

Лекция 4. Полиномы Жегалкина. Теорема Жегалкина. Быстрый способ построения полинома Жегалкина. Полные системы.

Лектор — Селезнева Светлана Николаевна
selezn@cs.msu.ru

факультет ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова

Лекции на сайте <https://mk.cs.msu.ru>

Монотонные элементарные конъюнкции

Элементарная конъюнкция, не содержащая отрицаний переменных, называется **монотонной** (ЭК), или **мономом**, или **одночленом**.

Например, 1 , x_2 , $x_1x_2x_4$ — монотонные ЭК.

Полиномы Жегалкина

Полиномом (или многочленом) **Жегалкина** длины l , $l \geq 1$, назовем сумму по модулю два l различных монотонных ЭК.

Полиномом (или многочленом) **Жегалкина** длины 0 назовем константу 0.

Другими словами, полиномом Жегалкина называется выражение вида

$$K_1 \oplus \dots \oplus K_l,$$

где K_j — различные монотонные ЭК, $l \geq 1$, или константа 0.

Например, 0, 1, $x_1x_2 \oplus x_1$, $x_2 \oplus x_3 \oplus 1$, $x_1x_2 \oplus x_1 \oplus x_3$ — полиномы Жегалкина.

Считаем, что **два полинома Жегалкина совпадают**, если они отличаются только порядком входящих в них монотонных ЭК.

Каждый полином Жегалкина с переменными x_1, \dots, x_n определяет какую-то функцию $f(x_1, \dots, x_n) \in P_2^{(n)}$.

Полином Жегалкина

Теорема 4.1 (И. И. Жегалкина). *Каждая функция $f(x_1, \dots, x_n) \in P_2$ может быть единственным образом представлена в виде полинома Жегалкина P_f .*

Полином Жегалкина

Доказательство. 1. Существование. Применим полиномиальное разложение функции $f(x_1, \dots, x_n)$ по всем n переменным:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \bigoplus_{\sigma \in E_2^n} x_1^{\sigma_1} \cdot \dots \cdot x_n^{\sigma_n} \cdot f(\sigma).$$

Затем пользуясь тождеством $x^\sigma = x \oplus \sigma \oplus 1$ везде в правой части заменим выражение $x_i^{\sigma_i}$ на выражение $x_i \oplus \sigma_i \oplus 1$.

Далее по правилам коммутативности и ассоциативности $\&$ и \oplus и дистрибутивности вида $x(y \oplus z) = xy \oplus xz$ перемножим все скобки.

После этого приведем подобные слагаемые по правилам $x \oplus x = 0$, $x \oplus 0 = x$.

В итоге получим полином Жегалкина, который представляет исходную функцию f .

Полином Жегалкина

Доказательство. 2. Единственность. Покажем, что число полиномов Жегалкина над переменными x_1, \dots, x_n совпадает с числом функций из $P_2^{(n)}$.

Монотонных элементарных конъюнкций над переменными x_1, \dots, x_n всего найдется 2^n , т. к. каждая переменная x_i , $i = 1, \dots, n$, может либо входить, либо не входить в такую монотонную ЭК.

Далее, **полиномов Жегалкина над переменными x_1, \dots, x_n всего найдется 2^{2^n}** , т. к. каждая из 2^n монотонных ЭК может либо входить, либо не входить в такой полином Жегалкина.

Значит, учитывая п. 1, каждая функция f из $P_2^{(n)}$ может быть представлена **ровно одним** полиномом Жегалкина над переменными x_1, \dots, x_n .



Построение полиномов Жегалкина

По теореме Жегалкина для каждой функции $f \in P_2$ найдется единственный полином Жегалкина, который ее задает.

Если задана функция $f \in P_2$, то как можно построить ее полином Жегалкина?

Рассмотрим несколько способов построения:

- 1) метод из доказательства теоремы;
- 2) метод неопределенных коэффициентов;
- 3) быстрый способ.

Метод из доказательства теоремы

Пример. По методу из доказательства теоремы найдем полином Жегалкина для функции $f(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$:

x_1	x_2	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Найдем **полиномиальное разложение** функции f по всем переменным:

$$f(x_1, x_2) = \bar{x}_1 x_2 \oplus x_1 \bar{x}_2 \oplus x_1 x_2.$$

Метод из доказательства теоремы

Пример (продолжение). Теперь везде заменим выражение \bar{x} на выражение $x \oplus 1$ и выполним преобразования:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) &= \bar{x}_1 x_2 \oplus x_1 \bar{x}_2 \oplus x_1 x_2 = \\ &= (x_1 \oplus 1)x_2 \oplus x_1(x_2 \oplus 1) \oplus x_1 x_2 = \\ &= (x_1 x_2 \oplus x_2) \oplus (x_1 x_2 \oplus x_1) \oplus x_1 x_2 = \\ &= x_1 x_2 \oplus x_1 \oplus x_2. \end{aligned}$$

Получаем полином Жегалкина функции f :

$$f(x_1, x_2) = x_1 x_2 \oplus x_1 \oplus x_2.$$

Метод неопределенных коэффициентов

Пример. Методом неопределенных коэффициентов найдем полином Жегалкина для функции $f(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$:

x_1	x_2	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Запишем ее полином Жегалкина с **неопределенными коэффициентами**:

$$f(x_1, x_2) = c_{1,2}x_1x_2 \oplus c_1x_1 \oplus c_2x_2 \oplus c_0,$$

где $c_{1,2}, c_1, c_2, c_0 \in E_2$ — неизвестные коэффициенты.

Метод неопределенных коэффициентов

Пример (продолжение). Подставляя поочередно все наборы из E_2^2 в левую и правую части полученного равенства, составляем систему линейных уравнений с неизвестными $c_{1,2}, c_1, c_2, c_0$:

$$\begin{cases} f(0, 0) = c_0 = 0, \\ f(0, 1) = c_2 \oplus c_0 = 1, \\ f(1, 0) = c_1 \oplus c_0 = 1, \\ f(1, 1) = c_{1,2} \oplus c_1 \oplus c_2 \oplus c_0 = 1. \end{cases}$$

Решаем полученную систему и находим:

$$c_{1,2} = 1, \quad c_1 = 1, \quad c_2 = 1, \quad c_0 = 0.$$

Получаем полином Жегалкина функции f :

$$f(x_1, x_2) = x_1 x_2 \oplus x_1 \oplus x_2.$$

Полином Жегалкина

Если $f \in P_2^{(n)}$, то ее полином Жегалкина P_f однозначно определяется своими коэффициентами при всех возможных монотонных ЭК над переменными x_1, \dots, x_n .

Монотонные ЭК над x_1, \dots, x_n

Набору $\alpha \in E_2^n$, $n \geq 2$, взаимно однозначно сопоставим монотонную ЭК над переменными x_1, \dots, x_n :

$$x^\alpha = \begin{cases} 1, & \alpha = (0, \dots, 0), \\ \prod_{\alpha_i=1} x_i, & \alpha \neq (0, \dots, 0). \end{cases}$$

Будем говорить, что набор $\alpha \in E_2^n$ и монотонная ЭК x^α соответствуют друг другу.

Монотонные ЭК над x_1, \dots, x_n

Если α пробегает по всем возможным наборам из E_2^n , то x^α перечисляет все возможные монотонные ЭК над x_1, \dots, x_n .

Например, если $n = 2$, то

$$x^\alpha = \begin{cases} 1, & \alpha = (0, 0), \\ x_2, & \alpha = (0, 1), \\ x_1, & \alpha = (1, 0), \\ x_1x_2, & \alpha = (1, 1). \end{cases}$$

Коэффициенты полинома Жегалкина

Пусть $c_f(\alpha)$ обозначает **коэффициент** при мономе x^α , $\alpha \in E_2^n$, в полиноме Жегалкина функции $f \in P_2^{(n)}$.

Тогда

$$f(x_1, \dots, x_n) = \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_f(\alpha) \cdot x^\alpha.$$

Для нахождения полинома Жегалкина функции f нужно найти коэффициенты $c_f(\alpha)$ для всех $\alpha \in E_2^n$.

Вычисление коэффициентов при $n = 1$

Если $f(x) \in P_2^{(1)}$, то

$$\begin{aligned} f(x) &= \bar{x} \cdot f(0) \oplus x \cdot f(1) = (x \oplus 1) \cdot f(0) \oplus x \cdot f(1) = \\ &= x \cdot f(0) \oplus f(0) \oplus x \cdot f(1) = (f(0) \oplus f(1)) \cdot x \oplus f(0). \end{aligned}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} c_f(0) &= f(0), \\ c_f(1) &= f(0) \oplus f(1). \end{aligned}$$

Например, если $f(x) = \bar{x}$, то

$$\begin{aligned} c_f(0) &= f(0) = 1, \\ c_f(1) &= f(0) \oplus f(1) = 1 \oplus 0 = 1. \end{aligned}$$

Поэтому

$$\bar{x} = c_f(1) \cdot x \oplus c_f(0) \cdot 1 = x \oplus 1.$$

Вычисление коэффициентов полинома Жегалкина

Теорема 4.2 (вычисление коэффициентов). Если $n \geq 1$, $f(y, x_1, \dots, x_n) \in P_2^{(n+1)}$, $f_a(x_1, \dots, x_n) = f(a, x_1, \dots, x_n)$, где $a \in E_2$, то для каждого $\alpha \in E_2^n$ верны равенства:

$$\begin{aligned}c_f(0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) &= c_{f_0}(\alpha), \\c_f(1, \alpha_1, \dots, \alpha_n) &= c_{f_0}(\alpha) \oplus c_{f_1}(\alpha).\end{aligned}$$

Вычисление коэффициентов полинома Жегалкина

Доказательство. Применим полиномиальное разложение функции $f(y, x_1, \dots, x_n)$ по переменной y :

$$\begin{aligned} f(y, x_1, \dots, x_n) &= \bar{y} \cdot f(0, x_1, \dots, x_n) \oplus y \cdot f(1, x_1, \dots, x_n) = \\ &= \bar{y} \cdot f_0 \oplus y \cdot f_1 = (y \oplus 1) \cdot f_0 \oplus y \cdot f_1 = \\ &= y \cdot f_0 \oplus f_0 \oplus y \cdot f_1 = y \cdot (f_0 \oplus f_1) \oplus f_0. \end{aligned}$$

Но

$$\begin{aligned} f_0 &= \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_{f_0}(\alpha) \cdot x^\alpha, \\ f_1 &= \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_{f_1}(\alpha) \cdot x^\alpha. \end{aligned}$$

Вычисление коэффициентов полинома Жегалкина

Доказательство. Поэтому:

$$f = y \cdot \left(\bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_{f_0}(\alpha) \cdot x^\alpha \oplus \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_{f_1}(\alpha) \cdot x^\alpha \right) \oplus \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_{f_0}(\alpha) \cdot x^\alpha.$$

Значит,

$$f = \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} (c_{f_0}(\alpha) \oplus c_{f_1}(\alpha)) \cdot y \cdot x^\alpha \oplus \bigoplus_{\alpha \in E_2^n} c_{f_0}(\alpha) \cdot x^\alpha.$$

Перепишем следующим образом:

$$f = \bigoplus_{(1,\alpha) \in E_2^{n+1}} (c_{f_0}(\alpha) \oplus c_{f_1}(\alpha)) \cdot (y^1 \cdot x^\alpha) \oplus \bigoplus_{(0,\alpha) \in E_2^{n+1}} c_{f_0}(\alpha) \cdot (y^0 \cdot x^\alpha).$$

Вычисление коэффициентов полинома Жегалкина

Итак,

$$f = \bigoplus_{(1, \alpha) \in E_2^{n+1}} (c_{f_0}(\alpha) \oplus c_{f_1}(\alpha)) \cdot (y^1 \cdot x^\alpha) \oplus \bigoplus_{(0, \alpha) \in E_2^{n+1}} c_{f_0}(\alpha) \cdot (y^0 \cdot x^\alpha).$$

Из полученного выражения находим:

$$\begin{aligned} c_f(0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) &= c_{f_0}(\alpha), \\ c_f(1, \alpha_1, \dots, \alpha_n) &= c_{f_0}(\alpha) \oplus c_{f_1}(\alpha). \end{aligned}$$

□

Быстрый способ

Пример. Пользуясь формулами предыдущей теоремы, найдем полином Жегалкина функции $f(x_1, x_2, x_3)$:

x_1	x_2	x_3	f
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Быстрый способ

Пример (продолжение). На шаге 1 вычисляем коэффициенты полиномов Жегалкина всех подфункций $f_\sigma(x_3)$, $\sigma \in E_2^2$, функции $f(x_1, x_2, x_3)$ по переменным x_1, x_2 :

x_1	x_2	x_3	f	1
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	1	1
1	1	1	1	0

Быстрый способ

Пример (продолжение). На шаге 2, пользуясь полученными значениями на шаге 1, вычисляем коэффициенты полиномов Жегалкина всех подфункций $f_\delta(x_2, x_3)$, $\delta \in E_2^1$, функции $f(x_1, x_2, x_3)$ по переменной x_1 :

x_1	x_2	x_3	f	1	2
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	0	1

Быстрый способ

Пример (продолжение). Наконец, на шаге 3, пользуясь полученными значениями на шаге 2, вычисляем коэффициенты полиномов Жегалкина функции $f(x_1, x_2, x_3)$:

x_1	x_2	x_3	f	1	2	$3(c_f)$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	1	0	1	0

Быстрый способ

Пример (продолжение).

x_1	x_2	x_3	f	1	2	$3(c_f)$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	1	0	1	0

Получаем:

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_2x_3 \oplus x_1x_3 \oplus x_1x_2.$$

Полная система

Пусть $A \subseteq P_2$. Множество A называется **полной системой**, если **формулами над A можно выразить любую функцию алгебры логики**.

Полнота системы $\{x \cdot y, x \oplus y, 1\}$

Предложение 4.1. Система $A = \{x \cdot y, x \oplus y, 1\}$ является полной.

Доказательство. Рассмотрим произвольную функцию $f \in P_2$.

1. Если $f = 0$, то $f = x \oplus x$.
2. Если $f \neq 0$, то представим f ее полиномом Жегалкина.

□

Литература к лекции

1. Алексеев В. Б. Лекции по дискретной математике. М.: Инфра-М, 2012.
2. Марченков С. С. Основы теории булевых функций. М.: Физматлит, 2014.
3. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М.: Высшая школа, 2001.
4. Гаврилов Г. П., Сапоженко А. А. Задачи и упражнения по дискретной математике. М.: Физматлит, 2004.