} = Q^t$ .

Из карт Карно (рис. 3.35, *б* и *в*) следует

$$R^* = \bar{C} \cdot \bar{R} = \overline{C + R_R}; \tag{3.38}$$

$$S^* = \bar{C}R_RR_S = \overline{C + \bar{R}_R + \bar{R}_S}. \tag{3.39}$$

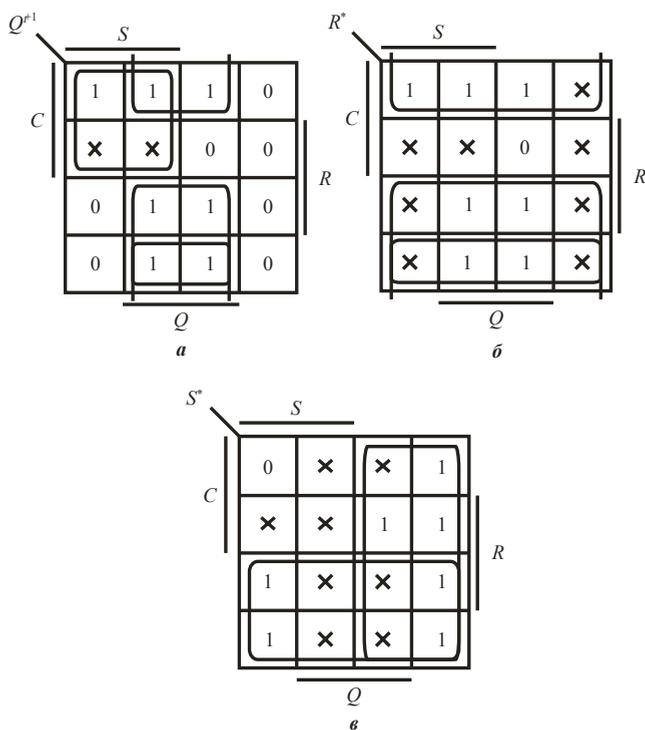


Рис. 3.35. Карты Карно для синхронного  $R$ -триггера

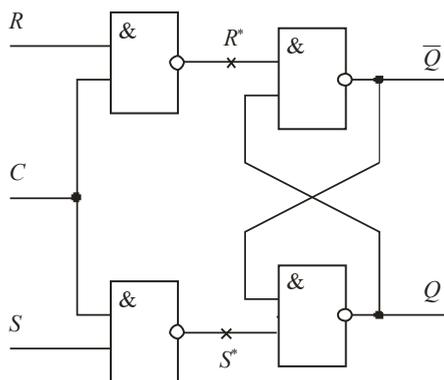


Рис. 3.36. Схема синхронного  $R$ -триггера

3

Выражения (3.38) и (3.39) определяют структуру проектируемого триггера, приведённую на рис. 3.36.

### 3.1.6.3. Синхронный $D$ -триггер

Пусть активный сигнал на входе  $C$  — логическая 1. Необходимо построить схему в базисе И-НЕ. Функционирование триггера представлено в табл. 3.19.

Таблица 3.19. Таблица переходов синхронного  $D$ -триггера

Номер набора	$C$	$D$	$Q_t$	$Q_{t+1}$	$R^*$	$S^*$
0	0	0	0	0	×	1
1	0	0	1	1	1	×
2	0	1	0	0	×	1
3	0	1	1	1	1	×
4	1	0	0	0	×	1
5	1	0	1	0	0	1
6	1	1	0	1	1	0
7	1	1	1	1	1	×

При  $C = 1$  триггер передаёт входные данные  $D$  на выход  $Q$ , а при  $C = 0$  сохраняет своё значение на выходе  $Q$ . Значения  $R^*$  и  $S^*$  заполняются с помощью табл. 3.5. Построим карты Карно (рис. 3.37).

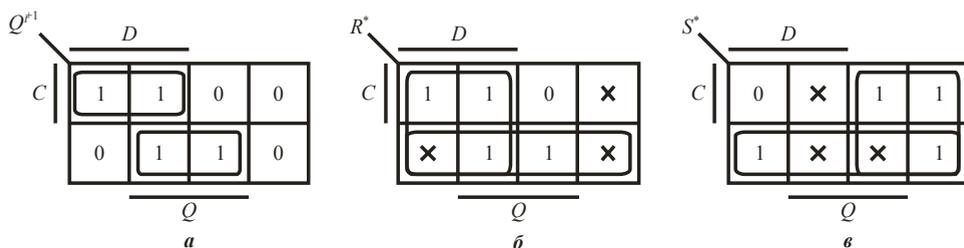


Рис. 3.37. Карты Карно для синхронного  $D$ -триггера

Из карты Карно (рис. 3.37,  $a$ ) следует:

$$Q^{t+1} = C^{t+1}D^t + \bar{C}^{t+1}Q^t,$$

откуда при  $C = 1$  получим  $Q^{t+1} = D^t$ , а при  $C = 0$   $Q^{t+1} = Q^t$ .

Из карт Карно (рис. 3.37,  $b$  и  $в$ ) следует:

$$R^* = \bar{C} + D = \bar{C}\bar{D}; \tag{3.40}$$

$$S^* = \bar{C} + \bar{D} = \bar{C}\bar{D}. \tag{3.41}$$

Устраним инверсию  $D$  в выражении (3.40), записав  $R^*$  в другом виде:

$$R^* = \bar{C} + CD. \tag{3.42}$$

С учётом (3.41) выражение (3.42) примет вид

$$R^* = \bar{C} + \bar{S}^* = \overline{CS^*}. \tag{3.43}$$

Выражения (3.41) и (3.43) определяют структуру проектируемого триггера, приведённую на рис. 3.38.

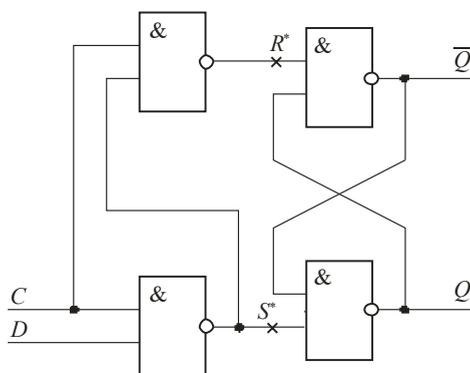


Рис. 3.38. Схема синхронного  $D$ -триггера (триггера-защелки)

Синхронный  $D$ -триггер широко используется для построения регистров хранения, тактируемых потенциалом. Данная схема часто называется «триггер-защёлка».

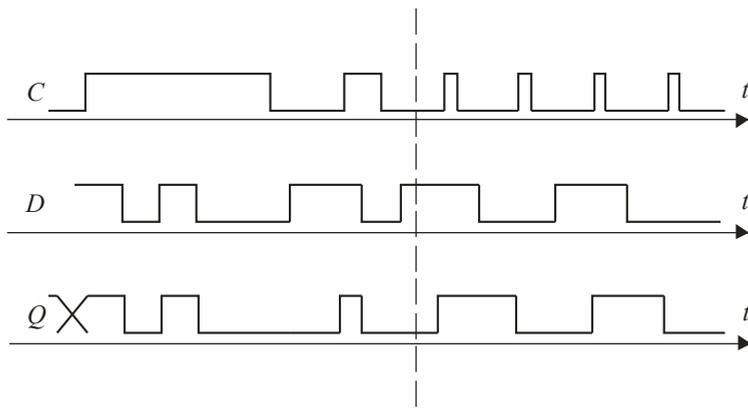


Рис. 3.39. Временные диаграммы  $D$ -триггера (триггера-зашёлки)

3

На рис. 3.39 показаны временные диаграммы работы триггера-зашёлки. Рекомендуемый режим синхронизации — справа от штриховой линии. Все триггеры, тактируемые потенциалом, являются **прозрачными триггерами**. Этот термин надо понимать следующим образом: при действии на тактовом входе активного уровня все изменения (в том числе и от помех) функциональных и информационных входов немедленно передаются на выход. Поэтому длительность активного уровня тактового сигнала должна быть минимальной, но достаточной для срабатывания триггера. Регистры, выполненные на прозрачных триггерах, также будут **прозрачными**.

Современные  $JK$ -триггеры, выполняемые в виде ИС, тактируются переходами и являются непрозрачными триггерами. Функциональное обозначение наиболее сложного  $JK$ -триггера приведено на рис. 3.40, его часто называют **универсальным  $JK$ -триггером**. Характеристическая таблица для него имеет вид табл. 3.20.

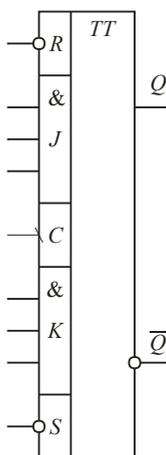


Рис. 3.40. Функциональное обозначение универсального  $JK$ -триггера

Таблица 3.20. Характеристическая таблица для  $JK$ -триггера

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	$J^{*t}$	$K^{*t}$
00	0	×
01	1	×
10	×	1
11	×	0
Активный переход на $C$ -входе:		

Универсальный  $JK$ -триггер может работать в четырёх режимах:

1. Асинхронный  $RS$ -триггер. Здесь управление осуществляется по входам  $R$  и  $S$ , причём активными уровнями на них являются 0. На  $J$ -,  $K$ - и  $C$ -входах в этом случае могут быть *любые потенциалы*.

2. Синхронный  $JK$ -триггер. Здесь управление осуществляется отрицательным переходом на тактовом входе  $C$ . На входах  $JK$  устанавливают необходимые потенциалы:  $JK = 00$  соответствует режиму хранения, иногда его называют «режим блокировки тактового входа»;  $JK = 01$  — установка триггера в состояние 0;  $JK = 10$  — установка триггера в состояние 1;  $JK = 11$  — изменение состояния триггера на противоположное.

3. Синхронный  $D$ -триггер. В этом случае  $J = D$ ,  $K = \bar{D}$ .

4. Счётный триггер. В этом случае  $J = K = 1$ , а  $C = T$ .

Временная диаграмма, представленная на рис. 3.41, в обобщённом виде отражает все перечисленные выше режимы работы универсального  $JK$ -триггера.

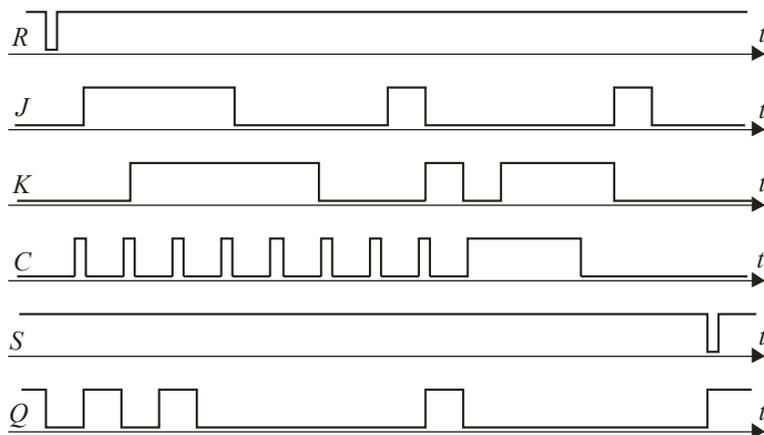


Рис. 3.41. Временные диаграммы универсального  $JK$ -триггера

#### 3.1.6.4. Синхронный $D$ -триггер, тактируемый переходом 01

Будем использовать канонический метод синтеза. При проектировании  $D$ -триггера, тактируемого перепадом 01, перечислим процедуры, выполняемые на этапе *абстрактного синтеза*.

1. Словесная формулировка алгоритма работы: триггер должен принимать и выдавать на своем выходе входные данные  $D$  только в момент действия перехода 01 на  $C$ -входе. Должны быть также предусмотрены асинхронные входы установки выхода триггера в ноль ( $R$ ) и установки в единицу ( $S$ ) как *вспомогательные входы*.

2. Составляем первичную таблицу переходов (табл. 3.21). Так как мы имеем два входа  $C$  и  $D$ , то сначала предполагаем, что на всех четырёх наборах потенциальных сигналов имеются свои *различные* состояния для выхода  $Q = 0$  и  $Q = 1$ , т.е. всего будет восемь отличающихся друг от друга состояний.

Таблица 3.21. Первичная таблица переходов для синхронного  $D$ -триггера (динамика)

Порядковый номер состояния	$CD$			
	00	01	10	11
1	(1), 0	3	5	× 7
2	(2), 1	4	5	× 7
3	1	(3), 0	× 6	8
4	2	(4), 1	× 6	8
5	1	3	(5), 0	7
6	2	4	(6), 1	8
7	1	3	5	(7), 0
8	2	4	6	(8), 1

Напомним, что переход в строке (всегда от устойчивого состояния!) говорит о смене входного набора  $CD$ , а переход в столбце (от неустойчивого к устойчивому состоянию!) говорит о переключениях внутри структуры триггера.

Среди двенадцати возможных переходов наборов  $CD$  ( $4 \cdot 3 = 12$ ) выделяются два перехода  $00 \rightarrow 11$  и  $01 \rightarrow 10$ , про которые можно сказать, что переменные  $C$  и  $D$  изменяются «одновременно», причём при этих переходах сигнал  $C$  является *активным*. Переходы  $10 \rightarrow 01$  и  $11 \rightarrow 00$  не надо относить к «одновременным», так как здесь сигнал  $C$  является *неактивным*, поэтому состояние выхода триггера не будет изменяться, несмотря на изменение сигнала  $D$ . В правильно разработанной синхронной цифровой системе «одновременного» изменения входных сигналов никогда не должно быть. Если же это имеет место, то поведение цифровой системы при таких переходах нас не интересует, именно поэтому в табл. 3.21 появились четыре символа  $\times$ . Чтобы сделать табл. 3.21 полностью определённой, остановимся на более подробном анализе ситуации «одновременного» переключения входных сигналов.

Пусть триггер используется при проектировании регистра. Регистр может выполнять две важнейшие микрооперации: приём параллельного входного кода и сдвиг данных. В режиме приёма входных данных в регистре хранения действительно возможно «одновременное» изменение  $C$ - и  $D$ -входов, если сигнал на  $D$ -входе является *асинхронным*, т.е. никак не привязан к системным тактовым сигналам. В этом случае можно разрешить триггеру вести себя в данной ситуации произвольным образом, что, возможно, позволит упростить его структуру за счёт минимизации не полностью определённых функций возбуждения.

В режиме сдвига в соседний разряд регистра записываются данные, действующие на  $D$ -входе *до прихода активного сигнала  $C$*  благодаря наличию задержки переключения триггера. Здесь над «одновременным» переключением следует понимать *последовательность событий*, т.е. сначала появляется активный перепад на тактовом входе  $C$ , а затем (через время, равное задержке переключения триггера) изменяется входной сигнал  $D$ . Именно поэтому в столбце  $CD = 10$  табл. 3.21 следует записать номер состояния 6 вместо символа  $\times$ , а в столбце  $CD = 11$  — состояние 7.

3. Оформляем диаграмму совместимых состояний. В данном случае она имеет вид, показанный на рис. 3.42.

Из диаграммы видно, что триггер имеет только четыре различных состояния внутренней структуры, откуда следует, что требуются две элементарные запоминающие ячейки. Фактически ответ на первый вопрос канонического метода синтеза получен, хотя полностью процедуры этапа абстрактного синтеза ещё не выполнены.

4. Оформляем сокращённую таблицу переходов (табл. 3.22), взяв в качестве различных состояния с номерами 1, 2, 3 и 4 из диаграммы совместимых состояний (см. рис. 3.42).

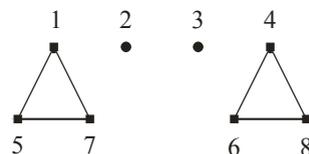


Рис. 3.42. Диаграмма совместимых состояний для  $D$ -триггера, тактируемого переходом 01

Таблица 3.22. Сокращённая таблица переходов

Порядковый номер состояния	$CD$			
	00	01	10	11
1	(1), 0	3	(1), 0	(1), 0
2	(2), 1	4	1	1
3	1	(3), 0	4	4
4	2	(4), 1	(4), 1	(4), 1

5. Оформляем граф переходов и кодируем внутренние переменные  $Q_1Q_2$ , применяя противогоночное соседнее кодирование (рис. 3.43). Набор  $Q_1Q_2$ , кодирующий состояние 1, принят равным 00, так как значение выхода триггера, в качестве которого используем выход ячейки  $Q_2$ , равен 0, а значение выхода ячейки  $Q_1$  безразлично (мы выбрали  $Q_1 = 0$ ). Как видно из рис. 3.43, в графе отсутствуют замкнутые циклы с нечётным числом переходов, поэтому соседнее кодирование полностью оправданно. На этом заканчивается выполнение процедур этапа абстрактного синтеза.

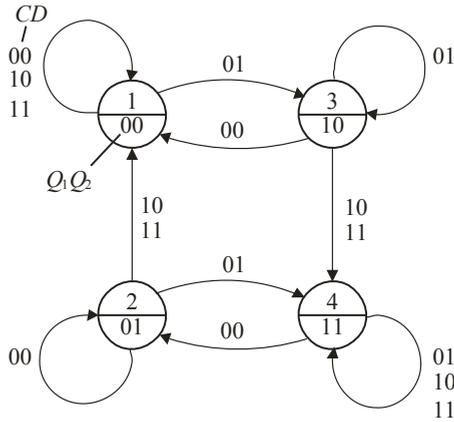


Рис. 3.43. Граф переходов *D*-триггера, тактируемого переходом 01

Таблица 3.23. Таблица переходов, учитывающая временные изменения всех внутренних переменных

Номер набора	$C^{t+1}$	$D^t$	$Q_1^t$	$Q_2^t$	$Q_1^{t+1}$	$Q_2^{t+1}$	$R_1^{*t+1}$	$S_1^{*t+1}$	$R_2^{*t+1}$	$S_2^{*t+1}$
0	0	0	0	0	0	0	×	1	×	1
1	0	0	0	1	0	1	×	1	1	×
2	0	0	1	0	1	0	0	1	×	1
3	0	0	1	1	1	1	0	1	1	×
4	0	1	0	0	0	0	1	0	×	1
5	0	1	0	1	0	1	1	0	1	×
6	0	1	1	0	1	0	1	×	×	1
7	0	1	1	1	1	1	1	×	1	×
8	1	0	0	0	0	0	×	1	×	1
9	1	0	0	1	0	0	×	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	×	1	0
11	1	0	1	1	1	1	1	×	1	×
12	1	1	0	0	0	0	×	1	×	1
13	1	1	0	1	0	0	×	1	0	1
14	1	1	1	0	1	1	1	×	1	0
15	1	1	1	1	1	1	1	×	1	×

Рассмотрим этап структурного синтеза.

1. В качестве логического базиса для элементарных запоминающих ячеек и комбинационных схем, реализующих их функции возбуждения, выбираем базис И-НЕ, чтобы в дальнейшем получить схему ИС, выпускаемую промышленностью.

2. Характеристическая таблица используемой элементарной запоминающей ячейки приведена в табл. 3.5.

3. Составляется таблица переходов, учитывающая временные изменения состояний внутренней структуры (табл. 3.23), на основе графа переходов и характеристической таблицы.

С помощью карт Карно (рис. 3.44) минимизируем выражение для  $Q_1^{t+1}$ ,  $Q_2^{t+1}$ ,  $R_1^{*t+1}$ ,  $S_1^{*t+1}$ ,  $R_2^{*t+1}$ ,  $S_2^{*t+1}$ :

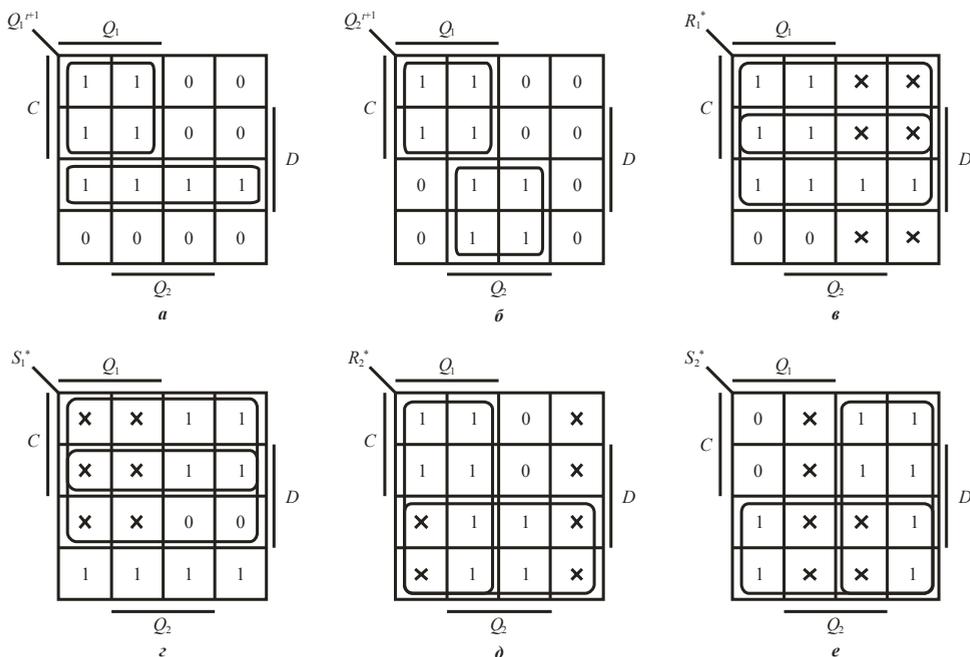


Рис. 3.44. Карты Карно для  $D$ -триггера, тактируемого переходом 01

$$Q_1^{t+1} = CQ_1 + \bar{C}D; \quad (3.44)$$

$$Q_2^{t+1} = CQ_1 + \bar{C}Q_2; \quad (3.45)$$

$$R_1^* = C + D = \overline{\bar{C} \cdot \bar{D}}; \quad (3.46)$$

$$S_1^* = C + \bar{D} = \overline{\bar{C}D}; \quad (3.47)$$

$$R_2^* = \bar{C} + Q_1 = \overline{C\bar{Q}_1}; \quad (3.48)$$

$$S_2^* = \bar{C} + \bar{Q}_1 = \overline{CQ_1} . \quad (3.49)$$

Схема  $D$ -триггера, определяемая уравнениями (3.44)–(3.49), приведена на рис. 3.45.

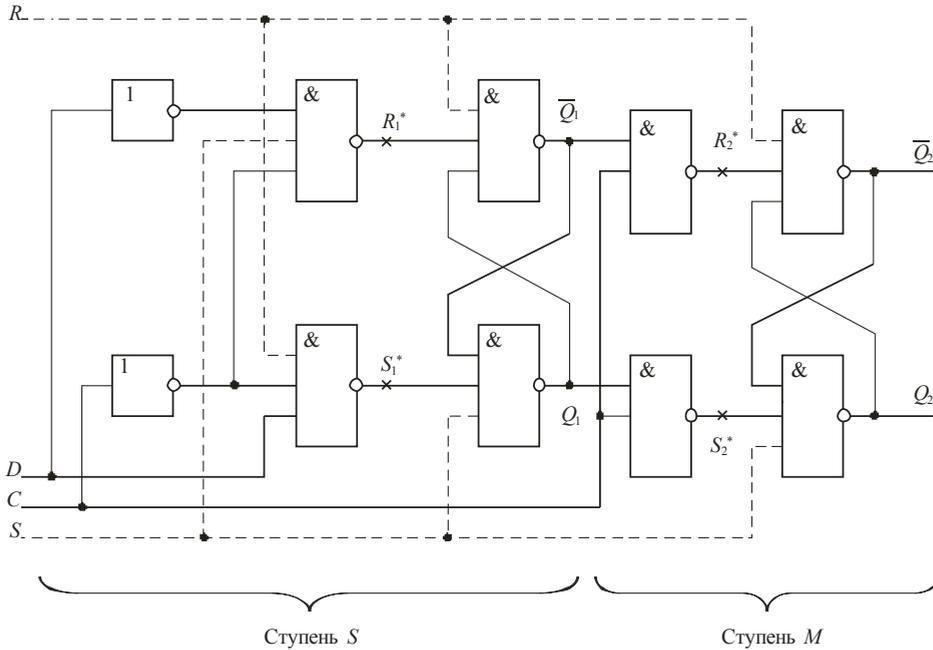


Рис. 3.45. Схема  $D$ -триггера, тактируемого переходом 01, в виде  $MS$ -структуры

Дополним эту схему асинхронными входами сброса  $R$  и установки  $S$ . Из уравнения (3.45) следует, что при наборах  $CD = 00$  или  $01$   $Q_2^{t+1} = Q_2^t$ , а при наборах  $CD = 10$  или  $11$   $Q_2^{t+1} = Q_1^t$ , поэтому, чтобы обнулить триггер при любом входном наборе  $CD$ , необходимо обнулить и ячейку  $Q_1$ , и ячейку  $Q_2$  (см. рис. 3.45, штриховые линии). Так как сигнал  $R$  асинхронный, то при  $C = 0, D = 1$  возможна запрещённая комбинация  $RS_1^* = 00$ . Для принудительного устранения такой ситуации подадим сигнал  $R$  на вход вентиля, реализующего сигнал  $S_1^*$ . Рассуждая аналогично, формируем цепи установки триггера в состоянии 1. Схема, приведённая на рис. 3.45, образует так называемую  **$MS$ -структуру** (*master* — хозяин, главный, основной; *slave* — раб, подчинённый, вспомогательный), содержащую основную и вспомогательные ступени, тактируемые **парафазным сигналом  $C$** .

Доопределив функцию  $R^*_1$  другим способом, можно записать

$$R^*_1 = C + \bar{C}D = C + \bar{S}_1^* = \overline{\bar{C}S_1^*} . \quad (3.50)$$

Такое преобразование устраняет инвертор, служащий для формирования  $D$ , в результате чего схема упрощается (рис. 3.46).

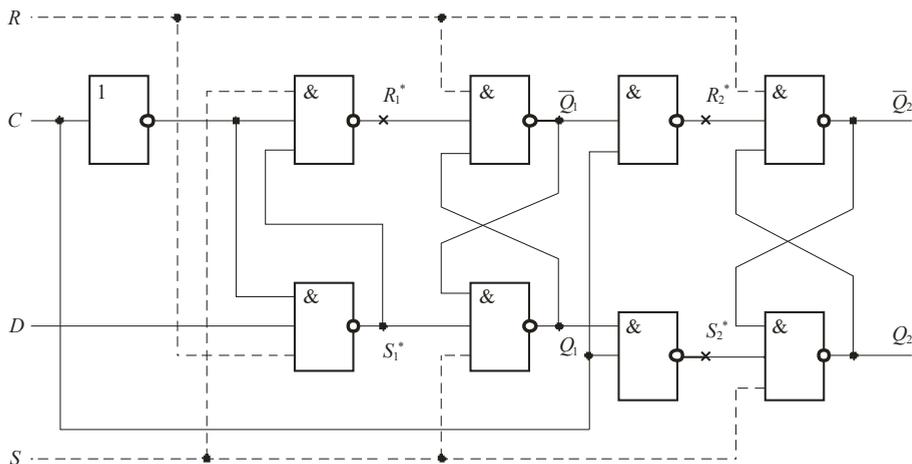


Рис. 3.46. Упрощенная схема  $D$ -триггера, тактируемого переходом 01

Доопределим  $R_1^*$  и  $S_1^*$  по-другому:

$$R_1^* = CQ_1 + \bar{C}D = \bar{S}_2^* + \bar{S}_1^* = \overline{S_2^* S_1^*}. \quad (3.51)$$

Следует обратить внимание, что при таком доопределении  $R_1^{*t+1} = Q_1^{t+1}$

$$S_1^* = C\bar{Q}_1 + \bar{D} = \bar{R}_2^* + \bar{D} = \overline{R_2^* D}. \quad (3.52)$$

Учитывая, что  $Q_1^t$  и  $Q_1^{t+1}$  — одна и та же точка схемы в разные моменты времени, подставим  $Q_1^{t+1}$ , определяемую формулой (3.44), в выражение (3.48) и, учитывая (3.47) и (3.49), получим

$$R_1^* = \bar{C} + CQ_1 + \bar{C}D = \bar{C} + \bar{S}_2^* + \bar{S}_1^* = \overline{CS_2^* S_1^*}. \quad (3.53)$$

Аналогично получаем

$$S_1^* = \bar{C} + C\bar{Q}_1 + \bar{C}D = \bar{C} + \bar{R}_2^* + \bar{R}_1^* = \overline{CR_2^* R_1^*}. \quad (3.54)$$

В уравнениях (3.51)–(3.54) нет в явном виде переменной  $Q_1$ . Она представлена косвенно через её функции возбуждения  $R_1^*$  и  $S_1^*$ .

Эти уравнения определяют структуру  $D$ -триггера, представленную на рис. 3.47.

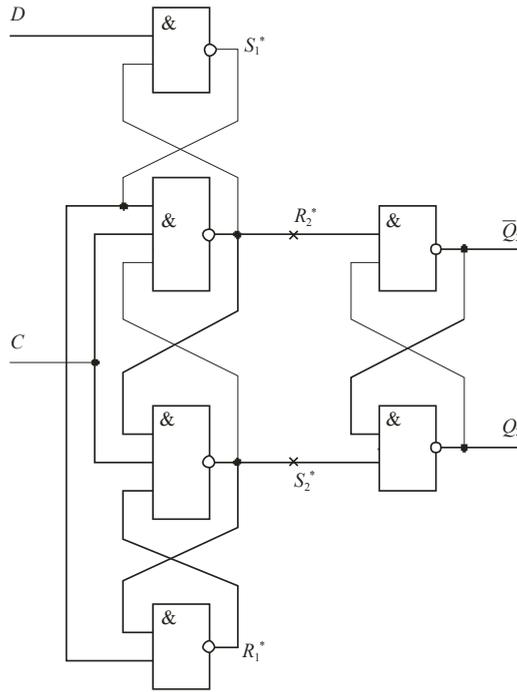


Рис. 3.47. Симметричная схема  $D$ -триггера, тактируемого переходом 01

Учитывая, что в уравнениях (3.51)–(3.54) переменная  $Q_2$  отсутствует, а ранее мы установили, что  $Q_1^{t+1} = R_1^{t+1}$ , представим часть схемы без элементарной запоминающей ячейки  $Q_2$  в виде цифрового блока, изображённого на рис. 3.48.



Рис. 3.48. Цифровой блок

С учётом сказанного таблица функционирования этого блока будет выглядеть так, как показано в табл. 3.24, в которой функции  $R_1^{*t+1}$ ,  $R_2^{*t+1}$  и  $S_2^{*t+1}$  представлены как полностью определённые соответственно по формулам  $R_1^* = CQ_1 + \bar{C}D$  (в этом случае  $R_1^* = Q_1$ );  $R_2^* = \bar{C} + Q_1$  и  $S_2^* = \bar{C} + \bar{Q}_1$ .

Таблица 3.24. Таблица функционирования логического блока

Номер набора	$C$	$D$	$R_1^{*t}$ ( $Q_1^t$ )	$R_1^{*t+1}$ ( $Q_1^{t+1}$ )	$R_2^{*t+1}$	$S_2^{*t+1}$
0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	0	1	1
2	0	1	0	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	1	0	0	0	0	1
5	1	0	1	1	1	0
6	1	1	0	0	0	1
7	1	1	1	1	1	0

Из табл. 3.24 видно, что этот цифровой блок устойчив и имеет четыре состояния. Представим его работу в виде графа переходов, изображённого на рис. 3.49. Переходы, отмеченные толстыми линиями, могут привести к опасным состязаниям, так как изменяется состояние двух сигналов. Для устранения состязаний направим эти выделенные дуги так, как показано штриховыми линиями. Окончательный граф для цифрового блока будет иметь вид, показанный на рис. 3.50.

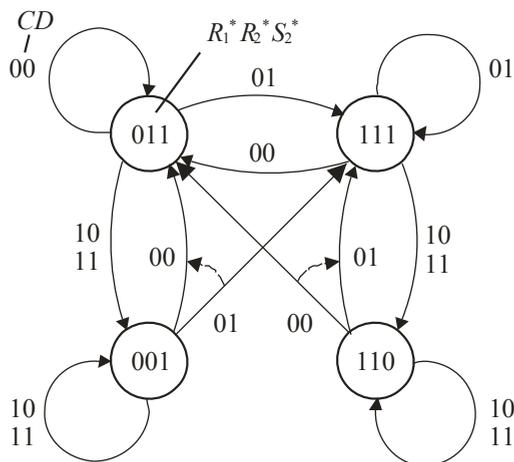


Рис. 3.49. Граф переходов цифрового блока

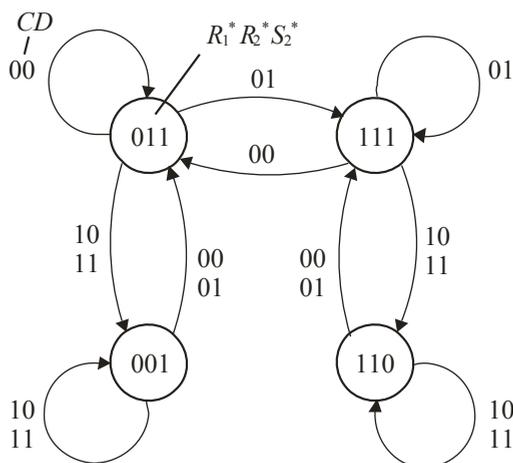


Рис. 3.50. Окончательный граф переходов цифрового блока

Отметим, что для случаев, когда на окончательном графе переходов в наборах  $CD$  изменяются обе переменные одновременно, позволим блоку вести себя произвольным образом, чтобы иметь возможность доопределять функции возбуждения рациональным способом, обеспечивающим минимальные уравнения. Напомним, что в правильно разработанном синхронном блоке такая ситуация никогда не должна возникать.

По окончательному графу переходов построим таблицу переходов, учитывающую изменения во времени (табл. 3.25), с учётом сделанного выше замечания (в табл. 3.25 символ \* соответствует ситуации, при которой переменные  $C$  и  $D$  изменяются одновременно).

Таблица 3.25. Таблица переходов, учитывающая изменения во времени

№ набора	$C^{t+1}$	$D^t$	$R_1^*$	$R_2^*$	$S_2^*$	$R_1^*$	$R_2^*$	$S_2^*$
0	0	0	0	0	0	×	×	×
1	0	0	0	0	1	*	*	*
2	0	0	0	1	0	×	×	×
3	0	0	0	1	1	0	1	1
4	0	0	1	0	0	×	×	×
5	0	0	1	0	1	×	×	×
6	0	0	1	1	0	*	*	*

Продолжение табл. 3.25

№ набора	$C^{t+1}$	$D^t$	$R_1^*$	$R_2^*$	$S_2^*$	$R_1^*$	$R_2^*$	$S_2^*$
7	0	0	1	1	1	0	1	1
8	0	1	0	0	0	×	×	×
9	0	1	0	0	1	*	*	*
10	0	1	0	1	0	×	×	×
11	0	1	0	1	1	1	1	1
12	0	1	1	0	0	×	×	×
13	0	1	1	0	1	×	×	×
14	0	1	1	1	0	*	*	*
15	0	1	1	1	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	×	×	×
17	1	0	0	0	1	0	0	1
18	1	0	0	1	0	×	×	×
19	1	0	0	1	1	0	0	1
20	1	0	1	0	0	×	×	×
21	1	0	1	0	1	×	×	×
22	1	0	1	1	0	1	1	0
23	1	0	1	1	1	*	*	*
24	1	1	0	0	0	×	×	×
25	1	1	0	0	1	0	0	1
26	1	1	0	1	0	×	×	×
27	1	1	0	1	1	*	*	*

Окончание табл. 3.25

№ набора	$C^{t+1}$	$D^t$	$R_1^*$	$R_2^*$	$S_2^*$	$R_1^*$	$R_2^*$	$S_2^*$
28	1	1	1	0	0	×	×	×
29	1	1	1	0	1	×	×	×
30	1	1	1	1	0	1	1	0
31	1	1	1	1	1	1	1	0

Используя карты Карно (рис. 3.51), минимизируем выражения для  $R_1^{*t+1}$ ,  $R_2^{*t+1}$  и  $S_2^{*t+1}$ :

3

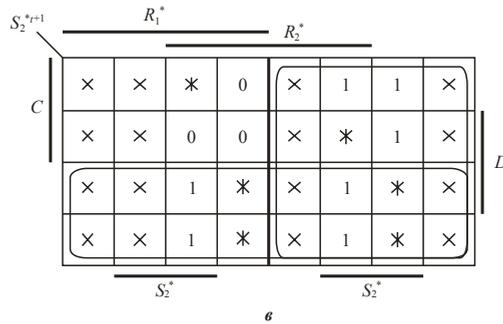
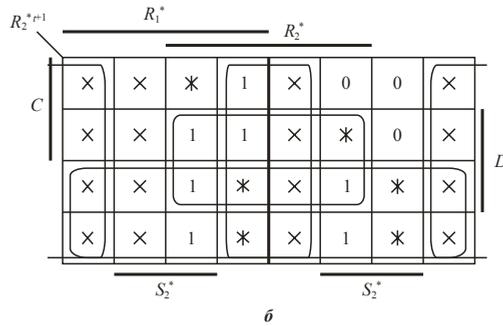
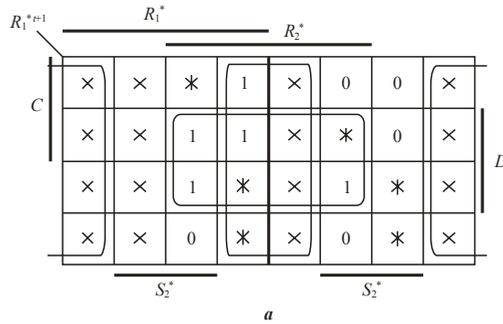


Рис. 3.51. Карты Карно для цифрового блока

$$R_1^{*t+1} = \overline{S_2^*} + DR_2^* = \overline{S_2^* DR_2^*} = \overline{S_2^* S_1^*}; \quad (3.55)$$

$$R_2^{*t+1} = \overline{C} + \overline{S_2^*} + DR_2^* = \overline{CS_2^* DR_2^*} = \overline{CS_2^* S_1^*}; \quad (3.56)$$

$$S_2^{*t+1} = \overline{C} + \overline{R_1^*} = \overline{CR_1^*}. \quad (3.57)$$

Схема, построенная по формулам (3.52), (3.55)–(3.57) и дополненная входами установки в 0 и 1, приведена на рис. 3.52.

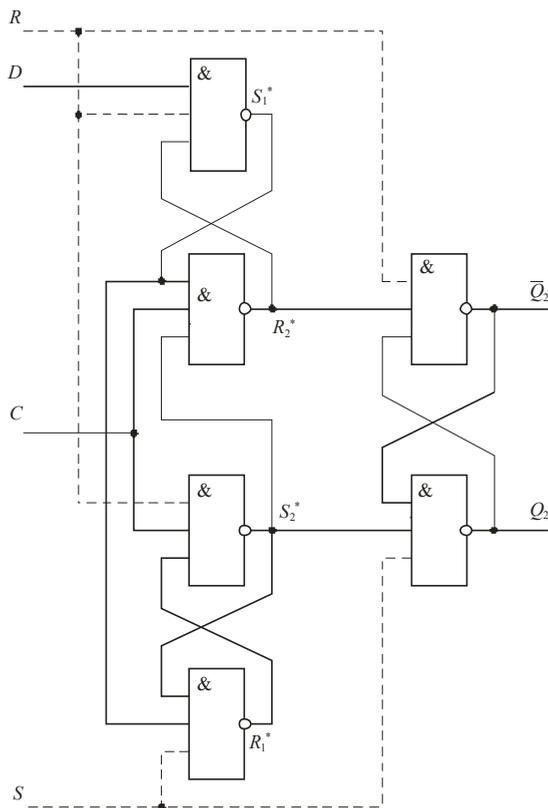


Рис. 3.52. Окончательная схема  $D$ -триггера, тактируемого переходом 01

Достоинством данной схемы является то, что она чисто противогоночная и допускает для всех её вентилях любые сочетания задержек распространения сигналов, а все её элементы переключаются строго один за другим. Поэтому по данной схеме выполняются ИС  $D$ -триггеров и она широко применяется в качестве библиотечного элемента БМК, когда нет возможности нормировать минимальные задержки распространения сигнала.

Часто при использовании данного триггера в качестве библиотечного элемента БМК требуется реализовать логические операции И и ИЛИ по входу  $D$ . Операция И легко реализуется увеличением числа входов  $D$  у соответствующего

вентиля, причём без увеличения задержки распространения сигнала по входу  $D$ . Если же надо реализовать функцию ИЛИ для нескольких входов  $D_i$ , например  $D = D_1 + D_2 + D_3$ , то тогда можно реализовать логическую операцию ИЛИ без увеличения задержки распространения сигнала по входу  $D$ , но с увеличением аппаратных затрат. Учитывая, что  $D = D_1 + D_2 + D_3$ , из (3.52), (3.55) и (3.56) следует

$$S_1^* = \overline{DR_2^*} = \overline{(D_1 + D_2 + D_3)R_2^*} = \overline{D_1R_2^*} \cdot \overline{D_2R_2^*} \cdot \overline{D_3R_2^*};$$

$$y = f(x_2; x_1; x_0);$$

$$R_2^* = \overline{CS_2^*S_1^*} = \overline{CS_2^*D_1R_2^* \cdot D_2R_2^* \cdot D_3R_2^*}.$$

Схема будет иметь вид, представленный на рис. 3.53.

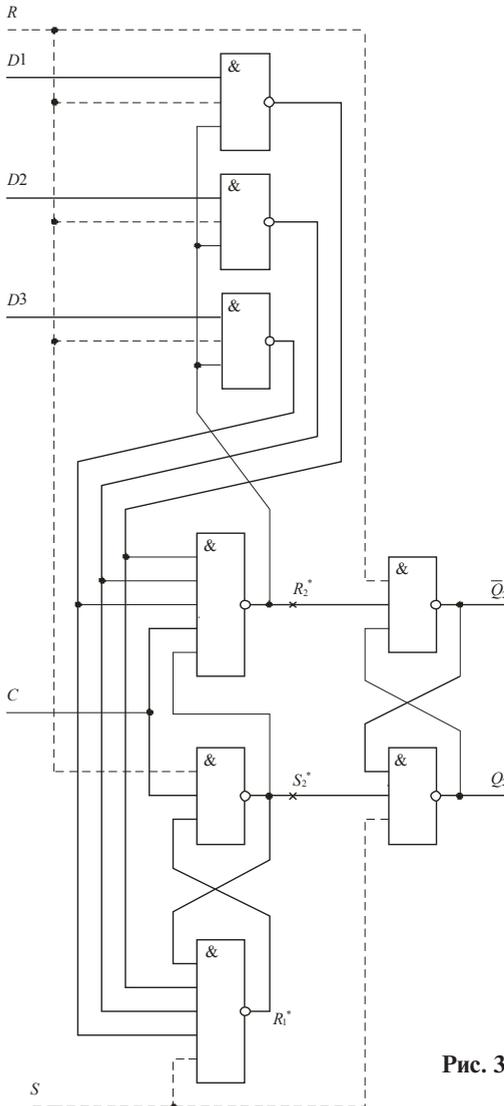


Рис. 3.53. Схема  $D$ -триггера с логикой ИЛИ по входу  $D$

Функциональное обозначение  $D$ -триггера, выполненного по схеме рис. 3.52, приведено на рис. 3.54, а его характеристической таблицей является табл. 3.26.

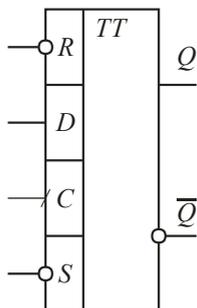


Рис. 3.54. Функциональное обозначение  $D$ -триггера

Таблица 3.26. Характеристическая таблица  $D$ -триггера

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	$D^t$
00	0
01	1
10	0
11	1

Активный переход на С-входе:

### 3.1.6.5. Произвольные триггерные структуры на базе универсальных $D$ - и $JK$ -триггеров

В инженерной практике часто требуется разработать триггерное устройство, закон функционирования которого не обеспечивается типовыми триггерами. В этом случае требуемую структуру можно получить на базе комбинационной схемы и универсального триггера. Комбинационная схема преобразует входные сигналы требуемого триггерного устройства в функции возбуждения информационного входа  $D$  при использовании универсального  $D$ -триггера либо функциональных входов  $J$  и  $K$  при использовании универсального  $JK$ -триггера. Рассмотрим два примера.

*Пример 1.* Необходимо разработать тактируемый переходом 01 двухвходовый триггер, функционирующий в соответствии с табл. 3.27. Комбинационную часть схемы следует выполнить в базе ИЛИ-НЕ.

Таблица 3.27. Закон функционирования произвольного триггерного устройства

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	$D^t$
00	0
01	1
10	0
11	1

Активный переход на С-входе:

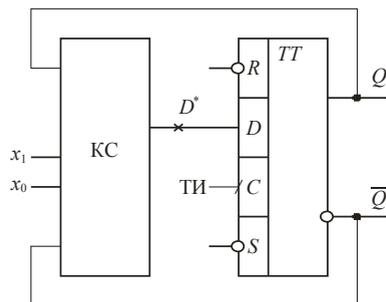


Рис. 3.55. Структурная схема произвольного триггерного устройства на  $D$ -триггере

Чтобы обеспечить требуемый тактирующий переход, выбираем универсальный  $D$ -триггер. Структурную схему триггерного устройства в общем виде представим так, как показано на рис. 3.55. По табл. 3.27 оформляем таблицу переходов (табл. 3.28), учитывающую временные изменения.

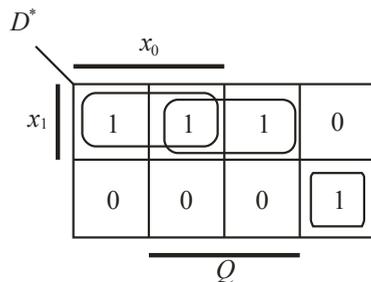
**Таблица 3.28.** Таблица переходов произвольного триггерного устройства

Номер набора	$x_1^t$	$x_0^t$	$Q^t$	$Q^{t+1} = D^t$
0	0	0	0	1
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	0
4	1	0	0	0
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	1

Синтез триггерного устройства заключается в построении комбинационной схемы в заданном базисе, вырабатывающей сигнал  $D^* = f(x_1^t; x_0^t \text{ и } Q^t)$ , обеспечивающий требуемый закон функционирования (см. рис. 3.55).

Из карты Карно (рис. 3.56) следует:

$$D^* = x_1 x_0 + x_1 Q + \overline{x_1} \overline{x_0} \overline{Q} = x_1 x_0 + x_1 Q + \overline{x_1} \overline{x_0} \overline{Q} = x_1 x_0 \cdot \overline{x_1} \overline{x_0} \overline{Q}.$$



**Рис. 3.56.** Карта Карно для функции возбуждения  $D^*$

Окончательная схема триггерного устройства представлена на рис. 3.57.

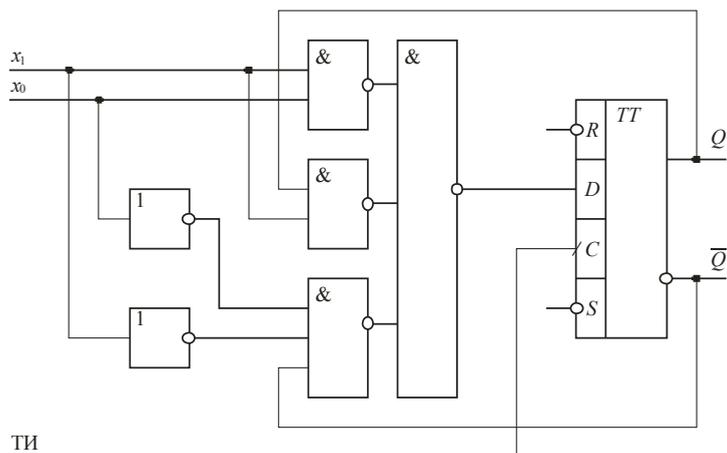


Рис. 3.57. Схема триггерного устройства на D-триггере

*Примечание.* Если входы  $R$  и  $S$  не используются по назначению, то на них надо подать уровень логической 1.

*Пример 2.* Необходимо разработать тактируемый переходом 10 трёхходовый триггер, функционирующий в соответствии с табл. 3.29.

Таблица 3.29. Закон функционирования произвольного трёхходового триггерного устройства

$x_2^t$	$x_1^t$	$x_0^t$	$Q^{t+1}$
0	0	0	1
0	0	1	$\bar{Q}^t$
0	1	0	×
0	1	1	0
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	0	$Q^t$
1	1	1	0

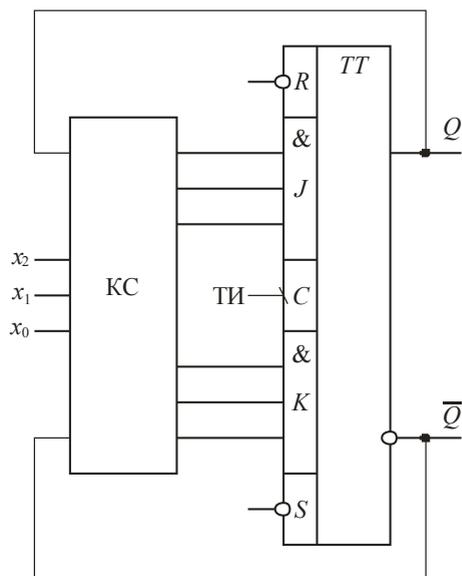


Рис. 3.58. Структурная схема произвольного триггерного устройства на JK-триггере

Комбинационную часть схемы следует выполнить на произвольных логических элементах. Чтобы обеспечить требуемый тактирующий переход, в качестве

триггера выбираем универсальный  $JK$ -триггер. Структурную схему триггерного устройства в общем виде представим так, как показано на рис. 3.58.

По табл. 3.29 оформляем таблицу переходов (табл. 3.30), учитывающую временные изменения. Синтез триггерного устройства заключается в построении комбинационной схемы, вырабатывающей сигналы  $J^* = f_1(x_2^t; x_1^t; x_0^t; Q^t)$  и  $K^* = f_2(x_2^t; x_1^t; x_0^t; Q^t)$ . При заполнении табл. 3.30 использовалась также табл. 3.20.

**Таблица 3.30.** Таблица переходов

Номер набора	$x_2^t$	$x_1^t$	$x_0^t$	$Q^t$	$Q^{t+1}$	$J^t$	$K^t$
0	0	0	0	0	1	1	×
1	0	0	0	1	1	×	0
2	0	0	1	0	1	1	×
3	0	0	1	1	0	×	1
4	0	1	0	0	×	×	×
5	0	1	0	1	×	×	×
6	0	1	1	0	0	0	×
7	0	1	1	1	0	×	1
8	1	0	0	0	×	×	×
9	1	0	0	1	×	×	×
10	1	0	1	0	0	0	×
11	1	0	1	1	1	×	0
12	1	1	0	0	0	0	×
13	1	1	0	1	1	×	0
14	1	1	1	0	0	0	×
15	1	1	1	1	0	×	1

Рассмотрим карты Карно (рис. 3.59).

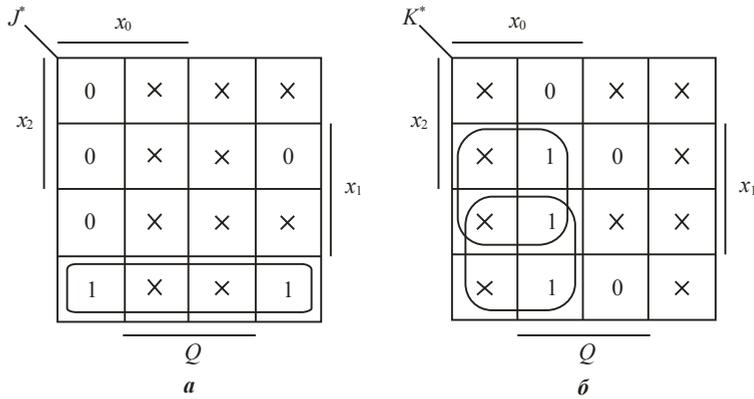


Рис. 3.59. Карты Карно для функций возбуждения  $J^*$ ,  $K^*$

Из карт Карно (рис. 3.59) следует:

$$J^{*t} = \bar{x}_2 \bar{x}_1;$$

$$K^{*t} = x_1 x_0 + \bar{x}_2 x_0.$$

Окончательная схема триггерного устройства представлена на рис. 3.60 (см. также примечание к примеру 1).

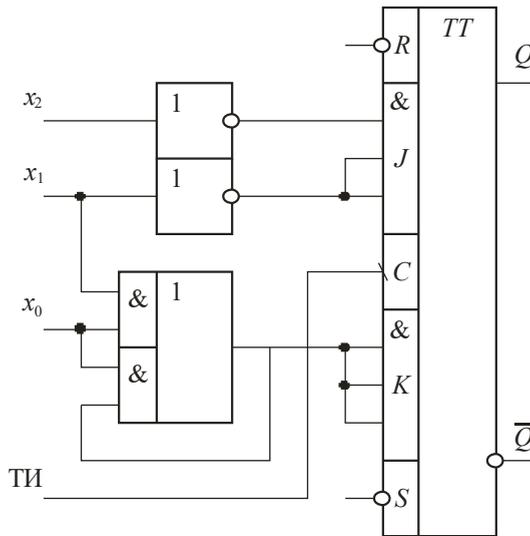


Рис. 3.60. Схема триггерного устройства на  $JK$ -триггере

## 3.2. Лабораторное задание

Синтезировать триггерные устройства, заданные в индивидуальном задании.

### 3.2.1. Пример индивидуального задания

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 1$ ,  $E_S = 0$ .

2. Используя  $D$ - и  $JK$ -триггеры, синтезировать два многовыходовых триггера, которые функционируют согласно табл. 3.31. Построить временные диаграммы, избегая состояний « $\times$ ».

3. В среде САПР БИС «Ковчег 3.04» разработать заданные триггерные устройства как отдельные подсхемы. Создать общую схему, объединяющую в себе разработанные подсхемы. Выполнить логическое моделирование. Сравнить полученные диаграммы с рассчитываемыми.

3

Таблица 3.31. Закон функционирования триггерного устройства

Входы			Выход
$x_2$	$x_1$	$x_0$	$Q^{t+1}$
0	0	0	$\overline{Q^t}$
0	0	1	0
0	1	0	$\times$
0	1	1	0
1	0	$\times$	$\times$
1	1	0	1
1	1	1	$Q^t$

### 3.2.2. Порядок выполнения работы на примере выполнения индивидуального задания

В соответствии с заданием *синтезируем в базисе ИЛИ-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 1$ ,  $E_S = 0$ .*

Структурная схема разрабатываемого триггерного устройства показана на рис. 3.61. На ней изображён классический  $RS$ -триггер в базисе ИЛИ-НЕ и комбинационная схема (КС), управляющая этим  $RS$ -триггером. Фактически для решения задачи необходимо синтезировать эту комбинационную схему.

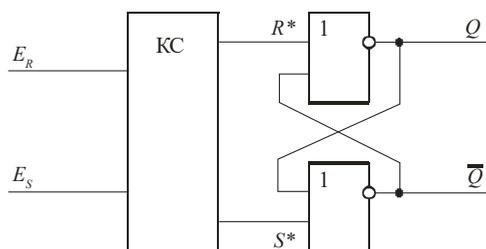


Рис. 3.61. Структурная схема триггерного устройства

Для решения построим таблицу переходов триггерного устройства (табл. 3.32). Левая часть таблицы заполняется перечислением всех возможных наборов. Для заполнения столбца  $Q^{+1}$  сначала определим режимы работы триггера (они перечислены в правой части таблицы). Для этого воспользуемся табл. 3.33, в которой перечислены режимы работы триггера в зависимости от его типа и уровней сигналов, поданных на его информационные входы. Самыми последними заполняются столбцы  $R^*$  и  $S^*$ . Для этого используют заполненные столбцы  $Q^i$  и  $Q^{i+1}$  и характеристическую таблицу для  $RS$ -триггера в базе ИЛИ-НЕ (табл. 3.34).

**Таблица 3.32.** Таблица переходов для  $E$ -триггера

№ набора	$E_R$	$E_S$	$Q^i$	$Q^{+1}$	$R^*$	$S^*$	Режимы работы $RS$ -триггера
0	0	0	0	1	0	1	Установка
1	0	0	1	1	0	×	
2	0	1	0	0	×	0	Хранение
3	0	1	1	1	0	×	
4	1	0	0	0	×	0	Хранение ( $E$ - $TG$ )
5	1	0	1	1	0	×	
6	1	1	0	0	×	0	Сброс
7	1	1	1	0	1	0	

**Таблица 3.33.** Режимы работы триггера

$E_R$	$E_S$	Режимы работы $RS$ -триггера
Неактивный	Неактивный	Хранение ( $Q^{+1} = Q^i$ )
Неактивный	Активный	Установка ( $Q^{+1} = 1$ )
Активный	Неактивный	Сброс ( $Q^{+1} = 0$ )
Активный	Активный	$RS$ - $TG$ : запрещённый набор $R$ - $TG$ : сброс ( $Q^{+1} = 0$ ) $S$ - $TG$ : установка ( $Q^{+1} = 1$ ) $E$ - $TG$ : хранение ( $Q^{+1} = Q^i$ )

**Таблица 3.34.** Характеристическая таблица для  $RS$ -триггера в базе «ИЛИ-НЕ»

$Q^i \rightarrow Q^{+1}$		$R^*$	$S^*$
0	0	×	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	×

Минимизируем функции  $R^*$  и  $S^*$  с использованием карт Карно. Рабочие карты с выбранными покрытиями для  $R^*$  показаны на рис. 3.62.

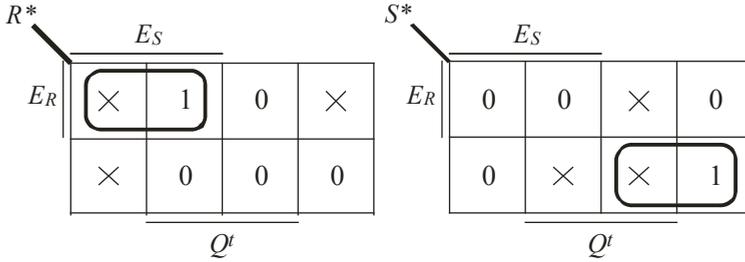


Рис. 3.62. Карты Карно с выбранными покрытиями для  $R^*$  и  $S^*$

В результате минимизации получаем аналитические выражения для  $R^*$  и  $S^*$ :

$$R^* = E_R \cdot E_S,$$

$$S^* = \overline{E_R} \cdot \overline{E_S}.$$

Так как требуется синтезировать схему в базисе ИЛИ-НЕ, то полученные выражения преобразуем в этот базис, используя правило Де-Моргана:

$$R^* = \overline{\overline{E_R \cdot E_S}} = \overline{\overline{E_R} + \overline{E_S}},$$

$$S^* = \overline{\overline{\overline{E_R} \cdot \overline{E_S}}} = \overline{\overline{E_R} + E_S}.$$

Используя полученные выражения, нарисуем схему искомого  $E$ -триггера (рис. 3.63).

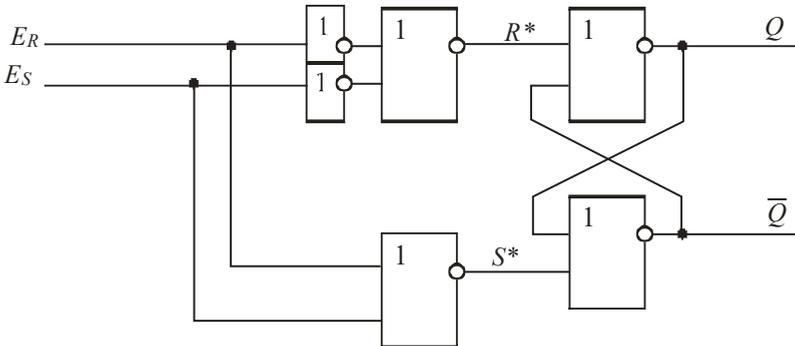


Рис. 3.63. Схема  $E$ -триггера в базисе ИЛИ-НЕ

Построим временную диаграмму работу спроектированного  $E$ -триггера (рис. 3.64).

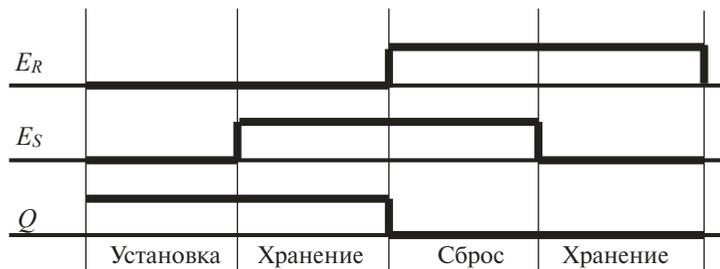


Рис. 3.64. Временная диаграмма работы  $E$ -триггера

Выполним вторую часть индивидуального задания. *Используя  $D$ - и  $JK$ -триггеры, синтезируем два многоходовых триггера, которые функционируют согласно табл. 3.31. Оформим их как отдельные подсистемы.*

Для решения задачи нужно синтезировать комбинационные схемы, управляющие работой  $D$ -триггера и  $JK$ -триггера. Структурная схема проектируемого триггерного устройства, основанная на  $D$ -триггере, показана на рис. 3.65, основанная на  $JK$ -триггере, — на рис. 3.66.

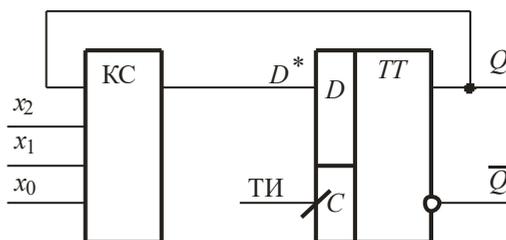


Рис. 3.65. Структурная схема триггерного устройства, основанная на  $D$ -триггере

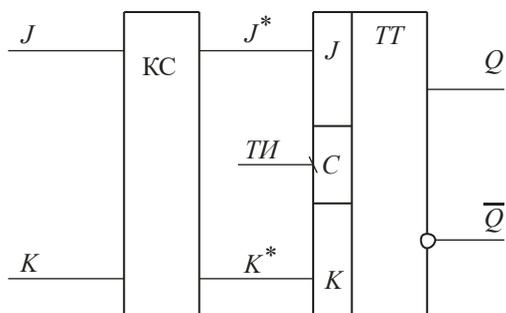


Рис. 3.66. Структурная схема триггерного устройства, основанная на  $JK$ -триггере

В соответствии с индивидуальным заданием заполним таблицу переходов для  $D$ - и  $JK$ -триггера (табл. 3.35). Левая половина таблицы (до двойной вертикальной черты) перечисляет все возможные состояния переменных  $x_2, x_1, x_0, Q$ . Используя индивидуальное задание и анализируя значения переменных  $x_2, x_1, x_0$ , заполняем столбец «Режим работы». Зная режим работы, легко заполнить столбец  $Q^{t+1}$ .

Согласно характеристической таблице для  $D$ -триггера  $D^* = Q^{t+1}$ , поэтому для  $D^*$  не будем заполнять отдельные колонки. Столбцы  $J^*$  и  $K^*$  заполняются с использованием характеристической таблицы для  $JK$ -триггера (табл. 3.36).

**Таблица 3.35.** Таблица переходов многовходового триггера

Номер набора	$x_2$	$x_1$	$x_0$	$Q^t$	$Q^{t+1}$ $D^*$	$J^*$	$K^*$	Режим работы
0	0	0	0	0	1	1	×	$\overline{Q^t}$
1	0	0	0	1	0	×	1	
2	0	0	1	0	0	0	×	0
3	0	0	1	1	0	×	1	
4	0	1	0	0	×	×	×	×
5	0	1	0	1	×	×	×	
6	0	1	1	0	0	0	×	0
7	0	1	1	1	0	×	1	
8	1	0	0	0	×	×	×	×
9	1	0	0	1	×	×	×	
10	1	0	1	0	×	×	×	×
11	1	0	1	1	×	×	×	
12	1	1	0	0	1	1	×	1
13	1	1	0	1	1	×	0	
14	1	1	1	0	0	0	×	$Q^t$
15	1	1	1	1	1	×	0	

**Таблица 3.36.** Характеристическая таблица  $JK$ -триггера

$Q^t \rightarrow Q^{t+1}$	$J^*$	$K^*$
0 → 0	0	×
0 → 1	1	×
1 → 0	×	1
1 → 1	×	0
C: 1 → 0		

Перенесём на карты Карно столбцы  $D^*$  (рис. 3.67, а),  $J^*$  (рис. 3.6.7, б) и  $K^*$  (рис. 7, в) и минимизируем эти функции алгебры логики.

В результате минимизации получаем

$$D^* = x_2 Q + x_0 \overline{Q};$$

$$J^* = \overline{x_0};$$

$$K^* = \overline{x_2}.$$

Оказалось, что полученные выражения не зависят от переменной  $x_1$ . Студентам рекомендуется самостоятельно проанализировать табл. 3.31 и убедиться в справедливости этого.

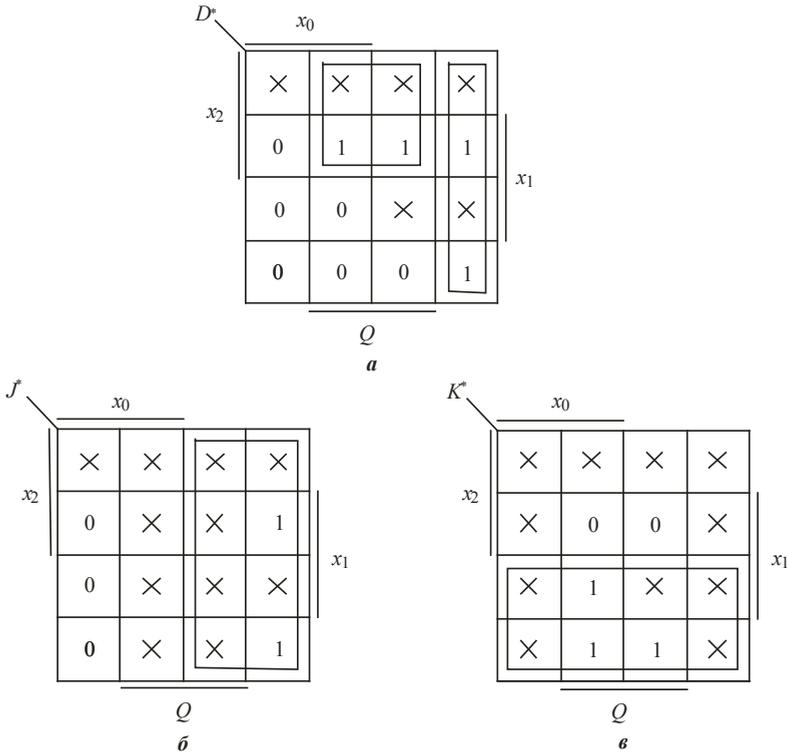


Рис. 3.67. Карты Карно: *a* — для  $D^*$ ; *b* — для  $J^*$ ; *v* — для  $K^*$

По полученным выражениям строим схемы, которые показаны на рис. 3.68 и 3.69 (для  $D$ - и  $JK$ -триггеров соответственно).

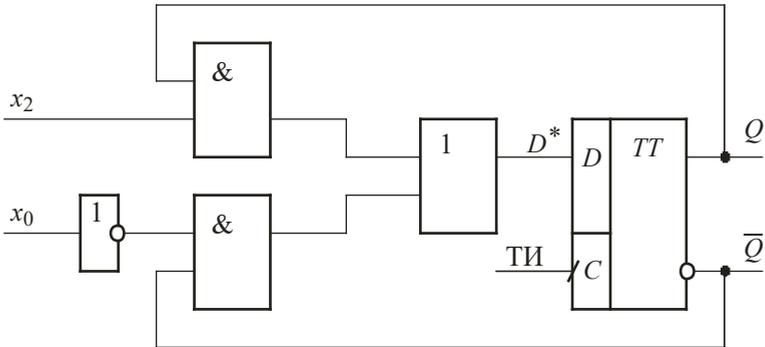


Рис. 3.68. Схема триггерного устройства, построенная с использованием  $D$ -триггера

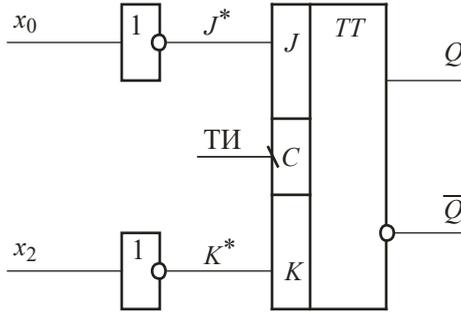


Рис. 3.69. Схема триггерного устройства, построенная с использованием  $JK$ -триггера

3

Построим временные диаграммы работы спроектированных триггерных устройств. При построении следует учитывать, что активным перепадом на входе тактирования у  $JK$ -триггера является переход из единицы в нуль, а у  $D$ -триггера, наоборот, — из нуля в единицу. Следует иметь в виду, что в тот момент, когда на тактовом входе триггера происходит активный перепад тактового импульса (ТИ), сигналы на других входах триггера не должны переключаться, а должны быть определены. Учитывая указанные ограничения, строим временные диаграммы. Сигналы  $x_2$ ,  $x_1$  и  $x_0$  могут принимать произвольные значения. Выход триггерного устройства  $Q$  должен изменять своё значение в соответствии с индивидуальным заданием. Полученные диаграммы представлены для  $D$ -триггера на рис. 3.70, для  $JK$ -триггера — на рис. 3.71.

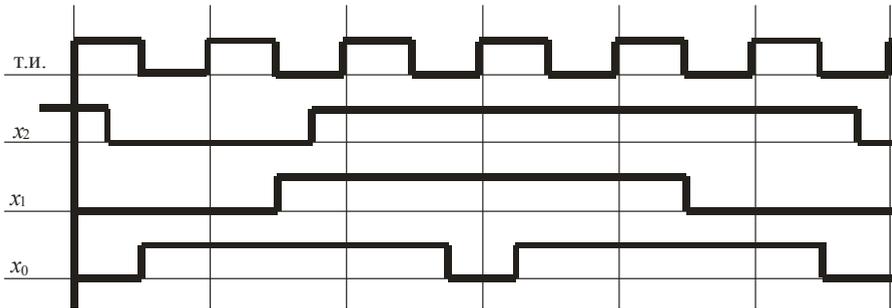


Рис. 3.70. Временная диаграмма триггерного устройства, основанная на  $D$ -триггере

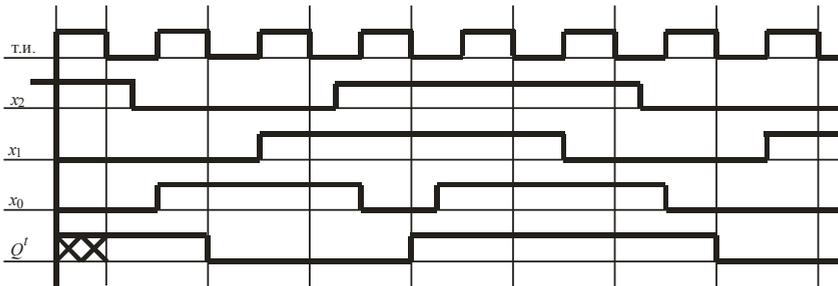


Рис. 3.71. Временная диаграмма триггерного устройства, основанная на  $JK$ -триггере

Приступаем к практической части — разработке схемы и получению временных диаграмм в САПР БИС «Ковчег 3.04».

При разработке реальных проектов микросхем, как правило, возникает необходимость создания подсхем (составных частей схем), которые можно будет затем многократно использовать при разработке других проектов. Именно это и предлагается опробовать при выполнении данной лабораторной работы. Для этого далее создадим три подсхемы, реализующие три триггерных устройства (рис. 3.63 — для задания 1 и рис. 3.68, рис. 3.69 — для задания 2).

Запустите программу (кнопка **Пуск** → Все программы → НПК «Технологический центр» → *Kovcheg5503* → *Kovcheg*), создайте новый проект «lab3», как это описано в лабораторной работе 2. Создание каждой из подсхем начнём с помощью команды «Создать схему» с выбором подпункта «Графический формат» (рис. 3.72).

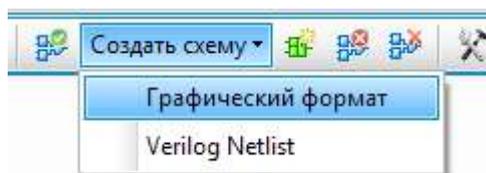


Рис. 3.72. Создание схемы в графическом формате

При создании подсхемы необходимо указать её имя. На рис. 3.73 показан пример создания схемы с именем *RS\_TRIGGER*.

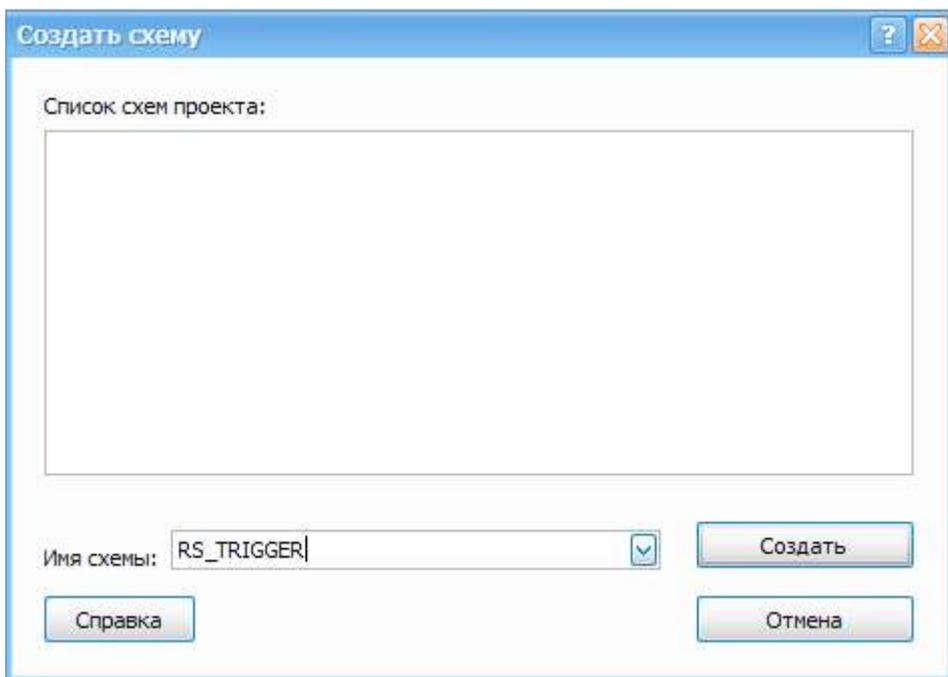


Рис. 3.73. Задание имени создаваемой схемы

После этого открывается окно графического схемного редактора с именем создаваемой схемы. Не забывая про входные и выходные порты, создадим схемы триггерных устройств. Результат реализации схемы  $E$ -триггера (рис. 3.63) в САПР БИС «Ковчег 3.04» представлен на рис. 3.74, схемы триггерных устройств, построенных с использованием  $D$ -триггера (рис. 3.68) и с использованием  $JK$ -триггера (рис. 3.69) — соответственно на рис. 3.75 и рис. 3.76. Название применённых ячеек указано под их графическим образом. При создании схемы с использованием  $JK$ -триггера (рис. 3.76) применена ячейка  $JK$ -триггера, тактируемая не спадающим, а возрастающим фронтом тактового сигнала. Это сделано для того, чтобы при подаче одинаковых воздействий на схемы с использованием  $D$ - и  $JK$ -триггеров, на временной диаграмме при моделировании были сформированы одинаковые сигналы с выходов триггеров (при правильно работающих схемах). В случае их расхождения, очевидно, допущена ошибка.

После завершения создания схемы выполним автоматическую нумерацию УГО с помощью команды «Автоматически нумеровать УГО» в меню «Редактор» либо по нажатию комбинации клавиш  $CTRL-D$  для удаления текущей нумерации, если такая имелась, а затем  $CTRL-A$  для создания новой автоматической нумерации.

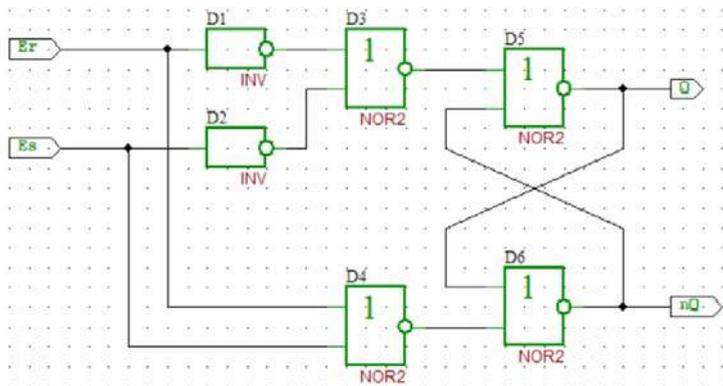


Рис. 3.74. Схема реализуемого  $E$ -триггера

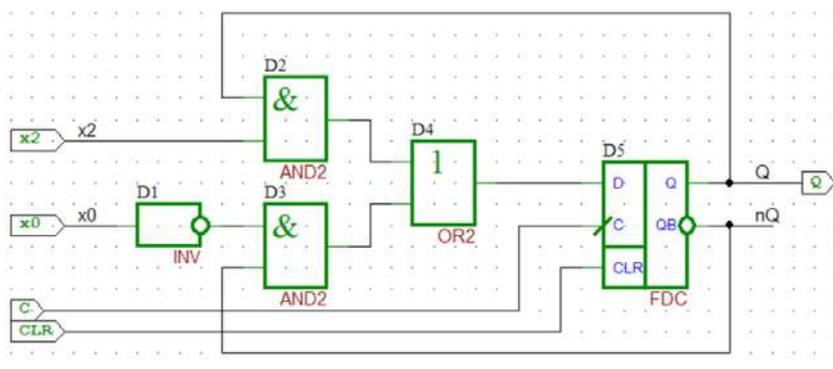


Рис. 3.75. Триггерное устройство на базе  $D$ -триггера

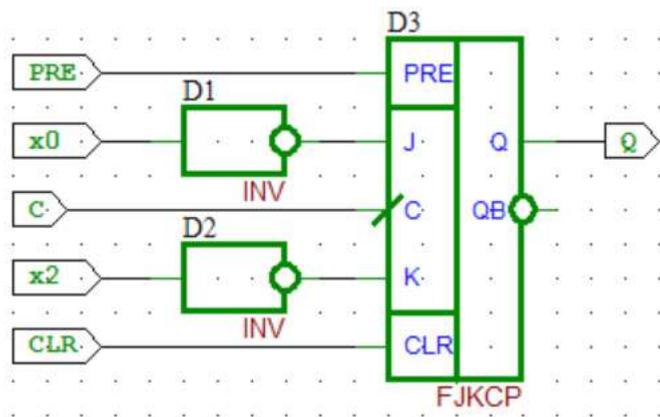


Рис. 3.76. Триггерное устройство на базе JK-триггера

Необходимо добиться, чтобы трансляция схем (при нажатии клавиши *F12*) проходила без ошибок. В общем случае для каждой разработанной подсхемы должны быть разработаны тесты и контрольные точки, а также выполнено моделирование с проверкой результата. Только в этом случае можно считать, что схема готова к дальнейшему использованию и из неё можно сформировать подсхему со своим УГО. В данной лабораторной работе выполним моделирование и проверку правильности функционирования подсхем на уровне головной схемы проекта. Для этого для каждой из нарисованных схем необходимо выполнить операцию создания УГО с помощью команды «Создать УГО» в выпадающем меню при нажатии правой кнопки мыши на имени подсхемы во вкладке «Схемы» области панелей быстрого доступа, как показано на рис. 3.77. При этом автоматически формируется графический образ создаваемого УГО (рис. 3.78), который можно отредактировать, например, изменив порядок следования входных или выходных портов.

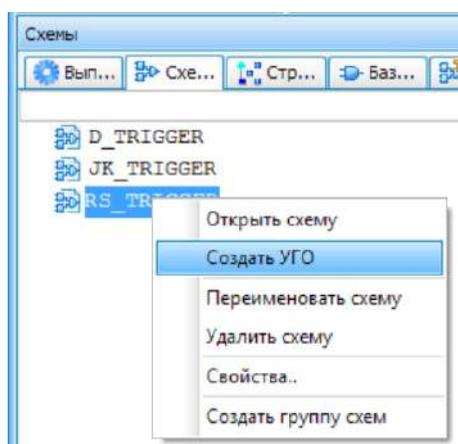


Рис. 3.77. Создание УГО

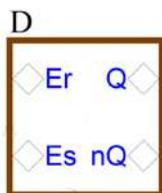


Рис. 3.78. Редактирование УГО

После того как для всех разработанных подсхем будут сохранены свои УГО, создадим общую схему с именем головной схемы *MAIN*, заданным при создании проекта. Это будет схема верхнего уровня. После её создания для использования в ней ранее созданных УГО подсхем из меню «Разместить» нужно выбрать команду «Подсхема из проекта...» или нажать на панели инструментов соответствующую кнопку. Готовая схема представлена на рис. 3.79.

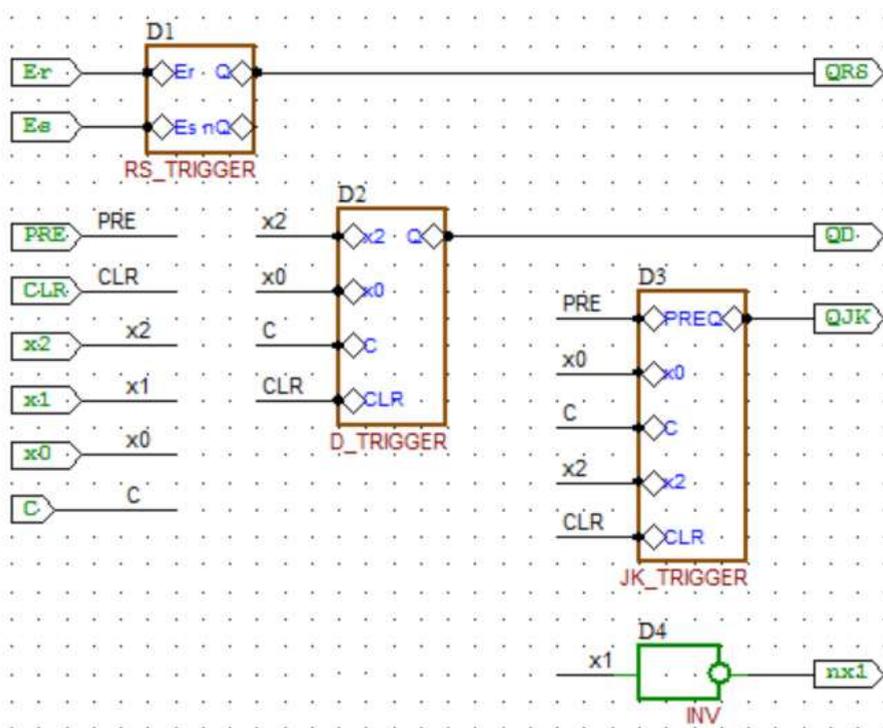


Рис. 3.79. Головная схема, использующая подсхемы проекта

Обратим внимание, что в соответствии с заданием должны использоваться сигналы  $x_2$ ,  $x_1$ ,  $x_0$ , для которых в схеме предусмотрены входные порты. Однако в процессе синтеза схем выяснилось, что схемы не зависят от сигнала  $x_1$ . Трансляция схемы (нажатием клавиши *F12*) будет приводить к неустраняемой ошибке, связанной с тем, что  $x_1$  в схеме не используется. Поэтому необходимо либо удалить входной порт  $x_1$ , либо ввести избыточный инвертор *D4*, выход которого

подадим на выходной порт *ix1*, т.к. все входные порты в проекте должны быть использованы. Такой способ решения проблемы применён в учебных целях для понимания процесса. Безусловно, при реализации реальных проектов следует исключать неиспользуемые цепи из схем.

Создадим перечень контрольных точек, как показано на рис. 3.80.

```

MAIN.SHM * MAIN.zkt
1  "Триггерные устройства"
2
3  Задание1, Задание2;
4
5  Задание1: Er, Es, QRS;
6
7  Задание2: C, x2, x1, x0, QD, QJK;
8

```

Рис. 3.80. Контрольные точки

Зададим тестовые воздействия, как показано на рис. 3.81, в соответствии с тестами, приведенными на рис. 3.64 и рис. 3.71.

```

MAIN.SHM * MAIN.tst MAIN.zkt
1  "Тесты триггерных устройств"
2  TEST_RS, TEST_D_JK;
3
4  TEST_RS:
5  Er = 0, 0, 1, 1;
6  Es = 0, 1, 1, 0;
7
8  C = 0;
9  x2 = 0;
10 x1 = 0;
11 x0 = 0;
12 PRE = 0;
13 CLR = 1;
14
15
16 TEST_D_JK:
17 C = (0,1):8;
18 x2 = 1:2, 0:2, 1:8, 0:2, 1:2;
19 x1 = 0:4, 1:6, 0:4, 1:2;
20 x0 = 0:2, 1:4, 0:2, 1:4, 0:4;
21
22 Er = 1;
23 Es = 0;
24 PRE = 0;
25 CLR = 0;

```

Рис. 3.81. Тесты

Тест состоит из двух частей: *TEST\_RS* и *TEST\_D\_JK*. В первой части формируются воздействия на входы *Er*, *Es* в соответствии с временной диаграммой рис. 3.64 для проверки правильности выполнения первого задания работы. Одновременно с этим сигнал *CLR* приводит *D*- и *JK*-триггер в исходное состояние, обнуляя значения на их выходах. Во второй части разворачивается временная

диаграмма на входах  $x_2$ ,  $x_1$ ,  $x_0$  в соответствии с рис. 3.71 для проверки второго задания.

Результат логического моделирования приведён на рис. 3.82 и 3.83. На рис. 3.82 представлен фрагмент, достаточный для того, чтобы сделать вывод о полном соответствии выхода триггера  $QRS$  расчётной временной диаграмме, приведённой на рис. 3.64.



Рис. 3.82. Результат логического моделирования задания 1

На рис. 3.83 показан полный результат логического моделирования. Видно, что выходы  $QD$  и  $QJK$  изменяют своё состояние одновременно и одинаково в соответствии с временными диаграммами рис. 3.70, рис. 3.71, так как они выполняют одни и те же микрооперации, заданные таблицей 3.31.



Рис. 3.83. Результат логического моделирования всех заданий

В результате проведённого анализа результатов логического моделирования можно сделать вывод, что синтез структур триггерных устройств выполнен верно.

### 3.3. Перечень индивидуальных заданий

1. Синтезировать  $R$ -,  $S$ - или  $E$ -триггер в указанном схемотехническом базисе с указанными активными уровнями (см. индивидуальное задание). Нарисовать временную диаграмму работы триггерного устройства.

2. Используя  $D$ - и  $JK$ - триггеры, синтезировать два многовыходных триггера, которые функционируют согласно таблице (см. таблицу режимов триггерного устройства в индивидуальном задании). Нарисовать временные диаграммы работы.

3. Оформить триггерные устройства как отдельные подсхемы САПР БИС «Ковчег 3.04». Создать схему в САПР БИС «Ковчег 3.04», установив в поле чертежа все подсхемы. Выполнить логическое моделирование. Сравнить полученные диаграммы с рассчитываемыми.

#### Вариант 1

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 1$ ,  $R_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$Q^t$
0	0	1	×
0	1	0	0
0	1	1	$\overline{Q^t}$
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	0	0
1	1	1	×

#### Вариант 2

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 0$ ,  $S_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	1
0	1	0	$Q^t$
0	1	1	×
1	0	0	1
1	0	1	$\overline{Q^t}$
1	1	0	×
1	1	1	0

**Вариант 3**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 0$ ,  $E_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	0
0	1	0	×
0	1	1	$\overline{Q^t}$
1	0	0	0
1	0	1	$Q^t$
1	1	0	1
1	1	1	$Q^t$

**Вариант 4**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 0$ ,  $R_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	1
0	0	1	$\overline{Q^t}$
0	1	0	0
0	1	1	$Q^t$
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	×	×

**Вариант 5**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 0$ ,  $S_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	0
0	1	0	×
0	1	1	0
1	0	0	×
1	0	1	1
1	1	0	$Q^t$
1	1	1	$\overline{Q^t}$

**Вариант 6**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 0$ ,  $S_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	0
0	0	1	$Q^t$
0	1	0	1
0	1	1	×
1	0	0	$\overline{Q^t}$
1	0	1	×
1	1	0	1
1	1	1	×

**Вариант 7**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 0$ ,  $E_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$\overline{Q^t}$
0	0	1	×
0	1	0	×
0	1	1	$Q^t$
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	0	0
1	1	1	1

**Вариант 8**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 0$ ,  $R_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	×	×
0	1	0	$Q^t$
0	1	1	1
1	0	×	0
1	1	0	×
1	1	1	$\overline{Q^t}$

**Вариант 9**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ R-триггер с активными уровнями:  $R_R = 1$ ,  $R_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	$Q^t$
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	0	$\overline{Q^t}$
1	1	1	×

3

**Вариант 10**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ R-триггер с активными уровнями:  $R_R = 0$ ,  $R_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$Q^t$
0	0	1	×
0	1	0	$\overline{Q^t}$
0	1	1	×
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	$Q^t$
1	1	1	×

**Вариант 11**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ E-триггер с активными уровнями:  $E_R = 1$ ,  $E_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	$Q^t$
0	1	0	1
0	1	1	×
1	0	0	$\overline{Q^t}$
1	×	1	0
1	1	0	×

**Вариант 12**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 0$ ,  $S_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	×	×
0	1	0	$\overline{Q^t}$
0	1	1	$Q^t$
1	×	0	1
1	0	1	0
1	1	1	×

**Вариант 13**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 1$ ,  $S_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	0
0	0	1	×
0	1	0	0
0	1	1	$\overline{Q^t}$
1	0	0	$Q^t$
1	0	1	×
1	1	0	×
1	1	1	1

**Вариант 14**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 1$ ,  $R_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$Q^t$
0	0	1	$\overline{Q^t}$
0	1	0	1
0	1	1	×
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	0	0
1	1	1	×

**Вариант 15**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 0$ ,  $E_S = 0$ .
2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	×
0	1	0	0
0	1	1	×
1	0	0	$Q^t$
1	0	1	1
1	1	0	$Q^t$
1	1	1	$\overline{Q^t}$

3

**Вариант 16**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 0$ ,  $R_S = 0$ .
2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$Q^t$
0	0	1	×
0	1	0	$\overline{Q^t}$
0	1	1	1
1	0	0	×
1	0	1	0
1	1	0	×
1	1	1	0

**Вариант 17**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 0$ ,  $E_S = 0$ .
2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	×
1	0	0	$Q^t$
1	0	1	×
1	1	0	0
1	1	1	$\overline{Q^t}$

**Вариант 18**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 1$ ,  $R_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	×	×
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	0	0
1	1	1	$\overline{Q^t}$

**Вариант 19**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 1$ ,  $E_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$\overline{Q^t}$
0	0	1	0
0	1	0	×
0	1	1	0
1	0	×	×
1	1	0	1
1	1	1	$Q^t$

**Вариант 20**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 1$ ,  $S_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$Q^t$
0	0	1	$Q^t$
0	1	0	×
0	1	1	$\overline{Q^t}$
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	0	0
1	1	1	×

**Вариант 21**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 1$ ,  $R_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	$Q^t$
0	1	0	$\overline{Q^t}$
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	×	×

3

**Вариант 22**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 1$ ,  $E_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	0
0	0	1	$Q^t$
0	1	×	×
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	0	×
1	1	1	$\overline{Q^t}$

**Вариант 23**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 0$ ,  $E_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	×	0
0	1	0	$Q^t$
0	1	1	×
1	0	0	1
1	0	1	$\overline{Q^t}$
1	1	×	×

**Вариант 24**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 1$ ,  $S_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	×	$\overline{Q^t}$
0	1	0	×
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	0	$Q^t$
1	1	1	×

**Вариант 25**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 1$ ,  $E_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	×
0	0	1	0
0	1	0	$Q^t$
0	1	1	×
1	0	0	1
1	0	1	×
1	1	×	$\overline{Q^t}$

**Вариант 26**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 1$ ,  $S_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	$Q^t$
0	0	1	1
0	1	0	$\overline{Q^t}$
0	1	1	1
1	0	×	×
1	1	0	×
1	1	1	0

**Вариант 27**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 0$ ,  $S_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	0
0	0	1	$\overline{Q^t}$
0	1	×	1
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	×	×

**Вариант 28**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $R$ -триггер с активными уровнями:  $R_R = 1$ ,  $R_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	×	0
0	1	0	$\overline{Q^t}$
0	1	1	1
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	×	×

**Вариант 29**

1. Синтезировать в базисе ИЛИ-НЕ  $S$ -триггер с активными уровнями:  $S_R = 0$ ,  $S_S = 0$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	0	1
0	0	1	$Q^t$
0	1	0	×
0	1	1	$\overline{Q^t}$
1	0	×	×
1	1	×	0

**Вариант 30**

1. Синтезировать в базисе И-НЕ  $E$ -триггер с активными уровнями:  $E_R = 0$ ,  $E_S = 1$ .

2. Таблица режимов работы триггерного устройства:

Входы			Выход $Q^{t+1}$
$x_2$	$x_1$	$x_0$	
0	0	×	$\overline{Q^t}$
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	×
1	0	1	$Q^t$
1	1	×	×