

Алгебра

Лектор: Жуков Игорь Борисович

Содержание

Элементы теории чисел	1
1 Делимость	1
2 Отношение эквивалентности и разбиение на классы	1
3 Сравнение по модулю	2
4 Кольцо классов вычетов	2
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
Комплексные числа	15
12 Построение поля комплексных чисел	15
13 Тригонометрическая форма комплексного числа	17
14 Корни из комплексных чисел	20
15 Темпер	23

Элементы теории чисел

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. a и b ассоциированы, если $a \mid b, b \mid a \implies a = \pm b$
7. a, a' и b, b' — ассоциированы, тогда $a \mid b \iff a' \mid b'$
8. $k \neq 0, ka \mid kb \iff a \mid b$

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, тогда $a \sim b \iff \exists i : a, b \in M_i$.

Доказательство.

рефлексивность, симметричность — очевидны

транзитивность: $a \sim b, b \sim c \implies \exists i, j : a, b \in M_i \text{ и } b, c \in M_j$

$b \in M_i \cap M_j \iff M_i \cap M_j \neq \emptyset \implies i = j \implies a, c \in M_i \implies a \sim c$

Теорема 2.2. \sim — отношение эквивалентности на M . Значит \exists 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.

$[a] = \{b \in M \mid a \sim b\}$ — класс, $a \in M$

$\forall a_1, a_2 \in M : [a_1] \cap [a_2] = \emptyset$ или $[a_1] = [a_2]$

$[a_1] \cap [a_2] \neq \emptyset \implies \exists x \in [a_1] \cap [a_2]$

$x \in [a_1], x \in [a_2] \implies x \sim a_1, x \sim a_2 \implies a_2 \sim a_1$

$$[a_2] \subset [a_1], c \in [a_2] \implies c \sim a_2 \implies c \sim a_1 \implies c \in [a_1]$$

$$[a_1] \subset [a_2], c \in [a_1] \implies c \sim a_1 \implies c \sim a_2 \implies c \in [a_2]$$

Значит $[a_1] = [a_2]$

$$I = \{[a] \mid a \in M\}$$

$$\forall \mathfrak{A}, \mathfrak{B} \in I : \mathfrak{A} \cap \mathfrak{B} = \emptyset$$

$$a_1, a_2 \in \mathfrak{A} \implies [a_1] = \mathfrak{A} = [a_2] \implies a_2 \in [a_1] \implies a_2 \sim a_1$$

$$a_1 \in \mathfrak{A}, a_2 \in \mathfrak{B} \implies \neg(a_1 \sim a_2), \text{ так как иначе } a_1 \in [a_2] \implies \mathfrak{B} \in \mathfrak{A} \implies \mathfrak{A} \cap \mathfrak{B} \neq \emptyset$$

Определение 2.3. Фактор-множество по отношению эквивалентности \sim — множество I , обозначим его как 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. $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} = \{\overline{0}, \overline{1}, \dots, \overline{m-1}\}$
2. $|\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}| = m$

Доказательство.

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

$$a) a \geq 0, \exists r - \text{наименьшее число, такое что } r \geq 0, a \equiv_m r$$

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

Значит $r < m$, то есть r — искомое.

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

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

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

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

Следствие.

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

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

$$2. 0 \leq r < b$$

Доказательство.

Существование:

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

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

Единственность:

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

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 :

$$\bullet \bar{a} + \bar{b} = \overline{a + b}$$

$$\bullet \bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{a \cdot b}$$

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

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

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

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. $\forall x \in \mathbb{R} \exists y \in \mathbb{R} : x + y = n \implies n$ — 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 ":

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

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

" \supset ":

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

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

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

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

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

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 $d_0 = ax_0 + by_0$

$$d \text{ ассоциирован с } d_0 \implies d = d_0\mathbb{Z}, z \in \mathbb{Z} \implies d = a(x_0z) + b(y_0z)$$

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

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

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. $ax \equiv_m ay, a \perp m \implies x \equiv_m y$.
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. $m \mid (ax - ay), a \perp m \implies m \mid (x - y) \implies x \equiv_m y$.
6. $d \mid a, d \mid b \implies a = da', b = db' : a', b' \in \mathbb{Z}$
 $d = am + bn, m, n \in \mathbb{Z}$
 $d = 0 \implies a' = b' = 1 = da'm + db'n$

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

7 Линейные диофантовы уравнения

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

Для решения нужно найти пару $(x, y) \in \mathbb{Z}^2 : ax + by = c$.

Пример. $12x + 21y = 5$ — уравнение не имеет решений.

Если $\gcd(a, b) \mid c$, то решение существует, иначе — нет.

TODO: нужно доделать параграф

8 Простые числа

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

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

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

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 (≥ 2), для которого такого представления нету.

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

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

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

Единственность:

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$2. \text{"} \Rightarrow \text{"}: x \equiv_{m_1 m_2} x_0 \implies \begin{cases} x \equiv_{m_1} x_0 \\ x \equiv_{m_2} x_0 \end{cases} \implies \begin{cases} x \equiv_{m_1} a_1 \\ x \equiv_{m_2} a_2 \end{cases}$$

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

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

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

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

Доказательство. Проверим корректность:

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

$$\varphi([a]_{m_1 m_2} + [b]_{m_1 m_2}) = \varphi([a + b]_{m_1 m_2}) = \varphi([a + b]_{m_1}, [a + b]_{m_2}) =$$

$$\varphi([a]_{m_1} + [a]_{m_2}) + \varphi([b]_{m_1} + [b]_{m_2}) = \varphi([a]_{m_1 m_2}) + \varphi([b]_{m_1 m_2})$$

Для умножения аналогично.

Проверим сюръективность φ

$$X = ([a_1]_{m_1}, [a_2]_{m_2})$$

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

про сюръективность \implies биекция:

$$|Y| = |Z| < \infty$$

$$\varphi : Y \rightarrow Z$$

Тогда φ инъективна $\iff \varphi$ сюръективна

что-то про принцип Дирихле и готово)

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.

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

$$\exists b \in \mathbb{Z} : ab \equiv 1 \pmod{m} \iff$$

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

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

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}_{p^r} — поле из n элементов $\iff n = p^r$, $p \in \mathbb{P}$, $r \in \mathbb{N}$

(хз что это)

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 11.2. $\exists p \in \mathbb{P}$, $r \in \mathbb{N}$.

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

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

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

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

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

Проверка корректности:

$$[a]_{mn} = [a']_{mn} \implies ([a]_m, [a]_n) = ([a']_m, [a']_n)?$$

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

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

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

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

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

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

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.

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

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. $\exists m \in \mathbb{N}, a \in \mathbb{Z}, (a, m) = 1 \implies a^{\varphi(m)} \equiv_m 1$ — 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

Теорема 11.2. (Малая теорема Ферма)

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

Доказательство.

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

$$(a, p) \neq 1 \implies a \equiv 0 \pmod{p} \implies a^p \equiv 0 \pmod{p} \implies a^p \equiv a \pmod{p}$$

Теорема 11.3. (Теорема Вильсона)

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

Доказательство.

В $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^*$

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

$$A^2 = \bar{1} \iff A^2 - \bar{1}^2 = \bar{0} \iff (A - \bar{1})(A + \bar{1}) = \bar{0} \xLeftrightarrow{\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}-field} A - \bar{1} = \bar{0}, A + \bar{1} = \bar{0} = \prod_{A^2=\bar{1}}$$

$$p \neq 2 \implies \bar{1} \cdot \overline{-1} = \overline{-1}$$

$$p = 2 \implies \bar{1} = \overline{-1}$$

Комплексные числа

12 Построение поля комплексных чисел

Определение 12.1. $\mathbb{C} = \mathbb{R} \times \mathbb{R} = \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\}$

Определение 12.2.

- 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 12.1. $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ - 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 12.3. \mathbb{C} — поле комплексных чисел.

Определение 12.4. $c \in \mathbb{C}$ — комплексное число.

Предложение 12.2. $\mathbb{R}' = \{(a, 0) \mid a \in \mathbb{R}\}$

\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. φ — 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 12.5. $z = a + bi$ — 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 12.6. $z = a + bi$ — комплексное число. $\bar{z} = a - bi$ — сопряженное к z .

Определение 12.7. Автоморфизм — изоморфизм на себя.

Отступление про отображения

Определение 12.8. $id_M : M \rightarrow M$, $x \mapsto x$ — тождественное отображение на M .

Определение 12.9. $\alpha : M \rightarrow N$, $\beta : N \rightarrow P$ — отображения

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

Определение 12.10. $\alpha : M \rightarrow N$ — отображение

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

Предложение 12.3. У отображения $\alpha : M \rightarrow N$ есть обратное отображение, если и только если α — 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 α — биекция, назовем $\beta : N \rightarrow M$ — обратный, 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 12.4. $\sigma : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$, $z \mapsto \bar{z}$ — автоморфизм.

Доказательство.

σ — 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

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

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

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

13 Тригонометрическая форма комплексного числа

Определение 13.1. $a + bi = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$

$$a = r \cos \varphi$$

$$b = r \sin \varphi$$

Определение 13.2. Модулем комплексного числа $z = a + bi \in \mathbb{C}$ назовем:

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

Предложение 13.1.

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 13.3. Пусть $z \in \mathbb{C}$. Аргументом z назовем такое $\varphi \in \mathbb{R}$,
что $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$

Предложение 13.2.

1. Если $z = 0$, то любой $\varphi \in \mathbb{R}$ - аргумент z
2. Если $z \neq 0$, то:
 - (a) аргумент существует
 - (b) если φ_0 - аргумент z , то φ - 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 13.4. $\arg(z) = \varphi$ означает φ - 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 13.3.

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: $n - 1 \rightarrow n$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

14 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 $k, l : z_k = z_l$?

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

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

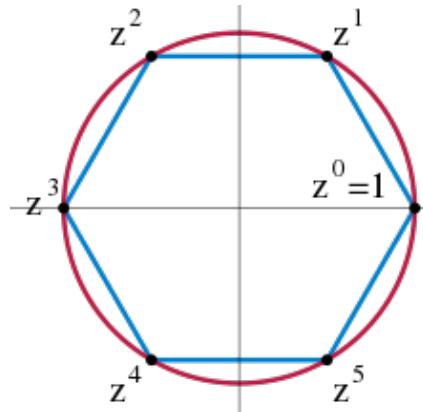
Таким образом, мы доказали:

Теорема 14.1. $\exists n \in \mathbb{N}, w \in \mathbb{C}$

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 14.1. 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 14.1. 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 μ_n — группа:

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

$$\text{Лемма 14.2. } \xi_k = \xi_1^k$$

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

Определение 14.2. 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 14.3. Группа G называется циклической, если $\exists g \in G : G = \{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$

Пишут: $G = \langle g \rangle$

Определение 14.4. 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 14.5. 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 14.1. 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 14.6. Первообразным корнем из 1 степени n называется такой элемент $z \in \mathbb{C}^*$, что $\text{ord } z = n$

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

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

ξ_2 — первообразный корень из 1 степени 3

15 Temp