

## Лекция 10. Проектирование регистров

**Цель лекции** – предоставить всестороннее понимание проектирования регистров, их типов и применения в цифровых системах для хранения и обработки данных.

### Введение

**Регистр** – устройство для записи, хранения и считывания  $n$ -разрядных двоичных данных и выполнения других операций над ними.

В компьютерах или цифровых системах обычно хранится и обрабатывается строка битов. Регистр, по сути, является устройством, которое может хранить строку битов. Поскольку триггер может хранить бит, то для построения регистра для хранения  $n$  битов можно использовать  $n$  триггеров. Однобитовый регистр разработан с использованием одного D-триггера. Рассмотрим D-триггер, срабатывающий по отрицательному фронту, как показано на рис. 10.1. Из таблицы характеристик D-триггера следует, что триггер передает данные, поданные на вход  $D$ , на свой выход по заднему фронту тактового импульса. Таким образом, когда логическая 1 подается на вход D-триггера, то после подачи тактового импульса вход 1 передается на его выход по заднему фронту тактового импульса. Теперь, если вход 1 удален, триггер продолжит находиться в установленном состоянии, сохраняя тем самым логику 1. Аналогично логический 0 может быть сохранен или сохранен в D-триггере.

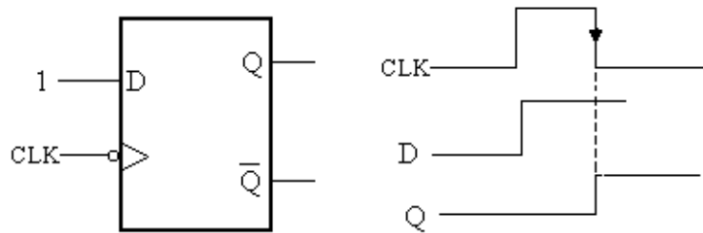


Рисунок 10.1. D-триггер и сигналы на его входах и выходе

$n$ -битный регистр – это набор из  $n$  триггеров с общим тактовым сигналом. Этот  $n$ -битный регистр может хранить  $n$ -битное слово. Все триггеры данного регистра должны реагировать на тактовый импульс одновременно. На рис. 10.2 показан четырехбитный регистр с общим тактовым сигналом. Все триггеры можно очистить, подав 0 на вход  $\overline{CLR}$ . Входные данные подаются на входы D-триггеров. Четырехбитные данные передаются на выходы по заднему фронту тактового импульса, и данные сохраняются до следующего импульса.

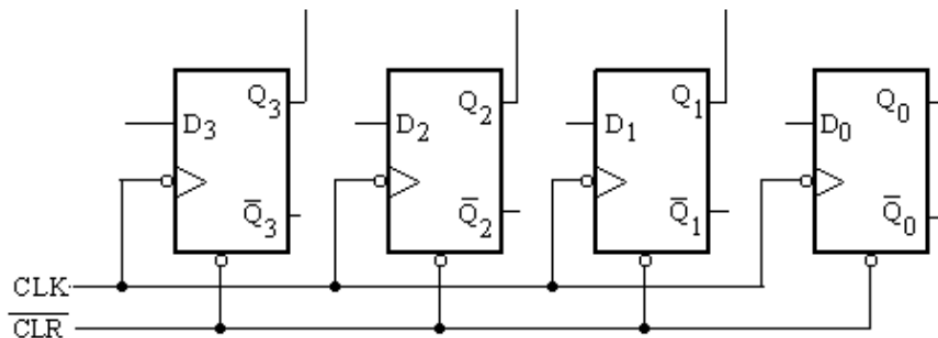


Рисунок 10.2. Четырехбитный регистр с общим тактовым сигналом

Процесс информации в регистре называется загрузкой регистра. Сдвиг данных в регистре в левом или правом направлении называется сдвиговым регистром. Передача информации во все триггеры регистра может быть выполнена двумя способами. Один из способов заключается в том, что все биты данных загружаются одновременно, другие биты данных загружаются побитно (т.е. по одному биту за раз). Таким образом, сдвиговые регистры можно классифицировать на: последовательный сдвиговый регистр, параллельный сдвиговый регистр.

Сохраненная информация в этих сдвиговых регистрах может быть передана из регистра параллельно или последовательно. На основе этих конфигураций возможны четыре комбинации загрузки и чтения данных:

1. Сдвиговый регистр с последовательным входом/параллельным выходом (Serial In Parallel Out – SIPO): В регистр этого типа данные загружаются последовательно, по одному биту за раз; и когда требуется вывод, данные, хранящиеся в регистре, могут считываться параллельно.

2. Сдвиговый регистр с последовательным входом/последовательным выходом (Serial In Serial Out – SISO): В регистрах этого типа данные могут последовательно вводиться в регистр и выводиться из него по одному биту за раз.

3. Сдвиговый регистр с параллельным входом/параллельным выходом (Parallel In Parallel Out PIPO): В регистрах этого типа данные загружаются одновременно на все триггеры, и когда требуется вывод, данные, хранящиеся в регистре, могут быть считаны в параллельном виде.

4. Сдвиговый регистр с параллельным входом/последовательным выходом (Parallel In Serial Out – PISO): В регистрах этого типа данные загружаются одновременно на все триггеры, и когда требуется вывод, сохраненные данные последовательно считываются из регистра по одному биту за раз под тактовым управлением.

### Сдвиговый регистр с последовательным входом/параллельным выходом (SIPO)

Рассмотрим принципиальную схему сдвигового регистра SIPO, показанную на рис. 10.3. Для упрощения выбраны D-триггеры, но они также могут быть JK-триггерами. Триггеры срабатывают по отрицательному фронту. Сначала подается сигнал  $\overline{CLR} = 0$ , который очищает все триггеры, выдавая выход  $Q = 0$ . Подается тактовый импульс ( $CLK$ ), и на заднем фронте тактового импульса вход на линии  $INPUT DATA$  передается на выход первого триггера. Какой бы выход первого триггера в это время ни был передан на выход второго триггера, и, аналогично, операция распространяется на оставшиеся триггеры справа до последнего триггера. Данные загружаются в триггер последовательно с каждым тактовым импульсом, и выход считывается на каждом из выходов триггера. Поэтому такой регистр, в котором данные подаются на вход последовательно, а выход принимается параллельно, называется сдвиговым регистром с последовательным входом и параллельным выходом (SIPO).

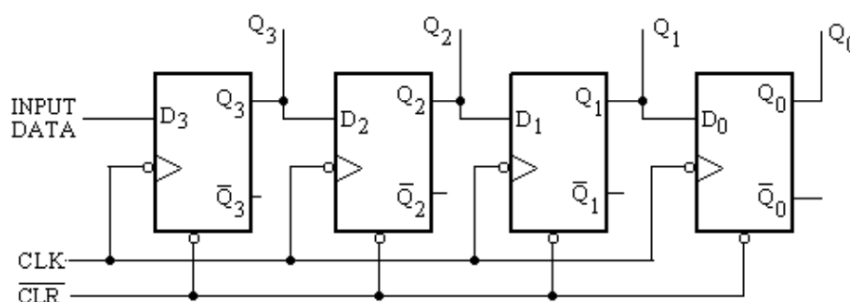


Рисунок 10.3. Принципиальная схема сдвигового регистра SIPO

Чтобы понять работу этого сдвигового регистра, предположим, что данные 1111 загружаются последовательно, а на выходе требуется получить данные параллельно. Сигнал  $\overline{CLR}$  сначала сбрасывает все триггеры, давая  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$ . Теперь данные подаются как 1 на входной терминал данных, и по заднему фронту первого тактового импульса данные как 1 будут смещены вправо, давая выходы  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1000$ . Аналогично на заднем фронте второго тактового импульса выходы  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1100$ . Во время заднего фронта третьего и четвертого импульса выходы будут 1110 и 1111, соответственно. Таким образом, данные 1111 загружаются в регистр последовательно, а выходные данные получают одновременно в  $Q_3Q_2Q_1Q_0$ .

Тактовый импульс	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	0	0	0	0

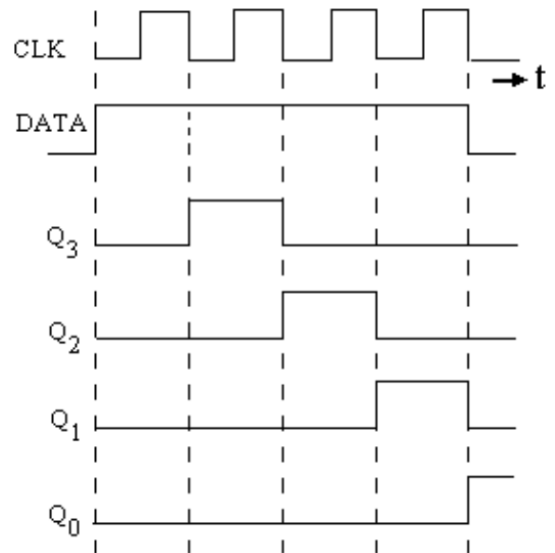


Рисунок 10.4. Принцип работы сдвигового регистра SIPO

### Сдвиговый регистр с последовательным входом/последовательным выходом (SISO)

Базовый четырехбитный сдвиговый регистр SISO может быть построен с использованием четырех D-триггеров, как показано на рис. 10.5.

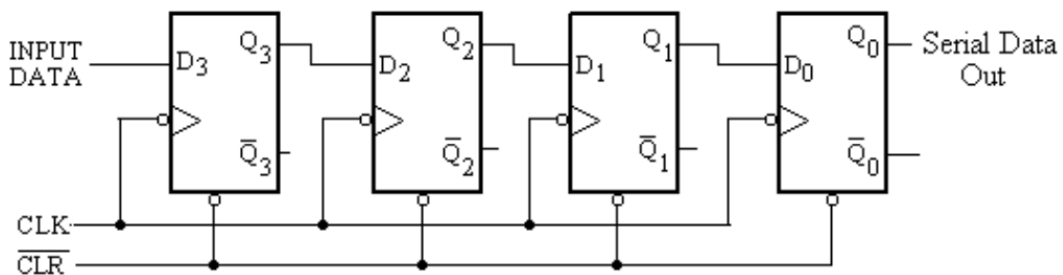


Рисунок 10.5. Принципиальная схема сдвигового регистра SISO

Работа схемы происходит следующим образом. Регистр сначала очищается путем подачи сигнала  $\overline{CLR} = 0$ , что принудительно устанавливает все четыре выхода в ноль. Затем входные данные последовательно подаются на входной терминал данных первого триггера. Во время каждого тактового импульса один бит передается слева направо. Данные вводятся в регистр последовательно в течение первых четырех тактовых импульсов таким же образом, как обсуждалось в регистре сдвига SIPO. Чтобы последовательно вывести данные из регистра, введенные данные теперь должны быть

последовательно сдвинуты и сняты на выходе  $Q_0$ . Для этой цели подаются еще четыре тактовых импульса, и требуемые четыре бита данных будут доступны последовательно на выходе  $Q_0$ . Предположим, что слово данных 1101 должно быть введено последовательно и снято на выходе  $Q_0$  бит за битом.

Предположим, что данные 1101 должно быть загружено последовательно, и их нужно получить эти данные на выходе  $Q_0$  бит за битом. Сначала все триггеры очищаются путем подачи сигнала  $\overline{CLR}$ . Теперь LSB 1 (наименьший значащий бит) данных подается на входной терминал данных, а затем во время отрицательного фронта тактового импульса данные 1 сдвигаются на  $Q_3$  и дают выходы  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1000$ . Второй LSB 0 данных подается на входной терминал, и на заднем фронте тактового импульса выходы  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0100$ . Аналогично на заднем фронте третьего и четвертого тактов с входными битами как 11 выходы  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1010$  и 1101, соответственно. Таким образом, на четвертом тактовом импульсе LSB 1 доступен на выходе  $Q_0$ . Во время 5-го, 6-го и 7-го импульса с входными данными 000 последовательный выходной терминал  $Q_0$  выдаст второй LSB, третий LSB и MSB данных. Все триггеры также могут быть очищены путем применения еще одного тактового импульса с 0 в качестве входных данных. Систематическое смещение данных показано в таблице 10.2.

Таблица 10.2. Принцип работы сдвигового регистра с последовательным входом/последовательным выходом

Входные данные	Тактовый импульс	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
-	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0
0	2	0	1	0	0
1	3	1	0	1	0
1	4	1	1	0	1
0	5	0	1	1	0
0	6	0	0	1	1
0	7	0	0	0	1
0	8	0	0	0	0

### Сдвиговый регистр с параллельным входом/параллельным выходом (PIPO)

Для сдвиговых регистров PIPO все биты данных появляются на параллельных выходах сразу после одновременного ввода битов данных. Четырехбитный регистр сдвига PIPO, созданный с помощью D-триггеров, показан на рисунке 10.6.  $D$  – параллельные входы, а  $Q$  – это параллельные выходы. Как только параллельный сигнал передачи становится высоким, все вентили И включаются, и биты данных подключаются к соответствующим триггерам. Теперь после подачи тактового импульса все данные на входах  $D$  появляются на соответствующих выходах  $Q$  одновременно.

### Сдвиговый регистр с параллельным входом/последовательным выходом (PISO)

Четырехбитный сдвиговый регистр PISO показан на рис. 10.7. Схема использует D-триггеры и вентили И-НЕ для ввода данных (т.е. записи) в регистр.  $D_3$ ,  $D_2$ ,  $D_1$  и  $D_0$  являются параллельными входами, где  $D_3$  – старший бит, а  $D_0$  – младший бит. Для записи данных линия управления режимом ( $\overline{WRITE}$  /  $SHIFT$ ) подается на низкий уровень, и данные синхронизируются. Данные могут быть сдвинуты, когда линия управления

режимом имеет высокий уровень, поскольку *SHIFT* активен на высоком уровне. Регистр выполняет операцию сдвига вправо при подаче тактовых импульсов.

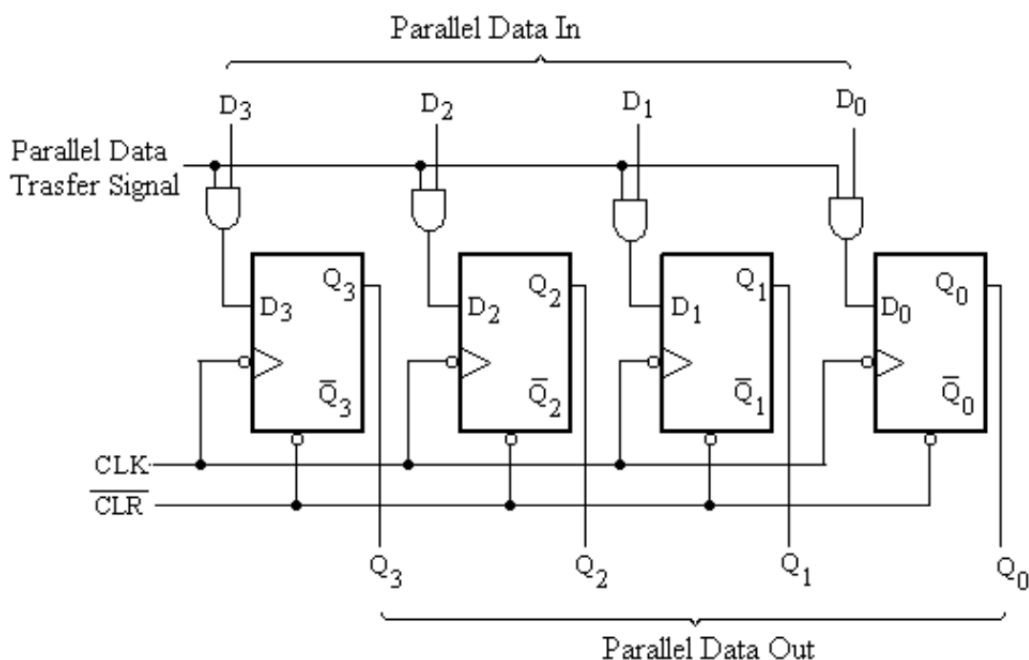


Рисунок 10.6. Принципиальная схема сдвигового регистра PIPO

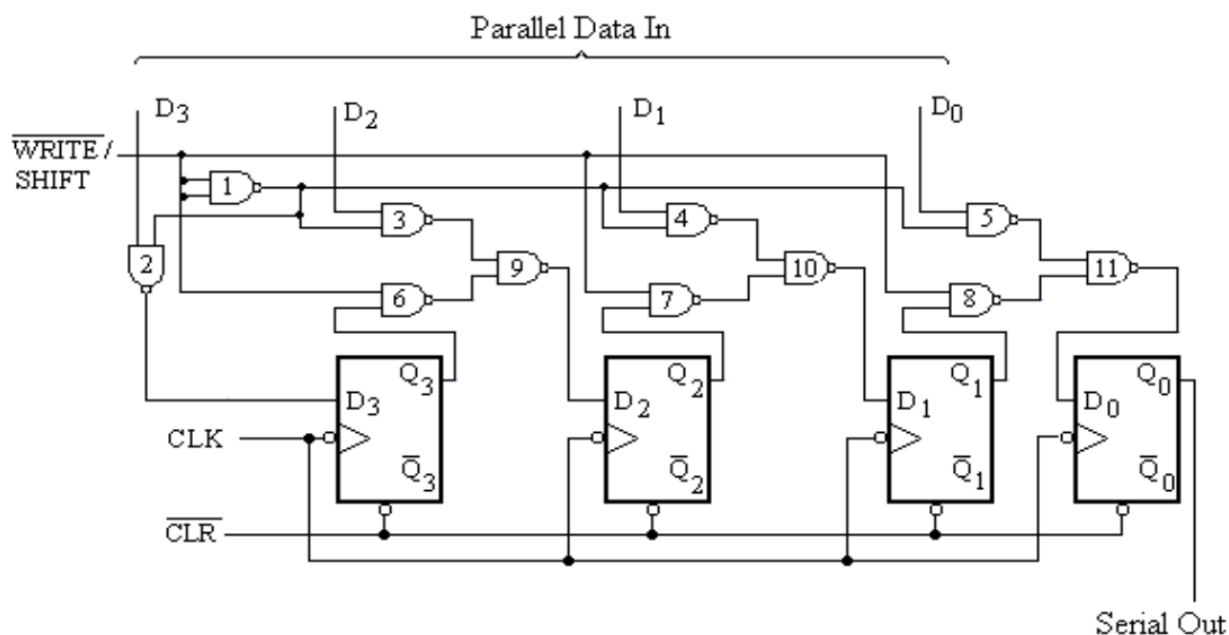


Рисунок 10.7. Принципиальная схема сдвигового регистра PISO

Это можно понять более подробно, данные, которые должны быть введены в регистр, подаются на параллельный входной терминал данных, а линия управления режимом (*WRITE / SHIFT*) устанавливается на низкий уровень, что позволяет всем четырем битам слова данных быть введенными параллельно в регистр. В этом состоянии будут включены вентили И-НЕ с 1 по 5, что позволяет каждому биту данных быть введенным на входы *D* соответствующего триггера. После подачи тактового импульса данные, поданные на входы триггеров, появятся на выходе соответствующего триггера. Принято говорить, что данные хранятся в регистре.

После того, как данные сохранены в регистре, линия управления режимом ( $\overline{WRITE} / \overline{SHIFT}$ ) становится высокой, вентили И-НЕ с 6 по 8 будут включены, что заставит данные сместиться из их текущего состояния в следующее состояние после подачи тактового импульса. Дальнейший сдвиг возможен со следующими последовательными импульсами. Таблица 10.3 иллюстрирует ввод данных (например, 1001) в регистр и их сдвиг с тактовыми импульсами.

Таблица 10.3. Принцип работы сдвигового регистра PISO

$\overline{WRITE} / \overline{SHIFT}$	Тактовый импульс	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$	Последовательный выход
0	1	1	0	0	1	1
1	2	0	1	0	0	0
1	3	0	0	1	0	0
1	4	0	0	0	1	1

### Двунаправленный сдвиговый регистр

Регистры, обсуждавшиеся до сих пор, включали только операции сдвига вправо. Каждая операция сдвига вправо имеет эффект последовательного деления двоичного числа на два. Если операция обратная (сдвиг влево), это имеет эффект умножения числа на два. При подходящем расположении вентилях последовательный сдвиговый регистр может выполнять обе операции. Двунаправленный, или обратимый, сдвиговый регистр – это тот, в котором данные могут быть сдвинуты как влево, так и вправо. Четырехбитный двунаправленный сдвиговый регистр, использующий D-триггеры, показан на рис. 10.8.

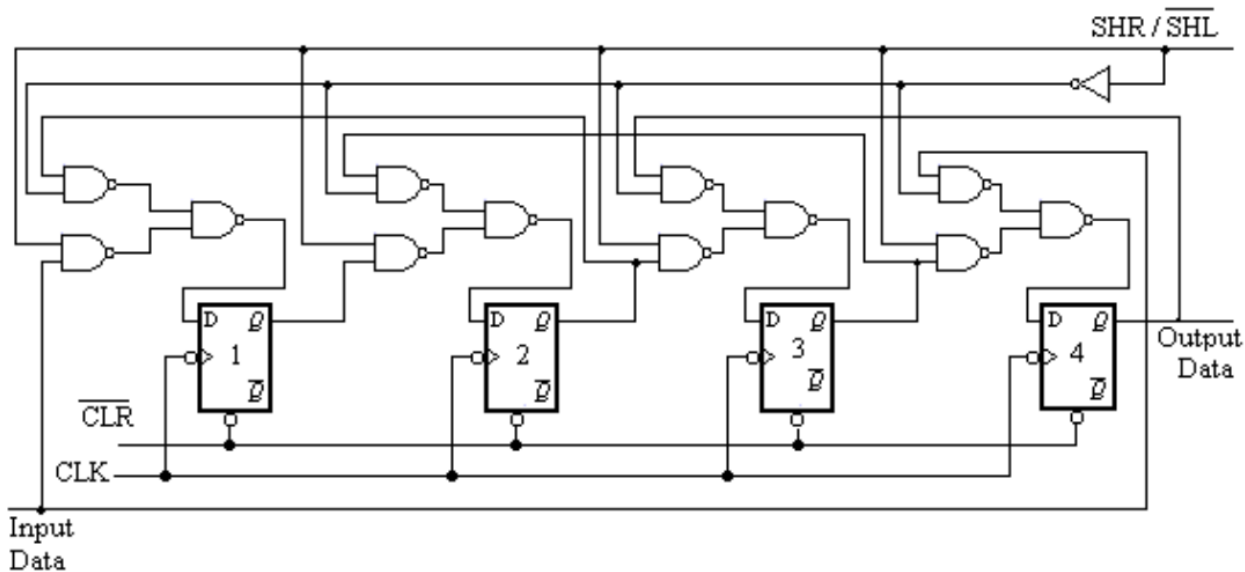


Рисунок 10.8. Четырехбитный двунаправленный сдвиговый регистр, использующий D-триггеры

Здесь набор вентилях И-НЕ настроен как вентили ИЛИ для выбора входов данных из правого или левого смежного бистабильного состояния, как выбрано линией управления  $\overline{SHR} / \overline{SHL}$ . Когда эта линия управления имеет высокий уровень, данные перемещаются или сдвигаются на правую сторону, а если она имеет низкий уровень, данные будут перемещены на левую сторону. Поэтому этот регистр сдвига также называется левым или двунаправленным сдвиговым регистром.

Работа этой схемы может быть объяснена следующим образом. В начале сигнал  $\overline{CLR}$  устанавливается на низкий уровень, что очищает все триггеры. Когда линия управления  $SHR / \overline{SHL}$  находится на высоком уровне, можно понять из логики вентилях, соединенных в этой схеме, что выход  $Q$  всех триггеров подключается к входу  $D$  следующего триггера. Бит данных подключается к входу  $D$  первого триггера. Теперь после подачи тактового импульса на терминал  $CLK$  биты данных сдвигаются на одну позицию вправо. Дальнейшее появление следующих импульсов сдвинет данные вправо. Однако, когда линия управления  $SHR / \overline{SHL}$  находится на низком уровне, конфигурация логических вентилях заставляет бит данных подключаться к входу  $D$  4-го триггера, а выход каждого триггера также передается на вход  $D$  предыдущего триггера. После подачи тактового импульса на клемму  $CLK$  биты данных сдвигаются на одну позицию влево. В этом режиме эта схема работает как левый сдвиговый регистр.

Сегодня доступно множество высокоскоростных двунаправленных регистров сдвига «универсального» типа, таких как ТТЛ 74LS194, 74LS195 или КМОП 4035, которые доступны как 4-битные многофункциональные устройства, которые могут использоваться либо в последовательно-последовательном режиме, либо в режиме сдвига влево, либо в режиме сдвига вправо, либо в режиме последовательно-параллельного, параллельно-последовательного или параллельно-параллельного многофункционального регистра данных, отсюда и их название «универсальные».

### Циклические сдвиговые регистры

В обычном сдвиговом регистре заданное число может быть сдвинуто влево или вправо при применении импульса сдвига. Биты, сдвинутые с одного конца регистра, могут быть потеряны. Однако в циклическом сдвиговом регистре биты, сдвинутые с одного конца, сдвигаются обратно на другой конец. Циклические сдвиговые регистры, также известные как счетчики регистров сдвига, построены путем модификации сдвиговых регистров SISO. Существует два типа циклических сдвиговых регистров: кольцевой счетчик и счетчик Джонсона.

#### Кольцевой счетчик

Кольцевой счетчик может быть получен из сдвигового регистра SISO путем соединения выхода  $Q_0$  последнего триггера с входом  $D$  первого триггера. Кольцевой счетчик, построенный с использованием D-триггеров, показан на рисунке 10.9.

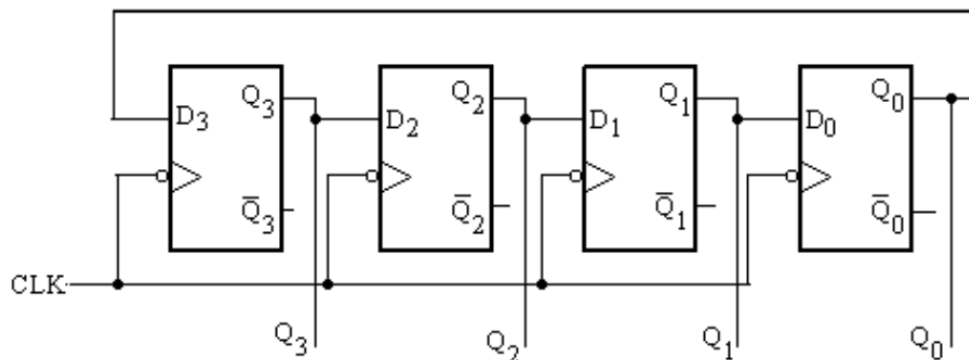


Рисунок 10.9. Кольцевой счетчик, построенный с использованием D-триггеров

В этом счетчике в регистре хранится одна единица, которая циркулирует в регистре после подачи тактового импульса. Первоначально выход  $Q_3$  устанавливается в 1 путем предварительной установки этого триггера, а другие триггеры сбрасываются так, что выходы  $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 1000$ . Поскольку выход  $Q$  каждого триггера подключен к входу  $D$

следующего каскада, содержимое каждого регистра сдвигается вправо на один бит после подачи тактовых импульсов. После первого импульса содержимое регистра сдвига равно 0100. После второго импульса состояние регистра равно 0010, затем 0001, и регистр возвращается в исходное состояние 1000 при четвертом импульсе. В этом регистре сдвига за один раз один триггер выдает на выходе 1. 1 можно использовать для включения последовательности машин, одной за другой, время работы которых контролируется длиной тактовых импульсов. Кольцевой счетчик будет иметь столько же различных кодов, сколько триггеров, поскольку единственное различие между выходами кольцевого кода – это место, где находится 1. Циклические сдвиговые регистры используются в калькуляторах. На дисплее некоторых карманных калькуляторов можно увидеть, что числа смещаются при вводе каждого нового числа. Это происходит из-за сдвигового регистра. Систематическое смещение данных приведено в таблице 10.4, а его временная диаграмма показана на рис. 10.10.

Таблица 10.4. Принцип работы кольцевого счетчика

Тактовый импульс	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
0	1	0	0	0
1	0	1	0	0
2	0	0	1	0
3	0	0	0	1
4	1	0	0	0

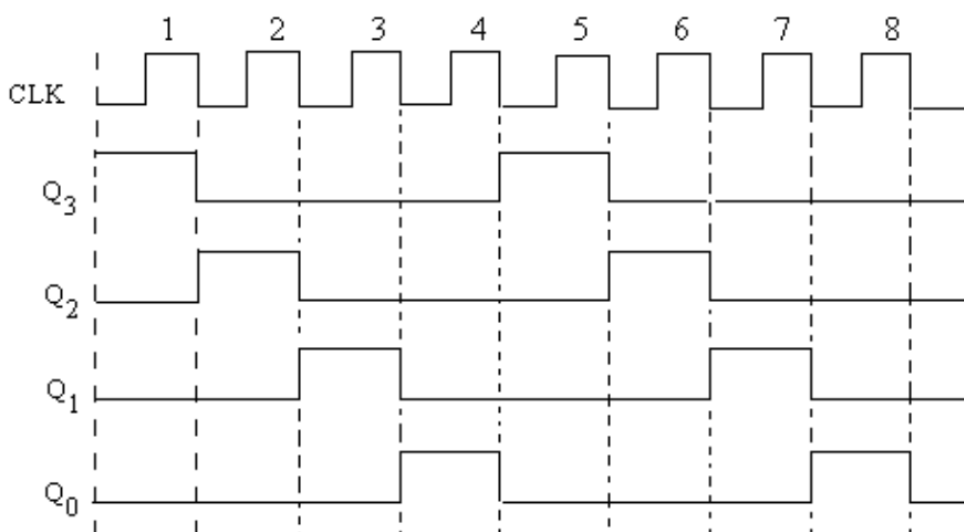


Рисунок 10.10. Временная диаграмма данных в кольцевом счетчике

### **Счетчик Джонсона**

Основное различие между счетчиком Джонсона и кольцевым счетчиком заключается в том, что в счетчике Джонсона дополнение выхода последнего триггера подключено обратно к входу  $D$  первого триггера, а не к самому выходу. Такая схема обратной связи создает уникальную последовательность состояний. Четырехбитный счетчик Джонсона имеет всего 8 состояний. В общем,  $n$ -ступенчатый счетчик Джонсона будет выдавать модуль  $2n$ , ( $n$  также будет числом ступеней счетчика)

Принципиальная схема 4-битного счетчика Джонсона, также известного как счетчик с витым кольцом, показана на рисунке 10.11.



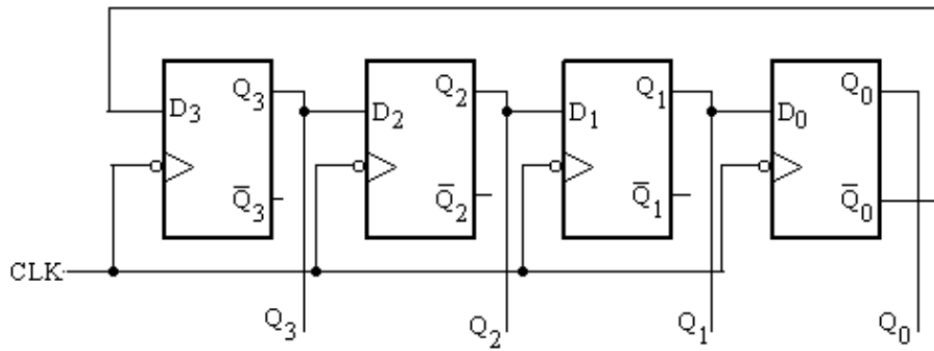


Рисунок 10.11. Принципиальная схема 4-битного счетчика Джонсона

Работу этой схемы можно объяснить следующим образом. Первоначально считается, что счетчик установлен в 0 ( $Q_3Q_2Q_1Q_0 = 0000$ ) при появлении первого импульса. При появлении второго тактового импульса первый триггер меняет свое выходное состояние с 0 на 1 ( $Q_3$  становится 1). Теперь, поскольку  $Q_1 = 1$ , второй триггер также изменит свое состояние с 0 на 1 при следующем импульсе. Триггеры 1, 3 и 4 остаются неизменными. Аналогичные изменения происходят при следующих импульсах, как указано в таблице 10.5. Временная диаграмма сигналов этого счетчика показана на рисунке 10.11.

Таблица 10.5. Принцип работы счетчика Джонсона

Тактовый импульс	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
1	0	0	0	0
2	1	0	0	0
3	1	1	0	0
4	1	1	1	0
5	1	1	1	1
6	0	0	0	0
7	1	0	0	0

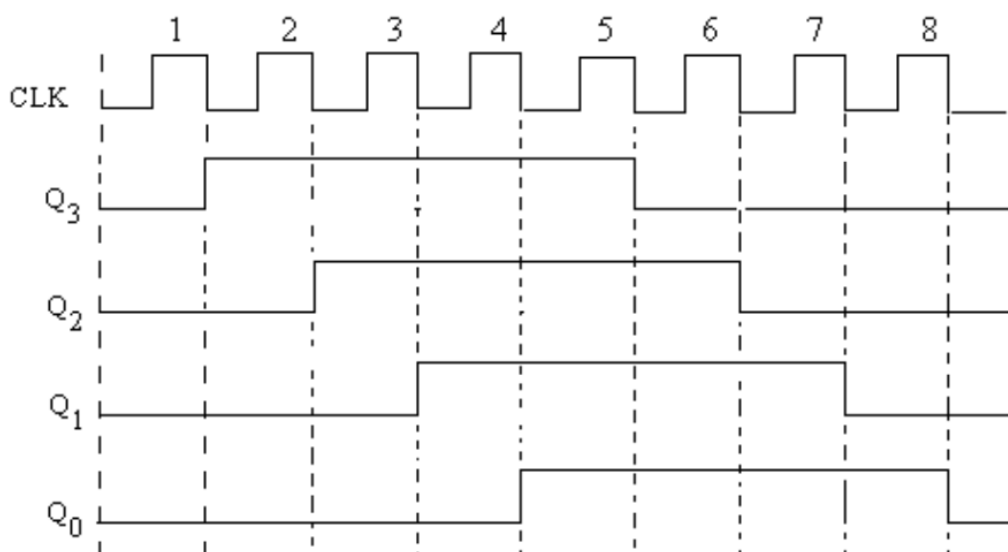


Рисунок 10.10. Временная диаграмма данных в кольцевом счетчике

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое регистр в контексте цифровых систем, и как он используется для хранения двоичных данных?
2. Объясните разницу между сдвиговым регистром с последовательным входом и параллельным выходом (SIPO) и сдвиговым регистром с последовательным входом и последовательным выходом (SISO).
3. Каковы основные функции и характеристики сдвигового регистра с параллельным входом и параллельным выходом (PIPO)?
4. Опишите работу сдвигового регистра с параллельным входом и последовательным выходом (PISO). Как он отличается от регистров других типов?
5. Что такое двунаправленный сдвиговый регистр, и как его можно использовать для сдвига данных влево и вправо?
6. Каковы отличия между кольцевым счетчиком и счетчиком Джонсона?
7. Постройте таблицу состояния для 4-битного сдвигового регистра SIPO, если на вход подаются данные 1011.