

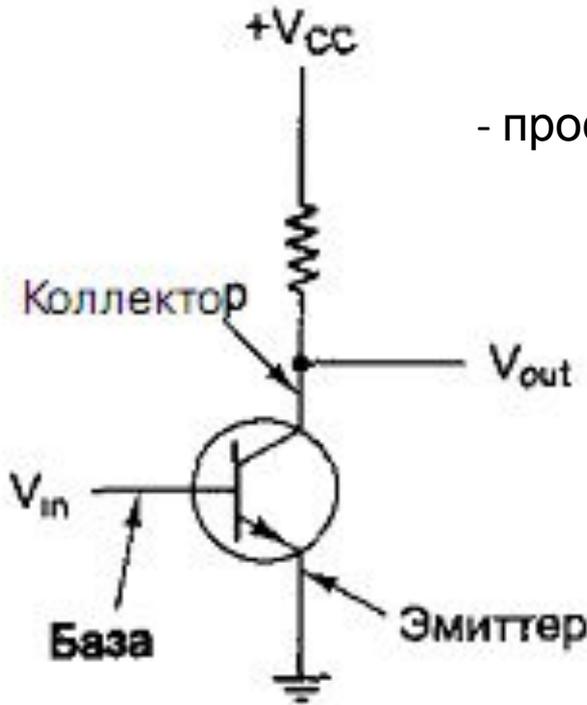
# Цифровой логический уровень

**Транзистор** – основной элемент цифровой электроники.

- если входное напряжение  $V_{in}$  ниже определенного значения, транзистор выключен и не проводит ток – в результате  $V_{out} = V_{cc}$  (внешнее напряжение, обычно 5 вольт)

- если входное напряжение  $V_{in}$  превышает критическое значение, транзистор открывается и проводит ток – в результате  $V_{out} = 0$

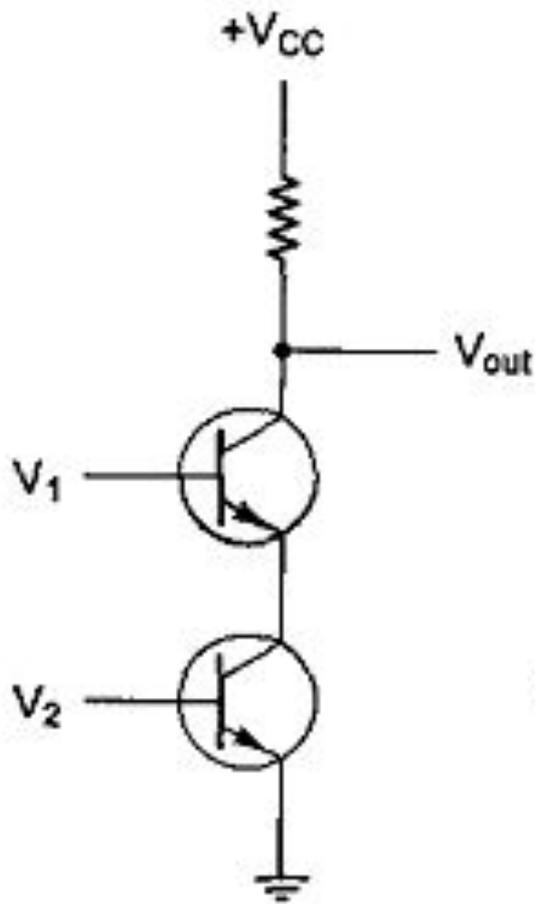
Таким образом если  $V_{in}$  высокое, то  $V_{out}$  низкое, и наоборот. То есть транзистор работает инвертором – преобразует 0 в 1, а 1 в 0.



- простой транзисторный инвертер

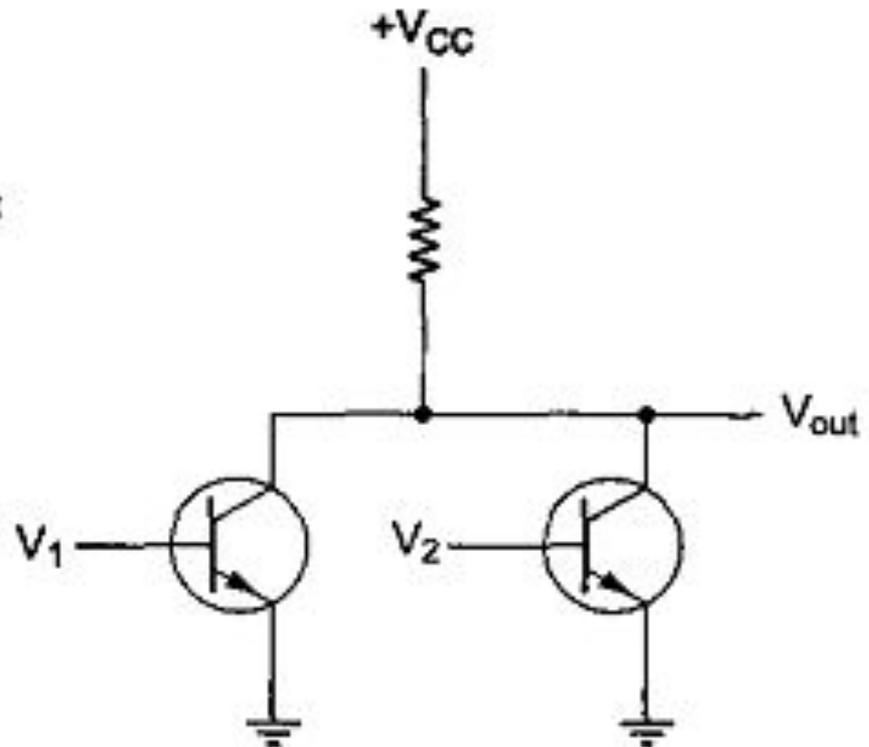
*Резистор ограничивает протекаемый ток, чтобы транзистор не сгорел*

*Время переключения – несколько наносекунд*



**Вентиль И-НЕ**

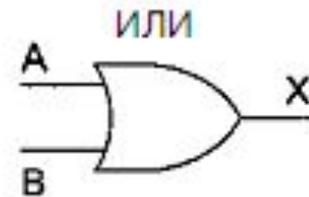
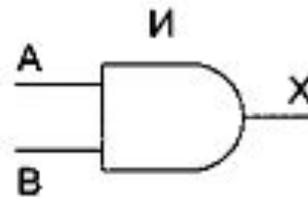
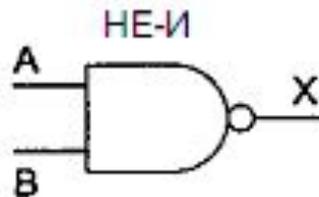
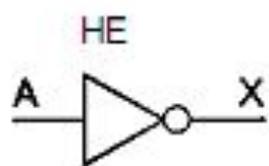
Если и  $V_1$ , и  $V_2$  высокие, то оба транзистора проводят ток, и  $V_{out}$  низкое



**Вентиль ИЛИ-НЕ**

Если хотя бы одно из  $V_1$   $V_2$  высокое, то ток уходит на землю, и  $V_{out}$  низкое

## Обозначения основных вентилях и таблицы истинности



| A | X |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

а

| A | B | X |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

б

| A | B | X |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

в

| A | B | X |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

г

| A | B | X |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

д

Вентили НЕ-И и НЕ-ИЛИ требуют по 2 транзистора, а вентили И и ИЛИ – по 3.

*На практике вентили делают несколько по-другому, но всё равно НЕ-И и НЕ-ИЛИ проще и чаще используются в цифровых электронных схемах*

## Классификация технологий производства вентиляей

### Биполярная

- ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика)
- ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) – более высокая скорость работы

### МОП (металл-оксид-полупроводник)

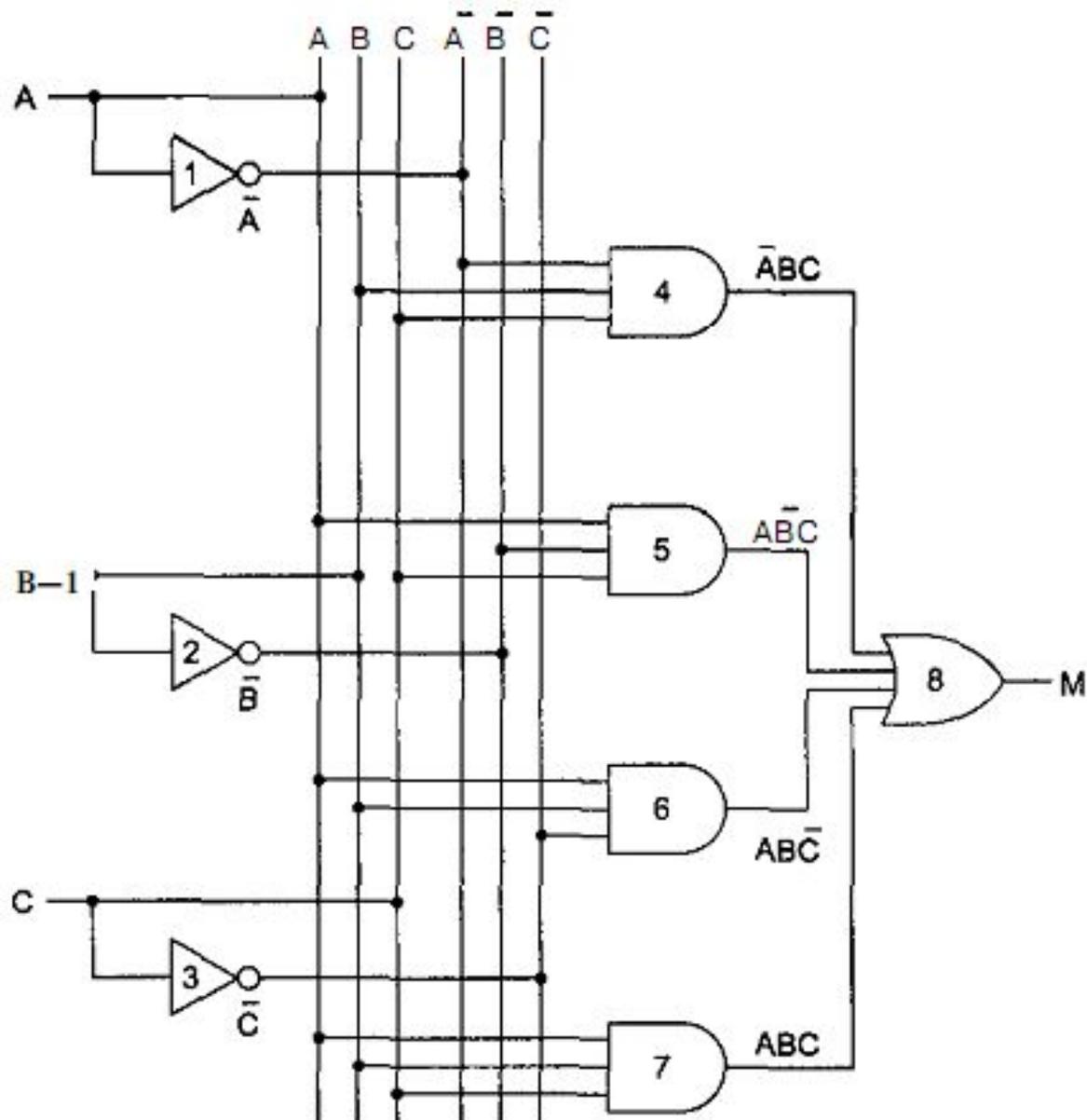
Работают медленнее ТТЛ и ЭСЛ, но компактны и потребляют мало энергии – можно разместить много на ограниченной площади.

Недорогие процессоры и память часто производят (по крайней мере, до недавних пор производили) по технологии комплиментарных МОП.

Стандартное напряжение работы +3.3 В.

Функция большинства – на выходе 1, если большинство переменных = 1

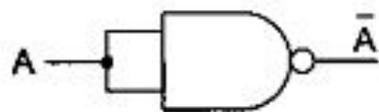
| A | B | C | M |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |



# Алгоритм построения схемы для любой булевой функции

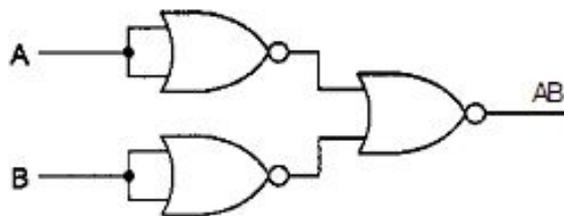
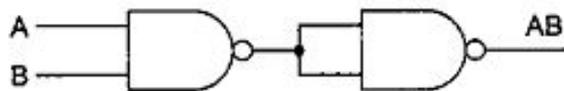
1. Составить таблицу истинности для данной функции.
2. Обеспечить инверторы, чтобы породить инверсии для каждого входного сигнала.
3. Нарисовать вентиль И для каждой строки таблицы истинности с результатом 1.
4. Соединить вентили И с соответствующими входными сигналами.
5. Вывести выходы всех вентилях И в вентиль ИЛИ.

Построенную схему можно преобразовать, чтобы использовать только один тип вентилях - И-НЕ или ИЛИ-НЕ



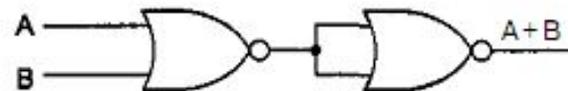
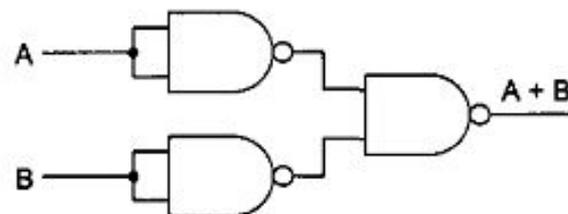
а

НЕ



б

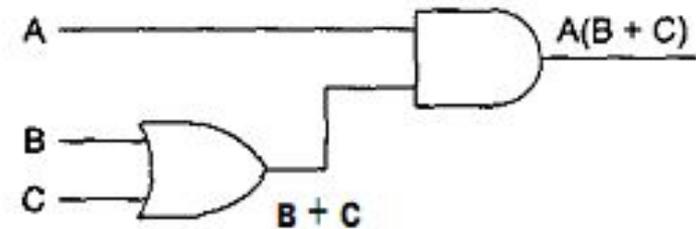
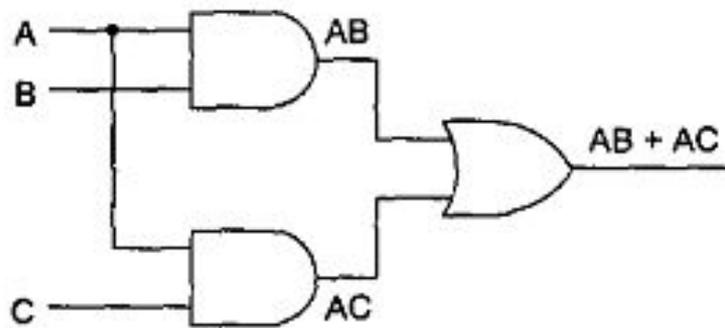
И



в

ИЛИ

# Одну и ту же функцию можно реализовать разными схемами с разным числом элементов



| A | B | C | AB | AC | AB + AC |
|---|---|---|----|----|---------|
| 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0       |
| 0 | 0 | 1 | 0  | 0  | 0       |
| 0 | 1 | 0 | 0  | 0  | 0       |
| 0 | 1 | 1 | 0  | 0  | 0       |
| 1 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0       |
| 1 | 0 | 1 | 0  | 1  | 1       |
| 1 | 1 | 0 | 1  | 0  | 1       |
| 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1       |

| A | B | C | A | B + C | A(B + C) |
|---|---|---|---|-------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0     | 0        |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1     | 0        |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1     | 0        |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1     | 0        |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0     | 0        |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1     | 1        |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1     | 1        |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1     | 1        |

# Для минимизации булевых функций используются законы булевой алгебры

$$a \vee b = b \vee a;$$

$$a \wedge b = b \wedge a.$$

1 коммутативность  
переместительность

$$a \vee (b \vee c) = (a \vee b) \vee c;$$

$$a \wedge (b \wedge c) = (a \wedge b) \wedge c.$$

2 ассоциативность  
сочетательность

3.1 конъюнкция относительно  
дизъюнкции

$$a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c)$$

3.2 дизъюнкция относительно  
конъюнкции

$$a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$$

3 дистрибутивность  
распределительность

$$a \vee \neg a = 1;$$

$$a \wedge \neg a = 0.$$

4 **комплементность**  
дополнительность  
(свойства отрицаний)

$$\neg(a \vee b) = \neg a \wedge \neg b;$$

$$\neg(a \wedge b) = \neg a \vee \neg b.$$

5 законы де Моргана

$$a \vee (a \wedge b) = a;$$

$$a \wedge (a \vee b) = a.$$

6 законы поглощения

$$a \vee (\neg a \wedge b) = a \vee b;$$

$$a \wedge (\neg a \vee b) = a \wedge b.$$

7 Блейка-Порецкого

$$a \vee a = a;$$

$$a \wedge a = a.$$

Идемпотентность

8 Идемпотентность

$$\neg\neg a = a.$$

9 инволютивность  
отрицания

$$a \vee 0 = a;$$

$$a \wedge 1 = a.$$

$$a \vee 1 = 1;$$

$$a \wedge 0 = 0.$$

10 свойства констант

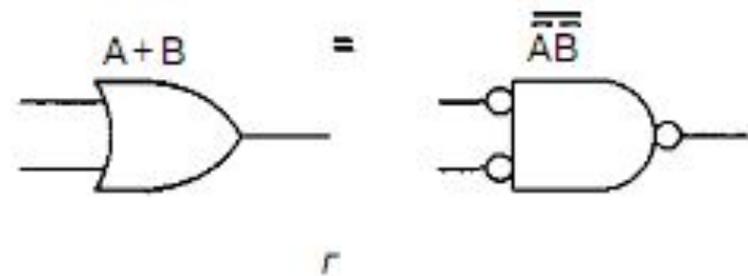
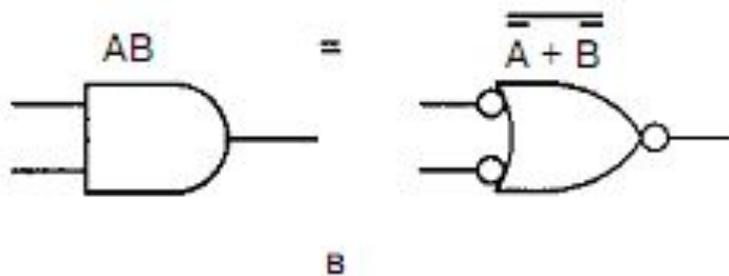
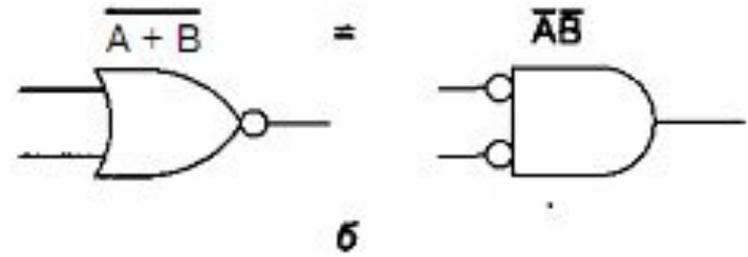
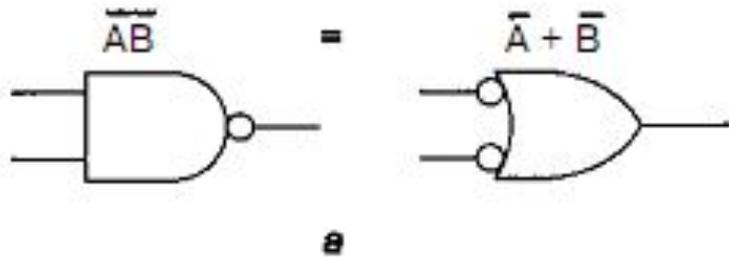
дополнение 0 есть 1  $\neg 0 = 1$ ;

дополнение 1 есть 0  $\neg 1 = 0$ .

# Иллюстрация к законам Де-Моргана

$$\neg(a \vee b) = \neg a \wedge \neg b;$$

$$\neg(a \wedge b) = \neg a \vee \neg b.$$

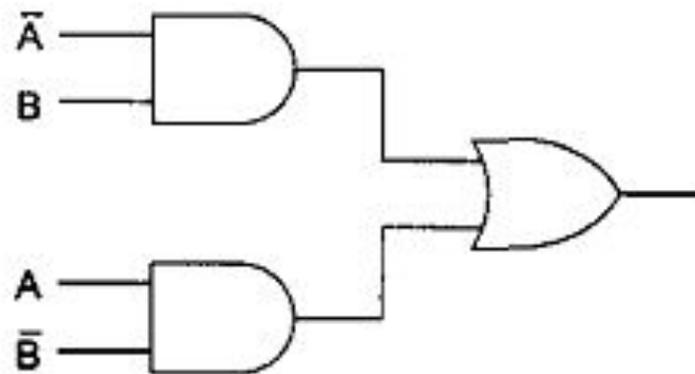


Альтернативные обозначения некоторых вентилях: НЕ-И (а); НЕ-ИЛИ (б); И (е); ИЛИ (г)

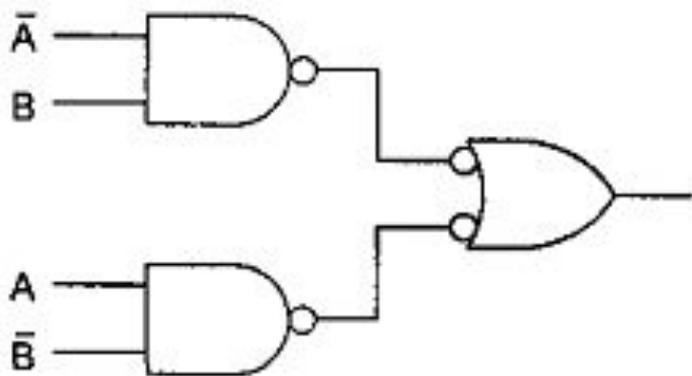
# Примеры схем для функции XOR (Исключающее ИЛИ)

| A | B | XOR |
|---|---|-----|
| 0 | 0 | 0   |
| 0 | 1 | 1   |
| 1 | 0 | 1   |
| 1 | 1 | 0   |

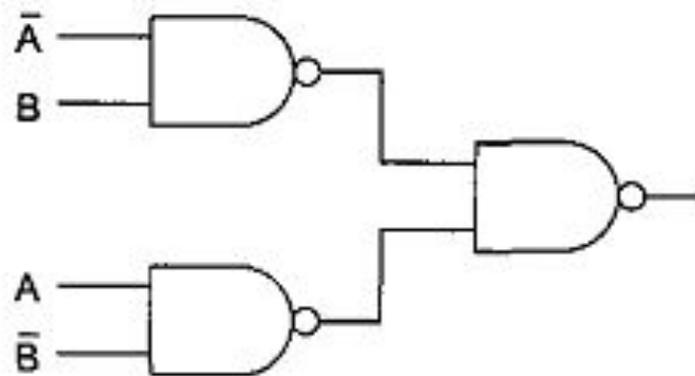
**а**



**б**



**в**



**г**

# Позитивная и негативная логика

Позитивная логика:

0 – 0 вольт, 1 – 3.3 или 5 вольт

Негативная логика:

1 – 0 вольт, 0 – 3.3 или 5 вольт

Одна и та же схема реализует разную функцию в негативной и позитивной логике:

| A              | B              | F              |
|----------------|----------------|----------------|
| 0 <sup>v</sup> | 0 <sup>v</sup> | 0 <sup>v</sup> |
| 0 <sup>v</sup> | 5 <sup>v</sup> | 0 <sup>v</sup> |
| 5 <sup>v</sup> | 0 <sup>v</sup> | 0 <sup>v</sup> |
| 5 <sup>v</sup> | 5 <sup>v</sup> | 5 <sup>v</sup> |

**а**

| A | B | F |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

**б**

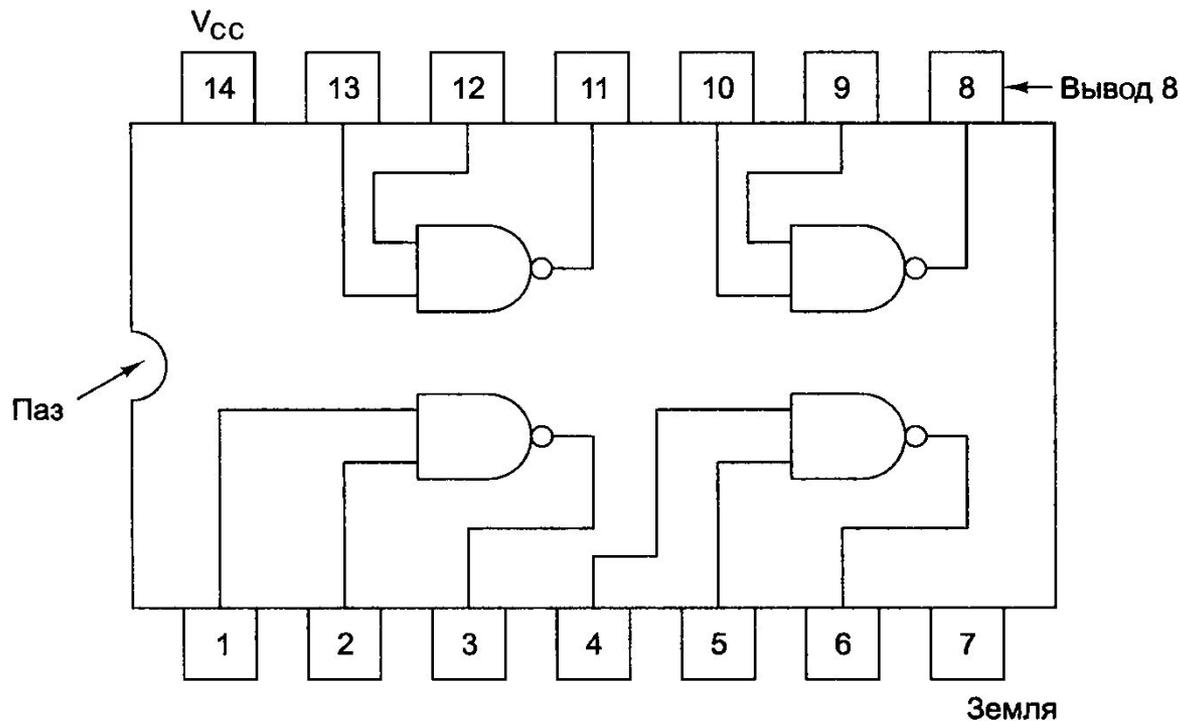
| A | B | F |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |

**в**

Электрические характеристики устройства (а); позитивная логика (б);  
негативная логика (в)

# Интегральные схемы

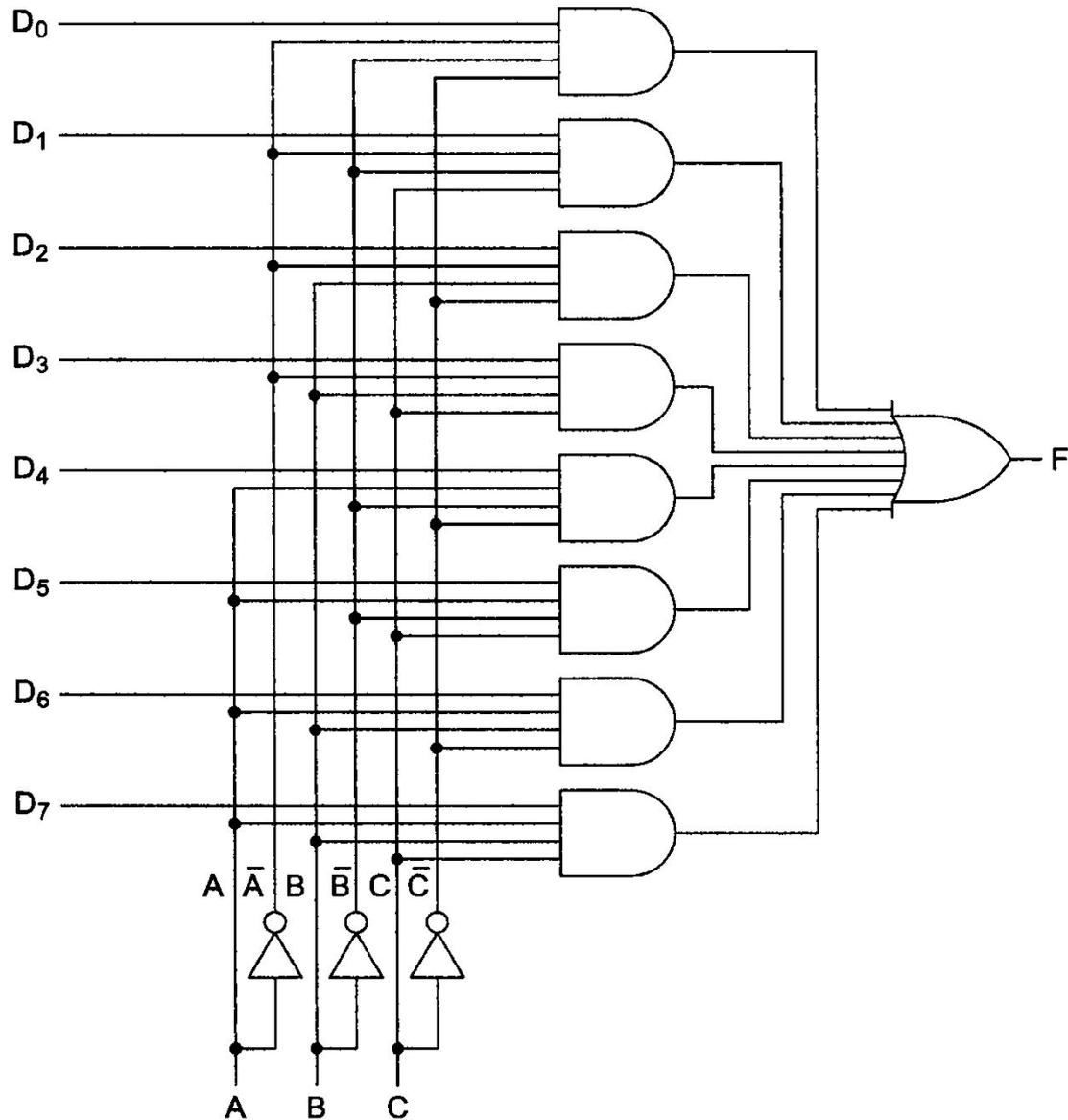
- МИС (малая интегральная схема): от 1 до 10 вентиляей.
- СИС (средняя интегральная схема): от 1 до 100 вентиляей.
- БИС (большая интегральная схема): от 100 до 100 000 вентиляей.
- СБИС (сверхбольшая интегральная схема): более 100 000 вентиляей.



МИС из четырех вентиляей

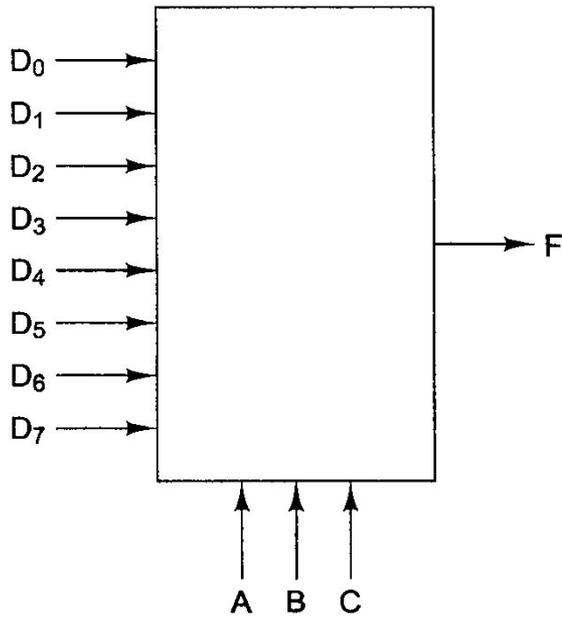
*Сейчас на одну микросхему помещают уже десятки миллионов транзисторов*

## Мультиплексор

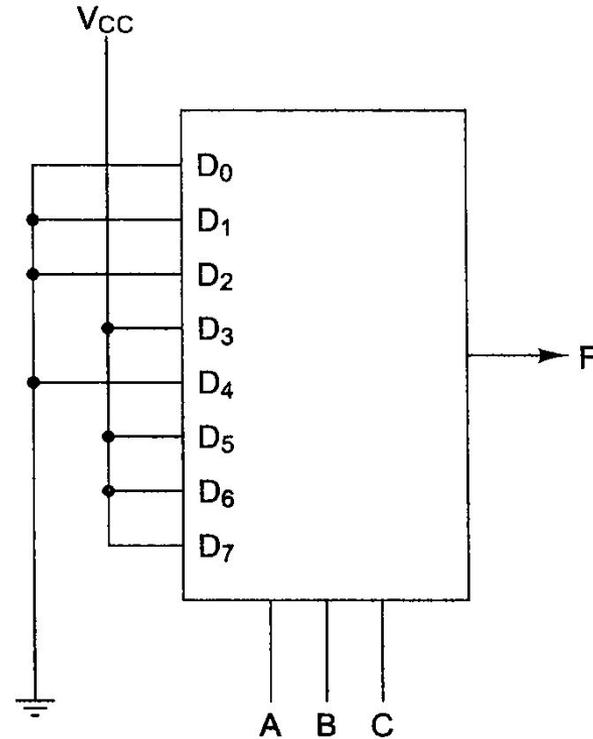


**Линии управления** A, B, C кодируют 3-разрядное двоичное число, которое определяет, какую из 8-ми **входных линий** соединить с выходом

# Схемы на мультиплексорах



Обозначение  
мультиплексора



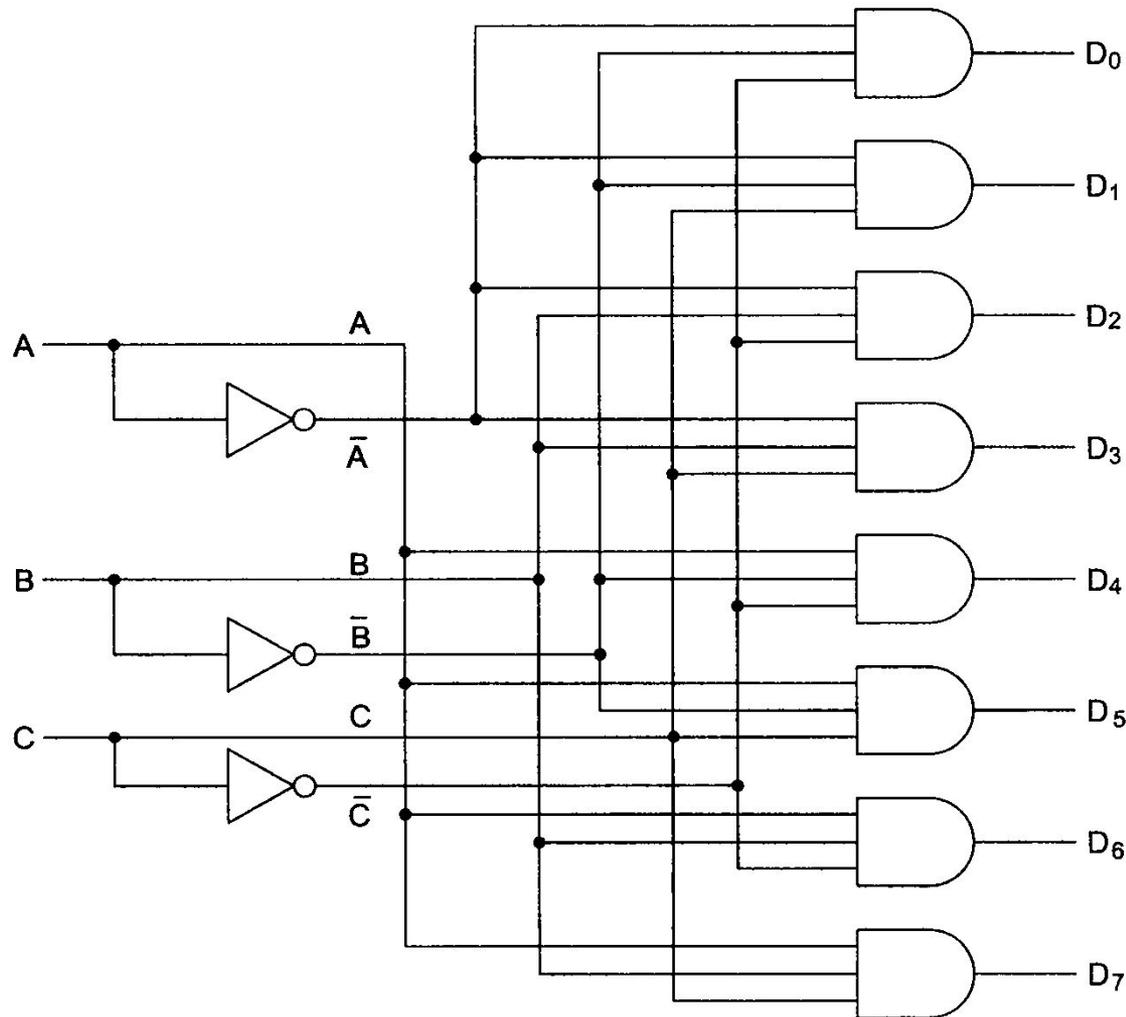
*Пример реализации функции большинства на мультиплексоре (просто подаём 1 на те линии, для которых ответ по табличке истинности = 1)*

Вывод: на мультиплексоре легко реализовать любую логическую функцию по её таблице истинности

*А ещё с помощью мультиплексора можно преобразовывать параллельный код в последовательный*

# Декодер

получает на вход  $n$ -разрядное число  $i$  и выставляет 1 на  $i$ -й линии

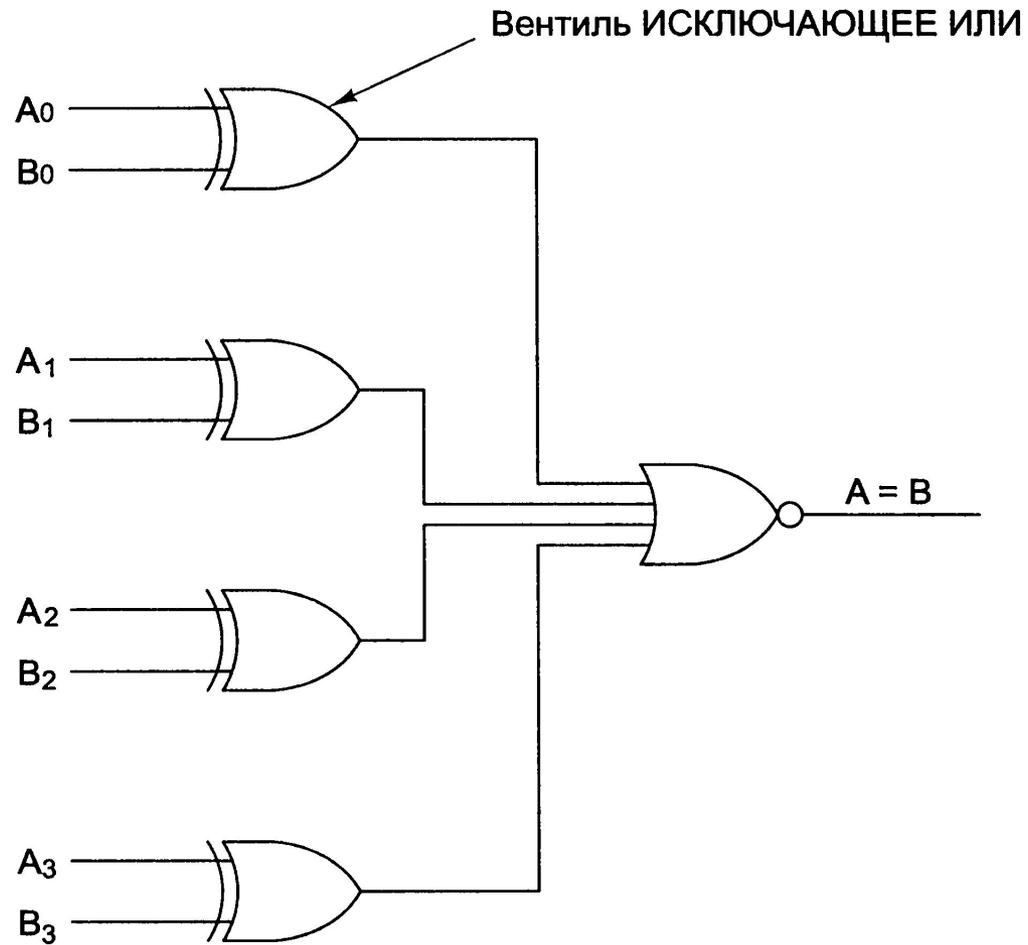


Принцип действия: каждый вентиль запускается уникальной комбинацией входов

Пример применения: на плате имеется 8 микросхем памяти по 1 мегабайту, нужно выбрать одну из них

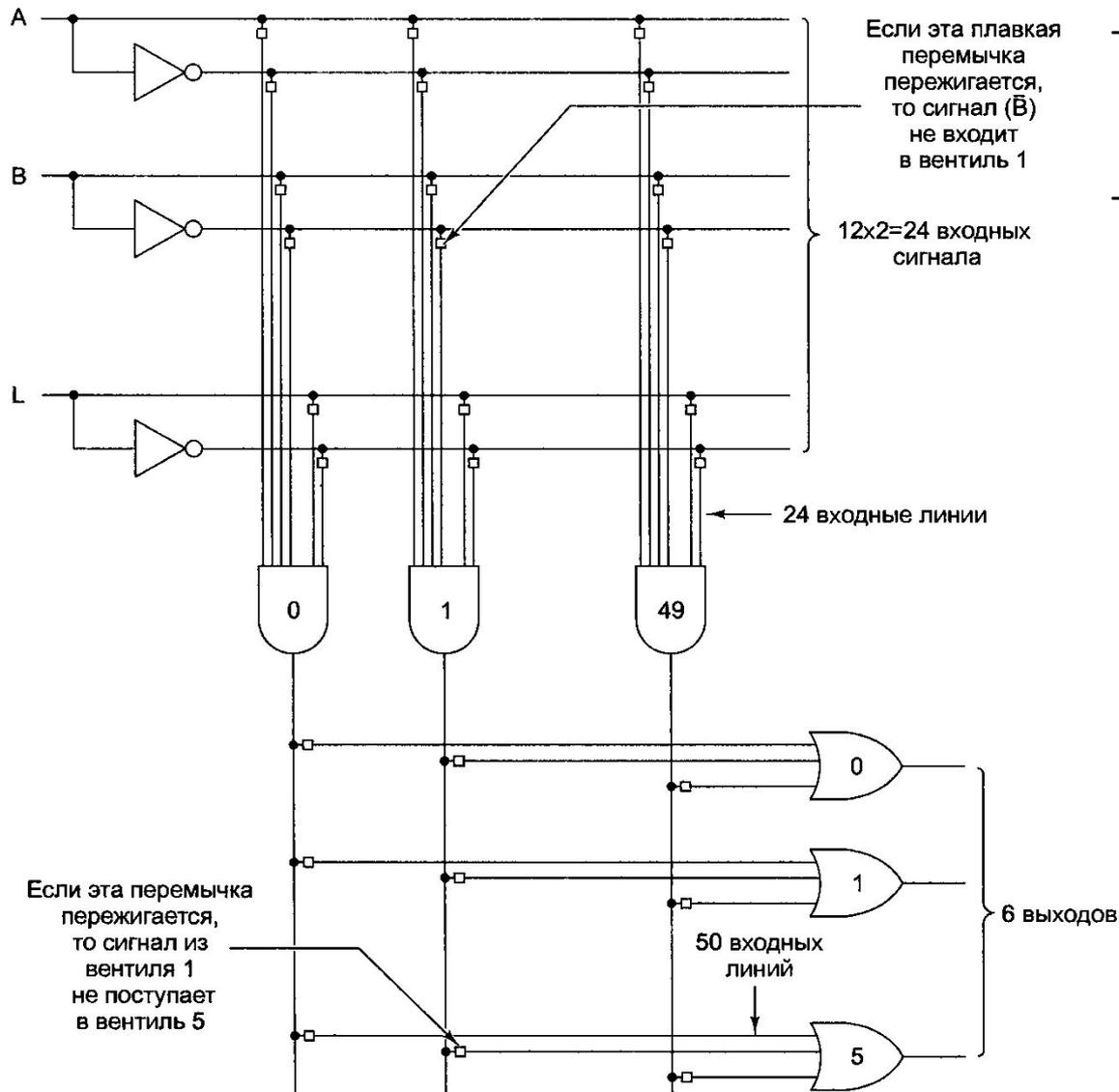
# Компаратор

сравнивает n-разрядные слова на равенство/неравенство



# Программируемые логические матрицы

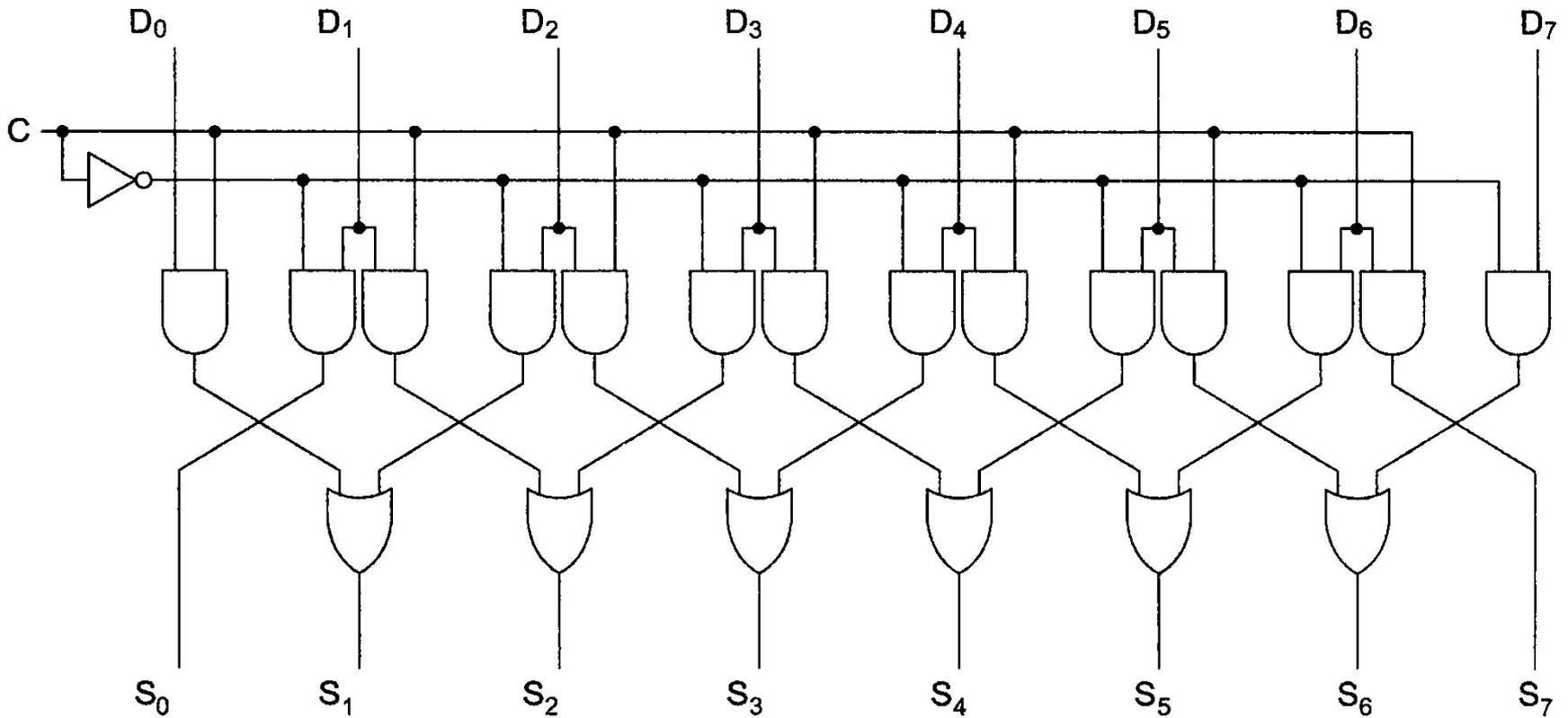
Содержат плавкие перемычки. Пережигая их, можно получать разные логические схемы



- ПЛМ с 12 входами и 6 выходами
- Обычно дешевле сразу заказать нужную конфигурацию на заводе

# Арифметические схемы

## Схема сдвига:

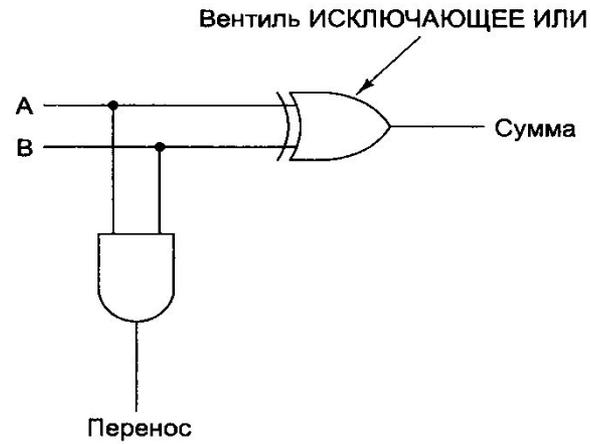


$D$  – входные линии,  $S$  – выходные линии

$C$  – направление сдвига (0 – влево, 1 – вправо)

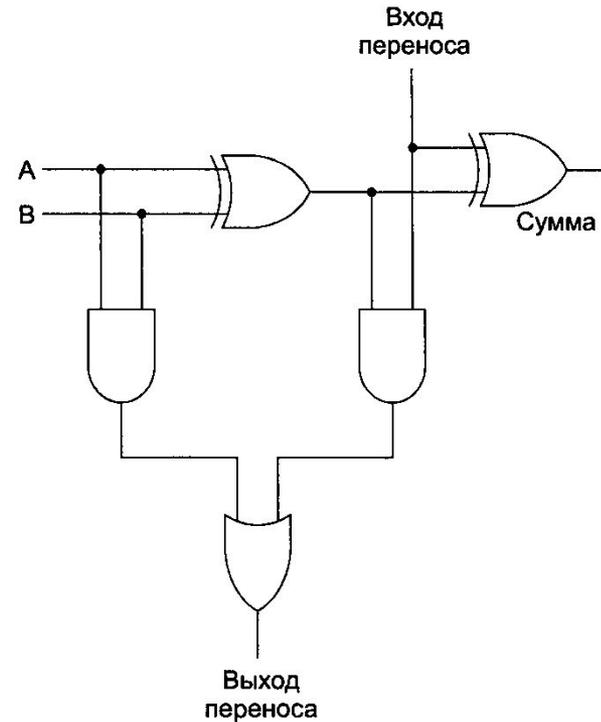
# Полусумматор

| A | B | Сумма | Перенос |
|---|---|-------|---------|
| 0 | 0 | 0     | 0       |
| 0 | 1 | 1     | 0       |
| 1 | 0 | 1     | 0       |
| 1 | 1 | 0     | 1       |



# Полный одноразрядный сумматор

| A | B | Вход переноса | Сумма | Выход переноса |
|---|---|---------------|-------|----------------|
| 0 | 0 | 0             | 0     | 0              |
| 0 | 0 | 1             | 1     | 0              |
| 0 | 1 | 0             | 1     | 0              |
| 0 | 1 | 1             | 0     | 1              |
| 1 | 0 | 0             | 1     | 0              |
| 1 | 0 | 1             | 0     | 1              |
| 1 | 1 | 0             | 0     | 1              |
| 1 | 1 | 1             | 1     | 1              |



# Сумматоры многоразрядных чисел

Простой подход:

Соединить последовательно  $N$  одноразрядных полных сумматоров (получится **сумматор со сквозным переносом**).

Минус – скорость работы в  $N$  раз ниже, чем у одноразрядного сумматора.

Более быстрый подход:

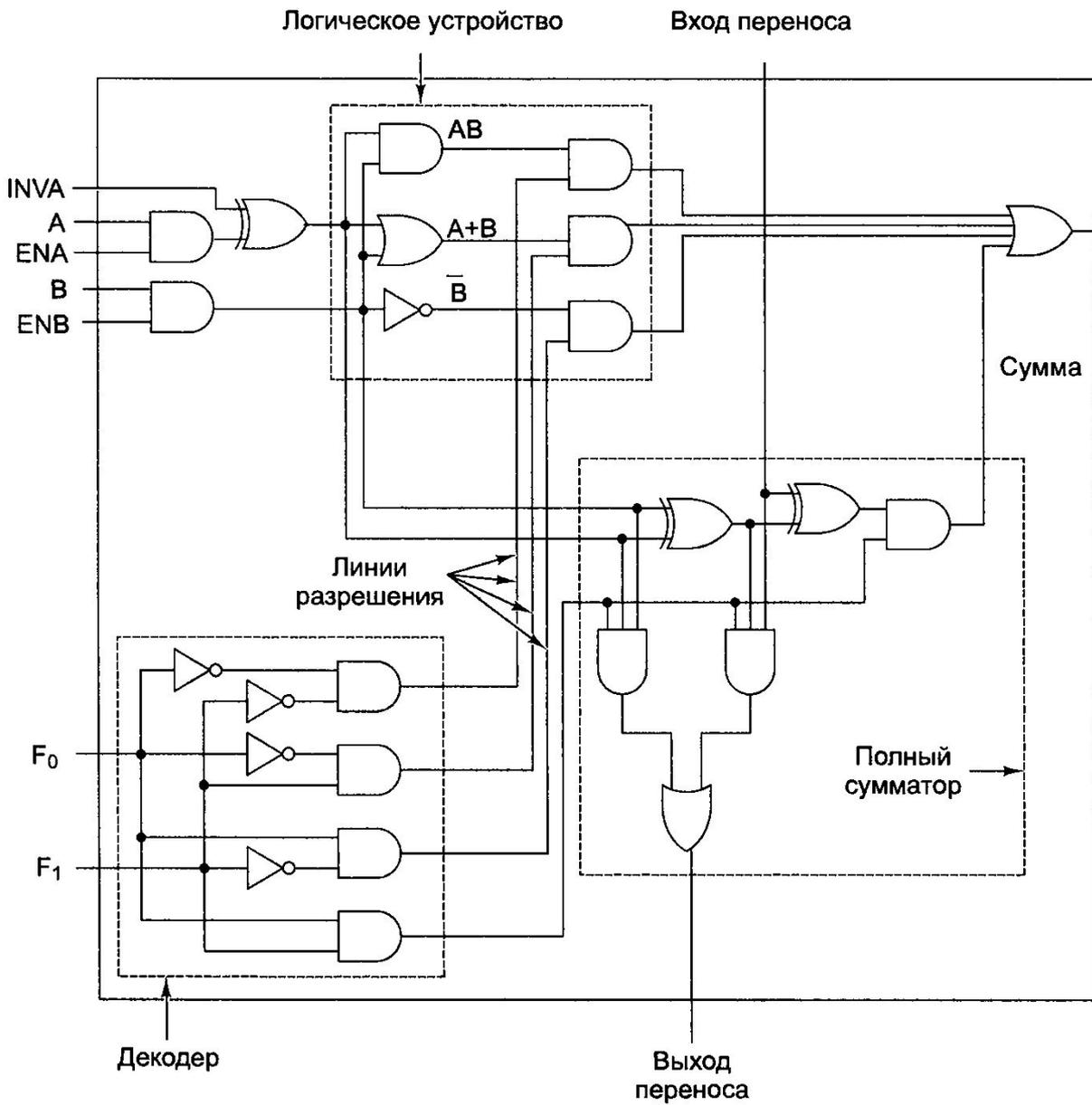
Пусть  $N=32$ . Разобьём 32-битный сумматор на две половины: нижний (младший) - **L** и два верхних (старших) - **U0** и **U1**, при этом:

- **U0** предполагает, что перенос в 16-й разряд = 0
- **U1** предполагает, что перенос в 16-й разряд = 1

В конце расчёта берётся верная старшая часть, а неверная отбрасывается.

Можно каждый 16-битный сумматор ещё разбить на 8-битные, и т.д.

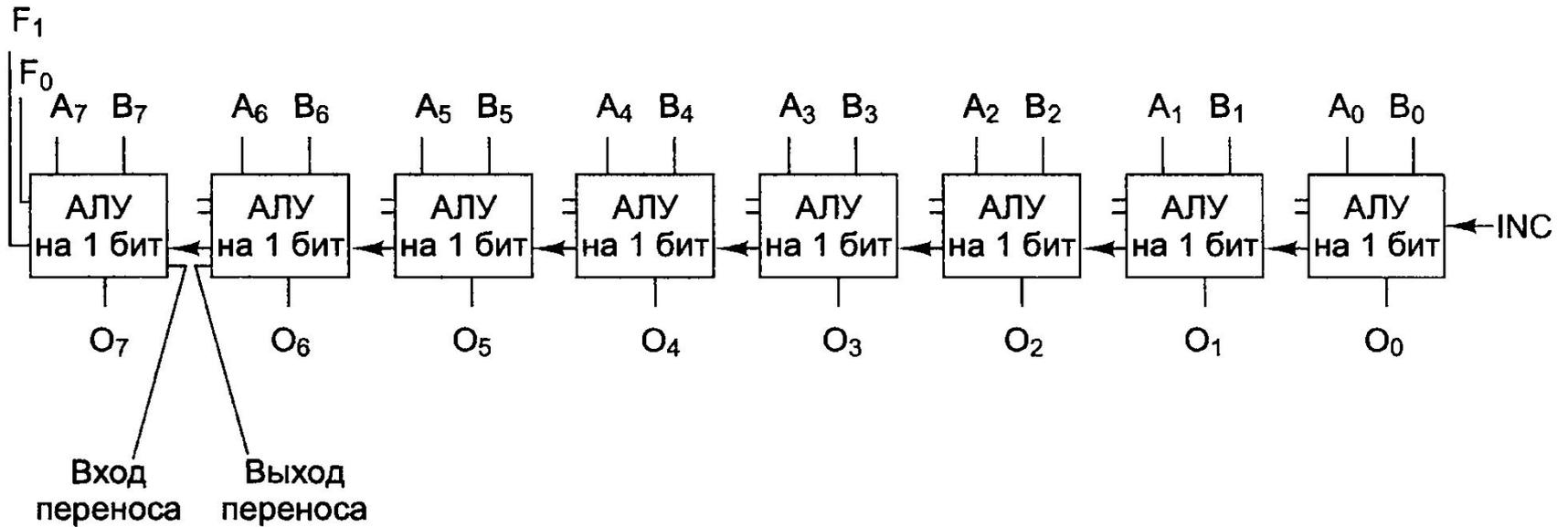
# Простейшее одноразрядное арифметико-логическое устройство (одноразрядная микропроцессорная секция)



F0 И F1 – команда управления:  
 00 – считать A И B  
 01 – считать A ИЛИ B  
 10 – считать НЕ B  
 11 – считать A+B

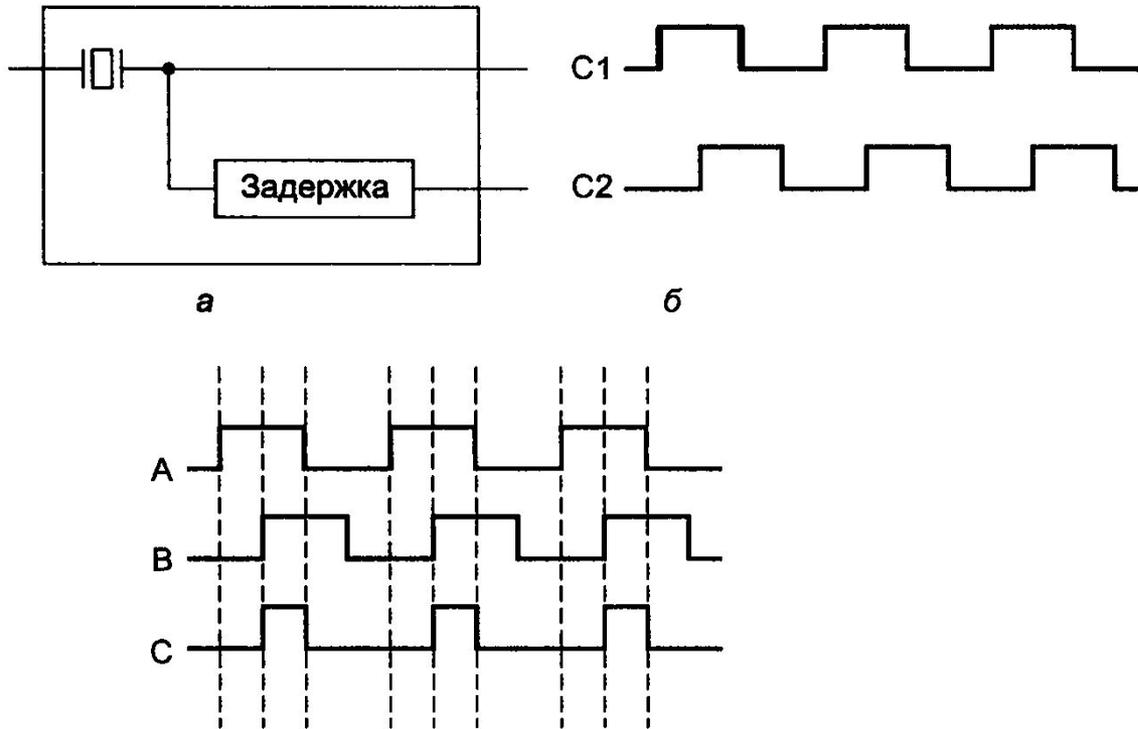
Сигнал ENA=0 – считать, что A=0  
 Сигнал ENB=0 – считать, что B=0  
 Сигнал INVA=1 – работать с инвертированным A

# Простейшее 8-разрядное арифметико-логическое устройство



Сигнал INC позволяет считать A+1 или A+B+1

# Тактовые генераторы (генераторы импульсов)



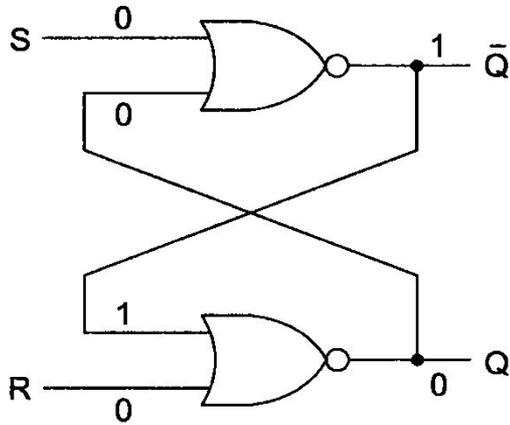
Если нужно на каждом такте выполнить несколько событий в определённом порядке, то можно сделать ответвление от сигнала тактового генератора и вставить схему задержки.

Синхронный генератор – время пика = времени спада (A и B на рисунке)

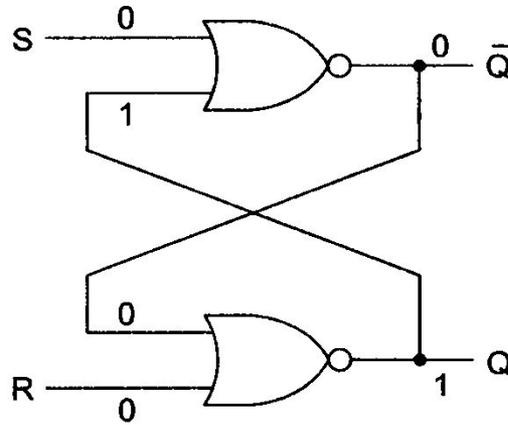
Асинхронный генератор – время пика  $\neq$  времени спада (сигнал C на рисунке)

# Устройство памяти

## SR-защелка:



а



б

| A | B | НЕ-ИЛИ |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 0      |

в

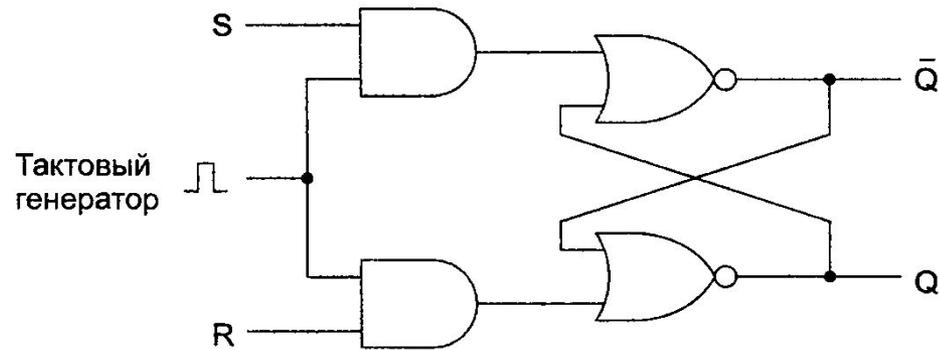
В режиме хранения  $S=R=0$ , и защелка может находиться в одном из двух устойчивых состояний (хранить бит 0 или 1)

$S = 1$  – заносит в защёлку 1

$R = 1$  – заносит в защёлку 0

Одновременно  $S=1$  и  $R=1$  – некорректное действие

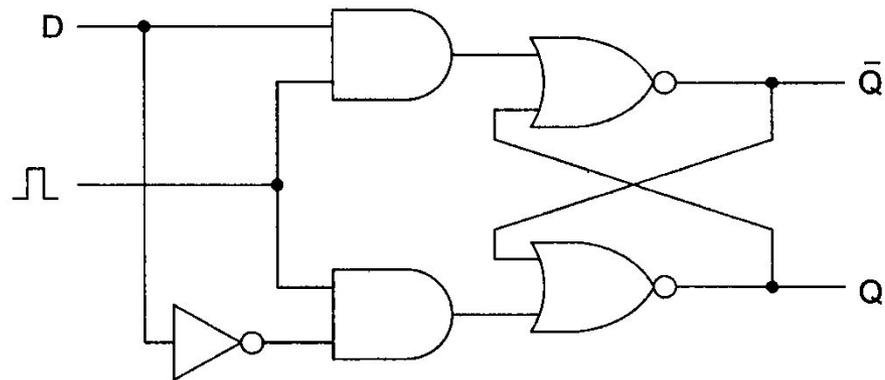
## Синхронная SR-защелка:



Появление единицы на синхронизирующем входе – **включение** или **стробирование**

## Синхронная D-защелка (элемент памяти в 1

бит):  
*Нет проблемы  
неоднозначности при  
 $S=R=1$*



Такая схема требует 11 транзисторов.

Существуют элементы памяти всего на 6 транзисторах.

# Отличия защелок и триггеров

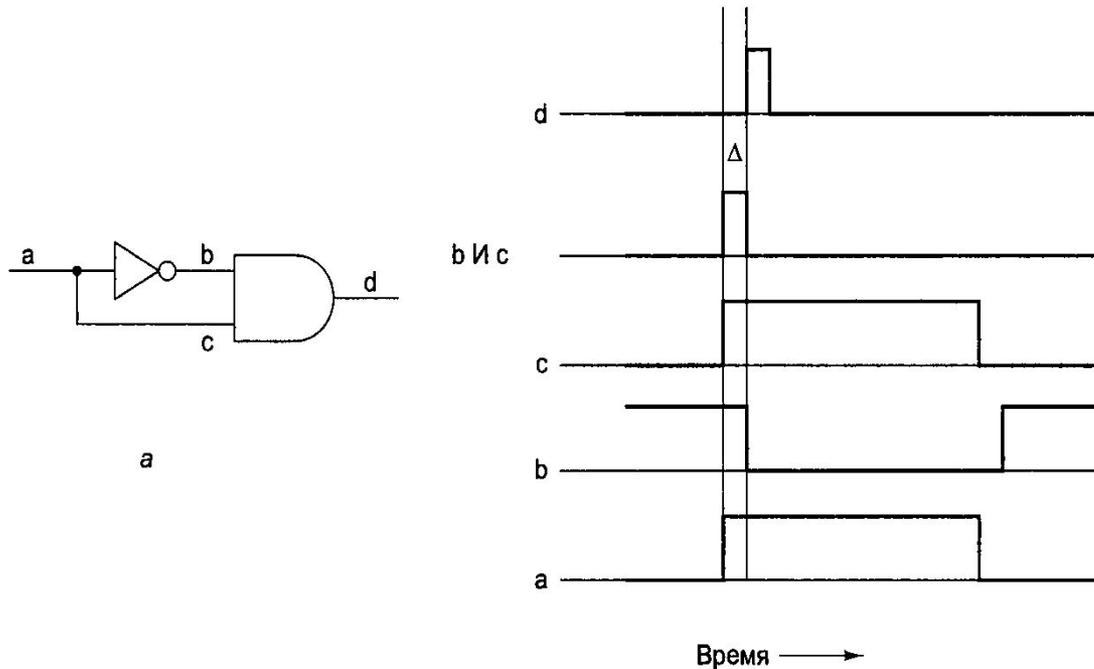
**Защелка** (latch) запускается *уровнем сигнала*

**Триггер** (flip-flop) запускается *перепадом сигнала* (с 0 на 1 или наоборот)

*В отечественной литературе защелка называется триггером, а триггер – T-триггером.*

Для создания триггера можно применить схему, дающую очень короткий импульс на D-защелку (ей этого хватит, чтобы сработать).

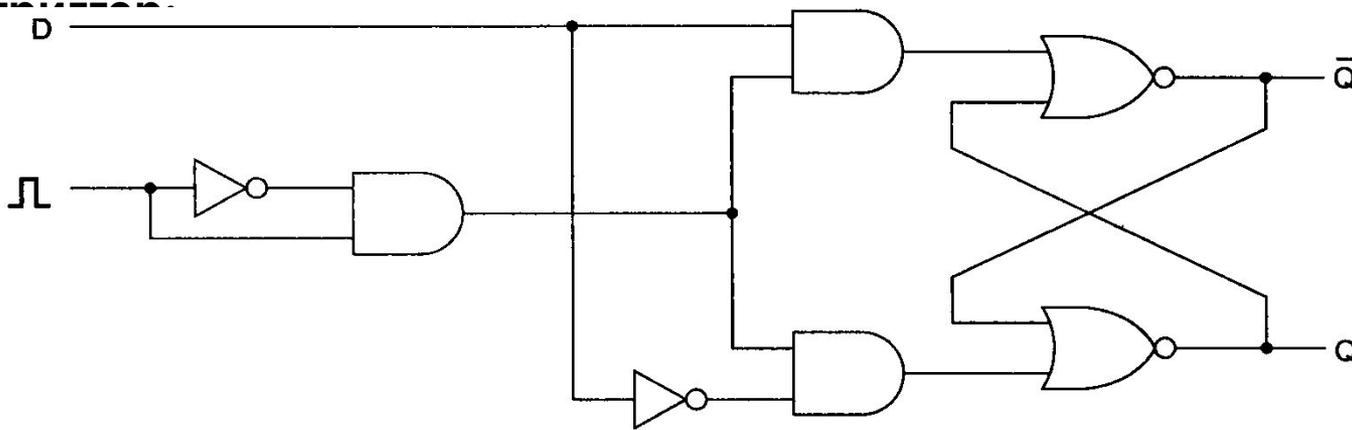
Простейшая схема:



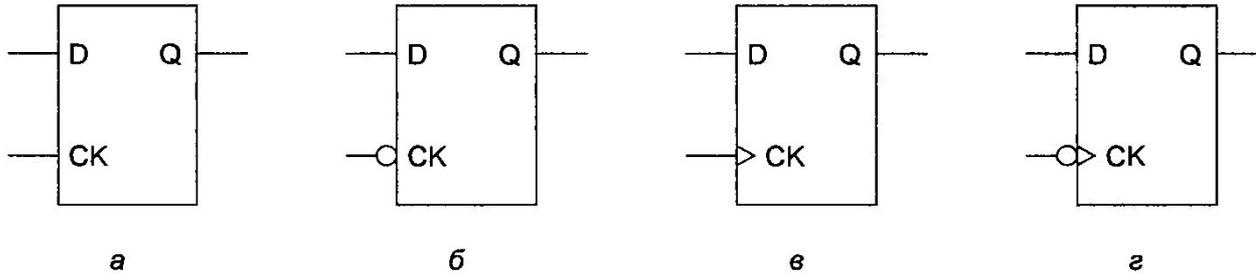
*Смысл в том, что элемент «НЕ» срабатывает с небольшой задержкой, и на короткое время на элемент «И» подадутся две единицы.*

*На схеме показано напряжение в разных точках схемы как функция от времени*

**В результате получаем D-**



**Обозначения защелок и триггеров:**



а – защелка, загружающая значение при СК=1,

б – защелка, загружающая значение при СК=0,

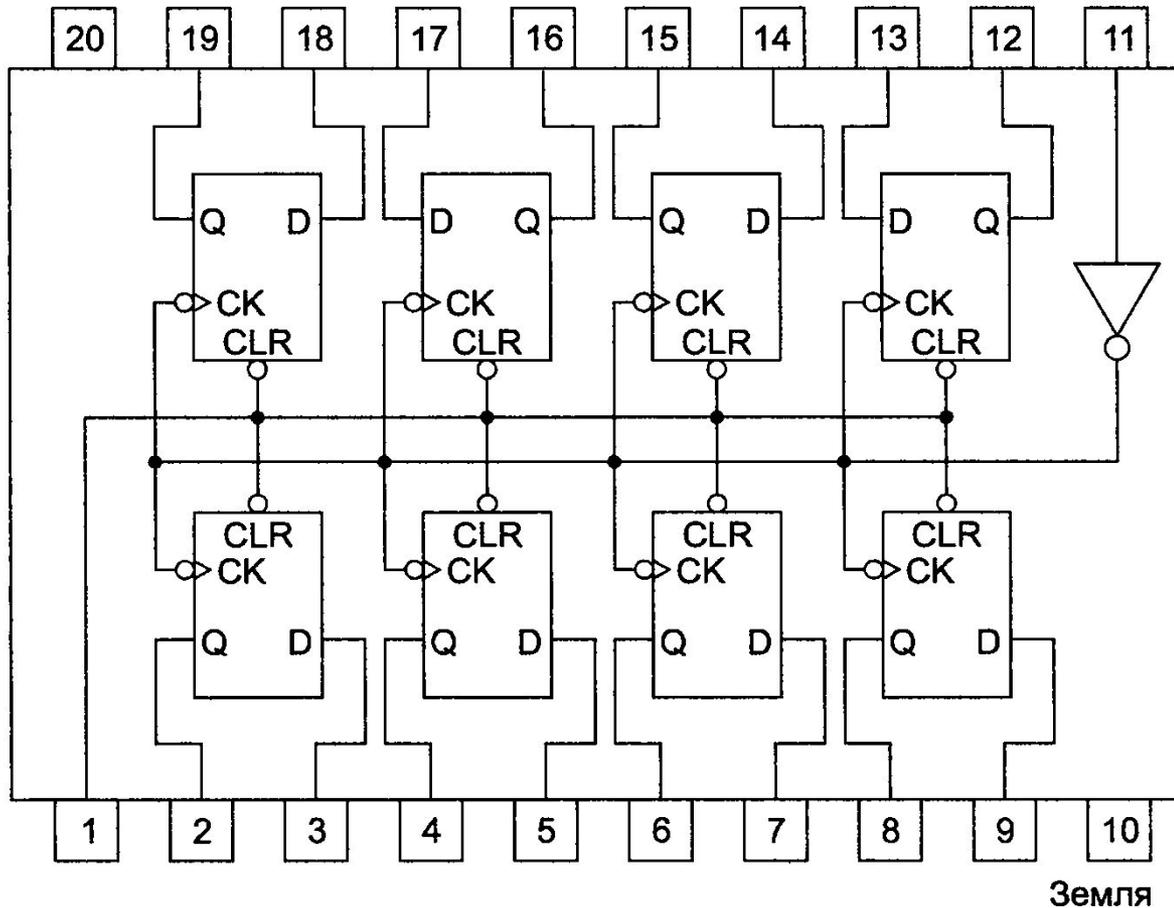
в – триггер, устанавливающий значение на фронте синхросигнала,

г - триггер, устанавливающий значение на спаде синхросигнала,

# 8-БИТНЫЙ

регистр:

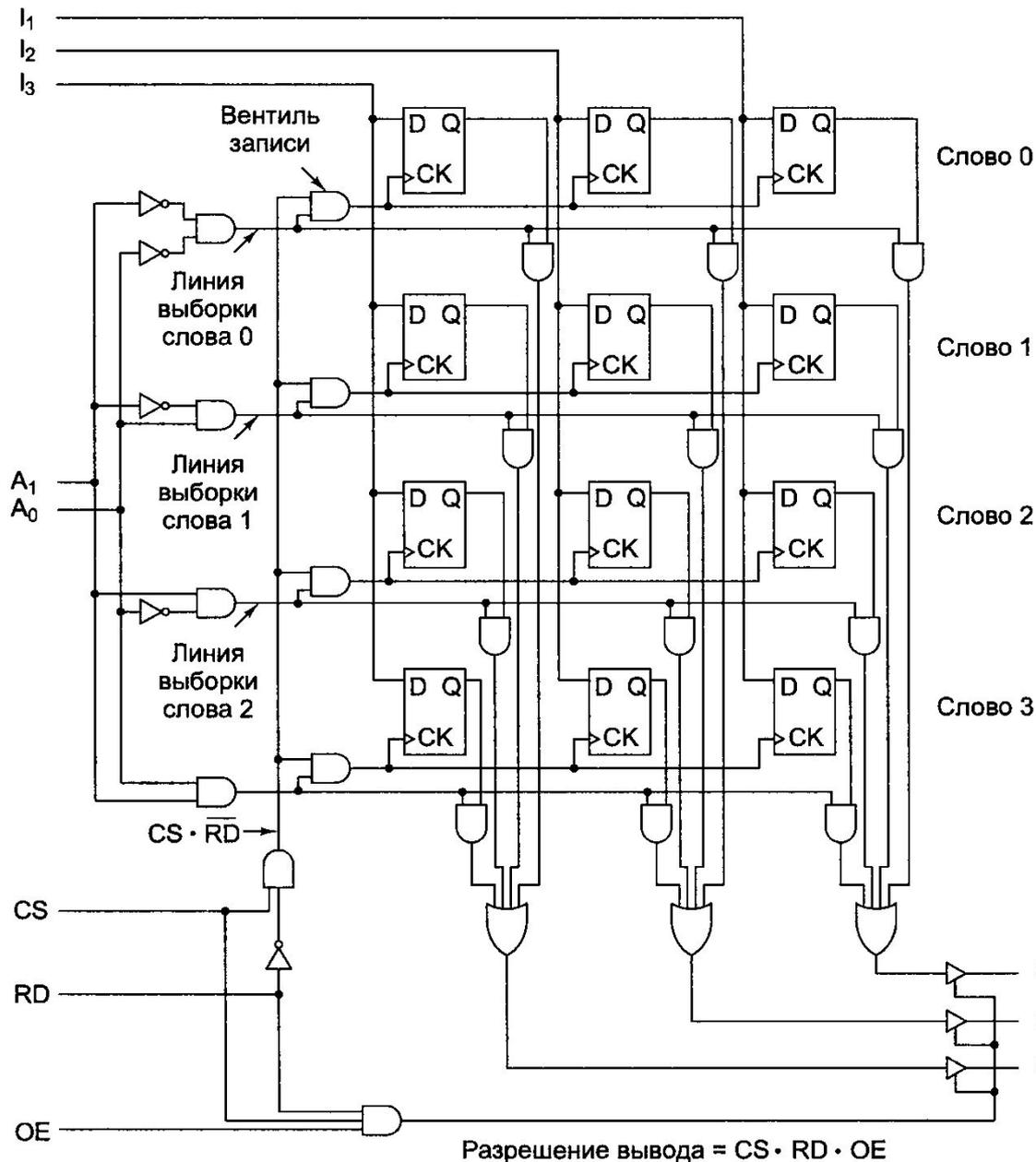
$V_{CC}$



Синхросигнал подаётся на 11-й вход. Он инвертируется на входе в микросхему, а потом ещё раз на входе в каждый триггер просто для усиления сигнала (иначе мощности сигнала не хватит на запуск 8-ми триггеров)

# Организация памяти большого объёма

Входные данные



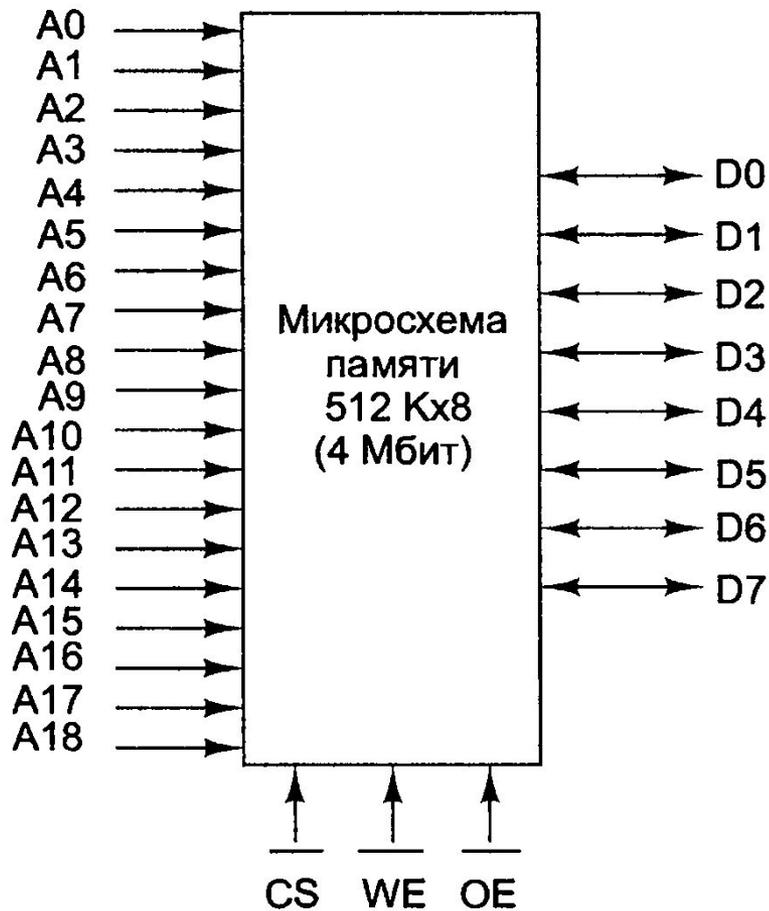
На рисунке память содержит четыре 3-разрядных слова  
Каждая операция считывает или записывает одно слово

**A0** и **A1** – адресные входы  
**I0, I1, I2** – входы для данных  
**O0, O1, O2** – выходы для данных  
**CS** (chip select) - выбор элемента памяти  
**RD** (read) – чтобы отличить чтение от записи (1-чтение, 0 – запись)  
**OE** (output enable) – разрешение выдачи выходных сигналов

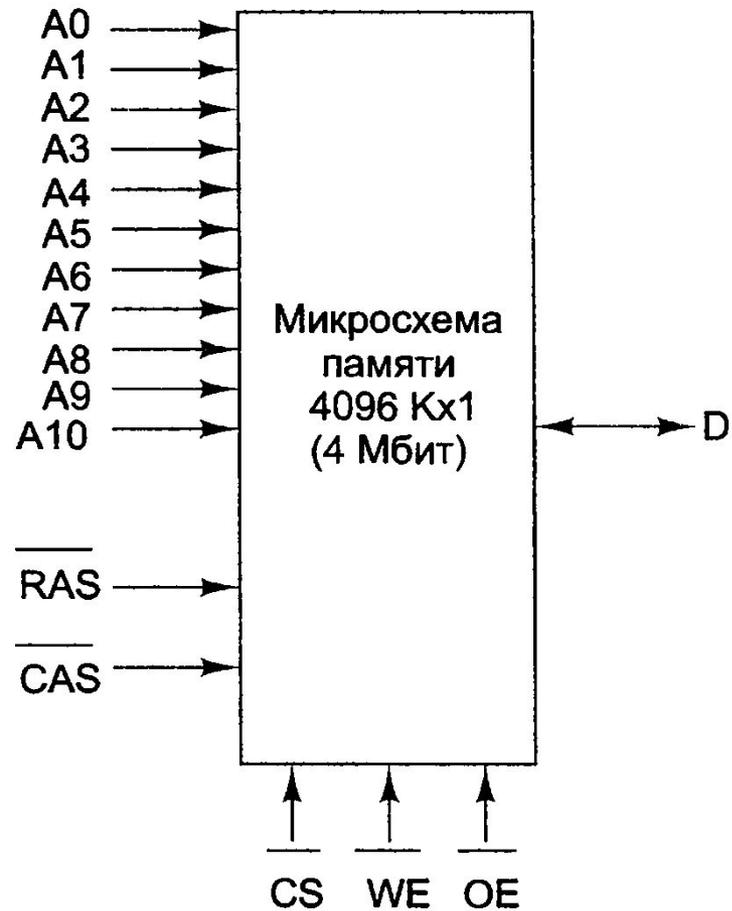
На практике для входных и выходных линий используют одни и те же проводники, прс



# Разные подходы к построению схем памяти



а



б

а – возвращает 8-битное слово

б – возвращает 1 бит, но работает в 2 раза медленнее: сначала подаётся номер строки (и сигнал RAS), потом номер столбца (и сигнал CAS)