

Математический анализ — 1.

Лектор — Юрий Сергеевич Белов

Создатель конспекта — Глеб Минаев *

Литература:

- В. А. Зорич “Математический анализ”
- О. Л. Виноградов “Математический анализ”
- (подходит попозже) Г. М. Фихтенгельц “Курс дифференциального и интегрального исчисления”
- У. Рудин “Основы анализа”
- М. Спивак “Математический анализ на многообразиях”
- В. М. Тихомиров “Рассказы о максимумах и минимумах”

1 Множества, аксиоматика и вещественные числа.

Мы начинаем с теории множеств.

Определение 1.

- Множества и элементы — понятно.
- $a \in B$ — понятно.
- $A \cup B := \{x \mid x \in A \vee x \in B\}$ — объединение.
- $A \cap B := \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$ — пересечение.
- $A \setminus B := \{x \mid x \in A \vee x \notin B\}$ — разность.
- $A \triangle B := A \setminus B \cup B \setminus A$ — симметрическая разница.
- $A^C := X \setminus A$ — дополнение, где X — некоторое фиксированное рассматриваемое множество.
- $A \subset B$ — “ A — подмножество B ”, т.е. $\forall x (x \in A \Rightarrow x \in B)$.

Следствие.

- (первое правило Моргана) $(A \cup B)^C = A^C \cap B^C$.

$$x \in (A \cup B)^C \Leftrightarrow x \notin A \cup B \Leftrightarrow \begin{cases} x \notin A \\ x \notin B \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x \in A^C \\ x \in B^C \end{cases} \Leftrightarrow x \in A^C \cap B^C$$

* Оригинал конспекта расположен на GitHub. Также на GitHub доступен репозиторий с другими конспектами.

- (второе правило Моргана) $(A \cap B)^C = A^C \cup B^C$. Аналогично.

Определение 2. (Аксиома индукции.) Пусть есть функция $A : \mathbb{N} \rightarrow \text{true}; \text{false}$, что:

1. $A(1) = \text{true}$;
2. $\forall n(A(n) \rightarrow A(n+1))$.

Тогда $\forall n A(n)$.

Определение натуральных чисел сложно, рассматривать его не будем. Важно также иметь в виду натуральные числа с операциями сложения и умножения.

Определение 3. Пусть есть кольцо без делителей нуля R . Рассмотрим отношение эквивалентности \sim на $R \times (R \setminus \{0\})$, что $(a; b) \sim (c; d) \Leftrightarrow ad = bc$. Тогда $\text{Quot}(R)$ — фактор-множество по \sim и поле.

Определение 4. Рациональные числа — $\mathbb{Q} := \text{Quot}(\mathbb{Z})$.

Теорема 1. $\nexists x \in \mathbb{Q}, x^2 = 2$.

Доказательство. Предположим противное, т.е. существуют взаимно простые $m \in \mathbb{Z}$ и $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$, что $(\frac{m}{n})^2 = 2$. Тогда $m^2 = 2n^2$. Очевидно, что тогда $m^2 : 2$, значит $m : 2$, значит $m : 4$, значит $n^2 : 2$, значит $n : 2$, значит n и m не взаимно просты, так как делятся на 2 — противоречие. \square

Теперь мы хотим понять, что есть вещественные числа. Тут есть несколько подходов.

Определение 5 (аксиоматический подход). Вещественные числа — это полное упорядоченное поле \mathbb{R} , состоящее не из одного элемента.

Здесь “поле” значит, что на множестве (вместе с его операциями и выделенными элементами) верны аксиомы поля $A_1, A_2, A_3, A_4, M_1, M_2, M_3, M_4$ и D (т.е. сложение и умножение ассоциативны, коммутативны имеют нейтральные элементы и удовлетворяют условию существованию обратных (по умножению — для всех кроме нуля), а также дистрибутивности).

Упорядоченность значит, что есть рефлексивное транзитивное антисимметричное отношение \preceq , что все элементы сравнимы, согласованное с операциями, т.е.:

$$A) \quad a \preceq b \Rightarrow a + x \preceq b + x.$$

$$M) \quad 0 \preceq a \wedge 0 \preceq b \Rightarrow 0 \preceq ab.$$

Полнота поля значит любое из следующих утверждений (они равносильны):

- любое ограниченное сверху (снизу) подмножество поля имеет точную верхнюю (нижнюю) грань;
- (аксиома Кантора-Дедекинда) для любых двух множеств A и B , что $A \preceq B$, есть разделяющий их элемент.

Итого мы имеем 9 аксиом поля, 2 аксиомы упорядоченности и 1 аксиома полноты упорядоченности.

Утверждение. Над \mathbb{Q} нет элемента разделяющего $A := \{a > 0 \mid a^2 < 2\}$ и $B := \{b > 0 \mid b^2 > 2\}$.

Доказательство. Предположим противное, т.е. есть $c > 0$, что $A < c < B$.

Если $c^2 < 2$, то найдём ε , что $\varepsilon \in (0; 1)$ и $(c + \varepsilon)^2 < 2$. Заметим, что $(c + \varepsilon)^2 = c^2 + 2c\varepsilon + \varepsilon^2 < c^2 + (2c + 1)\varepsilon$. Пусть $\varepsilon < \frac{2-c^2}{2c+1}$, тогда такое ε точно подойдёт, ну а поскольку $\frac{2-c^2}{2c+1} > 0$, то такое ε есть. Значит $c^2 \geq 2$.

Аналогично имеем, что $\varepsilon \leq 2$. А значит $c^2 = 2$, что не бывает над \mathbb{Q} . \square

Следствие. \mathbb{Q} не полно.

Определение 6. Значение t является *верхней (нижней) гранью* непустого множества $X \in \mathbb{R}$ тогда и только тогда, когда $t \geq X$, т.е. любой элемент x множества X не более t .

Точная верхняя (нижняя) грань или *супремум (инфимум)* непустого множества $X \subseteq \mathbb{R}$ — минимальная верхняя (нижняя) грань множества X . Он же является элементом разделяющим X и множество всех его верхних (нижних) граней. Обозначение: $\sup(X)$ и $\inf(X)$ соответственно.

Осцелляющей множества X называется значение $\text{osc } X := \sup X - \inf X$.

Определение 7.

- *Закрытый интервал* или *отрезок* $[a; b] := \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$.
- *Открытый интервал* или просто *интервал* $(a; b) := \{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$.
- *Полуоткрытый интервал* или *полуинтервал* $(a; b] := \{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}$, $[a; b) := \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\}$.

Теорема 2 (Лемма о вложенных отрезках). Пусть имеется $\{I_i\}_{i=1}^{\infty}$ — множество вложенных (непустых) отрезков, т.е. $\forall n > 1 \ I_{n+1} \subset I_n$. Тогда $\bigcap_{i=1}^{\infty} I_i \neq \emptyset$.

Доказательство. Заметим, что для любых натуральных $n < m$ верно, что $a_n \leq a_m \leq b_m \leq b_n$, где $I_n = [a_n; b_n]$. Тогда для $A := \{a_i\}_{i=1}^{\infty}$ и $B := \{b_i\}_{i=1}^{\infty}$ верно, что $A \leq B$. Значит есть разделяющий их элемент t , значит $A \leq t \leq B$, значит $t \in I_i$ для всех i , значит $t \in \bigcap_{i=1}^{\infty} I_i$. \square

Замечание 1. Теорема 2 не верна для не отрезков.

Замечание 2. Если в теореме 2 $b_i - a_i$ “сходится к 0”, т.е. $\forall \varepsilon > 0 \exists n \in \mathbb{N} : \forall i > n \ b_i - a_i < \varepsilon$, то пересечение всех отрезков состоит из ровно одного элемента.

Теорема 3 (индукция на вещественных числах). Пусть дано множество $X \subseteq [0; 1]$, что

1. $0 \in X$;
2. $\forall x \in X \exists \varepsilon > 0 : U_{\varepsilon}(x) \cap [0; 1] \subseteq X$;
3. $\forall Y \subseteq X \ \sup(Y) \in X$.

Тогда $X = [0; 1]$.

Доказательство. Предположим противное: $X \neq [0; 1]$. Рассмотрим $Z := [0; 1] \setminus X$ ($Z \neq \emptyset$!) и $Y := \{y \in [0; 1] \mid y < Z\}$ ($Y \neq \emptyset$!). Заметим, что $Y \subseteq X$ и $\sup(Y) = \inf(Z) = t$. Тогда $t \in X$ по второму условию. Значит для некоторого $\varepsilon > 0$ верно, что $U_{\varepsilon}(t) \cap [0; 1] \in X$, а т.е. $(U_{\varepsilon}(t) \cap [0; 1]) \cap Z = \emptyset$, а тогда $t \neq \inf(Z)$ — противоречие. Значит $X = [0; 1]$. \square

2 Топология прямой, пределы и непрерывность.

2.1 Последовательности, пределы и ряды

Определение 8. Предел последовательности $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ — такое число x , что для любой окрестности x эта последовательность с некоторого момента будет лежать в этой окрестности:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \forall n \geq N \quad x_n \in U_{\varepsilon}(x)$$

Обозначение: $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} = x$.

Пределная точка последовательности $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ — такое число x , что в любой его окрестности после любого момента появится элемент данной последовательности:

$$\forall \varepsilon > 0 \forall N \in \mathbb{N} \exists n > N : \quad x_n \in U_{\varepsilon}(x)$$

Определение 9. Последовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ называется *фундаментальной*, если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \forall n_1, n_2 > N \quad |x_{n_1} - x_{n_2}| < \varepsilon$$

Теорема 4. Последовательность сходится тогда и только тогда, когда фундаментальна.

Доказательство.

1. Пусть последовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ сходится к некоторому значению X , тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N \quad |x_n - X| < \varepsilon/2 \Rightarrow$$

$$\forall n_1, n_2 > N \quad |x_{n_1} - x_{n_2}| = |x_{n_1} - X + X - x_{n_2}| \leq |x_{n_1} - X| + |X - x_{n_2}| < \varepsilon$$

2. Пусть последовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ фундаментальна. Мы знаем, что для каждого $\varepsilon > 0$ все члены, начиная с некоторого различаются менее чем на ε . Тогда возьмём какой-нибудь такой член y_0 для некоторого ε , затем какой-нибудь такой член y_1 для $\varepsilon/2$, который идёт после y_0 и так далее. Получим последовательность, что все члены, начиная с n -ого лежат в $\varepsilon/2^n$ -окрестности y_n . Тогда рассмотрим последовательность $\{I_n\}_{n=0}^{\infty}$, где $I_n = [y_n - \varepsilon/2^{n-1}; y_n + \varepsilon/2^{n-1}]$. Несложно понять, что $I_n \supseteq I_{n+1}$, поэтому в пересечении $\{I_n\}_{n=0}^{\infty}$ лежит некоторый X . Несложно понять, что все члены начальной последовательности, начиная с y_{n+2} , лежат в $\varepsilon/2^{n+2}$ -окрестности y_{n+2} . При этом $|y_{n+2} - X| \leq \varepsilon/2^{n+1}$, что значит, что все члены главной последовательности, начиная с y_{n+2} лежат в $3\varepsilon/2^{n+2}$ -окрестности X , а значит и в $\varepsilon/2^n$.

□

Утверждение 5. Для последовательностей $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ и $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ верно (если определено), что

1. $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} + \lim\{y_n\}_{n=0}^{\infty} = \lim\{x_n + y_n\}_{n=0}^{\infty}$
2. $-\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} = \lim\{-x_n\}_{n=0}^{\infty}$
3. $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \cdot \lim\{y_n\}_{n=0}^{\infty} = \lim\{x_n y_n\}_{n=0}^{\infty}$
4. $\frac{1}{\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty}} = \lim\{\frac{1}{x_n}\}_{n=0}^{\infty}$ (если $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \neq 0$)

и всегда, когда определена левая сторона определена, правая тоже определена.

Доказательство.

1. Пусть $\lim\{x_n\}_{n=0}^\infty = X$, $\lim\{y_n\}_{n=0}^\infty = Y$. Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N, M \in \mathbb{N} : \quad \forall n > N \quad |x_n - X| < \varepsilon/2 \quad \wedge \quad \forall m > M \quad |y_m - Y| < \varepsilon/2,$$

тогда

$$\forall n > \max(N, M) \quad |(x_n + y_n) - (X + Y)| \leq |x_n - X| + |y_n - Y| < \varepsilon,$$

что означает, что $\{x_n + y_n\}_{n=0}^\infty$ сходится и сходится к $X + Y$.

2. Пусть $\lim\{x_n\}_{n=0}^\infty = X$. Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \quad \forall n > N \quad |x_n - X| < \varepsilon,$$

тогда

$$\forall n > N \quad |(-x_n) - (-X)| = |X - x_n| = |x_n - X| < \varepsilon,$$

что означает, что $\{-x_n\}_{n=0}^\infty$ сходится и сходится к $-X$.

3. Пусть $\lim\{x_n\}_{n=0}^\infty = X$, $\lim\{y_n\}_{n=0}^\infty = Y$. Определим также

$$\delta : (0; +\infty) \rightarrow \mathbb{R}, \varepsilon \mapsto \frac{\varepsilon}{\sqrt{\left(\frac{|x|+|y|}{2}\right)^2 + \varepsilon} + \frac{|x|+|y|}{2}} = \sqrt{\left(\frac{|x|+|y|}{2}\right)^2 + \varepsilon} - \frac{|x|+|y|}{2}$$

Несложно видеть, что $\delta(\varepsilon)$ всегда определено и всегда положительно. Также несложно видеть, что $\delta(\varepsilon)$ есть корень уравнения $t^2 + t(|X| + |Y|) = \varepsilon$. Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N, M \in \mathbb{N} : \quad \forall n > N \quad |x_n - X| < \delta(\varepsilon) \quad \wedge \quad \forall m > M \quad |y_m - Y| < \delta(\varepsilon),$$

тогда

$$\begin{aligned} \forall n > \max(N, M) \quad |x_n \cdot y_n - X \cdot Y| &= |x_n \cdot y_n - x_n \cdot Y + x_n \cdot Y - X \cdot Y| \\ &\leq |x_n \cdot (y_n - Y)| + |(x_n - X) \cdot Y| \\ &< |x_n| \cdot \delta(\varepsilon) + \delta(\varepsilon) \cdot |Y| \\ &< (|X| + \delta(\varepsilon)) \cdot \delta(\varepsilon) + |Y| \cdot \delta(\varepsilon) \\ &= \delta(\varepsilon)^2 + (|X| + |Y|)\delta(\varepsilon) \\ &= \varepsilon, \end{aligned}$$

что означает, что $\{x_n \cdot y_n\}_{n=0}^\infty$ сходится и сходится к $X \cdot Y$.

4. Пусть $\lim\{x_n\}_{n=0}^\infty = X$. Определим также

$$\delta : (0; +\infty) \rightarrow \mathbb{R}, \varepsilon \mapsto \frac{\varepsilon|X|}{1 + \varepsilon|X|}$$

Несложно видеть, что $\delta(\varepsilon)$ всегда определено и всегда меньше $|X|$. Также несложно видеть, что $\delta(\varepsilon)$ есть корень уравнения $\frac{t}{|X|(|X|-t)} = \varepsilon$. Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \quad \forall n > N \quad |x_n - X| < \delta(\varepsilon),$$

тогда

$$\forall n > N \quad \left| \frac{1}{x_n} - \frac{1}{X} \right| = \left| \frac{X - x_n}{X \cdot x_n} \right| < \frac{\delta(\varepsilon)}{|X| \cdot |x_n|} < \frac{\delta(\varepsilon)}{|X|(|X| - \delta(\varepsilon))} = \varepsilon,$$

что означает, что $\{\frac{1}{x_n}\}_{n=0}^\infty$ сходится и сходится к $1/X$.

□

Определение 10. Последовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ *асимптотически больше* последовательности $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$, если $x_n > y_n$ для всех натуральных n , начиная с некоторого. Обозначение: $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succ \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$.

Аналогично определяются *асимптотически меньше* ($\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \prec \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$), *асимптотически не больше* ($\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \preccurlyeq \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$) и *асимптотически не меньше* ($\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succcurlyeq \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$).

Утверждение 6. Если $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succcurlyeq \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$, то $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \geq \lim\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$.

Доказательство. Предположим противное, т.е. $Y > X$, где $X := \lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$, $Y := \lim\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$. Тогда пусть $\varepsilon = \frac{|X-Y|}{2}$. С каких-то моментов $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ и $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ находятся в ε -окрестностях X и Y соответственно. Тогда начиная с позднего из этих моментов, $y_n > Y - \varepsilon = X + \varepsilon > x_n$, т.е. $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \prec \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ — противоречие. Значит $X \geq Y$. □

Утверждение 7. Если $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} > \lim\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$, то $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succ \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$.

Доказательство. Пусть $X := \lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$, $Y := \lim\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$. Тогда пусть $\varepsilon = \frac{|X-Y|}{2}$. С каких-то моментов $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ и $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ находятся в ε -окрестностях X и Y соответственно. Тогда начиная с позднего из этих моментов, $x_n > X - \varepsilon = Y + \varepsilon > y_n$, т.е. $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succ \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$. □

Утверждение 8 (лемма о двух полицейских). Если

$$\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succcurlyeq \{y_n\}_{n=0}^{\infty} \succcurlyeq \{z_n\}_{n=0}^{\infty}$$

и

$$\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} = \lim\{z_n\}_{n=0}^{\infty} = A,$$

то предел $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ определён и равен A .

Доказательство. Для каждого $\varepsilon > 0$ есть $N, M \in \mathbb{N}$, что

$$\forall n > N \quad |x_n - A| < \varepsilon \quad \wedge \quad \forall m > M \quad |z_m - A| < \varepsilon,$$

значит

$$\forall n > \max(N, M) \quad A + \varepsilon > x_n \geq y_n \geq z_n > A - \varepsilon \quad \text{т.е.} \quad |y_n - A| < \varepsilon,$$

что означает, что $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ сходится и сходится к A . □

Утверждение 9. Если $\{x_n\}_{n=0}^{\infty} \succcurlyeq \{y_n\}_{n=0}^{\infty}$, $\lim\{x_n\}_{n=0}^{\infty} = A$, а $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ не убывает (с некоторого момента), то предел $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ существует и не превосходит A .

Доказательство. Если последовательность $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ возрастает не с самого начала, тоотрежем её начало с до момента начала возрастания. Заметим, что она ограничена сверху (из-за последовательности $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$), тогда определим $B := \sup(\{y_n\}_{n=0}^{\infty})$. Тогда $\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : |B - x_N| < \varepsilon$, тогда $\forall n > N \quad |B - x_n| < \varepsilon$, что означает, что $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ сходится и сходится к B . По утверждению 6 $A \geq B$. □

Определение 11. Сумма ряда $\{a_k\}_{k=0}^{\infty}$ есть значение $\sum_{k=0}^{\infty} a_k := \lim \left\{ \sum_{i=0}^k a_i \right\}_{k=0}^{\infty}$. Частичной же суммой s_k этого ряда называется просто $\sum_{i=0}^k a_i$.

Определение 12. Ряд $\sum_{i=0}^{\infty} a_i$ *сильно сходится*, если $\sum_{i=0}^{\infty} |a_i|$ сходится.

Теорема 10. Если ряд *сильно сходится*, то он *сходится*.

Доказательство.

Лемма 10.1. Пусть ряд $\sum_{i=0}^{\infty} a_i$ сходится, тогда сходится любой его “хвост” (суффикс), и для любого $\varepsilon > 0$ есть такой хвост, сумма которого меньше ε .

Доказательство. Пусть $A = \sum_{i=0}^{\infty} a_i$. Это значит, что для каждого $\varepsilon > 0$ существует $N \in \mathbb{N}$, что для всех $n \geq N$ верно, что $\sum_{i=0}^n |a_i| \in U_{\varepsilon}(A)$. Тогда заметим, что

$$\sum_{i=N+1}^{\infty} |a_i| = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=N+1}^n |a_i| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=0}^n |a_i| - \sum_{i=0}^N |a_i| \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n |a_i| - \sum_{i=0}^N |a_i| = A - \sum_{i=0}^N |a_i| \in U_{\varepsilon}(0)$$

Это и означает, что любой хвост сходится. И так мы для каждого ε нашли такой хвост, что его сумма меньше ε . \square

Пусть дан сильно сходящийся ряд $\sum_{i=0}^{\infty} a_i$. Пусть $\varepsilon_n := \sum_{i=n}^{\infty} |a_i|$. Несложно видеть, что $\{\varepsilon_n\}_{n=0}^{\infty}$ монотонно уменьшается, сходясь к 0 (последнее следует из леммы 10.1). Также несложно видеть по рассуждениям леммы 10.1, что $\varepsilon_n - \varepsilon_{n+1} = |a_n|$. Тогда определим

$$S_n := \overline{U}_{\varepsilon_{n+1}} \left(\sum_{i=0}^n a_i \right),$$

где $\overline{U}_{\varepsilon}(x)$ — закрытая ε -окрестность точки x . Тогда несложно видеть, что

$$\left| \sum_{i=0}^{n+m} a_i - \sum_{i=0}^n a_i \right| = \left| \sum_{i=n+1}^{n+m} a_i \right| \leq \sum_{i=n+1}^{n+m} |a_i| \leq \varepsilon_{n+1}$$

Тем самым сумма любого префикса длины хотя бы $n+1$ лежит в $\overline{U}_{\varepsilon_{n+1}}(\sum_{i=0}^n a_i) = S_n$. Также несложно видеть, что $S_{n+1} \subseteq S_n$. А также понятно, что S_i замкнуто и ограничено (“компактно”).

Пусть $A := \bigcap_{i=0}^{\infty} S_i$ (поскольку диаметры шаров сходятся к нулю, то в пересечении лежит не более одной точки). Тогда мы видим, что $|\sum_{i=0}^n a_i - A| \leq \varepsilon_{n+1} \rightarrow 0$, поэтому $\sum_{i=0}^n a_i$ сходится и сходится к A . \square

Следствие 10.1. Если $\{b_i\}_{i=0}^{\infty} \succcurlyeq \{|a_i|\}_{i=0}^{\infty}$ и $\sum_{i=0}^{\infty} |b_i|$ существует, то и $\sum_{i=0}^{\infty} a_i$ существует.

Теорема 11 (признак Лейбница). Пусть дана последовательность $\{a_n\}$, монотонно сверху сходящаяся к 0. Тогда ряд $\sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i a_i$ сходится.

Доказательство. Рассмотрим последовательности

$$\{P_n\}_{n=0}^{\infty} := \{S_{2n}\}_{n=0}^{\infty} = \left\{ \sum_{i=0}^{2n} (-1)^i a_i \right\}_{n=0}^{\infty} \quad \{Q_n\}_{n=0}^{\infty} := \{S_{2n+1}\}_{n=0}^{\infty} = \left\{ \sum_{i=0}^{2n+1} (-1)^i a_i \right\}_{n=0}^{\infty}$$

Несложно видеть, что

$$\begin{aligned} P_{n+1} - P_n &= -a_{2n+1} + a_{2n+2} \leq 0 & Q_{n+1} - Q_n &= a_{2n+2} - a_{2n+3} \geq 0 \\ Q_n - P_n &= -a_{2n+1} \leq 0 & P_{n+1} - Q_n &= a_{2n+2} \geq 0 \end{aligned}$$

Тогда имеем, что $\{P_n\}_{n=0}^{\infty}$ монотонно убывает, $\{Q_n\}_{n=0}^{\infty}$ монотонно возрастает, а также

$$\{P_n\}_{n=0}^{\infty} \geq \{Q_n\}_{n=0}^{\infty}.$$

Тогда последовательности $\{P_n\}_{n=0}^{\infty}$ и $\{Q_n\}_{n=0}^{\infty}$ сходятся и сходятся к P и Q соответственно. При этом последовательность

$$\{P_n\}_{n=0}^{\infty} - \{Q_n\}_{n=0}^{\infty} = \{P_n - Q_n\}_{n=0}^{\infty} = a_{2n+1}$$

тоже сходится по условию и сходится к 0. Поэтому

$$P - Q = \lim \{P_n\}_{n=0}^{\infty} - \lim \{Q_n\}_{n=0}^{\infty} = 0$$

значит $P = Q$. Значит и последовательность префиксных сумм тоже сходится к $P = Q$. \square

Лемма 12 (преобразование Абеля).

$$\sum_{k=0}^n a_k b_k = \sum_{k=0}^{n-1} (a_k - a_{k+1}) B_k + a_n B_n$$

где $B_n := \sum_{i=0}^n b_i$.

Теорема 13 (признак Дирихле). Если даны $\{a_i\}_{i=0}^{\infty}$ и $\{b_i\}_{i=0}^{\infty}$, что $\{a_i\}_{i=0}^{\infty} \searrow 0$, а $\{B_n\}_{n=0}^{\infty} = \{\sum_{i=0}^n b_i\}_{i=0}^{\infty}$ ограничена, то ряд $\sum_{i=0}^{\infty} a_i b_i$ сходится.

Доказательство.

$$S_n = \sum_{i=0}^n a_i b_i = \sum_{i=0}^n (a_i - a_{i+1}) B_i + a_n B_n$$

Пусть $|B_n| < C$ для всех n . Несложно видеть, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n B_n| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} a_n C = C \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0,$$

поэтому $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n B_n = 0$. Также

$$|(a_k - a_{k+1}) B_k| < C |a_k - a_{k+1}| = C(a_k - a_{k+1}),$$

поэтому

$$|S_n - a_n B_n| \leq \sum_{k=0}^{n-1} |(a_k - a_{k+1}) B_k| < C \sum_{k=0}^{n-1} (a_k - a_{k+1}) = C(a_0 - a_n),$$

что тоже сходится. Поэтому $\{S_n\}_{n=0}^{\infty}$ сходится, т.е. и ряд сходится. \square

2.2 Топология

Определение 13. ε -окрестность точки x (для $\varepsilon > 0$) — $(x - \varepsilon; x + \varepsilon)$. Обозначение: $U_\varepsilon(x)$.

Проколота ε -окрестность точки x — $(x - \varepsilon; x) \cup (x; x + \varepsilon)$. Обозначение: $V_\varepsilon(x)$.

Определение 14. Пусть дано некоторое множество $X \subseteq \mathbb{R}$. Тогда точка $x \in X$ называется *внутренней точкой* множества X , если она содержится в X вместе со своей окрестностью.

Само множество X называется *открытым*, если все его точки внутренние.

Пример 1. Следующие множества открыты:

- $(a; b)$;
- $(a; +\infty)$;
- \mathbb{R} ;
- \emptyset ;
- $\bigcup_{i=0}^{\infty} (a_i; b_i)$ (интервалы не обязательно не должны пересекаться).

Определение 15. Пусть дано множество $X \subseteq \mathbb{R}$. Точка $x \in \mathbb{R}$ называется *предельной точкой* множества, если в любой проколота окрестности x будет какая-либо точка X .

Множество предельных точек X называется *производным множеством* множества X и обозначается как X' .

Множество X называется *замкнутым*, если $X \supseteq X'$.

Определение 16. Пусть дано множество $X \subseteq \mathbb{R}$. Если у любой последовательности его точек есть предельная точка из самого множества X , то X называется *компактным*.

Теорема 14. Подмножество \mathbb{R} компактно тогда и только тогда, когда замкнуто и ограничено.

Доказательство.

1. Пусть $X \subseteq \mathbb{R}$ компактно. Если X неограниченно, то несложно построить последовательность элементов X , которая монотонно возрастает или убывает, а разность между членами не меньше любой фиксированной константы (например, не меньше 1); такая последовательность не имеет предельных точек, что противоречит определению X , а значит X ограничено. Если X не замкнуто, то можно рассмотреть предельную точку x , не лежащую в X , и построить последовательность, сходящуюся к ней, а значит никаких других точек у последовательности быть не может, а значит опять получаем противоречие с определением X ; значит X ещё и замкнуто.
2. Пусть X замкнуто и ограничено. Пусть также дана некоторая последовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ элементов X . Поскольку X ограничено, то значит лежит внутри некоторого отрезка I_0 . Определим последовательность $\{I_n\}_{n=0}^{\infty}$ рекуррентно следующим образом. Пусть I_n определено; разделим I_n на две половины и определим I_{n+1} как любую из половин, в которой находится бесконечное количество членов последовательности $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$. После этого определим последовательность $\{y_n\}_{n=0}^{\infty}$ как подпоследовательность $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$, что $y_n \in I_n$ для любого $n \in \mathbb{N}$ (это можно сделать рекуррентно: если определён член y_n , то найдётся ещё бесконечное количество членов начальной последовательности в I_{n+1} , которые идут после y_n , так как отброшено конечное количество, а значит можно взять любой). Несложно видеть, что $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} I_n =: y$. Из-за замкнутости $y \in X$, а значит y — предельная точка $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ — лежит в X и доказывает компактность X .

□

Лемма 15. Пусть Σ — семейство интервалов длины больше некоторого $d > 0$, покрывающее отрезок $[a; b]$. Тогда у Σ есть конечное подсемейство Σ' , покрывающее $[a; b]$.

Доказательство. Давайте вести индукцию по $\lceil (b - a)/d \rceil$.

База. $\lceil (b - a)/d \rceil = 0$. В таком случае $a = b$, а значит, можно взять любой интервал, покрывающий единственную точку и получить всё искомое семейство Σ' .

Шаг. Рассмотрим $\Omega := \{I \in \Sigma \mid a \in I\}$. Заметим, что если у правых концов интервалов из Ω нет верхних граней (т.е. их множество не ограничено сверху), то значит найдётся интервал, покрывающий и a , и b , а значит его как единственный элемент семейства Σ' будет достаточно. Иначе определим a' как супремум правых концов интервалов из Ω .

Тогда мы имеем, что есть интервалы из Ω , подбирающиеся сколь угодно близко к a' , а также что все интервалы из Σ , покрывающие a' не покрывают a . Если $a' > b$, то можно опять же взять интервал, который покроет весь $[a; b]$, и остановится. Иначе рассмотрим любой интервал I , покрывающий a' и любой интервал J из Ω , перекрывающийся с I . Пусть a'' — правый конец J .

Заметим, что I и J покрывают $[a; a'']$. При этом $a < J < a''$, значит $a'' - a \geq \text{osc}(J) > d$. Если $a'' > b$, то $\Sigma = \{I, J\}$ будет достаточно. Иначе заметим, что

$$\left\lceil \frac{b - a''}{d} \right\rceil = \left\lceil \frac{b - a}{d} - \frac{a'' - a}{d} \right\rceil \leq \left\lceil \frac{b - a}{d} - 1 \right\rceil = \left\lceil \frac{b - a}{d} \right\rceil - 1 < \left\lceil \frac{b - a}{d} \right\rceil$$

Тогда по предположению индукции есть конечное подпокрытие Σ'' покрытия Σ отрезка $[a''; b]$. Значит $\Sigma' := \Sigma'' \cup \{I, J\}$ является конечным подпокрытием покрытия Σ множества $[a; b]$. □

Лемма 16. Пусть Σ — семейство интервалов длины больше некоторого $d > 0$. Тогда найдётся не более чем счётное подсемейство Σ' , имеющее такое же объединение, т.е. $|\Sigma'| \leq |\mathbb{N}|$, а $\bigcup \Sigma = \bigcup \Sigma'$.

Доказательство. Несложно видеть, что $A := \bigcup \Sigma$ представляется в виде дизъюнктного объединения интервалов. Каждый из них можно представить как объединение не более чем счётного отрезков. Итого мы получим не более чем счётное семейство Ω отрезков, что $\bigcup \Omega = A$. Для каждого отрезка из Ω построим по лемме 15 конечное подпокрытие покрытия Σ , а затем объединив их, получим не более чем счётное семейство Σ' , покрывающее любой из них, а значит и $\bigcup \Omega = A = \bigcup \Sigma$. С другой стороны Σ' — подмножество Σ , значит и $\bigcup \Sigma' \subseteq \bigcup \Sigma$.

В итоге $\bigcup \Sigma' = \bigcup \Sigma$, и при этом Σ' — не более чем счётное подмножество Σ . \square

Лемма 17. Пусть дано семейство Σ интервалов. Тогда из него можно выделить не более чем счётное подсемейство Σ' с тем же объединением, т.е. $|\Sigma'| \leq |\mathbb{N}|$, а $\bigcup \Sigma = \bigcup \Sigma'$.

Доказательство. Рассмотрим для каждого $n \in \mathbb{Z}$ семейство

$$\Sigma_n = \{I \in \Sigma \mid \text{osc}(I) \in [2^n; 2^{n+1})\}$$

Применим лемму к Σ_n и получим Σ'_n . Тогда $\Sigma' := \bigcup_{n \in \mathbb{Z}} \Sigma'_n$ является подмножеством Σ , даёт в объединении то же, что и Σ , и при этом имеет мощность не более $|\mathbb{N} \times \mathbb{N}| = |\mathbb{N}|$. \square

Теорема 18. Подмножество \mathbb{R} компактно тогда и только тогда, когда из любого его покрытия интервалами можно выделить конечное подпокрытие.

Доказательство.

1. Пусть X компактно, а Σ — некоторое его покрытие интервалами. Определим для каждого $d > 0$

$$\Sigma_d := \{I \in \Sigma \mid \text{osc}(I) > d\}$$

Если никакое из Σ_d не является подпокрытием множества X , то рассмотрим последовательность $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, где x_n — любой элемент $X \setminus \Sigma_{1/2^n}$. У $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ есть предельная точка $x \in X$. Значит должен быть интервал, покрывающий x , но тогда он же покрывает весь некоторый хвост нашей последовательности, а сам лежит в некотором $\Sigma_{1/2^n}$ — противоречие. Значит некоторое Σ_d является подпокрытием, а значит далее можно рассматривать его в качестве Σ .

$\bigcup \Sigma$ — открытое множество, поэтому является дизъюнктным объединением семейства Ω интервалов. Поскольку в Σ длины всех интервалов больше d , то в Ω тоже. Но также X ограничено, поэтому Ω конечно, да и все интервалы в нём ограничены. Заметим, что $X \cap I$, где I — любой интервал из Ω , является замкнутым множеством, поэтому его можно накрыть некоторым отрезком $S \subseteq I$ (для этого можно взять отрезок $[\inf(X \cap I); \sup(X \cap I)]$). Значит из накрытия Σ выделить $|\Omega|$ конечных подпокрытий для каждого отрезка (по лемме 16), а их объединение даст конечное покрытие X .

2. Пусть X таково, что из любого покрытия можно выбрать конечное подпокрытие.

Если X неограничено, то тогда несложно будет видеть, что покрытие $\{(n; n+2) \mid n \in \mathbb{Z}\}$ нельзя уменьшить до конечного. Значит X конечно.

Если X не замкнуто, то значит есть точка $x \notin X$, что в любой окрестности x будет точка. Тогда рассмотрим покрытие $\{(x+2^n; x^{n+2}) \mid n \in \mathbb{Z}\} \cup \{(x-2^{n+2}; x^n) \mid n \in \mathbb{Z}\}$. Несложно видеть, что если взять любое конечное подсемейство интервалов, то оно не накроет некоторую окрестность x , а значит и X . Значит X замкнуто.

Итого получаем, что X компактно. \square

2.3 Пределы функций, непрерывность

Определение 17 (по Коши). *Предел функции $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ в точке x — такое значение y , что*

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : f(V_\delta(x) \cap X) = U_\varepsilon(y)$$

Обозначение: $\lim_{t \rightarrow x} f(t) = y$.

Определение 18 (по Гейне). *Предел функции $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ в точке x — такое значение y , что для любой последовательности $\{x_n\}_{n=0}^\infty$ элементов $X \setminus \{x\}$ последовательность $\{f(x_n)\}_{n=0}^\infty$ сходится к y .* Обозначение: $\lim_{t \rightarrow x} f(t) = y$.

Теорема 19. *Определения пределов по Коши и по Гейне равносильны.*

Доказательство. Будем доказывать равносильность отрицаний утверждений, ставимых в определениях.

1. Пусть функция $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ не сходится по Коши в x к значению y . Значит есть такое $\varepsilon > 0$, что в любой проколотой окрестности x (в множестве X) есть точка, значение f в которой не лежит в ε -окрестности. Рассмотрим любую такую проколотую окрестность $I_0 = V_{\delta_0}(x)$, берём в ней любую такую точку x_0 . Далее рассмотрим $I_1 = V_{\delta_1}(x)$, где $\delta_1 = \min(\delta_0/2, |x - x_0|)$, берём там любую точку x_1 , где значение f вылетает вне ε -окрестности y . Так далее строим последовательность $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, сходящуюся к x , значения f в которой не лежат в ε -окрестности y , что означает, что $\{f(x_n)\}_{n=0}^\infty$ не сходится к y , что означает, что f не сходится по Гейне в x к значению y .
2. Пусть функция $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ не сходится по Гейне в x к значению y . Значит есть последовательность $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, сходящаяся к x , что последовательность её значений не сходится к y . Значит есть $\varepsilon > 0$, что после любого момента в последовательности будет член, значение в котором вылезает вне ε -окрестности y . Поскольку для любой проколотой окрестности x есть момент, начиная с которого вся последовательность лежит в этой окрестности, то в любой проколотой окрестности x есть член, значение которого вылезает вне ε -окрестности y , что означает, что f не сходится по Коши в x к y .

□

Утверждение 20. *Функция $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ имеет в x предел тогда и только тогда, когда*

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x_1, x_2 \in V_\delta(x) \quad |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$$

Доказательство. Такое же как для последовательностей: см. теорему 4.

□

Утверждение 21. *Для функций $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ и $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ верно, что*

1. $\lim_{x \rightarrow a} f(x) + \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \lim_{x \rightarrow a} (f + g)(x)$
2. $\lim_{x \rightarrow a} (-f)(x) = -\lim_{x \rightarrow a} f(x)$
3. $\lim_{x \rightarrow a} f(x) \cdot \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \lim_{x \rightarrow a} (f \cdot g)(x)$
4. $\frac{1}{\lim_{x \rightarrow a} f(x)} = \lim_{x \rightarrow a} (\frac{1}{f})(x)$ (если $\lim_{x \rightarrow a} f(x) \neq 0$)
5. $\lim_{y \rightarrow \lim_{x \rightarrow a} g(x)} f(y) = \lim_{x \rightarrow a} (f \circ g)(x)$

и всегда, когда определена левая сторона определена, правая тоже определена.

Замечание 3. Утверждения 6, 7 и 8 верны, если заменить последовательности на функции, пределы последовательностей на пределы функций в некоторой точке x , а асимптотические неравенства на неравенства на окрестности x .

Определение 19. Верхним пределом функции f в точке x_0 называется

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) = \inf_{\delta > 0} \left(\sup_{V_\delta(x_0)} f \right)$$

Нижним пределом функции f в точке x_0 называется

$$\underline{\lim}_{x \rightarrow x_0} f(x) = \sup_{\delta > 0} \left(\inf_{V_\delta(x_0)} f \right)$$

Утверждение 22. Функция $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ имеет в x предел тогда и только тогда, когда $\overline{\lim}_{t \rightarrow x} f(t) = \underline{\lim}_{t \rightarrow x} f(t)$.

Определение 20. Функция $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ называется непрерывной в точке x , если $\lim_{t \rightarrow x} f(t) = f(x)$. В изолированных точках f всегда непрерывна.

Определение 21. Функция $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ называется непрерывной на множестве $Y \subseteq X$, если она непрерывна во всех точках Y .

Утверждение 23. Для непрерывных на X функций f и g верно, что

- $f + g$ непрерывна на X ;
- fg непрерывна на X ;
- $\frac{1}{f}$ непрерывна на X (если $f \neq 0$).

Утверждение 24. Для f , непрерывной в x_0 , и g , непрерывной в $f(x_0)$, $g \circ f$ непрерывна в x_0 .

Теорема 25 (Вейерштрасса). Непрерывная функция на компакте ограничена на нём и принимает на нём свои минимум и максимум.

Доказательство. Докажем утверждение для ограниченности сверху и максимума; для ограниченности снизу и минимума рассуждения аналогичны.

Пусть множество неограниченно сверху. Тогда есть $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, что $\{f(x_n)\}_{n=0}^\infty \rightarrow +\infty$. Тогда рассмотрим подпоследовательность $\{y_n\}_{n=0}^\infty$ последовательности $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, сходящуюся к y . Тогда

$$f(y) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(y_n) = +\infty$$

— противоречие.

Тогда существует последовательность $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, что $\{f(x_n)\}_{n=0}^\infty$ сходится к супремуму S функции. Рассмотрим подпоследовательность $\{y_n\}_{n=0}^\infty$ последовательности $\{x_n\}_{n=0}^\infty$, сходящуюся к y . Тогда

$$f(y) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(y_n) = S$$

□

Следствие 25.1. Так как отрезок компактен, то любая непрерывная на нём функция ограничена и принимает на нём свои максимум и минимум.

Теорема 26 (о промежуточном значении). Пусть f непрерывна на $[a; b]$, а $f(a) < f(b)$. Тогда $\forall y \in [f(a); f(b)]$ найдётся $c \in [a; b]$, что $f(c) = y$.

Доказательство. Рассмотрим последовательность $\{(a_n; b_n)\}_{n=0}^{\infty}$, что $(a; b) = (a_0; b_0)$, а следующие пары определяются так: если $f(\frac{a_n+b_n}{2}) < y$, то $(a_{n+1}; b_{n+1}) = (\frac{a_n+b_n}{2}; b_n)$, иначе $(a_{n+1}; b_{n+1}) = (a_n; \frac{a_n+b_n}{2})$. Тогда $c = \lim\{a_n\}_{n=0}^{\infty} = \lim\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$. Тогда

$$f(c) = \lim\{f(a_n)\}_{n=0}^{\infty} = \lim\{f(b_n)\}_{n=0}^{\infty},$$

откуда получаем, что $f(c) \geq y$ и $f(c) \leq y$, т.е. $f(c) = y$. □

Определение 22. Функция f равномерно непрерывна на X , если

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x \in X \quad f(U_\delta(x)) \subseteq U_\varepsilon(f(x))$$

Теорема 27 (Кантор). Непрерывная на компакте функция равномерно непрерывна.

Доказательство. Предположим противное. Тогда

$$\exists \varepsilon > 0 : \forall \delta > 0 \exists x, y : |x - y| < \delta \wedge |f(x) - f(y)| > \varepsilon$$

Тогда рассмотрим последовательность пар x и y построенных так для δ , сходящихся к 0. Из неё выделим подпоследовательность, что x сходится к некоторому a . Тогда y сойдутся к нему же. Тогда в любой окрестности a будет пара точек $(x'; y')$, что $|f(x') - f(y')| > \varepsilon$, значит будет в любой окрестности x будет точка, выбивающаяся из $\varepsilon/2$ -окрестности — противоречие с непрерывностью. □

Определение 23. Пусть есть функции f и g , что $|f| \leq C|g|$ в окрестности x для некоторого $C \in \mathbb{R}$, тогда пишут, что $f = O(g)$ (при $t \rightarrow x$).

Если же $\forall \varepsilon > 0$ будет такая окрестность x_0 , что $|f| \leq \varepsilon|g|$ в этой окрестности, тогда пишут, что $f = o(g)$ (при $t \rightarrow x$).

2.4 Гладкость (дифференцируемость)

Определение 24. Функция f называется *гладкой (дифференцируемой)* в x , если $f(x + \delta) = f(x) + A\delta + o(\delta)$ для некоторого $A \in \mathbb{R}$. В таком случае A называется *дифференциалом (производной)* f в точке x .

Обозначение: $f'(x) = A$.

Определение 25. Функция f называется *гладкой (дифференцируемой)* в x , если предел

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{f(x + \delta) - f(x)}{\delta}$$

определён. В таком случае его значение называется *дифференциалом (производной)* f в точке x .

Утверждение 28. Определения 24 и 25 равносильны.

Утверждение 29. Непрерывная в некоторой точке функция там же непрерывна.

Определение 26. Функция, значения которой равны производным функции f в тех же точках называется *производной функцией* (или просто *производной*) функции f . Обозначение: f' .

Лемма 30. Для дифференцируемых в x функций f и g

1. $(f \pm g)'(x) = f'(x) \pm g'(x)$;
2. $(f \cdot g)'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$ (правило Лейбница);
3. $(\frac{1}{f})'(x) = \frac{-f'(x)}{f(x)^2}$;
4. $(f \circ g)'(x) = f'(g(x)) \cdot g'(x)$.

Лемма 31. Пусть дана $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ — непрерывная монотонно возрастающая (убывающая) функция. Тогда существует $g : [f(a); f(b)] \rightarrow \mathbb{R}$ — непрерывная монотонно возрастающая (убывающая) функция, что $g \circ f = Id$.

Доказательство. Заметим, что f — монотонно возрастающая (убывающая) биекция из $[a; b]$ в $[f(a); f(b)]$. Тогда существует монотонно возрастающая (убывающая) биекция $g : [f(a); f(b)] \rightarrow [a; b]$, что $g \circ f = id$. Осталось показать, что g непрерывна.

Предположим противное, тогда в любой окрестности некоторой точки $f(x)$ из $[f(a); f(b)]$ есть точки вылетающие вне ε -окрестности. Значит все точки из либо $(x - \varepsilon; x)$, либо $(x; x + \varepsilon)$ не принимаются, значит g не биекция — противоречие. Значит g непрерывна. \square

Лемма 32.

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

Доказательство. Пусть $g := f^{-1}$. Тогда

$$1 = Id' = (f \circ g)' = f' \circ g \cdot g'$$

Откуда следует, что

$$(f^{-1})' = g' = \frac{1}{f' \circ g} = \frac{1}{f' \circ f^{-1}}$$

\square

Определение 27. Функция f возрастает в точке y , если есть $\varepsilon > 0$, что $f(x) \leq f(y)$ для любого $x \in (y - \varepsilon; y)$ и $f(x) \geq f(y)$ для любого $x \in (y; y + \varepsilon)$.

Аналогично определяется убываемость функции в точке.

Лемма 33. Если f возрастает в любой точке на $[a; b]$, то $f(a) \leq f(b)$.

Доказательство.

1. Можно рассмотреть для каждой точки $[a; b]$ окрестность, для которой верна её возрастательность, и из покрытия, ими образуемого, выделить конечное. А тогда перебираясь между общими точками окрестностей, получим искомое.
2. Также можно предположить противное, рассмотреть последовательность вложенных отрезков, у которых левый конец выше правого, и тогда для точки пересечения отрезков будет противоречие.

\square

Следствие 33.1. f возрастает на всём отрезке.

Теорема 34. Если f гладка, а f' положительна на $[a; b]$, то f строго возрастает на $[a; b]$.

Доказательство. Несложно видеть, что в любой точке на $[a; b]$ у функции есть окрестность, где она строго возрастает, так как если $t \in [a; b]$, а $f'(t) = \lambda > 0$, то в некоторой окрестности

$$\frac{f(x) - f(t)}{x - t} \in (0; 2\lambda) \quad \implies \quad f(x) \in (f(t); f(t) + 2\lambda(x - t))$$

что значит, что эта окрестность — подтверждение для возрастания f в t . Тогда по предыдущему следствию f возрастает на $[a; b]$. Если вдруг функция возрастает не строго, то тогда найдётся подотрезок на $[a; b]$, на котором функция константа, а значит на интервале с теми же концами производная тождественно равна нулю. \square

Теорема 35. Если f возрастает, то f' в своей области определения неотрицательно.

Доказательство. Если функция в точке t равна $\lambda < 0$, то в некоторой окрестности t

$$\frac{f(x) - f(t)}{x - t} \in \left(\frac{3}{2}\lambda; \frac{1}{2}\lambda\right) \quad \implies \quad f(x) \in \left(f(t) + \frac{3}{2}\lambda(x - t); f(t) + \frac{1}{2}\lambda(x - t)\right)$$

что значит, что f в точке t "строго" убывает — противоречие. Значит $f'(t) \geq 0$. \square

Определение 28. f имеет локальный максимум в x , если для некоторого $\varepsilon > 0$ верно, что $f(x) \geq f(y)$ для любого $y \in (x - \varepsilon; x + \varepsilon)$.

Аналогично определяется точка локального минимума.

Теорема 36. В точках локальных максимумов и минимумов функции f функция f' принимает нули (если определена).

Доказательство. Слева от точки максимума функция возрастает в данной точке, значит производная в данной точке ≥ 0 , а справа — убывает, значит производная ≤ 0 , значит производная равна 0. Аналогично для точки минимума. \square

Теорема 37 (Ролль). Если f — гладкая функция на $[a; b]$, и $f(a) = f(b)$, то существует $c \in (a; b)$, что $f'(c) = 0$.

Доказательство. В точке максимума или минимума f на $[a; b]$ достигается ноль производной. Если они обе совпадают с концами отрезка, то значит функция константа, а тогда в любой точке отрезка производная равна нулю. \square

Теорема 38. Если f и g непрерывные на $[a; b]$ и гладкие на $(a; b)$ функции, а $g' \neq 0$, то существует $c \in (a; b)$, что

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

Доказательство. Пусть

$$\lambda := \frac{f(a) - f(b)}{g(a) - g(b)}$$

а $\tau(x) := f(x) - \lambda g(x)$. В таком случае

$$\frac{\tau(a) - \tau(b)}{g(a) - g(b)} = \frac{(f(a) - f(b) - \lambda(g(a) - g(b)))}{g(a) - g(b)} = \lambda - \lambda = 0$$

значит $\tau(a) = \tau(b)$, значит есть $c \in [a; b]$, что $\tau(c) = 0$. Тогда

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

\square

Теорема 39 (Лагранж). Если f непрерывна на $[a; b]$ и гладка на $(a; b)$, то существует $c \in (a; b)$, что

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

Доказательство. Очевидно следует из предыдущей теоремы с помощью подстановки $g(x) = x$. \square

Теорема 40. Пусть f — гладкая на $(a; b)$ функция.

1. Если $f' \geq 0$, то f возрастающая функция.
2. Если $f' > 0$, то f строго возрастающая функция.
3. Если f возрастающая функция, то $f' > 0$.

Теорема 41. Пусть f — гладкая на $[a; b]$ функция. Если $f'(x) = 0$ для всех $x \in [a; b]$, то $f \equiv \text{const}$ на том же отрезке.

Замечание 4. Функция $f(x) := x^2 \sin(1/x)$ (доопределённая в нуле) имеет производную $f'(x) = 2x \sin(1/x) - \cos(1/x)$ в случае ненулевых x и производную $f'(0) = 0$. При этом легко видно, что f' не является непрерывной функцией (она имеет разрыв в том же нуле).

Теорема 42. Если f гладка на $(a; b)$, а f' не равна нулю, то f' либо положительна, либо отрицательна.

Доказательство. f не принимает никакого значения на $(a; b)$ дважды (т.к. иначе у производной был бы корень), значит она либо строго возрастает, либо строго убывает, а значит f' либо неотрицательна, либо неположительна соответственно. Но ноль принимать не может, поэтому последнее утверждение равносильно тому, что f либо строго положительна, либо строго отрицательна. \square

Теорема 43. Пусть f гладка на $(a; b)$ и для некоторых $u, v \in (a; b)$ верно, что $f'(u) < \alpha < f'(v)$. Тогда существует $c \in (u; v)$, что $f'(c) = \alpha$.

Доказательство. Пусть $g(x) := f(x) - \alpha x$. Тогда $g'(u) < 0 < g'(v)$, значит g не может строго возрастать или убывать на $(u; v)$, значит $\exists c \in (u; v)$, что $g'(c) = 0$, а значит $f'(c) = \alpha$. \square

Замечание 5. Данная теорема по сути является теоремой о промежуточном значении для производной.

Теорема 44. Пусть f непрерывна на $[a; b]$ и гладка на $(a; b)$. Пусть также $\lim_{x \rightarrow a^+} f'(x)$ существует и равен d . Тогда $f'(a)$ тоже существует и равна d .

Доказательство. Есть несколько способов:

1. Несложно видеть, что для любого $\varepsilon > 0$ есть некоторая правая окрестность a , в которой функция f' лежит в ε -окрестности d . Тогда $f(x) - (d - \varepsilon)x$ убывает в данной окрестности, а $f(x) - (d + \varepsilon)x$ возрастает, значит $f(x) - f(a) \in ((d + \varepsilon)(x - a); (d - \varepsilon)(x - a))$. В таком случае $f'(a)$ определена и равна d .
2. По теореме Лагранжа для любого $x \in [a; b]$ найдётся $\xi \in (a; x)$, что

$$\frac{f(x) - f(a)}{x - a} = f'(\xi)$$

Значит

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} = \lim_{x \rightarrow a^+} f'(\xi) = d$$

что буквально значит, что $f'(a) = d$.

□

Теорема 45 (правило Лопиталя). Пусть $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow a^+} g(x) = 0$. Пусть также f и g гладки и $g' \neq 0$ на $(a; b)$. Тогда

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

если второй предел определён.

Доказательство. Пусть дано $\varepsilon > 0$, а

$$d := \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

. Тогда есть $\delta > 0$, что для любого $t \in (a; a + \delta)$ значение $f'(t)/g'(t)$ лежит в $U_\varepsilon(d)$. Легко видеть, что для любых $x, y \in (a; a + \delta)$ существует $\xi \in (x; y) \subseteq (a; a + \delta)$, что

$$\frac{f(x) - f(y)}{g(x) - g(y)} = f'(\xi) \in U_\varepsilon(d)$$

Устремляя x к a , получаем, что $f(y)/g(y)$ тоже лежит в $U_\varepsilon(d)$. Тогда по определению предела

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = d = \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

□

Определение 29. f'' — вторая производная f , т.е. $(f')'$, а $f^{(n)}$ — n -ая производная f , т.е. $f^{(n)} := (f^{(n-1)})'$, $f^{(0)} := f$.

Определение 30. $P(x)$ — полином Тейлора степени n функции f , если $\deg(P) \leq n$, а

$$f(x) - P(x) = o((x - a)^n), \quad x \rightarrow a$$

Теорема 46. Если P_1 и P_2 — полиномы Тейлора степени n функции f , то $P_1 = P_2$.

Теорема 47. Пусть $f : (a; b) \rightarrow \mathbb{R}$, $f^{(1)}, \dots, f^{(n-1)}$ определены на $(t - \delta; t + \delta)$ для некоторого $\delta > 0$ и определена $f^{(n)}(t)$. Тогда

$$f(x) = f(t) + \frac{f^{(1)}(t)}{1!}(x - t) + \dots + \frac{f^{(n)}(t)}{n!}(x - t)^n + o((x - t)^n)$$

Доказательство. Рассмотрим $g(x) := f(x) - f(t)/0! \cdot (x - t)^0 - \dots - f^{(n)}(t)/n! \cdot (x - t)^n$. Тогда задача сведена к следующей лемме.

Лемма 47.1. Если $g^{(1)}, \dots, g^{(n-1)}$ определены на $(t - \delta; t + \delta)$ для некоторого $\delta > 0$ и

$$g(t) = g^{(1)}(t) = \dots = g^{(n)}(t) = 0.$$

Тогда $g(x) = o((x - t)^n)$.

Доказательство. Докажем по индукции по n .

База. Пусть $n = 1$. Тогда очевидно, что $f(x) = f(t) + f'(t)(x - t) + o(x - t) = o(x - t)$.

Шаг. По предположению индукции $f'(x) = o((x - t)^n)$. Тогда мы имеем, что

$$f(x) - f(t) = f'(\xi)(x - t)$$

для некоторого $\xi \in (x, t)$. Тогда

$$\frac{f(x) - f(t)}{(x - t)^n} = \frac{f'(\xi)}{(x - t)^{n-1}} = \frac{o((\xi - t)^{n-1})}{(x - t)^{n-1}} = o(1) \frac{(\xi - t)^{n-1}}{(x - t)^{n-1}} = o(1)$$

□

□

Теорема 48. Пусть $f(t) = f^{(1)}(t) = \dots = f^{(n)}(t) = 0$, а $f^{(n+1)} \neq 0$. Если n чётно, то t — не экстремальная точка функции f , иначе t — экстремальная точка функции f .

Теорема 49. Пусть $f : (a; b) \rightarrow \mathbb{R}$, $f^{(1)}, \dots, f^{(n+1)}$ определены на $(t - \delta; t + \delta)$ для некоторого $\delta > 0$. Тогда существует $\xi \in (x; t)$, что

$$f(x) = f(t) + \frac{f^{(1)}(t)}{1!}(x - t) + \dots + \frac{f^{(n)}(t)}{n!}(x - t)^n + \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x - t)^{n+1}$$

Доказательство. Точно так же сведём f к g , что $g(t) = \dots g^{(n)}(t) = 0$. Тогда требуется показать, что $g(x) = g^{(n+1)}(\xi)/(n+1)! \cdot (x - t)^{n+1}$ для некоторого $\xi \in (x, t)$. Докажем это по индукции.

База. $n = 0$. Теорема Лагранжа.

Шаг.

$$\frac{f(x)}{(x - t)^{n+1}} = \frac{f(x) - f(t)}{(x - t)^{n+1} - (t - t)^{n+1}} = \frac{f'(\xi)}{(n+1)(\xi - t)^n} = \frac{f^{(n+1)}(\eta)}{(n+1)!}$$

где $\xi \in (x, t)$ (существует по теореме Лагранжа), а $\eta \in (\xi, t) \subseteq (x, t)$ (существует по предположению индукции для f' и ξ). Отсюда следует искомое утверждение. □

2.5 Стандартные функции, ряды Тейлора и их сходимость

Тут нужно рассказать про функции \exp , \sin , \cos и $(1+x)^\alpha$ и их ряды

Определение 31. f является (поточечным) пределом $\{f_n\}_{n=0}^\infty$ на E , если $\lim\{f_n(x)\}_{n=0}^\infty = f(x)$ для любого $x \in E$.

Определение 32. f является равномерным пределом $\{f_n\}_{n=0}^\infty$ на E , если для любого $\varepsilon > 0$ найдётся $N \in \mathbb{N}$, что $|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$ для всех $n > N$ и $x \in E$.

Теорема 50 (Стокс, Зейдель). Пусть $\{f_n\}_{n=0}^\infty$ — последовательность непрерывных функций, и $f_n \rightarrow f$ равномерно на E . Тогда f непрерывна.

Доказательство. Для любого $\varepsilon > 0$ есть такое $n \in \mathbb{N}$, что $|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon/3$ для всех $x \in E$. Тогда существует $\delta > 0$, что $f_n(U_\delta(t)) \subseteq U_{\varepsilon/3}(f_n(t))$ для данного t . Тогда

$$f(U_\delta(t)) \subseteq U_{\varepsilon/3}(f_n(U_\delta(t))) \subseteq U_{2\varepsilon/3}(f_n(t)) \subseteq U_\varepsilon(f(t)).$$

□

Теорема 51 (Коши). TFAE (the following are equivalent):

1. $f_n \rightarrow f$ равномерно сходится на E .
2. Для любого $\varepsilon > 0$ существует $N \in \mathbb{N}$, что $|f_k(x) - f_l(x)| < \varepsilon$ для любых $k, l > N$ и $x \in E$.

Теорема 52 (Вейерштрасс). Пусть $\{u_n\}_{n=0}^\infty$ — последовательность непрерывных функций, что есть последовательность чисел $\{d_n\}_{n=0}^\infty$, для которой верно, что $|u_n| < d_n$ для всех $n \in \mathbb{N}$, и $\sum_{n=0}^\infty d_n$ сходится. Тогда $\sum_{n=0}^\infty u_n$ равномерно сходится.

Теорема 53. Пусть $f_n \rightarrow f$ на E и $\{f_n\}_{n=0}^\infty$ гладкие. Если $f'_n \rightarrow g$ равномерно, то f тогда тоже гладка и $f' = g$.

Доказательство. Для любого $\varepsilon > 0$ существует $N \in \mathbb{N}$, что $|f'_k - f'_l| < \varepsilon/3$ для всех $k, l > N$. Тогда имеем, что

$$\left| \frac{f_k(x) - f_k(y)}{x - y} - \frac{f_l(x) - f_l(y)}{x - y} \right| = \left| \frac{(f_k - f_l)(x) - (f_k - f_l)(y)}{x - y} \right| = |(f_k - f_l)'(\xi)| < \varepsilon/3$$

Устремляя l к бесконечности получаем, что

$$\left| \frac{f_k(x) - f_k(y)}{x - y} - \frac{f(x) - f(y)}{x - y} \right| \leq \varepsilon/3$$

Также имеем, что есть такое $\delta > 0$, что для всех $y \in U_\delta(x)$

$$\left| \frac{f_k(x) - f_k(y)}{x - y} - f'_k(x) \right| < \varepsilon/3$$

Также есть $M \in \mathbb{N}$, что $|f'_k - g| < \varepsilon/3$ для любого $k > M$. Складывая всё вместе, получаем, что для всех $k > \max(N, M)$ и $y \in U_\delta(x)$

$$\left| \frac{f(x) - f(y)}{x - y} - g(x) \right| < \varepsilon$$

Значит f гладка и $f' = g$. □

Следствие 53.1. Если $\{f^{(0)}\}, \dots, \{f^{(n-1)}\}$ сходятся, а $f^{(n)}$ равномерно сходится. Тогда то же верно и про первые n производных.

Следствие 53.2. Если ряд Тейлора сходится, то функция бесконечно гладкая.

3 Примеры и контрпримеры

Название раздела?

Теорема 54. Существует непрерывная функция f на отрезке $[a; b]$, которая не имеет производной ни в какой точке на отрезке $[a; b]$

Доказательство. Можно привести примеры данной функции f .

1. (функция Вейерштрасса) Определим

$$f_0(x) := \frac{1}{2} - \left| x - [x] - \frac{1}{2} \right| \quad f_n(x) := \frac{f_0(4^n x)}{4^n} \quad f(x) := \sum_{i=0}^{\infty} f_i(x)$$

Поскольку $|f_n| = 1/4^n$, а $\sum_{i=0}^{\infty} 1/4^i$ сходится, то по теореме Вейерштрасса ряд равномерно сходится к f , а поскольку каждая f_n непрерывна, то по теореме Стокса-Зейделя функция f непрерывна. Теперь осталось показать, что у f нет производных.

Пусть a — произвольная точка из \mathbb{R} . Заметим, что для всяких m и n , что $m \geq n$, период f_m равен $1/4^m$, значит $1/4^m \mid 1/4^n$, а тогда $f_m(a \pm 1/4^n) = f_m(a)$. Значит для всякого $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$

$$f(a \pm 1/4^n) - f(a) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(a \pm 1/4^n) - f_i(a)$$

Заметим, что a находится на отрезке монотонности функции f_{n-1} длины $1/(2 \cdot 4^{n-1}) = 2/4^n$, который также является отрезком монотонности каждой функции из f_0, \dots, f_{n-2} . Поскольку $1/4^n$ в два раза меньше, то либо $a + 1/4^n$, либо $a - 1/4^n$ лежит на том же отрезке монотонности; пусть это будет точка b_n . Тогда имеем, что

$$\left| \frac{f_0(b_n) - f_0(a)}{b_n - a} \right| = \left| \frac{f_1(b_n) - f_1(a)}{b_n - a} \right| = \dots = \left| \frac{f_{n-1}(b_n) - f_{n-1}(a)}{b_n - a} \right| = 1$$

Следовательно

$$\frac{f(b_n) - f(a)}{b_n - a} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{f_i(b_n) - f_i(a)}{b_n - a} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f_i(b_n) - f_i(a)}{b_n - a}$$

— целое число, совпадающее по чётности с n . Если $f'(a)$ определено, то $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$ сходится, а значит должен сойтись и

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(b_n) - f(a)}{b_n - a};$$

но это последовательность целых значений, значит с какого-то момента она должна быть тождественно равна 0, но это не так, так как нечётных членов бесконечно много в этой последовательности.

2. (пример Глеба Минаева) Рассмотрим $f_0(x) := x$. Представим её как бесконечную ломанную $\dots \leftrightarrow (-2, -2) \leftrightarrow (-1, -1) \leftrightarrow (0, 0) \leftrightarrow (1, 1) \leftrightarrow (2, 2) \leftrightarrow \dots$. Далее будем получать f_{n+1} из f_n следующим образом.

f_n будет некоторой бесконечной в обе стороны ломанной, при этом всегда $f_n(x) = f_n(x+1)$. Следующая функция будет получаться заменой ребра $(a_1, b_1) \leftrightarrow (a_2, b_2)$ на три ребра:

$$(a_1, b_1) \longleftrightarrow \left(\frac{a_1 + 2a_2}{3}, \frac{2b_1 + b_2}{3} \right) \longleftrightarrow \left(\frac{2a_1 + a_2}{3}, \frac{b_1 + 2b_2}{3} \right) \longleftrightarrow (a_2, b_2)$$

Так мы получим f_{n+1} . Рассматриваемой же функцией будет $f := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$.

Несложно видеть, что звено высоты h каждый раз заменяется на три ребра: два высоты $2h/3$ и одно высоты $h/3$. При этом описанный прямоугольник любого ребра содержит описанные прямоугольники рёбер, на которые он был заменён, а значит, окажется точка на ребре, из его описанного прямоугольника больше не вылезет. Таким образом после функции f_n разброс положений $f_i(x)$ не более $1/3^n$, поэтому поточечный предел определён.

При этом значения в точках $k/3^m$ с некоторого момента неподвижны: после функции f_n значения во всех точках $k/3^n$ не меняются. Таким образом мы имеем, что во всякой окрестности будут точки вида $k/3^n$, $(3k+1)/3^{n+1}$, $(3k+2)/3^{n+1}$ и $(k+1)/3^n$, а они ломают монотонность функции на данном интервале. Таким образом f нигде не монотонна.

Также предположим в точке a есть производная. Рассмотрим для каждого $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ пару (p_n, q_n) , что p_n и q_n — абсциссы концов звена на котором лежит $(a, f_n(a))$ в ломаной функции f_n ($q_n > p_n$). Тогда заметим, что $q_n - p_n = 1/3^n$, $f_n(p_n) = f(p_n)$, $f_n(q_n) = f(q_n)$, а тогда

$$\frac{f_n(q_n) - f_n(p_n)}{q_n - p_n} = \frac{f(q_n) - f(p_n)}{q_n - p_n} = \frac{f(q_n) - f(a)}{q_n - a} \cdot \frac{q_n - a}{q_n - p_n} + \frac{f(a) - f(p_n)}{a - p_n} \cdot \frac{a - p_n}{q_n - p_n}$$

Тем
бо-
лее
кар-
ти-
ноч-
ки!!!

Следовательно значение $\frac{f_n(q_n)-f_n(p_n)}{q_n-p_n}$ лежит на отрезке между $\frac{f(q_n)-f(a)}{q_n-a}$ и $\frac{f(p_n)-f(a)}{p_n-a}$; при этом оно является коэффициентом наклона звена $(p_n, f(p_n)) \leftrightarrow (q_n, f(q_n))$.

Заметим, что звено $(p_n, f(p_n)) \leftrightarrow (q_n, f(q_n))$ будет заменено на три, среди которых будет и $(p_{n+1}, f(p_{n+1})) \leftrightarrow (q_{n+1}, f(q_{n+1}))$. Значит коэффициент наклона $(p_{n+1}, f(p_{n+1})) \leftrightarrow (q_{n+1}, f(q_{n+1}))$ можно получить из коэффициента наклона $(p_n, f(p_n)) \leftrightarrow (q_n, f(q_n))$ домножением либо на 2, либо на -1 .

Таким образом мы имеем, что последовательность

$$\left(\frac{f_n(q_n) - f_n(p_n)}{q_n - p_n} \right)_{n=0}^{\infty}$$

либо расходится по модулю, либо с некоторого момента не меняет модуль, но знакоперебуется. При этом если $f'(a)$ определена, то в некоторой окрестности a значение

$$\frac{f(x) - f(a)}{x - a}$$

несильно отличается от $f'(a)$ (чем меньше окрестность, тем меньше отличается). Но если мы будем рассматривать точки p_n и q_n , то для одной из них (обозначим её за x_n) верно, что

$$\left| \frac{f(x_n) - f(a)}{x_n - a} \right| \geq \left| \frac{f_n(q_n) - f_n(p_n)}{q_n - p_n} \right| \quad \text{sign} \left(\frac{f(x_n) - f(a)}{x_n - a} \right) = \text{sign} \left(\frac{f_n(q_n) - f_n(p_n)}{q_n - p_n} \right)$$

Тогда про последовательность

$$\left(\frac{f_n(x_n) - f_n(a)}{x_n - a} \right)_{n=0}^{\infty}$$

с одной стороны можно сказать, что она сходится к $f'(a)$ (т.к. $|p_n - a|$ и $|q_n - a|$ не более $1/3^n$, а следовательно и $|x_n - a|$); с другой же стороны эта последовательность либо неограниченно растёт по модулю, либо с некоторого момента знакоперебуется, а значит навряд ли сходится — противоречие. Значит ни в какой точке f' не определена.

□

4 Интегрирование

4.1 Первообразная

Определение 33. g — первообразная функции f , если на области определения f верно, что $g' = f$.

Теорема 55. Если g_1 и g_2 — первообразные f на отрезке $[a; b]$, то $g_1 - g_2 = \text{const}$ на том же отрезке.

Доказательство. Очевидно, что $(g_1 - g_2)' = f' - f' = 0$ на отрезке $[a; b]$. Если $g_1 - g_2$ не константна, то есть две точки на отрезке $[a; b]$, в которых принимаются разные значения, а тогда по теореме Лагранжа будет точка строго между ними (а значит и на отрезке), где производная не равна нулю — противоречие. Следовательно $g_1 - g_2$ является константой. □

Замечание 6. Для несвязного множества утверждение неверно. Например, если областью определения f будут два отрезка, то $g_1 - g_2$ будет константной на каждом отрезке, но константы могут быть различны.

Определение 34. Семейство первообразных функции f обозначается как

$$\int f$$

Определение 35. *Линейная форма* — линейная однородная функция ($f(x) = \alpha x$).

Лемма 56.

1.

$$\int 0 = \{f \equiv C \mid C \in \mathbb{R}\}$$

5.

$$\int e^x = e^x + C$$

2.

$$\int a_0 + \dots + a_n x^n = C + a_0 x + \dots + a_n x^{n+1}$$

6.

$$\int \sin(x) = -\cos(x) + C$$

3. $\forall \alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0\}, x > 0$

$$\int x^\alpha = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C$$

$$\int \cos(x) = \sin(x) + C$$

7.

$$\int \frac{1}{1+x^2} = \arctan(x) + C$$

4. $\forall x > 0$

$$\int \frac{1}{x} = \ln(x) + C$$

8.

$$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin(x) + C$$

Теорема 57.

1.

$$\int \alpha f = \alpha \int f + C$$

3.

$$\int f dg = fg - \int g df$$

2.

$$\int f + g = \int f + \int g$$

4.

$$\int f(\varphi(x))\varphi'(x)dx = \left(\int f\right) \circ \varphi$$

Доказательство.

1. Продифференцируем обе части:

$$\left(\int \alpha f\right)' = \alpha f = \alpha \left(\int f\right)' = \left(\alpha \int f\right)'$$

Таким образом обе стороны отличаются на константу: её корректность гарантирует $+C$.

2. Продифференцируем обе части:

$$\left(\int f + g\right)' = f + g = \left(\int f\right)' + \left(\int g'\right) = \left(\int f + \int g\right)'$$

Таким образом обе стороны отличаются на константу; эта константа поглощается первообразными слева и справа (так как это семейства функций).

3. Продифференцируем обе части:

$$\left(\int f dg \right)' = f \cdot g' = (fg)' - g \cdot f' = \left(fg - \int g df \right)'$$

Таким образом обе стороны отличаются на константу; эта константа поглощается первообразными слева и справа (так как это семейства функций).

4. Продифференцируем обе части:

$$\left(\int f(\varphi(x))\varphi'(x)dx \right)' = (f \circ \varphi) \cdot \varphi' = \left(\left(\int f \right) \circ \varphi \right)'$$

Таким образом обе стороны отличаются на константу; эта константа поглощается первообразными слева и справа (так как это семейства функций).

□

4.2 Суммы Дарбу и интеграл Римана

Определение 36. Разбиение отрезка $[a; b]$ — такое семейство $\Sigma := \{I_k\}_{k=1}^n$ отрезков (ненулевой длины), что $[a; b] = \bigcup_{k=1}^n I_k$, и все отрезки из Σ попарно пересекаются не более, чем по одной точке.

Пусть дана функция $f : E \rightarrow \mathbb{R}$, где $E \supseteq [a; b]$, и некоторое разбиение Σ отрезка $[a; b]$. Тогда верхняя и нижняя суммы Дарбу функции f при разбиении Σ есть выражения

$$S^+(f, \Sigma) := \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_{x \in I} f(x) \quad S^-(f, \Sigma) := \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_{x \in I} f(x)$$

соответственно. (При этом \sup и \inf могут принимать значения $+\infty$ и $-\infty$ соответственно; и в таких случаях соответствующие суммы Дарбу тоже будут принимать значения $\pm\infty$.)

Пример 2.

- Пусть $f(x) := x^\alpha$, $\alpha > 0$, $[a; b] := [0; 1]$, а $\Sigma := \{[\frac{k-1}{n}; \frac{k}{n}]\}_{k=1}^n$. Тогда

$$\begin{aligned} S^+(f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_{x \in I} f(x) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} \cdot f\left(\frac{k}{n}\right) = \frac{\sum_{k=1}^n k^\alpha}{n^{\alpha+1}} \\ S^-(f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_{x \in I} f(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{n} \cdot f\left(\frac{k}{n}\right) = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} k^\alpha}{n^{\alpha+1}} \end{aligned}$$

- Пусть f — функция Дирихле, отрезок $[a; b]$ — любой, и его разбиение Σ — любое. Тогда

$$\begin{aligned} S^+(f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_{x \in I} f(x) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot 1 = b - a \\ S^-(f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_{x \in I} f(x) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot 0 = 0 \end{aligned}$$

Лемма 58. Пусть даны функция f , отрезка $[a; b]$ и его разбиение Σ . Назовём его подразбиением семейство отрезков Σ' , которое является объединением разбиений отрезков из Σ (иначе говоря, множество концов отрезков Σ является подмножеством концов отрезков Σ'). Тогда верны неравенства

$$S^+(f, \Sigma) \geq S^+(f, \Sigma') \quad S^-(f, \Sigma) \leq S^-(f, \Sigma')$$

Доказательство. Покажем это для верхних сумм Дарбу; для нижних доказательство аналогично.

Пусть $\{\Lambda_I\}_{I \in \Sigma}$ — набор разбиений каждого отрезка I из Σ , что $\Sigma' = \bigcup_{I \in \Sigma} \Lambda_I$. Тогда мы имеем, что для всяких $I \in \Sigma$ и $J \in \Lambda_I$ верно, что

$$\sup_{x \in I} f(x) \geq \sup_{x \in J} f(x)$$

Следовательно

$$\sum_{J \in \Lambda_I} |J| \cdot \sup_{x \in J} f(x) \leq \sum_{J \in \Lambda_I} |J| \cdot \sup_{x \in I} f(x) = \left(\sum_{J \in \Lambda_I} |J| \right) \cdot \sup_{x \in I} f(x) = |I| \cdot \sup_{x \in I} f(x)$$

Значит, суммируя обе части по Σ , получаем, что

$$S^+(f, \Sigma') = \sum_{J \in \Sigma'} |J| \cdot \sup_{x \in J} f(x) = \sum_{I \in \Sigma} \sum_{J \in \Lambda_I} |J| \cdot \sup_{x \in J} f(x) \leq \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_{x \in I} f(x) = S^+(f, \Sigma)$$

□

Лемма 59. Пусть даны функция f , отрезок $[a; b]$, его разбиения Σ_1 и Σ_2 . Тогда

$$S^+(f, \Sigma_1) \geq S^-(f, \Sigma_2)$$

Доказательство. Рассмотрим

$$\Sigma := \{I \cap J \mid I \in \Sigma_1 \wedge J \in \Sigma_2 \wedge |I \cap J| > 1\}$$

— (минимальное) подразбиение Σ_1 и Σ_2 . Тогда верно, что

$$S^+(f, \Sigma_1) \geq S^+(f, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma_2)$$

□

Следствие 59.1. Пусть фиксированы функция f и отрезок $[a; b]$. Рассмотрим множества

$$D^+ := \{S^+(f, \Sigma) \mid \Sigma \text{ — разбиение } [a; b]\} \quad D^- := \{S^-(f, \Sigma) \mid \Sigma \text{ — разбиение } [a; b]\}$$

Тогда $D^+ \geq D^-$.

Определение 37. Пусть фиксированы функция f и отрезок $[a; b]$, разбиения которого рассматриваются. Если

$$\sup_{\Sigma} S^-(f, \Sigma) = \inf_{\Sigma} S^+(f, \Sigma) = S,$$

то тогда f называется *интегрируемой по Риману*, а S называют *интегралом Римана функции f на отрезке $[a; b]$* . Обозначение:

$$\int_a^b f(x) dx := S$$

Лемма 60. Пусть даны функция f и отрезок $[a; b]$. Тогда если для всякого $\varepsilon > 0$ есть разбиение Σ отрезка $[a; b]$, что

$$\forall I \in \Sigma \quad \text{osc}_I f < \varepsilon$$

то f интегрируема по Риману на $[a; b]$.

Доказательство. Обозначим для каждого такого ε разбиение из условия за Σ_ε . Тогда мы имеем, что

$$S^+(f, \Sigma_\varepsilon) - S^-(f, \Sigma_\varepsilon) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot (\sup_I f - \inf_I f) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \varepsilon \cdot \sum_{I \in \Sigma} |I| = \varepsilon \cdot (b - a)$$

Т.е. для всякого $\varepsilon > 0$ верно, что

$$\inf_{\Sigma} S^+(f, \Sigma) - \sup_{\Sigma} S^-(f, \Sigma) \leq S^+(f, \Sigma_{\varepsilon/(b-a)}) - S^-(f, \Sigma_{\varepsilon/(b-a)}) < \frac{\varepsilon}{b-a} \cdot (b-a) = \varepsilon$$

Следовательно

$$\inf_{\Sigma} S^+(f, \Sigma) = \sup_{\Sigma} S^-(f, \Sigma),$$

что значит, что f интегрируема по Риману. □

Лемма 61. Пусть даны функция f и отрезок $[a; b]$. Тогда f интегрируема по Риману на $[a; b]$ тогда и только тогда, когда для всякого $\varepsilon > 0$ существует $\delta > 0$, что для всякого разбиение Σ отрезка $[a; b]$, где $\forall I \in \Sigma |I| < \delta$, верно, что

$$\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \varepsilon$$

Доказательство.

(\Rightarrow) Пусть f интегрируема по Риману на $[a; b]$. Тогда для всякого $\varepsilon > 0$ есть разбиения Σ_1 и Σ_2 отрезка $[a; b]$, что

$$\{S^+(f, \Sigma_1); S^-(f, \Sigma_2)\} \subseteq U_{\varepsilon/4} \left(\int_a^b f(x) dx \right)$$

Пусть Σ — общее подразбиение Σ_1 и Σ_2 (например, минимальное). Тогда

$$S^+(f, \Sigma_1) \geq S^+(f, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma_2)$$

Следовательно,

$$\{S^+(f, \Sigma); S^-(f, \Sigma)\} \subseteq U_{\varepsilon/4} \left(\int_a^b f(x) dx \right)$$

Заметим, что в таком случае $\sup_{[a; b]} f$ и $\inf_{[a; b]} f$ ограничены (равны вещественным значениям, а не $\pm\infty$). Поэтому $A := \operatorname{osc}_{[a; b]} f$ является вещественной величиной. Определим также $L := \min_{\Sigma} |I|$.

Пусть Λ — некоторое разбиение $[a; b]$, что длина всякого отрезка не больше $L \cdot \alpha$, где

$$\alpha := \min \left(1, \frac{\varepsilon \cdot |\Sigma|}{2 \cdot A \cdot L} \right) \in (0; 1].$$

Тогда мы имеем, что всякий отрезок I из Λ либо является подотрезком некоторого отрезка J_I из Σ (обозначим множество таких I за Γ), либо является подотрезком объединения двух соседних отрезков K_1 и K_2 из Σ и содержит их общую границу (обозначим множество

таких I за Θ). В случае I и J мы имеем, что $\text{osc}_I f \leq \text{osc}_J f$; в случае I , K_1 и K_2 мы имеем, что $\text{osc}_I f \leq \text{osc}_{K_1 \cup K_2} f \leq A$. Следовательно, используя только что оговоренные оценки,

$$\begin{aligned}
& \sum_{I \in \Lambda} |I| \cdot \text{osc}_I f \\
&= \sum_{I \in \Gamma} |I| \cdot \text{osc}_I f + \sum_{I \in \Theta} |I| \cdot \text{osc}_I f \\
&\leq \sum_{I \in \Gamma} |I| \cdot \text{osc}_{J_I} f + \sum_{I \in \Theta} |I| \cdot \text{osc}_{[a;b]} f \\
&\leq \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \text{osc}_I f + A \cdot \sum_{I \in \Theta} |I| \\
&\leq \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \text{osc}_I f + A \cdot L \cdot \alpha \cdot |\Theta| \\
&\leq S^+(f, \Sigma) - S^-(f, \Sigma) + A \cdot L \cdot \alpha \cdot |\Sigma| \\
&\quad < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} \\
&\quad \quad \quad = \varepsilon
\end{aligned}$$

Таким образом $\delta := L \cdot \alpha$.

(\Leftarrow) Пусть для всякого $\varepsilon > 0$ существует $\delta > 0$, что для всякого разбиение Σ отрезка $[a; b]$, где $\forall I \in \Sigma |I| < \delta$, верно, что

$$\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \text{osc}_I f < \varepsilon$$

Тогда

$$S^+(f, \Sigma) - S^-(f, \Sigma) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot (\sup_I f - \inf_I f) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \text{osc}_I f < \varepsilon$$

Т.е. для всякого $\varepsilon > 0$

$$\inf_{\Sigma} S^+(f, \Sigma) - \sup_{\Sigma} S^-(f, \Sigma) < \varepsilon$$

Следовательно

$$\inf_{\Sigma} S^+(f, \Sigma) = \sup_{\Sigma} S^-(f, \Sigma)$$

т.е. f интегрируема на $[a; b]$ по Риману.

□

Теорема 62. Пусть f — непрерывная на $[a; b]$ функция. Тогда она интегрируема по Риману на $[a; b]$.

Доказательство. Поскольку f непрерывна на компакте $[a; b]$, то она равномерно непрерывна, т.е.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x \in [a; b] \quad f(U_{\delta}(x)) \subseteq U_{\varepsilon}(f(x))$$

Для каждого такого ε получаемое δ обозначим за δ_{ε} . Тогда для всякого подотрезка I отрезка $[a; b]$ длины менее $\delta_{\varepsilon/2}$ верно, что $\text{osc}_I f < \varepsilon$. Следовательно для любого разбиения Σ с шагом не более $\delta_{\varepsilon/2}$ (т.е. $\forall I \in \Sigma |I| < \delta_{\varepsilon/2}$) мы имеем, что

$$\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \text{osc}_I f < [a; b] \cdot \varepsilon$$

Поэтому f интегрируема по Риману на $[a; b]$.

□

Теорема 63.

1.

$$\int_a^b \lambda dx = \lambda(b-a)$$

2. Если f интегрируема по Риману на $[a; b]$, то

$$f \geq 0 \implies \int_a^b f(x) dx \geq 0$$

3. Если f и g интегрируемы по Риману на $[a; b]$, то

$$\int_a^b (f+g)(x) dx = \int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx$$

4. Если f интегрируема по Риману на $[a; b]$, то

$$\int_a^b \lambda f(x) dx = \lambda \int_a^b f(x) dx$$

5. f интегрируема по Риману на $[a; b]$ и $[b; c]$ тогда и только тогда, когда на $[c; a]$, и во всех случаях

$$\int_a^b f(x) dx + \int_b^c f(x) dx = \int_a^c f(x) dx$$

Доказательство.

1. Очевидно, что для всякого разбиения Σ верно, что $S^+(f, \Sigma) = S^-(f, \Sigma) = \lambda(b-a)$, следовательно и интеграл Римана равен $\lambda(b-a)$.

2. Очевидно, что для всякого разбиения Σ верно, что $S^-(f, \Sigma) \geq 0$, следовательно, если интеграл Римана определён, то он неотрицателен.

3. Очевидно, что для всякого $\varepsilon > 0$ есть разбиения Σ_1 и Σ_2 , что

$$\sum_{I \in \Sigma_1} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \frac{\varepsilon}{2} \qquad \sum_{I \in \Sigma_2} |I| \cdot \operatorname{osc}_I g < \frac{\varepsilon}{2}$$

Рассмотрим любое подразбиение Σ разбиений Σ_1 и Σ_2 . Тогда

$$\begin{aligned} S^+(f+g, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I (f+g) \\ &\leq \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f + \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I g \\ &\leq \sum_{I \in \Sigma_1} |I| \cdot \sup_I f + \sum_{I \in \Sigma_2} |I| \cdot \sup_I g \\ &= S^+(f, \Sigma_1) + S^+(g, \Sigma_2) \end{aligned}$$

Аналогично мы имеем, что $S^-(f+g, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma_1) + S^-(g, \Sigma_2)$. Таким образом отметим две важные строки неравенств.

$$\begin{aligned} S^+(f, \Sigma_1) + S^+(g, \Sigma_2) &\geq S^+(f+g, \Sigma) \geq S^-(f+g, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma_1) + S^-(g, \Sigma_2) \\ S^+(f, \Sigma_1) + S^+(g, \Sigma_2) &\geq \int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx \geq S^-(f, \Sigma_1) + S^-(g, \Sigma_2) \end{aligned}$$

Так мы получаем, что $S^+(f+g, \Sigma)$, $S^-(f+g, \Sigma)$ и $\int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx$ — три числа с отрезка

$$[S^-(f, \Sigma_1) + S^-(g, \Sigma_2); S^+(f, \Sigma_1) + S^+(g, \Sigma_2)],$$

длина которого меньше ε . Следовательно $f+g$ интегрируема по Риману на $[a; b]$, и интеграл равен

$$\int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx$$

4. Докажем сначала для $\lambda \geq 0$. Для всякого $\varepsilon > 0$ есть разбиение Σ отрезка $[a; b]$, что

$$\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \varepsilon$$

Также имеем, что

$$\begin{aligned} S^+(\lambda f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I \lambda f = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \lambda \cdot \sup_I f = \lambda \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f = \lambda S^+(f, \Sigma) \\ S^-(\lambda f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_I \lambda f = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \lambda \cdot \inf_I f = \lambda \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_I f = \lambda S^-(f, \Sigma) \end{aligned}$$

Следовательно

$$\begin{aligned} S^+(\lambda f, \Sigma) &= \lambda S^+(f, \Sigma) \geq \lambda \int_a^b f(x) dx \geq \lambda S^-(f, \Sigma) = S^-(\lambda f, \Sigma) \\ S^+(\lambda f, \Sigma) - S^-(\lambda f, \Sigma) &< \lambda \varepsilon \end{aligned}$$

Таким образом интеграл λf по Риману на $[a; b]$ определён и равен $\lambda \int_a^b f(x) dx$.

Теперь покажем для $\lambda = -1$. Заметим, что

$$\begin{aligned} S^+(-f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I -f = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot -\inf_I f = -\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_I f = -S^-(f, \Sigma) \\ S^-(-f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_I -f = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot -\sup_I f = -\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f = -S^+(f, \Sigma) \end{aligned}$$

Следовательно

$$\begin{aligned} S^+(-f, \Sigma) &= -S^-(f, \Sigma) \geq -\int_a^b f(x) dx \geq -S^+(f, \Sigma) = S^-(-f, \Sigma) \\ S^+(-f, \Sigma) - S^-(-f, \Sigma) &< \varepsilon \end{aligned}$$

Таким образом интеграл $-f$ по Риману на $[a; b]$ определён и равен $-\int_a^b f(x) dx$.

Используя доказанные утверждения получаем, что для всякого λ верно, что

$$\begin{aligned} \int_a^b \lambda f(x) dx &= \int_a^b \operatorname{sign}(\lambda) \cdot |\lambda| f(x) dx \\ &= \operatorname{sign}(\lambda) \int_a^b |\lambda| f(x) dx \\ &= \operatorname{sign}(\lambda) |\lambda| \int_a^b f(x) dx \\ &= \lambda \int_a^b f(x) dx \end{aligned}$$

5. Если f интегрируема по Риману на некотором отрезке I , то $\sup_I f$ и $\inf_I f$ равны некоторым вещественным значениям (не $\pm\infty$).

Таким образом пусть f интегрируема по Риману на $[a; b]$ и $[b; c]$. Тогда для всякого $\varepsilon > 0$ есть разбиения Σ_L отрезка $[a; b]$ и Σ_R отрезка $[b; c]$, что

$$\sum_{I \in \Sigma_L} |I| \operatorname{osc}_I f < \frac{\varepsilon}{2} \qquad \sum_{I \in \Sigma_R} |I| \operatorname{osc}_I f < \frac{\varepsilon}{2}$$

Следовательно, если определить $\Sigma := \Sigma_L \cup \Sigma_R$,

$$S^+(f, \Sigma) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \sup_I f = \sum_{I \in \Sigma_L} |I| \sup_I f + \sum_{I \in \Sigma_R} |I| \sup_I f \geq \int_a^b f(x) dx + \int_b^c f(x) dx$$

По аналогии получаем, что

$$S^+(f, \Sigma) \geq \int_a^b f(x) dx + \int_b^c f(x) dx \geq S^-(f, \Sigma)$$

При этом

$$S^+(f, \Sigma) - S^-(f, \Sigma) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \operatorname{osc}_I f = \sum_{I \in \Sigma_L} |I| \operatorname{osc}_I f + \sum_{I \in \Sigma_R} |I| \operatorname{osc}_I f < \varepsilon$$

Таким образом f интегрируема по Риману на $[a; c]$, а интеграл равен $\int_a^b f(x) dx + \int_b^c f(x) dx$.

Пусть теперь f интегрируема на $[a; c]$. Тогда для всякого разбиения Σ отрезка $[a; c]$ мы можем рассмотреть

$$\Sigma_L := \{I \cap [a; b] \mid I \in \Sigma\}$$

и тогда

$$\sum_{I \in \Sigma_L} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f$$

Следовательно есть разбиения со сколь угодно маленькой осцелляцией f на них, а значит f интегрируема на $[a; b]$; аналогично и на $[b; c]$. А по предыдущим рассуждениям достигается равенство в тождестве интегралов.

□

Теорема 64. Пусть дана функция f , а $M = \sup_{[a; b]} |f|$. Тогда

$$\left| \int_a^b f(x) dx \right| \leq M(b - a)$$

Доказательство. Очевидно, что при разбиении $\Sigma := \{[a; b]\}$

$$\begin{aligned} S^+(f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f = (b - a) \cdot \sup_{[a; b]} f \\ S^-(f, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_I f = (b - a) \cdot \inf_{[a; b]} f \end{aligned}$$

Следовательно

$$M(b - a) \geq (b - a) \sup_{[a; b]} f = S^+(f, \Sigma) \geq \int_a^b f(x) dx \geq S^-(f, \Sigma) = (b - a) \inf_{[a; b]} f \geq -M(b - a)$$

откуда следует требуемое.

□

Теорема 65. Пусть $f : [a; b] \rightarrow \mathbb{R}$ непрерывна. Тогда

$$F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \int_a^x f(t)dt$$

является первообразной f .

Доказательство. Рассмотрим какие-то x и y , что $a \leq x < y \leq b$. Тогда

$$F(y) - F(x) = \int_a^y f(t)dt - \int_a^x f(t)dt = \int_x^y f(t)dt$$

Следовательно, рассматривая $\Sigma := \{[x; y]\}$,

$$\begin{aligned} \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \inf_I f &\leq F(y) - F(x) \leq \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f \\ (y - x) \cdot \inf_{[x; y]} f &\leq F(y) - F(x) \leq (y - x) \cdot \sup_{[x; y]} f \\ \inf_{[x; y]} f &\leq \frac{F(y) - F(x)}{y - x} \leq \sup_{[x; y]} f \end{aligned}$$

Немного меняя обозначения, получаем, что для всякого $\varepsilon \in [a - x; b - x] \setminus \{0\}$

$$\inf_{U_{|\varepsilon|}(x)} f \leq \frac{F(x + \varepsilon) - F(x)}{\varepsilon} \leq \sup_{U_{|\varepsilon|}(x)} f$$

Заметим, что по непрерывности f

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \inf_{U_\varepsilon(x)} f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \sup_{U_\varepsilon(x)} f = f(x)$$

Следовательно

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{F(x + \varepsilon) - F(x)}{\varepsilon} = f(x)$$

Иначе говоря $F'(x) = f(x)$. Таким образом $F' = f$. □

Следствие 65.1 (формула Ньютона-Лейбница). Пусть F — первообразная непрерывной на $[a; b]$ функции f . Тогда

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a)$$

Доказательство. Заметим, что $G(x) := \int_a^x f(t)dt$ — первообразная f . Следовательно $G(x) - F(x) = C$ на $[a; b]$. Значит

$$\int_a^b f(x)dx = G(b) = G(b) - G(a) = (F(b) + C) - (F(a) + C) = F(b) - F(a)$$

□

Теорема 66. Пусть $(f_n)_{n=0}^\infty$ — последовательность интегрируемых по Риману на $[a; b]$ функций — равномерно сходится к f . Тогда f интегрируема по Риману на $[a; b]$, и

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x)dx$$

Доказательство. Заметим, что для всякого $\varepsilon > 0$ есть $N \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, что для всяких $n, m > N$ верно, что

$$|f_n - f_m| \leq \frac{\varepsilon}{3(b-a)};$$

следовательно для всякого $n > N$ верно, что

$$|f - f_n| \leq \frac{\varepsilon}{3(b-a)}.$$

При этом существует такое разбиение Σ отрезка $[a; b]$, что

$$S^+(f_{N+1}, \Sigma) - S^-(f_{N+1}, \Sigma) = \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \frac{\varepsilon}{3}.$$

Таким образом для всякого $n > N$ верно, что

$$\begin{aligned} S^+(f_n, \Sigma) &= \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f_n \leq \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \left(\frac{\varepsilon}{3(b-a)} + \sup_I f_{N+1} \right) = \frac{\varepsilon}{3} + \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \sup_I f_{N+1} \\ &= S^+(f_{N+1}, \Sigma) + \frac{\varepsilon}{3}; \end{aligned}$$

аналогично $S^-(f_n, \Sigma) \geq S^-(f_{N+1}, \Sigma) - \frac{\varepsilon}{3}$. Аналогично данные утверждения верны и для f (вместо f_n).

Заметим, что

$$\begin{aligned} S^+(f_{N+1}, \Sigma) + \frac{\varepsilon}{3} &\geq S^+(f_n, \Sigma) \geq \int_a^b f_n(x) dx \geq S^-(f_n, \Sigma) \geq S^-(f_{N+1}, \Sigma) - \frac{\varepsilon}{3} \\ S^+(f_{N+1}, \Sigma) + \frac{\varepsilon}{3} &\geq S^+(f, \Sigma) \geq S^-(f, \Sigma) \geq S^-(f_{N+1}, \Sigma) - \frac{\varepsilon}{3} \end{aligned}$$

Таким образом

$$S^+(f, \Sigma) - S^-(f, \Sigma) < \varepsilon,$$

следовательно f интегрируема по Риману на $[a; b]$. Таким образом мы имеем, что

$$\begin{aligned} S^+(f_{N+1}, \Sigma) + \frac{\varepsilon}{3} &\geq \int_a^b f_n(x) dx \geq S^-(f_{N+1}, \Sigma) - \frac{\varepsilon}{3} \\ S^+(f_{N+1}, \Sigma) + \frac{\varepsilon}{3} &\geq \int_a^b f(x) dx \geq S^-(f_{N+1}, \Sigma) - \frac{\varepsilon}{3} \end{aligned}$$

т.е. для всех $n > N$

$$\left| \int_a^b f_n(x) dx - \int_a^b f(x) dx \right| < \varepsilon$$

Это значит, что

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x) dx$$

□

Лемма 67. Если f и g интегрируемы по Риману на $[a; b]$, то и $f \cdot g$.

Доказательство. Заметим, что, поскольку f и g интегрируемы по Риману, есть такие константы $C_f > 0$ и $C_g > 0$, что $|f| \leq C_f$ и $|g| \leq C_g$. Следовательно для всяких $x, y \in [a; b]$

$$\begin{aligned} |f(x)g(x) - f(y)g(y)| &\leq |f(x)g(x) - f(y)g(x)| + |f(y)g(x) - f(y)g(y)| \\ &\leq C_g|f(x) - f(y)| + C_f|g(x) - g(y)| \end{aligned}$$

Значит для всякого отрезка I верно, что

$$\operatorname{osc}_I f \cdot g \leq C_g \operatorname{osc}_I f + C_f \operatorname{osc}_I g$$

Следовательно для всякого разбиения Σ отрезка $[a; b]$

$$\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f \cdot g \leq C_g \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f + C_f \sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I g$$

Вспомним, что для всякого $\varepsilon > 0$ есть разбиения Σ_f и Σ_g отрезка $[a; b]$, что

$$\sum_{I \in \Sigma_f} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f < \frac{\varepsilon}{2C_g} \qquad \sum_{I \in \Sigma_g} |I| \cdot \operatorname{osc}_I g < \frac{\varepsilon}{2C_f}$$

Рассмотрим общее подразбиение Σ разбиений Σ_f и Σ_g . Для него верны предыдущие предыдущие неравенства. Следовательно

$$\sum_{I \in \Sigma} |I| \cdot \operatorname{osc}_I f \cdot g < C_g \frac{\varepsilon}{2C_g} + C_f \frac{\varepsilon}{2C_f} = \varepsilon$$

Поэтому $f \cdot g$ интегрируема по Риману на $[a; b]$. □

4.3 У чего есть выражаемая первообразная?

Лемма 68.

- | | |
|--|---|
| <p>1. $\int 0 = C$</p> | <p>5. $\int e^x = e^x + C$</p> |
| <p>2. $\int a_0 + \dots + a_n x^n = C + a_0 x + \dots + a_n x^{n+1}$</p> | <p>6. $\int \sin(x) = -\cos(x) + C$
 $\int \cos(x) = \sin(x) + C$</p> |
| <p>3. $\forall \alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0\}, x > 0$
 $\int x^\alpha = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C$</p> | <p>7. $\int \frac{1}{1+x^2} = \arctan(x) + C$</p> |
| <p>4. $\forall x > 0$
 $\int \frac{1}{x} = \ln(x) + C$</p> | <p>8. $\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin(x) + C$</p> |

Теорема 69. Следующие виды функций имеют выражаемую первообразную:

1. рациональные функции;

3. рациональные функции от \sinh и \cosh ;

2. рациональные функции от \sin и \cos ;

4. рациональные функции от x и $ax^2 + bx + 1$, где $a \neq 0$.

Доказательство.

1. Каждая рациональная функция представляется в виде суммы полиномов, членов вида $\frac{k}{(x+a)^n}$ и членов вида $\frac{px+q}{(ax^2+bx+c)^n}$. Покажем, что каждый из них имеет выражаемую первообразную.

- Первообразная многочлена очевидна.

-

$$\int \frac{dx}{x+a} = \ln(x+a) + C$$

- Для всякого $n > 1$

$$\int \frac{dx}{(x+a)^n} = \frac{1}{(1-n)(x+a)^{n-1}} + C$$

-

$$\int \frac{dx}{x^2+1} = \operatorname{ctg}^{-1}(x)$$

-

$$\int \frac{xdx}{x^2+1} = \frac{1}{2} \ln(x^2+1)$$

- Для всякого $n > 1$

$$\int \frac{xdx}{(x^2+1)^n} = \frac{1}{2(1-n)(x^2+1)^{n-1}}$$

- Заметим, что

$$\left(\frac{x}{(x^2+1)^n} \right)' = \frac{1}{(x^2+1)^n} - 2n \frac{x^2}{(x^2+1)^{n+1}} = \frac{2n}{(x^2+1)^{n+1}} - \frac{2n-1}{(x^2+1)^n}$$

Следовательно

$$\int \frac{dx}{(x^2+1)^{n+1}} = \frac{x}{2n(x^2+1)^n} + \frac{2n-1}{2n} \int \frac{dx}{(x^2+1)^n}$$

Таким образом несложно понять по индукции, что $\int \frac{dx}{(x^2+1)^n}$ для $n > 1$ есть некоторая сумма рациональных функций и ctg^{-1} .

- Линейными заменами задача нахождения первообразных у $\frac{1}{(x+a)^n}$ и $\frac{px+q}{(ax^2+bx+c)^n}$ сводится к нахождению первообразных $\frac{1}{x^n}$, $\frac{1}{(x^2+1)^n}$ и $\frac{x}{(x^2+1)^n}$.

2. Заметим, что

$$\sin(x) = \frac{2 \operatorname{tg}(x/2)}{1 + \operatorname{tg}(x/2)^2} \quad \cos(x) = \frac{1 - \operatorname{tg}(x/2)^2}{1 + \operatorname{tg}(x/2)^2} \quad dx = \frac{2d(\operatorname{tg}(x/2))}{1 + \operatorname{tg}(x/2)^2}$$

Следовательно задача сводится к нахождению первообразной рациональной функции при помощи подстановки $t := \operatorname{tg}(x)$.

3. С одной стороны это можно свести к предыдущей задаче заменой $t := ix$. С другой стороны можно заметить, что

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad \cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad dx = \frac{d(e^x)}{e^x}$$

Следовательно задача сводится к нахождению первообразной рациональной функции при помощи подстановки $t := e^x$.

4. Линейными подстановками можно свести задачу к нахождению первообразной рациональной функции от y и $\sqrt{\pm y^2 \pm 1}$ или только от y .

- Случай рациональной функции только от y уже был разобран.
- Если нам дана рациональная функция от y и $\sqrt{1 - y^2}$, то заменой $t := \sin(y)$ она сводится к рациональной функции от \sin и \cos .
- Если нам дана рациональная функция от y и $\sqrt{y^2 - 1}$, то заменой $t := \cosh(y)$ она сводится к рациональной функции от \sinh и \cosh .
- Если нам дана рациональная функция от y и $\sqrt{1 + y^2}$, то заменой $t := \sinh(y)$ она сводится к рациональной функции от \sinh и \cosh .

□