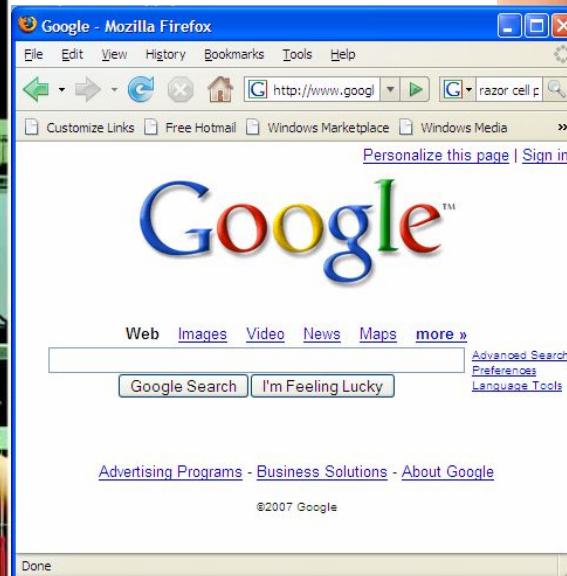


Глава1 :: Темы

- Микроэлектронная промышленность
- План игры
- Искусство управления сложностью
- Цифровая абстракция
- Системы счисления
- Логические элементы
- Логические уровни
- КМОП транзисторы
- Энергопотребление

Полупроводниковая микроэлектроника

- Микропроцессоры кардинально изменили наш мир
 - Сотовые телефоны, интернет, достижения в медицинской сфере
- Объем продаж полупроводниковой промышленности вырос с 21 миллиарда долларов в 1985 году до 300 миллиардов долларов в 2011



План игры

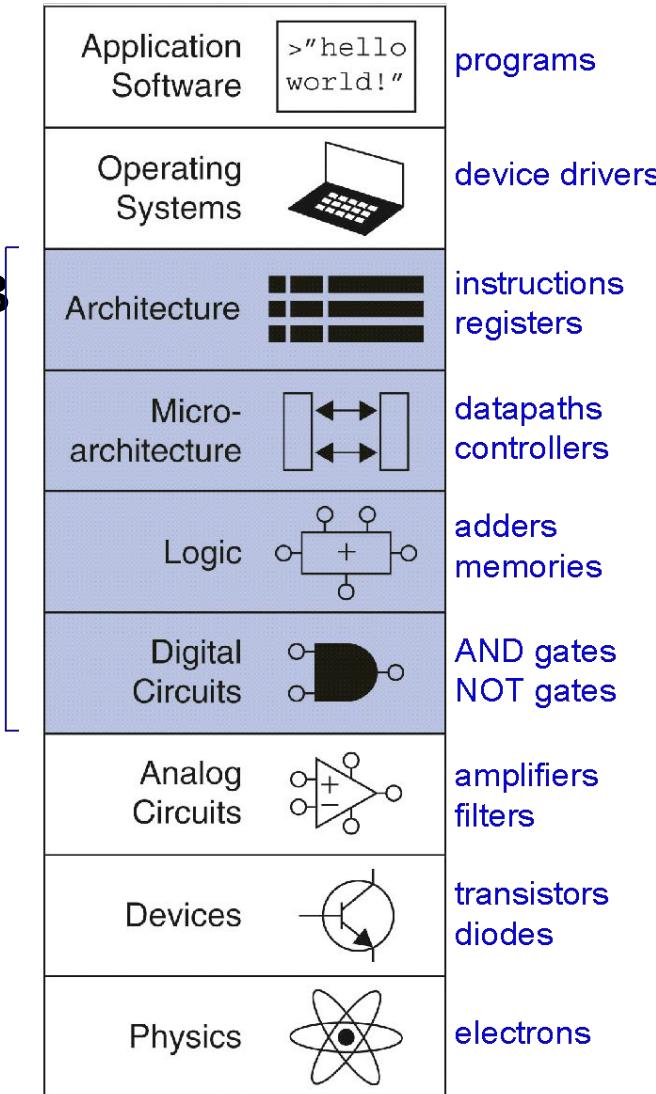
- Цель курса:
 - Понять, что происходит внутри корпуса компьютера
 - Изучить основные принципы цифровой схемотехники
 - Научиться разрабатывать проекты увеличивающейся сложности
 - Научиться проектировать микропроцессоры

Искусство управления

- Абстракция
- Дисциплина
- Три базовых принципа
 - Иерархичность
 - Модульность
 - Регулярность

Абстракция

- Исключение из рассмотрения деталей, которые в данном контексте неважны



Дисциплина

- Намеренное ограничение выбора возможных проектных решений
- Пример: Цифровая дисциплина
 - Использование дискретных значений напряжений вместо непрерывных
 - Цифровые системы проще проектировать, чем аналоговые – можно создать более сложные устройства
 - Аналоговые предшественники были вытеснены цифровыми системами:
 - например, цифровые камеры, цифровое телевидение, сотовые телефоны, компакт-диски

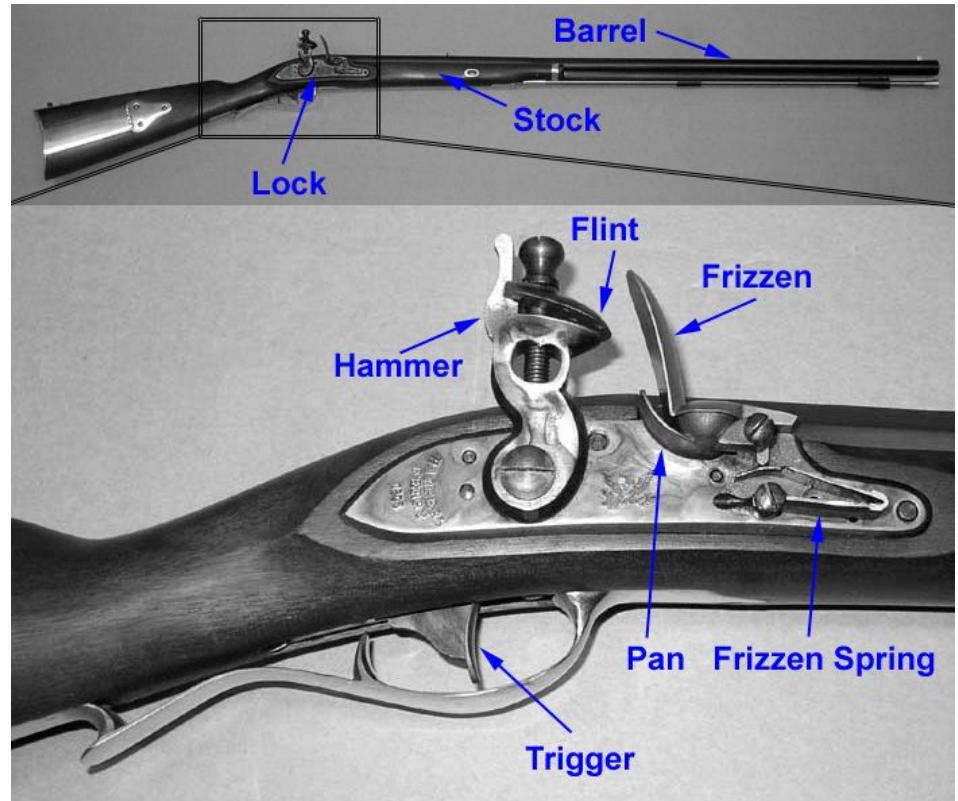
Три базовых принципа

- **Иерархичность**
 - Система разделяется на модули и подмодули
- **Модульность**
 - Каждый модуль имеет четко определенные функции и интерфейсы
- **Регулярность**
 - Поощрение единообразия, что позволяет многократно использовать модули

Пример: Кремневое ружье

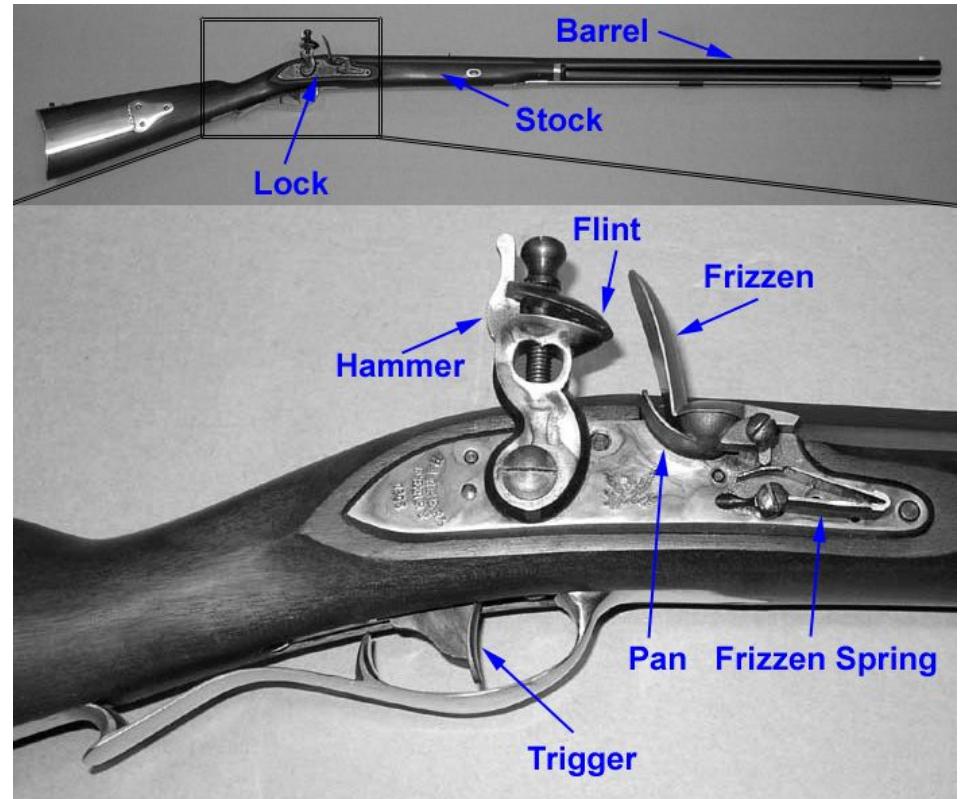
- **Иерархичность**

- Три главные модуля:
ствол, ударно-спусковой
механизм и приклад с
цевьем
- Подмодули ударно-
спускового механизма:
крючок, курок, кремень и
т.д.



Пример: Кремневое ружье

- **Модульность**
 - **Функции приклада и цевья:** служить базой для установки ствола и ударно-спускового механизма
 - **Интерфейс приклада и цевья:** длина и расположение посадочных мест
- **Регулярность**
 - Взаимозаменяемые детали

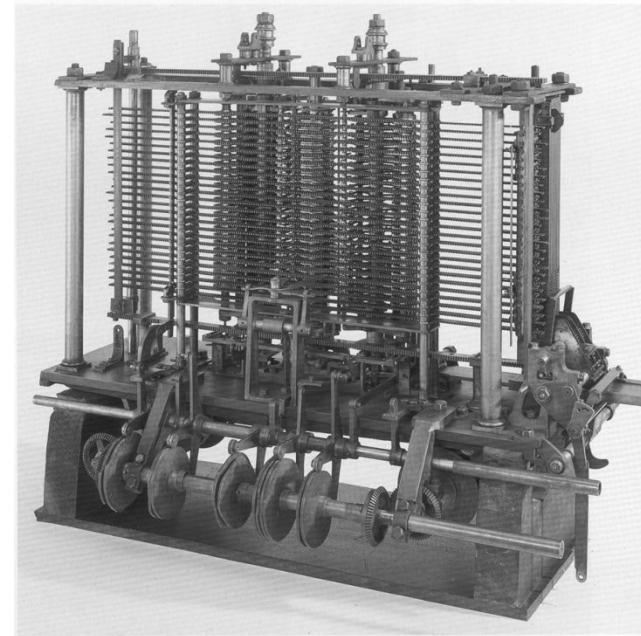


Цифровая абстракция

- Большинство физических величин **непрерывны**
 - Потенциал проводника
 - Частота колебаний
 - Положение тела
- Цифровая абстракция рассматривает **дискретное множество возможных значений**

Аналитическая машина

- Спроектирована Чарльзом Бэббиджем в 1834 – 1871 годах
- Считается первым цифровым компьютером
- Построена из механических шестеренок, каждая шестеренка представляла дискретную величину (0-9)
- Бэббидж не дожил до окончания работ над машиной

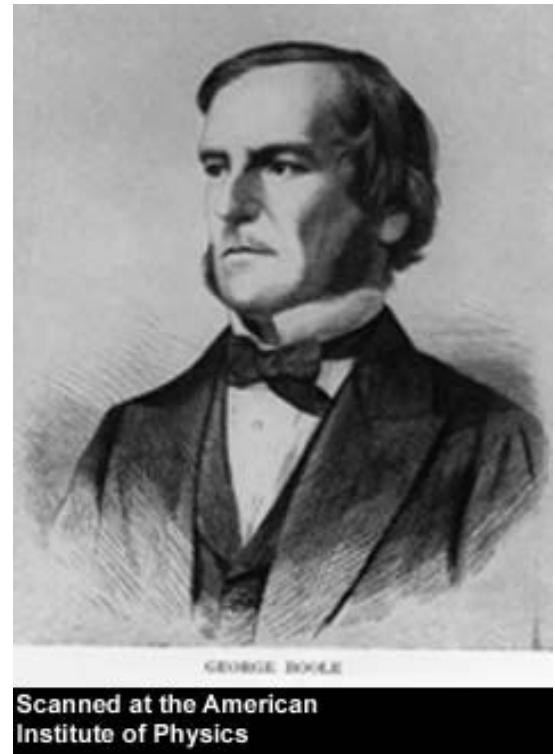


Цифровая дисциплина: Двоичные переменные

- **Два дискретные значения:**
 - 1 и 0
 - 1, Истина, Большая величина
 - 0, Ложь, Малая величина
- **1 и 0:** Величина напряжения, угол поворота шестеренки, уровень жидкости и т.д.
- Цифровые схемы используют значение **напряжения** для представления 0 и 1
- **Бит (Bit):** Двоичная цифра (*Binary digit*)

Джордж Буль, 1815-1864

- Родился в семье небогатого ремесленника
- Самостоятельно изучал математику и стал преподавателем Королевского колледжа в Ирландии.
- Написал работу *Исследование законов мышления* (1854)
- Ввел двоичные переменные
- Ввел три основных логических оператора: И, ИЛИ, НЕ (AND, OR, NOT)



Системы счисления

- Десятичные числа

1's column
10's column
100's column
1000's column

$$5374_{10} =$$

- Двоичные числа

1's column
2's column
4's column
8's column

$$1101_2 =$$

Системы счисления

- Десятичные числа

1's column
10's column
100's column
1000's column

$$5374_{10} = 5 \times 10^3 + 3 \times 10^2 + 7 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

five thousands three hundreds seven tens four ones

- Двоичные числа

8's column
1's column
2's column
4's column

$$1101_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 13_{10}$$

one eight one four no two one one

Степени числа 2

- $2^0 =$
- $2^1 =$
- $2^2 =$
- $2^3 =$
- $2^4 =$
- $2^5 =$
- $2^6 =$
- $2^7 =$
- $2^8 =$
- $2^9 =$
- $2^{10} =$
- $2^{11} =$
- $2^{12} =$
- $2^{13} =$
- $2^{14} =$
- $2^{15} =$

Степени числа 2

- $2^0 = 1$
- $2^1 = 2$
- $2^2 = 4$
- $2^3 = 8$
- $2^4 = 16$
- $2^5 = 32$
- $2^6 = 64$
- $2^7 = 128$
- Желательно запомнить до 2^9
- $2^8 = 256$
- $2^9 = 512$
- $2^{10} = 1024$
- $2^{11} = 2048$
- $2^{12} = 4096$
- $2^{13} = 8192$
- $2^{14} = 16384$
- $2^{15} = 32768$

Преобразование системы счисления

- Преобразование двоичного числа в десятичное:
 - Преобразовать 10011_2 в десятичное число
- Преобразование десятичного числа в двоичное:
 - Преобразовать 47_{10} в двоичное число

Преобразование системы счисления

- Преобразование десятичного числа в двоичное:
 - Преобразовать 10011_2 в десятичное число
 - $16 \times 1 + 8 \times 0 + 4 \times 0 + 2 \times 1 + 1 \times 1 = 19_{10}$
- Преобразование десятичного числа в двоичное:
 - Преобразовать 47_{10} в двоичное число
 - $32 \times 1 + 16 \times 0 + 4 \times 1 + 2 \times 1 + 1 \times 1 = 101111_2$

Двойничные числа и их диапазоны

- N -разрядное десятичное число
 - Сколько значений?
 - Диапазон?
 - Пример: Трехразрядное десятичное число
- N -битовое двоичное число
 - Сколько значений?
 - Диапазон:
 - Пример: Трехразрядное двоичное число

Двойничные числа и их диапазоны

- N -разрядное десятичное число
 - Сколько значений? 10^N
 - Диапазон? $[0, 10^N - 1]$
 - Пример: Трехразрядное десятичное число
 - $10^3 = 1000$ возможных значений
 - Диапазон: $[0, 999]$
- N -битовое двоичное число
 - Сколько значений? 2^N
 - Диапазон: $[0, 2^N - 1]$
 - Пример: Трехразрядное двоичное число
 - $2^3 = 8$ возможных значений
 - Диапазон: $[0, 7] = [\text{от } 000_2 \text{ до } 111_2]$

Шестнадцатеричные числа

| Шестнадцатеричная цифра | Десятичный эквивалент | Двоичный эквивалент |
|-------------------------|-----------------------|---|
| 0 | 0 | |
| 1 | 1 | |
| 2 | 2 | |
| 3 | 3 | |
| 4 | 4 | |
| 5 | 5 | |
| 6 | 6 | |
| 7 | 7 | |
| 8 | 8 | |
| 9 | 9 | |
| A | 10 | |
| B | 11 | |
| C | 12 | |
| D | 13 | |
| E | 14 | |
| F | 15 |  |

Шестнадцатеричные числа

| Шестнадцатеричная цифра | Десятичный эквивалент | Двоичный эквивалент |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0000 |
| 1 | 1 | 0001 |
| 2 | 2 | 0010 |
| 3 | 3 | 0011 |
| 4 | 4 | 0100 |
| 5 | 5 | 0101 |
| 6 | 6 | 0110 |
| 7 | 7 | 0111 |
| 8 | 8 | 1000 |
| 9 | 9 | 1001 |
| A | 10 | 1010 |
| B | 11 | 1011 |
| C | 12 | 1100 |
| D | 13 | 1101 |
| E | 14 | 1110 |
| F | 15 | 1111 |

Шестнадцатеричные числа

- Основание 16
- Компактная запись двоичных чисел

Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные

- Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные:
 - Преобразовать $4AF_{16}$ (также записывается $0x4AF$) в двоичное число
- Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные:
 - Преобразовать $0x4AF$ в десятичное число

Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные

- Преобразование шестнадцатеричных чисел в двоичные:
 - Преобразовать $4AF_{16}$ (также записывается $0x4AF$) в двоичное число
 - $0100\ 1010\ 1111_2$
- Преобразование шестнадцатеричных чисел в десятичные:
 - Преобразовать $4AF_{16}$ в десятичное число
 - $16^2 \times 4 + 16^1 \times 10 + 16^0 \times 15 = 1199_{10}$

Биты, байты, полубайты...

- Биты

10010110

most significant bit least significant bit

- Байты и
- полубайты (nibble)

byte
10010110
nibble

- Байты

C E B F 9 A D 7

most significant byte least significant byte

Большие степени 2

- $2^{10} = 1$ кило ≈ 1000 (1024)
- $2^{20} = 1$ мега ≈ 1 миллион (1,048,576)
- $2^{30} = 1$ гига ≈ 1 миллиард (1,073,741,824)

Вычисление степеней 2

- Чему равно 2^{24} ?
- Сколько значений может представить 32-битовая переменная?

Вычисление степеней 2

- Чему равно 2^{24} ?
 - $2^4 \times 2^{20} \approx 16 \text{ миллионов}$
- Сколько значений может представить 32-битовая переменная?
 - $-2^2 \times 2^{30} \approx 4 \text{ миллиарда}$

Сложение

- Десятичное

$$\begin{array}{r} 11 \leftarrow \text{carries} \\ 3734 \\ + 5168 \\ \hline 8902 \end{array}$$

- Двоичное

$$\begin{array}{r} 11 \leftarrow \text{carries} \\ 1011 \\ + 0011 \\ \hline 1110 \end{array}$$

Примеры сложения двоичных чисел

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 1001 \\ + 0101 \\ \hline \end{array}$$

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 1011 \\ + 0110 \\ \hline \end{array}$$

Примеры сложения двоичных чисел

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} & & 1 \\ & 1001 \\ + & 0101 \\ \hline 1110 \end{array}$$

- Сложите следующие 4-битовые двоичные числа

$$\begin{array}{r} 111 \\ 1011 \\ + 0110 \\ \hline 10001 \end{array}$$

Переполнение!

Переполнение

- Цифровые системы работают с **фиксированным количеством разрядов**
- Переполнение: когда результат слишком большой, чтобы поместится в доступном количестве разрядов
- Вспомните пример сложения $11 + 6$

Двоичные числа со знаком

- Числа в прямом коде
- Числа в дополнительном коде

Числа в прямом коде

- Один знаковый бит, $N-1$ битов величины
- Знаковый бит является старшим (самым левым) битом
 - Положительные числа:
знаковый бит = 1
 - Отрицательные числа:
знаковый бит = 0
- Пример, 4-битовое представление числа ± 6 в прямом коде
 - +6 =
 - 6 =
- Диапазон N -битового числа в прямом коде:

$$A : \{a_{N-1}, a_{N-2}, \dots, a_2, a_1, a_0\}$$

$$A = (-1)^{a_{n-1}} \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

Числа в прямом коде

- Один знаковый бит, $N-1$ битов величины
- Знаковый бит является старшим (самым левым) битом
 - Положительные числа:

знаковый бит = 1

$$A : \{a_{N-1}, a_{N-2}, \dots, a_2, a_1, a_0\}$$

– Отрицательные числа:

знаковый бит = 0

$$A = (-1)^{a_{n-1}} \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Пример, 4-битовое представление числа ± 6 в прямом коде

$$+6 = 0110$$

$$-6 = 1110$$

- Диапазон N -битового числа в прямом коде:

$$[-(2^{N-1}-1), 2^{N-1}-1]$$

Числа в прямом коде

- Недостатки:
 - Стандартный способ сложения не работает, например, $-6 + 6$:

$$\begin{array}{r} 1110 \\ +0110 \\ \hline \end{array}$$

10100 (не правильно!)

- Два представления числа 0 (± 0):

1000

0000

Числа в дополнительном

- Не имеет проблем прямого кода
 - Алгоритм сложения работает
 - Единственное представление 0

Числа в дополнительном

- Старший бит имеет вес -2^{N-1}

$$A = a_{n-1} \left(-2^{n-1} \right) + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Наибольшее положительное 4-битовое число
- Наибольшее (по модулю) отрицательное 4-битовое число
- Старший бит, как и ранее, показывает знак ($1 =$ отрицательное, $0 =$ положительное)
- Диапазон N -битового числа в дополнительном коде:

Числа в дополнительном

- Старший бит имеет вес -2^{N-1}

$$A = a_{n-1} \left(-2^{n-1} \right) + \sum_{i=0}^{n-2} a_i 2^i$$

- Наибольшее положительное 4-битовое число **0111**
- Наибольшее (по модулю) отрицательное 4-битовое число **1000**
- Старший бит, как и ранее, показывает знак ($1 =$ отрицательное, $0 =$ положительное)
- Диапазон N -битового числа в дополнительном коде: **$[-(2^{N-1}-1), 2^{N-1}-1]$**



Операция “Дополнение до двух”

- Изменение знака числа, представленного в дополнительном коде
- Метод:
 1. Инвертировать биты
 2. Добавить 1
- Пример: Изменить знак $3_{10} = 0011_2$

Операция “Дополнение до двух”

- Изменение знака числа, представленного в дополнительном коде
- Метод:
 1. Инвертировать биты
 2. Добавить 1
- Пример: Изменить знак $3_{10} = 0011_2$
$$\begin{array}{r} \text{1. } \underline{\text{1100}} \\ \text{2. } \underline{+ 1} \\ \hline \text{1101} = -3_{10} \end{array}$$

Примеры вычислений с числами в дополнительном коде

- Найти представление в дополнительном коде числа $6_{10} = 0110_2$
- Чему равно десятичное представление числа 1001_2 ?

Примеры вычислений с числами в дополнительном коде

- Найти представление в дополнительном коде $6_{10} = 0110_2$

$$\begin{array}{r} \text{1. } \underline{1001} \\ \text{2. } + \quad 1 \end{array}$$

$$1010 = -6_{10}$$

- Чему равно десятичное представление числа в дополнительном коде 1001_2 ?

$$\begin{array}{r} \text{1. } 0110 \\ \text{2. } + \quad 1 \end{array}$$

$$\overline{-0111}_2 = 7_{10}, \text{ следовательно } 1001_2 = -7_{10}$$

Сложение чисел в дополнительном коде

- Сложить числа $6 + (-6)$ с использованием дополнительного кода

$$\begin{array}{r} 0110 \\ + \quad 1010 \\ \hline \end{array}$$

- Сложить числа $-2 + 3$ с использованием дополнительного кода

$$\begin{array}{r} 1110 \\ + \quad 0011 \\ \hline \end{array}$$

Сложение чисел в дополнительном коде

- Сложить числа $6 + (-6)$ с использованием дополнительного кода

111

0110

+ 1010

—————
10000

- Сложить числа $-2 + 3$ с использованием дополнительного кода

111

1110

+ 0011

—————
10001

Увеличение количества бит

- **Увеличить количество бит с N до M ($M > N$) :**
 - Знаковое расширение
 - Дополнение нулями

Знаковое расширение

- Знаковый бит копируется во все новые старшие биты
- Значение числа не изменяется
- **Пример 1:**
 - 4-битовое представление $3 = 0011$
 - 8-битовое представление: 00000011
- **Пример 2:**
 - 4-битовое представление $-5 = 1011$
 - 8-битовое представление: 11111011

Дополнение нулями

- Все новые старшие биты принимают нулевое значение
- Значение отрицательных чисел изменяется
- **Пример 1:**
 - 4-битовая величина = $0011_2 = 3_{10}$
 - 8-битовая величина после дополнения нулями:
 $00000011 = 3_{10}$
- **Пример 2:**
 - 4-битовая величина = $1011_2 = -5_{10}$
 - 8-битовая величина после дополнения нулями:
 $00001011 = 11_{10}$

Сравнение способов представления двоичных чисел

| Представление | Диапазон |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Числа без знака | $[0, 2^N-1]$ |
| Числа в прямом коде | $[-(2^{N-1}-1), 2^{N-1}-1]$ |
| Числа в дополнительном коде | $[-2^{N-1}, 2^{N-1}-1]$ |

Пример: 4-битовое представление:



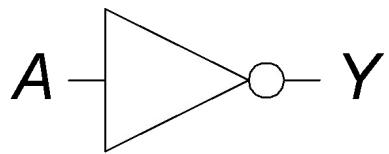
| Unsigned | 0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 1000 1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111 | Two's Complement |
|---|---|---|
| 1000 1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111 | 0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 | 1000 1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111 |
| 1111 1110 1101 1100 1011 1010 1001 | 0000 1000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 | Sign/Magnitude |

Логические элементы

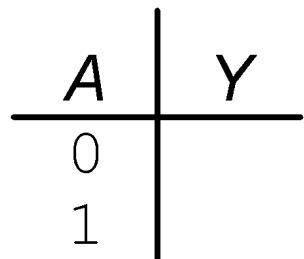
- **Выполняют логические функции**
 - Инверсия (НЕ), И (AND), ИЛИ (OR), И-НЕ (NAND), ИЛИ-НЕ(NOR), и т.д.
- **С одним входом**
 - Элемент НЕ, буфер
- **С двумя входами**
 - И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, Исключающее ИЛИ-НЕ
- **С несколькими входами**

Логические элементы с одним входом

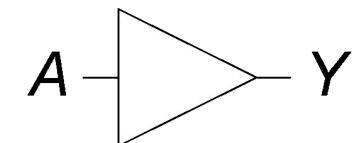
NOT



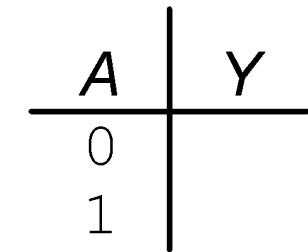
$$Y = \overline{A}$$



BUF

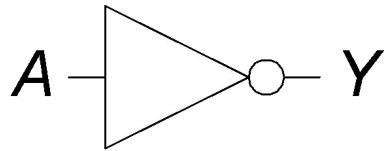


$$Y = A$$



Логические элементы с одним входом

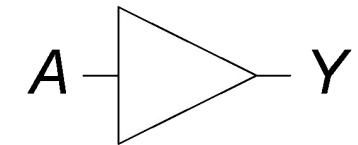
NOT



$$Y = \overline{A}$$

| A | Y |
|-----|-----|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

BUF

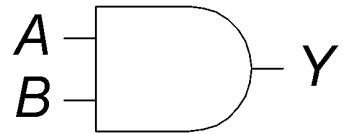


$$Y = A$$

| A | Y |
|-----|-----|
| 0 | 0 |
| 1 | 1 |

Логические элементы с двумя входами

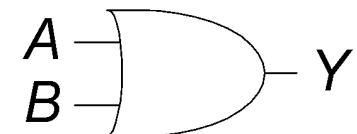
AND



$$Y = AB$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | |
| 0 | 1 | |
| 1 | 0 | |
| 1 | 1 | |

OR

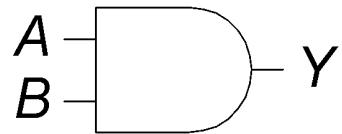


$$Y = A + B$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | |
| 0 | 1 | |
| 1 | 0 | |
| 1 | 1 | |

Логические элементы с двумя входами

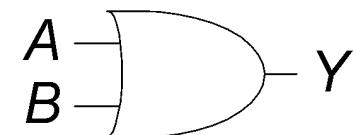
AND



$$Y = AB$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

OR

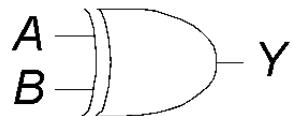


$$Y = A + B$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

Прочие логические элементы с двумя входами

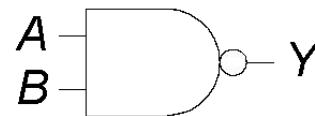
XOR



$$Y = A \oplus B$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | |
| 0 | 1 | |
| 1 | 0 | |
| 1 | 1 | |

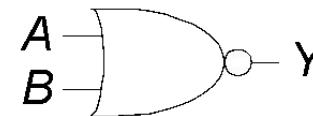
NAND



$$Y = \overline{AB}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

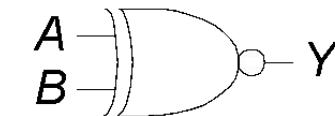
NOR



$$Y = \overline{A + B}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

XNOR

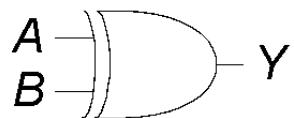


$$Y = \overline{A \oplus B}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Прочие логические элементы с двумя входами

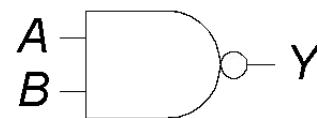
XOR



$$Y = A \oplus B$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

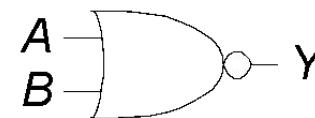
NAND



$$Y = \overline{AB}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

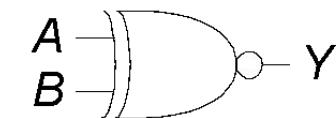
NOR



$$Y = \overline{A + B}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

XNOR

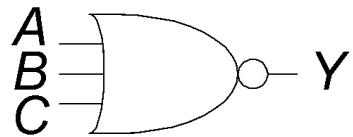


$$Y = \overline{A \oplus B}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Логические элементы с несколькими входами

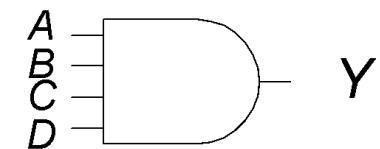
NOR3



$$Y = \overline{A+B+C}$$

| A | B | C | Y |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

AND4

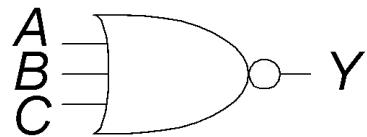


$$Y = ABCD$$

| A | B | C | Y |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

Логические элементы с несколькими входами

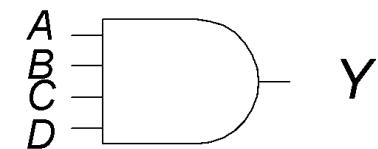
NOR3



$$Y = \overline{A+B+C}$$

| A | B | C | Y |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

AND4



$$Y = ABCD$$

| A | B | C | Y |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

- Многовходовый элемент XOR: Контроль четности

Логические уровни

- Дискретные уровни напряжения представляют 1 и 0
- Например:
 - 0 = земля (GND) или 0 В
 - 1 = V_{DD} или 5 В
- Как трактовать напряжение 4.99 В? Это 0 или 1?
- Как трактовать напряжение 3.2 В?

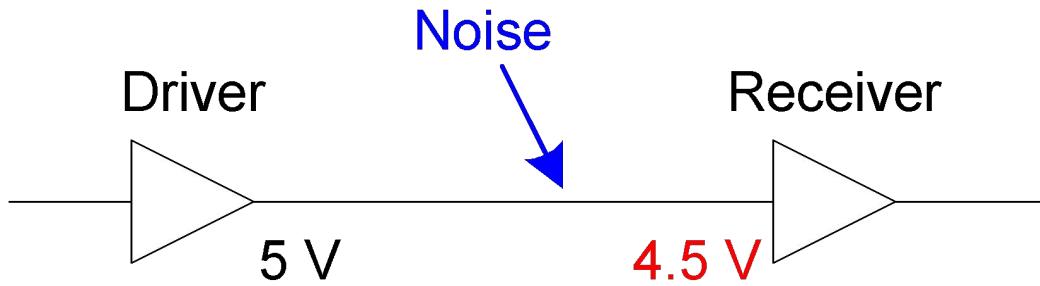
Логические уровни

- Диапазон напряжений для 1 и 0
- Разные диапазоны для входов и выходов обеспечивают работу схем при наличии помех и шумов

Что такое шум?

Что такое шум?

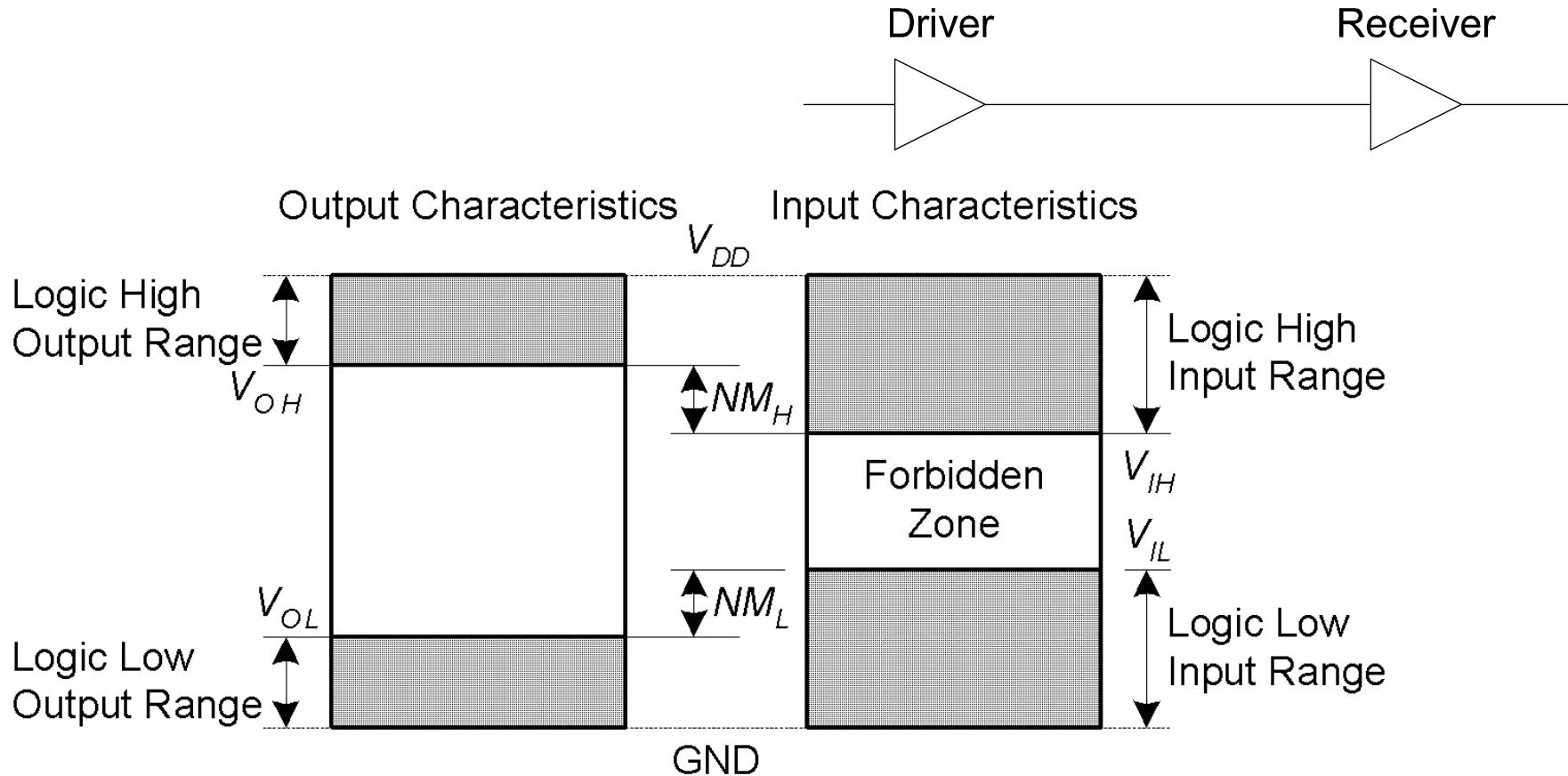
- **Любая помеха искажающая сигнал**
 - Например, сопротивление проводников, помехи источника питания, наводки от соседних проводников и т.д.
- **Пример:** элемент (его выходной каскад) выдает 5 В, но из-за сопротивления длинного проводника на приемник поступает 4.5 В



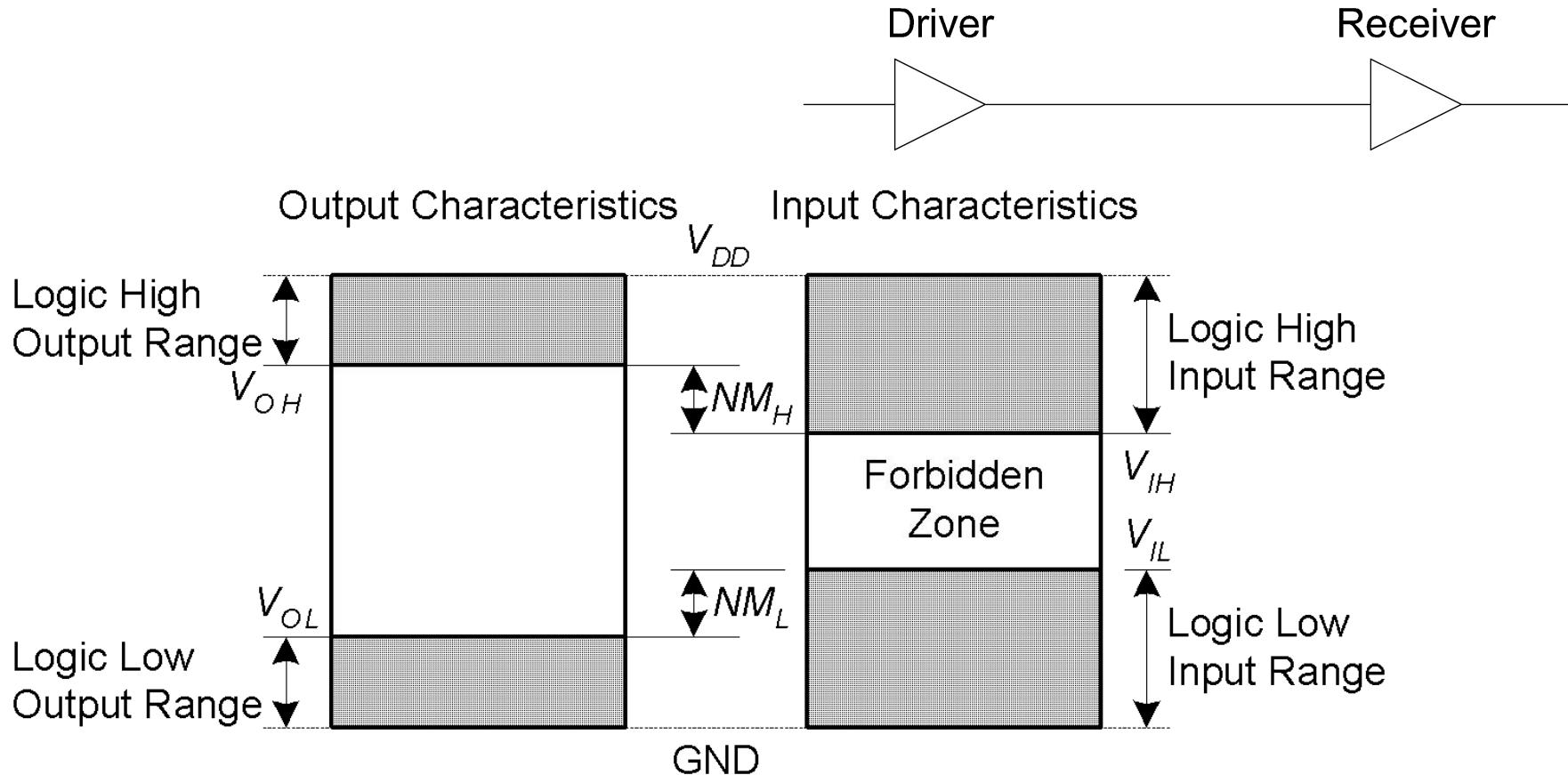
Статическая дисциплина

- Если на вход элемента поступают корректные логические значения, на его выходе формируются корректные выходные сигналы
- Для представления дискретных величин используется ограниченный диапазон напряжений

Логические уровни

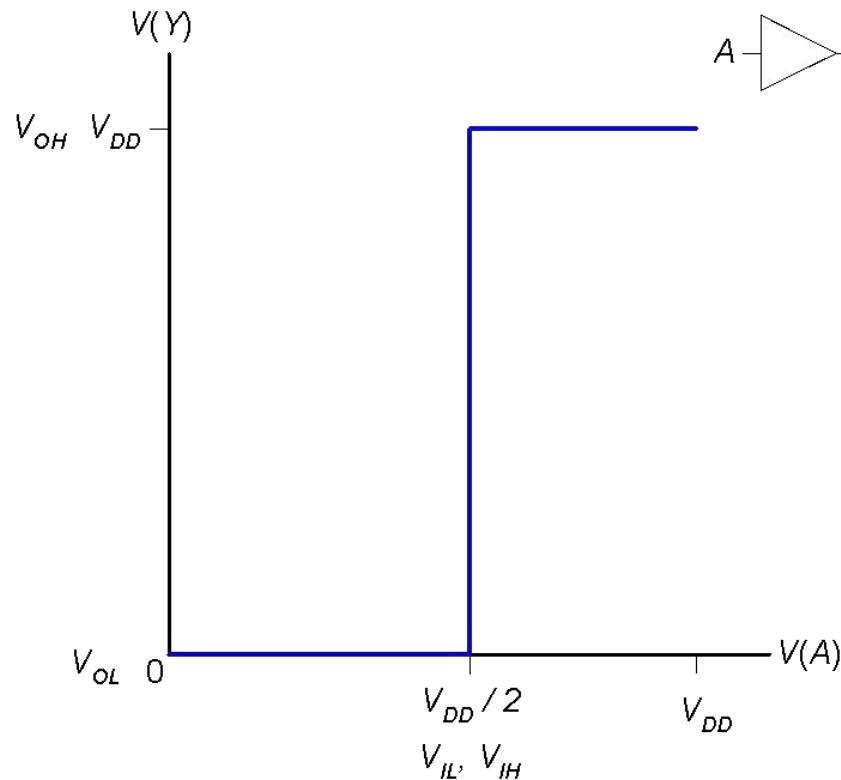


Допустимые уровни шумов

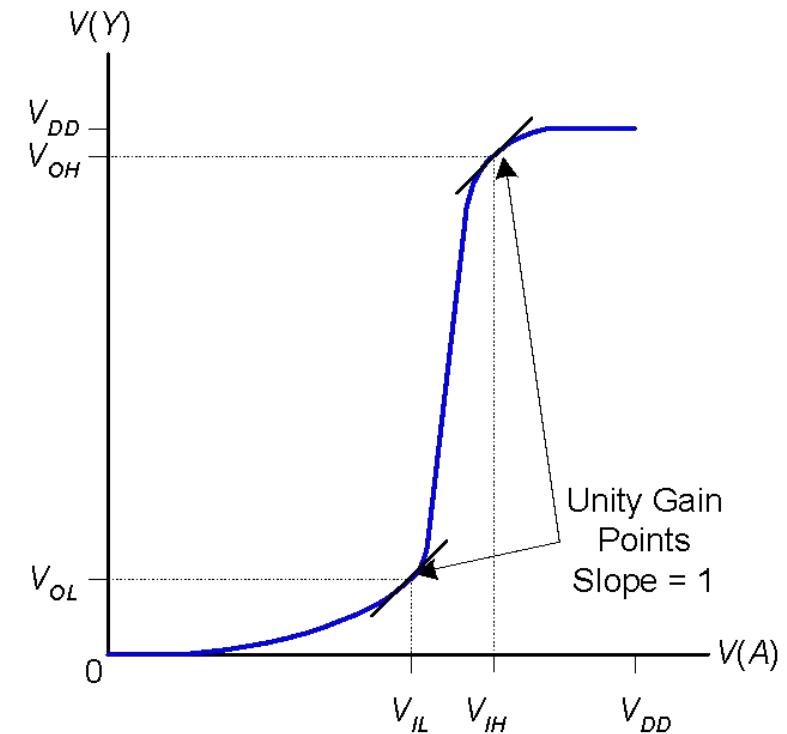


Передаточная характеристика на постоянном токе

Идеальный буфер:



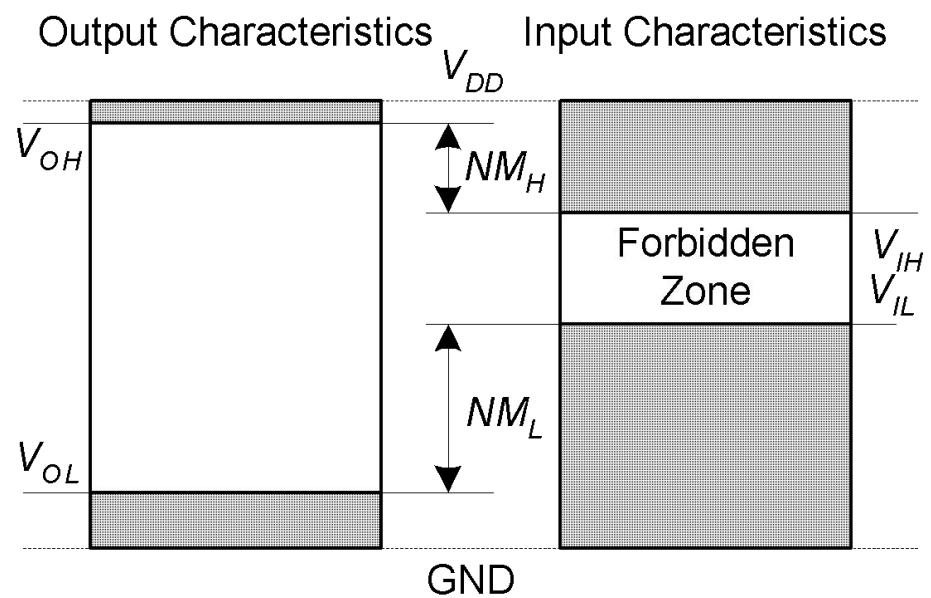
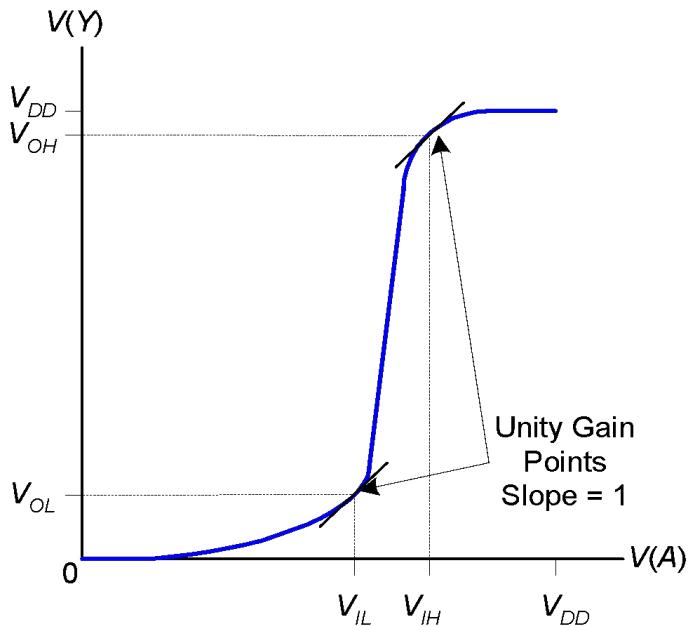
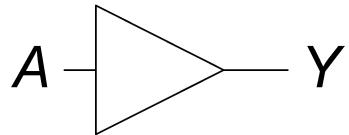
Реальный буфер:



$$NM_H = NM_L = V_{DD}/2$$

$$NM_H, NM_L < V_{DD}/2$$

Передаточная характеристика на постоянном токе



Изменение V_{DD}

- В 1970 и 1980 годы, $V_{DD} = 5$ В
- В следующие годы V_{DD} уменьшается
 - Уменьшается нагрев транзисторов
 - Уменьшается энергопотребление
- 3.3 В, 2.5 В, 1.8 В, 1.5 В, 1.2 В, 1.0 В,
- ...
- При соединении микросхем с разными напряжениями питания нужно быть очень осторожным



Микросхемы работают, пока они содержат волшебный дым

Доказательство:

- Если волшебный дым покидает микросхему, она перестает работать

Примеры логических

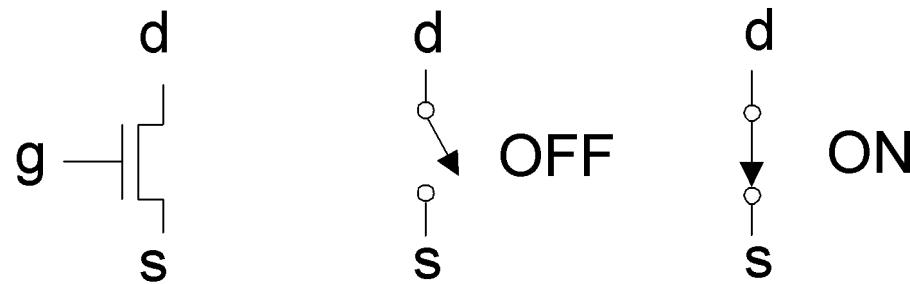
| Логические семейства | V_{DD} | V_{IL} | V_{IH} | V_{OL} | V_{OH} |
|-------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| TTL | 5 (4.75 - 5.25) | 0.8 | 2.0 | 0.4 | 2.4 |
| КМОП | 5 (4.5 - 6) | 1.35 | 3.15 | 0.33 | 3.84 |
| LVTTL | 3.3 (3 - 3.6) | 0.8 | 2.0 | 0.4 | 2.4 |
| LVCMOS | 3.3 (3 - 3.6) | 0.9 | 1.8 | 0.36 | 2.7 |

Транзисторы

- Логические элементы состоят из транзисторов
- Трехходовой управляемый напряжением выключатель
 - Соединение двух входов зависит от напряжения на третьем
 - d и s соединены (ON) когда g равно 1

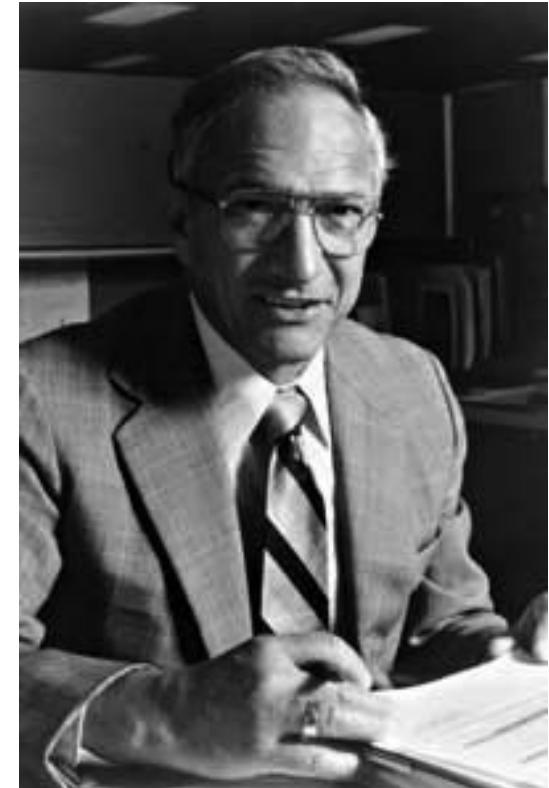
$$g = 0$$

$$g = 1$$



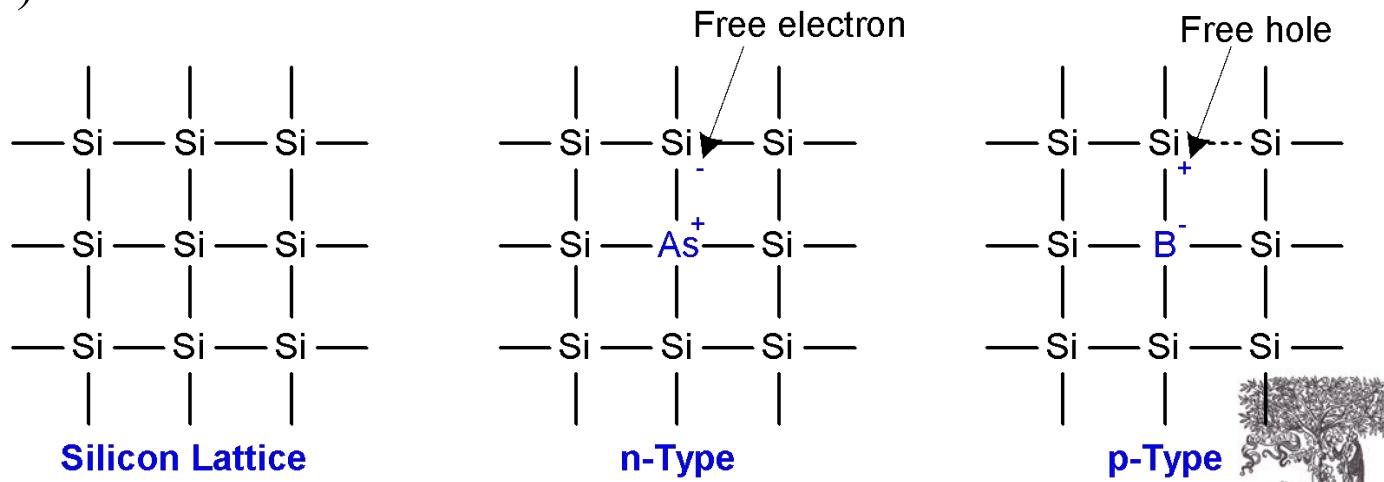
Роберт Нойс, 1927-1990

- Прозвище - “Мэр Силиконовой долины”
- Со-основатель Fairchild Semiconductor в 1957 году
- Со-основатель Intel в 1968 году
- Одни из изобретателей интегральной микросхемы



Кремний

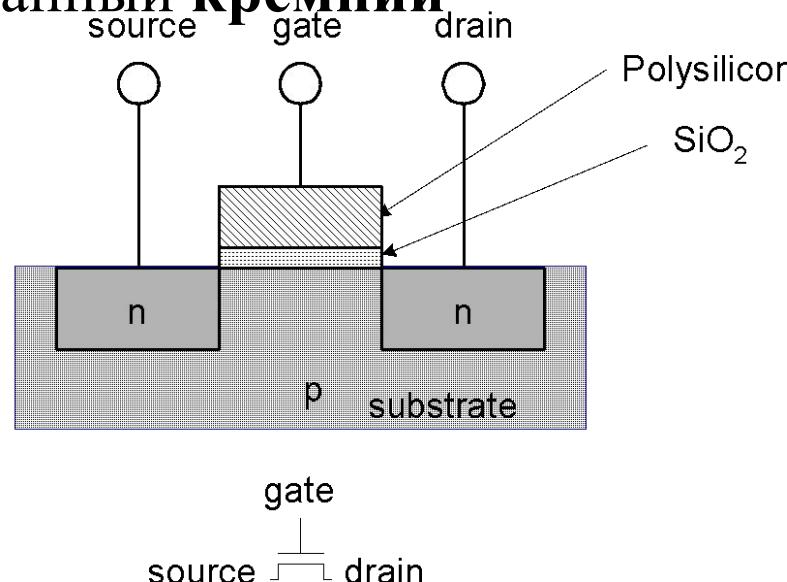
- Транзисторы создаются из полупроводникового материала, кремния
- Чистый кремний плохой проводник (свободные носители заряда отсутствуют)
- Легированный кремний хороший проводник (есть свободные носители заряда)
 - n-типа (свободные носители заряда отрицательные (*negative*), электроны)
 - p-типа (свободные носители заряда положительные(*positive*), дырки)



МОП транзисторы

- **Метал-оксид-полупроводник (МОП) транзисторы:**

- Поликремниевый (используется как **метал**) затвор
- Оксидный (диоксид кремния) изолятор
- Легированный кремний



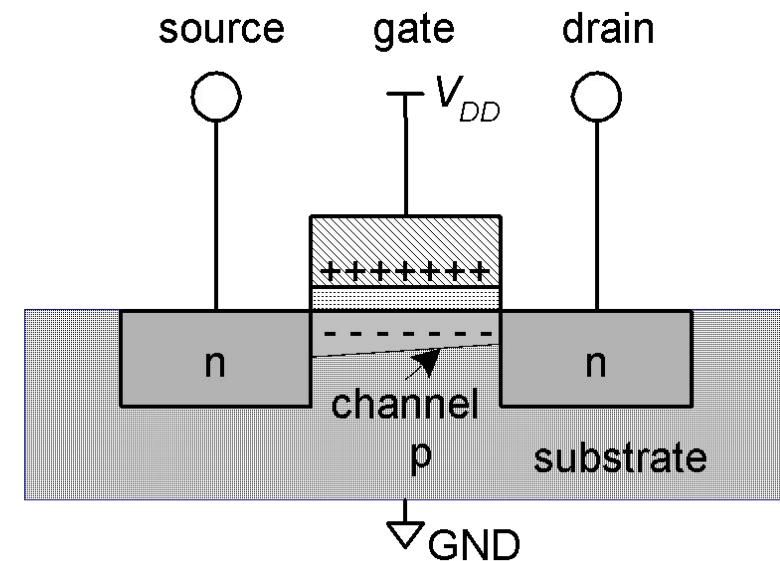
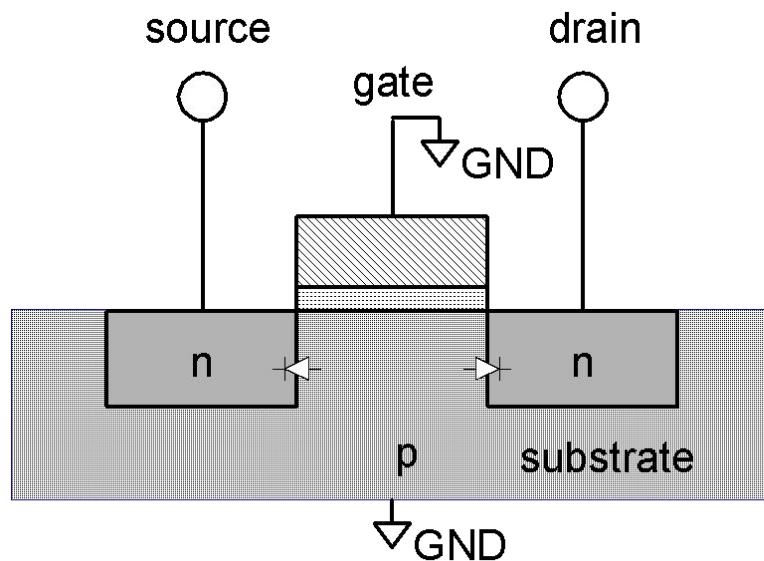
Транзисторы: n-МОП

Gate = 0

OFF (исток и сток не соединены)

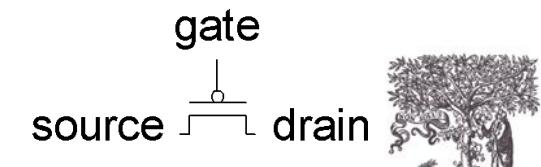
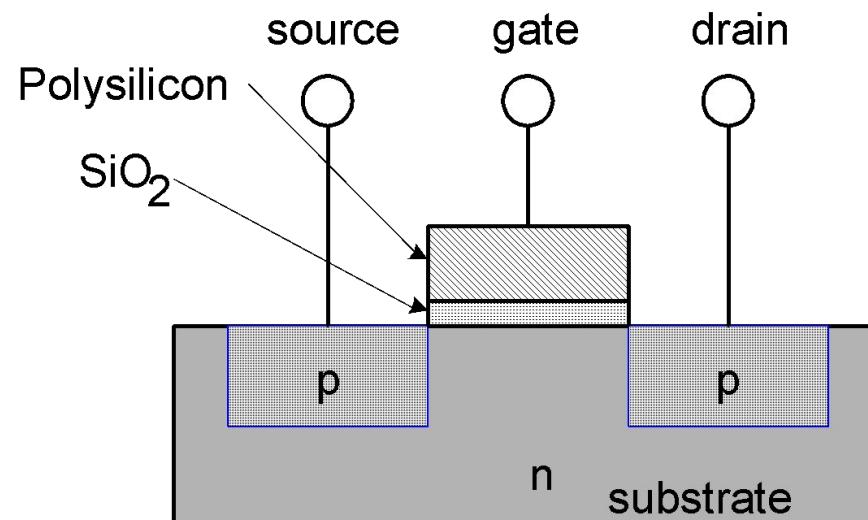
Gate = 1

ON (исток и сток соединены)

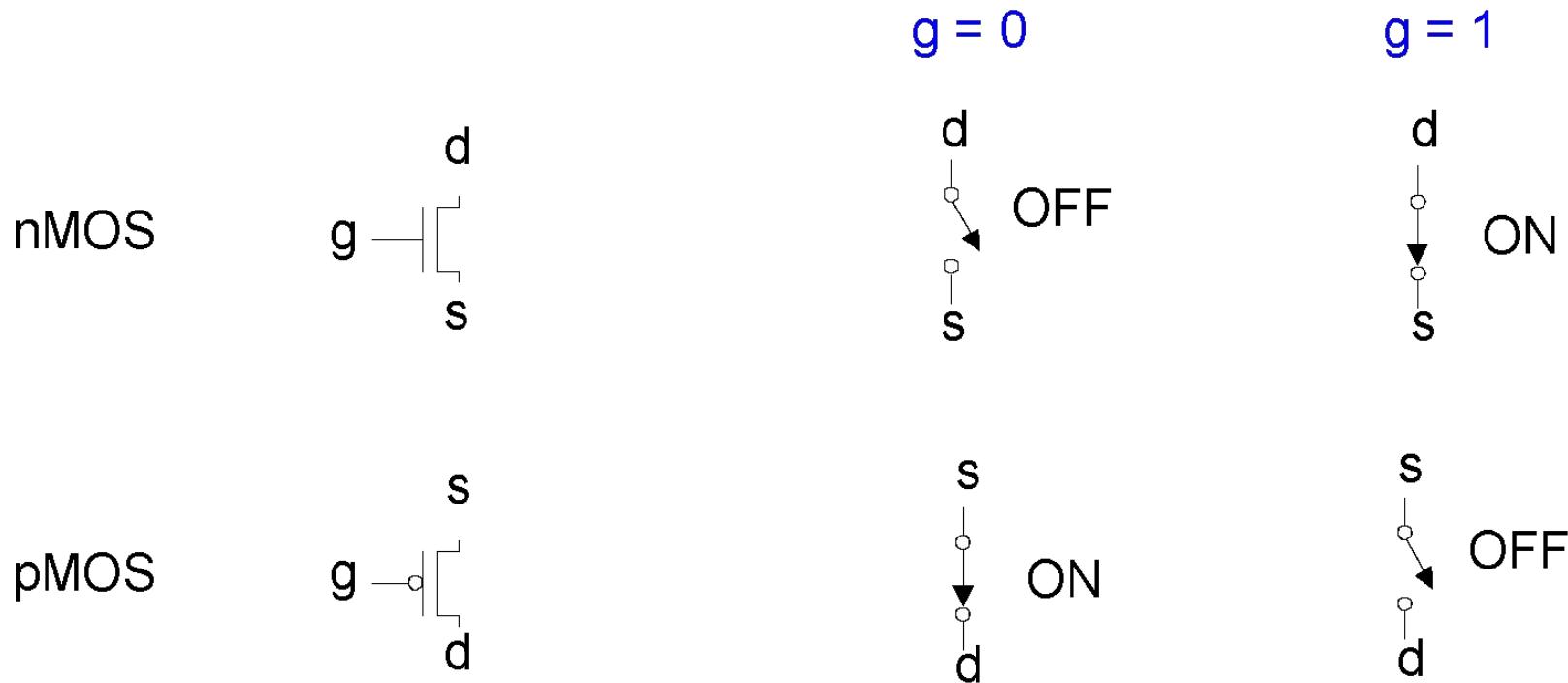


Транзисторы: p-МОП

- p-МОП транзистор работает противоположным образом
 - ON, когда Gate = 0
 - OFF, когда Gate = 1

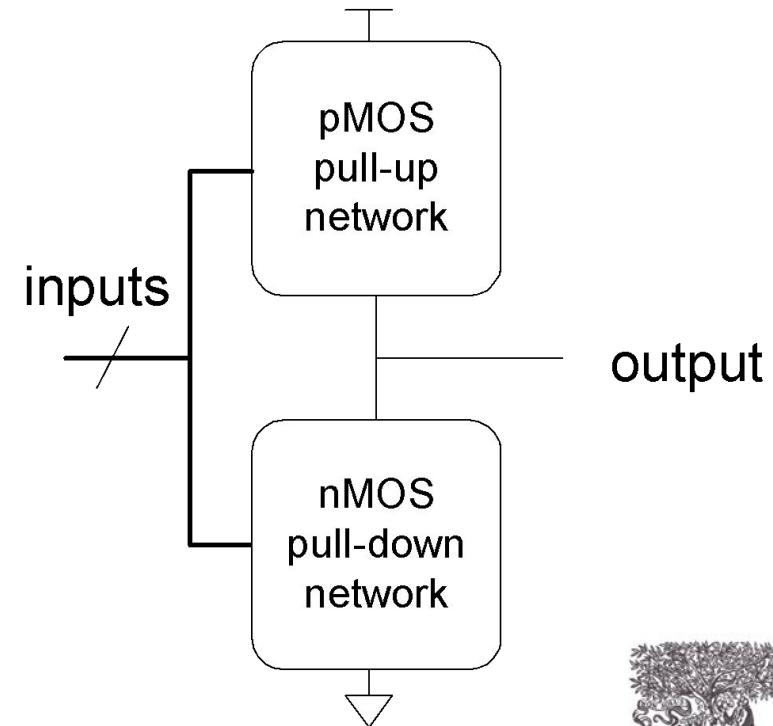


Работа транзистора



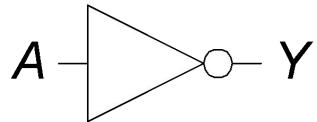
Работа транзистора

- **n-МОП:** Хорошо передают 0, т.е. исток соединен с GND
- **p-МОП:** Хорошо передают 1, т.е. исток соединен с V_{DD}



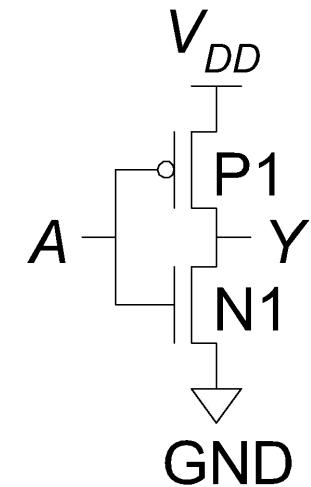
Логические элементы КМОП: Логический элемент НЕ:

NOT



$$Y = \overline{A}$$

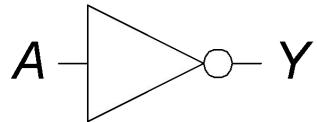
| A | Y |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |



| A | P1 | N1 | Y |
|---|----|----|---|
| 0 | | | |
| 1 | | | |

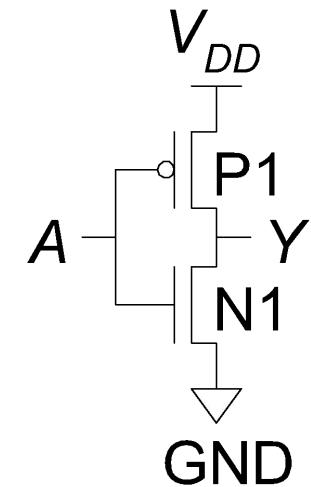
Логические элементы КМОП: Логический элемент НЕ:

NOT



$$Y = \overline{A}$$

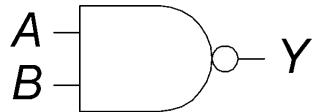
| A | Y |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |



| A | P1 | N1 | Y |
|---|-------|-------|---|
| 0 | Вкл. | Выкл. | 1 |
| 1 | Выкл. | Вкл. | 0 |

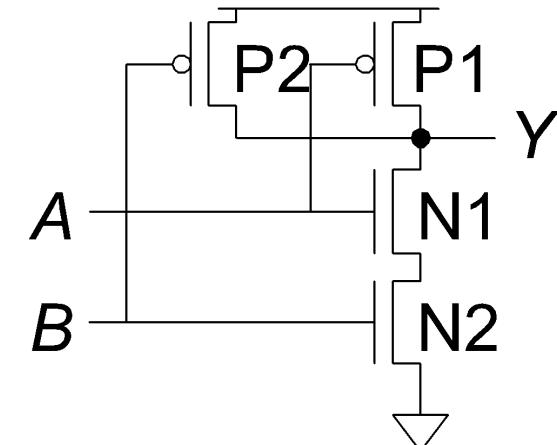
Логические элементы КМОП: Логический элемент И-НЕ:

NAND



$$Y = \overline{AB}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

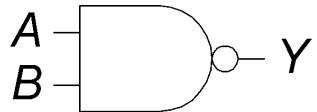


| A | B | P1 | P2 | N1 | N2 | Y |
|---|---|----|----|----|----|---|
| 0 | 0 | | | | | |
| 0 | 1 | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | |



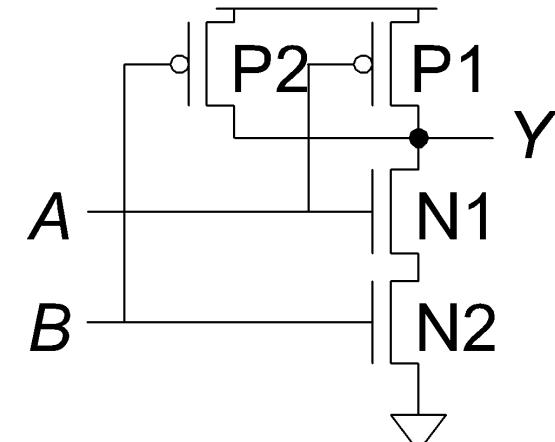
Логические элементы КМОП: Логический элемент И-НЕ:

NAND



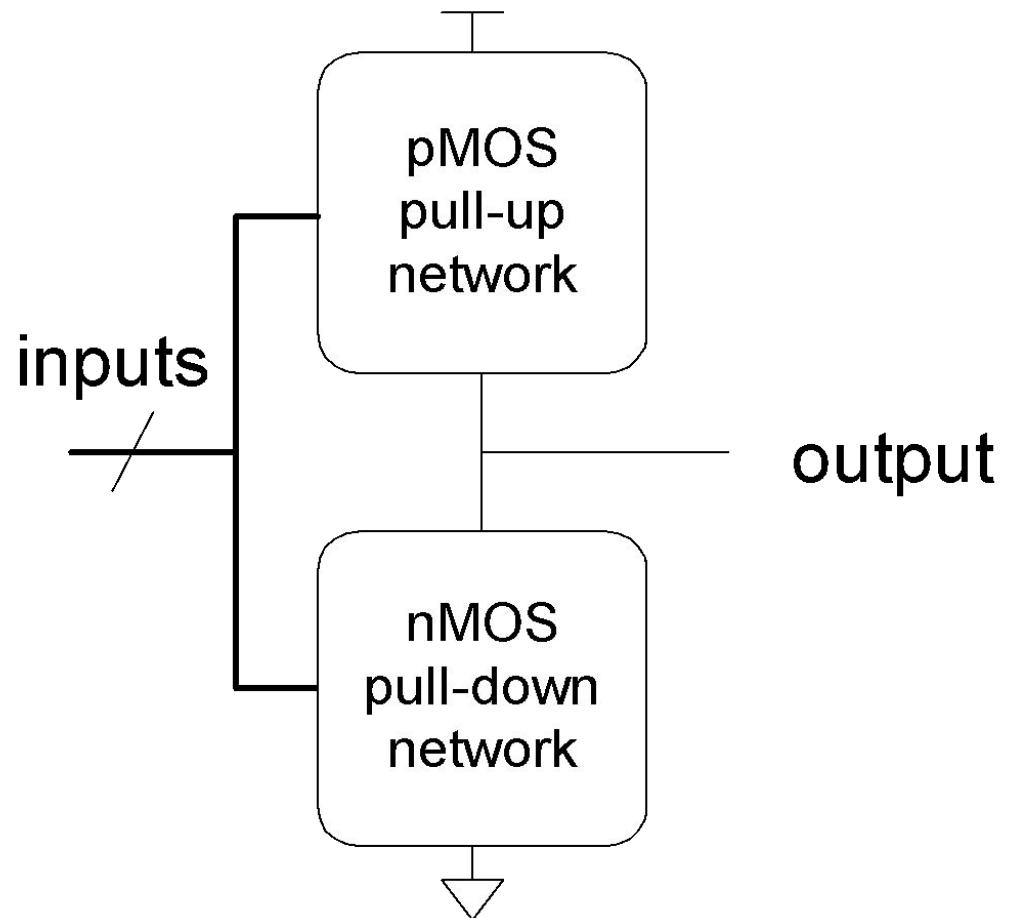
$$Y = \overline{AB}$$

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |



| A | B | P1 | P2 | N1 | N2 | Y |
|---|---|-------|-------|-------|-------|---|
| 0 | 0 | Вкл. | Вкл. | Выкл. | Выкл. | 1 |
| 0 | 1 | Вкл. | Выкл. | Выкл. | Вкл. | 1 |
| 1 | 0 | Выкл. | Вкл. | Вкл. | Выкл. | 1 |
| 1 | 1 | Выкл. | Выкл. | Вкл. | Вкл. | 0 |

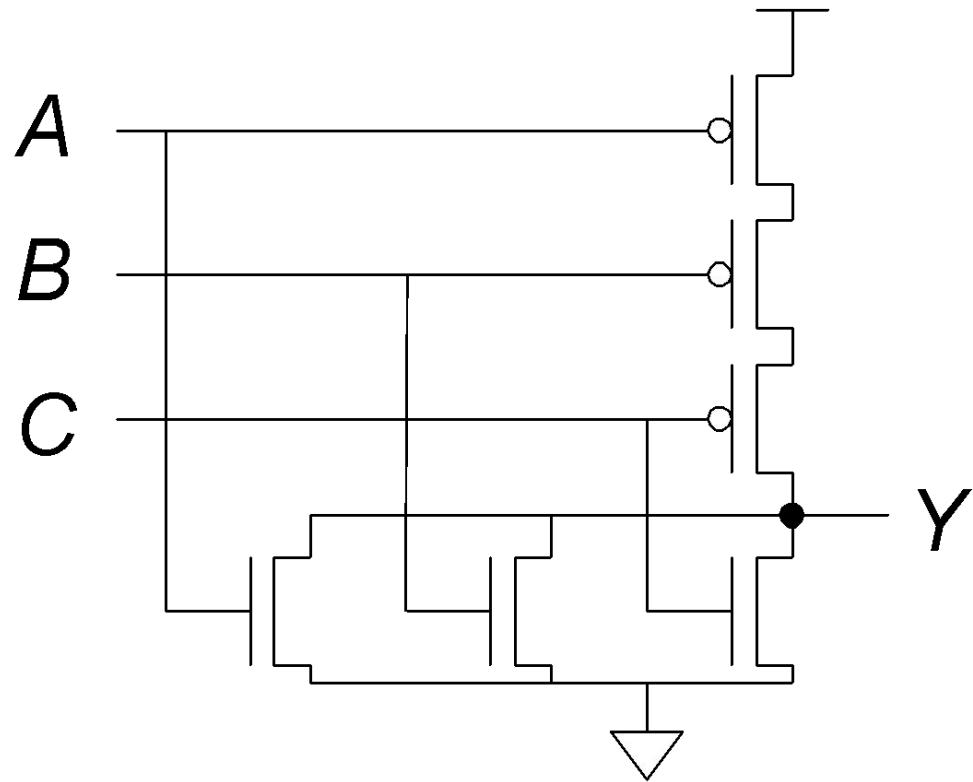
Структура элемента КМОП



Логический элемент ИЛИ-НЕ

Как построить элемент ИЛИ-НЕ?

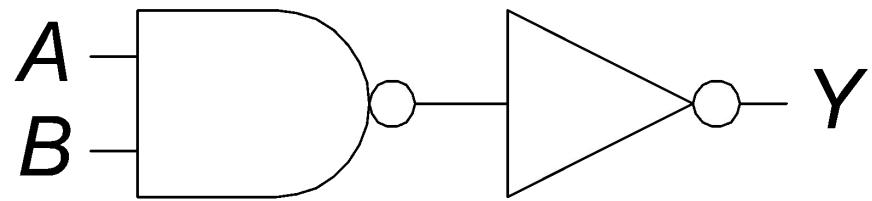
Элемент ИЛИ-НЕ с тремя входами



Другие элементы КМОП

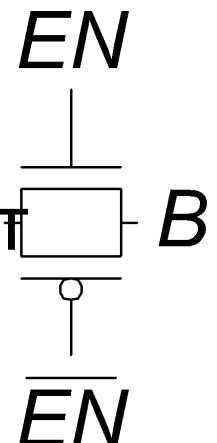
Как построить элемент И с двумя входами?

Элемент И с двумя входами



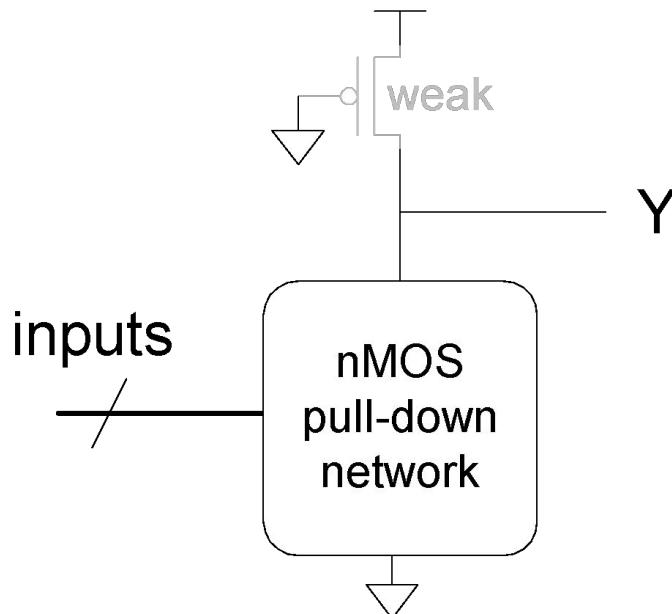
Передаточный логический элемент

- n-МОП плохо передают 1
- p-МОП плохо передают 0
- Передаточный логический элемент лучше всего передает 0 и 1
- Когда $EN = 1$, выключатель замкнут (ON):
 - $EN = 1$ и A соединен с B
- Когда $EN = 0$, выключатель разомкнут (OFF):
 - A и B не соединены



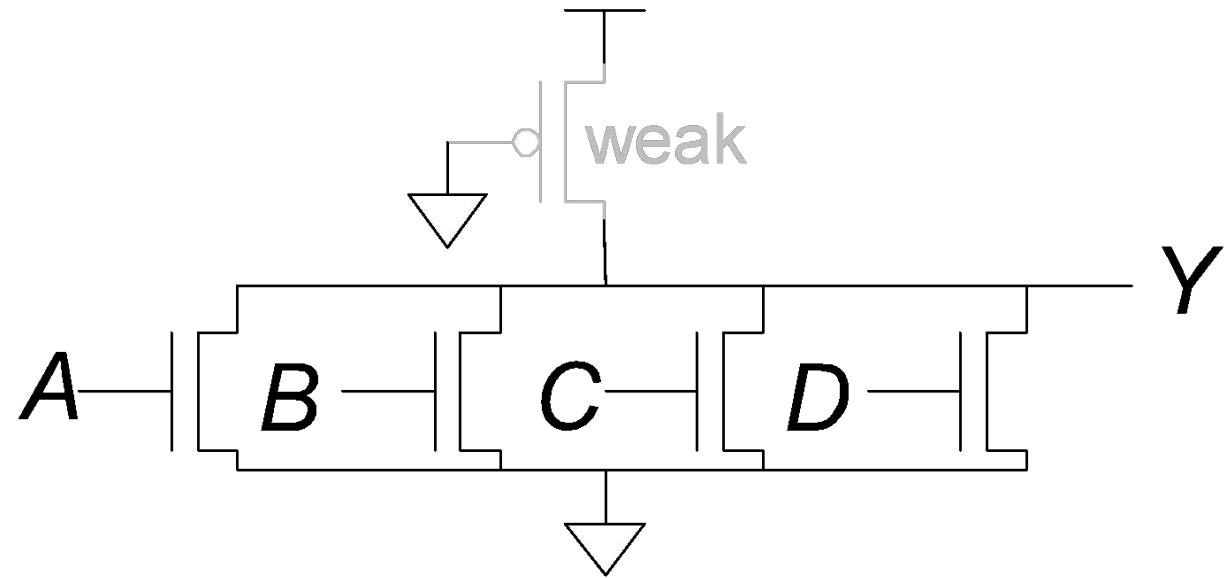
Элементы Псевдо-n-MOP

- Заменить подтягивающую цепь слабым всегда включенным p-MOP транзистором
- p-MOP транзистор: подтягивает выход к высокому напряжению, только если n-MOP цепь не тянет его к низкому напряжению



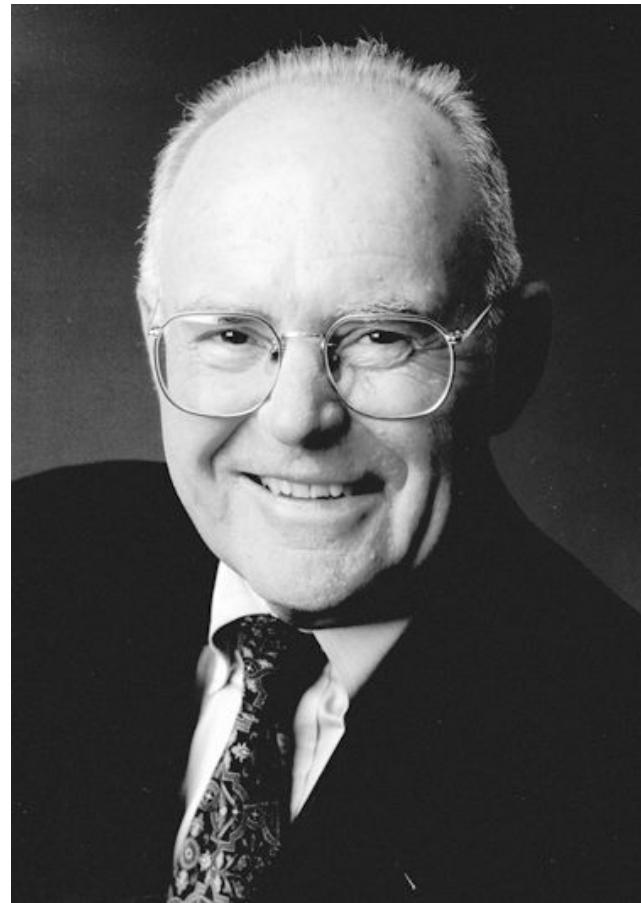
Пример элемента Псевдо-п-МОП

Псевдо-п-МОП элемент NOR4

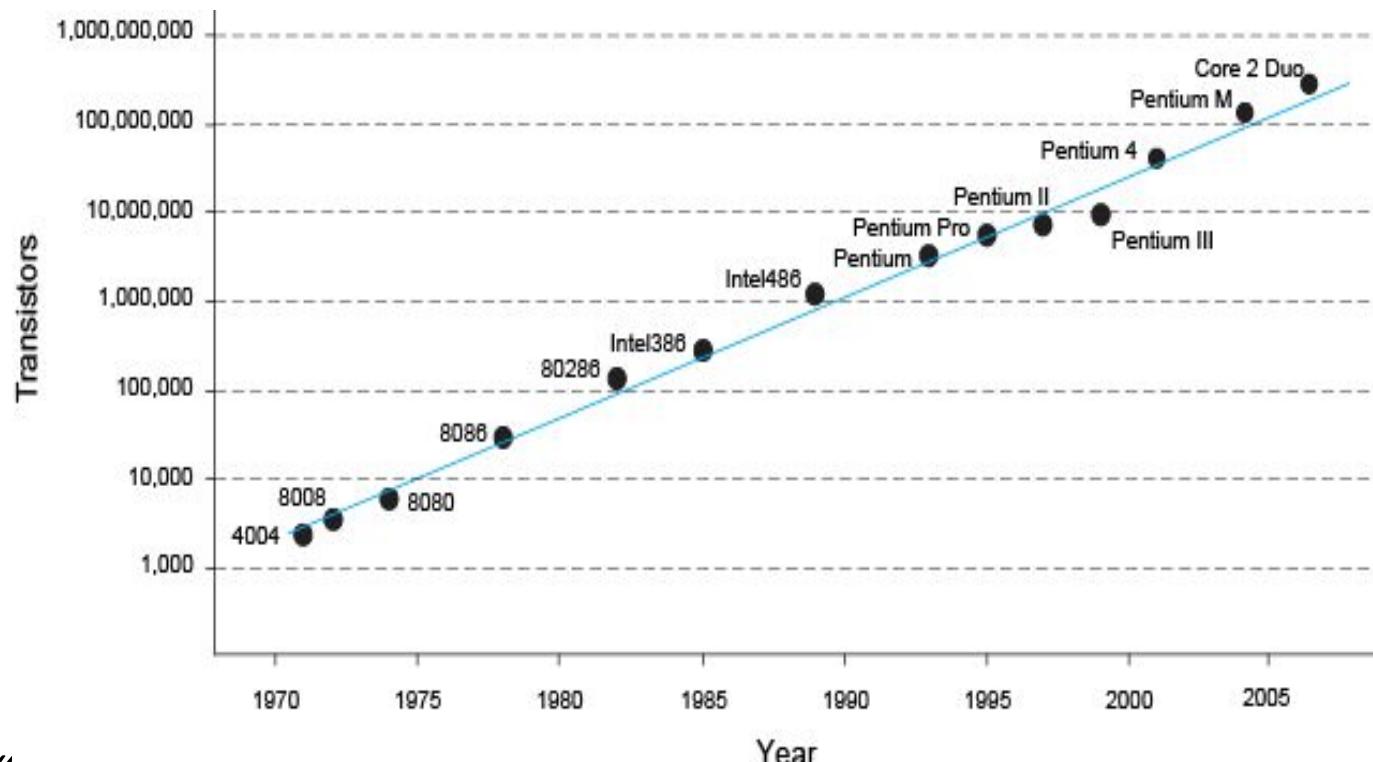


Гордон Мур, 1929-

- Со-основатель (вместе с Робертом Нойсом) Intel в 1968 году
- **Закон Мура:** количество транзисторов на микросхеме удваивается каждый год (наблюдался в 1965 году)
- С 1975 года количество транзисторов удваивается каждые два года



Закон Мура:



- “Если автомобильный промышленность получились бы такому же циклу развития, как и компьютерная, Rolls-Royce стоил бы сейчас \$100, на одном галлоне бензина проезжал бы миллион миль и взрывался бы раз в году. . .”

– Robert Cringley

Энергопотребление

- Мощность = Потребление энергии в единицу времени
 - Динамическая потребляемая мощность
 - Статическая потребляемая мощность

- **Мощность идет на зарядку емкостей заторов транзисторов**
 - Для зарядки конденсатора емкостью C до напряжения V_{DD} необходима энергия CV_{DD}^2
 - Ток переключается с частотой f : транзистор переключается (от 0 в 1 или наоборот) с такой частотой
 - Конденсатор заряжается $f/2$ раз за секунду (разрядка из 1 в 0 не требует энергии)
- **Динамическая потребляемая мощность:**

Статическая потребляемая мощность

- Мощность, потребляемая, когда элементы не переключаются
- Обусловлена *токами покоя (токами утечки)*, I_{DD}
- Статическая потребляемая мощность:

$$P_{static} = I_{DD} V_{DD}$$

Пример оценки

- Оцените мощность, потребляемую беспроводным переносным компьютером
 - $V_{DD} = 1.2 \text{ В}$
 - $C = 20 \text{ нФ}$
 - $f = 1 \text{ ГГц}$
 - $I_{DD} = 20 \text{ мА}$

Пример оценки

- Оцените мощность, потребляемую беспроводным переносным компьютером
 - $V_{DD} = 1.2 \text{ В}$
 - $C = 20 \text{ нФ}$
 - $f = 1 \text{ ГГц}$
 - $I_{DD} = 20 \text{ мА}$

$$\begin{aligned}P &= \frac{1}{2}CV_{DD}^2f + I_{DD}V_{DD} \\&= \frac{1}{2}(20 \text{ нФ})(1.2 \text{ В})^2(1 \text{ ГГц}) + \\&\quad (20 \text{ мА})(1.2 \text{ В}) \\&= \mathbf{14.4 \text{ Вт}}\end{aligned}$$