

Языки описания схем

mk.cs.msu.ru → Лекционные курсы → Языки описания схем

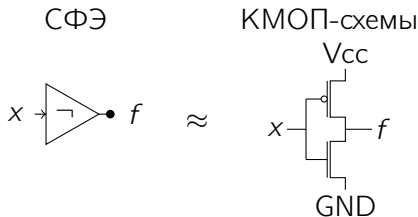
Блок 4

Логические вентили
Комбинационные схемы

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

ВМК МГУ, 2025/2026, осенний семестр

Схемы и время



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

$$y = x$$



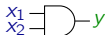
НЕ

$$y = \bar{x}$$

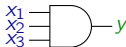


И

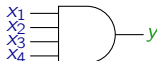
$$y = x_1 \& x_2$$



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



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



...

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 вентили можно дорисовать кружок, означающий **отрицание** в соответствующем месте

Кружок на выходе добавляет к названию вентили 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

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



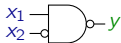
—

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



—

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



—

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

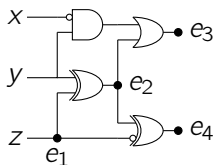
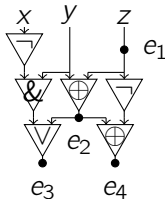


Комбинационные схемы

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**, посылаемыми 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

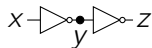
Такую семантику будем называть **точной**

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

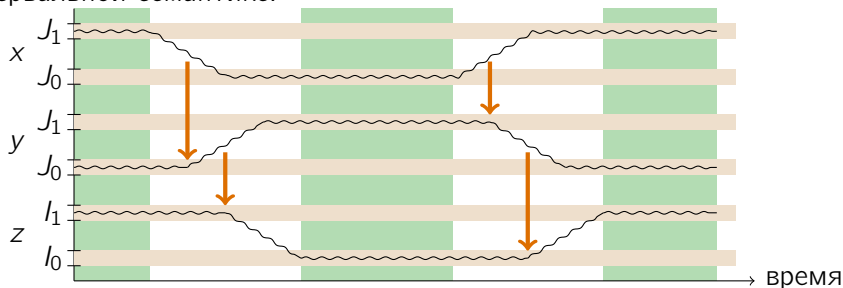
- ▶ от I_0/J_0 до I_1/J_1 — **положительным** фронтом (*positive edge*)
- ▶ от I_1/J_1 до I_0/J_0 — **отрицательным** фронтом (*negative edge*)


Семантики комбинационных схем

Пример:



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



«» = «напряжения на выходах соответствуют напряжениям 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:

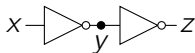
- ▶ Интервалы напряжений I_0 , J_0 , I_1 и J_1 заменяются на заданные уровни напряжения (без погрешностей): 0, 0, 1, 1 соответственно
- ▶ Переходы от уровня 0 к уровню 1 и обратно изображаются линиями, обозначающими, что напряжение отлично от 0 и 1 (а какое именно, неизвестно)

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

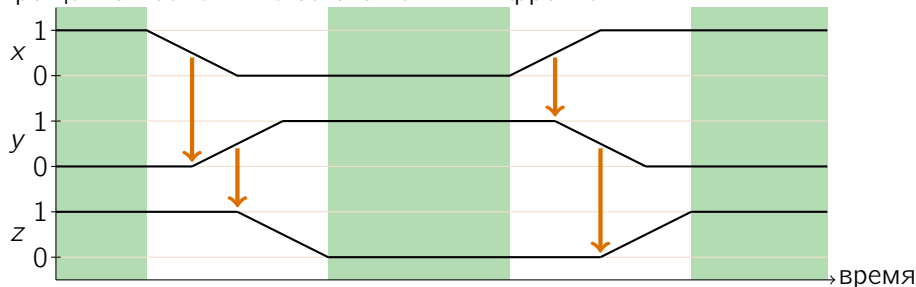
Семантику схем с такой трактовкой булевых значений для ясности будем называть **упрощённой со скошенными фронтами**

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:

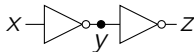
- ▶ Временная ось покрывается **открытыми интервалами** $((x, y) = \{z \mid x < z < y\})$ так, чтобы непокрытыми осталось только конечное или счётное множество точек
- ▶ На каждом интервале сигнал имеет постоянное значение: 0 или 1
- ▶ Значения сигнала на каждой паре соседних интервалов различны
- ▶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

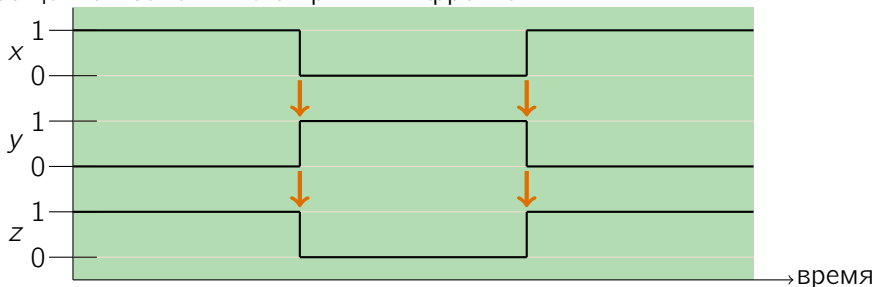
Семантику комбинационных схем, основанную на таком определении сигнала, для ясности будем называть **упрощённой с прямыми (мгновенными) фронтами**

Семантики комбинационных схем

Пример:



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



«|» — фронт