

Математический анализ-1

Лектор: проф. Подольский Владимир Евгеньевич

6 января 2025 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	Правила де Моргана	6
2	Вещественные 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
2.9	Принципы полноты	13
2.10	Отношение эквивалентности. Равномощные множества	16
2.11	Теорема Кантора и аксиома выбора	17
3	Топология вещественной прямой	20
3.1	Окрестность точки. Классификация точек относительно подмножеств действительных чисел	20
3.2	Открытые и замкнутые множества	21
3.3	Компакты	23
3.4	Теорема Больцано-Вейерштрасса	24
4	Числовые последовательности	25
4.1	Предел последовательности	25
4.2	О-символика. Бесконечно малые и бесконечно большие последовательности	26
4.3	Арифметические свойства сходящихся последовательностей	28
4.4	Монотонные последовательности	29
4.5	Неравенство Бернулли и Бином Ньютона	29
4.6	Число e	30

4.7	Сходимость последовательностей и частичные пределы	31
5	Предел функции	33
5.1	Определение предела по Коши и по Гейне	33
5.2	Простейшие свойства предела функции	35
5.3	Предел по множеству. Односторонние пределы	35
5.4	О-символика	36
5.5	Арифметические свойства пределов функций и предельные пе- реходы в неравенствах	38
5.6	Монотонные функции	39
5.7	Критерий Коши	40
6	Непрерывные функции	41
6.1	Локальные свойства непрерывных функций	41
6.2	Глобальные свойства непрерывных функций	41
6.3	Точки разрыва функции	43
6.4	Равномерная непрерывность	43
6.5	Элементарные функции	44
6.6	Замечательные пределы	46
7	Дифференциальное исчисление функций одной переменной	48
7.1	Производная функции	48
7.2	Дифференцируемые функции	50
7.3	Производные элементарных функций	51
7.4	Касательная. Геометрический смысл первого дифференциала . .	52
7.5	Производные и дифференциалы старших порядков	53
7.6	Свойства дифференцируемых функций	54
7.7	Формула Лагранжа. Геометрический смысл и приложения	55
7.8	Правила Лопиталя	58
7.9	Формулы Тейлора	61
7.10	Экстремум функции	64
7.11	Выпуклые функции	65

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 $\forall a : a \in A' \Rightarrow a \in A$. Если A' - подмножество A , то пишут $A' \subset A$.

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 $X \times Y = \{(x, y)\}$, где $x \in X$ и $y \in Y$ называется декартовым произведением множеств X и 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 $y = f(x)$.

Далее пусть $f : X \rightarrow Y$.

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

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

Определение. 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. f - сюръекция $\Leftrightarrow Y = R_f$

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

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 Правила де Моргана

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 Вещественные числа

2.1 Натуральные числа. Аксиоматика Пеано

Определение. (Аксиоматика Пеано)

1. В множестве \mathbb{N} $\forall n \in \mathbb{N}$ существует единственный элемент, называемый следующим и обозначаемый как $S(n)$.
2. В множестве \mathbb{N} $\forall n \in \mathbb{N}$ существует не более одного элемента, для которого n - следующий.
3. В множестве \mathbb{N} существует единственный 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 $n \in \mathbb{N}$ существует 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 $\text{card}X = n$.

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

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 (линейного) порядка на множестве X , если $\forall x, y, z \in X$ 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. Существует единственное отношение порядка на \mathbb{N} такое, что $\forall n \in \mathbb{N} : n \leq S(n)$.

Доказательство. 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. □

2.3 Арифметические операции

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

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

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

Замечание. По определению существуют биекции $A \leftrightarrow \{1, \dots, n\}, B \leftrightarrow \{1, \dots, k\}$.

Возьмем $card(A \cup B) = \{1, \dots, n\} \cup \underbrace{\{S(n), S(S(n)), \dots, S(S(\dots(S(n)) \dots))\}}_k$,

(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. Выполнены:

- $nk = kn$ (коммутативность)
- $n(kt) = (nk)t$ (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 $-\mathbb{N} \cup \{0\} \cup \mathbb{N}$ называется целыми числами и обозначаются \mathbb{Z} . В нем 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 $\mathbb{Q} = \{(m, n) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{N}\}$, элементы которого обозначают $\frac{m}{n}$ 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:

$$\frac{m}{n} \leq \frac{p}{q} \Leftrightarrow mq \leq pn$$

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. $\forall a, b \in \mathbb{Q} a \leq b$ или $b \leq a$
11. $a \leq b$ и $b \leq a \Rightarrow a = b$
12. $a \leq b$ и $b \leq c \Rightarrow a \leq c$
13. $\forall c \in \mathbb{Q} : a \leq b \Rightarrow a + c \leq b + c$
14. $\forall c \in \mathbb{Q} : c > 0 : a \leq b \Rightarrow ac \leq bc$

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).

Аксиома. (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 не существует $\frac{m}{n}$ такого, что $\frac{m^2}{n^2} = 2$

2.8 Модели действительных чисел

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

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.

□

Дедекиндовы сечения

Определение. 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.

□

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

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 $\inf A$.

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

Лемма. (Свойство точной грани)

Если у множества $A \subset \mathbb{R}$ существует $M = \sup A$ или $m = \inf A$, то $\forall \varepsilon > 0 \exists a \in A : a \in (M - \varepsilon, M)$ или $a \in (m, m + \varepsilon)$ соответственно.

Доказательство. Докажем для верхней грани. $M = \sup A \Rightarrow \forall a \in A : a \leq M$. Поскольку M - минимальная из верхних граней, то $\forall \varepsilon > 0 : \widetilde{M} = M - \varepsilon$ - не является верхней гранью. Тогда $\exists a \in A : a > \widetilde{M} \Rightarrow a \in (M - \varepsilon, M)$. \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 $|b_n - a_n| < \varepsilon$.

Теорема. (Принцип вложенных отрезков, принцип полноты Кантора)

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 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 $\psi \circ \varphi : A \rightarrow C$.

□

Замечание. Если A равномощно B то иногда пишут $A \sim B$ или $|A| = |B|$.

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 $\varphi \circ \psi^{-1} : B \rightarrow A$ - искомая биекция.
- (\Rightarrow) Пусть $\varphi : A \rightarrow B$ - биекция, если $A = \emptyset$, то $B = \emptyset$. Индукция по количеству элементов. База: 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 и $\exists! b \in B : b = \varphi(a) \Rightarrow B \setminus \{b\}$ - n -элементное $\Rightarrow B$ - $n + 1$ -элементное.

□

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.

Доказательство. ² Достаточно показать, что $\mathbb{R} \sim (0, 1)$. Например функция $f : (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$, такая что $f(x) = \frac{2x-1}{4x-4x^2}$ задает нужную биекцию. \square

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.

Доказательство. Без доказательства. \square

Определение. Для множеств A и B обозначим $|A| \leq |B|$, если $\exists B' \subset B$ такое, что $A \sim B'$.

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 $|B| \leq |A| \Rightarrow |A| = |B|$ (Теорема Кантора-Бернштейна)
3. $|A| \leq |B|$ и $|B| \leq |C| \Rightarrow |A| \leq |C|$

Доказательство. Без доказательства. \square

Аксиома. (Аксиома выбора)

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

²Не было на лекциях

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

Доказательство. ³ 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 объединение не более чем счётного числа не более чем счётных множеств не более чем счётно, то $(A \setminus A') \cup A' \sim (A \setminus A') \cup (A' \cup B) \sim (A \cup B)$. \square

³Может отличаться от доказательства на лекциях

3 Топология вещественной прямой

3.1 Окрестность точки. Классификация точек относительно подмножеств действительных чисел

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 (в любой ее окрестности есть как точки из A так точки из $\mathbb{R} \setminus A$). Множество всех граничных точек называется границей множества A и обозначается ∂A .

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 $\exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(x) \subset \mathbb{R} \setminus A$, 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. Если $\forall \varepsilon > 0 : A \cap \overset{\circ}{B}_\varepsilon(x) \neq \emptyset$, то x - предельная. Если $\exists \varepsilon > 0 : A \cap \overset{\circ}{B}_\varepsilon(x) = \emptyset$, но по определению $\forall \varepsilon > 0 : A \cap B_\varepsilon(x) \neq \emptyset \Rightarrow x \in A \Rightarrow x$ - изолированная. \square

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.

3.2 Открытые и замкнутые множества

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

Пример. Любой интервал - открытое множество

Определение. Множество $A \subset \mathbb{R}$ называется замкнутым, если 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.

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) : $A' \subset A \Rightarrow \forall x \in \mathbb{R} \setminus A : x \notin A' \Rightarrow \forall x \in \mathbb{R} \setminus A \exists \dot{B}_\varepsilon : \dot{B}_\varepsilon(x) \cap A = \emptyset \Rightarrow B_\varepsilon(x) \cap A = \emptyset$ (т.к $x \notin A$) $\Rightarrow x$ - 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 $u \in \bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i} \Rightarrow \forall i \in \{1, \dots, n\} \exists \varepsilon_i : B_{\varepsilon_i}(u) \in U_{\alpha_i} \Rightarrow \exists \varepsilon_0 = \min\{\varepsilon_i\} \Rightarrow B_{\varepsilon_0} \subset U_{\alpha_i} \forall i \Rightarrow B_{\varepsilon_0} \subset \bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i} \Rightarrow \bigcap_{i=1}^n U_{\alpha_i}$ - 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. \square

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 полноты Вейерштрасса $\exists \alpha = \sup A$. По свойству точной верхней грани:

$\forall \varepsilon > 0 \exists a \in (\alpha - \varepsilon, \alpha] \Rightarrow \alpha$ - точка прикосновения $\Rightarrow \alpha \in A \Rightarrow \alpha = \max A$. \square

3.3 Компакты

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

Определение. Рассмотрим $X \subset \mathbb{R}$. Если для любого покрытия X открытыми множествами $\{A_{\alpha}\}_{\alpha}$ существует $\{\alpha_i\}_{i=1}^n$ - конечное подпокрытие такое, 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 $\Rightarrow \exists! c \in [a_n, b_n] \forall n \Rightarrow \exists \alpha_0 : c \in A_{\alpha_0}$. Поскольку A_{α_0} - открыто, то $\exists B_{\varepsilon}(c) \subset A_{\alpha_0} \Rightarrow \exists n_{\alpha_0} : [a_{n_{\alpha_0}}, b_{n_{\alpha_0}}] \subset A_{\alpha_0}$ получаем противоречие. \square

Теорема. (Лемма Гейне-Бореля)⁴

A - компакт в $\mathbb{R} \Leftrightarrow A$ - замкнуто и ограничено.

Доказательство. Без доказательства. \square

⁴На самом деле, утверждение верно и для \mathbb{R}^n

3.4 Теорема Больцано-Вейерштрасса

Теорема. (Больцано-Вейерштрасса)

Если $A \subset \mathbb{R}$ - ограниченное и бесконечное множество, то в нем есть хотя бы одна предельная точка (т.е. $A' \neq \emptyset$).

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

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

4 Числовые последовательности

4.1 Предел 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 обозначается

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

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

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

Замечание. Теорема об отделимости равносильна следующему утверждению: $\exists \varepsilon > 0 : \dot{B}_\varepsilon(b) \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty = \emptyset$, причем если $b \notin \{a_n\}_{n=1}^\infty$, то $B_\varepsilon(b) \cap \{a_n\}_{n=1}^\infty = \emptyset$.

4.2 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 $\exists M > 0 : \left| \frac{a_n}{b_n} \right| \leq M \forall n$, 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

$$a_n = \bar{o}(1) \quad (\Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0)$$

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. $a_nb_n = \bar{o}(1)$
4. $c_na_n = \bar{o}(1)$

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

□

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

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

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 $a_n - a = \bar{o}(1)$. □

4.3 Арифметические свойства сходящихся последовательностей

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. Пользуясь тем, что $a_n = a + \bar{o}(1)$, $b_n = b + \bar{o}(1)$ и исчислением бесконечно малых, получаем:

1. $a_n + b_n = a + \bar{o}(1) + b + \bar{o}(1) = a + b + \bar{o}(1)$.
2. $ca_n = c(a + \bar{o}(1)) = ca + c\bar{o}(1) = ca + \bar{o}(1)$.
3. $a_n b_n = (a + \bar{o}(1))(b + \bar{o}(1)) = ab + a\bar{o}(1) + b\bar{o}(1) + \bar{o}(1)\bar{o}(1) = ab + \bar{o}(1)$.
4. $\frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} = \frac{a_n b - ab_n}{bb_n} = \frac{b(a + \bar{o}(1)) - a(b + \bar{o}(1))}{b(b + \bar{o}(1))} = \frac{ab - ab + b\bar{o}(1) - a\bar{o}(1)}{b^2 + b\bar{o}(1)} =$
 $= \frac{1}{b^2 + \bar{o}(1)} \bar{o}(1) = O(1)\bar{o}(1) = \bar{o}(1)$.

□

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. □

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 $a_n - b_n \geq 0$.

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

□

Теорема. (Теорема 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. $\forall \varepsilon > 0 \exists N_1$, $\forall n > N_1 : |a_n - a| < \varepsilon$, $\exists N_2$, $\forall n > N_2 : |b_n - a| < \varepsilon \Rightarrow \forall n > N = \max\{N_1, N_2\} : a - \varepsilon < a_n \leq c_n \leq b_n < a + \varepsilon$
 $\Rightarrow |c_n - a| < \varepsilon$.

□

4.4 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 не убывает.
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 не возрастает.

Такие последовательности называют монотонными.

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

Доказательство. Докажем для неубывающей, ограниченной сверху. a_n - ограничена сверху $\Rightarrow \exists a = \sup a_n \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists a_{N_\varepsilon} : a - \varepsilon < a_{N_\varepsilon} < a$, a_n - неубывает $\Rightarrow \forall n > N_\varepsilon : a_n > a - \varepsilon \Rightarrow a - a_n < \varepsilon$. \square

4.5 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.

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

\square

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

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

□

4.6 Число e

Лемма.

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

Доказательство.

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

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

□

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

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

□

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

4.7 Сходимость последовательностей и частичные пределы

Теорема. Если a_n ограничена, то у нее существует сходящаяся подпоследовательность.

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 конечен. 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

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

Доказательство.

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

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

□

Определение. Последовательность a_n , удовлетворяющая условию

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

называется фундаментальной.

Пример.

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

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

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

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

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. □

Определение. Пусть a_n ограничена. Тогда $\exists \max A$ и $\min A$ частичные пределы, которые называют верхним пределом $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$ и нижним пределом $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$ соответственно.

Теорема. Пусть a_n ограничена. Тогда

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sup\{a_k\}_{k=1}^{\infty}, \quad \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \inf\{a_k\}_{k=1}^{\infty}$$

Доказательство. Докажем для верхнего:

$$\sup\{a_k\}_{k=n+1}^{\infty} \leq \sup\{a_k\}_{k=n}^{\infty}$$

$\Rightarrow \sup\{a_k\}_{k=n}^{\infty}$ ограничена снизу и невозрастает $\Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sup\{a_k\}_{k=n}^{\infty} = \alpha$. Значит

$$\forall \varepsilon > 0 : (\alpha + \varepsilon, +\infty) \cap \{a_n\}_{n=1}^{\infty}$$

конечно. С другой стороны

$$\forall \varepsilon > 0 : (\alpha - \varepsilon, \alpha + \varepsilon) \cap \{a_n\}_{n=1}^{\infty}$$

бесконечно $\Rightarrow \alpha$ - частичный предел $\Rightarrow \alpha = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n$. □

Теорема. $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \Leftrightarrow \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ и $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n = a$.

Доказательство.

(\Rightarrow) Если последовательность сходится к a , то все частичные пределы сходятся к a .

(\Leftarrow)

$$\inf\{a_k\}_{k=n}^{\infty} \leq a_n \leq \sup\{a_k\}_{k=n}^{\infty}$$

по лемме о двух милиционерах $a_n \rightarrow a$. □

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

5 Предел функции

5.1 Определение предела по Коши и по Гейне

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

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

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

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $\mathring{B}(x_0)$. Число a называется пределом $f(x)$ в точке x_0 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 функции f при $x \rightarrow \infty$ ($x \rightarrow +\infty$, $x \rightarrow -\infty$) если

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

Теорема. Определения предела по Коши (1) и по Гейне (2) эквивалентны.

Доказательство.

1. (1) \Rightarrow (2):

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

$$\forall x_n : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0 \exists N_{\delta_\varepsilon} > 0 : 0 < |x_0 - x_n| < \delta_\varepsilon$$

$$\Rightarrow \forall n > N_{\delta_\varepsilon}, x_n \in \mathring{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) : |f(x_n) - a| < \varepsilon$$

т.е. $f(x_n) \rightarrow a$.

2. (2) \Rightarrow (1): Выведем из отрицания предела по Коши отрицание предела по Гейне:

$$\exists \varepsilon_0 > 0 \forall \delta > 0 \exists x_\delta \in \mathring{B}_\delta(x_0) : |f(x_\delta) - a| \geq \varepsilon_0$$

Возьмем

$$x_1 \in \mathring{B}_1(x_0) \Rightarrow |f(x_1) - a| \geq \varepsilon_0$$

$$x_2 \in \mathring{B}_{\frac{|x_1 - x_0|}{2}}(x_0) \Rightarrow |f(x_2) - a| \geq \varepsilon_0$$

$$x_3 \in \mathring{B}_{\frac{|x_2 - x_0|}{2}}(x_0) \Rightarrow |f(x_3) - a| \geq \varepsilon_0$$

\vdots

Получили последовательность $x_n \rightarrow x_0$, $x_n \neq x_0$, но при этом $|f(x_n) - a| \geq \varepsilon_0$. 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 $x \rightarrow \infty$ ($+\infty$, $-\infty$) доказываем аналогично.

5.2 Простейшие свойства предела функции

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

Доказательство. Получим противоречие с определением по Гейне, пусть

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

Предположим, что $b \neq a$ - тоже предел. Тогда

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

Получаем, что последовательность $y_n = x_1, t_1, x_2, t_2, \dots : y_n \rightarrow x_0$, но при этом $f(y_n) = f(x_1), f(t_1), f(x_2), f(t_2) \dots$ - имеет два различных частичных предела - противоречие. \square

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

Доказательство. Возьмем $\varepsilon = 1$. Тогда

$$\exists \delta > 0, \forall x \in \mathring{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < 1$$

$\Rightarrow a - 1 < f(x) < a + 1 \Rightarrow f(x)$ - ограничена. \square

Теорема. (Теорема об отделимости)

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

Доказательство. Возьмем $\varepsilon = \frac{|a-b|}{3}$. Тогда

$$\exists \delta > 0, \forall x \in \mathring{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < \frac{|a-b|}{3} \Rightarrow f(\mathring{B}_\delta(x_0)) \cap \mathring{B}_{\frac{|a-b|}{3}}(b) = \emptyset$$

\square

5.3 Предел по множеству. Односторонние пределы

Определение. Число a называется пределом $f(x)$ в точке x_0 по множеству $X \subset \mathbb{R}$, если

$$x_0 \in X' \text{ и } \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x \in \mathring{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) \cap X : |f(x) - a| < \varepsilon$$

Обозначают

$$\lim_{X \ni x \rightarrow x_0} f(x) = a$$

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

$$\exists \lim_{X_1 \ni x \rightarrow x_0} f(x) = a.$$

Доказательство. Очевидно. □

Определение.

1. Если $X = (x_0, x_0 + \delta)$, то обозначают $\lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x) = a$.

2. Если $X = (x_0 - \delta, x_0)$, то обозначают $\lim_{x \rightarrow x_0-0} f(x) = a$.

Такие пределы называются односторонними.

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. ⁵

(\Rightarrow) Поскольку

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0, \forall x \in \overset{\circ}{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < \varepsilon$$

то

$$\forall x \in (x, x + \delta) : |f(x) - a| < \varepsilon \text{ и } \forall x \in (x - \delta, x) : |f(x) - a| < \varepsilon$$

(\Leftarrow) Поскольку

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0, \forall x \in (x, x + \delta) : |f(x) - a| < \varepsilon$$

и поскольку

$$\forall x \in (x - \delta, x) : |f(x) - a| < \varepsilon$$

то выполнено и

$$\forall x \in \overset{\circ}{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < \varepsilon$$

□

5.4 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 $f(x)$ называется бесконечно малой, если $f(x) = \bar{o}(1)$ при $x \rightarrow x_0$.

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

Определение. Для обозначения класса ограниченных функций используется запись $f(x) = O(1)$.

⁵Дано в качестве очевидного

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $\mathring{B}(x_0)$. Если

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

то говорят, что $f(x)$ - бесконечно большая, и пишут

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

Теорема. (Исчисление бесконечно малых)

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 $\mathring{B}(x_0)$, $c \in \mathbb{R}$. Тогда:

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

Доказательство. ⁶ Запишем определение по Гейне:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \alpha(x) = 0 \Leftrightarrow \forall x_n : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0, \forall n : \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha(x_n) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \beta(x) = 0 \Leftrightarrow \forall x_n : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0, \forall n : \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \beta(x_n) = 0$$

$$\gamma(x) = O(1) \Leftrightarrow \exists M > 0 : |\gamma(x)| < M$$

Теперь воспользуемся доказанным для последовательностей:

1. $\alpha(x_n) + \beta(x_n) = \bar{o}(1) + \bar{o}(1) = \bar{o}(1)$.
2. $c\alpha(x_n) = c\bar{o}(1) = \bar{o}(1)$.
3. $\alpha(x_n)\beta(x_n) = \bar{o}(1)\bar{o}(1) = \bar{o}(1)$.
4. $\alpha(x)\gamma(x) = \bar{o}(1)M = \bar{o}(1)$.

□

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

Доказательство. ⁷

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0, \forall x \in \mathring{B}_\delta(x_0) : |f(x) - a| < \varepsilon \Leftrightarrow f(x) - a = \bar{o}(1)$$

□

⁶ Дано в качестве очевидного

⁷ Дано в качестве очевидного

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

Доказательство. По теореме об отделимости

$$\exists \mathring{B}(x_0) \text{ и } \exists \varepsilon > 0 : f(\mathring{B}(x_0)) \cap \mathring{B}_\varepsilon(0) \neq \emptyset$$

Тогда

$$\forall x \in \mathring{B}(x_0) : |f(x)| \geq \varepsilon \Rightarrow \frac{1}{|f(x)|} \leq \frac{1}{\varepsilon}$$

□

5.5 Арифметические свойства пределов функций и предельные переходы в неравенствах

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. Эту теорему можно доказать используя тот факт, что

$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \Leftrightarrow f(x) = a + \bar{o}(1)$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b \Leftrightarrow g(x) = b + \bar{o}(1)$, а также исчисление бесконечно малых функций. □

Пример.

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

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

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

2. $\sin x = x + \bar{o}(x)$, $x \rightarrow 0$, так как $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$.

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. ⁸

$$\forall x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0, \forall n : \lim_{x \rightarrow x_0} f(x_n) = a \text{ и } \lim_{x \rightarrow x_0} g(x_n) = b$$

по условию: $f(x_n) \geq g(x_n)$ значит, по доказанному для последовательностей $a \geq b$. □

⁸Дано в качестве очевидного

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. По теореме об отделимости. □

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. □

5.6 Монотонные функции

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

1. $f(x_1) \leq f(x_2)$, то $f(x)$ называют неубывающей.
2. $f(x_1) < f(x_2)$, то $f(x)$ называют возрастающей.
3. $f(x_1) \geq f(x_2)$, то $f(x)$ называют невозрастающей.
4. $f(x_1) > f(x_2)$, то $f(x)$ 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. Докажем для неубывающей и ограниченной сверху. $\exists \sup f(x) = A$. Значит

$$\forall \varepsilon > 0 \exists x_\varepsilon \in (a - \delta, a) : f(x_\varepsilon) > A - \varepsilon$$

Тогда

$$\forall x \in (x_\varepsilon, a) : f(x) \geq f(x_\varepsilon) > A - \varepsilon$$

а значит

$$\forall x \in \mathring{B}(A) : |f(x) - A| < \varepsilon$$

□

5.7 Критерий Коши

Теорема. (Критерий Коши)

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

Доказательство.

(\Rightarrow)

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

Значит $\forall x_1, x_2 \in \mathring{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) :$

$$|f(x_1) - f(x_2)| = |f(x_1) - a + a - f(x_2)| \leq |f(x_1) - a| + |f(x_2) - a| < 2\varepsilon$$

(\Leftarrow)

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : \forall x_1, x_2 \in \mathring{B}_{\delta_\varepsilon}(x_0) : |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$$

$$\forall x_n : x_n \rightarrow x_0, x_n \neq x_0 \exists N_{\delta_\varepsilon} \in \mathbb{N}, \forall n > N_{\delta_\varepsilon} : |x_n - x_0| < \delta_\varepsilon$$

$$\Rightarrow \forall n, m > N_{\delta_\varepsilon} : |f(x_n) - f(x_m)| < \varepsilon \Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a$$

$t_n : t_n \rightarrow x_0, t_n \neq x_0, \exists \lim_{n \rightarrow \infty} f(t_n) = b$. Рассмотрим последовательность $y_n : x_1, t_1, x_2, t_2, \dots, y_n \rightarrow x_0$ если $a \neq b$ то последовательность $f(y_n)$ будет иметь два частичных предела $\Rightarrow a = b$.

□

6 Непрерывные функции

6.1 Локальные свойства непрерывных функций

Определение. Пусть D_f - область определения $f(x)$, $x_0 \in D_f$. Если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x \in B_{\delta_\varepsilon}(x_0) \cap D_f : |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$$

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)

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

Доказательство. По Гейне:

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

$$y_n = f(x_n), g(f(x_n)) \rightarrow g(f(x_0))$$

\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

$$x_1 : |f(x_1)| > 1, x_2 : |f(x_2)| > 2, \dots x_M : |f(x_M)| > M, \dots$$

Получаем последовательность

$$x_n \subset [a, b] \Rightarrow \exists x_{n_k} : x_{n_k} \rightarrow x_0$$

$f(x)$ непрерывна $\Rightarrow f(x_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$, но $|f(x_{n_k})| \rightarrow \infty$ получаем противоречие. \square

Теорема. (2-я теорема Вейерштрасса)

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

Доказательство. Пусть

$$\alpha = \sup_{x \in [a, b]} f(x)$$

Значит

$$\exists x_1 \in [a, b] : f(x_1) > \alpha - 1, \exists x_2 \in [a, b] : f(x_2) > \alpha - \frac{1}{2}, \dots$$

$$\exists x_n \in [a, b], f(x_n) > \alpha - \frac{1}{n}, \dots$$

$$\Rightarrow \exists \{x_{n_k}\}, x_{n_k} \rightarrow x'$$

$$f(x_{n_k}) \rightarrow f(x'), \alpha - \frac{1}{n_k} < f(x_{n_k}) \leq \alpha \Rightarrow f(x_{n_k}) \rightarrow \alpha$$

\square

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

$$\forall C : A \leq C \leq B \exists c \in [a, b], f(c) = C$$

Доказательство. Если $A = B$ то очевидно, далее пусть $A < B$. 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 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 $\Rightarrow \exists c \in [a_n, b_n], \forall n, a_n \rightarrow c, b_n \rightarrow c$. Тогда по непрерывности:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(c) \leq C, \lim_{n \rightarrow \infty} f(b_n) = f(c) \geq C$$

$$\Rightarrow f(c) = C.$$

\square

6.3 Точки разрыва функции

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $B(x_0)$.

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

Теорема. Пусть $f(x)$ определена на $[a, b]$ и монотонна. Тогда у этой функции не может быть разрывов 2-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 $\exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f(x)$. Значит у $f(x)$ не может быть разрывов 2-го рода. \square

Следствие. Утверждение теоремы верно и для монотонной 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. 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

6.4 Равномерная непрерывность

Определение. Пусть $f(x)$ определена на $[a, b]$. Если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0, \forall x', x'' \in [a, b] : |x' - x''| < \delta_\varepsilon : |f(x') - f(x'')| < \varepsilon$$

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

$$\exists \varepsilon_0 > 0, \forall \delta > 0 \exists x', x'' \in [a, b] : |x' - x''| < \delta : |f(x') - f(x'')| \geq \varepsilon_0$$

Возьмем последовательность

$$\delta_n = \frac{1}{n} : \exists x', x'' \in [a, b] : |x' - x''| < \frac{1}{n} : |f(x') - f(x'')| \geq \varepsilon_0$$

Тогда $\exists x'_{n_k} \rightarrow x_0, \exists x''_{n_k} \rightarrow x_0 \Rightarrow f(x'_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$ и $f(x''_{n_k}) \rightarrow f(x_0)$ - противоречие. \square

6.5 Элементарные функции

1. Показательная функция

Пусть $a > 1$

(i) Определим показательную функцию для натурального аргумента:

$$a^n := \prod_{j=1}^n a, \quad n \in \mathbb{N}, \text{ из определения очевидно свойство: } a^{n+m} = a^n a^m.$$

(ii) Для целого аргумента n определим функцию так:

$$a^n := \begin{cases} a^n, & n \in \mathbb{N}, \\ \frac{1}{a^k}, & n = -k, \quad k \in \mathbb{N}, \\ 1, & n = 0. \end{cases}$$

(iii) Теперь доопределим функцию для рационального аргумента:

Пусть $a^{\frac{1}{n}} = b$, где $b^n = a$, $a, b \in \mathbb{R}_{\geq 1}$. Пусть $A = \{x \in \mathbb{R}_{\geq 1} : x^n \leq a\}$,

$B = \{x \in \mathbb{R}_{\geq 1} : x^n > a\}$, $A \cup B = \mathbb{R}_{\geq 1}$. По аксиоме полноты

$\exists b : x_1 \leq b \leq x_2, \forall x_1 \in A, \forall x_2 \in B$ и $b = a^{\frac{1}{n}}$.

Далее $\forall \frac{m}{n} \in \mathbb{Q}, a^{\frac{m}{n}} := (a^{\frac{1}{n}})^m$.

(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) Доопределим функцию при $0 < a < 1$:

$$a^x := \frac{1}{\left(\frac{1}{a}\right)^x}$$

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

$$x = \log_a y$$

Далее пишем $y = \log_a x$. Известны следующие свойства:

$$\log_{a^\alpha} x^\beta = \frac{\beta}{\alpha} \log_a x, \log_a xy = \log_a x + \log_a y$$

Отдельно выделяют $\log_e x$, его называют натуральным логарифмом и обозначают $\ln x$.

3. Степенная функция.

$\forall x > 0, \forall \alpha \in \mathbb{R}$ степенная функция определяется как

$$x^\alpha := e^{\alpha \cdot \ln x}$$

Распространяем: при $\alpha \geq 0$ доопределим 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. Тригонометрические функции:

$y = \sin x$ определим так: возьмем окружность единичного радиуса, на $[0, 2\pi]$ синус - ордината.

$$\forall x \in \mathbb{R} : |\sin x| \leq |x|, \sin(x + \delta) - \sin x = |2 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cos\left(x + \frac{\delta}{2}\right)| \leq \delta.$$

$\cos x$ определяем в соответствии с определением синуса.

$$\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x}, \operatorname{ctg} x = \frac{\cos x}{\sin x}$$

5. Обратные тригонометрические функции:

$y = \arcsin x$, обратную к $\sin x$ определяем на области, где будет биекция с $\sin x$ (обычно берут $-\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2}$). Аналогично определяются обратные к $\cos x$, $\operatorname{tg} x$ и $\operatorname{ctg} x$.

6. Гиперболические функции:

$$\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, \quad \operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}, \quad \operatorname{th} x = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x}, \quad \operatorname{cth} x = \frac{\operatorname{ch} x}{\operatorname{sh} x}$$

Для этих функций можно получить формулы, аналогичные тем, что верны для тригонометрических функций.

6.6 Замечательные пределы

Теорема. (Первый замечательный предел)

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

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

Утверждение.

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

Доказательство. Воспользуемся определением по Гейне. Пусть $\alpha_n \rightarrow +\infty$:

$$\left(1 + \frac{1}{[\alpha_n] + 1}\right)^{[\alpha_n]} \leq \left(1 + \frac{1}{\alpha_n}\right)^{\alpha_n} \leq \left(1 + \frac{1}{[\alpha_n]}\right)^{[\alpha_n] + 1}$$

\Rightarrow по лемме о двух милиционерах $\left(1 + \frac{1}{\alpha_n}\right)^{\alpha_n} \rightarrow e$. Теперь пусть $\beta_n \rightarrow -\infty$:

$$\left(1 + \frac{1}{\beta_n}\right)^{\beta_n} = \left(\frac{\beta_n + 1}{\beta_n}\right)^{\beta_n} = \left(\frac{\beta_n}{\beta_n + 1}\right)^{-\beta_n} = \left(1 - \frac{1}{\beta_n + 1}\right)^{-\beta_n}$$

□

Следствие.

$$\lim_{x \rightarrow 0} (1 + x)^{\frac{1}{x}} = e$$

Утверждение.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + x)}{x} = 1$$

Доказательство. В силу непрерывности натурального логарифма:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1 + x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \ln(1 + x)^{\frac{1}{x}} = 1$$

□

Теорема. (Второй замечательный предел)

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = 1$$

Доказательство. Пусть $t = e^x - 1 \Rightarrow e^x = 1 + t \Rightarrow x = \ln(1 + t)$. Тогда

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t}{\ln(1 + t)} = 1$$

□

7 Дифференциальное исчисление функций одной переменной

7.1 Производная функции

В следующих определениях предполагается, что $f(x)$ определена в $B(x_0)$.

Определение. Производной функции $f(x)$ в точке x_0 называется (если он существует) предел

$$f'(x_0) := \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

Определение. Производной функции $f(x)$ в точке x_0 по множеству A называется (если он существует) предел

$$f'_A(x_0) := \lim_{A \ni \Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

Если $A = (x_0 - \Delta x, x_0)$ или $(x_0, x_0 + \Delta x)$, то пишут $f'_-(x_0)$ или $f'_+(x_0)$.

Замечание. Если обозначить $\Delta x = x - x_0$, то

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

Теорема. Если существует производная функции $f(x)$ в точке x_0 , то $f(x)$ непрерывна в точке x_0 .

Доказательство.

$$\exists f'(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \Rightarrow \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = f'(x) + \bar{o}(1)$$

Так как $x - x_0 = \bar{o}(1)$ при $x \rightarrow x_0$, то это равенство можно записать в виде:

$$f(x) - f(x_0) = (f'(x) + \bar{o}(1))(x - x_0) = \bar{o}(1)$$

Значит

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

□

Теорема. Если у функций $f(x)$ и $g(x)$ существуют производные в точке x_0 , то $\forall C \in \mathbb{R}$ выполнено:

$$1. \exists (Cf(x_0))' = Cf'(x_0).$$

$$2. \exists (f(x_0) \pm g(x_0))' = f'(x_0) \pm g'(x_0).$$

Теорема. Если $\exists f'(x_0)$ и $\exists g'(x_0)$, то $\exists (f(x_0)g(x_0))' = f'(x_0)g(x_0) + g'(x_0)f(x_0)$.

Доказательство.

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)g(x) - f(x_0)g(x_0)}{x - x_0} &= \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)g(x) - f(x_0)g(x) + f(x_0)g(x) - f(x_0)g(x_0)}{x - x_0} = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{(f(x) - f(x_0))g(x)}{x - x_0} + \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{(g(x) - g(x_0))f(x_0)}{x - x_0} = \\ &= f'(x_0)g(x_0) + g'(x_0)f(x_0) \end{aligned}$$

в последнем переходе используется непрерывность $g(x)$

($\exists g'(x_0) \Rightarrow g(x)$ непрерывна в точке x_0). □

Теорема. Если $\exists f'(x_0)$, $\exists g'(x_0)$ и $g(x_0) \neq 0$, то

$$\exists \left(\frac{f(x_0)}{g(x_0)} \right)' = \frac{f'(x_0)g(x_0) - f(x_0)g'(x_0)}{g^2(x_0)}$$

Доказательство.

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{f(x)}{g(x)} - \frac{f(x_0)}{g(x_0)}}{x - x_0} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)g(x_0) - f(x_0)g(x)}{g(x)g(x_0)(x - x_0)} = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)g(x_0) - f(x_0)g(x_0) + f(x_0)g(x_0) - f(x_0)g(x)}{g(x)g(x_0)(x - x_0)} = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{(f(x) - f(x_0))g(x_0) - (g(x) - g(x_0))f(x_0)}{g(x)g(x_0)(x - x_0)} = \\ &= \frac{f'(x_0)g(x_0) - g'(x_0)f(x_0)}{g^2(x_0)} \end{aligned}$$

в последнем переходе используется непрерывность $g(x)$. □

Теорема. Пусть $y = f(x)$, $y_0 = f(x_0)$, $\exists f'(x_0)$, $\exists g'(y_0)$. Тогда

$$\exists (g(f(x_0)))' = g'(f(x_0))f'(x_0)$$

Доказательство. Пусть $x_n \rightarrow x_0$, $f(x_n) \rightarrow f(x_0)$ и $f(x_n) \neq f(x_0)$. Тогда

$$\begin{aligned} (g(f(x_0)))' &= \lim_{x_n \rightarrow x_0} \frac{g(f(x_n)) - g(f(x_0))}{x_n - x_0} = \\ &= \lim_{x_n \rightarrow x_0} \frac{g(f(x_n)) - g(f(x_0))}{f(x_n) - f(x_0)} \cdot \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0} = g'(f(x_0))f'(x_0) \end{aligned}$$

Остался случай, когда в любой окрестности x_0 есть бесконечно много точек, в которых $f(x_n) = f(x_0)$. Тогда

$$f'(x_0) = \lim_{x_n \rightarrow x_0} \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0} = 0$$

$$\Rightarrow g'(f(x_0))f'(x_0) = 0$$

□

Пример. $(f(g(h(a(x)))))' = f'(g(h(a(x)))) \cdot g'(h(a(x))) \cdot h'(a(x)) \cdot a'(x)$

7.2 Дифференцируемые функции

Определение. Разность $\Delta x = x - x_0$ называется приращением аргумента. Разность $f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$ называется полным приращением функции.

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $B(x_0)$. Если $\exists A \in \mathbb{R}$ такое, что

$$f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = A\Delta x + \bar{o}(\Delta x)$$

то $f(x)$ называется дифференцируемой в точке x_0 , а главная линейная часть приращения функции $A\Delta x$ называется (первым) дифференциалом $f(x)$ в точке x_0 , его обозначают $df = A\Delta x$.

Если функция $f(x)$ дифференцируема на $X \subset \mathbb{R}$, то пишут $f(x) \in \mathcal{D}(X)$

Теорема. $f(x) \in \mathcal{D}(x_0) \Leftrightarrow \exists f'(x_0)$.

Доказательство.

(\Rightarrow) : $f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = A\Delta x + \bar{o}(\Delta x)$, значит

$$\frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = A + \bar{o}(1) \Rightarrow \exists f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = A$$

(\Leftarrow) : $\exists f'(x_0)$, значит

$$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \Rightarrow f(x_0 + \Delta x) - f(x_0) = f'(x_0)\Delta x + \bar{o}(\Delta x)$$

□

Замечание.

$$1. df = f'(x_0)\Delta x$$

$$2. dx = x'\Delta x = \Delta x \Rightarrow df = f'(x)dx$$

Примеры.

$$1. y = y(x) \quad dy = y'(x) \, dx \Leftrightarrow dx = \frac{1}{y'(x)} \, dy$$

$$2. x^2 + y^2 = 1 \Rightarrow y = \sqrt{1 - x^2}$$

$$2x \, dx + 2y \, dy = 0 \Leftrightarrow dy = -\frac{x}{y} \, dx = -\frac{x}{\sqrt{1 - x^2}} \, dx.$$

$$3. \begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t). \end{cases} \quad \begin{cases} dx = x'_t \, dt, \\ dy = y'_t \, dt. \end{cases} \quad dy = \frac{y'_t}{x'_t} \, dx \quad \begin{cases} y'_x = \frac{y'_t}{x'_t}, \\ x = x(t). \end{cases}$$

Теорема. (Теорема о производной обратной функции)

Пусть $\exists y' = f'(x_0)$, $f'(x_0) \neq 0$. Тогда $\exists x = f^{-1}(y)$ и

$$(f^{-1}(y_0))' = \frac{1}{f'(x_0)}$$

Доказательство.

$$(f^{-1}(y_0))' = \lim_{y \rightarrow y_0} \frac{f^{-1}(y) - f^{-1}(y_0)}{y - y_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x - x_0}{f(x) - f(x_0)} = \frac{1}{f'(x_0)}$$

□

7.3 Производные элементарных функций

$$1. (e^x)' = e^x$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{x_0 + \Delta x} - e^{x_0}}{\Delta x} = e^{x_0} \cdot \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{e^{\Delta x} - 1}{\Delta x} = e^{x_0}$$

$$2. y' = (\ln x)' = \frac{1}{x}$$

$$(\ln x)' = \frac{1}{e^y} = \frac{1}{e^{\ln x}} = \frac{1}{x}$$

$$3. (x^\alpha)' = \alpha x^{\alpha-1}$$

$$(x^\alpha)' = (e^{\alpha \ln x})' = \frac{\alpha}{x} \cdot e^{\alpha \ln x} = \alpha x^{\alpha-1}$$

$$4. (\sin x)' = \cos x.$$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sin(x_0 + \Delta x) - \sin x_0}{\Delta x} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{2 \sin \frac{\Delta x}{2} \cos(x_0 + \frac{\Delta x}{2})}{\Delta x} = \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \cos x_0 \cos \frac{\Delta x}{2} - \sin x_0 \sin \frac{\Delta x}{2} = \cos x_0 \end{aligned}$$

$$5. y' = (\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$\begin{aligned} (\arcsin x)' &= \frac{1}{(\sin y)'} = \frac{1}{\cos y} = \frac{1}{\cos(\arcsin x)} = \frac{1}{\sqrt{1-\sin^2(\arcsin x)}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \end{aligned}$$

7.4 Касательная. Геометрический смысл первого дифференциала

Определение. Луч $l_0 = l(\alpha_0, (x_0, y_0))$ с началом в точке (x_0, y_0) и углом к Ox , $\alpha_0 \in [-\pi, \pi]$ называется предельным положением семейства лучей $l(t)$, $t, t_0 \in I$, если они начинаются в той же самой точке (x_0, y_0) и $\lim_{x \rightarrow x_0} \alpha(t) = \alpha_0$.

Определение. Пусть $f(x)$ определена на $[x_0, x_0 + \delta)$. Если семейство лучей $l(x, x_0)$, проходящих через точки $(x_0, f(x_0))$ и $(x, f(x))$ имеет предельное положение при $x \rightarrow x_0 + 0$, то это предельное положение называется правой полукасательной. Аналогично определяется левая полукасательная. У правой полукасательной $\alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, у левой $\alpha \in [-\pi, -\frac{\pi}{2}] \cup [\frac{\pi}{2}, \pi]$.

Определение. Если углы наклона у правой и левой полукасательной отличаются на π , то образованная этими лучами прямая называется касательной прямой.

Определение.

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_+ &= \lim_{x \rightarrow x_0+0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = f'_+(x_0) \\ \operatorname{tg} \alpha_- &= \lim_{x \rightarrow x_0-0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = f'_-(x_0) \end{aligned}$$

Утверждение. Уравнение касательной имеет вид:

$$y - y_0 = f'(x_0)(x - x_0)$$



$$df = f'(x)dx$$

Утверждение. (Инвариантность формы первого дифференциала)

Пусть $y = y(x)$. Если переменная x - независимая, то

$$dy = y'(x)dx$$

Если $x = x(t)$, то дифференциал dy все равно вычисляется по той же формуле.

Доказательство.

$$dy = y'(x)x'(t)dt = y'(x)dx$$

□

7.5 Производные и дифференциалы старших порядков

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $B(x_0)$, $f(x) \in \mathcal{D}(B(x_0))$. Если $\exists (f'(x_0))'$, то говорят, что у функции есть вторая производная в точке x_0 , и обозначают $f''(x_0)$. Аналогично определяется производная порядка $n \in \mathbb{N}$, обозначают $f^{(n)}(x)$.

Определение. Пусть $f(x) \in \mathcal{D}(B(x_0))$, $f'(x) \in \mathcal{D}(B(x_0))$. Возьмем первый дифференциал от первого дифференциала

$$\delta(f'(x)dx) = \delta(f'(x))dx = f''(x)\delta x dx \quad (*)$$

Выражение $(*)$, взятое при $\delta x = dx$, называется вторым дифференциалом $f(x)$, обозначается $d^2 f(x) = f''(x)(dx)^2$. Аналогично определяется дифференциал порядка $n \in \mathbb{N}$:

$$\delta(f^{(n-1)}(x)dx) = f^{(n)}(x)dx^{n-1}\delta x|_{\delta x=dx} = f^{(n)}dx^n = d^n f(x)$$

Пример. (Неинвариантность формы дифференциала старших порядков)

$$d^2 y(x) = y''(x)dx^2 \neq y''(x(t))x'(t)^2 dt^2$$

$$d(dy(x(t))) = d(y'(x(t))x'(t)dt) = (y''(x(t))x'(t)^2 + y'(x(t))x''(t))dt^2$$

Определение. Запись $f(x) \in \mathcal{C}^n[a, b]$ обозначает, что у функции f есть n производных и они все непрерывны на отрезке $[a, b]$.

7.6 Свойства дифференцируемых функций

Определение. Пусть $f(x)$ определена в $B(x_0)$. Если $\forall x \in \mathring{B}(x_0)$ и $f(x) > f(x_0)$, то x_0 - точка минимума. Если $f(x) < f(x_0)$, то x_0 - точка максимума. Такие точки называют точками экстремума.

Теорема. (Теорема Ферма)

Пусть $f(x)$ определена в $B(x_0)$, пусть существуют левая и правая производные в точке x_0 . Тогда

1. x_0 - точка максимума, если $f'_-(x_0) \geq 0$ и $f'_+(x_0) \leq 0$.
2. x_0 - точка минимума, если $f'_-(x_0) \leq 0$ и $f'_+(x_0) \geq 0$.

Доказательство. (для точки максимума)

$$f'_-(x_0) = \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq 0 \text{ при } x \in (x_0 - \delta, x_0)$$

$$f'_+(x_0) = \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leq 0 \text{ при } x \in (x_0, x_0 + \delta)$$

□

Следствие. ⁹ Если $\exists f'(x_0)$, то $f'(x_0) = 0 \Rightarrow x_0$ - экстремум.

Теорема. (Необходимое условие существования экстремума)

Если $f(x)$ имеет в экстремум в точке x_0 , то либо $f'(x_0) = 0$, либо не существует производной в точке x_0 .

⁹Зачастую этот факт и именуют теоремой Ферма

Теорема. (Теорема Ролля)

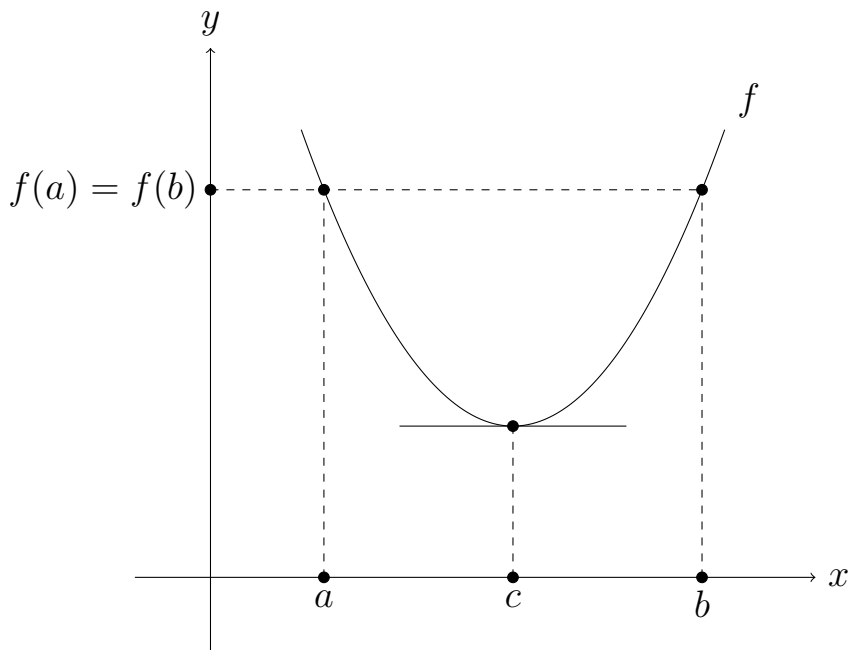
Пусть $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$, $f(x) \in \mathcal{D}(a, b)$. Если $f(a) = f(b)$, то $\exists c \in (a, b) : f'(c) = 0$.

Доказательство. Если $\exists x_{\max}$ такой, что $\forall a : f(x_{\max}) > f(a) \Rightarrow f'(x_{\max}) = 0$.

Если $\exists x_{\min}$ такой, что $\forall a : f(x_{\min}) < f(a) \Rightarrow f'(x_{\min}) = 0$.

Если $\forall x \in (a, b) : f(x) = f(a) = f(b)$, то $f'(x) = 0$ □

Геометрически это означает, что при таких условиях найдется точка, в которой касательная параллельна оси абсцисс.



7.7 Формула Лагранжа. Геометрический смысл и приложения

Теорема. (Формула Лагранжа, формула дифференциального среднего)

Пусть $f(x) \in \mathcal{C}[a, b]$, $f(x) \in \mathcal{D}(a, b)$. Тогда $\exists c \in (a, b) :$

$$f(b) - f(a) = f'(c)(b - a)$$

Доказательство. Введем функцию $\varphi(x) :$

$$\varphi(x) = f(x) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a) \Rightarrow \varphi(a) = f(a), \varphi(b) = f(a)$$

Тогда по теореме Ролля $\exists c \in (a, b) :$

$$\varphi'(c) = f'(c) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = 0$$

□

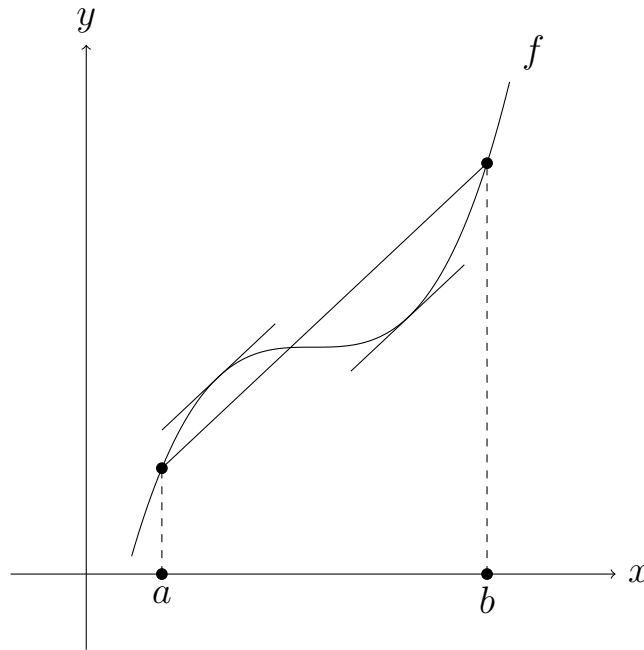
Следствие. (Важное следствие из формулы Лагранжа)

Пусть $f(x) \in \mathcal{D}(a, b)$. Если $f'(x) \equiv 0$, то $f(x) = \text{const}$.

Доказательство. $\forall x_1, x_2 \in (a, b) : f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) = 0$ □

Геометрически теорема Лагранжа означает, что в некоторой точке $(c, f(c))$, где $c \in (a, b)$, касательная к графику функции будет параллельна хорде, соединяющей точки $(a, f(a))$ и $(b, f(b))$.

$$f(b) - f(a) = f'(c)(b - a) \Leftrightarrow f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$



Отметим, что точек, удовлетворяющих формуле Лагранжа, может быть несколько.

Теорема. (Формула Коши)

Пусть $f(x), g(x) \in \mathcal{C}[a, b]$, $f(x), g(x) \in \mathcal{D}(a, b)$, $g'(x) \neq 0 \forall x \in (a, b)$. Тогда $\exists c \in (a, b)$ такая, что

$$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}$$

Доказательство. Заметим, что $g(b) \neq g(a)$, так как иначе, по теореме Ролля существует $c \in (a, b) : g'(c) = 0$. Введем функцию $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = f(x) - \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}(g(x) - g(a)) \Rightarrow \varphi(b) = f(a), \varphi(a) = f(a)$$

Тогда по теореме Ролля $\exists c \in (a, b) :$

$$\varphi'(c) = f'(c) - \frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}g'(c) = 0$$

□

Теорема. (Связь монотонной функции и знака ее производной)

1. Пусть $f(x) \in \mathcal{D}(a, b)$.

- Если $f(x)$ неубывает на (a, b) , то $\forall c \in (a, b) : f'(c) \geq 0$.
- Если $f(x)$ невозрастает на (a, b) , то $\forall c \in (a, b) : f'(c) \leq 0$.

2. • Пусть $f'(x) \geq 0$. Тогда $f(x)$ неубывает.
• Пусть $f'(x) \leq 0$. Тогда $f(x)$ невозрастает.
3. • Пусть $f'(x) > 0$. Тогда $f(x)$ строго возрастает.
• Пусть $f'(x) < 0$. Тогда $f(x)$ строго убывает.

Доказательство. Воспользуемся формулой Лагранжа:

1. Докажем для неубывающей: $\forall x_1, x_2 \in (a, b), x_1 \leq x_2 :$

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq 0 \Rightarrow f'(x) \geq 0$$

2. Докажем для неубывающей: $\forall x_1, x_2 \in (a, b), x_1 \leq x_2 :$

$$f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) \Rightarrow f'(c) = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq 0$$

3. Докажем для возрастающей: $\forall x_1, x_2 \in (a, b), x_1 < x_2 :$

$$f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) \Rightarrow f'(c) = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} > 0$$

□

Теорема. Пусть $f(x) \in \mathcal{C}(B(x_0))$, $f(x) \in \mathcal{D}(\mathring{B}(x_0))$

1. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0-0} f'(x) = f'(x_0 - 0)$, то $\exists f'_-(x_0)$ и $f'_-(x_0) = f'(x_0 - 0)$.
2. Если $\exists \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) = f'(x_0 + 0)$, то $\exists f'_+(x_0)$ и $f'_+(x_0) = f'(x_0 + 0)$.

Доказательство. Докажем для правой производной. По формуле Лагранжа $\exists c \in (x_0, x)$:

$$f'(c) = \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}, \quad x \rightarrow x_0 + 0, \quad c \rightarrow x_0 + 0$$

Тогда

$$f'(x_0 + 0) = \lim_{x \rightarrow x_0+0} f'(x) = \lim_{x \rightarrow x_0+0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = f'_+(x_0)$$

□

Следствие. Если $f(x) \in \mathcal{D}(a, b)$, то $f'(x)$ может иметь разрывы только второго рода.

Доказательство. Покажем, что у такой функции не может быть устранимых разрывов и разрывов первого рода:

1. Если $f'_-(x_0) = f'_+(x_0)$, то $\exists f'(x_0) = f'_-(x_0) = f'_+(x_0)$.
2. Если $f'_-(x_0) \neq f'_+(x_0)$, тогда $f'(x_0)$ не существует.

Таким образом, могут быть разрывы только второго рода. □

Теорема. (Теорема Дарбу о промежуточных значениях производной)

Пусть $f(x) \in \mathcal{D}[a, b]$, $f'_+(a) = A$, $f'_-(b) = B$, C - число между A и B . Тогда $\exists c \in [a, b]$ такая, что $f'(c) = C$.

Доказательство. Тривиальный случай: Если $A = B$, то очев. Далее $A \neq B$

1. Пусть $A < 0$, $B > 0$, $C = 0$. Тогда

$$\frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x} < 0 \Rightarrow \exists \delta > 0, x \in [a, a + \delta) : f(x) < f(a)$$

$$\frac{f(b + \Delta x) - f(b)}{\Delta x} > 0 \Rightarrow \exists \delta > 0, x \in (b - \delta, b] : f(x) < f(b)$$

(при достаточно малых x) $\Rightarrow x_{\min} \in (a, b) \Rightarrow f'(x_{\min}) = 0$, $c = x_{\min}$.

2. Пусть $A > 0$, $B < 0$, $C = 0$. Тогда рассмотрим $g(x) = -f(x)$, а для нее верен предыдущий случай.
3. Пусть $A \neq B$ - любые, C - между A и B - любое. Рассмотрим функцию $g(x) = f(x) - Cx$. Тогда $g'(a) = A - C$, $g'(b) = B - C$. Заметим, что $g'(a)$ и $g'(b)$ разных знаков $\Rightarrow \exists g'(c) = 0$ (свели к первому и второму случаю).

□

7.8 Правила Лопиталля

Теорема. Пусть $f(x), g(x) \in \mathcal{D}(B(x_0))$, $f(x_0) = g(x_0) = 0$, $g(x) \neq 0$ в $\dot{B}(x_0)$ и $g'(x) \neq 0$ в $B(x_0)$. Тогда

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)}$$

Доказательство.

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{g(x) - g(x_0)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}}{\frac{g(x) - g(x_0)}{x - x_0}} = \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)}$$

□

Теорема. Пусть $f(x), g(x) \in \mathcal{D}(\mathring{B}(x_0))$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = 0$ и $g'(x) \neq 0$ $\forall x \in \mathring{B}(x_0)$. Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = A \Rightarrow \exists \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = A$$

А также

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \infty \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \infty$$

Доказательство. ¹⁰ Из существования предела отношения производных имеем:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x \in \mathring{B}(x_0) : \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} - A \right| < \varepsilon$$

Доопределим функции в точке x_0 : $f(x_0) := 0$, $g(x_0) := 0$. Тогда $f(x), g(x) \in \mathcal{C}(x_0)$ при этих всех условиях выполнена теорема Коши:

$$\left| \frac{f(x)}{g(x)} - A \right| = \left| \frac{f(x) - f(x_0)}{g(x) - g(x_0)} - A \right| = \left| \frac{f'(c)}{g'(c)} - A \right| < \varepsilon$$

Аналогично, условие

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x \in \mathring{B}(x_0) : \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} - A \right| > \varepsilon$$

влечет выполнение

$$\left| \frac{f(x)}{g(x)} - A \right| = \left| \frac{f'(c)}{g'(c)} - A \right| > \varepsilon$$

где $x \in \mathring{B}(x_0)$, а c - точка между x и x_0 . □

Теорема. Пусть $f(x), g(x) \in \mathcal{D}(a, +\infty)$, $\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$, $\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$, $g(x) \neq 0$, $g'(x) \neq 0$. Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = A \Rightarrow \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = A$$

А также

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \infty \Rightarrow \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = \infty$$

Для $x \rightarrow -\infty$ верно аналогичное утверждение.

Доказательство. Сделав замену, сведем теорему к предыдущей. □

¹⁰ Доказательство модифицировано в соответствии со старым конспектом лекций Подольского и курсом лекций Солодова на teach-in

Теорема. Пусть $f(x), g(x) \in \mathcal{D}(x_0 - \delta, x_0)$, $f(x), g(x) \rightarrow \pm\infty$, $x \rightarrow x_0 - 0$, $g'(x) \neq 0 \forall x \in \dot{B}(x_0)$. Тогда

$$\exists \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = A \Rightarrow \exists \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} \frac{f(x)}{g(x)} = A$$

А также

$$\lim_{x \rightarrow x_0 - 0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \pm\infty \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} \frac{f(x)}{g(x)} = \pm\infty$$

Для правой полуокрестности верно аналогичное утверждение.

Доказательство. ¹¹ Пусть $x_2 < x_1 < x_0$. По формуле Коши $\exists c \in (x_2, x_1)$:

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{g(x_1) - g(x_2)} = \frac{f'(c)}{g'(c)} \Rightarrow f(x_1) = f(x_2) + \frac{f'(c)}{g'(c)} \cdot g(x_1) - \frac{f'(c)}{g'(c)} \cdot g(x_2)$$

поделив это равенство на $g(x)$, получим:

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f(x_2)}{g(x_1)} + \frac{f'(c)}{g'(c)} - \frac{f'(c)}{g'(c)} \cdot \frac{g(x_2)}{g(x_1)}$$

По условию существования предела отношения производных выберем такой δ_1 , что $\forall \varepsilon > 0 \exists x_0 - x_1 > \delta_1 > 0$, $\forall x \in (a - \delta_1, a) : \left| \frac{f'(x)}{g'(x)} - A \right| < \varepsilon$, значит

$$\left| \frac{f'(x)}{g'(x)} \right| < |A| + \varepsilon$$

По неравенству треугольника:

$$\left| \frac{f(x_1)}{g(x_1)} - A \right| \leq \left| \frac{f(x_2)}{g(x_1)} \right| + \left| \frac{f'(c)}{g'(c)} - A \right| + \left| \frac{f'(c)}{g'(c)} \right| \cdot \left| \frac{g(x_2)}{g(x_1)} \right|$$

Ввиду расположения точки c :

$$\left| \frac{f'(c)}{g'(c)} - A \right| < \varepsilon$$

Поскольку $\lim_{x \rightarrow a - 0} \frac{1}{g(x)} = 0$, то $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_2 > 0 : \forall x \in (a - \delta_2, a) : \frac{1}{g(x)} < \varepsilon$. Значит

$$\left| \frac{f(x_2)}{g(x_1)} \right| < \varepsilon \quad \text{и} \quad \left| \frac{g(x_2)}{g(x_1)} \right| < \frac{\varepsilon}{|A| + \varepsilon}$$

Значит, выбрав $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2\}$, получим:

$$\left| \frac{f(x_1)}{g(x_1)} - A \right| < \varepsilon + \varepsilon + \frac{\varepsilon}{|A| + \varepsilon} (|A| + \varepsilon) = 3\varepsilon$$

Аналогично

$$\frac{f'(x)}{g'(x)} \rightarrow \pm\infty \Rightarrow \frac{f(x)}{g(x)} \rightarrow \pm\infty$$

□

¹¹ Доказательство модифицировано в соответствии с курсом лекций Солодова на teach-in

7.9 Формулы Тейлора

Определение. Пусть $\exists f^{(n)}(x_0)$. Формула

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + r_n(x, x_0)$$

называется формулой Тейлора с центром в точке x_0 и остаточным членом $r_n(x, x_0)$.

Теорема. (Формула Тейлора с остаточным членом в форме Пеано)

Пусть $\exists f^{(n)}(x_0)$. Тогда остаточный член $r_n(x, x_0) = \bar{o}(x - x_0)^n$, $x \rightarrow x_0$.

Доказательство.

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{r_n(x, x_0)}{(x - x_0)^n} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k}{(x - x_0)^n} = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x) - \sum_{k=1}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{(k-1)!} (x - x_0)^{k-1}}{n(x - x_0)^{n-1}} = \dots = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f^{(n-1)}(x) - f^{(n-1)}(x_0) - f^{(n)}(x_0)(x - x_0)}{n!(x - x_0)} = \\ &= \frac{1}{n!} \cdot \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f^{(n-1)}(x) - f^{(n-1)}(x_0)}{x - x_0} - f^{(n)}(x_0) = 0 \end{aligned}$$

□

Теорема. (Остаточный член в общей форме)

Пусть $f(t) \in \mathcal{C}^n[x_0, x]$, $f^{(n)} \in \mathcal{D}(x_0, x)$, $\varphi(t) \in \mathcal{C}[x_0, x]$, $\varphi(t) \in \mathcal{D}(x_0, x)$, $\varphi'(t) \neq 0$. Тогда $\exists c \in (x_0, x)$ такая, что

$$r_n(x_0, x) = \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{\varphi'(c)} \cdot \frac{f^{(n+1)}(c)}{n!} (x - c)^n$$

Доказательство. Введем вспомогательную функцию

$$\begin{aligned} \psi(t) &= \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(t)}{k!} (x - t)^k \\ \psi(x_0) &= \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k, \quad \psi(x) = f(x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{r_n(x, x_0)}{\varphi(x) - \varphi(x_0)} &= \frac{\psi(x) - \psi(x_0)}{\varphi(x) - \varphi(x_0)} = \frac{\psi'(c)}{\varphi'(c)} = \\
&= \frac{1}{\varphi'(c)} \left(\sum_{k=0}^n \frac{f^{(k+1)}(c)}{k!} (x - c)^k - \sum_{k=1}^n \frac{f^{(k)}(c)}{(k-1)!} (x - c)^{k-1} \right) = \\
&= \frac{1}{\varphi'(c)} \cdot \frac{f^{(n+1)}(c)}{n!} (x - c)^n
\end{aligned}$$

Отсюда

$$r_n(x, x_0) = \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{\varphi'(c)} \cdot \frac{f^{(n+1)}(c)}{n!} (x - c)^n$$

□

Следствие. (Остаточный член в форме Лагранжа)

Возьмем $\varphi(t) = (x - t)^{n+1}$. Тогда

$$r_n(x, x_0) = \frac{f^{(n+1)}(c)(x - x_0)^{n+1}}{(n+1)!}$$

Формулы Тейлора элементарных функций с центром в нуле

$$e^x = \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} + \bar{o}(x^n), \quad x \rightarrow 0$$

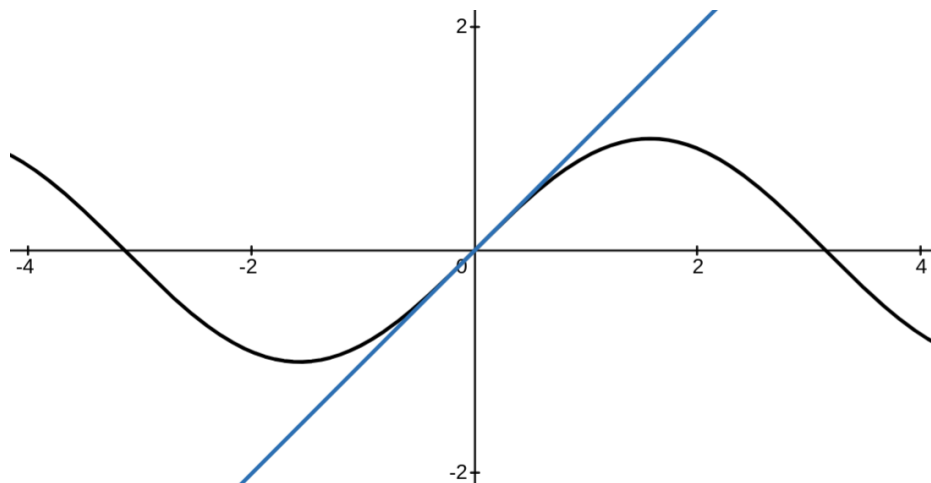
$$\sin x = \sum_{k=0}^n \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!} (-1)^k + \bar{o}(x^{2n+1})$$

$$\cos x = \sum_{k=0}^n \frac{x^{2k}}{(2k)!} (-1)^k + \bar{o}(x^{2n})$$

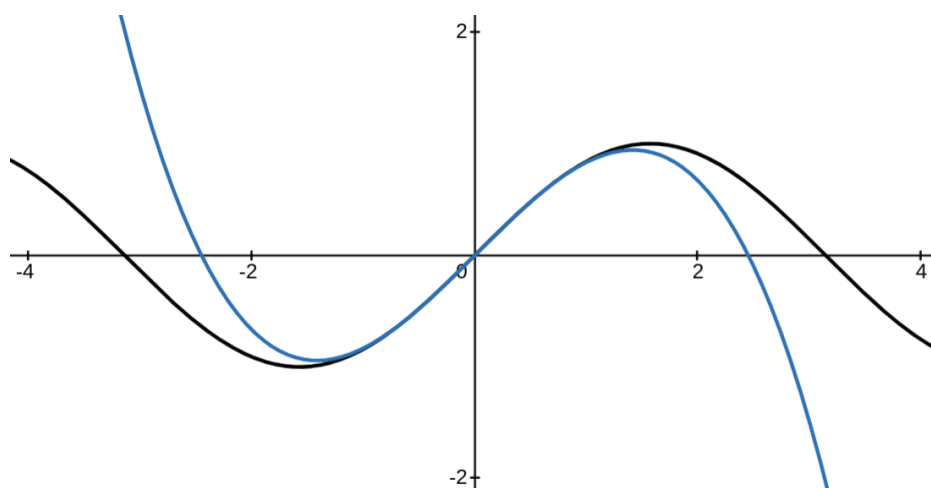
$$\ln(1+x) = \sum_{k=1}^n \frac{x^k}{k} (-1)^{k+1} + \bar{o}(x^n)$$

$$(1+x)^\alpha = 1 + \sum_{k=1}^n \binom{\alpha}{k} x^k, \quad \binom{\alpha}{k} = \frac{\alpha(\alpha-1)\dots(\alpha-k+1)}{k!}$$

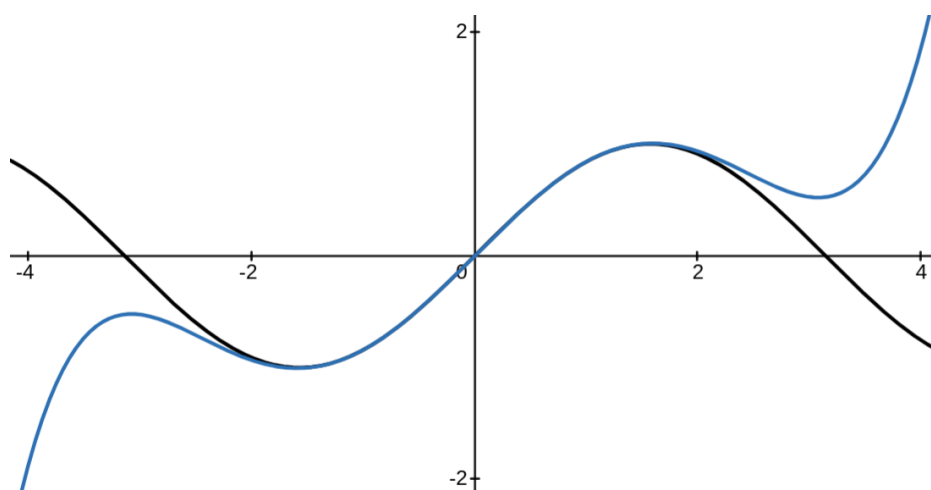
Пример. Рассмотрим несколько первых членов ряда для синуса



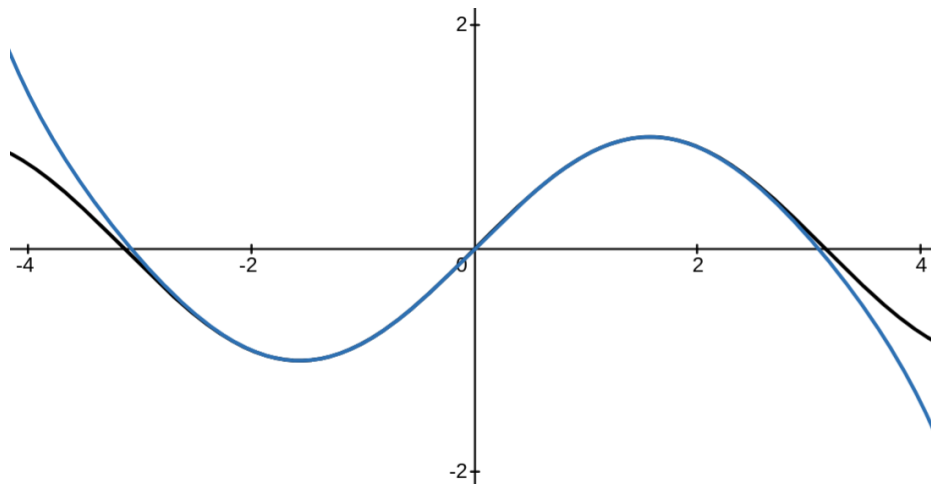
$$\sin x = x + \bar{o}(x)$$



$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \bar{o}(x^3)$$



$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \bar{o}(x^5)$$



$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \bar{o}(x^7)$$

7.10 Экстремум функции

Теорема. Пусть $f(x) \in \mathcal{C}(B(x_0))$, $f(x) \in \mathcal{D}(\mathring{B}(x_0))$.

Если при $x < x_0 : f'(x) > 0$ или при $x > x_0 : f'(x) < 0$, то x_0 - точка максимума.

Если при $x < x_0 : f'(x) < 0$ или при $x > x_0 : f'(x) > 0$, то x_0 - точка минимума.

Доказательство. По формуле Лагранжа: $f(x) - f(x_0) = f'(c)(x - x_0)$ □

Теорема. Пусть $\exists f^{(n)}(x_0) \neq 0$, $f^{(k)}(x_0) = 0$, $k = 1, \dots, n - 1$.

1. Если $n = 2k + 1$, то экстремум нет.

2. Если $n = 2k$, то

- если $f^n(x_0) > 0$, то x_0 точка минимум
- если $f^n(x_0) < 0$, то x_0 точка максимума.

Доказательство. $f(x) = f(x_0) + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n + \bar{o}(x - x_0)^n$, $x \rightarrow x_0$
 $\Rightarrow f(x) - f(x_0) = (x - x_0)^n(\frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} + \bar{o}(1))$ □

Схема поиска глобального экстремума

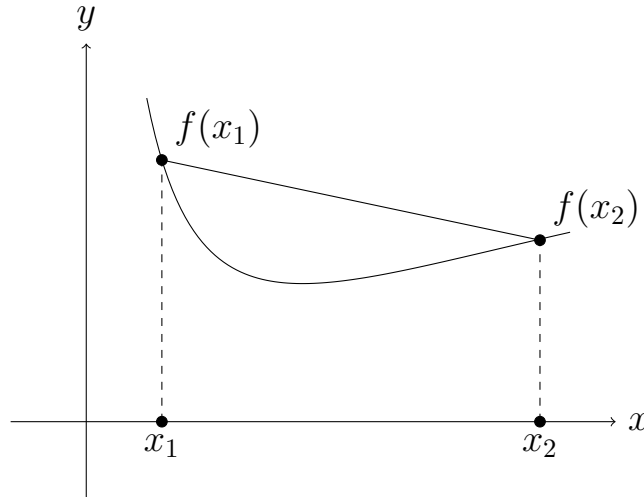
1. Ищем точки интервала (a, b) , где $f'(x) = 0$ или где ее не существует.
2. Находим значение во всех этих точках и значения на концах отрезка.
3. Сравниваем их между собой.

7.11 Выпуклые функции

Определение. Пусть $f(x) \in \mathcal{C}(I)$. Если $\forall x_1, x_2 \in I$ и $\forall x : x_1 < x < x_2$:

$$f(x) \leq \frac{f(x_2)(x - x_1) + f(x_1)(x_2 - x)}{x_2 - x_1}$$

то $f(x)$ называется выпуклой вниз. Если выполнено обратное неравенство, то $f(x)$ называется выпуклой вверх. Пример выпуклой вниз функции :



Теорема. Пусть $f'(c) \in \mathcal{D}(I)$.

- Если $f''(x) > 0$, то $f(x)$ выпукла вниз.
- Если $f''(x) < 0$, то $f(x)$ выпукла вверх.

Доказательство. Пусть $l_1(x) = \frac{f(x_2)(x-x_1)+f(x_1)(x_2-x)}{x_2-x_1}$

$$\begin{aligned} f(x) - l_1(x) &= f(x) \frac{(x - x_1) + (x_2 - x)}{x_2 - x_1} - \frac{f(x_2)(x - x_1) + f(x_1)(x_2 - x)}{x_2 - x_1} = \\ &= \frac{(f(x) - f(x_2))(x - x_1) + (f(x) - f(x_1))(x_2 - x)}{x_2 - x_1} = \\ &= \frac{-f'(\xi)(x_2 - x)(x - x_1) + f'(\eta)(x - x_1)(x_2 - x)}{x_2 - x_1} = \\ &= \frac{-f''(\chi)(\xi - \eta)(x - x_1)(x_2 - x)}{x_2 - x_1} \end{aligned}$$

□

Теорема. Пусть $f'(x) \in \mathcal{D}(I)$. Если $f''(x) > 0 (< 0)$, то $\forall x_0 \in I$:

$$f(x) - f(x_0) - f'(x_0)(x - x_0) \geq 0$$

Доказательство. Пусть $f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) = l_2(x)$

$$f(x) - l_2(x) = f'(\xi)(x - x_0) - f'(x_0)(x - x_0) = f''(\eta)(\xi - x_0)(x - x_0)$$

знаки скобок $(\xi - x_0)$ и $(x - x_0)$ одинаковы, значит $(\xi - x_0)(x - x_0) > 0$ \square

Определение. Если $f(x) - l_2(x)$ при проходе через точку x_0 меняет знак (разные знаки в левой и правой окрестности), то точка x_0 называется точкой перегиба.

Теорема. Пусть $f''(x) \in \mathcal{C}(B(x_0))$. Если x_0 - точка перегиба, то $f''(x_0) = 0$.

Доказательство. Если $f''(x_0) > 0$, то в силу непрерывности $f''(x) > 0$ в $B(x_0)$, значит x_0 - не точка перегиба. Аналогично для $f''(x_0) < 0$. \square

Теорема. Пусть $f''(x) \in \mathcal{C}(I)$. Если $f''(x)$ меняется знак при проходе точки x_0 , то x_0 - точка перегиба.

Доказательство. $f(x) - l_2(x) = f''(\eta)(\xi - x_0)(x - x_0)$ \square

Теорема. Пусть $f''(x_0) = 0$, $f'''(x_0) \neq 0$. Тогда x_0 - точка перегиба.

Доказательство. $f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f'''(x_0)}{6}(x - x_0)^3 + \bar{o}((x - x_0)^3)$. Тогда $f(x) - l_2(x) = (x - x_0)^3(\frac{f'''(x_0)}{6} + \bar{o}(1))$ \square

Определение. Если при $x \rightarrow a - 0(a + 0)$ $f(x \rightarrow \pm\infty)$, то прямая $x = a$ называется вертикальной асимптотой.

Определение. Если при $x \rightarrow +\infty(-\infty)$ $(f(x) - kx - b) \rightarrow 0$, то прямая $y = kx + b$ называется наклонной асимптотой.

Теорема. Прямая $y = kx + b$ является наклонной асимптотой графика функции $f(x) \Leftrightarrow \exists \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = k$, $\exists \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - kx)$, аналогично к $-\infty$

Теорема. (Неравенство Йенсена)

Пусть $f(x)$ выпукла вверх (вниз) на I . Пусть $\{\alpha_i\} \alpha_i > 0 \forall i$, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. Тогда

$$\forall \{x_i\} \subset I. f(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i) \geq \sum_{i=1}^n \alpha_i f(x_i).$$

Доказательство. Индукция по n . Если $n = 1$ - очев.

$n = 2$: $f(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2) \geq \alpha_1 f(x_1) + \alpha_2 f(x_2)$ - очев по выпуклости $f(x)$.

$$\begin{aligned} f(\sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i x_i) &= f(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \alpha_{n+1} x_{n+1}) = f(\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot x_i + \alpha_{n+1} x_{n+1}}) \geq \\ &\geq \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot f(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} x_i) + \alpha_{n+1} f(x_{n+1}) \geq \sum_{i=1}^n x_i (\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \cdot f(x_i)) + \alpha_{n+1} f(x_{n+1}) \end{aligned}$$

□

Утверждение. Неравенство между средним арифметическим и средним геометрическим

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \geq \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n x_k}$$

Доказательство. $f(x) = \ln x$, $f''(x) = -\frac{1}{x^2} < 0$ - выпукла вверх. Тогда

$$\ln\left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{n}\right) \geq \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln x = \ln \prod_{i=1}^n x_k^{\frac{1}{n}}$$

□

Утверждение. Неравенство Юнга

$\forall a, b > 0, \forall p, q > 1 : \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Тогда

$$ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}$$

Доказательство. Воспользуемся неравенством Йенсена для логарифма:

$$\ln\left(\frac{1}{p}x_1 + \frac{1}{q}x_2\right) \geq \frac{1}{p} \ln x_1 + \frac{1}{q} \ln x_2$$

$x_1 = a^p, x_2 = b^q$. Тогда

$$\ln \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q} \geq \ln a + \ln b = \ln ab$$

□