

Математическая логика и теория алгоритмов

Посов Илья Александрович

запись конспекта: Блюдин Андрей и Хаматов Вадим

Содержание

1	Математическая логика	1
1.1	Исчисление высказываний	1
1.1.1	Основные понятия	1
1.1.2	Функции от 1 переменной (их определения)	2
1.1.3	Функции от 2 переменных (их определения)	3
1.1.4	Приоритеты операций	5
1.1.5	Алгебраические преобразования логических выражений	5
1.1.6	Таблица эквивалентных логических выражений	6
1.1.7	Многочлены Жегалкина	8
1.1.8	Получение многочлена Жегалкина через алгебраические упрощения	11
1.1.9	Дизъюнктивно-нормальная форма (ДНФ)	12
1.1.10	Задача (не) выполнимости	14
1.1.11	Запись таблиц истинности в виде графика	15
1.2	КНФ - Конъюнктивная нормальная форма	15

1 Математическая логика

1.1 Исчисление высказываний

1.1.1 Основные понятия

Определение. Логическая функция — это множество из 2 элементов. Также, логической функцией называют множество логических значений $B = \{0, 1\}$, где 0 — это ложь (false), а 1 — это истина (true)

Определение. Логическая функция от n переменных

$$f : B^n \rightarrow B$$

Замечание. Часто логические функции вводят как перечисление возможных аргументов и значений функции при этих аргументах

Пример. Введем функцию $f(x, y)$

x	y	f(x,y)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 1: Таблица истинности для $f(x, y)$

Эту же функцию можно задать функцией $f(x, y) = \max(x, y)$

Утверждение. Функция от n переменных может быть $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

x_1	x_2	...	x_n	$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
0	0	...	0	0 или 1
...	0 или 1
1	1	...	1	0 или 1

Таблица 2: Таблица истинности для $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

При этом количество всех возможных наборов аргументов равняется 2^n , а количество всех возможных функций при всех возможных наборах аргументов равняется 2^{2^n}

Следствие. Посчитаем количество таких функций для разных n

$$n = 1 \quad 2^2 = 4 \text{ функций } f(x)$$

$$n = 2 \quad 2^{2^2} = 16 \text{ функций } f(x, y)$$

$$n = 3 \quad 2^{2^3} = 2^8 = 256 \text{ функций } f(x, y, z)$$

1.1.2 Функции от 1 переменной (их определения)

Пример. Перечислим все возможные функции от 1 переменной

Данные функции имеют значение:

$$f_1(x) = 0 \quad \text{— функция } 0$$

$$f_2(x) = x \quad \text{— функция } x$$

$$f_3(x) = \neg x, \bar{x}, \neg x, \text{ not } x \quad \text{— функция отрицания (не } x)$$

$$f_4(x) = 1 \quad \text{— функция } 1$$

x	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

1.1.3 Функции от 2 переменных (их определения)

Пример. Перечислим все возможные функции от 2 переменных

x	y	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$	$f_7(x)$	$f_8(x)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Таблица 3: Таблица истинности для $f(x, y)$

Продолжение:

x	y	$f_9(x)$	$f_{10}(x)$	$f_{11}(x)$	$f_{12}(x)$	$f_{13}(x)$	$f_{14}(x)$	$f_{15}(x)$	$f_{16}(x)$
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Таблица 4: Таблица истинности для $f(x, y)$

Перечислим основные значения функций:

$f_2(x, y)$ — это конъюнкция или "логическое и" или логическое умножение ($xy, x \& y, x \wedge y$)

$f_7(x, y)$ — это исключающее или ($x + y, x \text{ XOR } y, x \oplus y$), также данную функцию можно ассоциировать как $(x + y) \bmod 2$

$f_8(x, y)$ — это логическое или, но ее можно также записать как $\max(x, y)$ ($x|y, x \vee y$)

$f_{10}(x, y)$ — это эквивалентность ($x \Leftrightarrow y, x \equiv y, x == y$)

$f_{14}(x, y)$ — это импликация ($x \Rightarrow y, x \rightarrow y$)

Импликация работает так, что истина следует из чего угодно:

лешия не существует \Rightarrow русалок не существует = 1 ($1 \Rightarrow 1 = 1$)

допса скучная \Rightarrow русалок не существует = 1 ($0 \Rightarrow 1 = 1$)

русалки существуют \Rightarrow драконы существуют = 1 ($0 \Rightarrow 0 = 1$)

$x \Rightarrow y = 0$ только если $x = 1$, а $y = 0$

$f_{12}(x, y)$ — это обратная импликация ($x \Leftarrow y = y \Rightarrow x$)

$f_9(x, y)$ — стрелка Пирса ($x \downarrow y = \overline{x \vee y}$)
 $f_{15}(x, y)$ — штрих Шеффера ($x|y = \overline{xy}$)
 $f_3(x, y)$ — запрет по y ($x > y = \overline{x \Rightarrow y}$)
 $f_1(x, y) = 0$
 $f_4(x, y) = x$
 $f_5(x, y)$ — запрет по x ($x < y = \overline{x \Leftarrow y}$)
 $f_6(x, y) = y$
 $f_{11}(x, y)$ — не y ($\neg y$)
 $f_{13}(x, y)$ — не x ($\neg x$)
 $f_{16}(x, y) = 1$

Определение. Логические выражения — способ задания логических функций с помощью переменных, цифр 0 или 1 и операций:

· \vee \Rightarrow \Leftrightarrow $+$ \equiv $|$ \downarrow $<$ $>$

Пример. Примеры логических выражений:

$(x \vee y) =$
 $(x \Rightarrow yz) \vee (y \equiv z)$
 $(0 \Rightarrow x) \vee (1 \Rightarrow y)$

Определение. Значения логического выражения можно записать **Таблицей истинности**

Пример. $f(x, y, z) = (x \vee y)z$

x	y	z	f(x,y,z)
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	0
1	1	1	1

Замечание. Порядок строчек в таблице истинности может быть любым, но лучше использовать как у двоичных чисел

Утверждение. *Таблицы истинности часто считают постепенно*

x	y	z	$x \vee y$	$(x \vee y)z$
...
...

1.1.4 Приоритеты операций

\neg

\cdot

\vee

$+$ \equiv

\Rightarrow \Leftarrow

$|$ \downarrow $<$ $>$

Пример. Примеры приоритетов операций:

$$\neg x \vee y = (\neg x) \vee y$$

$$x \vee yz = x \vee (yz)$$

$$x \Rightarrow y \vee z = x \Rightarrow (y \vee z)$$

1.1.5 Алгебраические преобразования логических выражений

Определение. Алгебраические преобразования логических выражений — изменяем выражения по правилам, обычно в сторону упрощения

Пример. $(0 \Rightarrow x) \vee (1 \Rightarrow y) = 1 \vee (1 \Rightarrow y) = 1$

Утверждение 1.

$$\overline{\overline{x}} = x$$

Доказательство:

x	\overline{x}	$\overline{\overline{x}}$
0	1	0
1	0	1

Утверждение 2. При \vee :

$$1 \vee x = 1$$

$$0 \vee x = x$$

$$x \vee y = y \vee x$$

1.1.6 Таблица эквивалентных логических выражений

Утверждение. $x \vee y = y \vee x$ - симметричность

$$x \vee 0 = x$$

$$x \vee 1 = 1$$

$$x \vee x = x$$

$$x \vee \bar{x} = 1$$

Доказательство:

x	\bar{x}	$x \vee \bar{x}$
0	1	$0 \vee 1 = 1$
1	0	$1 \vee 0 = 1$

$$xy = yx$$

$$x * 0 = 0$$

$$x * 1 = x$$

$$x * x = x$$

$$x * \bar{x} = 0$$

$$x + y = y + x$$

$$x + 0 = x$$

$$x + 1 = \bar{x}$$

$$x + x = 0$$

$$x + \bar{x} = 1$$

Утверждение. $x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z$ - ассоциативность

Ассоциативность означает, что порядок скобок не важен

Пример. $x \Rightarrow y \neq y \Rightarrow x$ - не симметричная функция

Доказательство:

Замечание. $x \Rightarrow y \neq y \Rightarrow x$

x y	$x \Rightarrow y$	$y \Rightarrow x$
0 0	1	1
0 1	1	0
1 0	0	1
1 1	1	1

$$x \Rightarrow 0 = \bar{x}$$

$$0 \Rightarrow x = 1$$

Доказательство:

x	$x \Rightarrow 0$
0	$0 \Rightarrow 0 = 1$
1	$1 \Rightarrow 0 = 0$

$$x \Rightarrow 1 = 1$$

$$1 \Rightarrow x = x$$

$$x \Rightarrow x = 1$$

$$x \Rightarrow \bar{x} = \bar{x}$$

$$\bar{x} \Rightarrow x = x$$

$$\bar{x} \Rightarrow y \Rightarrow z \text{ договоримся, что это } x \Rightarrow y(y \Rightarrow z) \neq (x \Rightarrow y) \Rightarrow z$$

x y z	$x \Rightarrow y$	$y \Rightarrow z$	$x \Rightarrow (y \Rightarrow z)$	$(x \Rightarrow y) \Rightarrow z$
0 0 0	1	1	1	0
0 0 1	1	1	1	1
0 1 0	1	0	1	0
0 1 1	1	1	1	1
1 0 0	0	1	1	1
1 0 1	0	1	1	1
1 1 0	1	0	0	0
1 1 1	1	1	1	1

$$x \Leftrightarrow y = y \Leftrightarrow x$$

$$x \Leftrightarrow 0 = \bar{x}$$

$$x \Leftrightarrow 1 = x$$

$$x \Leftrightarrow x = 1$$

$$x \Leftrightarrow \bar{x} = 0$$

$$x \Leftrightarrow (y \Leftrightarrow z) = (x \Leftrightarrow y) \Leftrightarrow z \text{ - ассоциативно}$$

Утверждение. *Дистрибутивность*

$$(x \vee y)z = xz \vee yz$$

$$(x + y)z = xz + yz \text{ по таблице истинности}$$

$$(x \& y) \vee z = (xy \vee z = (x \vee z)(y \vee z)$$

$$(x \vee y) \& z = (x \& z) \vee (y \& z)$$

$$(x \& y) \vee z = (x \vee z) \& (y \vee z)$$

Замечание. $(x_1 \vee x_2 \vee x_3)(y_1 \vee y_2) = (x_1 \vee x_2 \vee x_3)y_1 \vee (x_1 \vee x_2 \vee x_3)y_2 =$
 $x_1y_1 \vee x_2y_1 \vee x_3y_1 \vee x_1y_2 \vee x_2y_2 \vee x_3y_2$

$$xy \vee z = (x \vee z)(y \vee z) = xy \vee xz \vee zy \vee zz = xy \vee xz \vee zy \vee z =$$

$$xy \vee xz \vee zy \vee z * 1 = xy \vee z(x \vee y \vee 1) = xy \vee z \text{ сошлось}$$

$$x + y = \overline{x} \Rightarrow y \text{ - смотри Таблицу истинности}$$

$$(x \Rightarrow y)(y \Rightarrow x) = x \Rightarrow y$$

1.1.7 Многочлены Жегалкина

Замечание. Одну и ту же функцию можно записать по разному.

$$\text{В алгебре: } f(x) = 1 + x = x + 1 = x + 5 - 4 = \sin(x - x) + x = \dots$$

В логике: $f(x, y) = x \vee y = x \vee y \vee 0 = (x \vee y)(\overline{y} \vee y = x\overline{y} \vee y (=$ -
дистрибутивность)

Многочлены Жегалкина для логической формулы

Определение. $f(x_1, \dots, x_n)$ - это многочлен с переменными x_i , конспектами 0,1 и со степенями переменных ≤ 1 . Это многочлены от $x_i \in \mathbb{Z}_2$

Пример. $f(x, y, z) = 1 + x + yz + xyz$

$$1 + x \quad xy + xyz$$

$$1 + xy$$

Не многочлены

$$1 + x + (y \vee z)$$

$$1 + x + z^2 \text{ нельзя степень } 2$$

Замечание. В общем случае многочлен от 1 переменной ($a_i = 0$ или 1)

$$a_0 + a_1x$$

$$\text{от } 2 \text{ух: } a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

$$\text{от } 3 \text{ех: } a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7xyz$$

В общем случае $f(x_1, \dots, x_n) = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n + ax_1x_2 + ax_1x_3 +$
 $+ \dots$ (все пары переменных) $+ ax_1x_2x_3 + ax_1x_3x_2 \leftarrow$ все тройки
переменных $+ ax_1x_2x_3 \dots x_n$

Определение. $\forall f(x_1, \dots, x_n)$ - логическая функция $\exists!$ многочлен Жегалкина $g(x_1, \dots, x_n) : f = g$

Замечание. Всего 4 функции от 1ой переменной

$$f(x) = 0 = \bar{x} = 0 + 0x$$

$$f(x) = 1 = 1 = 1 + 0x$$

$$f(x) = x = x = 0 + 1x$$

$$f(x) = \bar{x} = 1 + x = 1 + 1x$$

Доказательство:

Определение. Разные многочлены - это разные логические функции

т.е. $f(x_1...x_n) = a_0 + ... + a_1x_1...x_n$

$$g(x_1...x_n) = b_0 + ... + bx_1...x_n$$

$\exists!$: $a_i \neq b_i$ различающийся

Доказательство:

Возьмем индекс с самым большим количеством переменных

$$f(x, y, z) = 1 + x + xy + xyz = ... + 1x + Dy + Dz + 1xy$$

$$g(x, y, z) = 1 + y + z + xyz... + Dx + 1y + 1z$$

для переменных этого слагаемого подставим 1 0ху

для остальных переменных : 0

$$[\text{В примере } x = 1, y = 0, z = 0 : f(1, 0, 0) \text{ и } g(1, 0, 0)]$$

и в f и в g все другие слагаемые равны 0

Теперь $f(...)$ и $g(...)$

$$f(...) = a_ix_1x_2x_3 \neq b_ix_1x_2x_3 \Rightarrow f(x_1...x_n) \neq g$$

Доказательство:

Проверим, что многочленов Жегалкина столько, сколько функций:

Посчитаем

$$a_0 + a_1x_1 + ... + a_1x_1x_2...x_n$$

Сколько слагаемых:

1) 1 слагаемых без переменных

n слагаемых с переменной

$$a_1x_1 + ... + a_nx_n$$

C_n^2 - слагаемых с 2 - мя переменными

C_n^3 - слагаемых с 3 - мя переменными

C_n^n - слагаемых с n переменными

$$\text{Всего : } C_n^0 + C_n^1 + C_n^2 + ... C_n^n = 2^n((1 + 1)^2)$$

Пример. $a_0 + a_1x$ - 2 слагаемых

$$a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy - 2^2 = 4 \text{ слагаемых}$$

2) Все слагаемых имеют вид: $x_1, x_2, x_3...x_n$ (0 или 1) - 2^n слагаемых

Итого: многочлен Жегалкина от n переменных

Задача. Сколько разных многочленов?

Это столько же, сколько логических функций

Итог:

Следствие: Любая логическая функция может быть представлена в виде многочлена Жегалкина

Пример. $f(x, y) = x \vee y$

$f(x, y) = x * y$ - уже многочлен Жегалкина

Метод неопределенных коэффициентов:

Подберем $x \vee y = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$

$$f(0, 0) = 0$$

$$f(0, 0) = a_0 + a_1 * 0 + a_2 * 0 + a_3 \dots$$

$$f(1, 0) = 1 \vee 0 = 1$$

$$f(1, 0) = a_0 + a_1 = a_1 \quad (a_0 = 0, \Rightarrow a_1 = 1)$$

$$f(0, 1) = \text{аналогично} \Rightarrow a_2 = 1$$

$$f(x, y) = x + y + a_3xy$$

$$f(1, 1) = 1 \vee 1 = 1$$

$$f(1, 1) = 1 + 1 + a_3 = 0 + a_3 = a_3, \quad a_3 = 1$$

$$\text{Ответ: } x \vee y = x + y + xy$$

Многочлены Жегалкина от 1 переменной:

$f(x)$	Мн Ж
0	0
1	1
x	x
\bar{x}	$1 + x$

Многочлены Жегалкина от 2 переменных:

$f(x, y)$	Мн Ж
0	0
1	1
xy	xy
$x + y$	$x + y$
$x \vee y$	$x + y + xy$

Формулы:

$$1. \quad \overline{xy} = \neg(xy) = \bar{x} \vee \bar{y}$$

$$2. \quad \overline{x \vee y} = \neg(x \vee y) = \bar{x} \cdot \bar{y} = \bar{x} \bar{y}$$

Замечание. $\overline{xy} \neq \overline{x} \cdot \overline{y} = \overline{x} \overline{y}$

Доказательство формул через таблицу истинности:

x	y	$\overline{x \vee y}$	$\overline{x} \cdot \overline{y}$
0	0	1	1
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0

1.1.8 Получение многочлена Жегалкина через алгебраические упрощения

1. Многочлен Жегалкина для \vee

$$x \vee y = (x = \overline{a}, y = \overline{b}) = \overline{ab} = \overline{\overline{x} \cdot \overline{y}} = \overline{(1+x)(1+y)} = 1 + (1+x)(1+y) = 1 + 1 + x + y + xy = \underline{x + y + xy}$$

2. Многочлен Жегалкина для \Leftrightarrow

$$x \Leftrightarrow y = \overline{x + y} = \underline{1 + x + y}$$

3. Многочлен Жегалкина для \Rightarrow

$$x \Rightarrow y = \overline{x} \vee y = (1+x) \vee y = (1+x) + y + (1+x)y = 1 + x + y + y + xy = \underline{1 + x + xy}$$

Замечание. Если есть логическая формула, то ее можно привести к формуле многочлена Жегалкина двумя способами:

1. метод неопределенных коэффициентов:

$$a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + \dots + axyz$$

2. метод алгебраических преобразований

Пример. $x \vee y = \overline{\overline{x} \cdot \overline{y}} = \dots = x + y + xy$

Пример. $x \Rightarrow y = \overline{x} \vee y = \dots = 1 + x + xy$

Пример. $x \Rightarrow (y \vee \overline{z}) = x \Rightarrow (y + \overline{z} + y \cdot \overline{z}) = x \Rightarrow (y + (1+z) + y \cdot (1+z)) = x \Rightarrow (y + 1 + z + y + yz) = x \Rightarrow (1 + z + yz) = 1 + x + x(1 + z + yz) = 1 + x + x + xz + xyz = 1 + xz + xyz$

Поймем, что: $(x \Leftrightarrow y) \Leftrightarrow z = x \Leftrightarrow (y \Leftrightarrow z)$

$$x \Leftrightarrow y \Leftrightarrow z = (1+x+y) \Leftrightarrow z = 1 + (1+x+y) + z = 1 + 1 + x + y + z = x + y + z$$

Вывод:

Заранее не ясно, сложно ли привести логическую формулу к многочлену Жегалкина

1.1.9 Дизъюнктивно-нормальная форма (ДНФ)

Определение. Литерал — это переменная или отрицание переменной

Пример. $x, \bar{x}, y, \bar{y}, z, \bar{z}$

Определение. Конъюнктор — конъюнкция литералов

Пример. $x\bar{y}, xyz, \bar{x}\bar{y}\bar{z}, \bar{x}z$, ноль (пустой конъюнкт).

Определение. Логическое выражение имеет ДНФ, если она является дизъюнкцией конъюнкторов

Пример. $x\bar{y} \vee \bar{x}\bar{z} \vee z \vee \bar{x}\bar{y}$ — ДНФ

Пример. $xy \vee \bar{x}\bar{y}$ — ДНФ

Пример. $x \vee y$ — ДНФ

Пример. xy — ДНФ

Пример. не ДНФ — $\bar{x}\bar{y} = \bar{x} \vee \bar{y}$ — ДНФ

Пример. не ДНФ — $x \Rightarrow yz = \bar{x} \vee yz$ — ДНФ

Построение ДНФ по таблице истинности функции:
алгоритм на примере трех переменных

x	y	z	$f(x, y, z)$	
0	0	0	0	
0	0	1	0	
0	1	0	1	$\bar{x}y\bar{z}$
0	1	1	1	$\bar{x}yz$
1	0	0	0	
1	0	1	0	
1	1	0	1	$xy\bar{z}$
1	1	1	0	

Берем строки из столбца $f(x, y, z)$, где значения в столбце равны 1
Допустим есть строка: $x = a_1, y = a_2, z = a_3$ (a могут быть как 0, так и 1)

В ответ добавляется конъюнкт xyz ($0 \Rightarrow$ отрицание, $1 \Rightarrow$ не отрицание)

Ответ: $f(x, y, z) = \bar{x}y\bar{z} \vee \bar{x}yz \vee xy\bar{z}$

Доказательство корректности алгоритма:

Когда полученный ДНФ = 1?

Когда есть конъюнкт равный 1

1. Если первый конъюнкт равняется 1 (в примере $\bar{x} y \bar{z} = 1$)
 \Rightarrow все литералы конъюнкта равняются 1
 \Rightarrow в примере $\bar{x} = 1 \quad y = 1 \quad \bar{z} = 1$
 $x = 0 \quad y = 1 \quad z = 0$
2. Если второй конъюнкт равняется 1
 \Rightarrow в примере $x = 0 \quad y = 1 \quad z = 1$ — строка из таблицы истинности
3. То же самое с третьим конъюнктом

Посмотрим таблицу с этими конъюнктами:

x	y	z	$\bar{x} y \bar{z}$	$\bar{x} y z$	$x y \bar{z}$	$f(x, y, z)$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1
1	1	1	0	0	0	0

Замечание. У одной функции могут быть разные ДНФ

Пример. $\bar{x} y \bar{z} \vee \bar{x} y z \vee x y \bar{z} = \bar{x} y (\bar{z} \vee z) \vee x y \bar{z} = \bar{x} y \vee x y \bar{z}$ — подчеркнутые выражения являются ДНФ

Пример. $\bar{x} y \bar{z} \vee \bar{x} y z \vee x y \bar{z} = \bar{z} y (\bar{x} \vee x) \vee z y \bar{x} = \bar{z} y \vee z y \bar{x} = y \bar{z} \vee \bar{x} y z \vee \bar{x} x \vee z \bar{z}$ — подчеркнутые выражения являются ДНФ

Получить ДНФ для логической функции/формулы можно:

1. по таблице истинности
2. с помощью алгебраических преобразований

Пример. 1. $\bar{x} = \bar{x}$

2. $x \vee y = x \vee y$

3. $x \cdot y = x \cdot y$

4. $x \Rightarrow y = \bar{x} \vee y$

x	y	$x \Leftrightarrow y$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$$5. x \Leftrightarrow y = (x \Rightarrow y)(y \Rightarrow x) = (\bar{x} \vee y)(\bar{y} \vee x) = \bar{x}\bar{y} \vee \bar{x}x \vee y\bar{y} \vee yx = \bar{x}\bar{y} \vee xy$$

$$6. x + y = \overline{\bar{x} \Leftrightarrow \bar{y}} = \overline{\bar{x}\bar{y} \vee xy} \dots$$

$$= \overline{\bar{x}\bar{y}} \vee \overline{xy} = \overline{\bar{x}} \cdot \overline{\bar{y}} \vee \overline{x} \cdot \overline{y} = x\bar{y} \vee \bar{x}y$$

$$7. x \Rightarrow (y + z) = \bar{x} \vee (y + z) = \bar{x} \vee \bar{y}z \vee y\bar{z}$$

1.1.10 Задача (не) выполнимости

Дана логическая формала в ДНФ

Проверить, бывает ли она равна 0?

$$\bar{x}\bar{y} \vee x \vee y? = 0$$

$$x = 0, y = 0 \Rightarrow \bar{x}\bar{y} = 1$$

\Rightarrow данный ДНФ не может быть равным 0

Эта задача обладает особенностью:

1. если знать значения переменных (ответ), то их легко можно быстро проверить
2. подобрать значения переменных для 0 — нет

Нет известного алгоритма, который "принципиально" быстрее полного перебора

У этой задачи класс NP выполнимости (ответ легко проверить, а найти его простым способом невозможно)

Следствие. То к чему сводится задача (не) выполнимости тоже сложна

1. упростить логическое выражение
2. поиск минимального ДНФ

1.1.11 Запись таблиц истинности в виде графика

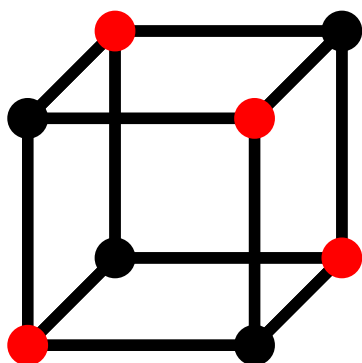
Формула = $f(x, y, z) = x + y$

$$f(0, 0) = 0$$

$$f(0, 1) = 1$$

$$f(1, 0) = 1$$

$$f(1, 1) = 0$$



1.1.12 Задача минимизации ДНФ

Данная задача тоже является сложной, также как и задача (не) выполнимости

Дана логическая функция (в виде ДНФ). Необходимо найти самую короткую ДНФ эквивалентную данной.

Минимальной ДНФ считается та, где меньше количество литералов и дизъюнкций

Пример. $\bar{x}\bar{y} \vee z$ короче, чем $xy \vee yz$

Замечание. Далее рассматриваться все будет для функции от 3 переменных $f(x, y, z)$

Замечание. Какова таблица истинности $xyz = abc$, где $a = 0$ или $1, b = 0$ или $1, c = 0$ или 1

$0 \Rightarrow$ надо поставить отрицание

$1 \Rightarrow$ нет отрицания

Пример. $f(x, y, z) = \bar{x} y \bar{z}$

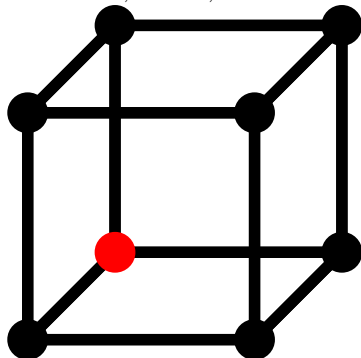
Если $\bar{x} y \bar{z} = 1$

$\Rightarrow \bar{x} = 1, y = 1, \bar{z} = 1$

$\Rightarrow x = 0, y = 1, z = 0$

$\Rightarrow x = a, y = b, z = c$

$\Rightarrow a = 0, b = 1, c = 0$



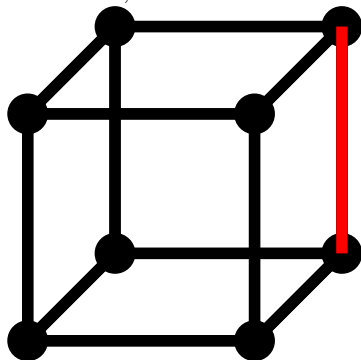
Пример. $f(x, y, z) = xy$

Если $xy = 1$

$\Rightarrow x = 1, y = 1$

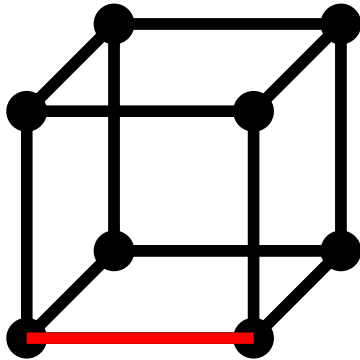
$\Rightarrow x = a, y = b$

$\Rightarrow a = 1, b = 1$



Аналогично, $f(x, y, z) = \bar{y} \bar{z}$

ребро: $y = 0, z = 0, x = ?$ — не важно

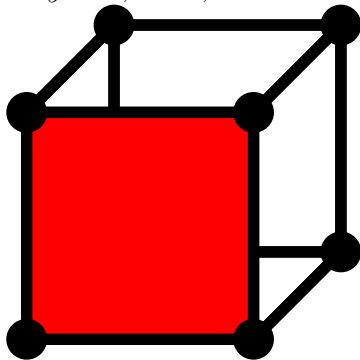


Последнее — конъюнкт из 1 литерала:
 $x, \bar{x}, y, \bar{y}, z, \bar{z}$

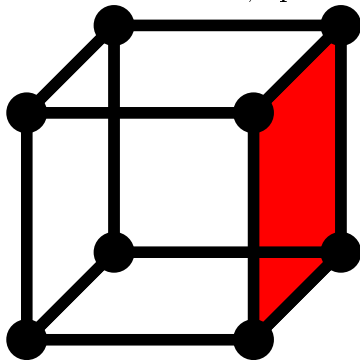
Пример. $f(x, y, z) = \bar{y}$

Если $\bar{y} = 1$

$\Rightarrow y = 0, x = ?, z = ?$



Или конъюнкт x , грань $x = 1$



Итого:

xyz — это вершина $x = a, y = b, z = c$

xy — это ребро $x = a, y = b$

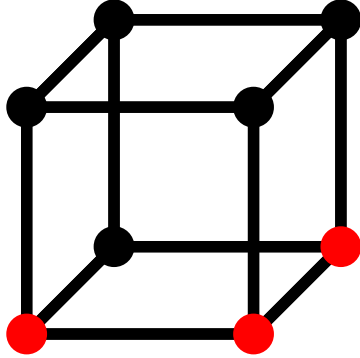
x — это грань $x = a$

Попробуем минимизировать ДНФ

Пример. $\bar{x}\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee xy\bar{z}$

Найти самый короткий ДНФ для данного выражения

Шаг 1: строим ТИ



$$\bar{x}\bar{y}\bar{z} = (0, 0, 0)$$

$$x\bar{y}\bar{z} = (1, 0, 0)$$

$$xy\bar{z} = (1, 1, 0)$$

Шаг 2: упрощаем

Чтобы упростить имеет смысл рассмотреть 2 ребра:

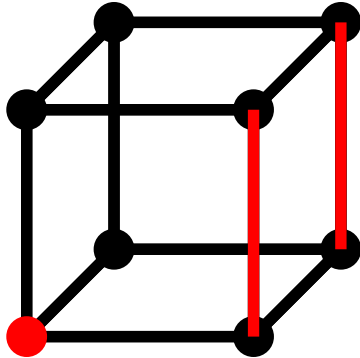
$$(0, 0, 0) - -(1, 0, 0) = \bar{y}\bar{z}$$

$$(1, 0, 0) - -(1, 1, 0) = x\bar{z}$$

$$\Rightarrow \text{ДНФ} = \bar{y}\bar{z} \vee x\bar{z} = \bar{x}\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee xy\bar{z} = xy\bar{z} \vee \bar{y}\bar{z}$$

$$\Rightarrow \text{самое короткое ДНФ} = \bar{y}\bar{z} \vee x\bar{z}$$

Пример. $\bar{x}\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y} \vee xy$



$$\Rightarrow \text{ДНФ} = x \vee \bar{x}\bar{y}\bar{z} = x \vee \bar{y}\bar{z}$$

Замечание. Данный метод позволяет наглядно перебрать все ДНФ и найти минимальный

С помощью алгебраических преобразований мы не сможем понять, что ответ самый оптимальный

Пример. Алгебраические преобразования

$$\bar{x}\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee xy\bar{z} = \bar{x}\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee xy\bar{z} = \bar{y}\bar{z} \vee x\bar{z}$$

Но тут непонятно, а вдруг можно сделать еще короче

1.1.13 Двойственная функция

Пусть есть логическая функция: $f = B^n \rightarrow B = \{0, 1\}$

Двойственная функция: $f^* = B^n \rightarrow B = \{0, 1\}$

$$f^*(x_1, x_2, \dots, x_n) = \overline{f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n})}$$

Замечание. Мир замены лжи на истину

$$0 \leftrightarrow 1$$

Пример. $f(x, y) = x \vee y$

x	y	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Новый мир: $1 \rightarrow 0, 0 \rightarrow 1$

x	y	f^*
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Получилось, что $(x \vee y)^* = xy$

Пример. $(x \vee y)^* = \overline{\overline{x} \vee \overline{y}} = \overline{\overline{x}} \overline{\overline{y}} = xy$

Пример. $(x + y)^* = \overline{\overline{x} + \overline{y}} = \overline{1 + x + 1 + y} = 1 + x + 1 + y + 1 = 1 + x + y = x \Leftrightarrow y$

Замечание. $f^{**}(x_1, x_2 \dots x_n) = \overline{f^*(\overline{x_1}, \overline{x_2} \dots \overline{x_n})} = \overline{\overline{f(x_1, x_2 \dots x_n)}} = f(x_1, x_2 \dots x_n)$

Следствие.

$$(xy)^* = x \vee y$$

$$(x \Leftrightarrow y)^* = x + y$$

Теорема о композиции:

$$f = f_0(f_1(x_1, \dots, x_n), f_2(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$$

f_i — это функции от n переменных $(B^n \rightarrow B)(i = 1 \dots n)$

$$f_0 = B^m \rightarrow B$$

$$\text{Тогда } f^*(x_1, \dots, x_n) = f_0^*(f_1^*(x_1, \dots, x_n), f_2^*(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m^*(x_1, \dots, x_n))$$

Доказательство:

$$\begin{aligned} f^* &= \overline{f(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n})} = \overline{f_0(f_1(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n}), f_2(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n}), \dots, f_m(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n}))} = \\ &= f_0^*(f_1^*(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n}), f_2^*(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n}), \dots, f_m^*(\overline{x_1}, \dots, \overline{x_n})) \end{aligned}$$

Следствие. Если есть $f(x_1, \dots, x_n)$ — записано, как логическое выражение с $\cdot, \vee, \neg, +, \Leftrightarrow$, то f^* — также выражение, но связки заменяются на двойственные узлы

$$\vee \leftrightarrow *$$

$$+ \leftrightarrow \Leftrightarrow$$

$$\neg \leftrightarrow \neg$$

$$\text{так как } (\overline{\overline{x}})^* = \overline{x}$$

Пример.

$$f(x, y, z) = \overline{x \vee \overline{y} z} \Leftrightarrow (x + y + z)$$

$$f^*(x, y, z) = \overline{(x \cdot (\overline{y} z))} + (x \Leftrightarrow y \Leftrightarrow z)$$

Пример.

$$f(x_1, \dots, x_n) = 1$$

$$\Rightarrow f^*(x_1, \dots, x_n) = \overline{1} = 0$$

$$1^* = 0; 0^* = 1$$

1.1.14 Конъюнктивно-нормальная форма КНФ

Определение. Конъюнктивно-нормальная форма — еще одна нормальная форма, похожая на ДНФ

Определение. Литерал — это как и раньше, переменные или отрицательные переменные

$$x, y, \overline{x}, \overline{y}$$

Определение. Дизъюнкт — дизъюнкция литералов

$$x \vee y; x \vee y \vee \bar{z}; x \vee \bar{z}; \bar{x}$$

$$\cancel{xy}, \cancel{x \vee yz}$$

Определение. КНФ — это конъюнкция нескольких дизъюнктов

$$(x \vee y)(y \vee \bar{z});$$

$$(x \vee \bar{y} \vee z)(\bar{y} \vee \bar{z})(\bar{x})$$

$$\cancel{xy \vee z}$$

$$x \vee y \vee z$$

— 1 дизъюнкт

$$xyz$$

— 3 дизъюнкта

Определение. У любой логической функции есть КНФ, её можно построить по таблице истинности

Доказательство

Заметим, что если вычислить $(\text{КНФ})^*$ (двойственную к КНФ), то получим ДНФ

Пример. $[(x \vee y \vee z)(x \vee \bar{y})(\bar{y} \vee \bar{z})]^* = (xyz) \vee (x\bar{y}) \vee (\bar{y}\bar{z})$

И наоборот $(\text{ДНФ})^* = \text{КНФ}$

Итого, чтобы получить КНФ для функции f , надо построить двойственную функцию к ДНФ этой функции. Отсюда следует, что КНФ всегда существует

Пример. $f(x,y,z) = xy \Leftrightarrow z$

Выпишем значения xyz из строчек, где $f^* = 1$

$$\bar{x}\bar{y}z \quad x\bar{y}\bar{z} \quad \bar{x}y\bar{z} \quad xyz$$

x	y	z	xy	f	f^*
0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1
0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	0	0
1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	0

Вспомним определение $f^*(x, y, z) = \overline{f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})}$

$$f^*(0, 0, 0) = \overline{f(1, 1, 1)}$$

$$\text{Итого: } f^* = \overline{\bar{x}\bar{y}z \vee \bar{x}y\bar{z} \vee x\bar{y}\bar{z} \vee xyz}$$

$$f^*(0, 0, 1) = \overline{f(1, 1, 0)}$$

$$f^*(0, 1, 0) = \overline{f(1, 0, 1)}$$

По теореме о композиции

$$f = (\bar{x} \vee \bar{y} \vee z)(\bar{x} \vee y \vee \bar{z})(x \vee \bar{y} \vee \bar{z})(x \vee y \vee \bar{z})$$

Получение КНФ по таблице истинности без двойственной функции

$$f(x, y, z) = xy \Leftrightarrow z$$

x	y	z	$f = xy \Leftrightarrow z$
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

$$\text{При } x \ y \ z = 1 \ 1 \ 0, f = xy \Leftrightarrow z \leftarrow \bar{x} \vee \bar{y} \vee z$$

для 1 - отрицание, для 0 - нет отрицания

Итого: Чтобы построить ДНФ:

$$\text{- строки с 1, } 0 \leftrightarrow \bar{x}\bar{y}\bar{z}$$

$$1 \leftrightarrow xyz$$

Чтобы получить КНФ:

$$\text{- строки с 0, } 0 \leftrightarrow xyz$$

$$1 \leftrightarrow \bar{x}\bar{y}\bar{z}$$

Пример. $f = x + y$

x	y	$x + y$
0	0	0
0	0	1
0	1	1
0	1	0

Нули в: $x \vee y \quad \bar{x} \vee \bar{y}$
 $f = (x \vee y)(\bar{x} \vee \bar{y})$

Замечание. Для функции записанной в форме КНФ, можно поставить задачу "выполнимости".

Вопрос: может ли значение быть = 1

- не известно решений, принципиально эффективней полного перебора значений

Пример. $(x \vee y \vee z)(x \vee \bar{y})(y \vee \bar{z})(\bar{x} \vee \bar{z}) = 1$

$x = 1$

$y = 1$ подходит

$z = 0$

Следовательно эта формула выполнима при таком наборе

Многие задачи, головоломки сводятся к задаче выполнимости

Пример. Принцип Дирихле

Если есть n клеток и в них $n+1$ заяц, то \exists клетка, где зайцев ≥ 2 .

при $n = 2$: $i = 1$ или 2 (клетка) x_{ij} - в клетке i сидит заяц j

$j = 1$ или 2 или 3 заяц

Попробуем записать, что в каждой клетке ≤ 1 зайца

а) каждый заяц ровно в одной клетке

$x_{11} \oplus x_{21}$ - заяц 1

$x_{12} \oplus x_{22}$ - заяц 2

$x_{13} \oplus x_{23}$ - заяц 3

б) в каждой клетке не больше 1 зайца

кл/з	1	2	3
1	x_{11}	x_{12}	x_{13}
2	x_{21}	x_{22}	x_{23}

если есть 2 зайца, то один из конъюнктов: = 1

$\overline{x_{11}x_{12} \vee x_{11}x_{13} \vee x_{12}x_{13}} \longleftarrow$ в кл 1 ≤ 1 зайца

$\overline{x_{21}x_{22} \vee x_{21}x_{23} \vee x_{22}x_{23}} \longleftarrow$ в кл 2 ≤ 1 зайца

Соединяем все утверждения:

$(x_{11}+x_{21})(x_{12}+x_{22})(x_{13}+x_{23})(\overline{x_{11}x_{12}} \vee \overline{x_{11}x_{13}} \vee \overline{x_{12}x_{13}})(\overline{x_{21}x_{22}} \vee \overline{x_{21}x_{23}} \vee \overline{x_{22}x_{23}}) =$
 0 всегда из принципа Дерихла

$(x_{11} \vee x_{21})(\overline{x_{11}} \vee \overline{x_{21}})(x_{12} \vee x_{22})(\overline{x_{12}} \vee \overline{x_{22}})(x_{13} \vee x_{23})(\overline{x_{13}} \vee \overline{x_{23}})(\overline{x_{11}} \vee \overline{x_{12}})(\overline{x_{11}} \vee \overline{x_{13}})(\overline{x_{12}} \vee \overline{x_{13}})(\overline{x_{21}} \vee \overline{x_{22}})(\overline{x_{21}} \vee \overline{x_{23}})(\overline{x_{22}} \vee \overline{x_{23}})$

← Берем программу, которая решает КНФ задачу выполнимости.
 Она скажет - невозможно.

1.1.15 Класс замкнутости

Повторим: Логическая функция: $f: \beta^n \rightarrow \beta$
 $\beta = \{0, 1\}$

Определение. Класс — это множество логических функций.

Пример. K_1 = класс функций: от двух переменных K_2 = класс функций такой, что $f(x, y) = f(y, x)$

$f(x, y) = x \vee y \in K_1, \in K_2$

$g(x, y) = x \Rightarrow y \in K_1 \notin K_2$

K_3 : класс функций $f(x, \dots) = f(\bar{x}, \dots)$ функции, которые не зависят от первой переменной

$f(x, y, z) = y \Rightarrow z \in K_3$

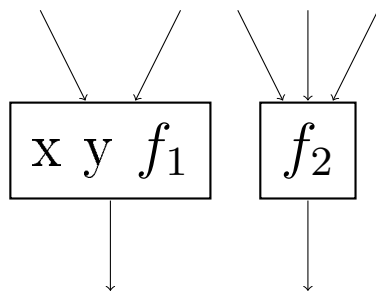
$f(x, y, z) = (x \Rightarrow y) \vee z \notin K_3$

$f(x, y, z) = x\bar{x} \vee y \vee z \in K_3 \quad (x\bar{x})$

$K_4 : \{f(x, y) = x \vee y; g(x, y) = x \Rightarrow y\}$

Определение. Замыкание класса

$K = \{f_1, f_2, \dots\}$ — класс функции



K^* — замыкание класса - это класс состоящий из всех композиций функций из K

$\overline{f_1(f_2)(f_1(x, y), y, z)}}$ — композиция

если есть функции, подставляем друг в друга, получаем композицию

Пример. : 1) $K = \{0, \bar{x}\}$ (0 - f() $\bar{x} - g(x)$)

$K^* = \{f(), g(f()), g(g(f())), g(g(g(f())))\}$

Пример. $K = \{\bar{x}\}$ возьмем класс только из отрицательных

$$K^* = \{\bar{x}, x\}$$

$$K = \{g(x), g(g(x)), g(g(g(x \dots 1, \dots)))\}$$

Пример. $K^* = \{\bar{x}, x \vee y, xy\}$ $K^* = \{\dots, \forall, \text{функция}\}$

Определение. Если K - класс:

$K^* = \alpha$, то $\overline{[K - \text{полный}]}$, где α — все логические функции

Вывод: $K = \{\bar{x}, x \vee y, xy\}$ — полный

Пример. $K = \{\bar{x}, x \vee y\}$, где $f(x) = \bar{x}$, $g(x, y) = x \vee y$

$$xy = \overline{\overline{xy}} = \overline{\overline{x} \vee \overline{y}} = f(g(f(x), f(y)))$$

Значит K^* — тоже полный

Определение. Замкнутый класс — K замкнут, если $K^* = K$

Свойства замыкания:

1. $K_1 \subset K_2$, тогда $K_1^* \subset K_2^*$

Доказательство:

Если есть $f \in K_1^* \Rightarrow f$ — композиция $f_1 \in K_1 \Rightarrow f$ — композиция
($f_i \in K_2$) $\Rightarrow f \in K_2^*$ чтд.

2. Если $K_1 \subset K_2$ и K_1 — полный, то K_2 — полный

Доказательство:

$$K_1 \subset K_2 \Rightarrow K_1^* \subset K_2^* \Rightarrow \alpha \subset K_2^* \Rightarrow K_2^* = \alpha$$

3. Пусть K_1, K_2 — замкнутое, тогда $K_1 \wedge K_2$ — тоже

Доказательство:

$$(K_1 \wedge K_2) \Rightarrow f \text{ — композиция}$$

Пусть $f \in (K_1 \wedge K_2)$

$$\text{а) } \Rightarrow f \text{ — композиция } \Rightarrow f \in K_1^*$$

$$\text{б) } \Rightarrow \text{ — композиция } \Rightarrow f \in K_2^*$$

$$\text{Из а и б следует, что } f \in K_1^* \wedge K_2^* = K_1 \wedge K_2$$

$$\text{Итог: } f \in (K_1 \wedge K_2)^* \Rightarrow f \in K_1 \wedge K_2 \Rightarrow (K_1 \wedge K_2)^* \subset K_1 \wedge K_2, \\ K_1 \wedge K_2 \subset (K_1 \wedge K_2)^* \Rightarrow K_1 \wedge K_2 = (K_1 \wedge K_2)^* \Rightarrow K_1 \wedge K_2 \text{ — замкнут}$$

Замечание. $K_1 K_2$ — замкнуты $\Rightarrow K_1 \vee K_2$ — замкнуты

4. $K^* = K^{**}$ для любого класса функций

Примеры замкнутых классов:

1. T_0 — класс функций, "сохраняющих ноль" $f \in T_0 \Rightarrow$ если $f(0, \dots, 0) =$
0

$$x * y \in T_0$$

$$x + y \in T_0$$

$$\bar{x} \notin T_0$$

$$x \Rightarrow y \notin T_0$$

$$xy + xz + yz \in T_0$$

Утверждение: T_0 - замкнут

Доказательство:

$$\square f \in T_0^*, \text{ проверим, что } f \in T_0$$

$$\Rightarrow T_0^* \subset T_0$$

$$\Rightarrow T_0^* = T$$

f - комп $f_i, f_i \in T_0$

$f_1(f_2(\dots)f_3(f_1(\dots)), \dots)$ - композиция

подставим все 0

$$\Rightarrow f(0, \dots, 0) = 0 \Rightarrow f \in T_0 \text{ чтд}$$

Пример. $f_1(x, y) = x * y \quad f_1 \in T_0, f_2 \in T_0$

$$f_2(x, y) = x + y \quad f_1(f_2(f_1(x, f_2(y, y)), y) f_1(z, z))$$

$$x(y + y)$$

$$f(x, y, z) = (x(y + y) + y) * z * z$$

$$f(0, 0, 0) = 0$$

2. Класс T_1 - сохраняющие 1

$$f \in T_1, \text{ если } f(1, \dots, 1) = 1$$

$$x * y \in T_1$$

$$x + y \notin T_1$$

$$x + y + z \in T_1$$

$$\bar{x} \notin T_1$$

$$x \Rightarrow y \in T_1$$

$$xy + xz + yz \in T_1$$

Утверждение. T_1 - замкнут

Доказательство: смотри T_0

3. Класс \mathbb{K}

$f \in \mathbb{K}$, если f можно записать как конъюнкцию нескольких переменных

$$f(x, y, z, t) = yz$$

$$g(x, y, z) = xyz$$

$$h(x, y, z) = xz$$

$$z(x, y, z) = z$$

$$0$$

$$1$$

Все это $\in \mathbb{K}$

Утверждение. Класс \mathbb{K} замкнут

Композиция $f_i \in \mathbb{K}$
 $f_1(\dots, \text{подаргумент1}, \dots, \text{подаргумент2}) = \text{арг2} * \text{арг4} = \text{подаргумент1} * \text{подаргумент2} * \dots *$
 подаргументT = пер * пер * пер * пер... (произвольная переменная)
 пер может быть 0 или 1

Утверждение. $\mathbb{K} = \{\&, 0, 1\}^*$

по определению замыкания

$$\{f_1(x, y) = x * y$$

$$f_2() = 0$$

$$f_3() = 1\}$$

4. \mathbb{V} - дизъюнкция переменных 0, 1

$$\mathbb{V} = \{V, 0, 1\}^*$$

Утверждение. \mathbb{V} - замкнут

Доказательство 1:

смотри доказательство \mathbb{K}

Доказательство 2:

$$\mathbb{V} = \{V, 0, 1\}^* \Rightarrow \mathbb{V}^* = \{V, 0, 1\}^* = \text{свойства замыкания}$$

Доказательство: $\square f \in K^* \Rightarrow f - \text{комп} f_i \Rightarrow f_i \in K^*$

$$f = f_1(f_2(\dots)) = g_1(g_2(h_1\dots)) \in K^*$$

$$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \text{комп} & g_1 \in K^* \end{matrix}$$

$$g_i \in K \quad h_i \in K$$

$$\Rightarrow f \in K^* \Rightarrow K^* = K^{**}$$

Следствие: $\forall K$ - класс K^* - замкнут

если класс замкнут он станет замкнутым

5. Класс u (unit) : $0, 1, f(x, \dots x_n) = x_i/x_i$

$$f(x, y, z) = \bar{z}$$

$$f(x, y, z, t) = x$$

$$f(x) = x f(x) = \bar{x}$$

Все это $\in u$

6. Класс 1^∞ $f(x_1 \dots x_n) \leq x_i$

$$0^\infty f(x \dots x_n) \geq x_i$$

$$x * y \leq x \quad xy \in 1^\infty$$

$$\leq y$$

$$x \vee y \geq x \quad x \vee y \in 0^\infty$$

$$\geq y$$

$$x \Rightarrow y \geq y \quad x \Rightarrow y \in 0^\infty$$

$$x \Rightarrow y \leq y$$

$$x = 0$$

$$y = 0$$

$$x \Rightarrow y \notin 1^\infty$$

7. L - линейная функция $L = \{0, 1, +\}^*$

Все функции из констант и сложения

$$x + y \in L$$

$$x + y + z \in L$$

$$1 + x \in L$$

$$\bar{x} \in$$

$$x * y \in L$$

(L - линейные многочлены Жегалкина, степени ≤ 1)

Доказательство: $x * y$ имеет многочлены Жегалкина $x * y$

он единственный \Rightarrow линейного многочлена Жегалкина

8. S - самодвойственные функции

$$f \in S, \text{ если } f = f^* \quad (f^* - \text{двойственные})$$

Если функция равна своей двойственной, то она самодвойственная

Пример. $x * y \notin S$

$$x \vee y \notin S$$

$$x \in S$$

$$\bar{x} \in S$$

$$x \Rightarrow y \notin S \text{ т.к. } (x \Rightarrow y)^* = (\bar{x} \vee y)^* = \bar{x} * y \neq \bar{x} \vee y$$

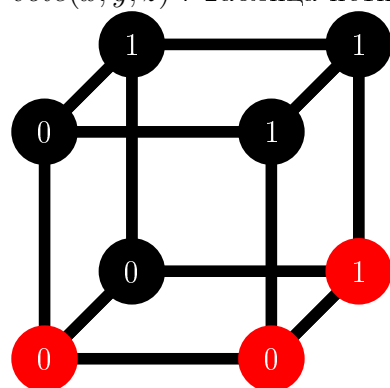
$$x = 1$$

Функция честного голосования $y = 1$ от 3 её переменных. $0 \neq 1$

$vote(x, y, z) = 1$, если 1 - иц больше $x + y + z \geq z$

0, если 0 - ей больше $x + y + z \leq 1$

$vote(x, y, z)$: Таблица истинности



$$vote(x, y, z) \in S?$$

$$(xy \vee xz \vee yz)^* = (x \vee y)(x \vee z)(y \vee z) = ? xy \vee xz \vee yz$$

Раскроем скобки:

$$\begin{aligned}
 & xxy \vee xxz \vee xzy \vee xzz \vee yxy \vee yxz \vee yzy \vee yzz = xy \vee xz \vee xyz \vee xz \vee \\
 & xy \vee xyz \vee yz \vee yz = xy \vee xz \vee yz \vee xyz = xy \vee xz \vee yz(1 \vee x) = xy \vee xz \vee yz \\
 & \text{т.е. } vote = vote^*
 \end{aligned}$$

или проверим таблицей истинности:

читаем снизу вверх, заменяя 0 на 1

xyz	$vote$	$vote^*$
000	0	0
001	0	0
010	0	0
011	1	1
100	0	0
101	1	1
110	1	1
111	1	1

Утверждение. S - замкнут

$$\sqsubset f \in S^* f = \text{композиция } f_i$$

$$f = f_i(f_2(\dots), f_3(\dots), f_4(\dots))$$

Определение. Высота композиции

$$f(x, y, z) - \text{высота } 1 \text{ (1 ф-ия)}$$

$$f(g(x, y), y, z) - \text{высота } 2$$

$$g(x, y) - 1$$

$$f(g(x, y), y, z) - 2$$

Пример. $f(g(h(x), y), h((h(x)), y))$

$$g(h(x), y) - 2$$

$$h(h(x)) - 2$$

$$f(g(h(x), y), h((h(x)), y)) - 3$$

$$f^* = f_1^*(f_2^*(\dots), \dots, f_n^*(\dots)) - \text{теория о композиции}$$

$$\text{по } f_i \in S \Leftarrow f_i^x = f_i$$

$$= f_i(f_2(\dots), \dots, f_n(\dots))$$

$$= f \text{ т.е. } f^* = f \Leftarrow f \in S$$