

# Алгебра

Лектор: Жуков Игорь Борисович

# Содержание

1	Делимость . . . . .	1
2	Отношение эквивалентности и разбиение на классы . . . . .	1
3	Сравнение по модулю . . . . .	2
4	Кольцо классов вычетов . . . . .	3
5	Наибольший общий делитель . . . . .	5
6	Взаимно простые числа . . . . .	7
7	Линейные диофантовы уравнения . . . . .	8
8	Простые числа . . . . .	8
9	Основная теорема арифметики . . . . .	9
10	Китайская теорема об остатках . . . . .	11
11	Функция Эйлера . . . . .	12
<b>1</b>	<b>Комплексные числа</b>	<b>16</b>
1	Построение поля комплексных чисел . . . . .	16
2	Тригонометрическая форма комплексного числа . . . . .	18
3	Корни из комплексных чисел . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Многочлены</b>	<b>25</b>
1	Многочлены и формальные степенные ряды . . . . .	25
2	Свойства степени . . . . .	26
3	Деление с остатком . . . . .	27
4	Гомоморфизм подстановки . . . . .	28
5	Евклидовы области . . . . .	31
6	Факториальность области главных идеалов . . . . .	34
7	Кратные корни и производные . . . . .	36
8	Формула Тейлора . . . . .	39
9	Алгебраически замкнутые поля. Каноническое разложение над $\mathbb{C}$ и над $\mathbb{R}$ . . . . .	40

## 1 Делимость

**Определение 1.1.**  $a, b \in \mathbb{Z}, a \mid b \iff \exists c \in \mathbb{Z} : b = ac$

**Свойства.**

1.  $a \mid a$  — рефлексивность
2.  $a \mid b, b \mid c \implies \exists c \in \mathbb{Z} : b = ac$  — транзитивность
3.  $a \mid b, k \in \mathbb{Z} \implies ka \mid kb$
4.  $a \mid b_1, a \mid b_2 \implies a \mid (b_1 \pm b_2)$
5.  $\pm 1 \mid a$
6.  $\begin{cases} ka \mid kb \\ k \neq 0 \end{cases} \implies a \mid b$

**Определение 1.2.**  $a, b$  называются *ассоциированными*, если  $a \mid b$  и  $b \mid a$ . Иногда такое отношение обозначают  $a \sim b$ :

$$a \sim b \iff a \mid b \wedge b \mid a$$

**Свойства.**

1. Пусть  $a \sim a', b \sim b'$ . Тогда  $a \mid b \iff a' \mid b'$ .

## 2 Отношение эквивалентности и разбиение на классы

**Определение 2.1.** Отношение эквивалентности — бинарное отношение, удовлетворяющее следующим свойствам: рефлексивность, симметричность, транзитивность.

**Определение 2.2.** Разбиение на классы множества  $M$  — это представление  $M$  в виде  $M = \bigcup_{i \in I} M_i$ , где  $M_i$  — классы,  $I$  — индексное множество,  $M_i \cap M_j = \emptyset$  при  $i \neq j$ .

**Теорема 2.1.** Пусть  $M = \bigcup_{i \in I} M_i$  — разбиение на классы. Введем отношение  $\sim$  над  $M$  так, что  $a \sim b \iff \exists i \in I, a, b \in M_i$ . Тогда  $\sim$  — отношение эквивалентности.

**Доказательство.**

Рефлексивность и симметричность очевидны. Докажем транзитивность.

$$a \sim b, b \sim c \implies \exists i, j \begin{cases} a, b \in M_i \\ b, c \in M_j \end{cases}$$

Тогда  $b \in M_i \cap M_j$ , но так как  $M_i \cap M_j \neq \emptyset$  при неравных  $i$  и  $j$ ,  $i = j$ . Значит  $a, b, c \in M_i$ .

**Теорема 2.2.** Пусть  $\sim$  — отношение эквивалентности на  $M$ . Значит существует разбиение на классы  $M = \bigcup_{i \in I} M_i$  такое, что  $\forall a, b \in M : a \sim b \iff \exists i : a, b \in M_i$ .

**Доказательство.**

Рассмотрим  $a \in M$ . Назовем классом элемента  $a$  множество

$$[a] = \{b \in M \mid a \sim b\}.$$

Докажем, что для любых элементов  $a$  и  $b$ , либо  $[a] = [b]$ , либо  $[a] \cap [b] = \emptyset$ .

Пусть  $[a] \cap [b] \neq \emptyset$ . Тогда

$$\exists x \in [a] \cap [b] \implies \begin{cases} x \in [a] \\ x \in [b] \end{cases} \xrightarrow{\text{опр. класса}} \begin{cases} x \sim a \\ x \sim b \end{cases} \xrightarrow{\text{транзитивность } \sim} a \sim b.$$

$$(\forall c \in [a] \ c \sim a \xrightarrow{a \sim b} c \sim b \implies c \in [b]) \implies [a] \subset [b] \quad (1)$$

$$(\forall c \in [b] \ c \sim b \xrightarrow{a \sim b} c \sim a \implies c \in [a]) \implies [b] \subset [a] \quad (2)$$

Из (1) и (2) получаем  $[a] = [b]$ .

Тогда искомое разбиение можно построить как

$$X = \{[a] \mid a \in M\}.$$

Действительно  $\forall a \in M$ , так как  $a \in [a]$ , то  $M = \bigcup_{a \in I} M_i$ , а так как различные классы не пересекаются (доказано выше)  $\forall a, b \ [a] \neq [b]$ .

**Определение 2.3.** Построенное множество  $X$  называют *фактор-множеством* множества  $M$  по отношению эквивалентности  $\sim$ , обозначение:  $M/\sim$ .

**Пример.**  $\mathbb{Z}/\sim = \{[z] \mid z \in \mathbb{Z}\} = \{[0], [1], [2], \dots\}$

### 3 Сравнение по модулю

**Определение 3.1.**  $\exists a, b, m \in \mathbb{Z}$ . Говорят, что  $m \mid (a - b)$ .

**Свойства.**

1.  $\equiv_m$  — рефлексивно
2.  $\equiv_m$  — симметрично
3.  $\equiv_m$  — транзитивно
4.  $a \equiv_m b, d \mid m \implies a^d \equiv_m b$
5.  $a \equiv_m b, k \in \mathbb{Z} \implies ka \equiv_{km} kb$
6.  $a \equiv_m b, k \in \mathbb{Z} \implies ka \equiv_m kb$
7.  $a_1 \equiv_m b_1, a_2 \equiv_m b_2 \implies a_1 \pm a_2 \equiv_m b_1 \pm b_2$
8.  $a_1 \equiv_m b_1, a_2 \equiv_m b_2 \implies a_1 a_2 \equiv_m b_1 b_2$

## 4 Кольцо классов вычетов

**Определение 4.1.** Множество классов вычетов по модулю  $m$  — это множество всех вычетов по модулю  $m$ .

Обозначается как  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \iff \mathbb{Z}/m \iff \mathbb{Z}/\equiv_m$

**Теорема 4.1.**  $\exists m \in \mathbb{N}$ . Тогда

1.  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{m-1}\}$
2.  $|\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}| = m$

**Доказательство.**

1.  $a \in \mathbb{Z} (!)\bar{a} = \bar{r}, \quad 0 \leq r < m$

а)  $a \geq 0, \exists r$  — наименьшее число, такое что  $r \geq 0, \quad a \equiv_m r$

$r \geq m \implies r - m \equiv_m a, \quad r - m \geq 0, \quad r - m < r$ . Противоречие с выбором  $r$ .

Значит  $r < m$ , то есть  $r$  — искомое.

б)  $a < 0, \quad a' = a \pm (-a)m = a(1 - m) \geq 0$

$\bar{a} = \bar{a'} = \bar{r}, \quad 0 \leq r < m$

2. предположим  $\bar{r} = \bar{r'}, \quad 0 \leq r, r' < m$ .

$$|r' - r| < m \implies m \mid (r - r') \implies r' - r = 0$$

**Следствие.** Теорема о делении с остатком —  $\exists a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N} \implies \exists !q, r \in \mathbb{Z}$

1.  $a = bq + r, \quad 0 \leq r < b$
2.  $0 \leq r < b$

**Доказательство.**

Существование:

В  $\mathbb{Z}/b\mathbb{Z}$  рассмотрим  $\bar{a} \in \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{b-1}\}$ , тогда если  $\bar{a} = \bar{r}, \quad 0 \leq r < b$

$$a \equiv_b r \iff a = bq + r, \quad q \in \mathbb{Z}$$

Единственность:

$$\exists a = bq + r = bq' + r', \quad 0 \leq r, r' < b \iff \overline{bq + r} = \overline{bq' + r'} \iff \bar{r} = \bar{r'} \iff r = r' \implies bq = bq' \implies q = q'$$

**Определение 4.2.**  $q$  — неполное частное при делении  $a$  на  $b$ ,  $r$  — остаток при делении  $a$  на  $b$

**Определение 4.3.** Операция на множестве  $M$  — бинарная операция  $M \times M \rightarrow M$

На  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  определим операцию сложения и умножения по модулю  $m$ :

- $\bar{a} + \bar{b} = \overline{a + b}$
- $\bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{a \cdot b}$

$$(!) \quad \bar{a} = \overline{a'}, \quad \bar{b} = \overline{b'} \implies \overline{a+b} = \overline{a'+b'}, \quad \overline{a \cdot b} = \overline{a' \cdot b'}$$

$$\bar{a} = \overline{a'}, \quad \bar{b} = \overline{b'} \implies a \equiv_m a', \quad \implies b \equiv_m b' \implies a+b \equiv_m a'+b', \quad a \cdot b \equiv_m a' \cdot b' \implies$$

$$\overline{a+b} = \overline{a'+b'}, \quad \overline{a \cdot b} = \overline{a' \cdot b'}$$

**Пример.**  $m = 4, \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}$

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{0}$
$\bar{2}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{3}$	$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$

$\cdot$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$
$\bar{1}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$
$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{2}$
$\bar{3}$	$\bar{0}$	$\bar{3}$	$\bar{2}$	$\bar{1}$

**Определение 4.4.**  $e \in M$  — нейтральный элемент относительно операции (\*) на  $M$ , если  $\forall a \in M$  справедливо  $a * e = e * a = a$

**Предложение 4.1.** Операции сложения и умножения на  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  обладают следующими свойствами:

1.  $A + B = B + A$  — коммутативность сложения
2.  $(A + B) + C = A + (B + C)$  — ассоциативность сложения
3.  $A + \bar{0} = A$  — существование нейтрального элемента относительно сложения
4.  $A + A' = \bar{0}$  — существование обратного элемента относительно сложения
5.  $AB = BA$  — коммутативность умножения
6.  $(AB)C = A(BC)$  — ассоциативность умножения
7.  $A \cdot \bar{1} = A$  — существование нейтрального элемента относительно умножения
8.  $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$  — дистрибутивность умножения относительно сложения.
9.  $(B + C) \cdot A = B \cdot A + C \cdot A$  — дистрибутивность сложения относительно умножения.

**Определение 4.5.** Кольцом называется множество  $M$  с операциями сложения и умножения, для которых выполнены аналоги свойств 1-4 и 8-9.

**Определение 4.6.** Кольцо коммутативное, если выполнены свойство 5.

**Определение 4.7.** Кольцо ассоциативное, если выполнено свойство 6.

**Определение 4.8.** Кольцо с единицей, если выполнено свойство 7.

**Определение 4.9.**  $\forall x \in \mathbb{R} \quad \exists y \in \mathbb{R} : x + y = n \implies n$  — нейтральный элемент относительно сложения.

**Замечание.** Если (\*) — операция на  $M$ , то существует единственный нейтральный элемент относительно (\*).

**Доказательство.**  $e, e'$  — нейтральные элементы относительно  $(*)$ , тогда  $e = e * e' = e'$ .

**Предложение 4.2.** В нашем курсе все кольца будут ассоциативные с единицей.

**Лемма 4.1.** В любом кольце  $0 \cdot a = 0$ .

**Доказательство.**

$$0 + 0 = 0 \implies (0 + 0) \cdot a = 0 \cdot a \implies 0 \cdot a + 0 \cdot a = 0 \cdot a$$

$$\exists 0 \cdot A \neq 0 \implies \exists b : b + 0 \cdot A = 0$$

$$0 = b + 0 \cdot a = b + (0 \cdot a + 0 \cdot a) = (b + 0 \cdot a) + (0 \cdot a) = 0 + (0 \cdot a) = (0 \cdot a)$$

**Определение 4.10.**  $A^*$  — множество обратимых элементов  $A$ .

**Примеры.** •  $\mathbb{R}^* = \mathbb{R} \setminus \{0\}$

$$\bullet \mathbb{Z}^* = \{-1, 1\}$$

$$\bullet (\mathbb{Z}/4\mathbb{Z})^* = \{\bar{1}, \bar{3}\}$$

$$\bullet (\mathbb{Z}/5\mathbb{Z})^* = \{\bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}\}$$

**Определение 4.11.** Полем называется коммутативное кольцо  $F$ , такое что  $F^* = F \setminus \{0\}$ .

## 5 Наибольший общий делитель

**Определение 5.1.**  $R$  — коммутативное кольцо,  $a, b \in R$ .

Элемент  $d$  называется наибольшим общим делителем, если:

1.  $d \mid a, d \mid b$
2.  $d' \mid a, d' \mid b \implies d' \mid d$

**Предложение 5.1.**

1.  $d_1, d_2$  — наибольшие общие делители, тогда  $d_1, d_2$  — ассоциированы.
2.  $\exists d_1$  — наибольший общий делитель,  $d_2$  ассоциирован с  $d_1$ , тогда  $d_2$  — тоже наибольший общий делитель.

**Доказательство.**

1. По свойству 2.  $d_1 \mid d_2, d_2 \mid d_1 \implies d_1, d_2$  — ассоциированы.
2.  $d_2 \mid d_1, d_1 \mid a, d_1 \mid b \implies d_2 \mid a, d_2 \mid b$

Пусть  $d_2$  не наибольший, тогда  $\exists d' > d_2$ .

$$d' \mid a, d' \mid b \implies d' \mid d_1$$

$$d' \mid d_1, d_1 \mid d_2 \implies d' \mid d_2$$

Противоречие

**Предложение 5.2.**  $\exists a, b \in \mathbb{Z} \implies$

1.  $\exists d \in \mathbb{Z} : a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$
2. при этом  $d$  — наибольший общий делитель  $a, b$ .

**Доказательство.**

1.  $I = a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$ , заметим что  $0 \in I$ , так как  $0a + 0b = 0$ .

$$I = \{0\} \implies I = 0\mathbb{Z}$$

$$I \neq \{0\} \implies c \in I \implies -c \in I, \text{ так как } -(ax + by) = a \cdot -x + b \cdot -y$$

То есть в  $I$  есть положительные числа.

$$d = \min\{c \mid c \in I, c > 0\}, \text{ докажем что } a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z} = d\mathbb{Z}$$

" $\subset$ ":

$$d \in I \implies d = ax_0 + by_0, \quad x_0, y_0 \in \mathbb{Z} \implies$$

$$\forall z \in \mathbb{Z} : dz = a(x_0z) + b(y_0z) \in I$$

" $\supset$ ":

$$\exists c \in I, d \in \mathbb{N} \implies \exists q, r \in \mathbb{Z} : c = dq + r, \quad 0 \leq r < d$$

$$c = ax_1 + by_1, \quad x_1, y_1 \in \mathbb{Z}$$

$$d = ax_0 + by_0, \quad x_0, y_0 \in \mathbb{Z}$$

$$r = c - dq = a(x_1 - x_0q) + b(y_1 - y_0q) \in I$$

$$\text{Но } r < d \xrightarrow{\text{defn}(d)} r = 0 \implies c \in d\mathbb{Z}$$

2.  $a = a1 + b0 \in I = d\mathbb{Z} \implies d \mid a$

$$b = a0 + b1 \in I = d\mathbb{Z} \implies d \mid b$$

$$\exists d' \mid a, d' \mid b, d = ax_0 + by_0$$

$$d' \mid ax_0, d' \mid by_0 \implies d' \mid d$$

**Следствие.**

1.  $a, b \in \mathbb{Z}$ : Тогда наибольший общий делитель  $a, b$  существует.
2. Если  $d$  — наибольший общий делитель  $a, b$ , то  $\exists x, y \in \mathbb{Z} : d = ax + by$  (Линейное представление наибольшего общего делителя).

**Доказательство.**

1. Доказали в двух частях предложения.
2.  $\exists d_0$  — наибольший общий делитель  $a, b$ , то есть  $d_0 = ax_0 + by_0$   
 $d$  ассоциирован с  $d_0 \implies d = d_0\mathbb{Z}, z \in \mathbb{Z} \implies d = a(x_0z) + b(y_0z)$

**Определение 5.2.**  $\text{НОД}(a, b) = \gcd(a, b)$  — неотрицательный наибольший общий делитель  $a, b$ .

**Предложение 5.3.**  $\exists a_1, a_2, b \in \mathbb{Z} : a_1 \equiv_b a_2$

Тогда  $\gcd(a_1, b) = \gcd(a_2, b)$ .



**Доказательство.** (!)  $\{c : c \mid a_1, c \mid b\} = \{c : c \mid a_2, c \mid b\}$

" $\subset$ ":

$$a_2 - a_1 = bm \implies a_2 = a_1 + bm$$

$$c \mid a_1, c \mid b \implies c \mid a_2$$

" $\supset$ ":

$$a_1 - a_2 = bm \implies a_1 = a_2 + bm$$

$$c \mid a_2, c \mid b \implies c \mid a_1$$

$$\forall x \in \{c : c \mid a_1, c \mid b\} : x \mid \gcd(a_1, b)$$

$$\forall x \in \{c : c \mid a_2, c \mid b\} : x \mid \gcd(a_2, b)$$

$$\gcd(a_1, b) = \gcd(a_2, b)$$

**Определение 5.3.** Алгоритм Евклида

$$\gcd(a, b) = \gcd(b, a \bmod b), \text{ если } b \neq 0$$

## 6 Взаимно простые числа

**Определение 6.1.** Числа  $a$  и  $b$  называются взаимно простыми, если  $\gcd(a, b) = 1$ .

**Предложение 6.1.**

1.  $\exists a, b \in \mathbb{Z}$ , тогда  $a \perp b \iff \exists m, n \in \mathbb{Z} : am + bn = 1$ .
2.  $a_1 \perp b, a_2 \perp b \implies a_1 a_2 \perp b$ .
3.  $a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_n \in \mathbb{Z}$  и  $\forall i, j : a_i \perp b_j \implies a_1 \dots a_m \perp b_1 \dots b_n$ .
4.  $a \mid bc, a \perp b \implies a \mid c$ .
5.  $ax \equiv ay, a \perp m \implies x \equiv y \pmod{m}$ .
6.  $\gcd(a, b) = d \implies a = da', b = db', a' \perp b'$ .

**Доказательство.**

1.  $m$  и  $n$  существуют согласно линейному представлению НОД.  
 $d = \gcd(a, b), d \mid a, d \mid b \implies d \mid (am + bn) = 1 \implies d \mid 1 \implies d = 1$ .
2.  $1 = a_1 m_1 + b n_1, 1 = a_2 m_2 + b n_2 \implies 1 = a_1 a_2 (m_1 m_2) + b (a_1 m_1 n_2 + a_2 m_2 n_1 + b n_1 n_2) \implies a_1 a_2 \perp b$ .
3.  $a_1 \perp b, \dots, a_n \perp b \implies a_1 \dots a_n \perp b$   
 $a_1 \dots a_n \perp b_1, \dots, a_1 \dots a_n \perp b_n \implies a_1 \dots a_n \perp b_1 \dots b_n$
4.  $1 = am + bn, c = acm + bcn$   
 $a \mid acm, a \mid bcn \implies a \mid c$ .
5.  $m \mid (ax - ay), a \perp m \implies m \mid (x - y) \implies x \equiv y \pmod{m}$ .

$$6. d \mid a, d \mid b \implies a = da', b = db' : a', b' \in \mathbb{Z}$$

$$d = am + bn, m, n \in \mathbb{Z}$$

$$d = 0 \implies a' = b' = 0 = da'm + db'm$$

$$d \neq 0 \implies 1 = a'm + b'n \implies a' \perp b'.$$

## 7 Линейные диофантовы уравнения

**Определение 7.1.** Линейным диофантовым уравнением с двумя неизвестными называется уравнение вида  $ax + by = c$ , где  $a, b, c \in \mathbb{Z}$ .

Решение уравнения - множество всех пар  $(x, y) \in \mathbb{Z}^2 : ax + by = c$ .

Если  $\gcd(a, b) \nmid c$ , то решение — пустое множество, так как все линейные комбинации  $a, b$  делятся на  $\gcd(a, b)$ .

Теперь заметим следующее: если  $ax_1 + by_1 = c$  и  $ax_2 + by_2 = c$ , то  $a(x_1 - x_2) + b(y_1 - y_2) = 0$ .

Иными словами, разность двух решений линейного диофантова уравнения - решение соответствующего однородного уравнения.

А значит все решения линейного диофантова уравнения можно найти, решив однородное уравнение и прибавив ко всем его решениям какое-то решение исходного уравнения.

Решим однородное уравнение:

$$ax + by = 0 \iff ax = -by \xrightarrow{\text{поделим } a, b \text{ на их } \gcd} a' \gcd(a, b)x = -b' \gcd(a, b)y \iff a'x = -b'y \xrightarrow{(\star)} \begin{cases} x = b'k \\ y = -a'k \end{cases} \quad k \in \mathbb{Z}$$

$$(\star) \gcd(a', b') = 1 \implies a' \mid y, b' \mid x \implies x = b'k, k \in \mathbb{Z} \implies y = -a'k$$

Теперь найдём какое-то решение исходного уравнения, вспомнив о линейном представлении  $\gcd$ :

$$\gcd(a, b) = ax_0 + by_0 \implies c = c' \gcd(a, b) = a(c'x_0) + b(c'y_0)$$

Таким образом, решение исходного уравнения:

$$\{(c'x_0 + b'k, c'y_0 - a'k) \mid k \in \mathbb{Z}\}, \text{ где } x_0, y_0 - \text{коэффициенты при } a, b \text{ в линейном представлении } \gcd(a, b), a' = \frac{a}{\gcd(a, b)}, b' = \frac{b}{\gcd(a, b)}, c' = \frac{c}{\gcd(a, b)}$$

**TODO:** Вставить код

## 8 Простые числа

**Определение 8.1.** Число  $p \in \mathbb{Z}$  называется простым, если  $p \notin \{-1, 0, 1\}$  и все делители  $p$  — это  $\pm 1$  и  $p$ .

*Свойства.*

1.  $p$  — простое  $\iff -p$  — простое.
2.  $p$  — простое,  $a \in \mathbb{Z} \implies p \mid a$  или  $p \perp a$ .
3.  $p, q$  — простые  $\implies p, q$  — ассоциированы или  $p \perp q$ .
4.  $p \mid ab \implies p \mid a$  или  $p \mid b$ .

**Предложение 8.1.**  $\exists a \neq \pm 1$ , тогда существует простое число  $p : p \mid a$ .

**Доказательство.**  $a = 0 \implies p = 239$

$a = 1 \implies a > 0$

Индукция по  $a$ :

$a$  — простое  $\implies p = a, p \mid a$

$a$  — не простое,  $\exists d : 1 < d < a, d \mid a$

$a = dd'$ , тогда по индукционному переходу существует простое число  $p : p \mid d$

$p \mid d, d \mid a \implies p \mid a$

**Определение 8.2.** Составное число — это число отличное от 0, и не являющееся простым.

## Решето Эратосфена

2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, ..., 100

- 2 — простое, вычеркиваем все числа кратные 2
- 3 — простое, вычеркиваем все числа кратные 3
- 4 — составное, пропускаем
- и т. д.

**Теорема 8.1.** (Теорема Евклида) Существует бесконечно много простых чисел

**Доказательство.**  $\exists p_1, p_2, \dots, p_n$  — все простые числа

$N = p_1 p_2 \dots p_n + 1 \implies$

$\exists$  простое число  $p : p \mid N, p > 0 \implies \exists j : p = p_j \implies p \mid (N - 1) \implies p \mid 1 \implies p = \pm 1$

Противоречие

## 9 Основная теорема арифметики

**Теорема 9.1.**  $\exists n \geq 2$ . Тогда  $n$  можно представить в виде произведения простых чисел, и такое представление единственно с точностью до порядка сомножителей.

**Доказательство.**

Существование:

$\exists n_0$  — наименьшее число ( $\geq 2$ ), для которого такого представления нету.

$n_0$  — составное число  $\implies n_0 = ab, 2 \leq a, b < n_0$

По минимальности  $\implies a = p_1 \dots p_k, b = q_1 \dots q_l$ , все  $p_i, q_j$  — простые.

$\implies n_0 = p_1 \dots p_k q_1 \dots q_l$  — Противоречие

Единственность:

$n = p_1 \dots p_k = q_1 \dots q_l, p_i, q_j$  — простые.

Нужно доказать:  $k = l$ ,  $q_1, \dots, q_k$  совпадают с  $p_1, \dots, p_k$  с точностью до порядка.

Не умаляя общности можно считать:  $k \leq l$ .

Индукция по  $k$ :

$k = 1$ :  $p_1 = q_1 \dots q_l$ ,  $p_1$  — простое  $\implies l = 1, p_1 = q_1$

$k > 1$ :  $p_k \mid n \implies p_k \mid (q_1 \dots q_l) \implies \exists j : p_k \mid q_j \implies p_k \sim q_j \implies p_k = q_j \implies$

$p_1 \dots p_{k-1} = q_1 \dots \hat{q}_j \dots q_l$ ,  $k - 1 \leq l - 1$

$k - 1 < k \implies$  применим индукционный переход:

$k - 1 = l - 1$  и  $q_1, \dots, \hat{q}_j, \dots, q_k$  — это  $p_1, \dots, p_{k-1}$  с точностью до порядка.  $\implies$

$q_1, \dots, (q_j = p_k), \dots, q_k$  — это  $p_1, \dots, p_k$  с точностью до порядка.

**Определение 9.1.** Каноническое разложение (факторизация) числа  $n$  — это представление  $n$  в виде  $p_1^{r_1} \dots p_s^{r_s}$ , где  $p_i$  — разложение  $n$  на простые множители,  $r_i \in \mathbb{N}$

**Примеры.**

- $n = 112 = 2^4 \cdot 7$
- $n = 6006 = 2^1 \cdot 3^1 \cdot 7^1 \cdot 11^1 \cdot 13^1$

**Предложение 9.1.**  $\exists a = p_1^{r_1} \dots p_s^{r_s}, b = p_1^{t_1} \dots p_s^{t_s}$

Тогда  $a \mid b \iff r_i \leq t_i \forall i \in \{1, \dots, s\}$

**Доказательство.** " $\Rightarrow$ ":

$$b = a \cdot p_1^{t_1 - r_1} \dots p_s^{t_s - r_s}$$

" $\Leftarrow$ ":

$$b = ac \quad c = p_1^{m_1} \dots p_s^{m_s} p_{s+1}^{m_{s+1}} \dots p_n^{m_n}$$

$$p_1^{t_1} \dots p_s^{t_s} = p_1^{r_1 + m_1} \dots p_s^{r_s + m_s} p_{s+1}^{m_{s+1}} \dots p_n^{m_n} \implies$$

$$t_i = r_i + m_i \quad \forall i \in \{1, \dots, s\}, m_{s+1} = \dots = m_n = 0 \implies t_i \geq r_i \quad \forall i \in \{1, \dots, s\}$$

**Следствие.**  $\exists a = p_1^{r_1} \dots p_s^{r_s}$

Тогда  $\{d > 0 : d \mid a\} = \{p_1^{t_1} \dots p_s^{t_s} \mid 0 \leq t_i \leq r_i, \forall i \in \{1, \dots, s\}\}$

**Следствие.**  $\exists a = p_1^{r_1} \dots p_s^{r_s}, b = p_1^{t_1} \dots p_s^{t_s}$

Тогда  $\gcd(a, b) = p_1^{\min(r_1, t_1)} \dots p_s^{\min(r_s, t_s)}$

**Определение 9.2.**  $\exists a, b \in \mathbb{Z}$ . Число  $c \in \mathbb{Z}$  называется наименьшим общим кратным чисел  $a$  и  $b$ , если

1.  $a \mid c, b \mid c$
2. Если  $a \mid c', b \mid c'$ , то  $c \mid c'$

**Предложение 9.2.**  $\exists a = p_1^{r_1} \dots p_s^{r_s}, b = p_1^{t_1} \dots p_s^{t_s}$

Тогда  $c = p_1^{\max(r_1, t_1)} \dots p_s^{\max(r_s, t_s)}$  — наименьшее общее кратное чисел  $a$  и  $b$

**Доказательство.**  $a \mid c, b \mid c$  — очевидно

$$\exists a \mid c', b \mid c', c' = p_1^{m_1} \dots p_s^{m_s} p_{s+1}^{m_{s+1}} \dots p_n^{m_n}$$

$$a \mid c', b \mid c' \implies r_i \leq m_i, t_i \leq m_i, \forall i \in \{1, \dots, s\} \implies$$

$$\max(r_i, t_i) \leq m_i, \forall i \in \{1, \dots, s\} \implies c \mid c'$$

**Определение 9.3.**  $\text{НОК}(a, b) = \text{lcm}(a, b)$  — положительное значение наименьшего общего кратного чисел  $a$  и  $b$ .

**Следствие.**  $\exists a, b \in \mathbb{N}$

$$\text{Тогда } \text{lcm}(a, b) \cdot \text{gcd}(a, b) = ab$$

**Доказательство.**  $\min(r_i, t_i) + \max(r_i, t_i) = r_i + t_i$

## 10 Китайская теорема об остатках

**Теорема 10.1.** Пусть  $(m_1, m_2) = 1; a_1, a_2 \in \mathbb{Z}$ .

$$1. \exists x \in \mathbb{Z}: \begin{cases} x_0 \equiv a_1 \\ x_0 \equiv a_2 \end{cases}$$

2.  $\exists x_0$  удовлетворяет системе выше

$$\text{Тогда для } x \in \mathbb{Z}: x \text{ удовлетворяет системе выше} \iff x \equiv x_0 \pmod{m_1 m_2}$$

**Доказательство.**

1.  $x_0 = a_1 + km_1 = a_2 + lm_2 \implies km_1 - lm_2 = a_2 - a_1$  — линейное диофантово уравнение с двумя неизвестными  $k, l$

$$(m_1, m_2) = 1 \implies \text{у него есть решение } (k_0, l_0)$$

$$x_0 = a_1 + k_0 m_1 \text{ — искомое}$$

$$2. \Rightarrow: x \equiv x_0 \pmod{m_1 m_2} \implies \begin{cases} x \equiv x_0 \\ x \equiv x_0 \end{cases} \implies \begin{cases} x \equiv a_1 \\ x \equiv a_2 \end{cases}$$

$$\Leftarrow: x \text{ удовлетворяет системе из теоремы} \implies \begin{cases} x \equiv x_0 \\ x \equiv x_0 \end{cases} \implies \begin{cases} m_1 \mid (x - x_0) \\ m_2 \mid (x - x_0) \end{cases} \implies m_1 m_2 \mid (x - x_0)$$

**Определение 10.1.**  $\exists R, S$  — кольца с единицей. Отображение  $\varphi : R \rightarrow S$  называется изоморфизмом колец, если:  $\varphi$  биекция.

$$1. \forall r_1, r_2 : \varphi(r_1 + r_2) = \varphi(r_1) + \varphi(r_2)$$

$$2. \forall r_1, r_2 : \varphi(r_1 r_2) = \varphi(r_1) \varphi(r_2)$$

**Предложение 10.1.**  $\exists(m_1, m_2) = 1$

Тогда существует изоморфизм

$$\mathbb{Z}/m_1m_2\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/m_1\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/m_2\mathbb{Z}$$

$$[a]_{m_1m_2} \mapsto ([a]_{m_1}, [a]_{m_2})$$

**Доказательство.** Проверим корректность:

$$\exists[a]_{m_1m_2} = [a']_{m_1m_2} \implies a \equiv_{m_1m_2} a' \implies \begin{cases} a \equiv_{m_1} a' \\ a \equiv_{m_2} a' \end{cases} \implies ([a]_{m_1}, [a]_{m_2}) = ([a']_{m_1}, [a']_{m_2})$$

$$\begin{aligned} \varphi([a]_{m_1m_2} + [b]_{m_1m_2}) &= \varphi([a+b]_{m_1m_2}) = ([a+b]_{m_1}, [a+b]_{m_2}) = \\ &= ([a]_{m_1}, [a]_{m_2}) + ([b]_{m_1}, [b]_{m_2}) = \varphi([a]_{m_1m_2}) + \varphi([b]_{m_1m_2}) \end{aligned}$$

Для умножения аналогично.

$\varphi$  - отображение между конечными равномощными множествами, поэтому оно биективно  $\iff$  оно сюръективно  $\iff$  оно инъективно.

Действительно, если  $\varphi : A \rightarrow B$ ,  $|A| = |B| < \infty$  инъективно, то полный прообраз любого элемента из  $B$  состоит из не более чем одного элемента из  $A$  (определение инъективности).

А если сложить количества прообразов у всех элементов из  $B$ , то должно получиться в точности  $|A|$ , так как каждый прообраз - чей-то образ.

Но тогда каждый прообраз состоит из в точности одного элемента, т. е.  $\varphi$  - биекция.

Аналогично можно рассуждать и про сюръективное отображение.

Проверим сюръективность  $\varphi$

$$\text{По китайской теореме об остатках } \forall a_1, a_2 \in \mathbb{Z} \exists a \in \mathbb{Z} : \begin{cases} a \equiv_{m_1} a_1 \\ a \equiv_{m_2} a_2 \end{cases}$$

Таким образом  $\varphi$  - биекция.

## 11 Функция Эйлера

**Предложение 11.1.**  $\exists m \in \mathbb{N}; a \in \mathbb{Z}$

$$[a]_m \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \iff (a, m) = 1$$

**Доказательство.**

$$[a]_m \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \iff \exists [b]_m : [a]_m \cdot [b]_m = [1]_m \iff$$

$$\exists b \in \mathbb{Z} : ab \equiv_m 1 \iff$$

$$\exists b, c \in \mathbb{Z} : ab = 1 + mc \iff$$

$$\exists b, c \in \mathbb{Z} : ab - mc = 1 \iff (a, m) = 1$$

**Следствие.**  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  - поле  $\iff m$  — простое число.

**Доказательство.** считаем  $m \geq 1$

$$m = 1: \mathbb{Z}/1\mathbb{Z} = \{\bar{0}\}$$

$m$  — простое:  $(a, m) = 1$  для  $\forall a \in \{1, 2, \dots, m-1\} \implies$

$$(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* = \{\bar{1}, \bar{2}, \dots, \overline{m-1}\}$$

$m$  — составное:  $m = ab$ ,  $2 \leq a \leq m-1$

$$(a, m) \neq 1 \implies \bar{a} \notin (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^*$$

**Определение 11.1.**  $\mathbb{F}_n$  — поле из  $n$  элементов.

**Предложение 11.2.**  $\mathbb{F}_n$  — поле из  $n$  элементов  $\iff n = p^r$ ,  $p \in \mathbb{P}$ ,  $r \in \mathbb{Z}_+$ .

$p$  — характеристика  $\mathbb{F}_n$ .

**Доказательство.** **TODO:** Пока без доказательства.

**Определение 11.2.**  $\exists m \in \mathbb{N} : \varphi(n) = |(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^*|$

Функция  $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  — функция Эйлера.

**Предложение 11.3.**  $\exists p \in \mathbb{P}$ ,  $r \in \mathbb{N}$ .

Тогда  $\varphi(p^r) = p^r - p^{r-1}$ .

**Доказательство.**  $\varphi(p^r) = |\{a \mid 0 \leq a \leq p^r - 1, (a, p^r) = 1\}| =$

$$p^r - |\{a \mid 0 \leq a \leq p^r - 1, (a, p) \neq 1\}| =$$

$$p^r - |\{a \mid 0 \leq a \leq p^r - 1, p \mid a\}| = p^r - p^{r-1}$$

**Предложение 11.4.** Мультипликативность функции Эйлера.

$$\exists m, n \in \mathbb{N}, (m, n) = 1.$$

Тогда  $\varphi(mn) = \varphi(m) \cdot \varphi(n)$ .

**Доказательство.** Построим отображение  $\lambda : (\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^* \rightarrow (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ :

$$[a]_{mn} = A \in (\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^* \mapsto ([a]_m, [a]_n)$$

$$[a]_{mn} \in (\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^* \implies (a, mn) = 1 \implies \begin{cases} (a, m) = 1 \\ (a, n) = 1 \end{cases} \implies \begin{cases} [a]_m \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \\ [a]_n \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \end{cases}$$

Проверка корректности:

$$[a]_{mn} = [a']_{mn} \implies a \equiv_{mn} a' \implies \begin{cases} a \equiv_m a' \\ a \equiv_n a' \end{cases} \implies \begin{cases} [a]_m = [a']_m \\ [a]_n = [a']_n \end{cases} \implies ([a]_m, [a]_n) = ([a']_m, [a']_n)$$

Проверим что  $\lambda$  — биекция:

Инъективность:

$$\lambda([a]_{mn}) = \lambda([b]_{mn}) \implies \begin{cases} [a]_m = [b]_m \\ [a]_n = [b]_n \end{cases} \xrightarrow{\text{КТО}} a \equiv_{mn} b \implies [a]_{mn} = [b]_{mn}$$

Сюръективность:

Рассмотрим  $([b]_m, [c]_n) \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ .

$$(m, n) = 1 \xrightarrow{\text{КТО}} \exists a : \begin{cases} a \equiv b \pmod{m} \\ a \equiv c \pmod{n} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (b, m) = 1 \implies (a, m) = 1 \\ (c, n) = 1 \implies (a, n) = 1 \end{cases} \implies (a, mn) = 1 \implies [a]_{mn} \in (\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^*$$

$$\lambda([a]_{mn}) = ([a]_m, [a]_n) = ([b]_m, [c]_n) \implies \lambda - \text{биекция.}$$

$$\lambda - \text{биекция} \implies |(\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^*| = |(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*| \implies \varphi(mn) = \varphi(m) \cdot \varphi(n)$$

**Следствие.**  $\exists m_1, \dots, m_k$  — попарно взаимно простые числа.

$$\text{Тогда } \varphi\left(\prod_{i=1}^k m_i\right) = \prod_{i=1}^k \varphi(m_i).$$

**Доказательство.** Индукция по  $k$ .

$$\text{База: } k = 1 \implies \varphi(m_1) = \varphi(m_1)$$

Переход:  $n - 1 \rightarrow n$

$$(m_n, m_1) = \dots = (m_n, m_{n-1}) = 1 \implies (m_1, \dots, m_n) = 1 \implies$$

$$\varphi(m_1 \dots m_n) = \varphi(m_1 \dots m_{n-1})\varphi(m_n) = \varphi(m_1) \dots \varphi(m_{n-1})\varphi(m_n)$$

**Следствие.**  $\exists n = p_1^{r_1}, \dots, p_s^{r_s}$  — разложение числа  $n$  на простые множители.

$$\implies \varphi(n) = \prod_{i=1}^s (p_i^{r_i} - p_i^{r_i-1})$$

$$\text{Доказательство. По следствию: } \varphi(n) = \varphi\left(\prod_{i=1}^s p_i^{r_i}\right) = \prod_{i=1}^s \varphi(p_i^{r_i}) = \prod_{i=1}^s (p_i^{r_i} - p_i^{r_i-1})$$

**Теорема 11.1.**  $\exists m \in \mathbb{N}, a \in \mathbb{Z}, (a, m) = 1 \implies a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$  — теорема Эйлера.

**Лемма 11.1.**

Пусть  $R$  — ассоциативное кольцо с единицей.

$$1. a, b \in R^* \implies ab \in R^*$$

$$2. a \in R^*, x, y \in R \implies ax = ay \implies x = y, xa = ya \implies x = y$$

**Доказательство.**

1.  $a'$  — обратный к  $a$  элемент,  $b'$  — обратный к  $b$  элемент.

$$(ab)(b'a') = a(bb')a' = aa' = 1$$

$$(b'a')(ab) = b'(aa')b = bb' = 1$$

2.  $a'$  — обратный к  $a$  элемент.

$$ax = ay \implies a'ax = a'ay \implies x = y$$



$$xa = ya \implies xaa' = yaa' \implies x = y$$

**Доказательство.** (теоремы Эйлера)

$$(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* = \{A_1, A_2, \dots, A_{\varphi(m)}\}$$

$$[a]_m A_j \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \xrightarrow{\text{lemma-1}}$$

$[a]_m A_1, \dots, [a]_m A_{\varphi(m)}$  — различные элементы

$$([a]_m A_j = [a]_m A_k \xrightarrow{\text{lemma-2}} A_j = A_k) \implies$$

$$\{[a]_m A_1, \dots, [a]_m A_{\varphi(m)}\} = (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \implies$$

$$[a]_m A_1 \cdot \dots \cdot [a]_m A_{\varphi(m)} = A_1 A_2 \dots A_{\varphi(m)} \implies$$

$$[a]_m^{\varphi(m)} A_1 A_2 \dots A_{\varphi(m)} = [1]_m A_1 A_2 \dots A_{\varphi(m)} \xrightarrow{\text{lemma-2}}$$

$$[a]_m^{\varphi(m)} = [1]_m \implies [a^{\varphi(m)}]_m = [1]_m \implies a^{\varphi(m)} \equiv 1_m$$

**Теорема 11.2.** (Малая теорема Ферма)

$$\exists p \in \mathbb{P}, a \in \mathbb{Z} \implies a^p \equiv_p a$$

**Доказательство.**

$$(a, p) = 1 \implies a^{p-1} \equiv_p 1 \implies a^{p-1} a \equiv_p 1a \implies a^p \equiv_p a$$

$$(a, p) \neq 1 \implies a \equiv_p 0 \implies a^p \equiv_p 0 \implies a^p \equiv_p a$$

**Теорема 11.3.** (Теорема Вильсона)

$$p \in \mathbb{P} \implies (p-1)! \equiv_p -1$$

**Доказательство.**

В  $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^*$

$$\overline{(p-1)!} = \bar{1} \cdot \bar{2} \cdot \dots \cdot \overline{p-1} = \prod_{A \in (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^*} A = \prod_{A^2=\bar{1}} A \cdot \prod_{A^2 \neq \bar{1}} A = \left( \prod_{A^2=\bar{1}} A \right) \cdot (A_1 \cdot A'_1 \cdot \dots) = \left( \prod_{A^2=\bar{1}} A \right) \cdot \bar{1} = \prod_{A^2=\bar{1}} A$$

$$A^2 = \bar{1} \iff A^2 - \bar{1}^2 = \bar{0} \iff (A - \bar{1})(A + \bar{1}) = \bar{0} \xrightarrow{\mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \text{ ОЦ}} A - \bar{1} = \bar{0} \text{ или } A + \bar{1} = \bar{0} \implies$$

$$\begin{cases} p=2 & \prod_{A^2=\bar{1}} A = \bar{1} = \overline{-1} \\ p \neq 2 & \prod_{A^2=\bar{1}} A = \overline{-1} \end{cases}$$

# 1 Комплексные числа

## 1 Построение поля комплексных чисел

**Определение 1.1.**  $\mathbb{C} = \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\}$

**Определение 1.2.**

- Сложение на  $\mathbb{C}$ :  $(a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2)$
- Умножение на  $\mathbb{C}$ :  $(a_1, b_1) \cdot (a_2, b_2) = (a_1 a_2 - b_1 b_2, a_1 b_2 + a_2 b_1)$

**Предложение 1.1.**  $(\mathbb{C}, +, \cdot)$  - поле.

**Доказательство.**

- Коммутативность сложения — очевидно.
- Ассоциативность сложения — очевидно.
- $(0, 0)$  — нейтральный элемент сложения.
- $(-a, -b)$  — обратный элемент к  $(a, b)$ .
- Коммутативность умножения — очевидно.
- Ассоциативность умножения — проверяется.
- Дистрибутивность — проверяется.
- $(1, 0)$  — нейтральный элемент умножения.
- $(a, b)z_1 z_2 = (1, 0) : z_1 = (a, -b), z_2 = \frac{1}{a^2 + b^2}$

**Определение 1.3.**  $\mathbb{C}$  — поле комплексных чисел.

**Определение 1.4.**  $c \in \mathbb{C}$  — комплексное число.

**Предложение 1.2.**  $\mathbb{R}' = \{(a, 0) \mid a \in \mathbb{R}\}$

$\mathbb{R}'$  замкнуто относительно сложения, вычитания, умножения, содержит единицу, то есть является подкольцом поля  $\mathbb{C}$ .

$\Rightarrow \mathbb{R}'$  — само является кольцом относительно сложения, умножения, ограниченных на  $\mathbb{R}'$ .

$\mathbb{R} \xrightarrow{\varphi} \mathbb{R}' (a \mapsto (a, 0)), \varphi(a)$  — изоморфизм колец, т.е.  $\varphi$  — биекция и  $\varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b); \varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b)$ .

Отождествим  $(a, 0)$  с вещественным числом  $a$ .

$$(a, 0) \cdot (0, 1) = (0, a)$$

$$(a, b) = (a, 0) + (0, b) = (a, 0) + (b, 0) \cdot (0, 1) = a + b \cdot (0, 1) = a + bi$$

**Определение 1.5.**  $z = a + bi$  — комплексное число.  $a = \operatorname{Re}(z), b = \operatorname{Im}(z)$  — действительная и мнимая части комплексного числа  $z$ . В геометрическом виде это вектор  $z = (a, b)$ .

**Определение 1.6.**  $z = a + bi$  — комплексное число.  $\bar{z} = a - bi$  — сопряженное к  $z$ .

**Определение 1.7.** Автоморфизм — изоморфизм на себя.

### Отступление про отображения

**Определение 1.8.**  $id_M : M \rightarrow M, x \mapsto x$  — тождественное отображение на  $M$ .

**Определение 1.9.**  $\alpha : M \rightarrow N, \beta : N \rightarrow P$  — отображения

Тогда  $\alpha \circ \beta : M \rightarrow P, x \mapsto \alpha(\beta(x))$  — композиция отображений.

**Определение 1.10.**  $\alpha : M \rightarrow N$  — отображение

Отображение  $\beta : N \rightarrow M$  — обратное к  $\alpha$ , если  $\beta \circ \alpha = id_M$ .

**Предложение 1.3.** У отображения  $\alpha : M \rightarrow N$  есть обратное отображение, если и только если  $\alpha$  — биекция.

**Доказательство.**

" $\Rightarrow$ ":

Инъективность:

$$\beta \circ \alpha = id_M, \alpha(x) = \alpha(y) \implies \beta(\alpha(x)) = \beta(\alpha(y)) \implies x = y$$

Сюръективность:

$$y \in N, y = \alpha(\beta(y)) \in Im(\alpha) \text{ (Im это прообраз)}$$

" $\Leftarrow$ ":

Пусть  $\alpha$  — биекция, назовем  $\beta : N \rightarrow M$  — обратными, если  $\forall y \in N \alpha^{-1}(y) = \{x\}, x \in M$

Положим  $\beta(y) = x, \alpha \circ \beta = id_N, \beta \circ \alpha = id_M$

### Продолжение

**Предложение 1.4.**  $\sigma : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, z \mapsto \bar{z}$  — автоморфизм.

**Доказательство.**

$\sigma$  — биекция, т.к.  $\sigma \circ \sigma = id_{\mathbb{C}}$

$\sigma(z_1 + z_2) = \sigma(z_1) + \sigma(z_2)$  — очевидно

$$\sigma(z_1 z_2) = \sigma(z_1) \sigma(z_2)$$

$\sigma(1) = 1$  — очевидно

$$z_1 = a_1 + b_1 i, z_2 = a_2 + b_2 i$$

$$\sigma(z_1 z_2) = \overline{a_1 a_2 - b_1 b_2 + i(a_1 b_2 + a_2 b_1)} = a_1 a_2 - b_1 b_2 + i(a_1 b_2 + a_2 b_1)$$

$$\sigma(z_1) \sigma(z_2) = \overline{(a_1 - i b_1)(a_2 - i b_2)} = a_1 a_2 - b_1 b_2 + i(a_1 b_2 + a_2 b_1)$$

## 2 Тригонометрическая форма комплексного числа

**Определение 2.1.**  $a + bi = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$

$$a = r \cos \varphi$$

$$b = r \sin \varphi$$

**Определение 2.2.** Модулем комплексного числа  $z = a + bi \in \mathbb{C}$  назовем:

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

**Предложение 2.1.**

1.  $|z| \geq 0$ ,  $|z| = 0 \iff z = 0$
2.  $|z_1 z_2| = |z_1| |z_2|$
3.  $|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$
4.  $|\bar{z}| = |z|$
5.  $z \bar{z} = |z|^2$

**Доказательство.**

1. очевидно
2.  $z_1 = a_1 + b_1 i$ ,  $z_2 = a_2 + b_2 i$   
 $|z_1 z_2|^2 = (a_1 a_2 - b_1 b_2)^2 + (a_1 b_2 + a_2 b_1)^2 = a_1^2 a_2^2 + b_1^2 b_2^2 + a_1^2 b_2^2 + a_2^2 b_1^2 =$   
 $(a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2) = |z_1|^2 |z_2|^2$
3.  $\iff |z_1 + z_2|^2 \leq (|z_1| + |z_2|)^2$   
 $\iff (a_1 + a_2)^2 + (b_1 + b_2)^2 \leq a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2 + 2|z_1||z_2|$   
 $\iff a_1 a_2 + b_1 b_2 \leq \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2)}$   
 $\iff |a_1 a_2 + b_1 b_2| \leq \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2)}$   
 $\iff a_1^2 a_2^2 + b_1^2 b_2^2 + 2a_1 a_2 b_1 b_2 \leq (a_1^2 + b_1^2)(a_2^2 + b_2^2)$   
 $\iff 2a_1 a_2 b_1 b_2 \leq b_1^2 a_2^2 + a_1^2 b_2^2$   
 $\iff (b_1 a_2 - b_2 a_1)^2 \geq 0$
4. очевидно
5.  $z = a + bi \implies \bar{z} = a - bi$   
 $z \bar{z} = (a + bi)(a - bi) = a^2 - (bi)^2 = a^2 + b^2 = |z|^2$

**Замечание.**  $z^{-1} = \frac{\bar{z}}{|z|^2} = \frac{a}{a^2 + b^2} - i \frac{b}{a^2 + b^2}$

**Определение 2.3.** Пусть  $z \in \mathbb{C}$ . Аргументом  $z$  назовем такое  $\varphi \in \mathbb{R}$ ,

что  $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$

**Предложение 2.2.**

1. Если  $z = 0$ , то любой  $\varphi \in \mathbb{R}$  - аргумент  $z$
2. Если  $z \neq 0$ , то:
  - (a) аргумент существует
  - (b) если  $\varphi_0$  - аргумент  $z$ , то  $\varphi$  - аргумент  $z \iff \varphi = \varphi_0 + 2\pi k, k \in \mathbb{Z}$

**Доказательство.**

1. тривиально

2.  $z_0 = \frac{1}{|z|} \cdot z$

$$|z_0| = \left| \frac{1}{|z|} \right| \cdot |z| = \frac{1}{|z|} \cdot |z| = 1$$

$$z_0 = a_0 + ib_0, |z_0| = a_0^2 + b_0^2 = 1 \implies \exists \varphi_0 : \begin{cases} a_0 = \cos \varphi_0 \\ b_0 = \sin \varphi_0 \end{cases}$$

$$z = |z| \cdot z_0 = |z|(\cos \varphi_0 + i \sin \varphi_0)$$

$$\varphi = \varphi_0 + 2\pi k \implies \begin{cases} \cos \varphi = \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi = \sin \varphi_0 \end{cases} \implies \varphi - \text{ аргумент}$$

$$\varphi - \text{ аргумент} \implies z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi) \implies \begin{cases} \cos \varphi = \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi = \sin \varphi_0 \end{cases} \implies \varphi - \varphi_0 = 2\pi k, k \in \mathbb{Z}$$

**Определение 2.4.**  $\arg(z) = \varphi$  означает  $\varphi$  - один из аргументов  $z$

**Замечание.** Предположим оказалось, что  $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$  для некоторых  $r \geq 0, \varphi \in \mathbb{R}$ . Тогда  $r = |z|, \varphi = \arg z$

**Доказательство.**  $|z| = \sqrt{(r \cos \varphi)^2 + (r \sin \varphi)^2} = \sqrt{r^2} = r \implies \varphi$  - аргумент по определению

**Предложение 2.3.**

1.  $\arg \bar{z} = -\arg z$
2.  $z \in \mathbb{R} \iff \arg z = k\pi, k \in \mathbb{Z}$
3.  $\arg(z_1 z_2) = \arg z_1 + \arg z_2$
4.  $\exists z_2 \neq 0 \implies \arg \frac{z_1}{z_2} = \arg z_1 - \arg z_2$

**Доказательство.**

1.  $\arg z = \varphi$

$$z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

$$\bar{z} = |z|(\cos \varphi - i \sin \varphi) = |\bar{z}|(\cos(-\varphi) + i \sin(-\varphi)) \implies$$

$$\arg \bar{z} = -\varphi$$

2. " $\Rightarrow$ ":

$$z > 0:$$

$$z = |z| \cdot 1 = |z|(\cos 0 + i \sin 0) \implies \arg z = 0$$

$$z < 0:$$

$$z = |z| \cdot (-1) = |z|(\cos \pi + i \sin \pi) \implies \arg z = \pi$$

$$" \Leftarrow ":$$

$$\sin(k\pi) = 0$$

$$3. \arg z_1 = \varphi_1, \arg z_2 = \varphi_2 \implies$$

$$(!) \varphi_1 + \varphi_2 = \arg(z_1 z_2)$$

$$z_1 = |z_1|(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1), z_2 = |z_2|(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) \implies$$

$$z_1 z_2 = |z_1| \cdot |z_2|(\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + i(\sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2)) =$$

$$|z_1 z_2|(\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)) \implies \arg(z_1 z_2) = \varphi_1 + \varphi_2$$

$$4. z_1 = \frac{z_1}{z_2} \cdot z_2 \implies \arg z_1 = \arg \frac{z_1}{z_2} + \arg z_2 \implies \arg \frac{z_1}{z_2} = \arg z_1 - \arg z_2$$

**Следствие.** (Формула Муавра)

Пусть  $z \in \mathbb{C}$ ,  $|z| = r$ ,  $\arg z = \varphi$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ .

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

**Доказательство.**

$n > 0$  — индукция по  $n$

База:  $n = 1$  — тривиально

Переход:  $n - 1 \rightarrow n$

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

$$r^{n-1}(\cos((n-1)\varphi) + i \sin((n-1)\varphi)) \cdot r(\cos \varphi + i \sin \varphi) =$$

$$r^n(\cos((n-1)\varphi + \varphi) + i \sin((n-1)\varphi + \varphi)) =$$

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

$$n = 0, 1 = r^0(\cos(0) + i \sin(0)) = 1$$

$$n < 0: n = -k, k \in \mathbb{N}$$

$$z^n = \frac{1}{z^k}$$

$$|z^n| = \frac{1}{|z^k|} = \frac{1}{|z|^k} = |z|^{-k} = |z|^n$$

$$\arg z^n = \arg 1 - \arg z^k = 0 - k\varphi = n\varphi$$

### 3 Корни из комплексных чисел

$$z^n = w, n \in \mathbb{N}, w \in \mathbb{C}$$

$$w = 0 \implies z = 0$$

$$w \neq 0, w = r(\cos \varphi + i \sin \varphi), r > 0, \varphi \in \mathbb{R}, z = p(\cos \alpha + i \sin \alpha), p > 0, \alpha \in \mathbb{R}$$

$$z^n = w \iff p^n(\cos n\alpha + i \sin n\alpha) = r(\cos \varphi + i \sin \varphi) \iff \begin{cases} p^n = r \\ n\alpha = \varphi + 2\pi k, k \in \mathbb{Z} \end{cases} \iff$$

$$\begin{cases} p = \sqrt[n]{r} \\ \alpha = \frac{\varphi + 2\pi k}{n}, k \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

$$z^n = w \iff z = \underbrace{\sqrt[n]{r} \left( \cos \frac{\varphi + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2\pi k}{n} \right)}_{z_k}, k \in \mathbb{Z}$$

При каких  $k, l : z_k = z_l$ ?

$$z_k = z_l \iff \frac{\varphi + 2\pi k}{n} = \frac{\varphi + 2\pi l}{n} + 2\pi s, s \in \mathbb{Z} \iff \frac{k}{n} + \frac{l}{n} + s, s \in \mathbb{Z} \iff$$

$$k = l + ns, s \in \mathbb{Z} \iff k \equiv l \iff z \in \{z_0, z_1, \dots, z_{n-1}\}$$

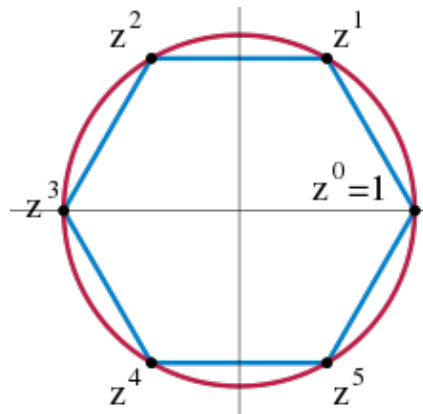
Таким образом, мы доказали:

**Теорема 3.1.**  $\exists n \in \mathbb{N}, w \in \mathbb{C}$

1. Если  $w = 0$ , То уравнение  $z^n = w$  имеет единственный корень  $z = 0$ .
2. Если  $w \neq 0$ , То уравнение  $z^n = w$  имеет ровно  $n$  различных корней:

$$z_k = \sqrt[n]{r} \left( \cos \frac{\varphi + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2\pi k}{n} \right), k = 0, 1, \dots, n-1$$

**Изображение на окружности**



Комплексные корни образуют правильный  $n$ -угольник на окружности.

**Лемма 3.1.** Пусть  $z_0, z_1, \dots, z_{n-1}$  — все корни  $z^n = w, n > 1$

Тогда  $z_0 + z_1 + \dots + z_{n-1} = 0$

**Доказательство.**

$$z_k = z_{k-1} \underbrace{\left( \cos \frac{2\pi}{n} + i \sin \frac{2\pi}{n} \right)}_{\xi}$$

$$S = z_0 + z_1 + \dots + z_{n-1}$$

$$z_k = z_0 \cdot \xi^k$$

$$\xi \cdot S = z_1 + z_2 + \dots + \underbrace{z_n}_{=z_0} = S \implies (\xi - 1)S = 0$$

$$n \neq 1 \implies \xi \neq 1$$

$$(\xi - 1)S = 0 \implies S = 0$$

**Определение 3.1.** Группа — это множество  $G$  с операцией  $*$  :  $G \times G \rightarrow G$  такая, что:

1.  $*$  — ассоциативна:  $(a * b) * c = a * (b * c)$
2. Существует нейтральный элемент  $e \in G$  такой, что  $a * e = e * a = a$  для любого  $a \in G$
3. У любого элемента  $a \in G$  существует обратный элемент  $a^{-1} \in G$  такой, что  $a * a^{-1} = a^{-1} * a = e$

**Примеры.**

1.  $(\mathbb{Z}, +)$
2.  $((\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, \cdot)$
3. Если  $R$  — ассоциативное кольцо с 1, то  $R^* = \{r \mid \exists s \in R : rs = sr = 1\}$  — группа относительно умножения.

Проверить замкнутость относительно умножения.

Зафиксируем  $n \in \mathbb{N}$

$$\mu_n = \{z \in \mathbb{C} \mid z^n = 1\} = \underbrace{\left\{ \cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n} \mid k = 0, 1, \dots, n-1 \right\}}_{\xi_k} \text{ — группа относительно}$$

умножения

$$z, w \in \mu_n \implies zw \in \mu_n \text{ — замкнутость относительно умножения}$$

$$(zw)^n = z^n w^n = 1 \cdot 1 = 1$$

Доказательство, что  $\mu_n$  — группа:

- Ассоциативность — так как есть ассоциативность в  $\mathbb{C}$
- $1 \in \mu_n$  ( $1 = \xi_0$ )
- $\xi_k \cdot \xi_{-k} = \left( \cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n} \right) \left( \cos \frac{2\pi(-k)}{n} + i \sin \frac{2\pi(-k)}{n} \right) = 1$

**Лемма 3.2.**  $\xi_k = \xi_1^k$

**Доказательство.**  $\left( 1 \cdot \cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n} \right)^k = 1 \cdot \left( \cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n} \right)$  (по формуле Муавра)

**Определение 3.2.**  $G$  — группа с операцией  $*$ ,  $g \in G$ ,  $n \in \mathbb{Z}$

$$g^n = \begin{cases} g * g * \dots * g & n > 0 \\ e & n = 0 \\ g^{-1} * g^{-1} * \dots * g^{-1} & n < 0 \end{cases}$$



**Определение 3.3.** Группа  $G$  называется циклической, если  $\exists g \in G : G = \{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$

Пишут:  $G = \langle g \rangle$

**Определение 3.4.**  $g$  — образующий элемент группы  $G$

**Примеры.**

- $\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle = \langle -1 \rangle$  (по сложению)  $g^n = \begin{cases} 1 + 1 + \dots + 1 & n > 0 \\ 0 & n = 0 \\ -1 + -1 + \dots + -1 & n < 0 \end{cases}$
- $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z} = \langle \bar{1} \rangle = \langle \bar{2} \rangle = \langle \bar{3} \rangle = \langle \bar{4} \rangle$  (по сложению)
- $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} = \langle \bar{1} \rangle = \langle \bar{5} \rangle$  (по сложению)
- $(\mathbb{Z}/5\mathbb{Z})^* = \langle \bar{2} \rangle = \langle \bar{3} \rangle$  (по умножению)
- $(\mathbb{Z}/8\mathbb{Z})^*$  — не циклическая группа  $g^2 = e \implies g^{2k} = e, g^{2k+1} = g$

**Определение 3.5.**  $G$  — группа,  $g \in G$

Если  $\forall n \in \mathbb{N} : g^n \neq e$ , то говорят, что  $g$  — бесконечный порядок

Если  $\exists n \in \mathbb{N} : g^n = e$ , то минимальное такое  $n$  называют порядком  $g$  (пишут:  $\text{ord } g = n$ )

**Пример.**  $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$

$$\text{ord } \bar{1} = 1$$

$$\text{ord } \bar{2} = 4$$

$$\text{ord } \bar{3} = 4$$

$$\text{ord } \bar{4} = 2$$

**Предложение 3.1.** Пусть  $G$  — конечная группа,  $|G| = n$ ,  $g \in G$ .

Тогда:  $G = \langle g \rangle \iff \text{ord } g = n$

**Доказательство.** " $\Rightarrow$ ":

$\exists k, l : g^k = g^l, k, l \in \{0, 1, \dots, n\}, k \neq l$  (так как  $G$  конечная)

$$k < l : g^{-k} \cdot g^k = g^{-k} \cdot g^l = g^{l-k} = e$$

$$0 < l - k \leq n$$

Таким образом, порядок  $g$  не превосходит  $n$

Предположим,  $\text{ord } g = m < n$

$G = \{g^k \mid k \in \mathbb{Z}\} = \{g^{mq+r} \mid q \in \mathbb{Z}, 0 \leq r < m\} = \{g^0, g^1, \dots, g^{m-1}\}$  — противоречие, так как  $|G| \leq m < n$

" $\Leftarrow$ ":

$$\text{ord } g = n$$

$$\implies g^0, g^1, g^2, \dots, g^{n-1} \text{ — они попарно различны}$$

$$\implies \{g^0, g^1, \dots, g^{n-1}\} = G$$

$$\implies G = \langle g \rangle$$

**Определение 3.6.** Первообразным корнем из 1 степени  $n$  называется такой элемент  $z \in \mathbb{C}^*$ , что  $\text{ord } z = n$

**Пример.**  $\mu_6 = \{1, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5\}$

$\text{ord } 1 = 1, \text{ord } \xi_1 = 6, \text{ord } \xi_2 = 3, \text{ord } \xi_3 = 2, \text{ord } \xi_4 = 3, \text{ord } \xi_5 = 6$

$\xi_2$  — первообразный корень из 1 степени 3

## 2 Многочлены

### 1 Многочлены и формальные степенные ряды

**Определение 1.1.** Последовательность финитная  $\iff \exists N : \forall n \geq N : a_n = 0$ .

**Определение 1.2.** Многочленом над  $R$  (от одной переменной) называется финитная последовательность  $(a_i)$ ,  $a_i \in R$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$

**Определение 1.3.**  $R$  — коммутативное кольцо с 1.

$R[x] = \{(a_i) \mid a_i \in R, i = 0, 1, \dots; a_i = 0 \text{ при } i \rightarrow \infty\}$  — кольцо многочленов над  $R$ .

Введём сложение и умножение на  $R[x]$

$$(a_i) + (b_i) = (a_i + b_i)$$

$$(a_i) \cdot (b_i) = (p_i), \text{ где } p_k = \sum_{i=0}^k a_i b_{k-i}$$

$\sqsubset a \in R$ ,  $[a] = (a, 0, 0, \dots)$  — многочлен, равный  $a$ .

$$[a] + [b] = [a + b]$$

$$[a] \cdot [boba] = (aboba, 0, 0, \dots) = [aboba]$$

Отождествим  $[a]$  с  $a$ .

$$[a] \cdot (b_0, b_1, \dots) = (ab_0, ab_1, \dots)$$

$$(a_0, a_1, \dots, a_n, 0, 0, \dots) = (a_0, 0, 0, \dots) + (0, a_1, 0, 0, \dots) + \dots + (0, 0, \dots, a_n, 0, 0, \dots) =$$

$$a_0 \cdot \underbrace{(1, 0, 0, \dots)}_{x_0} + a_1 \cdot \underbrace{(0, 1, 0, \dots)}_{x_1} + \dots + a_n \cdot \underbrace{(0, 0, \dots, 1, 0, 0, \dots)}_{x_n} =$$

$$a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n$$

$$x_j \cdot x_1 = (0, \dots, 1, 0, 0, \dots) \cdot (0, 1, 0, 0, \dots) = (0, \dots, 0, 1, 0, 0, \dots) = x_{j+1} \implies$$

$$\forall m \in \mathbb{N} : x_m = x_1^m$$

$$x_1 = x \implies x_m = x_1^m = x^m$$

Значит получили стандартную запись многочленов  $(a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n)$

**Определение 1.4.**  $\sqsubset f \in R[x]$ ,  $f \neq 0$  (то есть не  $(0)$ )

Тогда степенью  $f$  называется максимальное  $j$  такое что  $a_j \neq 0$

Обозначим  $\deg(f) = j$ .

Если  $f = 0$ , то  $\deg(f) \in \{-1, -\infty\}$  (по разному обозначают).

**Определение 1.5.**  $d = \deg f \implies a_d$  называется старшим коэффициентом  $f$ .

**Определение 1.6.** Константой называется множество  $f$  такое что  $\deg(f) \leq 0$ .

**Определение 1.7.** Мономом называется множество вида  $ax^j$ .

**Предложение 1.1.**  $R[x]$  — коммутативное ассоциативное кольцо с 1.

**Доказательство.** Аксиомы относящиеся к сложению очевидны.

Проверим коммутативность умножения и дистрибутивность.

$(f \cdot g) \cdot h = f \cdot (g \cdot h)$  — сводится к сложению,  $f, g, h$  — мономы.

$$\begin{cases} (aX^i \cdot bX^j) \cdot cX^k = abX^{i+j} \cdot cX^k = abc \cdot X^{i+j+k} \\ aX^i \cdot (bX^j \cdot cX^k) = aX^i \cdot bcX^{j+k} = abc \cdot X^{i+j+k} \end{cases}$$

$$(fg)h = f(gh)$$

$$f = \sum_{i=0}^k f_i, \quad g = \sum_{j=0}^l g_j, \quad h = \sum_{m=0}^n h_m$$

$$(fg)h = (\sum f_i \cdot \sum g_j) \cdot \sum h_k = \sum (f_i \cdot g_j) \cdot \sum h_k \stackrel{\text{ассоц. для мономов}}{=} \sum f_i \cdot \sum (g_j \cdot h_k) = f(gh)$$

**Определение 1.8.**  $R[[x]] = \{(a_i) \mid a_i \in R, i = 0, 1, \dots\}$  — множество формальных степенных рядов над  $R$ .

$$(a_i) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i X^i$$

**Упражнение.**  $R[[x]]$  — коммутативное ассоциативное кольцо с 1.

## 2 Свойства степени

**Предложение 2.1.**  $f, g \in R[x], \deg f = m, \deg g = n$

$$1. \deg(f + g) \leq \max(m, n)$$

$$\text{При этом: } m \neq n \implies \deg(f + g) = \max(m, n)$$

$$2. \deg(fg) \leq m + n$$

**Доказательство.**

$$1. f = \sum_{i=0}^m a_i X^i, \quad g = \sum_{i=0}^n b_i X^i, \quad d = \max(m, n)$$

$$f = \sum_{i=0}^d a_i X^i, \quad g = \sum_{i=0}^d b_i X^i$$

$$f + g = \sum_{i=0}^d (a_i + b_i) X^i \implies \deg(f + g) \leq d$$

$$m \neq n \implies \begin{cases} a_d = 0 \\ b_d \neq 0 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} a_d \neq 0 \\ b_d = 0 \end{cases} \implies a_d + b_d \neq 0 \implies \deg(f + g) = d$$

$$2. \left( \sum_{i=0}^m a_i X^i \right) \left( \sum_{j=0}^n b_j X^j \right) = a_0 b_0 + (a_0 b_1 + a_1 b_0) X + \dots + a_m b_n X^{m+n} \implies \deg fg \leq m + n$$

**Замечание.**  $\deg fg < m + n$ , если  $a_m \neq 0$  или  $b_n \neq 0$  и  $a_m b_n = 0$

**Замечание.** Будем считать, что  $\deg 0 = -\infty$

**Определение 2.1.** Область целостности (целостное кольцо, область) — коммутативное ассоциативное кольцо с  $1 \neq 0$  и без делителей нуля.

$$a \neq 0 \text{ так чтобы } \exists b \neq 0 : ab = 0$$

**Предложение 2.2.** Пусть  $R$  — ОЦ (область целостности).

1.  $\forall f, g \in R[x] : \deg(fg) \leq \deg f + \deg g$
2.  $R[x]$  — ОЦ

**Доказательство.**

1. В предыдущем доказательстве  $\begin{cases} a_m \neq 0 \\ b_n \neq 0 \end{cases} \implies a_m b_n \neq 0 \implies \deg(fg) = m + n$
2.  $f \neq 0 \implies \deg f \geq 0, g \neq 0 \implies \deg g \geq 0 \implies \deg(fg) \geq 0 \implies fg \neq 0$

**Следствие.** Пусть  $R$  — ОЦ: тогда  $R[x]^* = R^*$

**Доказательство.** Очевидно  $R^* \subset R[x]^*$

Обратно, пусть  $f \in R[x]^* \implies$

$$\exists g \in R[x] : f \cdot g = 1 (\implies f, g \neq 0)$$

$$\deg(fg) = 0 = \deg f + \deg g \implies \deg f = \deg g = 0 \implies f \in R^*$$

**Примеры.**

1.  $\mathbb{Z}[x]^* = \{\pm 1\}$
2.  $\mathbb{R}[x]^* = \mathbb{R} \setminus \{0\}$
3.  $(\mathbb{Z}/4\mathbb{Z})[x]^*$  — бесконечное множество

**Упражнение.**  $R[[x]]^* = \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} a_i X^i \mid a_0 \in R^* \right\}$

### 3 Деление с остатком

**Теорема 3.1** (о делении с остатком для многочленов).  $R$  — ОЦ.

Пусть  $f, g \in R[x]$ ,  $g \neq 0$  и старший коэффициент  $g$  обратим.

Тогда  $\exists! q, r \in R[x]$ :

1.  $f = gq + r$
2.  $\deg r < \deg g$

**Доказательство.**  $\deg g = d, g = b_d X^d + \dots$

1. Существование  $q$  и  $r$

Индукция по  $\deg f$ :  $\deg f < d \implies$  подходит  $q = 0, r = f$

Пусть  $\deg f = n \geq d$

$f_1 = f - g \cdot a_n \cdot b_d^{-1} \cdot X^{n-d}$ , где  $b_d$  — старший коэффициент  $g$

$$g \cdot a_n \cdot b_d^{-1} \cdot X^{n-d} = (b_d X^d + \dots) \cdot a_n \cdot b_d^{-1} \cdot X^{n-d} = a_n X^n + \dots \implies \deg f_1 < n$$

По индукционному предположению  $\exists q_1, r_1 \in R[x]$  такие, что:

$$(a) \quad f_1 = gq_1 + r_1$$

$$(b) \quad \deg r_1 < d$$

$$f = g \cdot a_n \cdot b_d^{-1} \cdot X^{n-d} + f_1 = g \underbrace{(a_n \cdot b_d^{-1} \cdot X^{n-d} + q_1)}_q + \underbrace{r_1}_r$$

2. Предположим  $f = g \cdot q_1 + r_1 = g \cdot q_2 + r_2$ ,  $\deg r_1 < d, \deg r_2 < d$

$$g(q_1 - q_2) = r_2 - r_1$$

$$\text{Предположим } q_1 \neq q_2 \implies \deg g \cdot (q_1 - q_2) = \underbrace{\deg g}_d + \underbrace{\deg q_1 - q_2}_{\geq 0} \geq d, \quad \deg(r_2 - r_1) < d$$

*Замечание.* Условие  $R$  — ОЦ не существенно.

$$g = b_d X^d + \dots, \quad b_d \in R^*$$

$$b_d \cdot a = 0 \implies b_d^{-1}(b_d a) = 0 \implies a = 0 \quad (\text{что это значит?})$$

## 4 Гомоморфизм подстановки

**Определение 4.1.** Пусть  $R, S$  — кольца. Гомоморфизм из кольца  $R$  в кольцо  $S$  называется отображением  $\varphi : R \rightarrow S$  так что:

1.  $\varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b), \forall a, b \in R$ ;
2.  $\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b)$
3.  $\varphi(1_R) = 1_S$

**Предложение 4.1** (свойства гомоморфизма).

1.  $\varphi(0_R) = 0_S$
2.  $\forall a \in R : \varphi(-a) = -\varphi(a)$
3.  $\forall a, b \in R : \varphi(a - b) = \varphi(a) - \varphi(b)$

**Доказательство.**

1.  $0_R = 0_R + 0_R \implies \varphi(0_R) = \varphi(0_R) + \varphi(0_R) \implies \underbrace{\varphi(0_R) + (-\varphi(0_R))}_{0_S} = \varphi(0_R) + \underbrace{\varphi(0_R) + (-\varphi(0_R))}_{0_S} \implies$   
 $0_S = \varphi(0_R) + 0_S \implies \varphi(0_R) = 0_S$
2.  $a + (-a) = 0_R \implies \varphi(a) + \varphi(-a) = \varphi(0_R) = 0_S \implies \varphi(-a) = -\varphi(a)$
3.  $\varphi(a - b) = \varphi(a) + \varphi(-b) = \varphi(a) - \varphi(b)$

**Определение 4.2.** Пусть  $S$ -кольцо,  $R \subset S$ .  $R$  называется подкольцом  $S$ , если:

1.  $\forall a, b \in R : a - b \in R$
2.  $\forall a, b \in R : ab \in R$
3.  $1_S \in R$

**Замечание.** Этих условий достаточно (остальные выражаются)

$$1 \in R \implies 0 = 1 - 1 \in R$$

$$a \in R \implies -a = 0 + (-a) = 0 - a \in R$$

$$a, b \in R \implies a + (-(-b)) = a - (-b) \in R$$

**Примеры.**

1. Пусть  $R$  — подкольцо в  $S$ . Тогда  $i_R : R \rightarrow S$  — гомоморфизм,  $a \mapsto a$ .
2.  $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  — гомоморфизм,  $a \mapsto \bar{a}$
3.  $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  — гомоморфизм,  $z \mapsto \bar{z}$

**Теорема 4.1.** Пусть  $B$  — кольцо,  $A$  — подкольцо такое что,  $\forall a \in A \forall b \in B : ab = ba$

Зафиксируем  $b \in B$ . Тогда отображение  $\varphi_b : A[x] \rightarrow B$

$a_n X^n + \dots + a_1 X + a_0 \mapsto a_n b^n + \dots + a_1 b + a_0$  является гомоморфизмом колец.

**Доказательство.**

Если  $f = a_n X^n + \dots + a_1 X + a_0$ , то  $f(b) = a_n b^n + \dots + a_1 b + a_0 = \varphi_b(f)$

Нужно проверить:  $(f + g)(b) = f(b) + g(b)$

$$(fg)(b) = f(b)g(b)$$

$$1(b) = 1 \text{ — тривиально}$$

$(f + g)(b) = f(b) + g(b)$  — очевидно из определения  $f + g$ .

$$f = \sum_{i=0}^n a_i X^i, g = \sum_{i=0}^m c_i X^i$$

$$fg = \sum_{k=0}^{n+m} d_k X^k, d_k = \sum_{i+j=k} a_i c_j$$

$$(fg)(b) = \sum_{k=0}^{n+m} d_k b^k$$

$$f(b)g(b) = \left( \sum_{i=0}^n a_i b^i \right) \left( \sum_{j=0}^m c_j b^j \right) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_i b^i c_j b^j \stackrel{\text{КОММУТ.}}{=} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_i c_j b^{i+j}$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_i c_j b^{i+j} = \sum_{k=0}^{n+m} \underbrace{\left( \sum_{i,j \geq 0, i+j=k} (a_i c_j) \right)}_{d_k} b^k = (fg)(b)$$

**Примеры.**

1.  $A$  — любое коммутативное кольцо,  $B = A[x]$

$A$  - подкольцо в  $B = A[x] \implies$  можно рассмотреть  $f(g)$ , где  $f, g \in A[x]$

2.  $\mathbb{R}[x] \xrightarrow{\varphi} \mathbb{R}[x], f \mapsto f(5)$

$$\text{Im } \varphi = \mathbb{R} \neq \mathbb{R}[x]$$

3.  $A \rightarrow A$

$f \xrightarrow{\alpha} f(x_2, x_3, x_4, \dots)$  — инъективный, но не сюръективный

$f \xrightarrow{\beta} f(0, x_1, x_2, x_3, \dots)$  — сюръективный, но не инъективный

### Упражнение.

1. Найти все автоморфизмы  $\mathbb{Q}$

2. Найти все автоморфизмы  $\mathbb{R}$

3. Найти все автоморфизмы  $\mathbb{R}[x]$

**Теорема 4.2** (Безу). Пусть  $f \in R[X]$ ,  $c \in R$ . Тогда остаток при делении  $f$  на  $X - c$  есть  $f(c)$ .

**Доказательство.**

$f = (X - c) \cdot q + r$ , по теореме о делении с остатком  $\deg r < \deg(X - c) = 1 \implies$

$$f(c) = (c - c) \cdot q(c) + r(c) = r(c)$$

**Следствие.** Пусть  $f \in R[X]$ ,  $c \in R$ . Тогда  $f(c) = 0 \iff (X - c) \mid f$

**Определение 4.3.** Пусть  $R$  — подкольцо  $S$ , элементы  $R$  коммутируют с элементами  $S$ . Тогда  $s \in S$ , такой что  $f(s) = 0$ , где  $f \in R[x]$  — называется корнем из  $f$  в  $R$ .

### Примеры.

1.  $f = x^4 - 2$  в  $\mathbb{Z}[x]$

$f$  не имеет корней в  $\mathbb{Z}$

$f$  имеет 2 корня в  $\mathbb{R}$

$f$  имеет 4 корня в  $\mathbb{C}$

**Предложение 4.2.** Пусть  $R$  — область целостности,  $f \in R[x]$ ,  $\deg f = d \geq 0$ . Тогда число корней  $f$  в  $R$  не превосходит  $d$ .

**Доказательство.** Индукция по  $d$

База:  $d = 0 \implies f$  ненулевой  $d \implies$  корней нет

Переход:  $d > 0$

$\forall f$  нет корней в  $R \implies$  утверждение выполнено

$\forall f$  есть корни в  $R$ , пусть  $c \in R$  — какой-либо из корней  $f$

$$f(c) = 0 \implies f = (X - c) \cdot g, \text{ где } g \in R[x]$$



$$\deg f = \deg(X - c) + \deg g \implies \deg g = d - 1$$

Пусть  $c_1, \dots, c_l$  — все корни  $g$  в  $R$

По предположению индукции:  $l \leq d - 1$

Утверждение:  $\{c_1, \dots, c_l, c\}$  — все корни  $f$  в  $R$

$$f(c_1) = \dots = f(c_l) = f(c) = 0$$

Предположим  $\exists c' \notin \{c_1, \dots, c_l, c\}$ , такой что  $f(c') = 0$

$\implies (c' - c) \cdot g(c') = 0$  — противоречие с тем, что  $R$  — область целостности

$\implies$  у  $f$  не более  $l + 1 \leq d$  корней в  $R$ .

**Пример.**  $x^2 - 1$  имеет 4 корня в  $\mathbb{Z}/8\mathbb{Z}$  или в  $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$

$$x^2 \equiv 1 \pmod{77} \iff \begin{cases} x^2 \equiv 1 \pmod{7} \\ x^2 \equiv 1 \pmod{11} \end{cases} \iff \begin{cases} x \equiv 1 \pmod{7} \text{ или } x \equiv -1 \pmod{7} \\ x \equiv 1 \pmod{11} \text{ или } x \equiv -1 \pmod{11} \end{cases}$$

**Предложение 4.3** (формальное и функциональное равенство многочленов).

Пусть  $R$  — бесконечная область:  $f, g \in R[x]$

таковы, что  $\forall a \in R : f(a) = g(a)$

Тогда  $f = g$

**Доказательство.**

$h = f - g$ , предположим, что  $h \neq 0 \implies \deg h = d \geq 0 \implies$  у  $h$  есть  $\leq d$  корней.

Но  $\forall a \in R : h(a) = f(a) - g(a) = 0$ ,  $R$  — бесконечная область, противоречие. Так как их не больше чем  $d$ , но  $R$  бесконечно.

**Пример.**  $R = \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ ,  $f = X$ ,  $g = X^3$

$$\forall \alpha \in \mathbb{Z} : \alpha^3 \equiv \alpha \pmod{3} \implies \forall \alpha \in \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} : f(\alpha) = g(\alpha)$$

## 5 Евклидовы области

**Определение 5.1.** Евклидовой областью целостности (евклидовой областью, евклидовым кольцом) называется область целостности  $R$ , для которой существует функция  $\nu : R \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0}$ , называемая *евклидовой нормой*, такая что:

1. Если  $d \mid a$ , то  $\nu(d) \leq \nu(a)$ , причем  $\nu(d) = \nu(a) \iff d \sim a$ .
2. Для любых  $a, b \in R$ ,  $b \neq 0$ : существует представление  $a = bq + r$ , где  $r = 0$  или  $\nu(r) < \nu(b)$ .

*Замечание:* свойство один можно убрать, но доказательства будут сложнее.

**Примеры.**

1.  $R = K[x]$ , ( $K$  — поле), где  $\nu(P) = \deg P$
2.  $R = \mathbb{Z}$ , где  $\nu(a) = |a|$

3.  $R = \mathbb{Z}[i] = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$ , где  $\nu(a + bi) = a^2 + b^2$  (подробнее в книжке Аейрленд, Роузен - «Классическое введение в современную теорию чисел»)

4.  $R = K[[x]]$ , ( $K$  - поле)

$$R^* = \{a_0 + a_1x + a_2x + \dots \mid a_0 \neq 0\}$$

$$\text{ord } f = \min\{j \mid a_j \neq 0\}$$

$$f = x^{\text{ord } f} \cdot (a_j + a_{j+1}x + \dots) \sim x^{\text{ord } f}$$

**Упражнение.** Докажите, что это евклидова область.

5.  $R = \mathbb{Z}_{(5)} = \{\frac{a}{b} \mid a, b \in \mathbb{Z}, 5 \nmid b\}$

**Упражнение.** Докажите, что это евклидова область.

**Лемма 5.1.** Пусть  $R$  - область целостности,  $a, b \in R$ . Тогда  $a \sim b \iff a = \varepsilon b, \varepsilon \in R^*$

**Доказательство.**

« $\Leftarrow$ »:

Пусть  $a = \varepsilon b \implies b$ . Так как  $\varepsilon$  — обратим,  $b = \varepsilon^{-1}a$ .

$$\left. \begin{array}{l} a = \varepsilon b \implies a \mid b \\ b = \varepsilon^{-1}a \implies b \mid a \end{array} \right\} \iff a \sim b$$

« $\Rightarrow$ »:

$$a \sim b \implies \left\{ \begin{array}{l} a \mid b \\ b \mid a \end{array} \right. \implies \left\{ \begin{array}{l} b = \varepsilon a \\ a = \varepsilon' b \end{array} \right. \implies b = \varepsilon \varepsilon' b \implies (\varepsilon \varepsilon' - 1)b = 0 \implies \varepsilon \text{ — обратим.}$$

**Определение 5.2.**  $R$  — коммутативное кольцо,  $I \subset R$  называется *идеалом* в  $R$ , если:

1.  $I \neq \emptyset$
2.  $\forall a, b \in I : a + b \in I$
3.  $\forall a \in I \forall b \in R : ab \in I$

**Примеры.**

1.  $R = \mathbb{Z}, I = 2\mathbb{Z}$
2.  $R = K[X], I = \{f \in R \mid f(0) = 0\}$
3.  $R = C[0, 1]$  (непрерывные функции на отрезке  $[0, 1]$ ),  $I = \{f \in R \mid f(0) = 0\}$

**Определение 5.3.** Пусть  $R$  — коммутативное кольцо,  $r \in R$ . Из свойств кольца очевидно, что  $\langle r \rangle = (r) = \{rs \mid s \in R\}$  — идеал в  $R$ .

Тогда  $(r)$  называется *главным идеалом* порожденный элементом  $r$ .

**Замечание.**  $(r) = (r') \iff r \sim r'$

**Пример.** Пример неглавного идеала:

$$R = \mathbb{Z}[X], \quad I = \{f : 2 \mid f(0)\}$$

**Предложение 5.1.** В евклидовой области все идеалы главные.

**Доказательство.** Пусть  $I$  - идеал в области целостности  $R$ .

Случай  $I = \{0\}$  — тривиален, тогда  $I = (0)$ . Пусть  $I \neq \{0\}$ .

Зафиксируем норму  $\nu$  и рассмотрим  $c \in I$  с минимальной нормой. Докажем, что  $I = (c)$ .

« $\supset$ »:

Так как для любого  $b \in R$  должно быть выполнено  $cb \in I$ , то  $I \supset (c)$ .

« $\subset$ »:

Предположим,  $\exists a \in I \setminus (c)$ . Представим евклидову норму в виде  $a = cq + r$ ,  $q, r \in R$ . Если  $r = 0$ , то  $a \in (c)$  по определению главного идеала. Но иначе  $\nu(r) < \nu(c)$ . Выразим  $r$ :

$$r = a - cq = a + c(-q).$$

Так как  $c \in I$  и  $a \in I$ , то и  $c(-q) \in I$ , следовательно  $r \in I$ . Но  $\nu(r) < \nu(c)$ , что противоречит минимальности нормы  $\nu(c)$ .

**Определение 5.4.** Область целостности, в которых все идеалы главные, называется *областью главных идеалов (ОГИ)*.

**Предложение 5.2.** Пусть  $R$  — область главных идеалов. Тогда:

1.  $a, b \in R \implies$  у  $a$  и  $b$  существует наибольший общий делитель
2. Если  $d$  - наибольший общий делитель  $a$  и  $b$ , то  $d = am + bn$ ,  $m, n \in R$

**Доказательство.**

Можно считать  $a \neq 0$  или  $b \neq 0$ , если  $a = b = 0$ , то  $d = 0$  подходит,  $d \neq 0$  не подходит.

1. Рассмотрим множество  $I = \{am + bn \mid m, n \in R\}$  — идеал в  $R$ . Тогда можно записать  $I = (d)$ .

Заметим, что  $d$  — общий делитель  $a$  и  $b$ .

$$\begin{cases} a = a \cdot 1 + b \cdot 0 \in I = (d) \\ b = a \cdot 0 + b \cdot 1 \in I = (d) \end{cases} \implies \begin{cases} d \mid a \\ d \mid b \end{cases}$$

Покажем, что  $d$  - наибольший общий делитель  $a$  и  $b$ . То есть, что

$$\begin{cases} d' \mid a \\ d' \mid b \end{cases} \xrightarrow{(!)} d' \mid d$$

Так как  $d \in I$ ,  $d = am_0 + bn_0$ ,  $m_0, n_0 \in R$ .

$$\begin{cases} d' \mid a \\ d' \mid b \end{cases} \implies \begin{cases} d' \mid am_0 \\ d' \mid bn_0 \end{cases} \implies d' \mid d.$$

Что и требовалось доказать.

2. Если  $d'$  - наибольший общий делитель  $a$  и  $b$ , то:

$$d' \sim d \in I \implies d' \in I \implies d' = am + bn, \quad m, n \in R.$$

**Замечание.** Наибольший общий делитель в ОГИ обозначают  $(a, b)$ .

**Определение 5.5.** Элементы ОГИ  $a$  и  $b$  называют *взаимно простыми*, если  $(a, b) = 1$ .

**Предложение 5.3.**  $(a, b) = 1 \iff m, n \in R : am + bn = 1$

**Доказательство.** « $\implies$ »: Из предыдущего предложения

$$\text{«}\leftarrow\text{»}: d = (a, b) \implies d \mid a, d \mid b \implies d = 1 \implies d \sim 1$$

## 6 Факториальность области главных идеалов

**Определение 6.1.** Пусть  $R$  - коммутативное кольцо. Элемент  $a$  называется *неприводимым*, если  $a \neq 0$ ,  $a \notin R^*$  и  $a = bc \implies b \in R^* \text{ или } c \in R^*$ .

То есть неприводимый элемент — необратимый элемент, который не раскладывается в произведение двух обратимых.

**Определение 6.2.** *Приводимый элемент* — не 0, не обратный, не неприводимый.

**Примеры.**

1.  $R = K[x]$ , ( $K$  - поле)

$$\deg f = 1 \implies f - \text{неприводимый, так как } f = bc, \deg f = \deg b + \deg c = 1 + 0 = 0 + 1 = 1$$

2.  $\mathbb{R}[x]$ :

$$x^2 - 4 \text{ приводим } x^2 - 4 = (x - 2)(x + 2)$$

$$x^2 + 1 \text{ неприводим, иначе имел бы корень в } \mathbb{R}$$

**Лемма 6.1.** Пусть  $f \in K[x]$  — многочлен степени 2 или 3. Тогда  $f$  приводим  $\iff$  у него есть корень в  $K$ .

**Доказательство.**

« $\implies$ »:

$a$  - корень  $f \xrightarrow{\text{т. Безу}} (X - a) \mid f$ . Рассмотрим разложение  $f = (X - a) \cdot g$ . Так как  $\deg g = \deg f - 1 \geq 1$ , оно нетривиально и  $f$  — приводимый.

« $\impliedby$ »:

Пусть  $f = gh$  и  $\deg g, \deg h \geq 1$ , не умаляя общности,  $\deg g \geq \deg h$ . Тогда:

$$\underbrace{\deg f}_{2 \text{ или } 3} = \deg g + \deg h$$

Есть два стула:  $2 = 1 + 1$  и  $3 = 2 + 1$  (на какой сам сядешь, на какой друга посадишь?)

$$\deg h = 1 \implies h = aX + b \implies h\left(-\frac{b}{a}\right) = 0 \implies f\left(-\frac{b}{a}\right) = 0.$$

Значит  $-\frac{b}{a}$  — корень  $f$ .

**Замечание.** Многочлены большей степени могут быть приводимыми, но не иметь корней в  $K$ .

**Пример.** Рассмотрим  $f = x^4 + x^2 + 1$  в  $\mathbb{R}[x]$ :

$$f = (x^2 + 1)^2 = (x^2 + x + 1)(x^2 - x + 1).$$

**Замечание.**  $R$  — ОГИ

**Лемма 6.2.** Пусть  $p, f \in R$ .  $p$  - неприводимый элемент. Тогда  $p \mid f$  либо  $(p, f) = 1$ .

**Доказательство.**  $(p, f) \mid p \implies (p, f) = 1$  или  $(p, f) = p \implies (p, f) = 1$  или  $p \mid f$ .

**Предложение 6.1.** Пусть  $p$  - неприводимый,  $p \mid ab \implies p \mid a$  или  $p \mid b$ .

**Доказательство.** Пусть  $p \nmid a, p \nmid b \implies (p, a) = (p, b) = 1 \implies$

$$pm + an = 1, pm' + an' = 1 \xrightarrow{\text{перемножим}} p(pmm' + mbn' + anm') + abnn' = 1 \implies p \mid 1$$

**Определение 6.3.** Область целостности  $R$  называют факториальным кольцом, если:

1. Любой  $a \in R$  отличный от 0 и не являющийся обратимым можно представить в виде  $a = p_1 \dots p_s, s \geq 1$  и  $p_1, \dots, p_s$  - неприводимые элементы.
2. Если  $p_1 \dots p_s = q_1 \dots q_t$ , где все  $p_i, q_i$  - неприводимые элементы, то  $s = t$  и после перенумерации  $q_j$  выполнено  $q_1 \sim p_1, \dots, q_s \sim p_s$ .

**Теорема 6.1.** Область главных идеалов является факториальным кольцом.

**Доказательство.** Есть элемент  $a$ , докажем что существует неприводимый  $p$  такой, что  $p \mid a$ .

Возьмем  $a$ , если он неприводимый, то доказывать нечего (т.к.  $a \mid a$ ), иначе:  $a = a_1 b_1$ , где  $a_1, b_1 \notin R^*$  (не являются обратимыми)

$a_1$  — неприводимый, следовательно утверждение доказано, иначе  $a_1 = a_2 b_2$ , где  $a_2, b_2 \notin R^*$

и так далее

Предположим, утверждение неверно. Обозначим  $I = \bigcup_{i=1}^{\infty} (a_i)$

$$x, y \in I \implies x + y \in I$$

$$\text{Можно заметить, что } a_2 \mid a_1, a_3 \mid a_2, \dots \implies (a_1) \subset (a_2) \subset \dots$$

$x \in (a_i), y \in (a_j)$ , не умаляя общности  $i \leq j$

$$x, y \in (a_j) \implies x + y \in (a_j) \subset I$$

$$x \in I \implies x \in (a_i) \text{ для некоторого } i$$

$$a \in R \implies ax \in (a_i) \subset I$$

$$I = (c), c \in I \implies c \in (a_i) \text{ для некоторого } i$$

$$a_{i+1} \in I \implies c \mid a_{i+1}$$

$$a_i \mid c \implies a_i \mid a_{i+1}$$

$$a_i = a_{i+1} \cdot b_{i+1} \implies b_{i+1} \in R^*$$

Значит любой обратимый элемент делится на неприводимый.

$$a \in R, a \neq 0, a \notin R^*$$

$a$  неприводимый  $\implies$  все доказано, иначе  $a = p_1 a_1$ ,  $p_1 \notin R^*$ ,  $p_1$  — неприводимый

$a_1$  неприводимый  $\implies$  все доказано, иначе  $a_1 = p_2 a_2$ ,  $p_2 \notin R^*$ ,  $p_2$  — неприводимый

и так далее

$$\text{Можно заметить, что } a_2 \mid a_1, a_3 \mid a_2, \dots \implies (a_1) \subset (a_2) \subset \dots$$

Аналогично доказывается, что существуют  $a_i \sim a_{i+1}$  ассоциированные  $\implies p_{i+1} \in R^*$ . Противоречие.

Единственность разложения:

Пусть  $p_1 \dots p_s = q_1 \dots q_t$ , где все  $p_i, q_i$ , не умаляя общности  $s \leq t$

Индукция по  $S$

База:  $s = 1$

$$p_1 = q_1 \dots q_t. p_1 \text{ — неприводимый} \implies t = 1, q_1 = p_1.$$

Переход:  $s > 1$

$$p_s \mid (p_1 \dots p_s) \implies p_s \mid (q_1 \dots q_t) \implies \exists j : p_s \mid q_j$$

Перенумеруем, так чтобы  $j = t$ .  $q_t = p_s \cdot \varepsilon$ , но  $q_t$  неприводим  $\implies \varepsilon \in R^*$

$$p_1 \dots p_s = q_1 \dots q_{t-1} \cdot \varepsilon p_s \implies p_1 \dots p_{s-1} = q_1 \dots q_{t-1} \cdot \underbrace{\varepsilon q_1}_{\text{неприводимый}} \cdot q_2 \dots q_{t-1}$$

По индукционному предположению  $p_1 \dots p_{s-1}$  совпадает с  $(\varepsilon q_1) \cdot q_2 \dots q_{t-1}$  с точностью до порядка и ассоциированности.

**Примеры.**

1.  $R$  — факториальное кольцо  $\implies R[X]$  — факториальное кольцо.
2.  $\mathbb{Z}[X]$  — факториальное кольцо.
3.  $K[X][Y] = K[X, Y] \implies K[X, Y]$  — факториальное кольцо.

## 7 Кратные корни и производные

**Определение 7.1.** Пусть  $f \in R[x]$  и  $f \neq 0$ . Пусть  $a \in R$  — корень.

$(X - a) \mid f$  по теореме Безу.

Наибольший  $n$ , такой что  $(X - a)^n \mid f$ , называется кратностью корня  $a$ . Можно заметить, что  $n \leq \deg f$ , поэтому он всегда существует.

Корни кратности 1 называются простыми корнями  $f$ ,

корни кратности  $\leq 2$  называются кратными корнями  $f$ ,

корни кратности 2 — двойными, 3 — тройными

**Теорема 7.1.** Пусть  $K$  поле,  $f \in K[X]$ ,  $d = \deg f > 0$

$a_1, \dots, a_s$  — его корни,  $n_1, \dots, n_s$  — их кратности.

Тогда  $n_1 + \dots + n_s \leq d$ .

**Доказательство.** Разложим  $f$  на неприводимые множители.

$X - a_j$  — неприводимые

$$f = (X - a_1)^{m_1} \dots (X - a_s)^{m_s} \cdot g, \quad g \in K[x]$$

$$(X - a_1) \nmid g, \dots, (X - a_s) \nmid g$$

$$m_1 \leq n_1, \dots, m_s \leq n_s$$

Предположим, при некотором  $j$ :  $n_j > m_j \implies$

$$(X - a_j)^{m_j+1} \mid f \implies (X - a_j)^{m_j+1} \cdot h = (X - a_1)^{m_1} \dots (X - a_s)^{m_s} \cdot g \implies$$

$$(X - a_j) \cdot h = (X - a_1)^{m_1} \dots \widehat{(X - a_j)^{m_j}} \dots (X - a_s)^{m_s} \cdot g \implies$$

$$(X - a_j) \mid (X - a_1)^{m_1} \dots \widehat{(X - a_j)^{m_j}} \dots (X - a_s)^{m_s} \cdot g \implies$$

Очевидно,  $(X - a_j) \mid (X - a_i)$ ,  $(i \neq j)$ .

$(X - a_j) \nmid g$  — противоречие.

Т.о.  $m_j = n_j, j = 1, \dots, s$ .

$$d = \deg f = m_1 + \dots + m_s + \underbrace{\deg g}_{\geq 0} \geq n_1 + \dots + n_s$$

**Определение 7.2.** Пусть  $f \in K[X]$ ,  $f = a_n X^n + a_{n-1} X_{n-1} + \dots + a_1 X_1 + a_0$

Его производной будет называться многочлен  $f' \in K[X]$ ,  $f' = n a_n X_{n-1} + (n-1) a_{n-1} X_{n-2} + \dots + a_1$

**Предложение 7.1.**

1.  $(f + g)' = f' + g'$
2.  $(fg)' = f'g + fg'$
3.  $(f^n)' = n f^{n-1} f'$

**Доказательство.**

1. лёгкая непосредственная проверка (сначала очевидно, потом тривиально)
2. Пусть  $f, g$  — мономы, то есть  $f = aX^n, g = bX^m$

$$(fg)' = (abX^{n+m})' = (n+m)abX^{n+m-1} = n \cdot abX^{n+m-1} + m \cdot abX^{n+m-1} =$$

$$\underbrace{naX^{n-1}}_{f'} \cdot \underbrace{bX^m}_g + \underbrace{aX^n}_f \cdot \underbrace{mbX^{m-1}}_{g'}$$

$$f = \sum f_i, \quad g = \sum g_i, \quad f_i, g_i \text{ — мономы}$$

$$(fg)' = \left( \sum_{i,j} f_i g_j \right)' = \sum_{i,j} (f_i g_j)' = \sum_{i,j} (f'_i g_j + f_i g'_j) = \sum_{i,j} f'_i g_j + \sum_{i,j} f_i g'_j = \sum_i f'_i \sum_j g_j + \sum_i f_i \sum_j g'_j = f'g + fg'$$

### 3. Индукция по $n$

База:  $n = 1$

$$f' = f'$$

Переход:  $n > 1$

$$(f^n)' = (f^{n-1} \cdot f)' = (f^{n-1})' \cdot f + f^{n-1} \cdot f' \stackrel{\text{ИП}}{=} ((n-1) \cdot f' \cdot f^{n-2}) \cdot f + f^{n-1} \cdot f' = (n-1)f' \cdot f^{n-1} + f' \cdot f^{n-1} = n f^{n-1} f'$$

**Предложение 7.2.**  $K$ -поле.  $f \in K[X], f \neq 0, a \in K$

Тогда  $a$  кратный корень  $f \iff f(a) = f'(a) = 0$

**Доказательство.**

« $\implies$ »:

$a$  кратный корень  $f \implies (X-a)^2 \mid f \implies f = (X-a)^2 \cdot g, g \in K[X]$

$$f' = ((X-a)^2)' \cdot g + (X-a)^2 \cdot g' = 2(X-a) \cdot g + (X-a)^2 \cdot g' \implies f'(a) = 0$$

« $\impliedby$ »:

Пусть  $f(a) = f'(a) = 0$ .

$$f(a) = 0 \stackrel{\text{т.Безу}}{\implies} f = (X-a) \cdot g, g \in K[X] \implies$$

$$f' = g + (X-a)g'$$

$$f'(a) = 0 \implies g(a) = 0 \implies (X-a) \mid g \implies (X-a)^2 \mid f \implies a \text{ кратный корень } f$$

**Следствие.**  $K$ -поле.  $f \in K[X], f \neq 0, a \in K$

Пусть  $D = (f, f')$

Тогда  $a$  кратный корень  $f \iff D(a) = 0$

**Доказательство.**  $a$  кратный корень  $\iff f(a) = f'(a) = 0 \stackrel{\text{т.Безу}}{\iff} (X-a) \mid f \text{ и } (X-a) \mid f' \iff (X-a) \mid D \stackrel{\text{т.Безу}}{\iff} D(a) = 0$

**Предложение 7.3.**  $K$ -поле. Характеристика 0, то есть  $\underbrace{1 + \dots + 1}_n \neq 0, \forall n \in \mathbb{N}$

$f \in K[X], a \in K$  — корень  $f$  кратности  $s \geq 2$ .

Тогда  $a$  — корень  $f'$  кратности  $s-1$

**Доказательство.**  $f = (X-g)^s g$

$$(X-a) \nmid g \stackrel{\text{т.Безу}}{\implies} g(a) \neq 0$$

$$f' = ((X-a)^s)' \cdot g + (X-a)^s \cdot g' = s(X-a)^{s-1} \cdot g + (X-a)^s \cdot g' = (X-a)^{s-1} \cdot h, \text{ где } h = s \cdot g + (X-a)g'$$

$$h(a) = s \cdot g(a) \neq 0 \implies (X-a) \nmid h$$



## 8 Формула Тейлора

**Предложение 8.1.**  $K$  - поле,  $f, g \in K[x]$ ,  $f \neq 0$ ,  $d = \deg(g) \geq 1$ .

Тогда  $f$  можно представить единственным образом:

$$f = h_n g^n + \dots + h_1 g + h_0,$$

где  $n \geq 0$ ,  $h_i \in K[x]$ ,  $h_n \neq 0$ ,  $\deg(h_i) < d$ ,  $i = 0, \dots, n$ .

**Доказательство.** Индукция по  $l = \deg f$ .

$$l < d: n = 0, h_0 = f.$$

$$l \geq d: f = gq + r, \deg(r) < d, q \neq 0.$$

$$\deg gq \geq \deg g > \deg r$$

$$\implies \deg f = \deg gq \implies \deg q = l - d$$

По ИП:  $q = h_n g^n + \dots + h_1 g + h_0$ ,  $h_n \neq 0$ ,  $\deg(h_i) < d$ ,  $i = 0, \dots, n$ .

$$\implies f = h_n g^{n+1} + \dots + h_0 g + r.$$

Единственность.

Индукция по  $l = \deg f$ .

$$l < d:$$

$$\deg h_n g^n \geq nd > \deg h_i g^i, i = 0, \dots, n-1 \implies \deg f = \deg h_n g^n \implies \deg h_n g^n < d.$$

$$nd + d - 1 \geq l \geq nd \implies n - \text{неполное частное при делении } l \text{ на } d.$$

$$\text{База } l < d, n = 0 \implies h_0 = f.$$

Предположим, то есть еще разложение  $f = \hat{h}_n g^n + \dots + \hat{h}_1 g + \hat{h}_0$ .

$$f = g(h_n g^{n-1} + \dots + h_1) + h_0 = g(\hat{h}_n g^{n-1} + \dots + \hat{h}_1) + h_0, \deg h_0, \deg \hat{h}_0 < d$$

$$\text{Тогда } h_0 = \hat{h}_0.$$

$$\text{По ИП: } \deg f_1 = h_n g^{n-1} + \dots + h_1 < \deg f \implies h_i = \hat{h}_i, i = 1, \dots, n-1.$$

**Предложение 8.2.**  $\text{char } K = 0$ ,  $f \in K[x]$ ,  $f \neq 0$ ,  $d = \deg(f) = n \geq 0$ ,  $a \in K$ .

$$\implies f = \sum_{i=0}^n \frac{f^{(i)}(x-a)}{i!} (x-a)^i, f_i \in K[x], \deg(f_i) < d, i = 0, \dots, n.$$

Напоминание:  $\text{char } K = \min\{l \mid \underbrace{1+1+\dots+1}_{l \text{ раз}} = 0\}$ .

**Доказательство.**  $f = \sum_{i=0}^n c_i (x-a)^i$ ,  $c_i \in K$ ,  $i = 0, \dots, n$ ,  $c_n \neq 0$ .

$$f^{(i)} = \sum_{j=i}^n c_j j! (x-a)^{j-i}, i = 0, \dots, n.$$

$$f^{(j)}(a) = c_j j!$$

$$c_i = \frac{f^{(i)}(a)}{i!}.$$

## 9 Алгебраически замкнутые поля. Каноническое разложение над $\mathbb{C}$ и над $\mathbb{R}$ .

**Определение 9.1.** Поле  $K$  называется *алгебраически замкнутым*, если любой  $f \in K[x]$  имеет корень в  $K$ .

**Теорема 9.1.** Основная теорема алгебры.

$\mathbb{C}$  алгебраически замкнуто.

**Доказательство.** Не будет в курсе.

Идея доказательства:

$$f = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0, \quad z \in \mathbb{C}, \quad f(z) = 0.$$

$$r > \max\{|a_0|, \dots, |a_n|\}.$$

$$f(r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))) = r^n(\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi)) + g(r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))).$$

$$|g(r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi)))| < r^{n-1}(|a_{n-1}| + \dots + |a_1| + |a_0|) < r^n.$$

$$\implies \Delta \arg f(r(\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))) = 2\pi n.$$

$$D = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq r\}$$

$\xRightarrow{\text{Топология}} f(D)$  - односвязная область.

$$\implies 0 \in f(D) \implies \exists z \quad f(z) = 0.$$

**Замечание.** Любое поле можно вложить в алгебраически замкнутое поле.

Всегда есть минимальное такое поле.

Для  $\mathbb{Q}$  это поле алгебраических чисел.

Алгебраическое число - комплексный корень многочлена над  $\mathbb{Q}$ .

**Предложение 9.1.**  $K$  - алгебраически замкнутое поле,  $f \in K[x]$ .

Тогда  $f$  - неприводим  $\iff \deg f = 1$ .

**Доказательство.** Все многочлены  $\deg = 1$  неприводимы.

$$\deg f \neq 1 \implies \exists x \in K : f(x) = 0$$

$$\xRightarrow{\text{Т. Безу}} (x - c) \mid f$$

Таким образом если  $f \in K[x], \deg f \geq 1$ , то его каноническое разложение имеет вид:

$$f = c_0 \prod_{i=1}^n (x - c_i)^{d_i}, \text{ где } c_i \in K, d_i \in \mathbb{Z}_+.$$

**Предложение 9.2.**  $f \in \mathbb{R}[x], a \in \mathbb{C}\mathbb{C}$  - его корень.

Тогда  $\bar{a}$  - корень  $f$  той же кратности.

**Доказательство.**  $l$  - кратность  $a$ .

$$\text{В } \mathbb{C}[x] \quad f = (x - a)^l g, \quad g \in \mathbb{C}[x], \quad g(a) \neq 0.$$

Пусть  $g = b_n x^n + \dots + b_1 x + b_0$ .

Рассмотрим  $\bar{g} = \bar{b}_n x^n + \dots + \bar{b}_1 x + \bar{b}_0$ .

Тогда  $f = \bar{f} = \overline{(x - a)^l} \bar{g} = (x - \bar{a})^l \bar{g} \implies f(\bar{a}) = 0$

$g(a) = \overline{g(\bar{a})} \implies x - \bar{a} \nmid \bar{g}$

$\implies \bar{a}$  - корень  $f$  кратности  $l$

$\implies$  все корни входят парами

$\implies f = r_0 \left( \prod_{i=1}^n (x - r_i)^{d_i} \right) \cdot \left( \prod_{i=1}^m ((x - c_i)(x - \bar{c}_i))^{p_i} \right)$ , где  $r_i \in \mathbb{R}$ ,  $d_i \in \mathbb{Z}_+$ ,  $c_i \in \mathbb{C}$ ,  $p_i \in \mathbb{Z}_+$ .

$\implies f = r_0 \left( \prod_{i=1}^n (x - r_i)^{d_i} \right) \cdot \left( \prod_{i=1}^m B_i^{p_i} \right)$ ,  $B_i$  - квадратичные многочлены, неприводимые в  $\mathbb{R}$ .

**Предложение 9.3.** Унитарные неприводимые многочлены в  $\mathbb{R}$  - это:

1.  $x - a$ ,  $a \in \mathbb{R}$

2.  $x^2 + ax + b$ ,  $a, b \in \mathbb{R}$ ,  $b^2 - 4ac < 0$

**Доказательство.** С многочленами степени 1 и 2 все ясно.

Если степень многочлена больше 2, то справедливо разложение 9.2, значит он приводим.