

# Алгебра

## Содержание

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Решение уравнений и неравенств.</b>              | <b>2</b>  |
| 1.1 Иррациональные уравнения . . . . .                | 2         |
| 1.2 Иррациональные неравенства . . . . .              | 2         |
| 1.3 Неравенства с модулем . . . . .                   | 2         |
| <b>2 Многочлены</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>3 Множества</b>                                    | <b>4</b>  |
| <b>4 Числовые последовательности</b>                  | <b>4</b>  |
| 4.1 Прогрессии . . . . .                              | 6         |
| <b>5 Эквивалентность и группы</b>                     | <b>7</b>  |
| <b>6 Пределы</b>                                      | <b>8</b>  |
| <b>7 Тригонометрия</b>                                | <b>9</b>  |
| <b>8 Комплексные числа</b>                            | <b>17</b> |
| 8.1 Матрицы поворота . . . . .                        | 18        |
| <b>9 Логарифмы</b>                                    | <b>18</b> |
| 9.5 Показательные уравнения и неравенства . . . . .   | 19        |
| 9.6 Логарифмические уравнения и неравенства . . . . . | 20        |
| <b>10 Линейная алгебра</b>                            | <b>20</b> |
| 10.1 Координаты на плоскости . . . . .                | 20        |
| 10.2 Векторы . . . . .                                | 20        |
| 10.3 Линейные пространства . . . . .                  | 20        |
| 10.4 Матрицы . . . . .                                | 21        |
| 10.4.1 Произведение матриц . . . . .                  | 22        |
| 10.4.2 Определитель . . . . .                         | 23        |
| 10.4.3 Ранг матрицы . . . . .                         | 23        |

# 1 Решение уравнений и неравенств.

## 1.1 Иррациональные уравнения

$$\sqrt{f(x)} = g(x) \iff \begin{cases} f(x) = (g(x))^2 \\ g(x) \geq 0 \end{cases} \quad \sqrt{f(x)} = \sqrt{g(x)} \iff \begin{cases} f(x) = g(x) \\ f(x) \geq 0 \end{cases}$$

## 1.2 Иррациональные неравенства

$$\frac{f(x)}{g(x)} \leq 0 \iff \begin{cases} f(x) \geq 0 \\ g(x) < 0 \\ f(x) \leq 0 \\ g(x) > 0 \end{cases} \quad \sqrt{f(x)} > g(x) \iff \begin{cases} g(x) < 0 \\ f(x) \geq 0 \\ g(x) \geq 0 \\ f(x) > (g(x))^2 \end{cases}$$
$$\sqrt{f(x)} < g(x) \iff \begin{cases} g(x) \geq 0 \\ f(x) \geq 0 \\ f(x) < (g(x))^2 \end{cases} \quad \sqrt{f(x)} > \sqrt{g(x)} \iff \begin{cases} f(x) > g(x) \\ g(x) \geq 0 \end{cases}$$

## 1.3 Неравенства с модулем

$$|f(x)| < a, \quad a > 0 \iff \begin{cases} f(x) > -a \\ f(x) < a \end{cases} \quad |f(x)| > a \iff \begin{cases} f(x) > a \\ f(x) < -a \end{cases}$$

$$\begin{aligned} |f(x)| \leq |g(x)| &\iff (f(x) - g(x)) \cdot (f(x) + g(x)) \leq 0 \\ |f(x)| + |g(x)| &> |f(x) + g(x)| \iff f(x) \cdot g(x) < 0 \\ |f(x)| + |g(x)| &\leq |f(x) + g(x)| \iff f(x) \cdot g(x) \geq 0 \end{aligned}$$

# 2 Многочлены

**Определение 1.** Многочленом от переменной  $x$  над  $K$  называется выражение вида:  $f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ ,  $a_k \in K$  – коэффициент многочлена,  $a_n \neq 0$ .

**Определение 2.** Наибольшее  $k$  такое, что  $a_k \neq 0$ , называется степенью многочлена  $f$ :

$$\begin{aligned} k &= \deg f \\ a_0 &- \text{свободный член} \\ a_n x^n &- \text{старший член} \\ a_n &- \text{старший коэффициент} \end{aligned}$$

**Определение 3.** Два многочлена называются равными, если их коэффициенты при соответственных степенях  $x$  равны.

**Определение 4.**

$$\begin{aligned}f(x) &= a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \\g(x) &= b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_1 x + b_0\end{aligned}$$

Суммой многочленов  $f(x)$  и  $g(x)$  называется:

$$n(x) = (a_n + b_n)x^n + (a_{n-1} + b_{n-1})x^{n-1} + \dots + (a_1 + b_1)x + (a_0 + b_0)$$

Произведением многочленов  $f(x)$  и  $g(x)$  называется:

$$S(x) = d_{2n}x^{2n} + d_{2n-1}x^{2n-1} + \dots + d_1x + d_0, \text{ где } d_k = a_0b_k + a_1b_{k-1} + \dots + a_{k-1}b_1 + a_kb_0 = \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i}$$

**Утверждение 2.1.** Пусть  $\deg f(x) \neq 0$ ,  $\deg g(x) \neq 0$ , тогда:

1.  $\deg(f(x) + g(x)) \leq \max \{\deg f, \deg g\}$
2.  $f(x) \cdot g(x) \neq 0$
3.  $\deg(f(x) \cdot g(x)) = \deg f(x) + \deg g(x)$

*Доказательство.*

1. Пусть  $\deg f = \deg g = n$

$$f(x) + g(x) = (a_n + b_n)x^n + (a_{n-1} + b_{n-1})x^{n-1} + \dots + (a_1 + b_1)x + (a_0 + b_0)$$

Если  $k > n$ , то  $a_k = 0$ ,  $b_k = 0$ , то есть  $(a_k + b_k) = 0$

Пусть  $\deg f = n$ ,  $\deg g = m$ ,  $m < n$

Если  $k > n$ , то  $a_k + b_k = 0$ , так как  $b_{m+1} = b_{m+2} = \dots = b_{n-1} = b_n = 0$

Тогда  $a_n + b_n = a_n \neq 0$

$$2. f(x) \cdot g(x) = a_n b_m x^{n+m} + \underbrace{\dots}_{\substack{\text{степень} < n \\ 0}}$$

**Определение 5.** Многочлен  $f(x)$  делится на многочлен  $g(x)$ , если существует такой многочлен  $h(x)$ , что  $h(x) \cdot g(x) = f(x)$ .

**Утверждение 2.2.** Всякий многочлен  $f(x) \neq 0$  делится на самого себя.

**Утверждение 2.3.** Если  $f(x)$  делится на  $g(x)$ , а  $g(x)$  делится на  $f(x)$ , то  $f(x) = c \cdot g(x)$ ,  $c \in K$ .

**Определение 6.** Число  $x_0$  является корнем  $f(x)$ , если  $f(x_0) = 0$ .

**Теорема 2.4** (Теорема Безу). Остаток от деления многочлена  $P(x)$  на двучлен  $(x - a)$  равен  $P(a)$ .

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}P(x) &= (x - a) \cdot q(x) + r \\P(a) &= 0 \cdot p(x) + r = r\end{aligned}$$

**Следствие 2.4.1.** Число  $a$  является корнем многочлена  $P(x)$  тогда и только тогда, когда  $P(x)$  делится на  $(x - a)$ .

### 3 Множества

**Определение 7.** Множества равномощны, если между ними существует биекция.

**Определение 8.** Множества  $A$  и  $B$  называются равными, если  $A \subseteq B, B \subseteq A$ .

**Определение 9.** Множества, равномощные  $\mathbb{N}$ , называются счетными.

**Определение 10.** Декартовым произведением множеств  $A$  и  $B$  называется множество:

$$A \times B = \{x \mid x = (a, b), a \in A, b \in B\}$$

**Определение 11.** Число  $a$  называется числом кратности  $k$  многочлена  $f(x)$ , если  $f(x)$  делится на  $(x - a)^k$ , но не делится на  $(x - a)^{k+1}$ .

**Определение 12.** Множество  $m$  называется ограниченным, если:

$$\exists c : \forall x \in M \ |x| \leq c$$

**Определение 13.** Пусть  $M \subset \mathbb{R}$ ,  $M$  ограничено. Тогда наименьшая из верхних граней множества  $M$  называется точной верхней гранью (супремумом):

$$a = \sup M \iff \forall x \in M : x \leq a, \forall \varepsilon > 0 \ \exists x \in M : x > a - \varepsilon$$

**Определение 14.** Пусть  $M \subset \mathbb{R}$ ,  $M$  ограничено. Тогда наибольшая из нижних граней множества  $M$  называется точной нижней гранью (инфимумом):

$$a = \inf M \iff \forall x \in M : x \geq a, \forall \varepsilon > 0 \ \exists x \in M : x < a + \varepsilon$$

**Определение 15.** Множество  $M$  называется открытым, если:

$$\forall m \in M \ \exists \varepsilon > 0 : U_\varepsilon(m) \subset M$$

**Определение 16.** Точка  $A$  называется предельной точкой множества  $M$ , если:

$$\forall \varepsilon > 0 \ U_\varepsilon(A) \cap M \text{ бесконечно или } \mathring{U}_\varepsilon(A) \cap M \neq \emptyset$$

**Определение 17.** Множество называется замкнутым, если оно содержит все свои предельные точки.

**Определение 18.** Пусть  $M \subset U_{A_i}$ ,  $A_i$  – открытое множество, тогда  $U_{A_i}$  называется открытыми покрытиями.

**Определение 19.** Говорят, что почти все элементы множества  $M$  удовлетворяют некоторому условию, если этому условию не удовлетворяет конечное число элементов.

### 4 Числовые последовательности

**Определение 20.** Числовой последовательностью  $a_n$  называется отображение  $a : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ .

**Определение 21.** Последовательность  $a_n$  называется ограниченной, если  $a(\mathbb{N})$  ограничено.

**Определение 22.** Последовательность  $a_n$  называется монотонно возрастающей, если:

$$\forall n \in \mathbb{N} : a_{n+1} > a_n$$

**Определение 23.** Последовательность  $a_n$  асимптотически больше  $b_n$ , если:

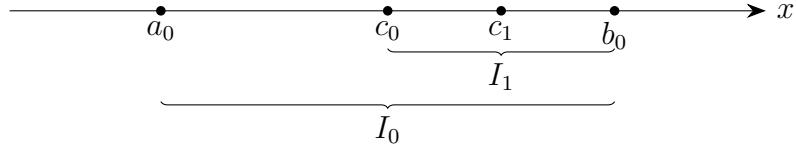
$$a_n > b_n \iff \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N \ a_n \geq b_n$$

**Определение 24.** Точка  $A$  называется частичным пределом последовательности  $a_n$ , если:

$$\forall \varepsilon > 0 \ a^{-1}(U_\varepsilon(A)) \text{ бесконечно}$$

**Теорема 4.1.** Пусть последовательность  $a_n$  ограничена, тогда у неё есть частичный предел.

*Доказательство.* Если  $\exists x_0 : a^{-1}(x_0)$  бесконечно, то доказано. Если  $\exists x_0 : a^{-1}(x_0)$  конечно или пусто, то:



Отметим на числовой прямой  $a_0 = \inf a(\mathbb{N})$  и  $b_0 = \sup a(\mathbb{N})$ , а также середину  $a_0b_0$ , то есть  $c_0 = \frac{a_0 + b_0}{2}$ . Разделим один из получившихся отрезков (отметим  $c_0$  и  $b_0$ , как  $a_1$  и  $b_1$  соответственно) пополам, получив  $c_1 = \frac{a_1 + b_1}{2}$ . Данный процесс можно продолжать, получая следующую конструкцию:

$$[a_0; b_0] \supset [a_1; b_1] \supset \dots \supset [a_n; b_n] \supset \dots$$

Теперь необходимо доказать следующее:

$$\bigcap_{n=0}^{\infty} [a_n; b_n] \neq \emptyset$$

1.  $a_0 \leq a_1 \leq \dots \leq a_n \leq \dots$
2.  $a(\mathbb{N})$  ограничена сверху  $b_i$  элементом
3.  $a(\mathbb{N})$  имеет точную верхнюю грань  $M_1 = \sup a(\mathbb{N})$   
и точную нижнюю грань  $M_2 = \inf a(\mathbb{N})$
4.  $M_1 \leq M_2$
5.  $[M_1; M_2] \subset \bigcap_{n=0}^{\infty} [a_n; b_n]$
6. Пусть  $M_1 < M_2$ , тогда  $\exists n : b_n - a_n < M_2 - M_1$ .  
Получаем противоречие, значит  $M_1 = M_2 = M$ .
7. Возьмем такое  $n$ , что  $b_n - a_n < \varepsilon$ . Тогда  $[a_n; b_n] \subset U_\varepsilon(M)$ .  
То есть  $\forall \varepsilon > 0 : a^{-1}(U_\varepsilon(M))$  бесконечно.

**Теорема 4.2.** Пусть  $M$  – множество частичных пределов последовательности  $a_n$ , тогда:

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup M; \ \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \inf M$$

**Теорема 4.3.** Множество частичных пределов числовой последовательности замкнуто.

**Определение 25.** Пусть даны  $a : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  и  $b : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ , при этом  $b$  монотонна. Тогда  $a \circ b : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  называется подпоследовательностью.

**Утверждение 4.4.** У всякой последовательности есть монотонная подпоследовательность.

**Определение 26.** Число  $A$  называется пределом последовательности  $a_n$ , если:

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$$

**Определение 27.** Число  $A$  называется пределом последовательности  $a_n$ , если  $\forall \varepsilon > 0$  почти все элементы последовательности принадлежат  $U_\varepsilon(A)$ .

**Определение 28.** Число  $A$  называется пределом последовательности  $a_n$ , если:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n > n_0, n \in \mathbb{N} |a_n - A| < \varepsilon$$

## 4.1 Прогрессии

**Определение 29.** Арифметической прогрессией называется числовая последовательность, заданная формулой  $n$ -го члена:

$$a_n = a_1 + (n - 1) \cdot d$$

**Определение 30.** Разностью арифметической прогрессии называется разность  $a_{n+1}$  и  $a_n$ .

**Утверждение 4.5.** Пусть  $(a_n)$  – арифметическая прогрессия, тогда:

$$a_{n+2} - a_{n+1} = a_{n+1} - a_n$$

**Утверждение 4.6.** Пусть  $(a_n)$  – арифметическая прогрессия, тогда:

$$\forall n \in \mathbb{N}, n \geq 2 \quad \forall k \in \mathbb{N}, k < n : a_n = \frac{a_{n+k} + a_{n-k}}{2}$$

**Теорема 4.7.** Сумма первых  $n$  членов арифметической прогрессии равна:

$$S_n = n \cdot \left( a_1 + \frac{(n-1) \cdot d}{2} \right) = n \cdot \frac{a_1 + a_n}{2}$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} S_n &= a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = \\ &= a_1 + (a_1 + d) + (a_1 + 2d) + \dots + (a_1 + (n-1) \cdot d) = \\ &= n \cdot a_1 + d \cdot \left( \frac{(n-1) \cdot n}{2} \right) = \\ &= n \cdot \left( a_1 + \frac{(n-1) \cdot d}{2} \right) = \\ &= n \cdot \frac{a_1 + (a_1 + (n-1) \cdot d)}{2} = \\ &= n \cdot \frac{a_1 + a_n}{2} \end{aligned}$$

■

**Определение 31.** Геометрической прогрессией называется числовая последовательность, заданная формулой  $n$ -го члена:

$$b_n = b_1 \cdot q^{n-1}, b_1 \neq 0, q \neq 0$$

**Утверждение 4.8.** Пусть  $(b_n)$  – геометрическая прогрессия, тогда:

$$\forall n \in \mathbb{N}, n \geq 2 : b_n^2 = b_{n-1} \cdot b_{n+1}$$

*Доказательство.*

$$b_{n-1} \cdot b_{n+1} = b_1 \cdot q^{n-2} \cdot b_1 \cdot q^n = b_1^2 \cdot q^{2n-2} = (b_1 \cdot q^{n-1})^2$$

■

**Теорема 4.9.** Сумма первых  $n$  членов геометрической прогрессии равна:

$$S_n = b_1 \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}, q \neq 1$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} S_n &= b_1 + b_2 + b_3 + \dots + b_n = \\ &= b_1 + b_1 \cdot q + b_1 \cdot q^2 + \dots + b_1 \cdot q^{n-1} = \\ &= b_1 \cdot (1 + q + q^2 + \dots + q^{n-1}) = \\ &= b_1 \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q} \end{aligned}$$

■

## 5 Эквивалентность и группы

**Определение 32.** Пусть  $M$  – множество, тогда множество  $R \subset \{(a, b) \mid a, b \in M\}$  упорядоченных пар элементов  $M$  называется бинарным отношением на  $M$ .

**Определение 33.** Бинарное отношение называется отношением эквивалентности, если оно удовлетворяет свойствам:

1. Рефлексивность  $a \sim a$
2. Симметричность  $a \sim b \iff b \sim a$
3. Транзитивность  $a \sim b, b \sim c \iff a \sim c$

**Теорема 5.1** (Малая теорема Ферма).  $\forall n \in \mathbb{N}, p \in \mathbb{P} : n^{p-1} \equiv_p 1$

**Определение 34.** Бинарной операцией  $\times$  на множестве  $M$  называется отображение из множества упорядоченных пар  $M^2 = \{(a, b) \mid a, b \in M\}$  в множество  $M$ .

**Определение 35.** Пара  $G(M; \times)$ ,  $M$  – множество,  $\times$  – бинарная операция, называется группой, если выполняются свойства:

1.  $\forall a, b \in M : (a \times b) \in M$
2.  $\exists e \in M \ \forall a \in M : e \times a = a$
3.  $\forall a \in M \ \exists a^{-1} \in M : a \times a^{-1} = a^{-1} \times a = e$
4.  $\forall a, b, c \in M : (a \times b) \times c = a \times (b \times c) = (a \times c) \times b$

## 6 Пределы

**Определение 36.**  $A$  называется пределом  $(x_n)$ , если:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N |x_n - A| < \varepsilon$$

**Теорема 6.1.**

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + y_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n) + \lim_{n \rightarrow \infty} (y_n)$$

*Доказательство.* Пусть  $x_n \rightarrow a$ ;  $y_n \rightarrow b$ . По определению  $N_a(\varepsilon) : \forall n > N_a(\varepsilon) |x_n - a| < \varepsilon$ ,  $N_b(\varepsilon) : \forall n > N_b(\varepsilon) |y_n - b| < \varepsilon$ . Рассмотрим  $N_c(\varepsilon) : \forall n > N_c(\varepsilon) |x_n + y_n - a - b| < \varepsilon$ :  $|x_n + y_n - a - b| \leq |x_n - a| + |y_n - b| \leq 2\varepsilon$  при  $N_c = \max(N_a(\varepsilon); N_b(\varepsilon))$ , то есть  $2N_c(\varepsilon)$  – это номер, с которого утверждение точно выполняется. ■

**Теорема 6.2** (Теорема Вейерштрасса). Пусть  $(x_n)$  монотонна, тогда:

1. Она имеет предел в  $\bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty; +\infty\}$
2. Если она ограничена, то она имеет предел в  $\mathbb{R}$

*Доказательство.* Пусть  $(x_n)$  монотонно возрастает. По определению монотонно возрастающей последовательности:  $\forall n : x_{n+1} > x_n$ , пусть  $(x_n)$  не ограничена, то есть  $\nexists m : \forall n x_n < m$ , тогда  $\sup(x_n) = +\infty$ , а значит  $(x_n) \rightarrow \infty$ . Пусть  $\exists m : \forall n x_n \leq m$  и  $m = \sup(x_n)$ . Тогда  $m = \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n)$ . Доказательство для монотонно убывающей последовательности аналогично. ■

**Теорема 6.3.** Пусть  $(x_n)$ ,  $(y_n)$ ,  $(z_n)$  – последовательности, причем  $x_n \leq y_n \leq z_n$ , кроме того  $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n) = a = \lim_{n \rightarrow \infty} (z_n)$ , тогда  $\lim_{n \rightarrow \infty} (y_n) = a$ .

**Лемма 6.4** (Неравенство Бернулли).

$$(1+x)^n \geq 1 + xn, n \in \mathbb{N}, x > 0$$

*Доказательство.* Докажем по индукции:  $(1+x)^1 \geq 1 + 1 \cdot x$  верно, пусть  $(1+x)^n \geq 1 + xn$  верно, тогда:

$$(1+x)^{n+1} = (1+x)(1+x)^n \geq (1+x)(1+xn) = 1 + x + nx + x^2n > 1 + (n+1)x$$

■

**Определение 37.**

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

*Доказательство.* Рассмотрим  $E_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} = \left(\frac{n+1}{n}\right) \cdot e_n$ :

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} \geq 1 + \frac{n+1}{n} > 2 - \text{последовательность ограничена снизу.}$$

$$\frac{E_{n+1}}{E_n} = \frac{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+2}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}} = \frac{\left(\frac{n+2}{n+1}\right)^{n+2}}{\left(\frac{n+1}{n}\right)^{n+1}} = \left(\frac{n+2}{n+1}\right) \cdot \left(\frac{n^2 + 2n}{n^2 + 2n + 1}\right)^{n+1}$$

Рассмотрим  $\left(\frac{n^2 + 2n + 1}{n^2 + 2n}\right)^{n+1}$  и используем неравенство Бернулли:

$$\left(\frac{n^2 + 2n + 1}{n^2 + 2n}\right)^{n+1} = \left(1 + \frac{1}{n^2 + 2n}\right)^{n+1} \geq 1 + \frac{n+1}{n^2 + 2n} = \frac{n^3 + 3n + 1}{n^2 + 2n}$$

То есть  $\left(\frac{n^2 + 2n}{n^2 + 2n + 1}\right)^{n+1} < \frac{n^2 + 2n}{n^3 + 3n + 1}$ , а значит  $E_n$  монотонно возрастает. Тогда по теореме Вейерштрасса  $\exists!$  предел  $E_n$ , а значит  $\exists!$  предел  $e_n$ . ■

## 7 Тригонометрия

**Определение 38.** Синусом угла в прямоугольном треугольнике называется отношение его противолежащего катета к гипотенузе.

**Определение 39.** Косинусом угла в прямоугольном треугольнике называется отношение его прилежащего катета к гипотенузе.

**Определение 40.** Тангенсом угла в прямоугольном треугольнике называется отношение его противолежащего катета к прилежащему или синуса этого угла к его косинусу.

**Определение 41.** Котангенсом угла в прямоугольном треугольнике называется отношение его прилежащего катета к противолежащему или косинуса этого угла к его синусу.

**Утверждение 7.1.**

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

*Доказательство.* По теореме Пифагора в прямоугольном треугольнике с катетами  $a$  и  $b$  и гипотенузой  $c$ :

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = \left(\frac{a}{c}\right)^2 + \left(\frac{b}{c}\right)^2 = \frac{a^2 + b^2}{c^2} = 1$$

**Утверждение 7.2.**

$$\operatorname{tg}^2 \alpha + 1 = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$$

*Доказательство.* Если выражение из утверждения 7.1 разделить на  $\cos^2 \alpha$ , то получим данное выражение. ■

**Утверждение 7.3.**

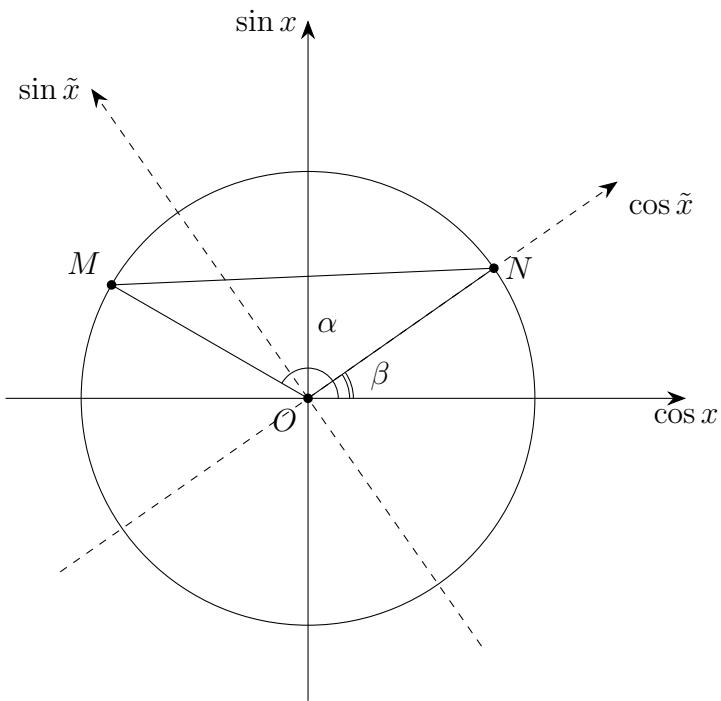
$$\operatorname{ctg}^2 \alpha + 1 = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$$

*Доказательство.* Если выражение из утверждения 7.1 разделить на  $\sin^2 \alpha$ , то получим данное выражение. ■

**Утверждение 7.4.**

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

*Доказательство.*



По теореме Пифагора:

$$MN = \sqrt{(\cos \alpha - \cos \beta)^2 + (\sin \alpha - \sin \beta)^2} = \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2}$$

Введем оси координат, повернутые относительно начальной на угол  $\beta$ , тогда:

$$MN = \sqrt{(\cos(\alpha - \beta) - 1)^2 + \sin^2(\alpha - \beta)} = \sqrt{2 \cdot (1 - \cos(\alpha - \beta))}$$

То есть  $\sqrt{2 \cdot (1 - \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2} = \sqrt{2 \cdot (1 - \cos(\alpha - \beta))}$ , а значит  $\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta$ . ■

### Утверждение 7.5.

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

*Доказательство.*

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha - (-\beta)) = \cos \alpha \cdot \cos(-\beta) + \sin \alpha \cdot \sin(-\beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

■

### Утверждение 7.6.

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \sin \alpha$$

*Доказательство.*

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \cos \frac{\pi}{2} \cdot \cos \alpha + \sin \frac{\pi}{2} \cdot \sin \alpha = \sin \alpha$$

■

### Утверждение 7.7.

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

*Доказательство.*

$$\sin(\alpha + \beta) = \cos\left(\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - \beta\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \cos \beta + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin \beta = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

■

**Утверждение 7.8.**

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

*Доказательство.*

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin(\alpha + (-\beta)) = \sin \alpha \cdot \cos(-\beta) + \cos \alpha \cdot \sin(-\beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

■

**Утверждение 7.9.**

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

Тогда если разделить все на  $\cos \alpha \cdot \cos \beta$ , получим:

$$\frac{\frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} + \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}}{\frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} - \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

■

**Утверждение 7.10.**

$$\operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos(\alpha - \beta)} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

Тогда если разделить все на  $\cos \alpha \cdot \cos \beta$ , получим:

$$\frac{\frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} - \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}}{\frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} + \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

■

**Утверждение 7.11.**

$$\operatorname{ctg}(\alpha + \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta - 1}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{ctg}(\alpha + \beta) = \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta}$$

Тогда если разделить все на  $\sin \alpha \cdot \sin \beta$ , получим:

$$\frac{\frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} - \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}}{\frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} + \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}} = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta - 1}{\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{ctg} \alpha}$$

■

**Утверждение 7.12.**

$$\operatorname{ctg}(\alpha - \beta) = -\frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + 1}{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{ctg}(\alpha - \beta) = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta}$$

Тогда если разделить все на  $\sin \alpha \cdot \sin \beta$ , получим:

$$\frac{\frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} + \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}}{\frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} - \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}} = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + 1}{\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha} = -\frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + 1}{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta}$$

■

**Утверждение 7.13.**

$$\cos(2\alpha) = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1 = 1 - 2 \sin^2 \alpha$$

*Доказательство.*

$$\cos(2\alpha) = \cos(\alpha + \alpha) = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1 = 1 - 2 \sin^2 \alpha$$

■

**Утверждение 7.14.**

$$\sin(2\alpha) = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

*Доказательство.*

$$\sin(2\alpha) = \sin(\alpha + \alpha) = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

■

**Утверждение 7.15.**

$$\operatorname{tg}(2\alpha) = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{tg}(2\alpha) = \operatorname{tg}(\alpha + \alpha) = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

■

**Утверждение 7.16.**

$$\operatorname{ctg}(2\alpha) = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{ctg}(2\alpha) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha - 1}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha} = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$$

■

**Утверждение 7.17.**

$$\cos(3\alpha) = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}\cos(3\alpha) &= \\&= \cos(2\alpha + \alpha) = \\&= \cos(2\alpha) \cdot \cos \alpha - \sin(2\alpha) \cdot \sin \alpha = \\&= (2\cos^2 \alpha - 1) \cdot \cos \alpha - 2\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \\&= 2\cos^3 \alpha - \cos \alpha \cdot (1 + 2\sin^2 \alpha) = \\&= 2\cos^3 \alpha - \cos \alpha \cdot (3 - 2\cos^2 \alpha) = \\&= 4\cos^3 \alpha - 3\cos \alpha\end{aligned}$$

■

**Утверждение 7.18.**

$$\sin(3\alpha) = 3\sin \alpha - 4\sin^3 \alpha$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}\sin(3\alpha) &= \\&= \sin(2\alpha + \alpha) = \\&= \sin(2\alpha) \cdot \cos \alpha + \cos(2\alpha) \cdot \sin \alpha = \\&= 2\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha + (1 - 2\sin^2 \alpha) \cdot \sin \alpha = \\&= \sin \alpha \cdot (2\cos^2 \alpha + 1) - 2\sin^3 \alpha = \\&= \sin \alpha \cdot (3 - 2\sin^2 \alpha) - 2\sin^3 \alpha = \\&= 3\sin \alpha - 4\sin^3 \alpha\end{aligned}$$

■

**Утверждение 7.19.**

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{2}$$

*Доказательство.*

$$\cos(2\alpha) = 2\cos^2 \alpha - 1 \iff \cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{2}$$

■

**Утверждение 7.20.**

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2}$$

*Доказательство.*

$$\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha = 1 - \frac{1 + \cos(2\alpha)}{2} = \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2}$$

■

**Утверждение 7.21.**

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}\cos \alpha + \cos \beta &= \\&= \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2} + \frac{\alpha-\beta}{2}\right) + \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2} - \frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\&= \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) - \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) + \\&\quad + \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\&= 2 \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\end{aligned}$$

■

**Утверждение 7.22.**

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}\cos \alpha + \cos \beta &= \\&= \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2} + \frac{\alpha-\beta}{2}\right) - \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2} - \frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\&= \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) - \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) - \\&\quad - \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) - \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\&= -2 \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\end{aligned}$$

■

**Утверждение 7.23.**

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}\sin \alpha + \sin \beta &= \\&= \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2} + \frac{\alpha-\beta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2} - \frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\&= \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) + \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) + \\&\quad + \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) - \cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right) = \\&= 2 \sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\end{aligned}$$

■

**Утверждение 7.24.**

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned}\sin \alpha - \sin \beta &= \\&= \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} + \frac{\alpha - \beta}{2} \right) - \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} - \frac{\alpha - \beta}{2} \right) = \\&= \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) + \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) + \\&\quad - \sin \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) + \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) = \\&= 2 \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cdot \sin \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right)\end{aligned}$$

■

**Утверждение 7.25.**

$$\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} + \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$$

■

**Утверждение 7.26.**

$$\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} - \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$$

■

**Утверждение 7.27.**

$$\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta + \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

■

**Утверждение 7.28.**

$$\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \beta - \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \alpha \cdot \sin \beta} = \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

■

**Утверждение 7.29.**

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)}{2}$$

*Доказательство.* Пусть  $\tilde{\alpha} = \frac{\alpha + \beta}{2}$ ,  $\tilde{\beta} = \frac{\alpha - \beta}{2}$ , тогда из утверждения 7.21:

$$2 \cos \tilde{\alpha} \cdot \cos \tilde{\beta} = \cos(\tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) + \cos(\tilde{\alpha} - \tilde{\beta}) \iff \cos \tilde{\alpha} \cdot \cos \tilde{\beta} = \frac{\cos(\tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) + \cos(\tilde{\alpha} - \tilde{\beta})}{2}$$

■

**Утверждение 7.30.**

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = -\frac{\cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta)}{2}$$

*Доказательство.* Пусть  $\tilde{\alpha} = \frac{\alpha + \beta}{2}$ ,  $\tilde{\beta} = \frac{\alpha - \beta}{2}$ , тогда из утверждения 7.22:

$$-2 \sin \tilde{\alpha} \cdot \sin \tilde{\beta} = \cos(\tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) - \cos(\tilde{\alpha} - \tilde{\beta}) \iff \sin \tilde{\alpha} \cdot \sin \tilde{\beta} = -\frac{\cos(\tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) - \cos(\tilde{\alpha} - \tilde{\beta})}{2}$$

■

**Утверждение 7.31.**

$$\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)}{2}$$

*Доказательство.* Пусть  $\tilde{\alpha} = \frac{\alpha + \beta}{2}$ ,  $\tilde{\beta} = \frac{\alpha - \beta}{2}$ , тогда из утверждения 7.23:

$$2 \sin \tilde{\alpha} \cdot \sin \tilde{\beta} = \sin(\tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) + \sin(\tilde{\alpha} - \tilde{\beta}) \iff \sin \tilde{\alpha} \cdot \cos \tilde{\beta} = \frac{\sin(\tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) + \sin(\tilde{\alpha} - \tilde{\beta})}{2}$$

■

**Утверждение 7.32.**

$$\sin \alpha + \cos \alpha = \sqrt{2} \cdot \sin \left( \frac{\pi}{4} + \alpha \right)$$

*Доказательство.*

$$\sin \alpha + \cos \alpha = \sqrt{2} \cdot \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin \alpha + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos \alpha \right) = \sqrt{2} \cdot \sin \left( \frac{\pi}{4} + \alpha \right)$$

■

**Утверждение 7.33.**

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{\sin(2\alpha)}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{2 \cos^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{\sin(2\alpha)}$$

■

**Утверждение 7.34.**

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1 - \cos(2\alpha)}{\sin(2\alpha)}$$

*Доказательство.*

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{2 \sin^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{1 - \cos(2\alpha)}{\sin(2\alpha)}$$

■

## 8 Комплексные числа

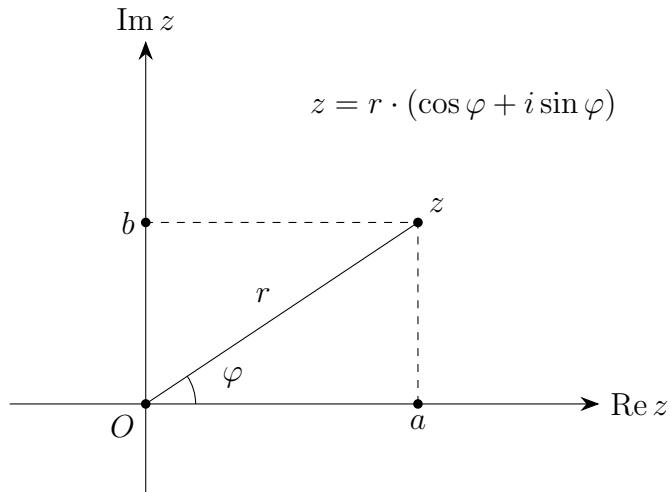
**Определение 42.** Мнимой единицей называется такое число  $i$ , что  $i^2 = -1$ .

**Определение 43.** Комплексным числом называется выражение вида  $z = a + bi$ , где  $a = \operatorname{Re} z$  – действительная часть, а  $b = \operatorname{Im} z$  – мнимая.

**Определение 44.** Число  $z_1$  называется сопряженным к числу  $z$ , если  $\operatorname{Re} z_1 = \operatorname{Re} z$ ;  $\operatorname{Im} z_1 = -\operatorname{Im} z$ . Обозначение:  $z_1 = \bar{z}$ .

**Определение 45.** Модулем  $z \in \mathbb{C}$  называется  $|z| = \sqrt{(\operatorname{Re} z)^2 + (\operatorname{Im} z)^2}$ .

**Определение 46.** Комплексная плоскость:



**Теорема 8.1 (Формула Муавра).**

$$z^n = r^n \cdot (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi))$$

*Доказательство.* Докажем по индукции.  $z = r \cdot (\cos \varphi + i \sin \varphi)$  верно. Пусть  $z^n = r^n \cdot (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi))$  верно, докажем, что  $z^{n+1} = r^{n+1} \cdot (\cos((n+1)\varphi) + i \sin((n+1)\varphi))$  верно.

$$\begin{aligned} z^{n+1} &= z^n \cdot z = r^n \cdot (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi)) \cdot r \cdot (\cos \varphi + i \sin \varphi) = \\ &= r^{n+1} \cdot ((\cos(n\varphi) \cdot \cos \varphi - \sin(n\varphi) \cdot \sin \varphi) + i(\cos(n\varphi) \cdot \sin \varphi + \sin(n\varphi) \cdot \cos \varphi)) = \\ &= r^{n+1} \cdot (\cos((n+1)\varphi) + i \sin((n+1)\varphi)) \end{aligned}$$

■

**Определение 47.** Корнем из комплексного числа называется:

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} \left( \cos \left( \frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi k}{n} \right) + i \sin \left( \frac{\varphi}{n} + \frac{2\pi k}{n} \right) \right), \quad k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$$

## 8.1 Матрицы поворота

**Определение 48.** Матрицей поворота на угол  $\alpha$  называется:

$$R_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} = \cos \alpha \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \sin \alpha \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \cos \alpha \cdot E + \sin \alpha \cdot I$$

**Утверждение 8.2.**

$$z = r \cdot (\cos \varphi + i \sin \varphi) \iff z = r e^{i\varphi}$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} e^x &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \frac{x^i}{i!} \\ \cos x &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \frac{x^{2i}}{(2i)!} \cdot (-1)^i \\ \sin x &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \frac{x^{2i+1}}{(2i+1)!} \cdot (-1)^i \\ e^{ix} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} \cdot i^k = \cos x + i \sin x \end{aligned}$$

## 9 Логарифмы

**Определение 49.** Пусть  $a > 0$ ;  $a \neq 1$ ,  $b > 0$ . Логарифмом  $\log_a b$  числа  $b$  по основанию  $a$  называется такое число  $c$ , что  $a^c = b$ . Из этого, а также свойств степеней следует:

$$\log_a 1 = 0 \quad \log_a a = 1 \quad a^{\log_a b} = b$$

**Утверждение 9.1.**

$$\log_a b + \log_a c = \log_a (bc)$$

*Доказательство.*

$$a^{\log_a b + \log_a c} = a^{\log_a b} \cdot a^{\log_a c} = bc = a^{\log_a (bc)}$$

**Утверждение 9.2.**

$$\log_a b - \log_a c = \log_a \left( \frac{b}{c} \right)$$

*Доказательство.*

$$a^{\log_a b - \log_a c} = \frac{a^{\log_a b}}{a^{\log_a c}} = \frac{b}{c} = a^{\log_a \left( \frac{b}{c} \right)}$$

**Утверждение 9.3.**

$$\log_a (b^k) = k \cdot \log_a b$$

*Доказательство.*

$$a^{\log_a(b^k)} = b^k = (a^{\log_a b})^k = a^{k \cdot \log_a b}$$

■

**Утверждение 9.4.**

$$\log_{a^k} b = \frac{1}{k} \cdot \log_a b$$

*Доказательство.*

$$(a^k)^{\log_{a^k} b} = a^{k \cdot \log_{a^k} b} = b = a^{\log_a b}$$

■

**Следствие 9.4.1.**

$$\log_{a^k} (b^k) = \log_a b$$

**Утверждение 9.5.**

$$\log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a}, \quad \log_c a \neq 0$$

*Доказательство.*

$$\log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a} \iff \log_a b \cdot \log_c a = \log_c b$$

$$c^{\log_c b} = b = a^{\log_a b} = (c^{\log_c a})^{\log_a b} = c^{\log_a b \cdot \log_c a}$$

■

**Утверждение 9.6.**

$$\log_a b = \frac{1}{\log_b a}$$

*Доказательство.*

$$a^{\frac{1}{\log_b a}} = (b^{\log_b a})^{\frac{1}{\log_b a}} = b = a^{\log_a b}$$

■

**Утверждение 9.7.**

$$a^{\log_b c} = c^{\log_b a}$$

*Доказательство.*

$$a^{\log_b c} = a^{\frac{\log_a c}{\log_a b}} = (a^{\log_a c})^{\frac{1}{\log_a b}} = c^{\frac{1}{\log_a b}} = c^{\log_b a}$$

■

**Определение 50.** Натуральным логарифмом  $\ln x$  называется логарифм с основанием  $e$ .

**Определение 51.** Десятичным логарифмом  $\lg x$  называется логарифм с основанием 10.

## 9.5 Показательные уравнения и неравенства

$$a^x = a^{x_0} \iff x = x_0$$

$$a^x = b \iff x = \log_a b$$

$$a^x > a^{x_0} \iff \begin{cases} x > x_0, & \text{если } a > 1 \\ x < x_0, & \text{если } 0 < a < 1 \end{cases}$$

$$a^x > b \iff \begin{cases} x > \log_a b, & \text{если } a > 1 \\ x < \log_a b, & \text{если } 0 < a < 1 \end{cases}$$

## 9.6 Логарифмические уравнения и неравенства

$$\log_a x = b \iff x = a^b$$

$$\log_a x > b \iff \begin{cases} x > a^b, & \text{если } a > 1 \\ x < a^b, & \text{если } 0 < a < 1 \end{cases}$$

$$\log_a f(x) < \log_a g(x) \iff \begin{cases} f(x) < g(x) & a > 1 \\ f(x) > 0 & \\ f(x) > g(x) & 0 < a < 1 \\ g(x) > 0 & \end{cases}$$

# 10 Линейная алгебра

## 10.1 Координаты на плоскости

**Утверждение 10.1.** Пусть даны  $A(x_1; y_1)$  и  $B(x_2; y_2)$ . Тогда середина отрезка  $AB$  будет иметь координаты  $(\frac{x_1+x_2}{2}; \frac{y_1+y_2}{2})$ , а его длина будет равна  $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ .

**Утверждение 10.2.** Пусть  $A(x_0; y_0) \in \omega(O; r)$ ,  $O(a; b)$ , тогда  $(x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 = r^2$ .

**Утверждение 10.3.** Пусть даны  $A(x_1; y_1)$  и  $B(x_2; y_2)$ . Тогда каноническое уравнение прямой, проходящей через  $A$  и  $B$  будет иметь вид:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}$$

**Утверждение 10.4.** Пусть даны точка  $M(x_0; y_0)$  и прямая  $l : ax + by + c = 0$ . Тогда:

$$\rho(M; l) = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

## 10.2 Векторы

**Определение 52.** Направленным отрезком  $\overrightarrow{AB}$  называется отрезок  $AB$ , у которого заданы начало  $A$  и конец  $B$ .

**Определение 53.** Направленные отрезки  $\overrightarrow{AB}$  и  $\overrightarrow{CD}$  называются коллинеарными, если  $AB \parallel CD$ .

**Определение 54.** Направленные отрезки  $\overrightarrow{AB}$  и  $\overrightarrow{CD}$  называются конгруэнтными, если они коллинеарны,  $B$  и  $D$  лежат в одной плоскости относительно  $AC$  и их длины равны.

**Определение 55.** Пусть  $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n$  – векторы в  $\mathbb{R}^n$ . Они называются линейно зависимыми, если  $\exists a_1, \dots, a_n$ , не равные одновременно нулю, что  $a_1\vec{r}_1 + \dots + a_n\vec{r}_n = 0$ .

**Определение 56.** Пусть  $X$  – множество, рассмотрим  $X \times X = \{(x; y) \mid x, y \in X\}$ . Тогда  $\rho \subset X \times X$  – бинарное отношение.

**Определение 57.** Бинарное отношение  $\sim \subset X \times X$  называется отношением эквивалентности на множестве  $X$ , если  $\forall x, y, z \in X : x \sim x; x \sim y \iff y \sim x; x \sim y, y \sim z \iff x \sim z$ .

## 10.3 Линейные пространства

**Определение 58.** Элементами поля  $F$  являются скаляры или векторы.  $L$  называется линейным пространством над полем  $F$ , если  $\forall a, b \in L; \forall \lambda, \mu \in F$ :

- |                                              |                                             |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1. $a + b = b + a$                           | 5. $\lambda(\mu a) = (\lambda\mu)a$         |
| 2. $(a + b) + c = a + (b + c)$               | 6. $(\lambda + \mu)a = \lambda a + \mu a$   |
| 3. $\exists \vec{0} \in L : a + \vec{0} = a$ | 7. $\lambda(a + b) = \lambda a + \lambda b$ |
| 4. $\forall a \exists b : a + b = \vec{0}$   | 8. $1 \cdot a = a$                          |

**Определение 59.** Пусть  $L$  – линейное пространство над полем  $F$ ;  $u_1, \dots, u_n \in L$ ;  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in F$ , тогда  $\alpha_1 u_1 + \dots + \alpha_n u_n$  – линейная комбинация. Линейная комбинация называется тривиальной, если  $\forall i : \alpha_i = 0$ .

**Определение 60.** Пусть  $U \subset L$ , множество векторов  $\langle U \rangle$ , которые не выражаются через элементы  $U$  называется линейной оболочкой.

**Определение 61.** Пусть  $\{x_1, \dots, x_n\}$  – система векторов. Она называется линейно зависимой, если существует нетривиальная линейная комбинация, равная нулю.

**Теорема 10.5.** Система векторов является линейно зависимой тогда и только тогда, когда один из векторов является линейной комбинацией других.

**Определение 62.** Система  $U = \{u_1, \dots, u_n\}$  линейно независимых векторов линейного пространства  $L$  называется базисом, если  $\langle U \rangle = L$ .

**Определение 63.** Скалярным произведением векторов  $\vec{a} \neq \vec{0}$  и  $\vec{b} \neq \vec{0}$  называется величина  $|\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos \angle(\vec{a}; \vec{b})$ . Если  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  сонаправлены, то угол между ними равен нулю, а если коллинеарны, но не сонаправлены –  $\pi$ :

- |                                                                                                     |                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}$                                                  | 3. $\vec{a} \cdot (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{a} \cdot \vec{c}$       |
| 2. $k \cdot (\vec{a}; \vec{b}) = (k \cdot \vec{a}) \cdot \vec{b} = \vec{a} \cdot (k \cdot \vec{b})$ | 4. $\vec{a} \cdot \vec{b} = \frac{1}{2} ( \vec{a} + \vec{b} ^2 -  \vec{a} ^2 -  \vec{b} ^2)$ |

## 10.4 Матрицы

**Определение 64.** Квадратной матрицей называется матрица, у которой число строк равно числу столбцов.

**Определение 65.** Квадратная матрица называется верхней треугольной, если  $\forall i, j; i > j : a_{ij} = 0$ .

**Определение 66.** Квадратная матрица называется нижней треугольной, если  $\forall i, j; i < j : a_{ij} = 0$ .

**Определение 67.** Квадратная матрица называется диагональной, если  $\forall i, j; i \neq j : a_{ij} = 0$ . Обозначение:  $\text{diag}(a_{11}, \dots, a_{nn})$ .

**Определение 68.** Диагональная матрица порядка  $n$ , у которой все диагональные элементы равны 1, называется единичной. Обозначение:  $E$  или  $E_n$ . Элементы единичной матрицы обозначаются  $\delta_{ij}$ :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j \\ 0 & \text{при } i \neq j \end{cases}$$

**Определение 69.** Квадратная матрица  $A$  называется скалярной, если  $A = \text{diag}(\lambda, \dots, \lambda)$ .

**Определение 70.** Сумма диагональных элементов матрицы  $A$  называется её шпуром или следом. Обозначение:  $\text{Sp } A$  или  $\text{tr } A$ .

**Определение 71.** Матрица  $B$  называется транспонированной по отношению к матрице  $A$ , если  $\forall i, j : b_{ij} = a_{ji}$ . Обозначение:  $B = A^T$ .

**Определение 72.** Квадратная матрица  $A$  называется симметрической, если  $A^T = A$ .

**Определение 73.** Квадратная матрица  $A$  называется кососимметрической, если  $A^T = -A$ .

**Определение 74.** Матрица  $B$  называется комплексно сопряжённой по отношению к матрице  $A$ , если  $\forall i, j : b_{ij} = \overline{a_{ji}}$ . Обозначение:  $B = \overline{A}$ .

**Определение 75.** Матрица  $B$  называется эрмитово сопряжённой по отношению к матрице  $A$ , если  $\forall i, j : b_{ij} = \overline{a_{ji}}$ . Обозначение:  $B = A^*$ .

**Определение 76.** Квадратная матрица  $A$  называется эрмитовой, если  $A^* = A$ .

**Определение 77.** Квадратная матрица  $A$  называется косоэрмитовой, если  $A^* = -A$ .

**Определение 78.** Матрица называется нулевой, если все её элементы равны нулю. Обозначение:  $A = O$ .

**Определение 79.** Матрица называется неотрицательной, если  $\forall i, j : a_{ij} \geq 0$ .

**Определение 80.** Матрица называется стохастической, если:

$$\forall i, j : a_{ij} \geq 0; \forall i \in \{1, \dots, n\} : \sum_{k=1}^n a_{ik} = 1$$

#### 10.4.1 Произведение матриц

**Определение 81.** Пусть даны матрица  $A$  размера  $m \times n$  и матрица  $B$  размера  $n \times k$ . Их произведением будет матрица размера  $m \times k$ , в которой:

$$c_{ij} = \sum_{l=1}^n a_{il} \cdot b_{lj}$$

**Утверждение 10.6.** Произведение верхних треугольных матриц является верхней треугольной матрицей.

**Определение 82.** Пусть  $A$  – квадратная матрица порядка  $n$ . Матрица  $B$  называется обратной к  $A$ , если  $A \cdot B = B \cdot A = E$ . Обозначение:  $B = A^{-1}$ .

**Определение 83.** Квадратная матрица  $A$  называется ортогональной, если  $A^T = A^{-1}$ .

**Определение 84.** Квадратная матрица  $A$  называется унитарной, если  $A^* = A^{-1}$ .

**Определение 85.** Матрица  $A$  называется нильпотентной, если  $A^k = O$ ,  $k \in \mathbb{N}$ . Наименьшее из таких  $k$  называется показателем нильпотентности матрицы  $A$ .

**Определение 86.** Матрица  $A$  называется периодической, если  $A^k = E$ ,  $k \in \mathbb{N}$ . Наименьшее из таких  $k$  называется периодом матрицы  $A$ .

### 10.4.2 Определитель

**Определение 87.** Пусть дана перестановка  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_n \end{pmatrix}$ . Инверсией называется число таких пар  $(i; j)$ , что  $i > j$ ;  $\alpha_i < \alpha_j$ .

**Определение 88.** Пусть дана квадратная матрица  $A$  порядка  $n$ . Если  $\alpha_i$  – перестановка чисел от 1 до  $n$ , а  $N(\alpha_i)$  – число инверсия в  $\alpha_i$  перестановке, то определителем матрицы  $A$  называется:

$$\det A = \sum_{\alpha_i} (-1)^{N(\alpha_i)} \cdot a_{1\alpha_1} \cdot a_{2\alpha_2} \cdots a_{n\alpha_n}$$

**Теорема 10.7.** Пусть дана квадратная матрица  $A$ ,  $M_{ji}$  – дополнительный минор элемента  $a_{ji}$ . Элементы её обратной матрицы можно вычислить по формуле:

$$b_{ij} = \frac{(-1)^{i+j} \cdot M_{ji}}{\det A}$$

**Определение 89.** Квадратная матрица  $A$  называется вырожденной, если  $\det A = 0$ .

**Определение 90.** Квадратная матрица  $A$  называется невырожденной, если  $\det A \neq 0$ .

**Определение 91.** Квадратная матрица  $A$  называется унимодулярной, если  $|\det A| = 1$ ,  $a_{ij} \in \mathbb{Z}$ .

**Определение 92.** Квадратная матрица  $A$  называется матрицей перестановки, если она получена из  $E$  перестановкой строк.

**Определение 93.** Квадратная матрица  $A$  называется элементарной, если она получена из  $E$  элементарным преобразованием.

### 10.4.3 Ранг матрицы

**Определение 94.** Рангом матрицы называется наибольший порядок из всех порядков её ненулевых миноров.

**Теорема 10.8** (О базисном миноре). Пусть  $M_r$  – базисный минор матрицы  $A$ , строки соответствующей матрицы – базисные строки, а столбцы – базисные столбцы. Тогда:

- |                                         |                                                                                        |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Базисные строки линейно независимы.  | 3. Любая строка (столбец) матрицы $A$ – линейная комбинация базисных строк (столбцов). |
| 2. Базисные столбцы линейно независимы. |                                                                                        |

*Доказательство.* Пункты 1 и 2 следуют из определения базиса. Без ограничения общности пусть базисный минор находится в левом верхнем углу матрицы  $A$ , то есть матрица имеет вид:

$$\left( \begin{array}{cccccc} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} & \cdots & \mathbf{a}_{1r} & a_{1(r+1)} & \cdots & a_{1n} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} & \cdots & \mathbf{a}_{2r} & a_{2(r+1)} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_{r1} & \mathbf{a}_{r2} & \cdots & \mathbf{a}_{rr} & a_{r(r+1)} & \cdots & a_{rn} \\ a_{(r+1)1} & a_{(r+1)2} & \cdots & a_{(r+1)r} & a_{(r+1)(r+1)} & \cdots & a_{(r+1)n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mr} & a_{m(r+1)} & \cdots & a_{mn} \end{array} \right)$$

Если расширить базисный минор до  $r + 1$  строки и  $r + 1$  столбца, при этом все его строки и столбцы останутся линейно независимыми, тогда  $\text{rank } A = r + 1$ , но по условию  $\text{rank } A = r$ , противоречие. ■

**Теорема 10.9** (Кронекер-Капелли). Система линейных алгебраических уравнений  $A \cdot \vec{x} = \vec{b}$  совместна тогда и только тогда, когда  $\text{rank } A = \text{rank } (A | \vec{b})$ .

*Доказательство.* Пусть система совместна, тогда:

$$b_i = \sum_j a_{ji}x_j; \quad \vec{b} = \sum_j \vec{a}_j x_j$$

То есть,  $\vec{b}$  выражается через  $\vec{a}_i$ , а значит  $\text{rank } A = \text{rank } (A | \vec{b})$ . Пусть  $\text{rank } A = \text{rank } (A | \vec{b})$ . Тогда по теореме о базисном миноре она совместна. ■

**Теорема 10.10** (Правило Крамера). Пусть дана система из  $n$  линейных уравнений с  $n$  неизвестным вида  $A \cdot \vec{x} = \vec{b}$ :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

Тогда если  $\Delta$  – определитель матрицы  $A$ , то  $x_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$ , где  $\Delta_i$  – определитель матрицы  $A$ , в которой  $i$ -й столбец заменили на вектор свободных членов:

$$x_i = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1(i-1)} & b_1 & a_{1(i+1)} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2(i-1)} & b_2 & a_{2(i+1)} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(n-1)1} & \dots & a_{(n-1)(i-1)} & b_{(n-1)} & a_{(n-1)(i+1)} & \dots & a_{(n-1)n} \\ a_{n1} & \dots & a_{n(i-1)} & b_n & a_{n(i+1)} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

Если  $\Delta = 0$ , то система имеет бесконечно много решений или несовместна.

**Теорема 10.11** (Конечномерная альтернатива Фредгольма). Пусть дана система из  $m$  линейных уравнений с  $n$  неизвестными вида  $A \cdot \vec{x} = \vec{b}$ :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

Тогда выполняется одно из двух условий:

1. Система имеет 1 решение для любого  $\vec{b}$  и соответствующая однородная система уравнений имеет только тривиальное решение.
2. Соответствующая однородная система уравнений имеет нетривиальное решение, тогда  $\exists \vec{b} : A \cdot \vec{x} = \vec{b}$  не имеет решений.

*Доказательство.*

1. Пусть  $\det A \neq 0$ . Тогда все столбцы  $A$  называются векторами  $n$ -мерного пространства, при этом они линейно независимы, то есть они образуют в этом пространстве базис. Тогда  $\vec{b} = x_1 \vec{a}_1 + x_2 \vec{a}_2 + \dots + x_n \vec{a}_n$ ; любой вектор этого пространства выражается единственным образом через линейную комбинацию базисных векторов. Система имеет единственное решение. Поскольку векторы  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$  линейно независимы, то нулю может равняться только их тривиальная комбинация.

2. Пусть  $\det A = 0$ . Векторы  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$  – линейно зависимы, поэтому существует их нетривиальная линейная комбинация, равная нулю.  $\dim\langle\vec{a}_i\rangle = k < n$ . Пусть при любом  $\vec{b}$  система имеет решение. Тогда любой  $\vec{b}$  выражается через линейную комбинацию  $\vec{a}_i$ , то есть  $\{\vec{a}_i\}$  – базис в  $n$ -мерном пространстве. Противоречие.

■