Лекции по математическому анализу для 1 курса ФН2, 3

Власова Елена Александровна

2024-2025 год.

Содержание

1 Введение **4**
1.1 Элементы теории множеств 4
1.2 Кванторные операции 4
1.3 Метод математической индукции 4

2 Множество действительных чисел **5**
2.1 Аксиоматика действительных чисел 5
2.2 Геометрическая интерпретация $\mathbb{R}$ 6
2.3 Числовые промежутки 6
2.4 Бесконечные числовые промежутки 6
2.5 Окрестности точки 6
2.6 Принцип вложенных отрезков (Коши-Кантора) 6
2.7 Ограниченные и неограниченные числовые множества . . . 6
2.8 Точные грани числового множества 6
2.9 Принцип Архимеда 6

3 Функции или отображения **7**
3.1 Понятие функции 7
3.2 Ограниченные и неограниченные числовые множества . . . 7
3.3 Обратные функции 7
3.4 Чётные и нечётные функции 7
3.5 Периодические функции 7
3.6 Сложная функция (композиция) 7
3.7 Основные элементарные функции 7

4 Числовые последовательности и их пределы **8**
4.1 Ограниченные и неограниченные числовые последовательности 8
4.2 Предел числовой последовательности 8
4.3 Бесконечные пределы 9
4.4 Свойства сходящихся последовательностей 9
4.5 Монотонные числовые последовательности 10
4.6 Число e 12
4.7 Гиперболические функции 13
4.8 Предельные точки числового множества 13
4.9 Предельные точки числовых последовательностей 16
4.10 Фундаментальные последовательности 18

5 Пределы функций **22**
5.1 Определение предела по Коши 22
5.2 Бесконечно малые функции 27
5.3 Свойства бесконечно малых функций 28
5.4 Арифметические операции с функциями, имеющими пределы 29
5.5 Бесконечно большие функции 33
5.6 Первый замечательный предел 34
5.7 Второй замечательный предел 35

Элементарные функции и их пределы

1 Введение

1.1 Элементы теории множеств

1.2 Кванторные операции

1.3 Метод математической индукции

2 Множество действительных чисел

2.1 Аксиоматика действительных чисел

Определение 2.1. *Множество $\mathbb{R}$ называется множеством действительных чисел, если элементы этого множества удовлетворяют следующему комплексу условий:*

1. *На $\mathbb{R}$ определена операция сложения "+", то есть задано отображение, которое каждой упорядоченной паре $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ ставит в соответствие элемент из $\mathbb{R}$, называемый суммой $x + y$ и удовлетворяющий следующим аксиомам:*
   (a) $\exists 0 \in \mathbb{R}$, *такой, что* $\forall x \in \mathbb{R} : x + 0 = 0 + x = x$;
   (b) $\forall x$ $\exists$ *противоположный элемент* $-x$, *такой, что* $x + (-x) = (-x) + x = 0$;
   (c) *Ассоциативность.* $\forall x, y, z \in \mathbb{R} : (x + y) + z = x + (y + z)$;
   (d) *Коммутативность.* $\forall x, y \in \mathbb{R} : x + y = y + x$.
2. *На $\mathbb{R}$ определена операция умножения "$\cdot$", то есть $\forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$ ставится в соответствие элемент $(x \cdot y) \in \mathbb{R}$.*
   (a) $\exists$ *нейтральный элемент* $1 \in \mathbb{R}$, *такой, что* $\forall x \in \mathbb{R} : 1 \cdot x = x \cdot 1 = x$;
   (b) $\forall x \in \mathbb{R} \backslash \{0\}$ $\exists$ *обратный элемент* "x^{-1}", *такой, что* $x \cdot x^{-1} = x^{-1} \cdot x = 1$;
   (c) *Ассоциативность.* $\forall x, y, z \in \mathbb{R} \backslash \{0\} : (x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$;
   (d) *Коммутативность.* $\forall x, y \in \mathbb{R} \backslash \{0\} : x \cdot y = y \cdot x$.

Операция умножения дистрибутивна по отношению к сложению.

$$\forall x, y, z \in \mathbb{R} : (x + y)z = xz + yz$$

3. *Отношения порядка. Для $\mathbb{R}$ определено отношение "$\leq$ ".*
   (a) $\forall x \in \mathbb{R} : x \leq x$;
   (b) $\forall x, y \in \mathbb{R} : (x \leq y \land y \leq x) \implies x = y$;
   ...

2.2 Геометрическая интерпретация $\mathbb{R}$

2.3 Числовые промежутки

2.4 Бесконечные числовые промежутки

2.5 Окрестности точки

Определение 2.2. *Окрестностью точки $a \in \mathbb{R}$ называется любой интервал, содержащий точку a и обозначается $U(a)$.*

Пусть ε — некоторое положительное число.

Определение 2.3. *ε-окрестностью точки $a \in \mathbb{R}$ называется интервал $(a-\varepsilon; a+\varepsilon)$ и обозначается $U_\varepsilon(a)$.*

$$c \in U_\varepsilon(a) \iff |a-c| < \varepsilon.$$

Определение 2.4. *Проколотой ε-окрестностью точки $a \in \mathbb{R}$ называется множество $(a-\varepsilon; a) \cup (a; a+\varepsilon) = U_\varepsilon(a) \setminus \{a\}$ и обозначается $\mathring{U}_\varepsilon(a)$.*

Определение 2.5. *Окрестностью бесконечности называют любое множество вида $(-\infty; a) \cup (b; +\infty)$.*

Определение 2.6. *ε-окрестностью бесконечности называют множество $(-\infty; -\varepsilon) \cup (\varepsilon; +\infty)$.*

Примечание: $U_\varepsilon(\infty) = \mathring{U}_\varepsilon(\infty)$.

2.6 Принцип вложенных отрезков (Коши-Кантора)

Определение 2.7. *Пусть $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — последовательность некоторых множеств. Если $\forall n \in \mathbb{N} : X_n \supset X_{n+1}$, то эта последовательность называется последовательностью вложенных отрезков.*

2.7 Ограниченные и неограниченные числовые множества

2.8 Точные грани числового множества

2.9 Принцип Архимеда

3 Функции или отображения

3.1 Понятие функции

3.2 Ограниченные и неограниченные числовые множества

3.3 Обратные функции

3.4 Чётные и нечётные функции

3.5 Периодические функции

3.6 Сложная функция (композиция)

3.7 Основные элементарные функции

4 Числовые последовательности и их пределы

Определение 4.1. $f : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$ *— числовая последовательность, т.е.* $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, $x_n \in \mathbb{R}$.

4.1 Ограниченные и неограниченные числовые последовательности

Определение 4.2. *Числовая последовательность* $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ *называется*

1. *ограниченной сверху, если* $\exists M \in \mathbb{R} : \forall n \in \mathbb{N} : \ x_n \le M$;
2. *ограниченной снизу, если* $\exists M \in \mathbb{R} : \forall n \in \mathbb{N} : \ x_n \ge M$;
3. *ограниченной, если* $\exists M \in \mathbb{R} : \forall n \in \mathbb{N} : |x_n| \le M$;
4. *неограниченной, если* $\exists M \in \mathbb{R} : \forall n \in \mathbb{N} : |x_n| > M$;

4.2 Предел числовой последовательности

Определение 4.3. *Число* $a \in \mathbb{R}$ *называется пределом числовой последовательности, если* $\forall \varepsilon > 0$ *существует такой номер* n*, зависящий от* ε*, что* $\forall$ *натурального числа* $N > n$ *верно неравенство* $|x_n - a| < \varepsilon$.

$$\lim_{n\to\infty} x_n = a$$

Пример:

$$\lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} = 0 \iff \forall \varepsilon > 0 \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall n > N : \frac{1}{n} < \varepsilon.$$

$\frac{1}{n} < \varepsilon \implies n > \frac{1}{\varepsilon}$. Возьмем $N(\varepsilon) = [\frac{1}{\varepsilon}]$. Тогда $\forall n > [\frac{1}{\varepsilon}] : \frac{1}{n} < \varepsilon$.

Определение 4.4. *Если* $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ *имеет конечный предел* a*, то эта последовательность называется сходящейся, в противном случае — расходящейся.*

Определение 4.5. *Если* $\lim_{n\to\infty} x_n = 0$*, то последовательность* $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ *называется бесконечно малой (б.м.).*

4.3 Бесконечные пределы

4.4 Свойства сходящихся последовательностей

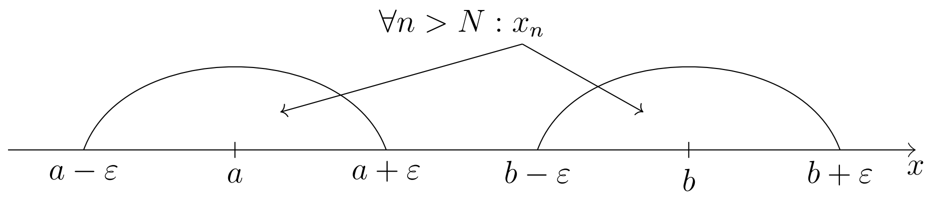
Теорема 4.1 (о единственности предела)**.** *Любая сходящаяся последовательность имеет только один предел.*

Доказательство. “От противного”. Пусть $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — сходящаяся последовательность. Предположим, что $\exists \lim_{n\to\infty} x_n = a$ и $\exists \lim_{n\to\infty} x_n = b$, причем $a \neq b$. Пусть для определенности $a < b$.

$$\lim_{n\to\infty} x_n = a \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N_1 = N_1(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall n > N_1 : |x_n - a| < \varepsilon,$$

$$\lim_{n\to\infty} x_n = b \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N_2 = N_2(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall n > N_2 : |x_n - b| < \varepsilon.$$

$$N = \max\{N_1, n_2\} \implies \forall n > N : \begin{cases} |x_n - a| < \varepsilon, \\ |x_n - b| < \varepsilon. \end{cases}$$



Выберем $\varepsilon = \frac{b-a}{4} > 0$. Найдем $N_1(\varepsilon), N_2(\varepsilon), N = \max\{N_1, N_2\}$, тогда

$$\forall n > N \quad |x_n - a| < \frac{b-a}{4}, \quad |x_n - b| < \frac{b-a}{4}.$$

Следовательно,

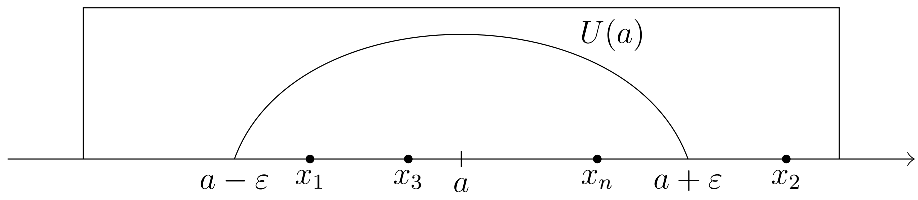
$$0 < b - a = |b - a| = |b - x_n + x_n - a| \leq |x_n - b| + |x_n - a| < \frac{b-a}{2},$$

то есть

$$0 < b - a < \frac{b-a}{2}.$$

Мы пришли к противоречию, следовательно, $a = b \implies \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ имеет единственный предел. $\square$

Теорема 4.2 (об ограниченности сходящейся последовательности)**.** *Любая сходящаяся последовательность является ограниченной.*



Доказательство. Если $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ сходится, то

$$\exists \lim_{n\to\infty} = a \in \mathbb{R} \implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall n > N : |x_n - a| < \varepsilon$$

Пусть $\varepsilon = 1 \implies \exists N = N(1) \quad \forall n > N : |x_n - a| < 1$. Следовательно,

$$|x_n| = |x_n - a + a| \leq |x_n - a| + |a| < 1 + |a|.$$

Пусть $M_0 = 1 + |a| \implies \forall n > N : x_n < M_0$.
Пусть $M = \max\{|x_1|, |x_2|, \ldots, |x_n|, M_0\}$, тогда $\forall n \in \mathbb{N} : x_n \leq M \implies$ $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ является ограниченной. $\square$

Замечание. Ограниченность является необходимым условием сходимости числовой последовательности. В то же время условие ограниченности не является достаточным для сходимости числовой последовательности. Например, $\{(-1)^n\}_{n=1}^{\infty}$ — ограниченная, но не сходящаяся числовая последовательность.

Теорема 4.3 (об арифметических операциях со сходящимися последовательностями)**.** *Пусть* $\exists \lim_{n\to\infty} x_n = a \in \mathbb{R}, \exists \lim_{n\to\infty} y_n = b \in \mathbb{R}$. *Тогда*

$$\exists \lim_{n\to\infty} (x_n \pm y_n) = a \pm b;$$

$$\exists \lim_{n\to\infty} (x_n \cdot y_n) = ab;$$

если $y_n \neq 0 \ \forall n \in \mathbb{N}, b \neq 0$, *то*

$$\exists \lim_{n\to\infty} \frac{x_n}{y_n} = \frac{a}{b}.$$

4.5 Монотонные числовые последовательности

Определение 4.6. *Числовая последовательность* $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ *называется*

1. *возрастающей, если* $\forall n \in \mathbb{N} : x_n < x_{n+1}$;
2. *убывающей, если* $\forall n \in \mathbb{N} : x_n > x_{n+1}$;

3. *неубывающей, если* $\forall n \in \mathbb{N} : x_n \le x_{n+1}$;

4. *невозрастающей, если* $\forall n \in \mathbb{N} : x_n \ge x_{n+1}$

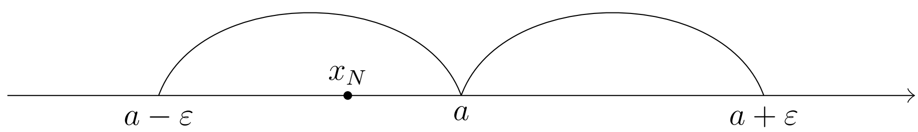
Для монотонных числовых последовательностей ограниченность является достаточным условием для сходимости.

Теорема 4.4 (Вейерштрасса о сходимости монотонных числовых последовательностей)**.** *Если последовательность не убывает и ограничена сверху, то она является сходящейся. Если последовательность не возрастает и ограничена снизу, то она является сходящейся. В общем, любая монотонная последовательность сходится.*

Доказательство. Пусть $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ не убывает и ограничена сверху $\implies$
$\implies \exists M \in \mathbb{R} : \forall n \in \mathbb{N} : x_n \le M \implies$
$\implies$ множество значений этой последовательности $\{x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots\} = A$ является ограниченным сверху числовым множеством $\implies$
$\implies \exists \sup A \in \{x_n\}_{n=1}^{\infty} = a$, то есть

1. $\forall n \in \mathbb{N} : x_n \le a$;

2. $\forall \varepsilon > 0 \ \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} : x_N > a - \varepsilon$.



$\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — неубывающая последовательность, то есть

$$\forall n > N = N(\varepsilon) : x_n \ge x_N \implies$$
$$\implies a - \varepsilon < x_N \le x_n \le a < a + \varepsilon \implies$$
$$\implies a - \varepsilon < x_n < a + \varepsilon \implies |x_n - a| < \varepsilon \implies$$
$$\implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \forall n > N : |x_n - a| < \varepsilon \implies$$
$$\implies \exists \lim_{n\to\infty} x_n = a \in \mathbb{R} \implies \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \text{ сходится.}$$

Если $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — невозрастающая и ограниченная снизу последовательность, то

$$\exists \lim_{n\to\infty} x_n = \inf A, A = \{x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots\}.$$

Доказательство аналогично. □

4.6 Число e

Теорема 4.5. *Числовая последовательность* $\{(1+\frac{1}{n})^n\}_{n=1}^{\infty}$ *является сходящейся, т.е.* $\exists \lim_{n\to\infty}(1+\frac{1}{n})^n = e$.

Доказательство. $x_n = (1+\frac{1}{n})^n, n \in \mathbb{N}$. Рассмотрим последовательность $\{y_n\}_{n=1}^{\infty}, y_n = (1+\frac{1}{n})^{n+1}$. Докажем, что $\{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ ограничена снизу. Т.к. $\forall n \in \mathbb{N} : (1+\frac{1}{n})^{n+1} > 0 \implies \{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ ограничена снизу. Теперь докажем, что $\{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ убывает.

$$\forall n \geq 2 \quad \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{(1+\frac{1}{n-1})^n}{(1+\frac{1}{n})^{n+1}} = \frac{(1+\frac{1}{n-1})}{(1+\frac{1}{n})^n(1+\frac{1}{n})} = \left(\frac{\frac{n}{n-1}}{\frac{n+1}{n}}\right)^n \cdot \frac{n}{n+1} =$$
$$= \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)^n \cdot \frac{n}{n+1} = \left(1+\frac{1}{n^2-1}\right)^n \cdot \frac{n}{n+1}.$$

Воспользуемся неравенством $\forall n \in \mathbb{N} : (1+x)^n \geq 1+nx, x \geq 0$, известным как неравенство Бернулли.

$$\left(1+\frac{1}{n^2-1}\right)^n \cdot \frac{n}{n+1} \geq \left(1+\frac{n}{n^2-1}\right) \cdot \frac{n}{n+1} > \left(1+\frac{n}{n^2}\right) \cdot \frac{n}{n+1} =$$
$$= \frac{n+1}{n} \cdot \frac{n}{n+1} = 1.$$

Таким образом, $\forall n \geq 2 \quad \frac{y_{n-1}}{y_n} > 1 \implies y_{n-1} > y_n \implies \{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ убывает. $\{y_n\}_{n=1}^{\infty}$ убывает и ограничена снизу $\implies$ по теореме Вейерштрасса $\exists \lim_{n\to\infty} y_n = e \in \mathbb{R}$. Вернемся к x_n:

$$x_n = \left(1+\frac{1}{n}\right)^n = \frac{\left(1+\frac{1}{n}\right)^{n+1}}{\left(1+\frac{1}{n}\right)} = \frac{y_n}{\left(1+\frac{1}{n}\right)},$$

$$\lim_{n\to\infty} x_n = \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n = \lim_{n\to\infty}\frac{y_n}{\left(1+\frac{1}{n}\right)} = \frac{e}{1+0} = e \implies$$
$$\implies \exists \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n = e.$$

□

Замечание. $x_n = (1+\frac{1}{n})^n$ — возрастающая последовательность и ограничена сверху: $2 < x_n < 3$; e — иррациональное число, т.е. $e \in \mathbb{R}\backslash\mathbb{Q}$; $e \approx 2{,}718281828459045$.

4.7 Гиперболические функции

4.8 Предельные точки числового множества

Определение 4.7. *Точка $a \in \mathbb{R}$ называется предельной точкой множества $X \subset \mathbb{R} \iff$ любая окрестность $U(a)$ содержит бесконечно много элементов множества X.*

Замечание. Множество A называется бесконечным или содержащим бесконечно много элементов, если при вычитании из A любого его конечного подмножества получается непустое множество.

Множество всех предельных точек множества X называется производным множеством для X и обозначается X'.

Утверждение 4.1. *Точка $a \in \mathbb{R}$ является предельной для $X \subset \mathbb{R} \iff$ в любой проколотой δ-окрестности точки a содержится хотя бы один элемент множества X, т.е.*

$$\forall \delta > 0 \quad \exists x \in X \cap \mathring{U}(a).$$

Доказательство. ($\Longrightarrow$) Необходимость.

a — предельная для $X \subset \mathbb{R} \Longrightarrow$

$\Longrightarrow$ любая $U(a)$ содержит бесконечно много элементов из $X \Longrightarrow$

$\Longrightarrow$ $\mathring{U}(a)$ тоже содержит бесконечно много элементов из $X \Longrightarrow$

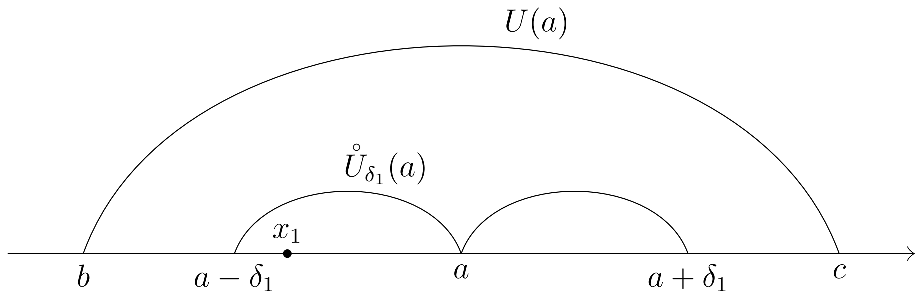
$\Longrightarrow$ любая $\mathring{U}$ содержит хотя бы один элемент $x \in X$.

($\Longleftarrow$) Достаточность.

$$\forall \delta > 0 \quad \exists x \in X \cap \mathring{U}(a).$$

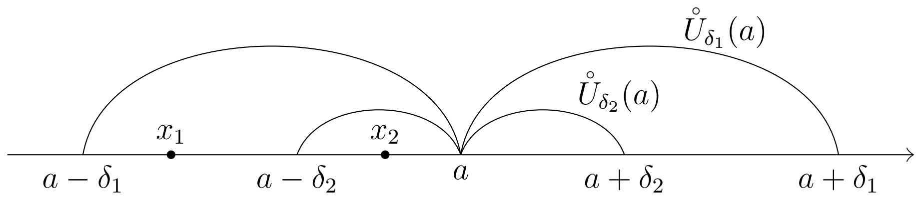
Выберем любую $U(a)$. Тогда

$$\exists \delta_1 > 0 : \mathring{U}(a) \subset U(a) \Longrightarrow \exists x_1 \in X : x_1 \in \mathring{U}_{\delta_1}(a).$$



Пусть $\delta_2 = \frac{|x_1 - a|}{2} > 0$. Тогда

$$\exists x_2 \in \mathring{U}_{\delta_2}(a) : x_2 \neq x_1.$$



Пусть $\delta_3 = \frac{|x_2 - a|}{2} > 0$. Тогда

$$\exists x_3 \in \mathring{U}_{\delta_3}(a) : x_3 \neq x_2$$

и т.д. На шаге n:

$$\delta_n = \frac{|x_{n-1} - a|}{2} > 0 \implies \exists x_n \in \mathring{U}_{\delta_n}(a) : x_n \neq x_k, k = 1, 2, \ldots, n-1.$$

Таким образом,

$$\exists \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \in U(a) : x_n \in X, x_n \neq x_k, n \neq k,$$

а значит, любая окрестность $U(a)$ содержит бесконечно много элементов из $X \implies a$ — предельная точка. $\square$

Утверждение 4.2. *Если точка $a \in \mathbb{R}$ является предельной точкой для множества $X \subset \mathbb{R}$, то*

$$\exists \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset X : \lim_{n \to \infty} x_n = a.$$

Доказательство. a — предельная точка для $X \subset \mathbb{R} \iff \forall \delta > 0 \quad \mathring{U}_\delta(a)$ содержит хотя бы одну точку множества X (по утверждению 1). Выберем $\{\delta_n\}_{n=1}^{\infty}, \delta_n = \frac{1}{n} > 0$, тогда

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad \exists x_n \in X : x_n \in \mathring{U}_{\delta_n}(a),$$

то есть

$$0 < |x_n - a| < \frac{1}{n}.$$

Т.к. $\lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} = 0$,

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall n > N : \frac{1}{n} < \varepsilon,$$

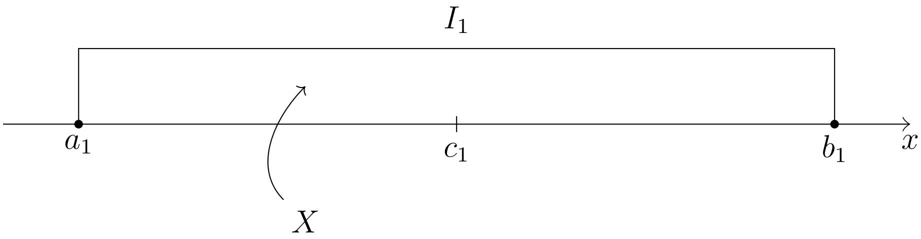
а значит,

$$|x_n - a| < \frac{1}{n} < \varepsilon \implies \lim_{n \to \infty} x_n = a.$$

$\square$

Теорема 4.6 (принцип Больцано-Вейерштрасса)**.** *Любое ограниченное бесконечное числовое множество имеет хотя бы одну предельную точку.*

Доказательство. Пусть X — бесконечное ограниченное множество, то есть $\exists I_1 = [a_1, b_1] : X \subset [a_1, b_1]$. Пусть $c_1 = \frac{a_1+b_1}{2}$, т.е. середина отрезка I_1.



Так как множество X бесконечное, то либо отрезок $[a_1, c_1]$, либо отрезок $[c_1, b_1]$ содержит бесконечно много элементов множества X. Обозначим ту половину отрезка I_1, которая содержит бесконечно много элементов множества X через $I_2 = [a_2, b_2], I_2 \subset I_1$. Выразим длину отрезка I_2:

$$|I_2| = b_2 - a_2 = \frac{b_1 - a_1}{2} = \frac{|I_1|}{2}.$$

На отрезке I_2 содержится бесконечно много элементов множества X. Пусть $c_2 = \frac{a_2+b_2}{2}$ — середина I_2, тогда либо $[a_2, c_2]$, либо $[c_2, b_2]$ содержит бесконечно много элементов множества X. Обозначим ту половину I_2, где бесконечно много элементов множества X через $I_3 = [a_3, b_3]$. Тогда

$$|I_3| = \frac{|I_1|}{2^2}$$

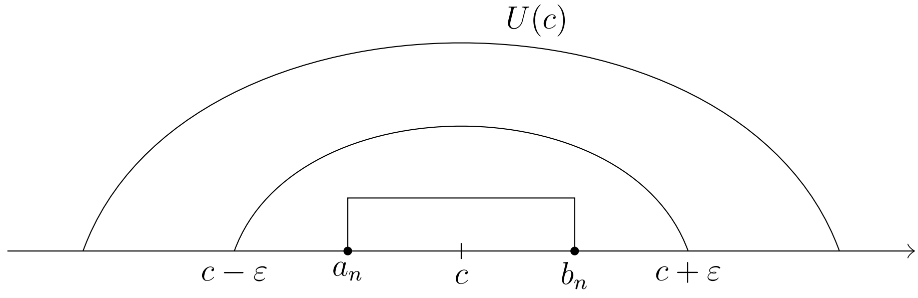
и т.д. На шаге n: $I_n = [a_n, b_n], c_n = \frac{a_n+b_n}{2}$ — середина I_n, I_n содержит бесконечно много элементов из X, тогда либо $[a_n, c_n]$, либо $[c_n, b_n]$ содержит бесконечно много элементов из $X \implies I_{n+1} = [a_{n+1}, b_{n+1}] \subset I_n$ и содержит бесконечно много элементов из X. Таким образом, мы получили последовательность вложенных отрезков $\{I_n\}_{n=1}^{\infty} : I_1 \supset I_2 \supset \ldots \supset I_n \supset I_{n+1} \supset \ldots$

$$|I_n| = \frac{|I_1|}{2^{n-1}} \implies \lim_{n\to\infty} \frac{|I_1|}{2^{n-1}} = 0 \implies$$
$$\implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall n > N : |I_n| < \varepsilon.$$

По принципу Коши-Кантора $\exists!$ общая точка c, т.е. $\forall n \in \mathbb{N} : c \in I_n$.

$$\forall U(c) \quad \exists \varepsilon > 0 \quad U_\varepsilon(c) \subset U(c) \implies \exists n \in \mathbb{N} : I_n = [a_n, b_n] \subset U_\varepsilon(c)$$

(например, $|I_n| < \frac{\varepsilon}{2}$).



Отрезок I_n содержит бесконечно много элементов множества X по построению последовательности $\{I_n\}_{n=1}^{\infty} \implies$ окрестность $U(c)$ содержит бесконечно много элементов из $X \implies c$ — предельная. $\square$

4.9 Предельные точки числовых последовательностей

Определение 4.8. *Точка $a \in \mathbb{R}$ называется предельной точкой числовой последовательно $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \iff$ любая окрестность $U(a)$ содержит бесконечно много элементов последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$.*

Замечание. Если a — предельная точка $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, то любая $U(a)$ содержит какую-либо подпоследовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Пример: $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}, x_n = (-1)^n$.

Теорема 4.7. *Точка $a \in \mathbb{R}$ является предельной для $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ тогда и только тогда, когда $\exists \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : \lim_{k\to\infty} x_{n_k} = a$.*

Доказательство. Докажем необходимость. Пусть a — предельная точка последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$. Выберем $\{\varepsilon_n\}_{n=1}^{\infty}, \varepsilon_n = \frac{1}{n} > 0$.

Для $n = 1$ $U_{\varepsilon_1=1}(a)$ содержит ∞ много элементов $\implies \exists x_{n_1} \in U_{\varepsilon_1}(a)$, т.е. $|x_{n_1} - a| < 1$.

Для $n = 2$ $U_{\varepsilon_2=\frac{1}{2}}(a)$ содержит ∞ много элементов $\implies \exists n_2 > n_1$: $x_{n_2} \in U_{\varepsilon_2}(a)$, т.е. $|x_{n_2} - a| < \frac{1}{2}$.

Для $n = 3$ $U_{\varepsilon_3=\frac{1}{3}}(a)$ содержит ∞ много элементов $\implies \exists n_3 > n_2$: $x_{n_3} \in U_{\varepsilon_3}(a)$, т.е. $|x_{n_3} - a| < \frac{1}{3}$ и т.д.

Для $n = k$ $U_{\varepsilon_k=\frac{1}{k}}(a)$ содержит ∞ много элементов $\implies \exists n_k > n_{k-1}$: $x_{n_k} \in U_{\varepsilon_k}(a)$, т.е. $|x_{n_k} - a| < \frac{1}{k} \implies \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ является подпоследовательностью последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \implies \forall k \in \mathbb{N} : |x_{n_k} - a| < \frac{1}{k}$.

$$\lim_{k\to\infty} \frac{1}{k} = 0 \implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall k > N : \frac{1}{k} < \varepsilon \implies$$
$$\implies \forall k > N \quad |x_{n_k} - a| < \frac{1}{k} < \varepsilon \implies \exists \lim_{k\to\infty} x_{n_k} = a.$$

Докажем достаточность.

Пусть $\exists \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : \lim_{k\to\infty} x_{n_k} = a$. Выберем любую $U(a)$ и найдем такое $\varepsilon > 0$, что $U_\varepsilon(a) \subset U(a)$:

$$\exists N = N_(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall k > N : |x_{n_k} - a| < \varepsilon \implies x_{n_k} \in U_\varepsilon(a) \subset U(a).$$

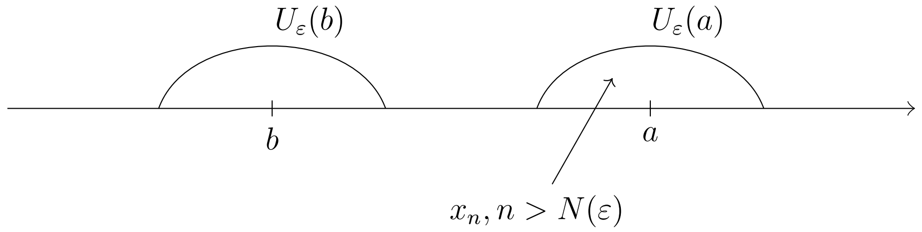
Следовательно, $U(a)$ содержит бесконечно много элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, а значит, a — предельная. $\square$

Теорема 4.8. *Если $\exists \lim_{n\to\infty} x_n = a$, то a является предельной точкой для $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, причем единственной.*

Доказательство. a — предельная, если $\lim_{n\to\infty} x_n = a$ (по теореме 1).

Докажем единственность предельной точки для $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ "от противного". Пусть $\exists b \neq a$, b — предельная точка $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, тогда $|b - a| \geq \delta > 0$. Т.к. $a = \lim_{n\to\infty} x_n$, любая ε-окрестность точки содержит бесконечно много элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, а именно все, начиная с номера $N(\varepsilon) + 1$, т.е. $\forall n > n(\varepsilon)$. Вне $U_\varepsilon(a)$ может содержаться не более конечного числа элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ (возможно x_n с номерами $1, 2, \ldots, N(\varepsilon)$).

Выберем $\varepsilon = \frac{\delta}{4} > 0$. Тогда $\forall n > N(\varepsilon) : x_n \in U_\varepsilon(a)$.



Но $U_\varepsilon(a) \cap U_\varepsilon(b) = \varnothing$, что противоречит тому, что b — предельная точка для $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, т.е. $U_\varepsilon(b)$ должна содержать бесконечно много элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, а туда может попасть не более конечного. Следовательно, $a = b$. $\square$

Теорема 4.9. *Любая ограниченная числовая последовательность имеет хотя бы одну предельную точку.*

Доказательство. $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — ограниченная, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n, \dots\} \subset \mathbb{R}$, X — множество значений числовой последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$. Т.к. $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — ограниченная числовая последовательность, X — ограниченное числовое множество. Рассмотрим два случая.

Первый: X — бесконечное числовое множество. Тогда X по принципу Больцано-Вейерштрасса имеет хотя бы одну предельную точку a, т.е. в любую $U(a)$ попадает бесконечно много элементов множества X, а значит, и бесконечно много элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$. Следовательно, a — предельная точка последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Второй: X — конечное числовое множество. Тогда хотя бы один элемент последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ повторяется бесконечно много раз, т.е. $\exists$ подпоследовательность $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ (постоянная $\forall k \in \mathbb{N}$), $x_{n_k} = a \in X \implies$ а — предельная точка $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}, \lim_{k\to\infty} x_{n_k} = a$. $\square$

Теорема 4.10 (критерий сходимости числовой последовательности)**.** *Для того, чтобы точка $a \in \mathbb{R}$ была пределом $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, необходимо и достаточно, чтобы $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ была ограниченной и имела единственную предельную точку.*

Доказательство. Докажем необходимость. $\exists \lim_{n\to\infty} x_n = a \in \mathbb{R} \implies \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ ограничена (по свойству сходящейся последовательности), а значит, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ имеет единственную предельную точку (по теореме 2).

Докажем достаточность. Пусть a — единственная предельная точка ограниченной последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$. Докажем, что $\lim_{n\to\infty} x_n = a$.

Будем доказывать "от противного". Предположим, что $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ не имеет предела. Тогда

$$\forall b \in \mathbb{R} \quad \exists \varepsilon > 0 \quad N \in \mathbb{N} \quad \exists n > N : |x_n - b| \geq \varepsilon,$$

а значит, вне $U_\varepsilon(a)$ лежит бесконечное множество элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$. Тогда существует $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : |x_{n_k} - a| \geq \varepsilon$, т.е. $x_{n_k} \notin U_\varepsilon(a)$. Следовательно, $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ — ограниченная последовательность, лежащая вне $U_\varepsilon(a)$. У этой последовательности есть предельная точка b (по теореме 3). $U_\varepsilon(a)$ не содержит ни одного элемента $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} \implies b \neq a$, что противоречит условию. Тогда $\lim_{n\to\infty} x_n = a$. $\square$

4.10 Фундаментальные последовательности

Определение 4.9. *Последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathbb{R}$ называется фундаментальной тогда и только тогда, когда*

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall n > N, \ \forall m > N : |x_n - x_m| < \varepsilon.$$

Теорема 4.11. *Если числовая последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ фундаментальна, то она ограничена.*

Доказательство. $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ — фундаментальная, т.е.

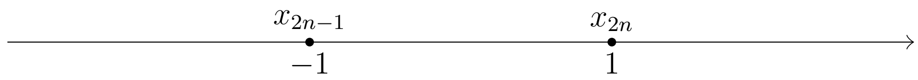
$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \quad \forall n > N,\ \forall m > N : |x_n - x_m| < \varepsilon.$$

Пусть $\varepsilon = 1$, тогда

$$\begin{aligned} \exists N = N(1) \implies \forall n > N,\ m = N+1 : |x_n - x_{N+1}| < 1 \implies \\ \implies \forall n > N : |x_n| = |x_n - x_{N+1} + x_{N+1}| \leq \\ \leq |x_n - x_{N+1}| + |x_{N+1}| < 1 + |x_{N+1}| = M_0 \implies \\ \implies \forall n > N : |x_n| < M_0. \end{aligned}$$

Пусть $M = \max\{|x_1|, |x_2|, \ldots, |x_N|, M_0\}$, тогда $\forall n \in \mathbb{N} : |x_n| \leq M$, следовательно, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ ограничена. $\square$

Пример 4.1. В обратную сторону Теорема 4.11 не работает. Например, $\{(-1)^n\}_{n=1}^{\infty}$ ограничена, но не фундаментальна.

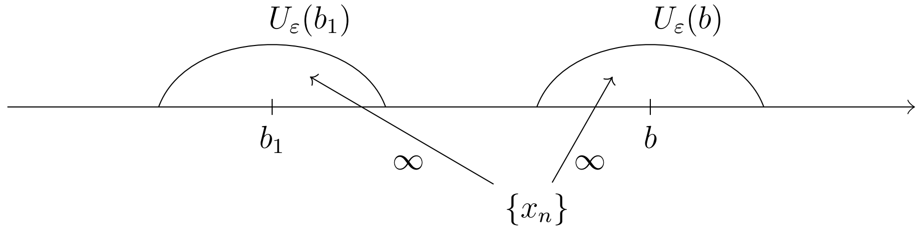


Теорема 4.12 (критерий Коши сходимости числовой последовательности)**.** *Числовая последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ сходится тогда и только тогда, когда она фундаментальна.*

Доказательство. Докажем необходимость. По условию $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ сходится $\implies$ $\exists \lim_{n\to\infty} x_n = a \in \mathbb{R}$. По числу $\varepsilon > 0$ найдем номер N так, чтобы при $n > N$ иметь $|x_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}$. Если теперь $m > N$ и $n > N$, то $|x_m - x_n| < |x_m - a| + |x_n - a| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$ и, таким образом, проверено, что сходящаяся последовательность фундаментальна.

Докажем достаточность. По условию $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ фундаментальна, следовательно, ограничена, а значит, у нее есть хотя бы одна предельная точка. Докажем, что эта предельная точка единственна "от противного". Предположим, что существует две предельные точки b и b_1, $b \neq b_1$ последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$. По определению предельной точки для любого числа $\varepsilon > 0$ окрестности $U_\varepsilon(b)$ и $U_\varepsilon(b_1)$ содержат бесконечно много членов последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Выберем удобный для дальнейших рассуждений ε. $b_1 \neq b$, следовательно, $\varepsilon = \frac{|b_1 - b|}{6} > 0$. Для выбранного ε найдем соответствующий номер $N = N(\varepsilon)$. По определению фундаментальной последовательности для этого номера выполняется, что $\forall n, m > N : |x_n - x_m| < \frac{|b_1 - b|}{6}$.



Т.к. в $U_\varepsilon(b)$ и $U_\varepsilon(b_1)$ попадает бесконечно много элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$,

$$\exists n_1 > N : x_{n_1} \in U_\varepsilon(b) \ \text{ и } \ \exists m_1 > N : x_{m_1} \in U_\varepsilon(b_1).$$

А значит, выполняется следующее неравенство:

$$\begin{aligned} 0 < |b - b_1| = |b - x_{n_1} + x_{n_1} - x_{m_1} + x_{m_1} - b_1| \leq \\ \leq |x_{n_1} - b| + |x_{n_1} - x_{m_1}| + |x_{m_1} - b_1| < 3\varepsilon = \\ = \frac{3|b - b_1|}{6} = \frac{|b - b_1|}{2} \implies 0 < |b - b_1| < \frac{|b - b_1|}{2} \end{aligned}$$

Получено противоречие $\implies$ $b = b_1$ $\implies$ $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ имеет единственную предельную точку $\implies$ $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ сходится (по теореме 4 о предельной точке последовательности). □

Пример 4.2. $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, $x_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots + \frac{1}{n}$. Существует ли $\lim_{n\to\infty} x_n$? Возьмем $m = 2n > n \quad \forall n \in \mathbb{N}$.

$$\begin{aligned} |x_n - x_{2n}| = |x_{2n} - x_n| = |1 + \frac{1}{2} + \ldots + \frac{1}{2n} - 1 - \frac{1}{2} - \ldots - \frac{1}{n}| = \\ = \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + .. + \frac{1}{2n} > \frac{1}{2n} + \frac{1}{2n} + \ldots + \frac{1}{2n} = \frac{n}{2n} = \frac{1}{2} \implies \\ \implies \exists \varepsilon = \frac{1}{2} \quad \forall N \in \mathbb{N} \quad \exists n > N, \ \exists m = 2n > N : |x_n - x_{2n}| > \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Следовательно, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ не является фундаментальной. Значит, конечный $\lim_{n\to\infty} x_n$ не существует, т.е. последовательность не является сходящейся.

Определение 4.10. *Число b или $+\infty(-\infty)$ называют частичным пределом числовой последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ тогда и только тогда, когда*

$$\exists \{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} : \lim_{k\to\infty} x_{n_k} = b.$$

Причем, если частичный предел есть конечное число, то это число является предельной точкой $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Наибольший частичный предел (может быть $\pm\infty$) называют верхним пределом числовой последовательности и обозначают $\overline{\lim}_{n\to\infty} x_n$.
Наименьший частичный предел (может быть $\pm\infty$) называют нижним пределом числовой последовательности и обозначают $\underline{\lim}_{n\to\infty} x_n$.

Пример 4.3. Для последовательности $\{(-1)^n\}_{n=1}^{\infty} = x_n$ частичными пределами будут $\overline{\lim}_{n\to\infty} x_n = 1$ и $\underline{\lim}_{n\to\infty} x_n = -1$.

Пример 4.4. Для последовательности $\{(-1)^n n\}_{n=1}^{\infty} = x_n$ частичными пределами будут $\overline{\lim}_{n\to\infty} x_n = +\infty$ и $\underline{\lim}_{n\to\infty} x_n = -\infty$.

Теорема 4.13. *Верхний и нижний частичные пределы удовлетворяют неравенству*

$$\underline{\lim}_{n\to\infty} x_n \le \overline{\lim}_{n\to\infty} x_n.$$

Теорема 4.14. *Последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ сходится тогда и только тогда, когда*

$$\overline{\lim}_{n\to\infty} x_n = \underline{\lim}_{n\to\infty} x_n,$$

и является конечным числом.

5 Пределы функций

5.1 Определение предела по Коши

Будем пользоваться следующими обозначениями:

$*$: a; $a+0$; $a-0$; ∞; $+\infty$; $-\infty$

$**$: b; ∞; $+\infty$; $-\infty$

Пусть функция $f(x)$ определена в некоторой проколотой окрестности $*$.

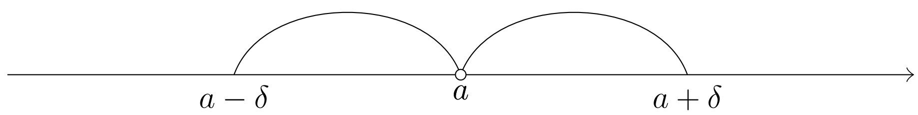
Определение 5.1 (предела функции по Коши)**.** $\lim_{x\to *} f(x) = **$ *тогда и только тогда, когда*

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies f(x) \in U_\varepsilon(**).$$

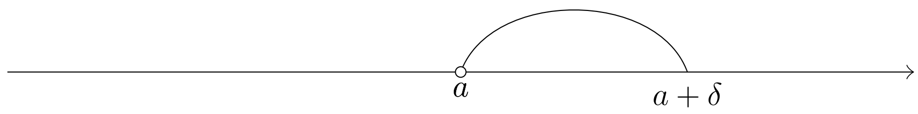
$*$	$x \in \mathring{U}_\delta(*)$
a	$x \in \mathbb{R} : 0 < \lvert x-a \rvert < \delta$
$a+0$	$x \in \mathbb{R} : a < x < a+\delta$
$a-0$	$x \in \mathbb{R} : a-\delta < x < a$
∞	$x \in \mathbb{R} : \lvert x \rvert > \delta$
$+\infty$	$x \in \mathbb{R} : x > \delta$
$-\infty$	$x \in \mathbb{R} : x < -\delta$

$**$	$f(x) \in U_\varepsilon(**)$
b	$\lvert f(x)-b \rvert < \varepsilon$
∞	$\lvert f(x) \rvert > \varepsilon$
$+\infty$	$f(x) > \varepsilon$
$-\infty$	$f(x) < -\varepsilon$

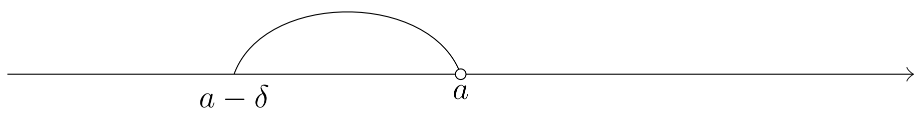
$x \in \mathring{U}_\delta(a)$



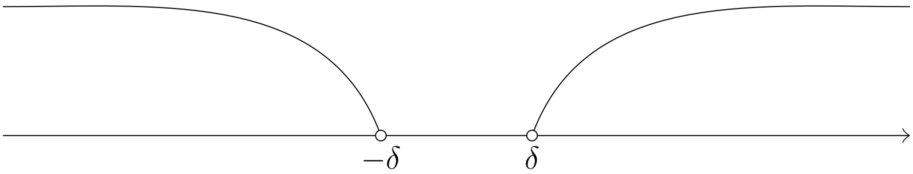
$x \in \mathring{U}_\delta(a+0)$



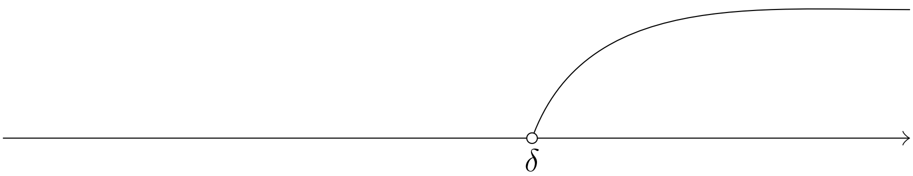
$x \in \mathring{U}_\delta(a-0)$



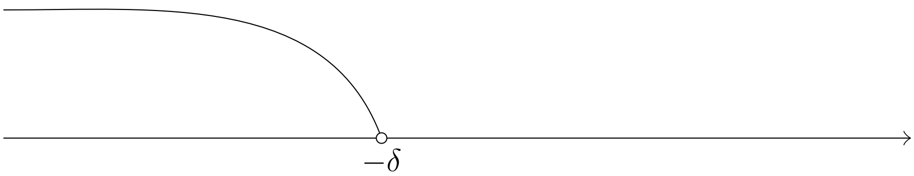
$$x \in \mathring{U}_\delta(\infty)$$



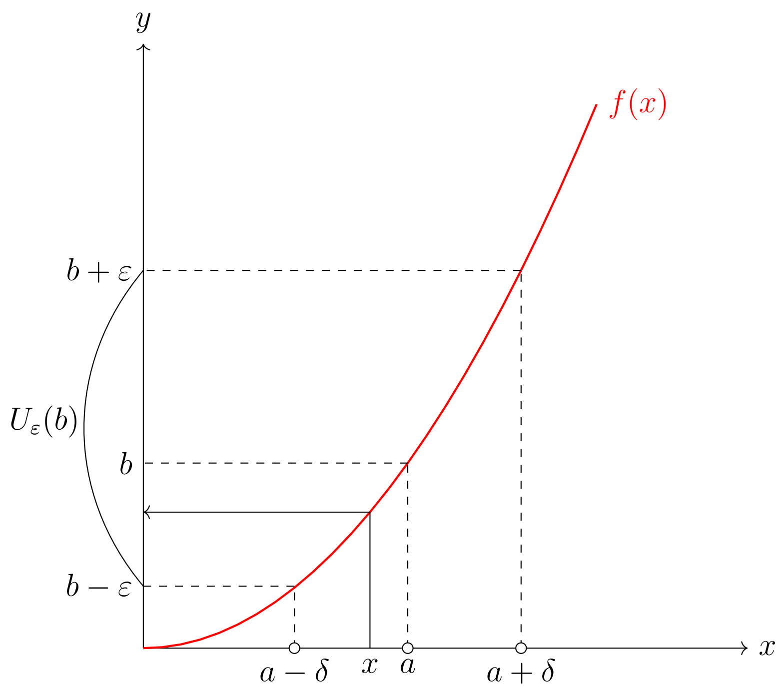
$$x \in \mathring{U}_\delta(+\infty)$$



$$x \in \mathring{U}_\delta(-\infty)$$



$$\begin{aligned} &\lim_{x\to a} f(x) = b \iff \\ &\qquad \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R} : 0 < |x - a| < \delta \implies \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \implies |f(x) - b| < \varepsilon. \end{aligned}$$



$x \approx a$ с точностью $< \delta = \delta(\varepsilon) \implies f(x) \approx b$ с точностью $< \varepsilon$.

$$\lim_{x\to+\infty} f(x) = b \iff \\ \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R} : x > \delta \implies \\ \implies |f(x) - b| < \varepsilon.$$

Пример 5.1. $\lim_{x\to+\infty} \operatorname{arctg} x = \frac{\pi}{2}$.

$$\lim_{x\to-\infty} f(x) = b \iff \\ \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R} : x < -\delta \implies \\ \implies |f(x) - b| < \varepsilon.$$

Пример 5.2. $\lim_{x\to-\infty} \operatorname{arctg} x = -\frac{\pi}{2}$.

Если $* = a;\ \infty$, то $\lim_{x\to*} f(x)$ называется двусторонним пределом. Если $* = a+0;\ a-0;\ +\infty;\ -\infty$, то $\lim_{x\to*} f(x)$ называется односторонним пределом. Если $** = b$ (конечное число), то $\lim_{x\to*} f(x) = b$ называют конечным пределом. Если $** = \infty;\ +\infty;\ -\infty$, то $\lim_{x\to*} f(x)$ называют бесконечным.

Теорема 5.1 (о связи двустороннего предела с односторонними).

$$\exists \lim_{x\to a} f(x) = b \iff \exists \lim_{x\to a+0} f(x) = b \text{ и } \exists \lim_{x\to a-0} f(x) = b.$$

Доказательство. Докажем необходимость. Распишем определение двустороннего предела по Коши.

$$\exists \lim_{x\to a} f(x) = b \implies$$
$$\implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) \quad \forall x \in \mathbb{R} : 0 < |x-a| < \delta \implies$$
$$\implies |f(x) - b| < \varepsilon.$$

Рассмотрим неравенство $0 < |x-a| < \delta$.

$$0 < |x-a| < \delta \iff x \in (a-\delta, a) \cup (a; a+\delta) \implies$$
$$\implies \begin{cases} \forall x \in \mathbb{R} : a < x < a+\delta \implies |f(x)-b| < \varepsilon, \\ \forall x \in \mathbb{R} : a-\delta < x < a \implies |f(x)-b| < \varepsilon. \end{cases} \implies$$
$$\implies \begin{cases} \exists \lim_{x\to a+0} f(x) = b, \\ \exists \lim_{x\to a-0} f(x) = b. \end{cases}$$

Докажем достаточность. Распишем определения односторонних пределов по Коши.

$$\lim_{x\to a+0} f(x) = b \iff$$
$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_1 = \delta_1(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R} : a < x < a + \delta_1 \implies$$
$$\implies |f(x) - b| < \varepsilon.$$

$$\lim_{x\to a-0} f(x) = b \iff$$
$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_2 = \delta_2(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathbb{R} : a - \delta_2 < x < a \implies$$
$$\implies |f(x) - b| < \varepsilon.$$

Пусть $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2\} > 0$. Тогда $\mathring{U}_\delta(a) \subset (\mathring{U}_{\delta_1}(a) \cap \mathring{U}_{\delta_2}(a)) \implies$

$$\implies (\forall x \in \mathbb{R} : 0 < |x-a| < \delta \implies |f(x)-b| < \varepsilon) \implies \exists \lim_{x\to a} f(x) = b.$$

$\square$

Замечание (1).

$$\lim_{x\to a} f(x) = \infty \iff \lim_{x\to a+0} f(x) = \infty, \lim_{x\to a-0} f(x) = \infty.$$

Замечание (2).

$$\lim_{x\to\infty} f(x) = \infty \iff \lim_{x\to+\infty} f(x) = b\ (\infty),\ \lim_{x\to-\infty} f(x) = b\ (\infty).$$

Определение 5.2 (Определение предела по Гейне)**.** *Пусть $f(x)$ определена в некоторой $\mathring{U}(*)$.*

$$\lim_{x\to *} f(x) = ** \iff \forall\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathring{U}(*) : \lim_{n\to\infty} x_n = * \implies \lim_{n\to\infty} f(x) = **,$$

где $x_n \neq * \ \forall n \in \mathbb{N}$.

Теорема 5.2 (об эквивалентности определений предела по Коши и Гейне)**.** *Определения предела по Коши и по Гейне эквивалентны.*

Пример 5.3. $\lim_{x\to 0} \sin\frac{1}{x}$ не определен.

Пример 5.4.

$$x_n = \frac{1}{\pi n} \quad \lim_{n\to\infty} x_n = 0 \quad \lim_{n\to\infty} \sin x_n = \lim_{n\to\infty} \sin \pi n = 0.$$

$$y_n = \frac{1}{\frac{\pi}{2} + 2\pi n} \quad \lim_{n\to\infty} y_n = 0 \quad \lim_{n\to\infty} \sin y_n = \lim_{n\to\infty} \sin \frac{\pi}{2} + 2\pi n = 1.$$

$0 \neq 1 \implies \lim_{x\to 0} f(x)$ не существует.

Теорема 5.3 (о единственности предела функции)**.** *Если существует $\lim_{x\to *} f(x) = b \in \mathbb{R}$, то этот предел единственный (при $x \to *$).*

Доказательство. Воспользуемся определением предела по Гейне.

$$\exists \lim_{x\to *} f(x) = b \in \mathbb{R} \implies \forall\{x_n\}_{n=1}^{\infty}, x_n \neq *, \lim_{n\to\infty} x_n = * \implies \lim_{n\to\infty} f(x_n) = b.$$

Числовая последовательность $\{f(x_n)\}_{n=1}^{\infty}$ сходится, следовательно, имеет единственный предел b (по теореме о единственности предела последовательности). □

Определение 5.3. *Функция $f(x)$ называется локально ограниченной при $x \to *$ (в точке $*$ или в окрестности $*$), если существуют такие $\mathring{U}(*)$ и $M > 0$, что $f(x)$ определена в $\mathring{U}(*)$ и $\forall x \in \mathring{U}(*) : |f(x)| \leq M$.*
Замечание: Если функция f локально ограничена при $x \to *$, то в точке $*$ такая функция может быть как определена, так и не определена.

Теорема 5.4 (о локальной ограниченности функции, имеющей конечный предел)**.** *Пусть $\exists \lim_{x\to *} f(x) = b \in \mathbb{R}$. Тогда $f(x)$ локально ограниченна при $x \to *$.*

Доказательство. По определению предела функции по Коши,

$$\lim_{x\to *} f(x) = b \iff$$
$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies |f(x) - b| < \varepsilon \implies$$
$$\implies \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |f(x)| = |f(x) - b + b| \le |f(x) - b| + |b| < \varepsilon + |b| = M.$$

Выберем любой $\varepsilon > 0$, например, $\varepsilon = 1$. Для соответствующей ему $\delta > 0$ будет верно, что $\forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |f(x)| < 1 + |b| = M$, а значит, $f(x)$ локально ограниченна при $x \to *$. □

5.2 Бесконечно малые функции

Определение 5.4. *Функцию $\alpha(x)$ называют бесконечно малой (б.м.) при $x \to *$ тогда и только тогда, когда*

$$\lim_{x\to *} \alpha(x) = 0 \iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies |\alpha(x)| < \varepsilon.$$

Пример: Рассмотрим функцию $y = 2^{\frac{1}{x}}$. Если $x \to 0 + 0$, то

$$\lim_{x\to 0+0} 2^{\frac{1}{x}} = [2^{+\infty}] = +\infty.$$

Если же $x \to 0 - 0$, то

$$\lim_{x\to 0-0} 2^{\frac{1}{x}} = [2^{-\infty}] = 0 \implies f(x) \text{ бесконечно малая при } x \to 0 - 0.$$

Теорема 5.5 (о связи функции, ее предела и бесконечно малой)**.**

$$\lim_{x\to *} f(x) = b \iff$$
$$\iff f(x) = b + \alpha(x), \text{ где } \alpha(x) \text{ — бесконечная малая при } x \to *.$$

Доказательство. Докажем необходимость.

$$\exists \lim_{x\to *} f(x) = b \iff$$
$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |f(x) - b| < \varepsilon.$$

Положим $\alpha(x) = f(x) - b$, тогда $\forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |\alpha(x)| < \varepsilon \implies$
$\implies \lim_{x\to *} \alpha(x) = 0 \implies \alpha(x)$ — бесконечно малая при $x \to * \implies$
$\implies f(x) = b + \alpha(x)$ при $x \to *$.

Докажем достаточность. Пусть $f(x) = b + \alpha(x)$, $\alpha(x)$ — бесконечно малая при $x \to * \implies$, тогда $\alpha(x) = f(x) - b \to 0$ при $x \to *$. По определению бесконечно малой,

$$\lim_{x\to *} \alpha(x) = 0 \iff$$
$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies |\alpha(x)| < \varepsilon \implies$$
$$\implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies |f(x) - b| < \varepsilon \implies$$
$$\implies \exists \lim_{x\to *} f(x) = b.$$

□

5.3 Свойства бесконечно малых функций

Теорема 5.6. *Пусть $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ - бесконечно малые при $x \to *$. Тогда $\alpha(x) + \beta(x)$ — бесконечно малые при $x \to *$.*

Доказательство. $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ бесконечно малые при $x \to *$

$$\lim_{x\to *} \alpha(x) \implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_1 = \delta_1(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_{\delta_1}(*) \implies |\alpha(x)| < \frac{\varepsilon}{2}.$$
$$\lim_{x\to *} \alpha(x) \implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_2 = \delta_2(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_{\delta_2}(*) \implies |\beta(x)| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Пусть $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2\}$, если $* : a; a+0; a-0$ и $\delta = \max\{\delta_1, \delta_2\}$, если $* : \infty; , +\infty, -\infty$.

$$\implies \mathring{U}_\delta(*) = \mathring{U}_{\delta_1}(*) \cap \mathring{U}_{\delta_2}(*) \implies .$$
$$\implies \forall.$$

□

Следствие 5.6.1. *Сумма конечного числа бесконечно малой при $x \to *$ есть бесконечно малая при $x \to *$.*

Теорема 5.7 (произведение бесконечно малой на ограниченнную)**.** *Пусть α - бесконечно малая при $x \to *$, $f(x)$ локально ограниченна при $x \to *$. Тогда $\alpha(x) \cdot f(x)$ есть бесконечно малая при $x \to *$.*

Доказательство. $f(x)$ — локально ограниченна при $x \to * \implies \exists \mathring{U}_{\delta_1}(*) \quad \exists M > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_{\delta_1}(*) : |f(x)| < M$; $\alpha(x)$ — бесконечно малая при $x \to * \implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_2 = \delta_2(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_{\delta_2}(*) \implies |\alpha(x)| < \frac{\varepsilon}{M} \implies \implies \mathring{U}_\delta = \mathring{U}_{\delta_1}(*) \cap \mathring{U}_{\delta_2}(*)$

□

$$\lim_{x\to 0} x\sin\frac{1}{x} = .$$

$$\lim_{x\to 0} x^2 \arctan\frac{1}{x^{100}} = 0.$$

Теорема 5.8 (о произведении двух бесконечно малых)**.** *Пусть $\alpha(x)$, $\beta(x)$ — бесконечно малые при $x \to *$. Тогда $\alpha(x)\beta(x)$ — бесконечно малая при $x \to *$*

Доказательство. $\beta(x)$ — бесконечно малая при $x \to * \implies \lim_{x\to *}\beta(x) = 0 \implies$ по теореме о локальной ограниченной функции, имеющей конечный предел $\implies \beta(x)$ локально ограниченна при $x \to * \implies \alpha(x)\cdot\beta(x)$ — произведение бесконечно малой на локально ограниченную при $x \to * \implies$ по теореме 2 $\alpha\cdot\beta$ — бесконечно малые при. □

Следствие 5.8.1. *Произведение конечного числа бесконечно малых при $x \to *$ есть бесконечно малая при $x \to *$.*

5.4 Арифметические операции с функциями, имеющими пределы

Теорема 5.9. *Пусть* $\exists \lim_{x\to *} f(x) = A \in \mathbb{R}, \lim_{x\to *} g(x) = B \in \mathbb{R}$ *Тогда*

1. $\exists \lim_{x\to *}(f(x) \pm g(x)) = A \pm B$
2. $\exists \lim_{x\to *}(f(x)g(x)) = AB$
3. $B \neq 0 \implies \exists \lim_{x\to *} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{A}{B}$

Доказательство. $\exists \lim_{x\to *} f(x) = A; \exists \lim_{x\to *} g(x) = B \implies$ по теореме о связи функции, ее предела и бесконечно малой $\implies f(x) = A + \alpha(x), g(x) = B + \beta(x)$, где $\alpha(x), \beta(x)$ — бесконечно малые при $x \to *$.

1. $f(x) \pm g(x) = (A + \alpha(x)) \pm (B + \beta(x)) = A \pm B + \alpha(x) \pm \beta(x) = A \pm B + \gamma(x)$, где $\gamma(x)$ – бесконечно малая при $x \to * \implies$
2. $f(x)\cdot g(x) = (A+\alpha(x))(B+\beta(x)) = AB+B\alpha(x)+A\beta(x)+\alpha(x)\beta(x) = AB + \gamma(x) \implies$ по теореме о связи предела функции, ее предела и бесконечно малой $\implies \lim_{x\to *} f(x)g(x) = AB$

3. $\frac{f(x)}{g(x)} = \frac{A+\alpha(x)}{B+\beta(x)} = \frac{A}{B} + \frac{A+\alpha(x)}{B+\beta(x)} - AB$

$$\gamma(x) = \frac{AB + B\alpha(x) - AB - A\beta(x)}{B(B+\beta(x)} = \frac{B\alpha(x) - A\beta(x)}{B} \cdot \frac{1}{B+\beta(x)}.$$

$\frac{B\alpha(x)-A\beta(x)}{B}$ — бесконечно малая при $x \to *$ по свойствам бесконечно малых.

Докажем, что $\phi(x) = \frac{1}{B+\beta(x)}$ локально ограниченна при $x \to *$. $\beta(x)$ — бесокнечно малая при $x \to * \implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies |\beta(x)| < \varepsilon$. Выберем $\varepsilon = \frac{|B|}{2} > 0$, найдем соответствующее $\delta = \delta(\varepsilon) > 0 \implies \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |\beta(x)| < \frac{|B|}{2}$

$$\implies |B + \beta(x)| \geq |B| - |\beta(x)| > |B| - \frac{|B|}{2} = \frac{|B|}{2} \implies .$$

$$\implies \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |B + \beta(x)| > \frac{|B|}{2} > 0 \implies .$$

$$\frac{1}{B + \beta(x) < \frac{2}{|B|}} \implies .$$

$\implies \phi(x) = \frac{1}{B+\beta(x)}$ локально ограниченна при $x \to *$ $\gamma(x)$ — произведение бесконечно малой на локально ограниченную при $x \to * \implies$ по свойству бесконечно малой является бесконечно малой при $x \to *$.

$\square$

Теорема 5.10 (о знакопостоянстве функции, имеющей ненулевой предел). *Пусть* $\exists \lim_{x\to*} f(x) = b \neq 0$. *Тогда* $\exists \mathring{U}_\delta(*) \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |f(x)| > \frac{|b|}{2}$ *Кроме того, если* $b > 0$, *то* $\forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : f(x) > \frac{b}{2} \implies f(x) > 0$, *т.е. имеет тот же знак, что и предел; если* $b < 0$, *то* $\forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : f(x) < \frac{b}{2} \implies f(x) < 0$, *т.е. имеет тот же знак, что и предел.*

Доказательство.

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \implies |f(x) - b| < \varepsilon.$$

Или $b - \varepsilon < f(x) < b + \varepsilon$. Выберем $\varepsilon = \frac{|b|}{2} > 0$, найдем соответствующий $\delta = \delta(\varepsilon) > 0 \implies$

$$\forall x \in \mathring{U}_\delta(*) : |f(x)| = |b + f(x) - b| \geq |b| - |f(x) - b| > |b| - \frac{|b|}{2}.$$

$$\implies |f(x)| > \frac{|b|}{2}.$$

Пусть $b > 0$, тогда $\varepsilon = \frac{|b|}{2} = \frac{b}{2} > 0 \implies \forall x \in \mathring{U}_\delta(*) \quad f(x) > b - \varepsilon = b - \frac{b}{2} = \frac{b}{2} > 0$ $\square$

Теорема 5.11 (о предельном переходе в неравенстве)**.** *Если существуют два предела $\lim_{x\to*} f(x) = b_1$, $\lim_{x\to*} g(x) = b_2$ и проколотая окрестность $\mathring{U}(*)$, такая, что для любого x из этой окрестности выполняется неравенство $f(x) \leq g(x)$, то $b_1 \leq b_2$.*

Доказательство. Пусть существуют $\lim_{x\to*} f(x) = b_1$ и $\lim_{x\to*} g(x) = b_2$. Т.к. пределы конечны, по теореме об арифметических операциях с функциями, имеющими пределы, для разности $\phi(x) = g(x) - f(x)$ существует предел $\lim_{x\to*} \phi(x) = b_2 - b_1$.

Будем доказывать "от противного". Предположим, что $b_1 > b_2$. Из этого следует, что $b_2 - b_1 < 0$, тогда по теореме о знакопостоянстве функции, имеющей ненулевой предел, существует такая проколотая окрестность $\mathring{U}_1(*)$, что $\forall x \in \mathring{U}_1(*) : \phi(x) = g(x) - f(x) < \frac{b_2 - b_1}{2} < 0$. Таким образом, $g(x) < f(x)$, а тогда $\forall x \in \mathring{U}(*) \cap \mathring{U}_1(*)$ выполняются сразу два неравенства: $f(x) \leq g(x)$ и $g(x) < f(x)$, что является противоречием. Значит, $b_1 \leq b_2$. $\square$

Замечание. Если существует $\mathring{U}(*)$, такая, что $\forall x \in \mathring{U}(*)$ верно неравенство $f(x) < g(x)$, то для пределов $\lim_{x\to*} f(x) = b_1$ и $\lim_{x\to*} g(x) = b_2$ выполняется $b_1 \leq b_2$.

Теорема 5.12 (о пределе промежуточной функции или лемма о двух милиционерах)**.** *Если слева и справа от правонарушителя находится по милиционеру, каждый из которых держит его и идет в отделение милиции, то правонарушитель тоже придет в отделение милиции. Или, говоря простым языком, если существует $\lim_{x\to*} f(x) = b$, $\lim_{x\to*} g(x) = b$ и $\mathring{U}(*)$, такая, что $\forall x \in \mathring{U}(*)$ выполняется неравенство $f(x) \leq \phi(x) \leq g(x)$, то существует $\lim_{x\to*} \phi(x) = b$.*

Доказательство. Пусть существуют $\lim_{x\to*} f(x) = b$ и $\lim_{x\to*} g(x) = b$. Распишем эти пределы по определению Коши:

$$\exists \lim_{x\to*} f(x) = b \iff$$
$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_1 = \delta_1(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_{\delta_1}(*) \implies b - \varepsilon < f(x) < b + \varepsilon,$$

$$\exists \lim_{x\to *} g(x) = b \iff$$

$$\iff \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta_2 = \delta_2(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}_{\delta_2}(*) \implies b - \varepsilon < g(x) < b + \varepsilon.$$

Пусть $\delta > 0$ таково, что $\mathring{U}_\delta(*) \subset \mathring{U}(*) \cap \mathring{U}_{\delta_1}(*) \cap \mathring{U}_{\delta_2}(*)$. Тогда $\forall x \in \mathring{U}_\delta(*)$ выполняются неравенства $f(x) \le \phi(x) \le g(x)$, $b - \varepsilon < f(x)$ и $g(x) < b + \varepsilon$. Записав их вместе, получим, что

$$b - \varepsilon < f(x) \le \phi(x) \le g(x) < b + \varepsilon \implies \exists \lim_{x\to *} \phi(x) = b.$$

□

Теорема 5.13 (о пределе сложной функции)**.** *Если существуют пределы* $\lim_{x\to *} f(x) = A$ *и* $\lim_{y\to A} g(y) = B$*, в некоторой окрестности* $\mathring{U}(*)$ $f(x) \ne A$*, и в этой окрестности определена сложная функция* $g(f(x))$*, то существует* $\lim_{x\to *} g(f(x)) = B$*.*

Обратим внимание на то, как осуществляется замена:

$$(y = f(x), x \to *, y \to A) \implies \lim_{y\to A} g(y) = B.$$

Доказательство. По определению предела по Гейне

$$\exists \lim_{x\to *} f(x) = A \implies$$

$$\implies \forall \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset \mathring{U}(*) : (\lim_{n\to\infty} x_n = * \implies \lim_{n\to\infty} f(x_n) = A), \qquad (\Delta)$$

$$\exists \lim_{y\to A} g(y) = B \implies$$

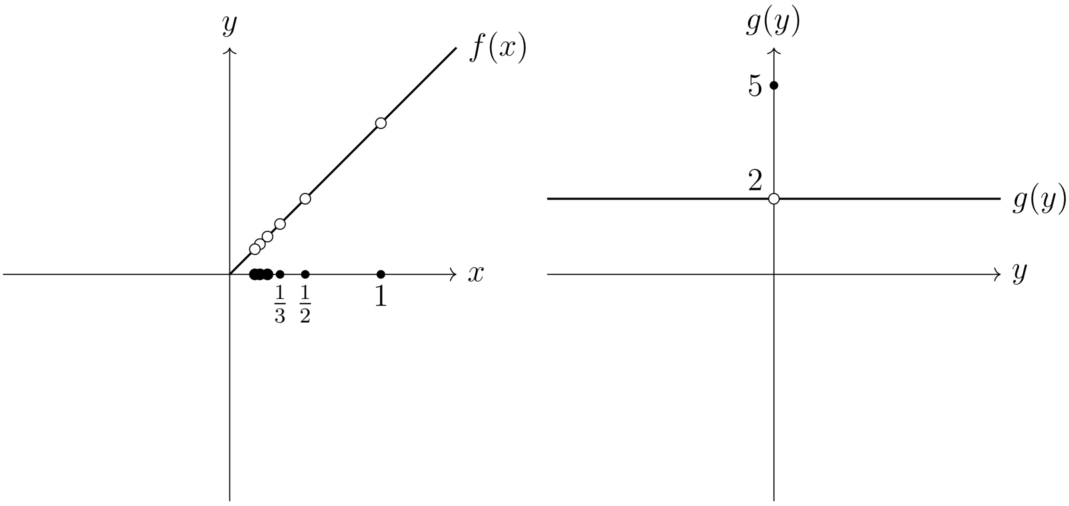
$$\implies \forall \{y_n\}_{n=1}^\infty, y_n \ne A : (\lim_{n\to\infty} y_n = A \implies \lim_{n\to\infty} g(y_n) = B). \qquad (\Delta\Delta)$$

Выберем любую $\{x_n\}_{n=1}^\infty : x_n \in \mathring{U}(*)$, тогда по (Δ) из того, что $\lim_{n\to\infty} x_n = *$, следует, что $\lim_{n\to\infty} f(x_n) = A$. Обозначим $y_n = f(x_n)$, по условию теоремы $y_n \ne A$, причем $\lim_{n\to\infty} y_n = \lim_{n\to\infty} f(x_n) = A$. Тогда по $(\Delta\Delta)$ существует $\lim_{n\to\infty} g(y_n) = \lim_{n\to\infty} g(f(x_n)) = B$. Следовательно, по определению предела по Гейне, существует $\lim_{x\to *} g(f(x)) = B$. □

Замечание. Условие $f(x) \ne A$ в окрестности $\mathring{U}(*)$ является существенным. Если это условие отсутствует, то теорема может не выполниться.

Пример 5.5.

$$f(x) = \begin{cases} x, x \neq \frac{1}{n}, n \in \mathbb{N}, \\ 0, x = \frac{1}{n}, n \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad g(y) = \begin{cases} 2, y \neq 0, \\ 5, y = 0. \end{cases}$$



$\lim_{x\to 0} f(x) = 0$. $x = 0$ в любой точке $x = \frac{1}{n}$, следовательно, в любой $\mathring{U}(0)$ есть точки, где $f(x) = 0$.

Рассмотрим последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} = \{\frac{1}{n}\}$.

$$\lim_{n\to\infty} x_n = 0 \implies \lim_{n\to\infty} f(x_n) = 0 \implies \lim_{n\to 0} g(f(x_n)) = \lim_{n\to 0} g(0) = 5.$$

Рассмотрим последовательность $\{\tilde{x_n}\}_{n=1}^{\infty} = \{e^{-n}\}$.

$$\lim_{n\to\infty} \tilde{x_n} = 0,\ e \notin \mathbb{N} \implies \lim_{n\to\infty} g(f(\tilde{x_n})) = \lim_{n\to\infty} g(e^{-n}) = 2.$$

Подведем итог:

$$\begin{cases} \lim_{n\to\infty} x_n = \lim_{n\to\infty} \tilde{x_n}, \\ \lim_{n\to 0} g(f(x_n)) \neq \lim_{n\to\infty} g(f(\tilde{x_n})). \end{cases} \implies \nexists \lim_{x\to 0} g(f(x)).$$

5.5 Бесконечно большие функции

Определение 5.5. *Функция $f(x)$ называется бесконечно большой (б.б.) при $x \to *$ тогда и только тогда, когда $f(x)$ определена в некоторой $\mathring{U}(*)$ и ее предел при $x \to *$ равен бесконечности, т.е.*

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 \quad \forall x \in \mathring{U}(*) : |f(x)| > \varepsilon.$$

Пример 5.6. Рассмотрим функцию $y = \frac{1}{x}$. $\lim_{x\to 0} y = \infty$, следовательно, y — бесконечно большая при $x \to 0$.

Теорема 5.14 (о связи бесконечно большой с бесконечно малой)**.**

1. *Если $f(x)$ — бесконечно большая при $x \to *$, то $\frac{1}{f(x)}$ является бесконечно малой при $x \to *$.*

2. *Если $\alpha(x)$ — бесконечно малая при $x \to *$ и существует такая проколотая окрестность $\mathring{U}(*)$, что $\forall x \in \mathring{U}(*) : \alpha(x) \neq 0$, то $\frac{1}{\alpha(x)}$ является бесконечно большой при $x \to *$.*

Доказательство.

1. $f(x)$ — бесконечно большая при $x \to *$, тогда для любого $\varepsilon_1 > 0$ найдется $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$, такая, что для любого x из $\mathring{U}_\delta(*)$ выполняется неравенство $|f(x)| > \varepsilon_1$. Выберем любой $\varepsilon > 0$, найдем $\varepsilon_1 = \frac{1}{\varepsilon}$ и $\delta = \delta(\varepsilon_1) = \delta(\frac{1}{\varepsilon})$. Тогда для любого x из $\mathring{U}_\delta(*)$ выполняется неравенство $|f(x)| > \frac{1}{\varepsilon}$, или, что то же, $\frac{1}{|f(x)|} < \varepsilon$. Положим $\alpha(x) = \frac{1}{f(x)}$, тогда для любого x из $\mathring{U}_\delta(*)$ верно, что $|\alpha(x)| < \varepsilon$, из чего следует, что предел $\alpha(x)$ при $x \to *$ равен нулю. Таким образом, $\alpha(x)$ — бесконечно малая при $x \to *$.

2. Пусть $\alpha(x)$ — бесконечно малая при $x \to *$ и для любого x из $\mathring{U}(*)$ верно, что $\alpha(x) \neq 0$. Предел $\alpha(x)$ при $x \to *$ равен нулю, т.е. для любого $\varepsilon_1 > 0$ найдется $\delta > 0$, зависящая от ε, такая, что для любого x из $\mathring{U}_\delta(*) \subset \mathring{U}(*)$ выполняется неравенство $|\alpha(x)| < \varepsilon_1$. Выберем любой $\varepsilon > 0$, найдем $\varepsilon_1 = \frac{1}{\varepsilon} > 0$ и соответствующую $\delta = \delta(\varepsilon_1) = \delta(\frac{1}{\varepsilon}) > 0$.

□

Замечание. Рассмотрим функцию $y = x \sin \frac{1}{x}$ при $x \to 0$. $\sin \frac{1}{x}$ — ограниченная, x — бесконечная малая, следовательно, $y = \alpha(x)$ — бесконечно малая.

Теперь рассмотрим функцию $f(x) = \frac{1}{x \sin x}$. В любой $\mathring{U}(0)$ есть хотя бы один x, следовательно, $\alpha(x)$ равна нулю, а значит, $f(x)$ не существует.

5.6 Первый замечательный предел

Теорема 5.15.

$$\lim_{x\to 0} \frac{\sin x}{x} = 1.$$

Утверждение 5.1. *Если* $f(x)$ *— элементарная функция,* $a \in D_{(f)}$ *— область определения* f*, то существует предел* $f(x)$*, равный* $f(a)$ *при* $x \to a$*.*

Следствие 5.15.1.

$$\lim_{x\to\infty} \frac{\operatorname{tg} x}{x} = 1.$$

5.7 Второй замечательный предел

Теорема 5.16.

$$\lim_{x\to\infty} \left(\frac{1}{x} + 1\right)^x = [1^\infty] = e.$$