

# **Языки описания схем**

[mk.cs.msu.ru](http://mk.cs.msu.ru) → Лекционные курсы → Языки описания схем

## Блок 4

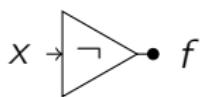
Логические вентили  
Комбинационные схемы

Лектор:  
**Подымов Владислав Васильевич**  
E-mail:  
**valdus@yandex.ru**

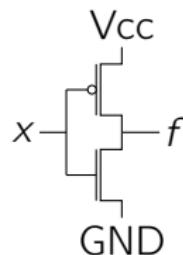
ВМК МГУ, 2025/2026, осенний семестр

# Схемы и время

СФЭ



КМОП-схемы



КМОП-схема — это модель, описывающая соединение «реальных» транзисторов, преобразующих напряжение в «реальном» времени

СФЭ — это модель со строгими ограничениями, транслируемая в КМОП-схему, но не учитывающая время

Комбинационная схема — это аналог СФЭ, более близкий к «реальности» и использующийся в области цифровой схемотехники

# Логические вентили

Логический вентиль — это схемотехнический аналог ФЭ

Как и ФЭ, вентиль содержит булеву функцию, набор входов и выход

## Основные логические вентили:

### Буфер

$$y = x$$



### НЕ

$$y = \bar{x}$$

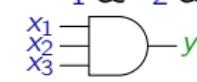


### И

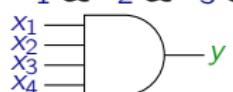
$$y = x_1 \& x_2$$



$$y = x_1 \& x_2 \& x_3$$



$$y = x_1 \& x_2 \& x_3 \& x_4$$



...

### ИЛИ

$$y = x_1 \vee x_2$$



$$y = x_1 \vee x_2 \vee x_3$$



...

### Исключающее ИЛИ

$$y = x_1 \oplus x_2$$



$$y = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$$



...

# Логические вентили

На выходе и любом входе вентиля можно дорисовать кружок, означающий **отрицание** в соответствующем месте

Кружок на выходе добавляет к названию вентиля суффикс «-НЕ»

**Например:**

И-НЕ

$$y = \overline{x_1 \& x_2} = x_1 | x_2$$


ИЛИ-НЕ

$$y = \overline{x_1 \vee x_2} = x_1 \downarrow x_2$$


Исключающее ИЛИ-НЕ

$$y = \overline{x_1 \oplus x_2} = x_1 \sim x_2$$


—

$$y = \overline{x_1} \vee x_2 = x_1 \rightarrow x_2$$


—

$$y = \overline{x_1 \& \overline{x_2}} = x_1 \rightarrow x_2$$


—

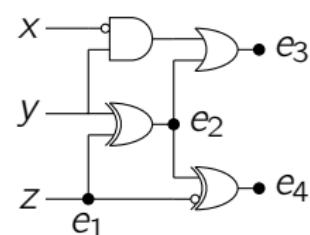
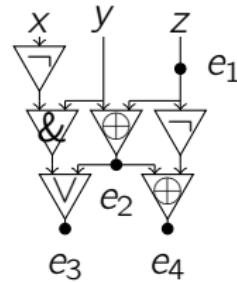
$$y = \overline{\overline{x_1} \oplus \overline{x_2}} = x_1 \sim x_2$$


# Комбинационные схемы

Определение **комбинационной схемы** отличается от определения СФЭ (... ориентированный граф ...) только тем, что вместо ФЭ используются логические вентили

Булева функция, **реализуемая** в вершине комбинационной схемы, и набор функций, **реализуемый** схемой, определяются в точности так же, как и для СФЭ

**Например**, изображёнными СФЭ и комбинационной схемой реализуются одинаковые наборы функций:



Один из смыслов (**семантик**) комбинационной схемы — это реализуемый схемой набор булевых функций — но на практике используются и другие смыслы

## Семантики комбинационных схем

В **блоке 3** обсуждалось «реальное воплощение» значений 0, 1 в аппаратуре: это два заданных уровня напряжения в устройстве (низкий и высокий), изменяющихся в реальном времени

Более точно, это

- ▶ **интервалы** напряжений  $I_0$ ,  $I_1$  на выходе вентиля: уровни 0, 1  $\pm$  погрешность (*от которой никак не избавиться в реальном мире*)
- ▶ **чуть более широкие интервалы** напряжений  $J_0$ ,  $J_1$  на входе вентиля: интервалы  $I_0$ ,  $I_1 \pm$  потери при передаче напряжения от одного вентиля другому

Семантика комбинационной схемы в такой трактовке булевых значений — это отображение, описывающее соответствие между цифровыми **сигналами**, посыпаемыми на входы схемы, и сигналами, получаемыми на выходах схемы

Под **сигналом** здесь понимается отображение, описывающее непрерывное изменение уровня напряжения в реальном (*действительном*) времени

## Семантики комбинационных схем

Семантика логического вентиля, содержащего функцию  $f(x_1, \dots, x_n)$ , для предложенного понимания сигнала устроена так:

**если на входах вентиля достаточно долго поддерживаются напряжения интервалов  $J_{\alpha_1}, \dots, J_{\alpha_n}$ , то напряжение на выходе с некоторого момента всегда принадлежит интервалу  $I_{f(\alpha_1, \dots, \alpha_n)}$**

Семантика комбинационной схемы складывается из интервальных семантик содержащихся вентилей точно так же, как семантика СФЭ складывается из семантик содержащихся в ней ФЭ

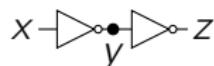
Такую семантику будем называть **точной**

Изменение напряжения сигнала от интервала  $I_p/J_p$  до интервала  $I_{1-p}/J_{1-p}$  называется **фронтом** сигнала:

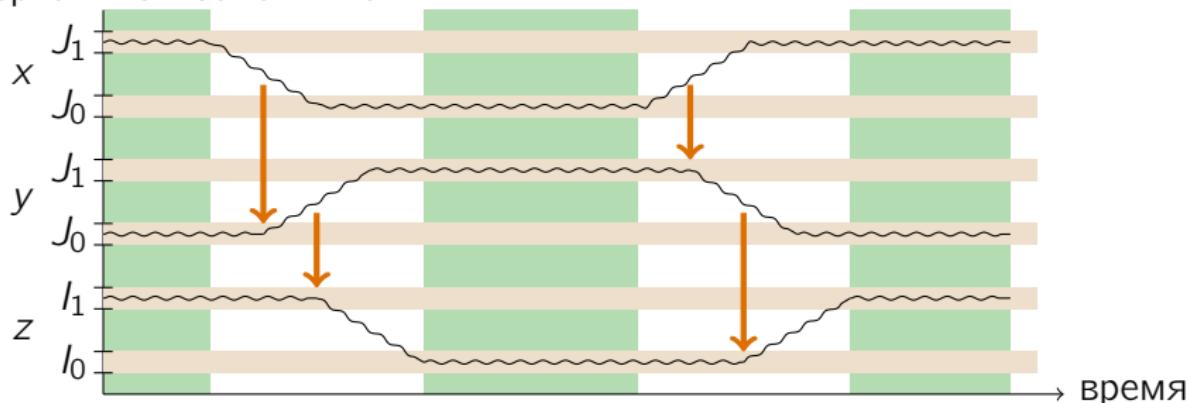
- ▶ от  $I_0/J_0$  до  $I_1/J_1$  — **положительным** фронтом (*positive edge*)
- ▶ от  $I_1/J_1$  до  $I_0/J_0$  — **отрицательным** фронтом (*negative edge*)

# Семантики комбинационных схем

Пример:



Отображение входного сигнала  $x$  в выходные сигналы  $y, z$  в интервальной семантике:



«» = «напряжения на выходах соответствуют напряженям на входах и функциям, содержащимся в вентилях»

«» — отрицательный фронт      «» — положительный фронт

# Семантики комбинационных схем

При разработке схем часто оказывается неважно знать **погрешности** и **точную форму** сигналов в схеме, и в связи с этим понятие сигнала и семантика вентилей и схем упрощаются

Пример такого упрощения:

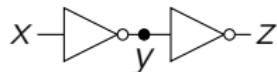
- ▶ Интервалы напряжений  $I_0$ ,  $J_0$ ,  $I_1$  и  $J_1$  заменяются на заданные уровни напряжения (без погрешностей): 0, 0, 1, 1 соответственно
- ▶ Переходы от уровня 0 к уровню 1 и обратно изображаются линиями, обозначающими, что напряжение отлично от 0 и 1 (*а какое именно, неизвестно*)

**Сигнал** с учётом такого упрощения является *кусочно-линейным* непрерывным отображением, описывающим изменение напряжения в реальном времени

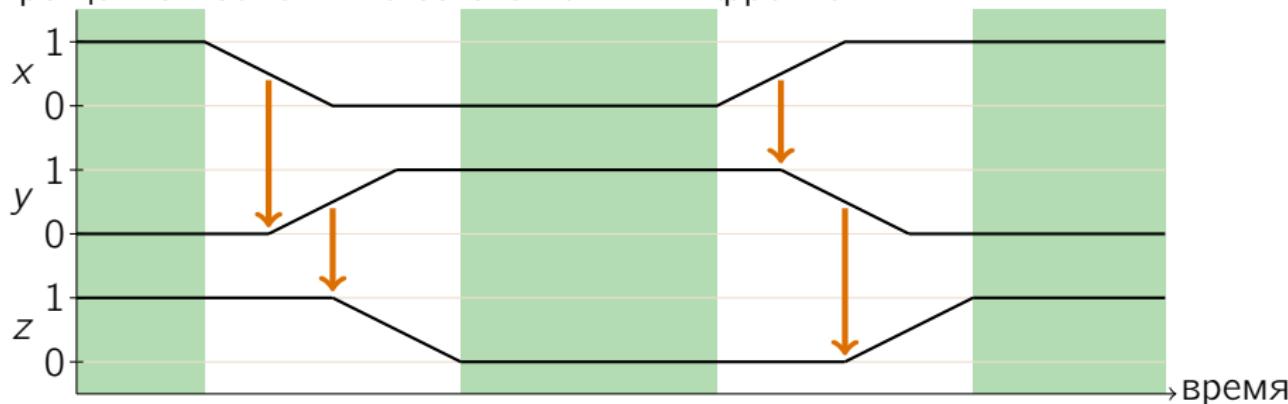
Семантику схем с такой трактовкой булевых значений для ясности будем называть **упрощённой со скошенными фронтами**

# Семантики комбинационных схем

Пример:



Отображение входного сигнала  $x$  в выходные сигналы  $y, z$  в упрощённой семантике со скошенными фронтами:



« ↘ » — отрицательный фронт

« ↗ » — положительный фронт

## Семантики комбинационных схем

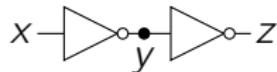
При разработке схем на высоких уровнях абстракции часто для простоты считается, что фронты сигналов **мгновенны**. Сигнал в таком упрощении становится отображением следующего вида:

- ▶ Временная ось покрывается **открытыми интервалами** ( $(x, y) = \{z \mid x < z < y\}$ ) так, чтобы непокрытыми осталось только конечное или счётное множество точек
- ▶ На каждом интервале сигнал имеет постоянное значение: 0 или 1
- ▶ Значения сигнала на каждой паре соседних интервалов различны
- ▶ **фронт** — это особое значение сигнала в каждой непокрытой точке:
  - ▶  ⇒ фронт **положительный**
  - ▶  ⇒ фронт **отрицательный**

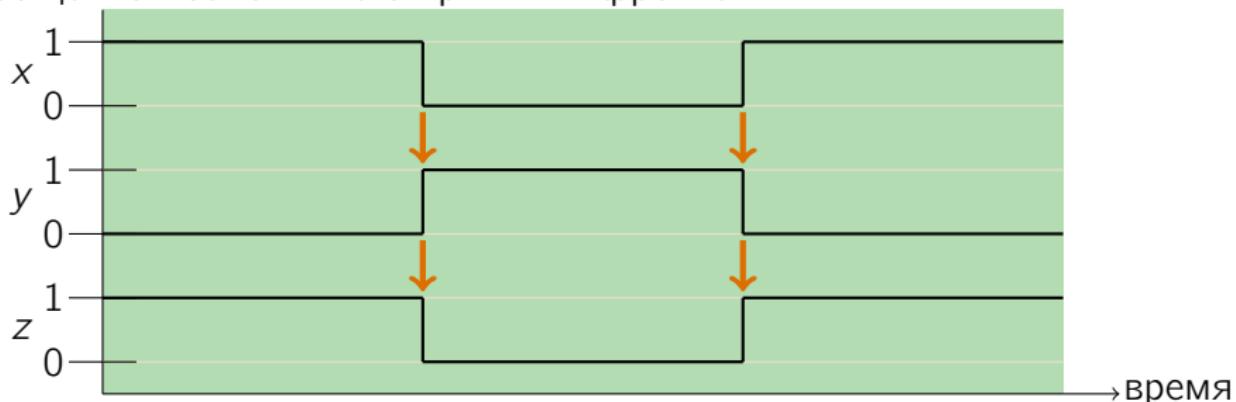
Момент фронта — это момент **нестабильности** сигнала: если от значения сигнала в этот момент существенно зависят значения в других местах схемы, то эти значения могут быть произвольны. Семантику комбинационных схем, основанную на таком определении сигнала, для ясности будем называть **упрощённой с прямыми (мгновенными) фронтами**.

# Семантики комбинационных схем

Пример:



Отображение входного сигнала  $x$  в выходные сигналы  $y, z$  в упрощённой семантике с прямыми фронтами:



«!» — фронт