

Математический анализ-1

Лектор: Подольский Владимир Евгеньевич

10 ноября 2024 г.



Конспект: Кирилл Яковлев, 108 группа

tg: @fourkenz

Содержание

1	Элементы теории множеств	4
1.1	Условности и обозначения	4
1.2	Операции над множествами	5
1.3	Декартово произведение множеств	5
1.4	Отображения	5
1.5	Операции над множествами (продолжение)	6
2	Действительные числа	7
2.1	Натуральные числа. Аксиоматика Пеано	7
2.2	Отношение порядка и принцип наименьшего элемента	7
2.3	Арифметические операции	8
2.4	Целые числа	9
2.5	Рациональные числа	9
2.6	Упорядоченные и архимедовы поля	10
2.7	Действительные числа. Аксиома полноты	11
2.8	Модели действительных чисел	11
2.8.1	Модель бесконечных десятичных дробей	11
2.8.2	Сечения \mathbb{Q}	12
2.8.3	Геометрическая модель числовой прямой	12
2.9	Принципы полноты	13
2.9.1	Верхние и нижние грани множества	13
2.9.2	Принцип полноты Вейерштрасса	14
2.9.3	Принцип вложенных отрезков (принцип полноты Кантора)	15
2.10	Неравенство Бернулли и Бином Ньютона	16
2.11	Отношение эквивалентности. Равномощные множества	17
2.12	Теорема Кантора и аксиома выбора	18
3	Топология \mathbb{R}	20
4	Числовые последовательности	24
4.1	О-символика. Бесконечно малые и бесконечно большие последовательности	25
4.2	Монотонные последовательности	28
4.3	Число e	28
4.4	Сходимость последовательностей и частичные пределы	29

5	Предел функции	31
5.1	О-символика	33
6	Непрерывные функции	35
6.1	Локальные свойства непрерывных функций	35
6.2	Глобальные свойства непрерывных функций	36
6.3	Элементарные функции	38
7	Замечательные пределы	39

1 Элементы теории множеств

1.1 Условности и обозначения

Определение. Кванторами будем называть символы, заменяющие слова в выражениях.

Замечание. Пока что кванторы не подразумевают логические операции, мы будем использовать их только для более удобной и формальной записи.

- \forall - квантор всеобщности
- \exists - квантор существования
- $!$ - квантор единственности
- Запись $A \Rightarrow B$ обозначает, что из высказывания A , следует высказывание B .
- Запись $A \Leftrightarrow B$ обозначает, что высказывание A равносильно высказыванию B .
- Запись $a \in A$ означает, что a является элементом множества A , отрицанием такой записи будет $a \notin A$
- Если x - объект, а P - свойство, то запись $\{x : P(x)\}$ означает класс всех объектов обладающих свойством P .

Определение. Множество не содержащее ни одного элемента называется пустым и обозначается \emptyset .

Определение. Множество A' является подмножеством множества A , если $\forall a : a \in A' \Rightarrow a \in A$. Запись $A' \subset A$ обозначает, что A' является подмножеством A .

Определение. Для любого множества A выполнено:

1. $\emptyset \subset A$.
2. $A \subset A$.

Определение. Если $A \subset B$ и $A \neq B$, то A называется собственным подмножеством множества B .

1.2 Операции над множествами

Определение. Множество $C = A \cup B$ называется объединением множеств A и B , если $\forall a : (a \in A \Rightarrow a \in C)$ и $\forall b : (b \in B \Rightarrow b \in C)$, а также $\forall c : c \in C \Rightarrow (c \in A \text{ или } c \in B)$.

Определение. Множество $C = A \cap B$ называется пересечением множеств A и B , если $\forall c : c \in C \Rightarrow (c \in A \text{ и } c \in B)$, а также $\forall c : (c \in A \text{ и } c \in B) \Rightarrow c \in C$.

Определение. Множество $C = A \setminus B$ называется разностью множеств A и B , если $\forall c : (c \in A \text{ и } c \notin B) \Rightarrow c \in C$, а также $\forall c : c \in C \Rightarrow (c \in A \text{ и } c \notin B)$.

Утверждение. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$.

Доказательство. $a \in (A \cup (B \cap C)) \Leftrightarrow a \in A \text{ или } a \in (B \cap C) \Leftrightarrow a \in A \text{ или } (a \in B \text{ и } a \in C) \Leftrightarrow (a \in A \text{ или } a \in B) \text{ и } (a \in A \text{ или } a \in C)$. \square

Утверждение. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$.

Доказательство. $a \in (A \cap (B \cup C)) \Leftrightarrow a \in A \text{ и } a \in (B \cup C) \Leftrightarrow a \in A \text{ и } (a \in B \text{ или } a \in C) \Leftrightarrow (a \in A \text{ и } a \in B) \text{ или } (a \in A \text{ и } a \in C)$. \square

1.3 Декартово произведение множеств

Определение. Множество A называется одноэлементным, если $\exists a \in A$ такое, что $A \setminus \{a\} = \emptyset$.

Определение. Множество A называется двухэлементным, если $\exists a \in A$ такое, что $A \setminus \{a\}$ - одноэлементное.

Определение. Пусть $x \in X, y \in Y$. Упорядоченной парой называется двухэлементное множество $\{x, \{x, y\}\}$, упорядоченную пару обозначают (x, y) .

Определение. Множество всех упорядоченных пар (x, y) называется декартовым произведением множеств X и Y , где $x \in X, y \in Y$. Декартово произведение обозначают $X \times Y$.

1.4 Отображения

Определение. Пусть X, Y - множества. Подмножество $f \subset X \times Y$ такое, что $\forall (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in f : y_1 \neq y_2 \Rightarrow x_1 \neq x_2$ называется отображением из X в Y , и обозначается $f : X \rightarrow Y$.

Замечание. Запись $(x, y) \in f$ часто заменяют на $y = f(x)$.

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$. Множество $\{x : \exists (x, y) \in f\} = D_f$ называется областью определения функции f .

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$. Множество $\{y : \exists (x, y) \in f\} = R_f$ называется областью значений функции f .

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$. f - инъекция $\Leftrightarrow \forall (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in f : x_1 \neq x_2 \Rightarrow y_1 \neq y_2$.

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$. f - сюръекция $\Leftrightarrow Y = R_f$

Замечание. Обычно используют определение f - сюръекция $\Leftrightarrow \forall y \in Y \exists x \in X : y = f(x)$.

Определение. f - биекция $\Leftrightarrow f$ - инъекция и f - сюръекция.

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$, $X_1 \subset X$. Множество $\{(x, y) \in f : x \in X_1\} = f|_{X_1}$ называется ограничением f на X_1 .

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$, $X_1 \subset X$. Множество $f(X_1) = \{y \in Y : \exists x \in X_1 : (x, y) \in f\}$ называют образом множества X_1 .

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$, $Y_1 \subset Y$. Множество $f^{-1}(Y_1) = \{x \in X : \exists y \in Y_1 : (x, y) \in f\}$ называют полным прообразом множества Y_1 .

Определение. Пусть $f : X \rightarrow Y$. Если $\forall y \in R_f : f^{-1}(y)$ - одноэлементное множество, то подмножество $f^{-1} \subset Y \times X = \{(y, x)\}$ является отображением и называется обратным отображением к f . Если у отображения f существует обратное отображение f^{-1} , то оно называется обратимым.

Утверждение. f - обратимое $\Leftrightarrow f$ - биекция.

Замечание. Иногда $f : X \rightarrow Y$ записывают в виде y_x и называют индексацией y элементами x .

1.5 Операции над множествами (продолжение)

Утверждение. $\bigcup_{\alpha} (A \setminus A_{\alpha}) = A \setminus (\bigcap_{\alpha} A_{\alpha})$.

Доказательство. $a \in \bigcup_{\alpha} (A \setminus A_{\alpha}) \Leftrightarrow (a \in A \text{ и } a \notin A_{\alpha_1}) \text{ или } \dots \text{ или } (a \in A \text{ и } a \notin A_{\alpha_n}) \Leftrightarrow a \in A \text{ и } (a \notin A_{\alpha_1} \text{ и } \dots \text{ и } a \notin A_{\alpha_n}) \Leftrightarrow a \in A \setminus (\bigcap_{\alpha} A_{\alpha})$. \square

Утверждение. $\bigcap_{\alpha} (A \setminus A_{\alpha}) = A \setminus (\bigcup_{\alpha} A_{\alpha})$.

Доказательство. $a \in \bigcap_{\alpha} (A \setminus A_{\alpha}) \Leftrightarrow (a \in A \text{ и } a \notin A_{\alpha_1}) \text{ и } \dots \text{ и } (a \in A \text{ и } a \notin A_{\alpha_n}) \Leftrightarrow a \in A \text{ и } (a \notin A_{\alpha_1} \text{ или } \dots \text{ или } a \notin A_{\alpha_n}) \Leftrightarrow a \in A \setminus (\bigcup_{\alpha} A_{\alpha})$. \square

2 Действительные числа

2.1 Натуральные числа. Аксиоматика Пеано

Определение. (Аксиоматика Пеано)

1. В множестве \mathbb{N} $\forall n \in \mathbb{N}, \exists!$ элемент называемый следующим и обозначаемый как $S(n)$.
2. $\forall n \in \mathbb{N} \exists$ не более одного элемента \mathbb{N} , для которого n - следующий.
3. $\exists!$ элемент \mathbb{N} не являющийся следующим ни для какого элемента. Этот элемент обозначается 1 и называется единицей.
4. (Аксиома индукции) Пусть $M \subset \mathbb{N}$, такое, что $1 \in M$ и $\forall m \in M : S(m) \in M$. Тогда $M = \mathbb{N}$.

Множество удовлетворяющее этим аксиомам называется множеством натуральных чисел и обозначается \mathbb{N} .

Определение. Рассмотрим множество X . Если для некоторого $n \in \mathbb{N} \exists$ биекция $\varphi : X \rightarrow \{1, \dots, n\}$, то X называется n -элементным, или говорят, что количество элементов в X равно n . Тот факт что множество X - n -элементное обозначается как $|X| = n$ или $card X = n$.

Замечание. По определению считаем, что $card(\emptyset) = 0$.

Определение. Все множества, количество элементов которых равно какому-то натуральному числу или нулю, называются конечными. Все остальные множества называются бесконечными.

2.2 Отношение порядка и принцип наименьшего элемента

Определение. $R \subset X \times Y$ называется отношением между элементами X и Y . Обозначают xRy , если $(x, y) \in R$.

Определение. Отношение R называется отношением порядка, если $\forall x \in X, \forall y \in Y$ выполнено:

1. xRy или yRx .
2. $(xRy \text{ и } yRx) \Rightarrow x = y$.

3. $(xRy \text{ и } yRz) \Rightarrow xRz$.

Такое отношение обозначают \leq .

Теорема. $\exists!$ отношение порядка на \mathbb{N} , такое, что $\forall n \in \mathbb{N} : n \leq S(n)$. (Можно использовать на экзамене без доказательства)

Теорема. (Принцип наименьшего элемента)

$M \subset \mathbb{N}, M \neq \emptyset$ имеет наименьший элемент, т.е. $\exists n_{\min} \in M, \forall n \in M : n_{\min} \leq n$.

Доказательство. Предположим, что в M нет минимального элемента.

База: если $1 \in M$, то $n_{\min} = 1 \Rightarrow 1 \notin M \Rightarrow 1 \in \mathbb{N} \setminus M$.

Шаг: $\{1, 2, \dots, n\} \subset \mathbb{N} \setminus M \Rightarrow S(n) \in \mathbb{N} \setminus M$, тогда по аксиоме индукции $\mathbb{N} \setminus M = \mathbb{N} \Rightarrow M = \emptyset$ - противоречие. \square

2.3 Арифметические операции

Определение. Рассмотрим $A, B, \text{card}(A) = n, \text{card}(B) = k, n, k \in \mathbb{N}$. Пусть $A \cap B = \emptyset$. Тогда число $\text{card}(A \cup B)$ называется суммой n и k и обозначается $\text{card}(A \cup B) = n + k$.

Замечание. Естественно выполняется $n + k = k + n$ (коммутативность) и $(n + k) + m = n + (k + m)$ (ассоциативность).

Замечание. $n + 0 = 0 + n = n$, т.к. $\text{card} A = \text{card}(A \cup \emptyset)$.

Замечание. $A \leftrightarrow \{1, \dots, n\}, B \leftrightarrow \{1, \dots, k\}$. Возьмем $\text{card}(A \cup B) = \{1, \dots, n\} \cup \underbrace{\{S(n), S(S(n)), \dots, S(S(\dots(S(n)) \dots))\}}_k$,
(где $\{1, \dots, k\} \leftrightarrow \underbrace{\{S(n), S(S(n)), \dots, S(S(\dots(S(n)) \dots))\}}_k$)

Из тех же соображений получаем, что $S(n) = n + 1$.

Определение. $n, k \in \mathbb{N}$. Тогда $\sum_{i=1}^k n = nk$ называется произведением n на k .

Замечание. $nk = \underbrace{(n + n + \dots + n)}_k$.

Замечание. Выполнены:

- $nk = kn$ (коммутативность)
- $n(km) = (nk)m$ (ассоциативность)
- $k(n + m) = kn + km$ (дистрибутивность)

- Если $k \leq n$, то $k + m \leq n + m$ и если $k \leq m$, то $kn \leq mn$

Определение. Если $n + k = m$, то $n = m - k$ называется разностью m и k , $k = m - n$ называется разностью m и n .

Замечание. $m - 0 = m$, $m + 0 = m$, $m - m = 0$.

Определение. $nk = m$, $\frac{m}{n} = k$, $\frac{m}{k} = n$.

2.4 Целые числа

Определение. Введем набор символов $-\mathbb{N} = \{\dots, -2, -1\}$. Множество символов $-\mathbb{N} \cup \{0\} \cup \mathbb{N}$ называются целыми числами и обозначаются \mathbb{Z} .

Замечание. Принимаем выполненными следующие свойства:

1. $k + (-n) = \begin{cases} k - n, \text{ если } k \geq n, \\ -(n - k), \text{ если } k < n. \end{cases}$
 $(-k) + (-n) = -(k + n)$
2. $k \cdot 0 = (-k) \cdot 0 = 0$,
 $(-k) \cdot n = (-kn)$,
 $(-k)(-n) = kn$.
3. $(\pm k)((\pm n) + (\pm m)) = (\pm k)(\pm n) + (\pm k)(\pm m)$.
4. $\forall k : (-k) \leq 0$,
 $(-k) \leq (-n)$, если $n \leq k$.
5. $\forall (\pm k), (\pm n), (\pm m) \in \mathbb{Z}$, если $(\pm k) \leq (\pm n)$, то $(\pm k) + (\pm m) \leq (\pm n) + (\pm m)$.
6. $\forall (\pm n), (\pm k) \in \mathbb{Z}, m \in \mathbb{N}$, если $(\pm n) \leq (\pm k)$, то $(\pm n)m \leq (\pm k)m$.

Далее пишем $-k$ вместо $(-k)$.

$\forall k, n \in \mathbb{Z} \exists (k - n) = k + (-n)$.

2.5 Рациональные числа

Определение. Множество $\mathbb{Q} = \{(m, n) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}\}$ называется множеством рациональных чисел, если введены следующие операции:

$$\frac{m}{n} + \frac{p}{q} = \frac{mq + pn}{nq}$$

$$\frac{m}{n} \cdot \frac{p}{q} = \frac{mp}{nq}$$

а также введено отношение порядка:

$$\frac{m}{n} \leq \frac{p}{q}$$

Свойства операций ($a, b, c \in \mathbb{Q}$):

$$(1) \ a + b = b + a$$

$$(2) \ a + (b + c) = (a + b) + c$$

$$(3) \ \exists! 0 \in \mathbb{Q} : a + 0 = 0 + a = a$$

$$(4) \ \forall a \in \mathbb{Q} \ \exists! (-a) \in \mathbb{Q} : a + (-a) = 0$$

$$(5) \ ab = ba$$

$$(6) \ a(bc) = (ab)c$$

$$(7) \ \exists! 1 \in \mathbb{Q} \ \forall a : a \cdot 1 = 1 \cdot a = a$$

$$(8) \ \forall a \neq 0 \ \exists! a^{-1} : aa^{-1} = a^{-1}a = 1$$

$$(9) \ a(b + c) = ab + ac$$

$$(10) \ \forall a, b \in \mathbb{Q} \ a \leq b \text{ или } b \leq a$$

$$(11) \ a \leq b \text{ и } b \leq a \Rightarrow a = b$$

$$(12) \ a \leq b \text{ и } b \leq c \Rightarrow a \leq c$$

$$(13) \ \forall c \in \mathbb{Q} : a \leq b \Rightarrow a + c \leq b + c$$

$$(14) \ \forall c > 0 : a \leq b \Rightarrow ac \leq bc$$

2.6 Упорядоченные и архимедовы поля

Определение. Множество X с операциями $(\cdot, +)$ и отношением порядка \leq называется упорядоченным полем.

Замечание. \mathbb{Q} - упорядоченное поле.

Определение. Упорядоченное поле X называется архимедовым, если

$$(15) \ \forall a \in X : \exists n \in \mathbb{N} : a \leq n.$$

Замечание. \mathbb{Q} - архимедово поле.

Замечание. $\frac{m}{n} = \frac{p}{q} \Leftrightarrow mq = pn$.

Замечание. $\forall m \in \mathbb{Z}$ число $\frac{m}{1} \in \mathbb{Q}$ можно отождествить с m .

2.7 Действительные числа. Аксиома полноты

Определение. Множество \mathbb{R} называется множеством действительных чисел, если $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$, \mathbb{R} удовлетворяет (1)-(15) и дополнительно выполняется (16).

Определение. (Аксиома полноты)

(16) $\forall A, B \subset \mathbb{R}$ таких, что $\forall a \in A, \forall b \in B : a \leq b \exists c \in \mathbb{R} : a \leq c \leq b$.

Пример. Аксиома полноты не выполняется в \mathbb{Q} .

$A = \{a \leq 0 \text{ или } a > 0 : a^2 < 2\}$, $B = \{b > a : b^2 > 2\}$,

но $\nexists \frac{m}{n}, \frac{m^2}{n^2} = 2$

2.8 Модели действительных чисел

2.8.1 Модель бесконечных десятичных дробей

Определение. Отображение $\{a_n\} : \mathbb{N} \rightarrow X$ называется последовательностью элементов X .

Определение. Выражение вида $\pm a_0, a_1, \dots, a_n, \dots$ называется бесконечной десятичной дробью, если $a_0 \in \mathbb{N}$ или $a_0 = 0$ и $\forall i \in \mathbb{N} a_i \in \{0, 1, \dots, 9\}$.

Определение. Введем отношение порядка \leq на множестве всех бесконечных дробей следующим образом:

1. Если $a_0 \leq 0, b_0 > 0$, то $a \leq b$.

2. Если $a_0, b_0 \geq 0$, то $a \leq b$

- если $a_0 < b_0$ или $a_0 = b_0, a_1 < b_1$ или $a_0 = b_0, a_1 = b_1, a_2 < b_2$,
или ... или $a_0 = b_0, a_1 = b_1, a_2 = b_2, \dots, a_{n-1} = b_{n-1}, a_n < b_n \dots$

- если $a_0 = b_0, a_1 = b_1, \dots, a_n \neq 9, b_n = a_n + 1, a_{n+k} = 9, b_{n+k} = 0, \forall k \in \mathbb{N}$,
т.е $a = \overline{a_0 a_1 \dots a_n (9)}$, а $b = \overline{b_0 b_1 \dots b_n (0)}$.

(в числе a начиная с a_{n+1} все a_i равны 9, а в числе b начиная с b_{n+1} все b_i равны 0), то $a = b$.

3. Если $a_0, b_0 < 0$, то $a < b$, если $-b < -a$ (случай 3 сведен к случаю 2)

Теорема. Множество бесконечных десятичных дробей с введенным отношением порядка (\leq) удовлетворяет аксиоме полноты.

Доказательство. Пусть $A, B \subset \{\text{множество бесконечных десятичных дробей}\}$ и $\forall a \in A, \forall b \in B : a \leq b$.

1. $a < 0, b \geq 0$, тогда $c = 0$.

2. $a > 0, b > 0$

Пусть

$$\overline{b_0} = \min\{b_0 : b_0 b_1 b_2 \cdots \in B\},$$

$$\overline{b_1} = \min\{b_1 : \overline{b_0} b_1 b_2 \cdots \in B\},$$

$$\overline{b_2} = \min\{b_2 : \overline{b_0} \overline{b_1} b_2 \cdots \in B\},$$

\vdots

Возьмем $\overline{b} = \overline{b_0 b_1 b_2 \dots b_n \dots} \in B$, тогда

$$\forall a \in A, \forall b \in B : a \leq \overline{b} \leq b.$$

3. $a < 0, b < 0$ строим число по аналогии с пунктом 2.

□

2.8.2 Сечения \mathbb{Q}

Определение. (Дедекиндовы сечения)

Пусть $A, B \subset \mathbb{Q} : A \cap B = \emptyset, A \cup B = \mathbb{Q}, \forall a \in A, \forall b \in B : a \leq b$ и в B не существует минимального элемента, тогда (A, B) - пара сечений \mathbb{Q} .

Теорема. На множестве всех пар сечений $\{(A, B)\}$ можно ввести операции $(+), (\cdot)$ и отношение (\leq) , так что будут выполняться (1) – (16).

Доказательство. Без доказательства.

□

2.8.3 Геометрическая модель числовой прямой

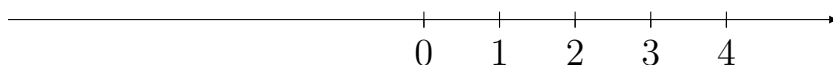
Выбираем точку, называем ее 0



затем выбираем точку справа от него, называем ее 1



затем вводим сложение и получаем 2, 3, 4, и т.д. (натуральный ряд)



затем делаем также в другую сторону, получаем целые числа



Проведем через 0 под непрямым углом вспомогательную прямую на ней выберем точку, назовем ее $1'$ и аналогично первой прямой получаем на ней целые числа. Проведем прямую через n' и 1 тогда параллельная ей прямая проходящая через $1'$ проходит через $\frac{1}{n}$ (по теореме Фаллеса)



таким образом складывая m раз $\frac{1}{n}$, получим любое рациональное число $\frac{m}{n}$.

Построим бесконечную десятичную дробь, например $0,37152\dots$

Разобьем отрезок:



$0,37152\dots$ находится между 0.2 и 0.4, теперь разобьем этот отрезок:



$0,37152\dots$ находится между 0.36 и 0.4, теперь разобьем этот отрезок и т.д. Получаем последовательность вложенных отрезков, у которых длина стремится к нулю, значит у них есть единственная общая точка - наше число.

Таким образом, прямая - множество бесконечных десятичных дробей, а значит на ней выполняются (1)-(16).

2.9 Принципы полноты

2.9.1 Верхние и нижние грани множества

Определение.

- Элемент $a \in \mathbb{R}$ называется максимальным элементом множества A ($\max A \subset \mathbb{R}$), $A \neq \emptyset$, если $\forall a' \in A : a \geq a'$ и $a \in A$.
- Элемент $a \in \mathbb{R}$ называется минимальным элементом множества A ($\min A \subset \mathbb{R}$), $A \neq \emptyset$, если $\forall a' \in A : a \leq a'$ и $a \in A$.

Определение.

- Элемент $m \in \mathbb{R}$ называется верхней гранью $A \subset \mathbb{R}, A \neq \emptyset$, если $\forall a \in A : a \leq m$.
- Элемент $m \in \mathbb{R}$ называется нижней гранью $A \subset \mathbb{R}, A \neq \emptyset$, если $\forall a \in A : a \geq m$.

Определение.

- Множество $A \subset \mathbb{R}, A \neq \emptyset$ называется ограниченным сверху, если у A существует верхняя грань.
- Множество $A \subset \mathbb{R}, A \neq \emptyset$ называется ограниченным снизу, если у A существует нижняя грань.
- Множество $A \subset \mathbb{R}$ называется ограниченным, если A ограничено и сверху и снизу.

Определение.

- Пусть множество $A \subset \mathbb{R}$ ограничено сверху, B - множество верхних граней A . Элемент $c = \min B$ называется точной верхней гранью A и обозначается $\sup A$.
- Пусть множество $A \subset \mathbb{R}$ ограничено снизу, B - множество нижних граней A . Элемент $c = \max B$ называется точной нижней гранью A и обозначается $\inf A$.

2.9.2 Принцип полноты Вейерштрасса

Теорема. (Принцип полноты Вейерштрасса)

Для каждого ограниченного сверху или снизу множества A существует $\sup A$ или $\inf A$ соответственно.

Доказательство. Докажем для верхней грани (аналогично для нижней)
 A - ограничено сверху, B - множество верхних граней. Значит $\forall a \in A$ и $\forall b \in B : a \leq b \Rightarrow$ по аксиоме полноты $\exists c \in \mathbb{R} : a \leq c \leq b \Rightarrow c = \sup A$. \square

Определение. $\forall a, b \in \mathbb{R} : a < b$ рассмотрим следующие множества:

- $[a, b] := \{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\}$ - отрезок
- $(a, b) := \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}$ - интервал
- $[a, b) := \{x \in \mathbb{R} : a \leq x < b\}$ - полуинтервал
- $(a, b] := \{x \in \mathbb{R} : a < x \leq b\}$ - полуинтервал

Такие множества называют промежутками.

Определение. $\forall a \in \mathbb{R}$ функция

$$|a| = \begin{cases} a, & a \geq 0, \\ -a, & a < 0. \end{cases}$$

называется модулем.

Определение. Для любого промежутка с концами $a, b \in \mathbb{R}$ длиной называется число $|b - a|$.

Определение. Рассмотрим последовательность $\{[a_n, b_n]\}_{n=1}^{\infty}$. Говорят, что $|b_n - a_n| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, если $\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N$ выполнено $|b_n - a_n| < \varepsilon$.

2.9.3 Принцип вложенных отрезков (принцип полноты Кантора)

Теорема. (Принцип вложенных отрезков)

Пусть последовательность $\{[a_n, b_n]\}_{n=1}^{\infty}$ такова, что $\forall n : [a_{n+1}, b_{n+1}] \subset [a_n, b_n]$. Тогда $\exists c \in \mathbb{R} : c \in [a_n, b_n], \forall n$. Если $|b_n - a_n| \rightarrow 0$ то c - единственная.

Доказательство. $\forall n, m \in \mathbb{N} : a_n \leq b_m$, т.к

- если $n < m$, то $a_n \leq a_m \leq b_m$.
- если $n > m$, то $a_n \leq b_n \leq b_m$.

Значит для $\forall m, n \in \mathbb{N}$: Рассмотрим множества $A = \{a_n\}$ и $B = \{b_n\}$. По аксиоме полноты $\exists c \in \mathbb{R} : a_n \leq c \leq b_m, \forall n, m \Rightarrow a_n \leq c \leq b_n, \forall n$.

Пусть $|b_n - a_n| \rightarrow 0$, предположим, что $\exists c_1$ и $c_2 : c_1 \neq c_2$ - различные общие точки, значит $|c_2 - c_1| > 0$. Получаем, что $0 < |c_2 - c_1| < |b_n - a_n|, \forall n$, значит $|c_2 - c_1| \rightarrow 0$ получаем противоречие. \square

2.10 Неравенство Бернулли и Бином Ньютона

Теорема. (Неравенство Бернулли)

Пусть $\{x_k\}_{k=1}^n, x_k \in \mathbb{R} \forall k : x_k > 0$ или $x_k \in (-1, 0)$. Тогда

$$\prod_{k=1}^n (1 + x_k) \geq 1 + \sum_{k=1}^n x_k$$

Доказательство. Индукция по n . База: $n = 1 : 1 + x_1 \geq 1 + x_1$. Пусть при n утверждение верно.

$$\prod_{k=1}^{n+1} (1 + x_k) \geq (1 + x_{n+1}) \left(1 + \sum_{k=1}^n x_k\right) = 1 + \sum_{k=1}^{n+1} x_k + \left(\sum_{k=1}^n x_k\right) \cdot x_{n+1} > 1 + \sum_{k=1}^{n+1} x_k$$

□

Определение. Число $\frac{n!}{k!(n-k)!}$ называется биномиальным коэффициентом и обозначается C_n^k .

Замечание. По определению считается, что $0! = 1$.

Теорема. (Бином Ньютона)

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^k b^{n-k}$$

Доказательство. Индукция по n . База: для $n = 1$ верно. Пусть верно для n . Распишем выражение для $n + 1$:

$$(a + b)^{n+1} = (a + b) \sum_{k=0}^n C_n^k a^k b^{n-k} = \sum_{k=0}^n C_n^k a^{k+1} b^{n-k} + \sum_{k=0}^n C_n^k a^k b^{n-k+1}$$

Сдвинем нумерацию в первой сумме:

$$\sum_{k=0}^n C_n^k a^{k+1} b^{n-k} = \sum_{m=1}^{n+1} C_n^{m-1} a^m b^{n-m+1}$$

Получаем, что

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n C_n^k a^{k+1} b^{n-k} + \sum_{k=0}^n C_n^k a^k b^{n-k+1} &= \sum_{m=1}^{n+1} C_n^{m-1} a^m b^{n-m+1} + \sum_{m=0}^n C_n^m a^m b^{n-m+1} = \\ &= C_n^n a^{n+1} b^0 + \sum_{m=1}^n (C_n^{m-1} + C_n^m) a^m b^{n-m+1} + C_n^0 a^0 b^{n+1} = \sum_{m=0}^{n+1} C_{n+1}^m a^m b^{n-m+1} \end{aligned}$$

□

2.11 Отношение эквивалентности. Равномощные множества

Определение. Отношение \sim называется отношением эквивалентности, если оно удовлетворяет:

1. $x \sim x$ (Рефлексивность)
2. $x \sim y \Rightarrow y \sim x$ (Симметричность)
3. $x \sim y$ и $y \sim z \Rightarrow x \sim z$ (Транзитивность)

Определение. Множества называются равномощными, если между ними существует биекция.

Теорема. Равномощность множеств является отношением эквивалентности.

Доказательство. Пусть A, B, C - множества, $\varphi : A \rightarrow B, \psi : B \rightarrow C$ - биекции.

1. Рефлексивность очевидна, поскольку у любого множества существует биекция в себя.
2. Для любой биекции $\varphi : A \rightarrow B$ существует $\varphi^{-1} : B \rightarrow A$.
3. $\varphi : A \rightarrow B, \psi : B \rightarrow C$, то $\psi \circ \varphi : A \rightarrow C$.

□

Теорема. Конечные множества равномощны \Leftrightarrow они содержат одинаковое количество элементов.

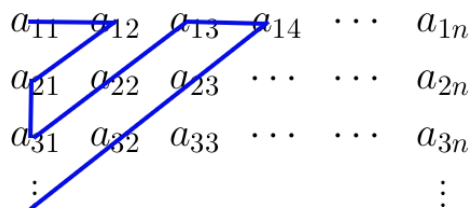
Доказательство.

- (\Leftarrow) Пусть $\varphi : A \rightarrow \{1, \dots, n\}, \psi : B \rightarrow \{1, \dots, n\}$
 $\Rightarrow \exists \psi^{-1} : \{1, \dots, n\} \rightarrow B$. Тогда $\varphi \circ \psi^{-1} : A \rightarrow B$ - искомая биекция.
- (\Rightarrow) Пусть $\varphi : A \rightarrow B$ - биекция. Если $A = \emptyset$, то $B = \emptyset$. Докажем индукцией по количеству элементов. Пусть $A = \{a\}$, тогда $\exists b \in B : \varphi(a) = b$. Пусть утверждение верно для случая когда A - это n -элементное множество. Теперь если A - это $n + 1$ -элементное, то $\exists \varphi : A \rightarrow \{1, 2, \dots, n + 1\}$ - биекция. Значит $\exists a \in A$, что $\varphi(a) = n + 1$. Тогда $A \setminus \{a\}$ - n -элементное. Также $\exists b \in B : b = \varphi(a) \Rightarrow B \setminus \{b\}$ - n -элементное $\Rightarrow B$ - $n + 1$ -элементное.

□

Теорема. Объединение не более чем счетного числа счетных множеств счетно.

Доказательство. Предъявим проход по элементам, который задает биекцию:



□

Определение. Множество называется не более чем счетным, если оно конечно или счетно.

Теорема. Объединение не более чем счетного числа не более чем счетных множеств не более чем счетно.

Примеры.

1. Множество целых чисел \mathbb{Z}
2. Множество рациональных чисел \mathbb{Q}
3. Множество многочленов с рациональными коэффициентами.
4. Множество алгебраических чисел (чисел которые являются корнями многочлена с рациональными коэффициентами).

2.12 Теорема Кантора и аксиома выбора

Теорема. (Теорема Кантора)

Интервал $(0, 1)$ несчетен.

Доказательство. Докажем от противного. Предположим, что у нас получилось перечислить все элементы интервала $(0, 1)$

$$x_1 = 0, a_{11} a_{12} a_{13} \dots$$

$$x_2 = 0, a_{21} a_{22} a_{23} \dots$$

$$x_3 = 0, a_{31} a_{32} a_{33} \dots$$

⋮

Теперь построим такую последовательность b , задающую число, которого нет

в списке. Определим последовательность так: $b_0 = 0$ и на i -й позиции b_i отличается от a_{ii} , например зададим ее так:

$$b_i = \begin{cases} 1, & \text{если, } a_{ii} \neq 1, \\ 2, & \text{если, } a_{ii} = 1. \end{cases}$$

Таким образом, построенное число $x = 0, b_1 b_2 b_3 \dots$ отличается от каждого из $x_1, x_2, x_3 \dots$ на i позиции \Rightarrow оно не было пересчитано, получаем противоречие. \square

Следствие. Действительных чисел несчетно.

Определение. Действительные числа не являющиеся алгебраическими называются трансцендентными.

Определение. Множества равномощные интервалу $(0, 1)$ называются множествами мощности континуума.

Теорема. У любого множества мощность множества всех подмножеств строго больше чем мощность самого множества.

Определение. Для множеств A и B обозначим $|A| \leq |B|$, если $\exists B' \subset B$ для которого $\exists \varphi : A \rightarrow B'$ - биекция.

Теорема. Сравнение мощностей множеств $|A| \leq |B|$ является отношением порядка.

1. $\forall A, B : |A| \leq |B|$ или $|B| \leq |A|$
2. $|A| \leq |B|$ и $|B| \leq |A| \Rightarrow |A| = |B|$
3. $|A| \leq |B|$ и $|B| \leq |C| \Rightarrow |A| \leq |C|$

Доказательство. Без доказательства. \square

Аксиома. (Аксиома выбора)

Если существует множество неких множеств, то из каждого множества можно выбрать по одному элементу и составить из них другое множество.

Утверждение. Множество $2^{\mathbb{N}}$ всех подмножеств \mathbb{N} равномощно интервалу $(0, 1)$ (множеству $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ бесконечных последовательностей нулей и единиц).

Доказательство. Каждому $A \subset \mathbb{N}$ ставим в соответствие характеристическую последовательность, которая принимает значения: единицу, если элемент лежит в подмножестве и ноль иначе $\Rightarrow 2^{\mathbb{N}} \sim \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$. Поскольку каждое число из интервала $(0, 1)$ представляется как последовательность цифр $0, a_1, a_2, a_3, \dots$ и каждую цифру можно представить в двоичной системе исчисления, то можно сделать вывод, что $2^{\mathbb{N}} \sim (0, 1)$. \square

Теорема. У любого бесконечного множества существует счетное подмножество.

Доказательство. Выбираем элемент и сразу присваиваем ему номер, продолжая это действие, построим счетное множество. \square

Теорема. Пусть A - бесконечное, B - не более чем счетное $\Rightarrow A \sim A \cup B$

Доказательство. Выделим из A счетное подмножество A' . Тогда $A \sim (A \setminus A') \cup A'$, поскольку не более чем счетное объединение не более чем счетных множеств не более чем счетно, то $(A \setminus A') \cup A' \sim (A \setminus A') \cup (A' \cup B) \sim (A \cup B)$. \square

3 Топология \mathbb{R}

Определение. $\forall x \in \mathbb{R}, \forall \varepsilon > 0 : B_{\varepsilon}(x) = (x - \varepsilon, x + \varepsilon)$. Множество $B_{\varepsilon}(x)$ называется ε -окрестностью точки x .

Определение. $\forall x \in \mathbb{R}, \forall \varepsilon > 0 : \mathring{B}_{\varepsilon}(x) = (x - \varepsilon, x) \cup (x, x + \varepsilon)$. Множество $\mathring{B}_{\varepsilon}(x)$ называется проколотой ε -окрестностью точки x .

Определение. Точка $x \in A \subset \mathbb{R}$ называется внутренней точкой множества A , если $\exists B_{\varepsilon}(x) \subset A$. Множество всех внутренних точек $x \in A$ называется внутренностью множества A .

Определение. Точка $x \in \mathbb{R} \setminus A$ называется внешней точкой для множества $A \subset \mathbb{R}$, если x - внутренняя точка для $\mathbb{R} \setminus A$. Множество всех внешних точек $x \in \mathbb{R} \setminus A$ называется внешностью множества A .

Определение. Точка называется граничной для множества $A \subset \mathbb{R}$, если она не является ни внешней ни внутренней для A . Множество всех граничных точек называется границей множества A и обозначается ∂A .

Определение. (Множество Кантора)

Разбиваем отрезок $[0, 1]$ на три части и выбрасываем середину, затем каждый из получившихся отрезков разбиваем на три части и выбрасываем середину, и т.д.

- Суммарная длина всех выброшенных интервалов равна 1.
- Концов отрезков счетное множество.
- Общее количество точек имеет мощность континуума.

Определение. Множество называется открытым, если все его точки - внутренние.

Пример. Любой интервал - открытое множество

Определение. Множество называется $A \subset \mathbb{R}$ замкнутым, если все его дополнение $\mathbb{R} \setminus A$ открыто.

Пример. Отрезок - замкнутое множество.

Замечание. По определению считаем, что \emptyset и \mathbb{R} и открыты и замкнуты одновременно.

Определение. Точка $x \in \mathbb{R}$ называется предельной точкой множества $A \subset \mathbb{R}$, если в любой проколотой окрестности точки x бесконечно много точек A , т.е. $\forall \varepsilon > 0 : A \cap \mathring{B}_\varepsilon(x) \neq \emptyset$. Множество всех предельных точек A обозначается A'

Определение. Точка $x \in A$ называется изолированной точкой $A \subset \mathbb{R}$, если $\exists \varepsilon > 0 : A \cap \mathring{B}_\varepsilon(x) = \emptyset$.

Определение. Точка $x \in \mathbb{R}$ называется точкой прикосновения $A \subset \mathbb{R}$, если $\forall \varepsilon > 0 : A \cap B_\varepsilon(x) \neq \emptyset$.

Утверждение. Точки прикосновения множества A являются либо внутренними, либо граничными.

Доказательство. Точка прикосновения не может являться внешней точкой, поскольку в этом случае $\exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(x) \in \mathbb{R} \setminus A$, что противоречит с условием $\forall \varepsilon > 0 : A \cap B_\varepsilon(x) \neq \emptyset \Rightarrow$ она либо внутренняя либо граничная. \square

Утверждение. Точки прикосновения являются либо предельными, либо изолированными.

Доказательство. По определению $\forall \varepsilon > 0 : A \cap B_\varepsilon(x) \neq \emptyset$. Если $\forall \varepsilon > 0 : A \cap \mathring{B}_\varepsilon(x) \neq \emptyset$, то x - предельная. Если $\exists \varepsilon > 0 : A \cap \mathring{B}_\varepsilon(x) = \emptyset$, то x - изолированная. \square

Теорема. (Критерии замкнутости множества)

Следующие условия эквивалентны:

(0) $A \subset \mathbb{R}$ - замкнуто.

(1) $\partial A \subset A$,

(2) Все точки прикосновения содержатся в A ,

(3) $A' \subset A$.

Доказательство. Докажем по цепочке $(0) \Rightarrow (1) \Rightarrow (2) \Rightarrow (3) \Rightarrow (0)$.

1. $(0) \Rightarrow (1)$: A - замкнуто $\Rightarrow \mathbb{R} \setminus A$ - открыто $\Rightarrow \partial A \not\subset \mathbb{R} \setminus A \Rightarrow \partial A \subset A$.
2. $(1) \Rightarrow (2)$: Все точки прикосновения являются граничными или внутренними. Поскольку $\partial A \subset A$ то все точки прикосновения содержатся в A .
3. $(2) \Rightarrow (3)$: Если x - предельная, то $x \in A$ или x - точка прикосновения. Поскольку все точки прикосновения содержатся в A , то и все предельные точки содержатся в A .
4. $(3) \Rightarrow (0)$: $A' \subset A \Rightarrow \forall x \in \mathbb{R} \setminus A : x \notin A' \Rightarrow \forall x \in \mathbb{R} \setminus A \exists \dot{B}_\varepsilon : \dot{B}_\varepsilon(x) \cap A = \emptyset \Rightarrow B_\varepsilon(x) \cap A = \emptyset \Rightarrow x$ - внешняя точка A , $B_\varepsilon(x) \subset \mathbb{R} \setminus A \Rightarrow \mathbb{R} \setminus A$ - открыто $\Rightarrow A$ - замкнуто.

□

Теорема. Пусть A - множество индексов. Пусть $\{U_\alpha\}_{\alpha \in A}$ - открытые, $\{X_\alpha\}_{\alpha \in A}$ - замкнутые. Тогда:

1. $\bigcup_{\alpha} U_\alpha$ - открыто (объединение открытых множеств - открыто).
2. $\bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i}$ - открыто (конечное пересечение открытых множеств - открыто).
3. $\bigcup_{i=1}^n X_{\alpha_i}$ - замкнуто (конечное объединение замкнутых множеств - замкнуто).
4. $\bigcap_{\alpha} X_\alpha$ - замкнуто (пересечение замкнутых множеств - замкнуто).

Доказательство.

1. Пусть $u \in \bigcup_{\alpha} U_\alpha \Rightarrow \exists \alpha_0 : u \in U_{\alpha_0} \Rightarrow \exists B(u) \in U_{\alpha_0} \Rightarrow B(u) \in \bigcup_{\alpha} U_\alpha \Rightarrow \bigcup_{\alpha} U_\alpha$ - открыто.
2. Пусть $u \in \bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i} \Rightarrow \forall i \in \{1, \dots, n\} \exists \varepsilon_i : B_{\varepsilon_i} \in U_{\alpha_i} \Rightarrow \exists \varepsilon_0 = \min\{\varepsilon_i\} \Rightarrow B_{\varepsilon_0} \subset U_{\alpha_i} \forall i \Rightarrow B_{\varepsilon_0} \subset \bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i} \Rightarrow \bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i}$ - открыто.

3. Поскольку $\bigcap_{\alpha} (A \setminus A_{\alpha}) = A \setminus (\bigcup_{\alpha} A_{\alpha})$ (доказано ранее), то $\mathbb{R} \setminus \bigcup_{i=1}^n X_{\alpha_i} = \bigcap_{i=1}^n (\mathbb{R} \setminus X_{\alpha_i})$. Так как X_{α_i} - замкнуто, то $\mathbb{R} \setminus X_{\alpha_i}$ - открыто. Тогда по пункту 2 получаем: $\bigcap_{i=1}^n (\mathbb{R} \setminus X_{\alpha_i})$ - открыто $\Rightarrow \mathbb{R} \setminus \bigcup_{i=1}^n X_{\alpha_i}$ - открыто $\Rightarrow \bigcup_{i=1}^n X_{\alpha_i}$ - замкнуто.
4. Поскольку $\bigcup_{\alpha} (A \setminus A_{\alpha}) = A \setminus (\bigcap_{\alpha} A_{\alpha})$ (доказано ранее), то $\mathbb{R} \setminus \bigcap_{\alpha} X_{\alpha} = \bigcup_{\alpha} (\mathbb{R} \setminus X_{\alpha})$. Так как X_{α} - замкнуто, то $\mathbb{R} \setminus X_{\alpha}$ - открыто. Тогда по пункту 1 получаем: $\bigcup_{\alpha} (\mathbb{R} \setminus X_{\alpha})$ - открыто $\Rightarrow \mathbb{R} \setminus \bigcap_{\alpha} X_{\alpha}$ - открыто $\Rightarrow \bigcap_{\alpha} X_{\alpha}$ - замкнуто.

□

Примеры.

1. $\bigcap_{n=1}^{\infty} (-\frac{1}{n}, 1 + \frac{1}{n}) = [0, 1]$.
2. $\bigcup_{n=1}^{\infty} [\frac{1}{n}, 1 - \frac{1}{n}] = (0, 1)$.

Теорема. Если A - ограничено сверху или снизу и замкнуто, то существует $\max A$ или $\min A$ соответственно.

Доказательство. Докажем для ограниченного сверху. По принципу полоты Вейерштрасса $\exists \alpha = \sup A$.

$\forall \varepsilon > 0 \exists a_{\varepsilon} \in (\alpha - \varepsilon, \alpha] \Rightarrow \alpha$ - точка прикосновения $\Rightarrow \alpha \in A \Rightarrow \alpha = \max A$. □

Теорема. (Больцано-Вейерштрасса)

Если A - ограниченное и бесконечное множество, то в нем есть хотя бы одна предельная точка ($A' \neq \emptyset$).

Доказательство. т.к A - ограничено, что $\exists \sup A = b, \inf A = a$

$\Rightarrow A \subset [a_1, b_1] = [a, b]$. Поделим отрезок $[a_1, b_1]$ пополам и возьмем половину $[a_2, b_2]$ в которой бесконечно много элементов A и т.д. Получаем систему вложенных отрезков $\{[a_n, b_n]\}_{n=1}^{\infty}$, у которых длина стремится к нулю (упражнение) $\Rightarrow \exists! c \in [a_n, b_n] \forall n \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists n_{\varepsilon} : [a_n, b_n] \subset B_{\varepsilon}(c) \Rightarrow$ существует бесконечно много элементов в $\mathring{B}_{\varepsilon}(c) \Rightarrow c \in A'$. □

Определение. Говорят, что семейство $\{A\}_{\alpha}$ является покрытием множества B , если $B \subset \bigcup_{\alpha} A_{\alpha}$

Определение. Рассмотрим $X \subset \mathbb{R}$. Если для любого покрытия X открытыми множествами $\{A\}_\alpha$ существует $\{\alpha_i\}_{i=1}^n$ - конечное подпокрытие, что $X \subset \bigcup_{i=1}^n A_{\alpha_i}$, то X называется компактным множеством или компактом.

Теорема. Любой отрезок является компактом.

Доказательство. Пусть $[a, b] \subset \bigcup_{\alpha} A_{\alpha}$, A_{α} - открытые и нельзя выделить конечное подпокрытие. Тогда $[a, b] = [a_1, b_1]$ делим отрезок пополам и выбираем половину $[a_2, b_2]$, у которой нельзя выделить конечное подпокрытие и т.д. Получаем систему вложенных отрезков $\{[a_n, b_n]\}_{n=1}^{\infty}$, у которых нельзя выделить конечное подпокрытие и длина стремится к нулю $\Rightarrow \exists! c \in [a_n, b_n] \forall n \Rightarrow \exists \alpha_0 : c \in A_{\alpha_0} \Rightarrow \exists n_{\alpha_0} : [a_{n_{\alpha_0}}, b_{n_{\alpha_0}}] \subset A_{\alpha_0}$ получаем противоречие. \square

Теорема. (Лемма Гейне-Бореля)

A - компакт $\Leftrightarrow A$ - замкнуто и ограничено.

Доказательство. Без доказательства. \square

4 Числовые последовательности

Определение. Отображение $\{a_n\} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ называется последовательностью.

Замечание. Далее, в обозначении последовательности будем опускать скобки и писать a_n .

Определение. Говорят, что a_n ограничена сверху (снизу), если ее образ ограничен сверху (снизу).

Определение. Пусть последовательность номеров n_k - образ $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ и $\forall k : n_{k+1} > n_k$. Тогда для любой последовательности a_n последовательность a_{n_k} называется подпоследовательностью a_n .

Определение. Рассмотрим последовательность a_n . Если $\exists a \in \mathbb{R}$, такое что

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_{\varepsilon} \in \mathbb{N} : \forall n > N_{\varepsilon} : |a_n - a| < \varepsilon$$

то говорят что последовательность a_n сходится, а число a называется пределом последовательности a_n и обозначают

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$$

Теорема. Если a_n сходится, то ее предел единственный.

Доказательство. Пусть $\exists a, b \in \mathbb{R} : a \neq b$ - два предела последовательности a_n . Тогда

$$\exists N_1 : \forall n > N_1 : |a_n - a| < \frac{|a - b|}{3} \quad \text{и} \quad \exists N_2 : \forall n > N_2 : |a_n - b| < \frac{|a - b|}{3}$$

Тогда $\forall n > N = \max(N_1, N_2)$ получаем, что $a_n \in B_{\frac{|a-b|}{3}}(a)$ и $a_n \in B_{\frac{|a-b|}{3}}(b)$, но $B_{\frac{|a-b|}{3}}(a) \cap B_{\frac{|a-b|}{3}}(b) = \emptyset \Rightarrow$ получаем противоречие. \square

Теорема. Пусть $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, тогда $\forall a_{n_k} \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$.

Доказательство. $\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \forall n > N_\varepsilon : |a_n - a| < \varepsilon \Rightarrow \forall k > N_\varepsilon : |a_{n_k} - a| < \varepsilon$ \square

Определение. $\forall k \in \mathbb{Z}$ отображение $\mathbb{Z} \setminus \{..., k-1\} \rightarrow \mathbb{R}$ тоже будем называть последовательностью.

Замечание.

1. Если $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, то $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+k} = a$.
2. Если $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ и b_n отличается от a_n конечным числом членов, то $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a$.

Теорема. (Теорема об отделимости)

Пусть $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ и $b \neq a$. Тогда $\exists \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon : B_\varepsilon(b) \cap \{a_n\}_{n=N_\varepsilon}^\infty = \emptyset$.

Доказательство. Пусть $\forall \varepsilon > 0 \forall N_\varepsilon : B_\varepsilon(b) \cap \{a_n\}_{n=N_\varepsilon}^\infty \neq \emptyset$. Возьмем $\varepsilon = \frac{|b-a|}{3}$, сразу получаем противоречие. \square

Замечание. $\exists \varepsilon > 0 : \overset{\circ}{B}_\varepsilon \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty = \emptyset$. Если $b \notin \{a_n\}_{n=1}^\infty$, то $B_\varepsilon(b) \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty = \emptyset$.

4.1 О-символика. Бесконечно малые и бесконечно большие последовательности

Определение. Рассмотрим пару последовательностей a_n и b_n . Если

$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = 0$, то говорят, что последовательность a_n это о-малое от b_n и обозначают $a_n = \bar{o}(b_n)$, при $n \rightarrow \infty$.

Определение. Если $\exists M > 0 : |\frac{a_n}{b_n}| \leq M \forall n$, то говорят, что последовательность a_n это О-большое от b_n и обозначают $a_n = O(b_n)$ при $n \rightarrow \infty$.

Примеры.

1. $\frac{\sin n}{n} \rightarrow 0 \Leftrightarrow \sin n = \bar{o}(n)$
2. $\frac{\cos n}{n} \rightarrow 0 \Leftrightarrow \cos n = \bar{o}(n)$
3. $\frac{\sqrt{n}+1}{n} \rightarrow 0 \Leftrightarrow \sqrt{n} + 1 = \bar{o}(n)$

Замечание. $O(1)$ - обозначение класса ограниченных последовательностей.

Определение. Последовательность a_n называется бесконечно малой, если $a_n = \bar{o}(1)$, т.е. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

Определение. Последовательность a_n называется бесконечно большой, если $\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon, \forall n > N_\varepsilon : |a_n| > \varepsilon$, такие последовательности обозначаются $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ (это всего лишь обозначение, конечно у последовательности a_n не существует предела)

Если в определении $a_n > \varepsilon$, то пишут $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$.

Если в определении $a_n < -\varepsilon$, то пишут $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = -\infty$.

Теорема. (Исчисление бесконечно малых)

Пусть $a_n = \bar{o}(1), n \rightarrow \infty$, $b_n = \bar{o}(1), n \rightarrow \infty$ и $c_n = O(1)$. Тогда $\forall c \in \mathbb{R}$:

1. $ca_n = \bar{o}(1)$
2. $a_n + b_n = \bar{o}(1)$
3. $a_n b_n = \bar{o}(1)$
4. $c_n a_n = \bar{o}(1)$

Доказательство. $\forall \varepsilon > 0 \exists N_1, \forall n > N_1 : |a_n| < \varepsilon, \exists N_2, \forall n > N_2 : |b_n| < \varepsilon$.

Возьмем $n > \max\{N_1, N_2\}$. Также по определению $\exists M > 0 : |c_n| < M$. Тогда:

1. $|ca_n| = |c| |a_n| < |c|\varepsilon$. Поскольку ε принимает любое вещественное положительное значение, то величина $|c|\varepsilon$ - тоже $\Rightarrow ca_n = \bar{o}(1)$.
2. $|a_n + b_n| < 2\varepsilon$. Поскольку ε принимает любое вещественное положительное значение, то величина 2ε - тоже $\Rightarrow a_n + b_n = \bar{o}(1)$.
3. $|a_n b_n| = |a_n| |b_n| < \varepsilon \cdot \varepsilon = \varepsilon^2$. Поскольку ε принимает любое вещественное положительное значение, то величина ε^2 - тоже $\Rightarrow a_n b_n = \bar{o}(1)$.
4. $|c_n a_n| = |c_n| |a_n| < M\varepsilon$. Поскольку ε принимает любое вещественное положительное значение, то величина $M\varepsilon$ - тоже $\Rightarrow c_n a_n = \bar{o}(1)$.

□

Теорема. Пусть a_n - бесконечно большая и $a_n \neq 0$, тогда $\frac{1}{a_n}$ - бесконечно малая.

Доказательство. $\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon, \forall n > N_\varepsilon : |a_n| > \varepsilon \Rightarrow \frac{1}{|a_n|} < \frac{1}{\varepsilon} \Rightarrow \frac{1}{a_n} = \bar{o}(1)$ \square

Лемма. $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \Leftrightarrow a_n - a = \bar{o}(1)$ т.е $a_n = a + \bar{o}(1)$

Доказательство. Из определения предела для a_n получаем: $|a_n - a| < \varepsilon$, а это и означает что $a_n - a = \bar{o}(1)$ \square

Теорема. Пусть $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a, \exists \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$, тогда

1. $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n + b_n) = a + b$
2. $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} (ca_n) = ca$
3. $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n b_n) = ab$
4. Если дополнительно $\forall n : b_n \neq 0$ и $b \neq 0$, то $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{a_n}{b_n}\right) = \frac{a}{b}$

Доказательство. Используя, что $a_n = a + \bar{o}(1), b_n = b + \bar{o}(1)$ и исчисление бесконечно малых, получаем:

1. $a_n + b_n = a + \bar{o}(1) + b + \bar{o}(1) = a + b + \bar{o}(1)$
2. $ca_n = c(a + \bar{o}(1)) = ca + c\bar{o}(1) = c(a + \bar{o}(1)) = ca + \bar{o}(1)$
3. $a_n b_n = (a + \bar{o}(1))(b + \bar{o}(1)) = ab + a\bar{o}(1) + b\bar{o}(1) + \bar{o}(1)\bar{o}(1).$

Поскольку любая сходящаяся последовательность ограничена, то

$$a\bar{o}(1) = \bar{o}(1), b\bar{o}(1) = \bar{o}(1) \Rightarrow a_n b_n = ab + \bar{o}(1).$$

$$\begin{aligned} 4. \frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} &= \frac{a_n b - ab_n}{bb_n} = \frac{b(a + \bar{o}(1)) - a(b + \bar{o}(1))}{b(b + \bar{o}(1))} = \frac{ab - ab + b\bar{o}(1) - a\bar{o}(1)}{b^2 + b\bar{o}(1)} = \\ &= \frac{1}{b^2 + \bar{o}(1)} \bar{o}(1) = O(1)\bar{o}(1) = \bar{o}(1). \end{aligned}$$

\square

Замечание. т.к $b \neq 0, b_n \neq 0 \forall n$, то 0 отделен от b_n , т.е $\exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(0) \cap b_n = \emptyset \Rightarrow |b_n| > \varepsilon \Rightarrow \frac{1}{|b_n|} < \frac{1}{\varepsilon}$.

Теорема. Пусть $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ и $a_n \geq 0, \forall n$. Тогда $a \geq 0$.

Доказательство. Пусть $a < 0$, тогда $\exists N, \forall n > N : |a - a_n| < \frac{|a|}{3} \Rightarrow$ начиная с N все члены a_n отрицательные \Rightarrow получаем противоречие. \square

Следствие. Пусть $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ и пусть $\forall n : a_n \geq b_n$. Тогда $a \geq b$.

Доказательство. Рассмотрим последовательность $a_n - b_n \geq 0$.

$$a_n - b_n \rightarrow a - b \geq 0. \quad \square$$

Теорема. (Лемма о двух милиционерах)

Пусть $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a : a_n \leq b_n$ и пусть $a_n \leq c_n \leq b_n, \forall n$, тогда $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} c_n = a$.

Доказательство. $\forall \varepsilon > 0 \exists N_1, \forall n > N_1 : |a_n - a| < \varepsilon, \exists N_2, \forall n > N_2 :$

$$|b_n - a| < \varepsilon \Rightarrow \forall n > N = \max\{N_1, N_2\} : a - \varepsilon < a_n \leq c_n \leq b_n < a + \varepsilon$$

$$\Rightarrow |c_n - a| < \varepsilon. \quad \square$$

4.2 Монотонные последовательности

Определение.

1. Если $\forall n : a_{n+1} > a_n$, то a_n (строго) возрастает.
2. Если $\forall n : a_{n+1} \geq a_n$, то a_n неубывает.
3. Если $\forall n : a_{n+1} < a_n$, то a_n (строго) убывает.
4. Если $\forall n : a_{n+1} \leq a_n$, то a_n невозрастает.

Такие последовательности называют монотонными.

Теорема. Если последовательность неубывает (невозрастает) и ограничена сверху (снизу), то у нее есть предел.

Доказательство. a_n - ограничена сверху $\Rightarrow \exists \sup a_n = a$

$$\Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists a_N > a - \varepsilon, a_n \text{ неубывает} \Rightarrow \forall n > N : a_n > a - \varepsilon \Rightarrow a - a_n < \varepsilon. \quad \square$$

4.3 Число e

Лемма.

1. $a_n = (1 + \frac{1}{n})^n$ возрастает.
2. $b_n = (1 + \frac{1}{n})^{n+1}$ убывает.

Доказательство.

$$\begin{aligned}
 1. \quad \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n} = \frac{(n+2)^{n+1}n^n}{(n+1)^{2n+1}} = \frac{(n^2+2)^n(n+2)}{(n^2+2n+1)^n(n+1)} = \\
 &= \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right)^n \left(\frac{n+2}{n+1}\right) > \left(1 - \frac{1}{(n+1)^2}\right) \cdot \frac{n+2}{n+1} = \\
 &= \frac{n^2+n+1}{n^2+2n+1} \cdot \frac{n+2}{n+1} = \frac{n^3+3n^2+3n+2}{n^3+3n^2+3n+1} > 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2. \quad \frac{b_n}{b_{n+1}} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n}{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1}} = \frac{(n+1)^{2n+3}}{n^{n+1}((n+2)^{n+2})} = \frac{(n^2+2n+1)^{n+1}(n+1)}{(n^2+2n)^{n+1}(n+2)} = \\
 &= \left(1 + \frac{1}{n^2+2n}\right)^{n+1} \frac{(n+1)}{n+2} > \left(1 + \frac{1}{n^2+2n}\right) \left(\frac{n+1}{n+2}\right) = \\
 &= \frac{n^2+3n+1}{n^2+2n} \cdot \frac{n+1}{n+2} = \frac{n^3+4n^2+4n+1}{n^3+4n^2+4n} > 1
 \end{aligned}$$

□

Теорема. $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$

Доказательство. $\forall n, a_n < b_n$, т.к. $b_n = a_n \left(1 + \frac{1}{n}\right) \Rightarrow \forall n, m : a_n < b_m$
 $\Rightarrow a_n$ - ограничена $\Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$

□

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

4.4 Сходимость последовательностей и частичные пределы

Теорема. Если a_n ограничена, то $\exists a_{n_k} \rightarrow a, k \rightarrow \infty$.

Доказательство.

1. Образ a_n бесконечен. Тогда $\exists a$ - предельная точка образа. Тогда в проколотой окрестности a есть хотя бы одна точка, возьмем эту точку, назовем ее a_{n_1} , далее возьмем новую проколотую окрестность a так, чтобы a_{n_1} в нее не попадало, возьмем в ней a_{n_2} такую, что $n_2 > n_1$ и так далее. Получим подпоследовательность, сходящуюся к a .

2. Образ a_n конечный. Тогда $\exists a$ из образа, встречающаяся в последовательности бесконечно много раз. Тогда возьмем постоянную (стационарную) подпоследовательность.

□

Теорема. (Критерий Коши)

Последовательность a_n сходится тогда и только тогда, когда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon, \forall n, m > N_\varepsilon : |a_n - a_m| < \varepsilon$$

Доказательство.

$$(\Rightarrow) \exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon, \forall n > N_\varepsilon : |a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}. \text{ Тогда } \forall m, n > N_\varepsilon : |a_m - a_n| = |(a_m - a) + (a - a_n)| \leq |a_m - a| + |a - a_n| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon.$$

$$(\Leftarrow) \forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon, \forall n, m > N_\varepsilon : |a_n - a_m| < \varepsilon. \text{ Фиксируем } m, \text{ тогда } a_m - \varepsilon < a_n < a_m + \varepsilon \Rightarrow a_n - \text{ограничена} \Rightarrow \exists a_{n_k} \rightarrow a, k \rightarrow \infty. \text{ Поскольку } n_k \geq n > N, \text{ то } |a_n - a_{n_k}| < \varepsilon. \text{ Тогда } |a_n - a| = |a_n - a_{n_k} + a_{n_k} - a| < |a_n - a_{n_k}| + |a_{n_k} - a| < 2\varepsilon \text{ (} 2\varepsilon \text{ пробегает все вещественные положительные числа)}$$

□

Определение. Последовательность a_n , удовлетворяющая условию $\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon, \forall n, m > N_\varepsilon : |a_n - a_m| < \varepsilon$ называется фундаментальной.

Пример.

$$a_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} - \text{сходится, поскольку:}$$

$$|a_n - a_m| = \left| \sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} - \sum_{k=1}^m \frac{1}{k^2} \right| = \left| \sum_{k=m+1}^n \frac{1}{k^2} \right| < \left| \sum_{k=m+1}^n \left(\frac{1}{m-1} - \frac{1}{k} \right) \right| = \frac{1}{m} - \frac{1}{n} < \frac{1}{m} < \varepsilon$$

$$a_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \text{расходится, поскольку:}$$

$$|a_n - a_m| = \left| \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{1}{k} \right| > \frac{1}{2n} n = \frac{1}{2}$$

Определение. Если у a_n есть сходящаяся подпоследовательность a_{n_k} , то $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$ называется частичным пределом последовательности a_n .

Теорема. Рассмотрим a_n , и пусть $A \subset \mathbb{R}$ - множество всех частичных пределов a_n . Тогда A замкнуто.

Доказательство. $\forall x \in \mathbb{R} \setminus A \Rightarrow x \notin A \Rightarrow \exists B_\varepsilon(x) : B_\varepsilon(x) \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty$ - конечно. Тогда $\forall x' \in B_\varepsilon(x) \exists B_{\varepsilon'}(x')$, что $B_{\varepsilon'}(x') \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty$ конечно $\Rightarrow \forall x' \notin A \Rightarrow B_\varepsilon(x) \subset \mathbb{R} \setminus A \Rightarrow \mathbb{R} \setminus A$ - открыто. \square

Определение. Пусть a_n ограничена. Тогда $\exists \max A$ и $\min A$, которые называют верхним и нижним пределом. (тут дописать обозначение)

Теорема. Пусть a_n ограничена. Тогда (верхний) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup\{a_k\}_{k=1}^\infty$ и (нижний) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf\{a_k\}_{k=1}^\infty$.

Доказательство. $\sup\{a_k\}_{k=n+1}^\infty \leq \sup\{a_k\}_{k=n}^\infty$, $\sup\{a_k\}_{k=n}^\infty$ ограничена снизу. $\Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sup\{a_k\}_{k=n}^\infty = \alpha$. $\forall \varepsilon > 0 : (\alpha + \varepsilon, +\infty) \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty$ конечно. С другой стороны $\forall \varepsilon > 0 : (\alpha - \varepsilon, \alpha + \varepsilon) \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty$ бесконечно $\Rightarrow \alpha$ - частичный предел \Rightarrow (верхний) $\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$. \square

Теорема. $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \Leftrightarrow$ (верхний) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ (нижний) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$

Доказательство. (\Rightarrow) очев

$(\Leftarrow) \inf\{a_k\}_{k=n}^\infty \leq a_n \leq \sup\{a_k\}_{k=n}^\infty$ по лемме о двух милиционерах $a_n \rightarrow a$. \square

Определение. Если a_n имеет бесконечно большую подпоследовательность то используют обозначения (верхний) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty (+\infty, -\infty)$ и (верхний) $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty (+\infty, -\infty)$

5 Предел функции

В данном разделе будут рассматриваться функции $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $\mathring{B}(x)$. Число a называется пределом $f(x)$ в точке x_0 , по Коши, если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x \in \mathring{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon$$

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $\mathring{B}(x_0)$. Число a называется пределом $f(x)$ по Гейне, если

$$\forall \{x_n\} : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0 \forall n \exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a$$

Определение. Пусть $f(x)$ определена на $(-\infty, x_0)$ и на $(x_0, +\infty)$. Тогда a - предел f при $x \rightarrow \infty$ ($x \rightarrow +\infty$, $x \rightarrow -\infty$) если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon : \forall |x| > \delta_\varepsilon (x > \delta_\varepsilon, x < -\delta_\varepsilon) \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon$$

Теорема. Определения предела по Коши и по Гейне эквивалентны.

Доказательство.

$$(K) \Rightarrow (G): \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x \in \dot{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon.$$

$$\forall x_n : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0 \exists N_{\delta_\varepsilon} : 0 < |x_0 - x_n| < \delta_\varepsilon \Rightarrow \forall n > N_{\delta_\varepsilon} : x_n \in \dot{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) \\ \Rightarrow |f(x_n) - a| < \varepsilon, \text{ т.е. } f(x_n) \rightarrow a$$

$(G) \Rightarrow (K)$: Выведем из отрицания предела по Коши отрицание предела по Гейне:

$$\exists \varepsilon > 0 \forall \delta \exists x_\delta \in \dot{B}_\delta(x_0) \Rightarrow |f(x_\delta) - a| \geq \varepsilon_0.$$

$$\text{Возьмем } x_1 \in \dot{B}_1(x_0) \Rightarrow |f(x_1) - a| \geq \varepsilon; x_2 \in \dot{B}_{\frac{|x_1|}{2}}(x_0) \Rightarrow |f(x_2) - a| \geq \varepsilon_0;$$

$$x_3 \in \dot{B}_{\frac{|x_2|}{2}}(x_0) \Rightarrow |f(x_3) - a| \geq \varepsilon_0; \dots; x_n \in \dot{B}_{\frac{|x_{n-1}|}{2}}(x_0) \Rightarrow |f(x_n) - a| \geq \varepsilon_0$$

это и есть отрицание по Гейне. □

Замечание. В доказательстве пользуемся тем, что для утверждений A и B верно: $(A \Rightarrow B) \Leftrightarrow (\neg B \Rightarrow \neg A)$

Замечание. при $x \rightarrow \infty$ ($+\infty$, $-\infty$) доказывается аналогично.

Теорема. Если у функции существует предел в точке x_0 то он единственный.

Доказательство. $x_n : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0$ for all $n : \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a$. Предположим, что $b \neq a$ - тоже предел. Тогда $\exists \{t_n\}, t_n \rightarrow x_0, t_n \neq x_0 : \lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n) = b$. Рассмотрим последовательность $x_1, t_1, x_2, t_2, \dots$ - имеет два частичных предела. □

Теорема. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, то $\exists \delta > 0$, что $f(x)$ ограничена в $\dot{B}_\delta(x_0)$.

Доказательство. $\exists \delta > 0$, что $\forall x \in \dot{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < 1$
 $\Rightarrow a - 1 < f(x) < a + 1$ □

Теорема. (Отделимость)

Пусть $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$. Тогда $\forall b \neq a \exists \delta > 0$ и $\exists \varepsilon > 0$, что $f(\dot{B}_\delta(x_0)) \cap \dot{B}_\varepsilon(b) = \emptyset$.

Доказательство. $\exists \varepsilon > 0$, что $\forall x \in \dot{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < \frac{|a-b|}{3}$. Тогда $f(\dot{B}_\delta(x_0)) \cap \dot{B}_{\frac{|a-b|}{3}}(b) = \emptyset$. □

Определение. Число a называется пределом $f(x)$ в точке x_0 по $X \subset \mathbb{R}$, если $x_0 \in X'$ и $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x \in \dot{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) \cap X \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon$. Обозначают

$$\lim_{x \rightarrow x_0, x \in X} f(x) = a.$$

Определение. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0, x \in X} f(x) = a$ и $X_1 \subset X$, $x_0 \in X'_1$. Тогда
 $\exists \lim_{x \rightarrow x_0, x \in X_1} f(x) = a$

Доказательство. Очевидно. □

Теорема. $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \Leftrightarrow \exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x) = a$ и $\exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x) = a$.

Доказательство. "В эту сторону очевидно, в другую сторону тоже очевидно" □

5.1 О-символика

Определение. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$, то $f(x) = \bar{o}(g(x))$ при $x \rightarrow x_0$.

Определение. Функция $f(x) = \bar{o}(x)$ при $x \rightarrow x_0$ называется бесконечно малой.

Определение. Если $\exists M > 0$, что $\forall x \in X \subset \mathbb{R} : |\frac{f(x)}{g(x)}| < M$, то $f(x) = O(g(x))$ на X

Определение. Функция $f(x) = O(1)$ называется ограниченной.

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $\mathring{B}(x_0)$. Если $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon : \forall x \in \mathring{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) \Rightarrow |f(x)| > \varepsilon$ ($f(x) > \varepsilon$, $f(x) < -\varepsilon$), то говорят что $f(x)$ бесконечно большая и пишут

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty, \quad (\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = +\infty, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty)$$

Теорема. Пусть $\alpha(x) = \bar{o}(1)$ при $x \rightarrow x_0$, $\beta(x) = \bar{o}(1)$ при $x \rightarrow x_0$, $\gamma(x) = O(1)$ в $\mathring{B}(x_0)$. Тогда

1. $\alpha + \beta = \bar{o}(1)$, $x \rightarrow x_0$
2. $c\alpha = \bar{o}(1)$, $x \rightarrow x_0$, $\forall c \in \mathbb{R}$
3. $\alpha\beta = \bar{o}(1)$, $x \rightarrow x_0$
4. $\alpha\gamma = \bar{o}(1)$, $x \rightarrow x_0$

Доказательство. Очевидно по Гейне. □

Утверждение. У функции $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \Leftrightarrow f(x) = a + \bar{o}(1)$, $x \rightarrow x_0$.

Доказательство. очев : (□

Теорема. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \neq 0$, то $\frac{1}{f(x)} = O(1)$ в $\mathring{B}(x_0)$.

Доказательство. По теореме об отделимости $\exists \mathring{B}(x_0)$ и $\exists \varepsilon > 0 : f(\mathring{B}(x_0)) \cap \mathring{B}_\varepsilon(0) \neq \emptyset$. $\forall x \in \mathring{B}(x_0) \Rightarrow |f(x)| \geq \varepsilon \Leftrightarrow \frac{1}{|f(x)|} < \frac{1}{\varepsilon}$. \square

Теорема. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b$, то

1. $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R} \exists \lim_{x \rightarrow x_0} (\alpha f(x) + \beta g(x)) = \alpha a + \beta b$.
2. $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} (f(x)g(x)) = ab$.
3. Если $b \neq 0$, то $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{a}{b}$.

Доказательство. По Гейне. \square

Пример. $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \alpha > \beta$, то $x^\alpha = \bar{o}(x^\beta)$, $x \rightarrow 0$.

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x^\alpha}{x^\beta} = \lim_{x \rightarrow x_0} x^{\alpha-\beta} = 0.$$

$$x + \bar{o}(x) + x^2 + \bar{o}(x^2) = x + \bar{o}(x), \quad x \rightarrow 0.$$

$$\sin x = x + \bar{o}(x), \quad x \rightarrow 0.$$

Теорема. Пусть $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b$ и пусть $\forall x \in \mathring{B}(x_0) : f(x) \geq g(x)$, тогда $a \geq b$.

Доказательство. по Гейне. \square

Теорема. Пусть $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b$, и пусть $a > b$. Тогда $\exists \mathring{B}(x_0) : f(x) > g(x)$.

Доказательство. дописать \square

Теорема. (Теорема о двух милиционерах)

Пусть $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = a$ и пусть в $\mathring{B}(x_0) : f(x) \leq h(x) \leq g(x)$.

Тогда $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = a$.

Доказательство. по Гейне. \square

Определение. $\forall x_1, x_2 \in (\alpha, \beta), x_1 < x_2$:

1. $f(x_1) \leq f(x_2)$ называют неубывающей.
2. $f(x_1) < f(x_2)$ называют возрастающей.
3. $f(x_1) \geq f(x_2)$ называют невозрастающей.
4. $f(x_1) > f(x_2)$ называют убывающей.

такие функции называют монотонными.

Теорема. Пусть $f(x)$ определена на $(a - \delta, a)$, $f(x)$ - неубывающая (невозрастающая) и ограниченная сверху (снизу). Тогда $\exists \lim_{x \rightarrow a-0} f(x) = A$.

Доказательство. $\exists \sup f(x) = A$. $\forall \varepsilon > 0 \exists x_\varepsilon \in (a - \delta, a)$, $f(x_\varepsilon) > A - \varepsilon$. Тогда $\forall x \in (x_\varepsilon, a) : f(x) \geq f(x_\varepsilon) > A - \varepsilon$, а значит $\forall x \in \overset{\circ}{B}(A) : f(x) - A < \varepsilon$. \square

Теорема. (Критерий Коши)

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x_1, x_2 \in \overset{\circ}{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) : |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$$

Доказательство.

$$\begin{aligned} (\Rightarrow) \quad & \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x \in \overset{\circ}{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) : |f(x) - a| < \varepsilon \\ & \forall x_1, x_2 \in \overset{\circ}{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) : |f(x_1) - f(x_2)| = |f(x_1) - a + a - f(x_2)| \leq |f(x_1) - a| + \\ & |f(x_2) - a| < 2\varepsilon. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\Leftarrow) \quad & \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x_1, x_2 \in \overset{\circ}{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) : |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon. \\ & \forall \{x_n\}, x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0 \exists N_{\delta_\varepsilon} : \forall n > N_{\delta_\varepsilon} : |x_n - x_0| < \delta_\varepsilon \\ & \Rightarrow n, m > N_{\delta_\varepsilon} : |f(x_n) - f(x_m)| < \varepsilon \Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a. \\ & \{t_n\}, t \rightarrow x_0, t_n \neq x_0, \exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n) = b. x_1, t_1, x_2, t_2 (\text{пояснить}), \dots \Rightarrow a = b. \end{aligned}$$

\square

6 Непрерывные функции

6.1 Локальные свойства непрерывных функций

Определение. Пусть D_f - область определения $f(x)$. Пусть $x_0 \in D_f$. Если $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0$, что $\forall x \in B_{\delta_\varepsilon}(x_0) \cap D_f : |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$, то $f(x)$ называется непрерывной в точке x_0 .

Замечание. Определение эквивалентно тому, что $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$, если x_0 не изолированная точка.

Теорема. Пусть $f(x), g(x)$ - непрерывны в точке x_0 . Тогда:

1. $\alpha f(x) + \beta g(x)$ - непрерывна в точке x_0
2. $f(x)g(x)$ - непрерывна в точке x_0
3. если $g(x_0) \neq 0$, то $\frac{f(x)}{g(x)}$ непрерывна в точке x_0

Доказательство. Если x_0 - изолированная то очев. Если неизолированная, то по свойствам предела очевидно. \square

Теорема. (Непрерывность композиции непрерывных функций)

$f(x)$ определена в $B_\delta(x_0)$ и $f(x)$ непрерывна в точке x_0 . $f(B_\delta(x_0)) \subset B(y_0)$, $f(x_0) = y_0$. $g(y)$ определена в $B(y_0)$ и непрерывна в точке y_0 . Тогда $g(f(x))$ непрерывна в точке x_0 .

Доказательство. $\forall x_n \rightarrow x_0, f(x_n) \rightarrow f(x_0). y_n \rightarrow y_0, g(y_n) \rightarrow g(y_0). y_n = f(x_n), g(f(x_n)) \rightarrow g(f(x_0)).$ \square

6.2 Глобальные свойства непрерывных функций

Определение. Пусть $f(x)$ - определена на $X \subset \mathbb{R}$ и $\forall x \in X : f(x)$ - непрерывна в точке x . Тогда говорят, что $f(x)$ непрерывна на X и пишут $f(x) \in \mathcal{C}(X)$.

Теорема. (1-я теорема Вейерштрасса)

Если $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$, то $f(x)$ - ограничена на $[a, b]$.

Доказательство. Предположим, что $f(x)$ неограничена, то есть

$\forall M > 0 \exists x_M \in [a, b] : |f(x_M)| > M$. Возьмем $x_1 : |f(x_1)| > 1; \dots;$

$x_2 : |f(x_2)| > 2; \dots; x_M : |f(x_M)| > M; \dots$

$\{x_n\} \subset [a, b] \exists \{x_{n_k}\} : \lim_{k \rightarrow \infty} \{x_{n_k}\} = x_0$ т.к. $f(x)$ непрерывная, то

$\exists \lim_{k \rightarrow \infty} f(\{x_{n_k}\}) = f(x_0)$, но $|f(x_{n_k})| \rightarrow +\infty$. \square

Теорема. (2-я теорема Вейерштрасса)

Пусть $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$. Тогда $f(x)$ имеет max и min значения на $[a, b]$

Доказательство. $\alpha = \sup_{x \in [a, b]} f(x) : \exists x_1 \in [a, b], f(x_1) > \alpha - 1, \exists x_2 \in [a, b], f(x_2) > \alpha - \frac{1}{2} \dots \exists x_n \in [a, b], f(x_n) > \alpha - \frac{1}{n}, \dots \exists \{x_{n_k}\}, x_{n_k} \rightarrow x', f(x_{n_k}) \rightarrow f(x'), \alpha - \frac{1}{n_k} < f(x_{n_k}) \leq \alpha \Rightarrow f(x_{n_k}) \rightarrow \alpha$. \square

Теорема. Пусть $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$. $f(a) = A, f(b) = B$, пусть $a \leq B$. Тогда $\forall C : A \leq C \leq B \exists c \in [a, b], f(c) = C$

Доказательство. $A = B$ ограничена, далее $A < B$. Возьмем $x_1 = \frac{a+b}{2}$. Если $f(\frac{a+b}{2}) = C$, то все. Если $f(\frac{a+b}{2}) \neq C$, то $f(\frac{a+b}{2}) > C$ или $f(\frac{a+b}{2}) < C$. Возьмем ту половину отрезка $[a_1, b_1] : f(a_1) < C < f(b_1)$, снова делим пополам и т.д. Получаем $\{[a_n, b_n]\}$ последовательность вложенных отрезков $\Rightarrow \exists c \in [a_n, b_n], \forall n, a_n \rightarrow c, b_n \rightarrow c. \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(c) \leq C. \lim_{n \rightarrow \infty} f(b_n) = f(c) \geq C \Rightarrow f(c) = C$. \square

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $B(x_0)$. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} = \lim_{x \rightarrow x_0+0} \neq f(x_0)$, то точка x_0 называется точкой устранимого разрыва функции $f(x)$. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} =$

$\alpha, \exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} = \beta, \alpha \neq \beta$, то точка называется точкой разрыва 1 рода функции $f(x)$. Если не существует хотя бы одного из односторонних пределов то x_0 называется точкой разрыва 2 рода.

Пример. $f(x) = \frac{1}{x}$ непрерывна на всей области определения (в нуле нет точки разрыва, она там не определена).

Теорема. Пусть $f(x)$ определена на $[a, b]$ и монотонна. Тогда у этой функции могут быть разрывы только 1-го рода.

Доказательство. Пусть $f(x) \leq f(b)$ и f монотонно возрастает. Так как $f(a) \leq f(x) \leq f(b)$, то f - ограничена $\Rightarrow \forall x_0 \in [a, b] \exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x)$ и $\exists \lim_{x \rightarrow x_0+0}$. Значит у $f(x)$ могут быть разрывы только 1-го рода. \square

Следствие. Утверждение теоремы верно и для функции $f(x)$, определенной на интервале (a, b) .

Доказательство. $\exists [a, b] \subset (a, b) : (a, b) = \bigcup_{n=1}^{\infty} [a_n, b_n]$ \square

Утверждение. У монотонной функции разрывов не более чем счетное множество.

Теорема. (Теорема об обратной функции)

Пусть $f(x)$ строго монотонна на $[a, b]$ и $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$, $f(a) = \alpha$, $f(b) = \beta$. Тогда $\exists f^{-1}(y) \in \mathcal{C}[\alpha, \beta]$ и она строго монотонна.

Доказательство. Пусть строго возрастает. $\forall x_1, x_2, x_1 < x_2 : f(x_1) = y_1 < y_2 = f(x_2)$. Тогда $f(x)$ - биекция между $[a, b]$ и $[\alpha, \beta] \Rightarrow \exists f^{-1}$. Предположим что она разрывная, но тогда нарушается биекция, и вообще нарушается условие того что функция определена на всем отрезке $[a, b]$. \square

Определение. Пусть $f(x)$ определена на $[a, b]$. Если $\forall \varepsilon \exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x', x'' \in [a, b] : |x' - x''| < \delta_\varepsilon$, то $|f(x') - f(x'')| < \varepsilon$, то $f(x)$ называется равномерно непрерывной на $[a, b]$.

Теорема. (Теорема Кантора)

Если $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$, то $f(x)$ равномерно непрерывна на $[a, b]$.

Доказательство. Пусть $\exists \varepsilon_0 > 0$, что $\forall \delta > 0 \exists x', x'' : |x' - x''| < \delta : |f(x') - f(x'')| \geq \varepsilon_0$. Возьмем последовательность $\delta_n = \frac{1}{n} : x', x'', |x' - x''| < \frac{1}{n}, |f(x') - f(x'')| \geq \varepsilon_0$. $\exists x'_{n_k} \rightarrow x_0$, тогда $f(x'_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$ и $f(x''_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$. \square

6.3 Элементарные функции

1. Показательная функция

Пусть $a > 1$

- (i) $n \in \mathbb{N}$, $a^n = \prod_{j=1}^n a$; $a^{n+m} = a^n a^m$
- (ii) $n \in \mathbb{Z}$, $n = -k$, $k \in \mathbb{N}$, тогда $a^{-k} = \frac{1}{a^k}$, $a^0 = 1$
- (iii) $a^{\frac{1}{n}} : b^n = a$ в \mathbb{R}_+ (строго положительные числа). Пусть $A = \{x \in \mathbb{R}_+ : x^n \leq a\}$, $B = \{x \in \mathbb{R}_+ : x^n > a\}$, $A \cup B = \mathbb{R}_+$. По аксиоме полноты $\exists b : x_1 \leq b \leq x_2$, $\forall x_1 \in A$, $\forall x_2 \in B$ и $b = a^{\frac{1}{n}}$. $\forall \frac{m}{n} \in \mathbb{Q}$ $a^{\frac{m}{n}} = (a^{\frac{1}{n}})^m$; $a^{r_1+r_2} = a^{r_1} a^{r_2}$, $(a^{\frac{m_1}{n_1}} \vee a^{\frac{m_2}{n_2}})^{n_1 n_2} \Rightarrow a^{m_1 n_2} \vee a^{m_2 n_1}$.
- (iv) $\lim_{n \rightarrow \infty} a^{\frac{1}{n}} = 1$. $(1 + \frac{a}{n})^n > 1 + a > a \Rightarrow 1 + \frac{a}{n} > a^{\frac{1}{n}} > 1$ по теореме о двух милиционерах $a^{\frac{1}{n}} \rightarrow 1$.

Пусть $\forall x_0 \in \mathbb{R}$, $r_n \rightarrow x_0 - 0$, $s_n \rightarrow x_0 + 0$. Тогда $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a^{r_n} = \alpha$, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a^{s_n} = \beta$, $\alpha \leq \beta$. Пусть $\alpha < \beta$, $a^{s_n} - a^{r_n} = a^{r_n}(a^{s_n - r_n} - 1) \rightarrow \beta - \alpha > 0$?. Рассмотрим подпоследовательность $0 < s_{n_k} - r_{n_k} < \frac{1}{k}$. Тогда $1 < a^{s_{n_k} - r_{n_k}} < a^{\frac{1}{k}}$. По теореме о двух милиционерах $a^{s_{n_k} - r_{n_k}} \rightarrow 1 \Rightarrow a^{s_{n_k}} - a^{r_{n_k}} \rightarrow 0 \Rightarrow \alpha = \beta = a^{x_0}$. Непрерывность и монотонность есть по построению.

- (v) При $0 < a < 1$, $a^x = \frac{1}{(\frac{1}{a})^x}$

2. Функция, обратная к $y = a^x$ называется логарифмом и обозначается $x = \log_a y$. Далее пишем $y = \log_a x$.

$\log_a a^x = \frac{\beta}{\alpha} \log_a x$, $\log_a xy = \log_a x + \log_a y$. Обозначение: $\log_e x := \ln x$.

3. Степенная функция.

$\forall x > 0$, $\forall \alpha \in \mathbb{R} : x^\alpha = e^{\alpha \cdot \ln x}$. Распространяем: при $\alpha \geq 0$ доопределяем x^α в точке x_0 по непрерывности (ищем предел и добавляем его как значение), при $\alpha \in \mathbb{Z}$ доопределяем x^α при $x < 0$ четно, если α - четное и нечетное, если α - нечетное.

4. $y = \sin x$. Возьмем окружность единичного радиуса, на $[0, 2\pi]$ синус - ордината. $\forall x \in \mathbb{R} : |\sin x| \leq |x|$, $\sin(x + \delta) - \sin x = |2 \sin(\frac{\delta}{2}) \cos(x + \frac{\delta}{2})| \leq \delta$. \cos определяем в соответствии определения синуса.

5. $\arcsin x$ определяем на области, где будет биекция с $\sin x$ (обычно берут $-\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2}$)

6. $\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$, $\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$, $\operatorname{th} x = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x}$ и $\operatorname{cth} x = \frac{\operatorname{ch} x}{\operatorname{sh} x}$ для этих функций можно получить формулы, аналогичные тем что верны для тригонометрических функций.

7 Замечательные пределы

Теорема. $\exists \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$.

Доказательство. $\sin x < x < \operatorname{tg} x \Rightarrow \frac{\sin x}{x} < 1$ и $\frac{x}{\sin x} < \frac{1}{\operatorname{ctg} x} \Rightarrow \operatorname{ctg} x < \frac{\sin x}{x} < 1$. По теореме о двух милиционерах $\frac{\sin x}{x} \rightarrow 1$. □