

Математический анализ. Теория

Александр Сергеев

1 Интеграл

1.1 Неопределенный интеграл

Определение

$f, F : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

F – первообразная функции f , если F дифференцируема на $\langle a, b \rangle$ и $\forall x \in \langle a, b \rangle F'(x) = f(x)$

Теорема 1

Если f непрерывна на $\langle a, b \rangle$, то первообразная существует

Теорема 2

Пусть F – первообразная f на $\langle a, b \rangle$

Тогда

1. $\forall c \in \mathbb{R} F + c$ – тоже первообразная
2. Если G – первообразная, то $G - F = \text{const}$

Определение

Неопределенный интеграл на $\langle a, b \rangle$ – множество всех первообразных

$$\int f(x) dx = \{F : F' = f\}$$

Таблица первообразных

$$\int x^P dx = \frac{x^{P+1}}{P+1} + C, P \neq -1$$

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln |x| + C$$

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

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a}$$

$$\begin{aligned}
\int \sin x \, dx &= -\cos x + C \\
\int \cos x \, dx &= \sin x + C \\
\int \frac{1}{\cos^2 x} \, dx &= \operatorname{tg} x + C \\
\int \frac{1}{\sin^2 x} \, dx &= -\operatorname{ctg} x + C \\
\int \frac{dx}{x^2 + 1} &= \operatorname{arctg} x + C \\
\int \frac{dx}{1 - x^2} &= \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+x}{1-x} \right| + C = \operatorname{arcth} x + C \\
\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} &= \operatorname{arcsin} x + C \\
\int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} &= \ln |x + \sqrt{1+x^2}| + C = \operatorname{arcsch} x + C - \text{"длинный логарифм"}
\end{aligned}$$

Гиперболические функции

$e^{ix} = \cos x + i \sin x$ - из ряда Тейлора

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$$

$$\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$$

$$\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} - \text{гиперболический косинус}$$

$$\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} - \text{гиперболический синус}$$

$$\operatorname{ch}^2 x - \operatorname{sh}^2 x = 1$$

$$\operatorname{sh} 2x = 2 \operatorname{sh} x \operatorname{ch} x$$

Теорема о свойствах неопределенного интеграла

Пусть f, g - имеют первообразные на $\langle a, b \rangle$

Тогда

$$\begin{aligned}
1. \quad \int f + g &= \int f + \int g \\
\int af &= a \int f
\end{aligned}$$

$$2. \quad \text{Пусть } \phi : \langle p, q \rangle \rightarrow \langle a, b \rangle$$

$$\int f(\phi(t))\phi'(t) \, dt = \int f(x) \, dx|_{x:=\phi(t)} = F(\phi(t)) + C$$

Замечание

Пусть ϕ обратима

$$\text{Тогда } F(x) = \int f(\phi(t))\phi'(t) \, dt|_{t:=\phi^{-1}(x)}$$

3. $\forall \alpha \neq 0, \beta \in \mathbb{R}$

$$\int f(\alpha x + \beta) \, dx = \frac{1}{\alpha} F(\alpha x + \beta) + C$$

4. f, g – дифференцируемы и $f'g$ имеет первообразную

Тогда fg' имеет первообразную

$$\int fg' = fg - \int f'g$$

Определение

Дифференциал $d\phi(x) = \phi'(x) \, dx$

1.2 Правило Лопиталья

Лемма об ускоренной сходимости

$f, g : D \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, a \in \bar{\mathbb{R}}$ – предельная точка D

Пусть $\exists U(a) : f, g \neq 0$ в $\dot{U}(a)$

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 0, \lim_{x \rightarrow a} g(x) = 0$$

$$\begin{aligned} & y_k \rightarrow a \\ & y_k \in D \\ & y_k \neq a \\ \text{Тогда } \forall x_k : & \begin{matrix} x_k \rightarrow a \\ x_k \in D \\ x_k \neq a \end{matrix} \exists y_k : \begin{matrix} \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{f(y_k)}{f(x_k)} = 0 \\ \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{f(y_k)}{g(x_k)} = 0 \end{matrix} \end{aligned}$$

Доказательство

Выберем y_k как подпоследовательность x_k

$$\forall k \frac{f(x_l)}{f(x_k)}, \frac{f(x_l)}{g(x_k)} \xrightarrow{l \rightarrow \infty}$$

$$\text{Тогда } \exists l_0 : \left| \frac{f(x_{l_0})}{f(x_k)} \right|, \left| \frac{f(x_{l_0})}{g(x_k)} \right| < \frac{1}{k}$$

Отсюда $y_k := x_{l_0}$

Правило Лопиталья

$f, g : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}, a \in \overline{\mathbb{R}}$ – дифференцируемы на (a, b)

$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)}$ – неопределенность

Пусть $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)} = A \in \overline{\mathbb{R}}$

Тогда $\exists \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = A$

Доказательство

По Гейне

$$x_k \rightarrow a$$

Возьмем $x_k : x_k \in (a, b)$

$$x_k \neq a$$

$$y_k \rightarrow a$$

Из леммы берем $y_k : y_k \in (a, b)$

$$y_k \neq a$$

По т. Коши $\frac{f(x_k) - f(y_k)}{g(x_k) - g(y_k)} = \frac{f'(\xi_k)}{g'(\xi_k)}, \xi$ – между x_k и y_k (т.е. $\xi_k \rightarrow a$)

$$\frac{f(x_k)}{g(x_k)} = \frac{f(y_k)}{g(y_k)} + \frac{f'(\xi_k)}{g'(\xi_k)} \left(1 - \frac{g(y_k)}{g(x_k)}\right)$$

$$\frac{f(x_k)}{g(x_k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \frac{f'(\xi_k)}{g'(\xi_k)} = A$$

Замечание

Работает только на неопределенностях

Следствие

$$\frac{x}{\ln x} \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} +\infty$$

$$\frac{x^a}{e^x} = \left(\frac{x}{e^n}\right)^a \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0$$

Теорема Штольца

$x_n, y_n \rightarrow 0, y_n$ – строго монотонная

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} = a \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда $\frac{x_n}{y_n} \rightarrow a$

Замечание

При $a = 0$ требуем монотонность x_n

Замечание

При $x_n, y_n \rightarrow \infty$ теорема тоже верна

Доказательство

1. $a > 0, a \in \mathbb{R}$

Утверждение

$$p < \frac{a}{b}, \frac{c}{d} < q \Rightarrow p < \frac{a+c}{b+d} < q$$

$$\forall 0 < \varepsilon < a \exists N_1 \forall n > N \geq N_1 \quad a - \varepsilon < \frac{x_{N+1} - x_N}{y_{N+1} - y_N} < a + \varepsilon$$

$$\forall 0 < \varepsilon < a \exists N_1 \forall n > N \geq N_1 \quad a - \varepsilon < \frac{x_{N+2} - x_{N+1}}{y_{N+2} - y_{N+1}} < a + \varepsilon$$

\vdots

$$\forall 0 < \varepsilon < a \exists N_1 \forall n > N \geq N_1 \quad a - \varepsilon < \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} < a + \varepsilon$$

$$\text{Отсюда } \forall 0 < \varepsilon < a \exists N_1 \forall n > N \geq N_1 \quad a - \varepsilon < \frac{x_n - x_N}{y_n - y_N} < a + \varepsilon$$

Устремим n к ∞

$$\text{Тогда } a - \varepsilon < \frac{x_N}{y_N} < a + \varepsilon, \text{ т.е. } \frac{x_N}{y_N} \rightarrow a$$

2. $a < 0$ – аналогично

3. $a = \pm\infty$

$$\text{Аналогично } \frac{x_N}{y_N} \rightarrow a$$

4. $a = 0$ (потребуем монотонность x_n)

$$\text{Пусть } \frac{x_n - x_{n-1}}{y_n - y_{n-1}} \rightarrow +\infty$$

Перевернем дробь. Через доказанное выше

Упражнение

Посчитаем $1^k + 2^k + \dots + n^k$

Рассмотрим функцию $f(x) = 1 + x + x^2 + \dots + x^n = \frac{x^{n+1} - 1}{x - 1}$

$$x \frac{d}{dx} f(x) = x + 2x^2 + \dots + nx^n$$

$$\left(x \frac{d}{dx}\right)^2 f(x) = x + 2^2 x^2 + \dots + n^2 x^n$$

$$\left(x \frac{d}{dx}\right)^k f(x) = x + 2^k x^2 + \dots + n^k x^n$$

Отсюда $1^k + 2^k + \dots + n^k = ((x \frac{d}{dx})^k f)(1)$

Заметим, что в результате дифференцирования мы получим дробь, знаменатель которой при подстановке 1 обращается в 0

Но данный дефект возникает лишь из-за формы записи. На самом деле функция непрерывна, поэтому можно взять ее предел в 1

$$1^k + 2^k + \dots + n^k = \lim_{x \rightarrow 1} (x \frac{d}{dx})^k f$$

Применим правило Лопиталя

$$1^k + 2^k + \dots + n^k = (\frac{1}{(k+1)!} (\frac{d}{dx})^k (x-1)^{k+1} (x \frac{d}{dx})^k \frac{x^{n+1}-1}{x-1})(1)$$

1.3 Определенный интеграл

Определение

Пусть ε - множество ограниченных плоских фигур

$\sigma : \varepsilon \rightarrow [0, +\infty)$ - *площадь*, если

1. Аддитивность - $A = A_1 \sqcup A_2 \Rightarrow \sigma(A) = \sigma(A_1) + \sigma(A_2)$, где \sqcup - дизъюнктное объединение (объединение непересекающихся фигур)
2. Нормировка - $\sigma([a, b] \times [c, d]) = (b-a)(d-c)$

Замечание

1. $A \subset B \in \varepsilon \Rightarrow \sigma A \leq \sigma B$

Доказательство

$$B = A \sqcup (B \setminus A) \Rightarrow \sigma(B) = \sigma(A) + \sigma(B \setminus A) \geq \sigma(A)$$

2. A - вертикальный отрезок $\Rightarrow \sigma(A) = 0$

Доказательство

Впишем отрезок в прямоугольник с шириной ε

Для любого ε это возможно. Отсюда площадь стремится к 0

3. Мы не доказываем, что такая функция существует

Определение

$\sigma : \varepsilon \rightarrow [0, +\infty)$ - *ослабленная площадь*, если

1. Монотонность
2. Нормировка

3. Ослабленная аддитивность:

Если $A = A_1 \cup A_2$, $A_1 \cap A_2 \subset$ вертикальный отрезок, то $\sigma A = \sigma A_1 + \sigma A_2$

UPD

Позже предыдущее утверждение было заменено на следующее:

Если вертикальная прямая l делит фигуру на A на части A_l и A_r (части могут иметь общие точки на l), то $\sigma A = \sigma A_l + \sigma A_r$

Примеры

$$1. \sigma A := \inf \left\{ \sum_{k=1}^n S(P_k) : A \subset \bigcup_{k=1}^n P_k \right\}, \text{ где } P_k - \text{прямоугольник}$$

$$2. \sigma A := \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} S(P_k) : A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} P_k \right\}, \text{ где } P_k - \text{прямоугольник}$$

Эти площади разные

К примеру, рассмотрим $C = [0, 1]^2 \cap \mathbb{Q} \times \mathbb{Q}$

$$\sigma_1(C) = 1$$

$$\sigma_2(C) = 0$$

Определение

$$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$$

Положительная срезка $f^+ = \max(f, 0)$

Отрицательная срезка $f^- = \max(-f, 0)$

$$f = f^+ - f^-$$

$$|f| = f^+ + f^-$$

$$\text{Подграфик } (F, E) = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \in E, 0 \leq y \leq f(x)\}$$

Определенный интеграл

$$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} - \text{непрерывная}$$

Тогда *определенный интеграл* f по $[a, b]$ - $\int_a^b f(x) dx = \sigma(\text{ПГ}(f^+, [a, b])) -$

$\sigma(\text{ПГ}(f^-, [a, b]))$, где σ - ослабленная площадь

Замечания

$$1. f \geq 0 \Rightarrow \int_a^b f \geq 0$$

$$2. f \equiv C \Rightarrow \int_a^b f = C(b - a)$$

$$3. \int_a^b -f = - \int_a^b f$$

$$4. \text{ Можно считать, что } \int_a^a f = 0$$

Свойства

1. Аддитивность по промежутку

$$\int_a^b f = \int_a^c f + \int_c^b f$$

2. Монотонность

$$f \leq_{[a,b]} g[a, b] \Rightarrow \int_a^b f \leq \int_a^b g$$

$$3. (b-a) \min_{[a,b]} f \leq \int_a^b f \leq (b-a) \max_{[a,b]} f$$

$$4. \left| \int_a^b f \right| \leq \int_a^b |f|$$

Теорема о среднем

Пусть $f \in C[a, b]$

Тогда $\exists c \in [a, b] : \int_a^b f = f(c)(b-a)$

Доказательство

Если $a = b$ – тривиально

Иначе по утверждению 3: $\min f \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b f \leq \max f$

Т.к. f принимает все значения между минимумом и максимумом, то

$$\exists c : f(c) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f$$

Определение

Пусть $f \in C[a, b]$

$\Phi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, \Phi(x) = \int_a^x f$ – интеграл с переменным верхним пределом

$\Psi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, \Psi(x) = \int_x^b f$ – интеграл с переменным нижним пределом

Теорема Барроу

$f \in C[a, b]$, Φ – интеграл с переменным верхним пределом

Тогда Φ дифференцируема на $[a, b]$ и $\Phi'(x) = f(x)$

Доказательство

Пусть $x \in (a, b)$, $y > x$

$$\Phi'_+ = \lim_{y \rightarrow x+0} \frac{\Phi(y) - \Phi(x)}{y - x} = \lim_{y \rightarrow x+0} \frac{\int_x^y f}{y - x} = \lim_{y \rightarrow x+0} f(c), c \in [x, y] = f(x)$$

Аналогично $\Phi'_- = f(x)$

Тогда $\Phi'(x) = f(x)$

Замечание

$$\Psi'(x) = -f(x)$$

Теорема (Формула Ньютона-Лейбница)

Пусть F – первообразная f на $[a, b]$, $f \in C[a, b]$

$$\text{Тогда } \int_a^b f = F(b) - F(a)$$

Доказательство

По т. Барроу Φ – первообразная

Тогда $F = \Phi + C$

$$\int_a^b f = \Phi(b) - \Phi(a) = (F(b) + C) - (F(a) + C) = F(b) - F(a)$$

Замечание

Теорема Барроу – это теорема о существовании первообразной у непрерывной функции

Также площадь под графиком непрерывной функции не зависит от σ

Соглашение

$$\text{При } c > d \quad \int_c^d f := - \int_d^c f$$

Свойства

1. Линейность

$$f, g \in C[a, b], \alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad \int_a^b (\alpha f + \beta g) = \alpha \int_a^b f + \beta \int_a^b g$$

Пример (неравенство Чебышева)

$f, g \in C[a, b]$ – монотонно возрастающие/убывающие

$$I_f := \frac{1}{b-a} \int_a^b f - \text{среднее значение функции}$$

Тогда $I_f I_g \leq I_{fg}$

Доказательство

$x, y \in [a, b]$

Тогда $(f(x) - f(y))(g(x) - g(y)) \geq 0$ – из монотонности

$$f(x)g(x) - f(y)g(x) - f(x)g(y) + f(y)g(y) \geq 0$$

Проинтегрируем по x по $[a, b]$:

$$\int_a^b f(x)g(x) - f(y) \int_a^b g(x) - f(y)g(y)(b-a) \geq 0$$

Поделим на $b-a$:

$$I_{fg} - f(y)I_g - I_f g(y) + f(y)g(y) \geq 0$$

Проинтегрируем по y по $[a, b]$ и поделим на $b-a$:

$$I_{fg} - I_f I_g - I_f I_g + I_{fg} \geq 0$$

$$I_{fg} \geq I_f I_g$$

2. Интегрирование по частям

$$f, g \in C^1[a, b]$$

$$\int_a^b f g' = f g \Big|_a^b - \int_a^b g f'$$

Пример

$$H_n = \frac{1}{n!} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\pi^2}{4} - x^2 \right)^n \cos x \, dx = F_n(\pi^2) - \text{какой-то многочлен степени } n$$

Пример – полный треш. Если вам надо, смотрите видео:

https://www.youtube.com/live/7ZQr_0Khuq4?feature=share&t=7020

Таймкод: 1:57:00

3. Замена переменных в интеграле

$$f \in C\langle a, b \rangle$$

$$\phi : \langle a, b \rangle \rightarrow \langle a, b \rangle, \phi \in C^1$$

$$[p, q] \in \langle a, b \rangle$$

$$\text{Тогда } \int_p^q f(\phi(t)) \phi'(t) \, dt = \int_{\phi(p)}^{\phi(q)} f(x) \, dx$$

Доказательство

F – первообразная f

$F(\phi(t))$ – первообразная $f(\phi(t))\phi'(t)$

$$\int_p^q f(\phi(t)) \phi'(t) \, dt = F(\phi(q)) - F(\phi(p)) = \int_{\phi(p)}^{\phi(q)} f(x) \, dx$$

Замечание

(а) Может оказаться, что $\phi(p) > \phi(q)$

(б) $\phi[p, q]$ может быть крупнее $[\phi(p), \phi(q)]$

Пример (Формула Тейлора с остатком в интегральной форме)

$a, b \in \overline{\mathbb{R}}, a < b, f \in C^{n+1}\langle a, b \rangle, x, x_0 \in \langle a, b \rangle$

Тогда $f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} f^{(k)}(x_0)(x - x_0)^k + \frac{1}{n!} \int_{x_0}^x (x - t)^n f^{(n+1)}(t) dt$

Доказательство

Индукция по n :

(a) $n = 0$:

$$f(x) = f(x_0) = \int_{x_0}^x f'(t) dt$$

(b) Интегрирование по частям

Пусть доказано для n

$$\begin{aligned} \frac{1}{n!} \int_{x_0}^x (x - t)^n f^{(n+1)}(t) dt &= \left[\begin{array}{ll} f = f^{(n+1)} & g' = (x - t)^n \\ f' = f^{(n+2)} & g = -\frac{(x - t)^{n+1}}{n + 1} \end{array} \right] = \\ &= -\frac{1}{n!} \frac{(x - t)^{n+1}}{n + 1} f^{(n+1)}(t) \Big|_{t=x_0}^{t=x} + \frac{1}{(n + 1)!} \int_{x_0}^x (x - t)^{n+1} f^{(n+2)}(t) dt = \\ &= \frac{(x - x_0)^{n+1}}{(n + 1)!} f^{(n+1)}(x_0) + \frac{1}{(n + 1)!} \int_{x_0}^x (x - t)^{n+1} f^{(n+2)}(t) dt \end{aligned}$$

Замечание

Формулу Тейлора можно интегрировать

F – первообразная f

Проинтегрируем слагаемое:

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^x \frac{f^{(k)}(x_0)(x - x_0)^k}{k!} &= \frac{f^{(k)}(x_0)(x - x_0)^{k+1}}{(k + 1)!} \Big|_{x=x_0}^{x=x} = \frac{f^{(k)}(x_0)(x - x_0)^{k+1}}{(k + 1)!} = \\ &= \frac{F^{(k+1)}(x_0)(x - x_0)^{k+1}}{(k + 1)!} \end{aligned}$$

Пример

$$\frac{1}{1 + x^2} = 1 - x + x^2 - \dots + (-1)^n x^{2n} + o(x^{2n})$$

$$\text{Тогда } \arctan x = F(0) + x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \dots + o(x^{2n+1})$$

Утверждение

π – иррациональное (даже π^2 – иррациональное)

Доказательство

Пусть $\pi^2 = \frac{k}{m}$

Тогда $m^n F(\frac{k}{m})$ – целое число, где F – из примера к интегрированию по частям

Отсюда $m^n F(\frac{k}{m}) = \frac{m^n}{n!} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi^2}{4} - x^2)^n \cos x \, dx$ – положительное целое число

Отсюда выражение ≥ 1

$$|\frac{m^n}{n!} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\frac{\pi^2}{4} - x^2)^n \cos x \, dx| \leq \frac{m^n}{n!} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |(\frac{\pi^2}{4} - x^2)^n \cos x| \, dx \leq \frac{m^n 3^n \pi}{n!} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$$

1.4 Продолжение свойств интеграла

Определение

1. $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ – кусочно непрерывная, если функция непрерывна всюду, кроме конечного числа точек, где у нее разрыв 1 рода
2. f – кусочно непрерывная функция
 $x_0 = a < x_1 < \dots < x_n = b$ – точки разрыва (a, b могут и не быть разрывными)

$$\int_a^b f(x) \, dx := \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f$$

3. Пусть f – кусочно непрерывная на $[a, b]$
 $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ – почти первообразная функции f , если

(а) F – непрерывна на $[a, b]$

(б) $F'(x) = f(x)$ при $x \in [a, b]$, кроме конечного числа точек

Если F_i – первообразная f на $[x_{i-1}, x_i]$

$$\text{Тогда } F(x) = \begin{cases} F_1(x), & x \in [x_0, x_1] \\ F_2(x) + c_1, & x \in [x_1, x_2] \\ \vdots \\ F_n(x) + c_{n-1}, & x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases},$$

где $c_i = F_i(x_i) - F_{i+1}(x_i)$

Утверждение

Если f – кусочно непрерывная на $[a, b]$

F – первообразная

$$\text{Тогда } \int_a^b f = F(b) - F(a)$$

Доказательство

$$\int_a^b f(x) dx := \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f = \sum_{i=1}^n F_i(x_i) - F_i(x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n F(x_i) - F(x_{i-1}) = F(b) - F(a)$$

Пример

Пусть $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n, b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_n$

$$\text{Тогда } \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \frac{b_1 + \dots + b_n}{n} \leq \frac{a_1 b_1 + \dots + a_n b_n}{n} \quad \text{– неравенство Чебышева (ч.с.)}$$

Доказательство

$$\text{Определим функции как } F_a(x) = \sum_{i=1}^{\lfloor x \rfloor} a_i, F_b(x) = \sum_{i=1}^{\lfloor x \rfloor} b_i$$

Тогда неравенство выполняется по неравенству Чебышева

Замечание

Утверждается, что все доказанные свойства интеграла выполняются и для кусочно-непрерывных функций

1.5 Приложение определенного интеграла

Общая схема

Пусть фиксирован $\langle a, b \rangle$

Обозначения: $\text{Segm}\langle a, b \rangle = \{[p, q] : [p, q] \subset \langle a, b \rangle\}$

Определение

Отображение $\Phi : \text{Segm}\langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ – функция промежутка

Φ – Аддитивная функция промежутка, если $\forall c \in (p, q) \Phi[p, q] = \Phi[p, c] + \Phi[c, q]$

Определение

$\Phi : \text{Segm}\langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ – аддитивная функция промежутка

$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ – плотность а.ф.п. Φ , если $\forall \delta \in \text{Segm}\langle a, b \rangle \quad |\delta| \cdot \inf_{\delta} f \leq$

$$\Phi(\delta) \leq |\delta| \cdot \sup_{\delta} f$$

Основной пример

$$\Phi[p, q] := \int_a^b f(x) \, dx$$

Тогда f – плотность

Теорема 1 (о вычислении а.ф.п. по плотности)

$\Phi : \text{Segm}\langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ – а.ф.п

$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ – плотность Φ , непрерывна

$$\text{Тогда } \forall [p, q] \in \text{Segm}\langle a, b \rangle \quad \Phi[p, q] = \int_p^q f$$

Доказательство

$$\text{Пусть } F(x) = \begin{cases} 0, & x = p \\ \Phi[p, x] & p < x \leq q \end{cases}$$

Докажем, что F – первообразная f

$$F'_+(x) = \lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{\Phi[p, x+h] - \Phi[p, x]}{h} = \lim_{h \rightarrow 0+0} \frac{\Phi[x, x+h]}{h}$$

$$\inf_{[p,q]} \leq \frac{1}{q-p} \Phi[p, q] \leq \sum_{[p,q]} f$$

$$\text{Отсюда } F'_+(x) = \lim_{h \rightarrow 0+0} f(x + \theta h), \theta \in [0, 1] = f(x)$$

Аналогично $F'_-(x) = f(x)$

$$\Phi[p, q] = F(q) - F(p) = \int_p^q f(x) \, dx$$

Пример

Пусть $r = f(\phi)$ – функция в полярных координатах

$\phi \in \langle \phi_0, \phi \rangle$

Пусть $\Phi : \text{Segm}\langle \phi_0, \phi \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

– площадь сектора $(f, \langle \phi_0, \phi \rangle)$

Т.е. Φ – Отображение $[\alpha, \beta] \mapsto \sigma(\text{Сектор}(f, \langle \alpha, \beta \rangle))$

Это аддитивная функция промежутка

Теорема

$f : \langle \phi_0, \phi_1 \rangle \rightarrow \mathbb{R}_+$ – непрерывна, $\langle \phi_0, \phi_1 \rangle \subset [0, 2\pi]$

$$\text{Тогда } \sigma(\text{Сектор}(f, \langle \alpha, \beta \rangle)) = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} f^2(\phi) \, d\phi$$

$([\alpha, \beta] \in \langle \phi_0, \phi_1 \rangle)$

Доказательство

Проверим, что $\frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} f^2(\phi) d\phi$ – плотность а.ф.п. Φ

Т.е. проверим неравенство $\forall [\alpha, \beta] \quad \min_{\phi \in [\alpha, \beta]} \left(\frac{1}{2} f^2(\phi) \right) (\beta - \alpha) \leq \Phi([\alpha, \beta]) \leq$

$$\max_{\phi \in [\alpha, \beta]} \left(\frac{1}{2} f^2(\phi) \right) (\beta - \alpha)$$

Рассмотрим произвольный сектор

Круговой сектор $(\min f, [\alpha, \beta]) \subset \text{Сектор}(f, [\alpha, \beta]) \subset \text{Круговой сектор}(\max f, [\alpha, \beta])$ из геометрических соображений

$$\text{Отсюда } \frac{1}{2}(\beta - \alpha)(\min f)^2 \leq \Phi([\alpha, \beta]) \leq \frac{1}{2}(\beta - \alpha)(\max f)^2$$

Пример

$$x = r(t - \sin t)$$

$y = r(1 + \cos t - \text{циклоида (координата точки на поверхности катящегося колеса)})$

Найдем площадь арки(периода) циклоиды

Происходят геометрические рассуждения, которые плохо конвертируются в конспект, поэтому оставляю ссылку: <https://www.youtube.com/live/CaG68GvecLw?feature=share&t=6813>

Посчитаем площадь через интеграл

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{2\pi r} y(x) dx = \int_0^{2\pi} r(1 - \cos t) d(r(t - \sin t)) = \int_0^{2\pi} r(1 - \cos t) r(1 - \cos t) dt \\ &= r^2 \int_0^{2\pi} (1 - 2\cos t + \cos^2 t) dt = 2\pi r^2 + r^2 \int_0^{2\pi} \frac{\cos 2t + 1}{2} dt = \\ &= 2\pi r^2 + \pi r^2 = 3\pi r^2 \end{aligned}$$

Пример 2

Пусть задана кривая $(x(t), y(t))$ – путь

Научимся считать площадь сектора $[t_0, t_1]$

Перейдем в полярные координаты (считая, что $\phi_0 \leq \phi_1$):

$$S = \frac{1}{2} \int_{\phi_0}^{\phi_1} r^2(\phi) d\phi = \left[\begin{array}{l} \phi = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \\ r = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \end{array} \right] = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} (x^2 + y^2) \frac{1}{1 + \frac{y^2}{x^2}} \frac{x'y - xy'}{x^2} dt =$$

$$\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} (x^2 + y^2) \frac{x'y - xy'}{x^2 + y^2} dt = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} (x'y - x'y) dt$$

Пример 3 (Изопериметрическое неравенство)

Пусть $G \subset \mathbb{R}^2$ – замкнутая, ограниченная, выпуклая фигура

Пусть $\text{diam}(G) \leq 1$, где $\text{diam}(G) = \sup(\rho(x, y) : x, y \in G)$

(Из компактности G , а значит $\text{diam}(G) = \max(\rho(x, y) : x, y \in G)$)

Тогда $\sigma(G) \leq \frac{\pi}{4}$

Доказательство

Зададим фигуру в полярных координатах

Граница фигуры – выпуклая функция

Выберем на поверхности точку A , где функция дифференцируема (точек недифференцируемости не более чем счетное множество). Проведем в этой точке касательную и повернем фигуру, чтобы касательная стала вертикальной, а фигура была расположена в правой полуплоскости

Зададим функцию $f(\phi)$, $\phi \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ следующим образом:

Проведем из точки A прямую под углом ϕ

Она пересечет границу в точке B

Тогда $f(\phi) = |AB|$

$$\sigma G = \frac{1}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f^2(\phi) d\phi = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f^2(\phi) d\phi + \frac{1}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 f^2(\phi) d\phi = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f^2(\phi) d\phi +$$

$$\frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f^2(\phi - \frac{\pi}{2}) d\phi = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (f^2(\phi) + f^2(\phi - \frac{\pi}{2})) d\phi$$

$(f^2(\phi) + f^2(\phi - \frac{\pi}{2}))$ – квадрат длины некоторой хорды в G

$$\text{Отсюда } \sigma G = \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (f^2(\phi) + f^2(\phi - \frac{\pi}{2})) d\phi \leq \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 d\phi = \frac{\pi}{4}$$

1.6 Интегральные суммы

Определение

Пусть $[a, b]$ – отрезок суммирования

Разделим отрезок конечным набором точек x_0, \dots, x_n

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$$

i -ый отрезок – $[x_{i-1}, x_i]$

$\max |x_i - x_{i-1}|$ = ранг дробления = мелкость

Оснащение – ξ_1, \dots, ξ_n – набор точек таких, что $\xi_i \in [x_{i-1}, x_i]$

$$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$$

Тогда $\sum_{i=1}^n f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$ – Риманова сумма

Теорема об интеграле как пределе Римановых сумм

$$f \in C[a, b]$$

Тогда $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall$ дроблений $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$, у которых

$$\text{ранг} < \delta \left| \int_a^b f(x) dx - \sum_{i=1}^n f(x_i)(x_i - x_{i-1}) \right| < \varepsilon$$

Доказательство

Зафиксируем ε

Для этого $\varepsilon \exists \delta > 0 \forall x_1, x_2 \in [a, b] : |x_2 - x_1| < \delta |f(x_1) - f(x_2)| < \frac{\varepsilon}{b-a} -$

по т. Кантора

$$\begin{aligned} \text{Отсюда } \left| \int_a^b f - \sum_{i=1}^n f(x_i)(x_i - x_{i-1}) \right| &= \left| \sum_{i=1}^n \left(\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx - f(x_i)(x_i - x_{i-1}) \right) \right| \\ &= \left| \sum_{i=1}^n \left(\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx - \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x_i) dx \right) \right| = \left| \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f(x_i)) dx \right| \leq \\ &\sum_{i=1}^n \left| \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f(x_i)) dx \right| \leq \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} |f(x) - f(x_i)| dx < \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\varepsilon}{b-a} dx = \\ &\int_a^b \frac{\varepsilon}{b-a} dx = \varepsilon \end{aligned}$$

Пример

$$\int_0^1 x dx$$

Разобьем отрезок $[0, 1]$ на отрезки по $\frac{1}{n}$

$$\text{Т.е. } \int_0^1 x dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{i}{n} \frac{1}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{2n} = \frac{1}{2}$$

Замечание

Пусть $|f'(x)| \leq M$ на $[a, b]$

Разделим отрезок на части $\frac{b-a}{n}$

$$x_i = a + \frac{b-a}{n} i$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \left| \int_a^b f - \sum_{i=1}^n f\left(a + \frac{b-a}{n} i\right) \frac{b-a}{n} \right| &< \text{ по т. Лагранжа } < \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} |f'(\bar{x}_i)| (x_i - x) dx \\ &\leq \sum_{i=1}^n M \int_{x_{i-1}}^{x_i} (x_i - x) dx = \sum_{i=1}^n M \frac{(x_i - x_{i-1})^2}{2} = \frac{M}{2} \left(\frac{b-a}{n} \right)^2 n \end{aligned}$$

Обобщенная теорема о плотности

Пусть $f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

$\Phi : \text{Segm}\langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

$\forall \Delta \in \text{Segm}\langle a, b \rangle$ заданы $m_\Delta, M_\Delta :$

1. $m_\Delta \cdot |\Delta| \leq \Phi(\Delta) \leq M_\Delta \cdot |\Delta|$
2. $\forall x \in \Delta \ m_\Delta \leq f(t) \leq M_\Delta$
3. $\forall x \in \langle a, b \rangle \ \forall \Delta \ni x : |\Delta| \rightarrow 0 \ M_\Delta - m_\Delta \rightarrow 0$

Тогда $\forall [p, q] \in \text{Segm}\langle a, b \rangle \ \Phi[p, q] = \int_p^q f$

Доказательство

$$F(x) = \begin{cases} \Phi[p, x], & p < x \leq q \\ 0, & x = p \end{cases}$$

$$\Delta := [x, x + h]$$

$$m_\Delta \leq \frac{F(x + h) - F(x)}{h} = \frac{\Phi(\Delta)}{|\Delta|} \leq M_\Delta$$

$$m_\Delta \leq f(x) \leq M_\Delta$$

$$\text{Тогда } \left| \frac{F(x + h) - F(x)}{h} - f(x) \right| \leq M_\Delta - m_\Delta \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0$$

$$\text{Т.е. } F'_+(x) = f(x)$$

$$\text{Аналогично } F'_-(x) = f(x)$$

$$\text{Т.о. } \Phi[p, q] = F(q) - F(p) = \int_p^q f$$

Пример

Пусть $a > 0$

$$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}, f \geq 0$$

$$\Phi_x, \Phi_y : \text{Segm}\langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\text{Пусть } \Phi_x[p, q] = V_{\Omega^x}$$

$$\Phi_y[p, q] = V_{\Omega^y}$$

$\Omega^x = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x \in [p, q], \sqrt{y^2 + z^2} \leq f(x)\}$ – фигура вращения вокруг OX

$\Omega^y = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : p \leq \sqrt{x^2 + z^2} \leq q, 0 \leq y \leq f(\sqrt{x^2 + y^2})\}$ – фигура вращения вокруг OY

Φ_x, Φ_y – а.ф.п.

Теорема

$$f \in C[p, q], f \geq 0$$

$$\text{Тогда } \Phi_x[p, q] = \pi \int_p^q f^2(x) dx$$

$$\Phi_y[p, q] = 2\pi \int_p^q x f(x) dx$$

Доказательство

Для Φ_x – очевидно (из 1 теоремы о плотности)

Для Φ_y :

Проверим, что $2\pi x f(x)$ – плотность Φ_y

Из геометрических соображений:

$$V(\Omega^y[\alpha, \beta]) \leq \pi(\beta^2 - \alpha^2) \max_{[\alpha, \beta]} f = (\beta - \alpha)\pi(\beta + \alpha) \max_{[\alpha, \beta]} f \leq (\beta - \alpha)\pi \max_{[\alpha, \beta]} 2x \max_{[\alpha, \beta]} f$$

$$V(\Omega^y[\alpha, \beta]) \geq \pi(\beta^2 - \alpha^2) \min_{[\alpha, \beta]} f = (\beta - \alpha)\pi(\beta + \alpha) \min_{[\alpha, \beta]} f \geq (\beta - \alpha)\pi \min_{[\alpha, \beta]} 2x \min_{[\alpha, \beta]} f$$

Отсюда $M_\Delta := \pi \max_{\Delta} 2x \max_{\Delta} f(x)$

$$m_\Delta := \pi \min_{\Delta} 2x \min_{\Delta} f(x)$$

Т.о. условие 1 выполнено

$m_\Delta \leq 2\pi x f(x) \leq M_\Delta$ – условие 2 выполнено

$\max_{\Delta} 2x \max_{\Delta} f(x) - \min_{\Delta} \min_{\Delta} f(x) \rightarrow 0$ по непрерывности f и $2x$ – условие

3 выполнено

Пример

Найдем объем тора с радиусом сечения r и радиусом кольца R

Формула прямой – $y = \sqrt{r^2 - (x - R)^2}$

$$\text{Отсюда } V = 4\pi \int_{R-r}^{R+r} x \sqrt{r^2 - (x - R)^2} dx = 4\pi \int_{R-r}^{R+r} (x - R) \sqrt{r^2 - (x - R)^2} dx +$$

$$4\pi R \int_{R-r}^{R+r} \sqrt{r^2 - (x - R)^2} dx = 0 (\text{из симметричности относительно } R) + 4\pi R \frac{1}{2} \pi r^2 = 2\pi R \pi r^2$$

1.6.1 Длина пути

$\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m$, непрерывная – путь

$\gamma(a)$ – начало пути, $\gamma(b)$ – конец пути

$$t \mapsto \begin{pmatrix} \gamma_1(t) \\ \vdots \\ \gamma_m(t) \end{pmatrix}, \text{ где } \gamma_i : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} - i\text{-ая координатная функция пути}$$

$$v(t) = \begin{pmatrix} \gamma'_1(t) \\ \vdots \\ \gamma'_m(t) \end{pmatrix} - \text{вектор скорости пути в точке } t$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\gamma(t+h) - \gamma(t)}{h} = v(t) - \text{считается по координатам}$$

Путь гладкий, если $\forall i \gamma_i \in C^1$ Носитель пути – $\gamma([a, b])$

Определение

l – функция на множестве гладких путей называется длиной пути, если

1. $l \geq 0$
2. l – аддитивна: $\forall \gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m \forall c \in [a, b] l(\gamma) = l(\gamma|_{[a, c]}) + l(\gamma|_{[c, b]})$
3. $\gamma, \bar{\gamma}$ – два пути в $\mathbb{R}^m, C_\gamma, C_{\bar{\gamma}}$ – их носители
Пусть $\exists T : C_\gamma \rightarrow C_{\bar{\gamma}}$ – сжатие:
 $\forall x, y \rho(T(x), T(y)) \leq \rho(x, y)$
Тогда $l(\bar{\gamma}) \leq l(\gamma)$
4. $\gamma(t) = \vec{A} + t \cdot \vec{v} \Rightarrow l(\gamma) = \rho(\gamma(a), \gamma(b))$ – длина прямолинейного пути

Замечание 1

1. Длина дуги \geq длина хорды
(по свойству 3: ортогонально проецируем дугу на хорду)
2. При "расширении" длина дуги растет
3. При движении пространства (изометрии) длина пути не меняется

Теорема о длине гладкого пути

Пусть $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m, \gamma \in C^1$

$$l(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt$$

Доказательство

Пусть γ – инъекция. Т.е. путь не проходит через одну точку два раза.
Если это не так, разобьем путь на несколько и посчитаем их длины отдельно

Проверим, что $\|\gamma'(t)\|$ – плотность а.ф.п. $\underbrace{[p, q]}_{\subset [a, b]} \mapsto l(\gamma|_{[p, q]})$

$$m_i(\Delta) = \min_{t \in \Delta} \gamma'_i(t)$$

$$M_i(\Delta) = \max_{t \in \Delta} \gamma'_i(t)$$

$$m_\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^m m_i^2(\Delta)}$$

$$M_{\Delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^m M_i^2(\Delta)}$$

Тогда свойства 2 ($m_{\Delta} \leq \|\gamma'(t)\| \leq M_{\Delta}$) и 3 ($M_{\Delta} - m_{\Delta} \xrightarrow{|\Delta| \rightarrow 0} 0$) очевидны,

$$\text{т.к. } \|\gamma'(t)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\gamma'_i(t))^2}$$

Докажем, что $m_{\Delta}|\Delta| \leq l(\gamma|_{\Delta}) \leq M_{\Delta}|\Delta|$

Зафиксируем $\Delta = [t_0, t_1]$

$\vec{M} = (M_1(\Delta), \dots, M_m(\Delta))$

$\tilde{\gamma}(t) : \Delta \rightarrow \mathbb{R}^m$

$\tilde{\gamma}(t) := \vec{M}t$

Проверим $T : C_{\gamma} \rightarrow C_{\tilde{\gamma}} : \gamma(t) \mapsto \tilde{\gamma}(t)$ – растяжение

Пусть $p < q$

$$\rho(\gamma(p), \tilde{\gamma}(q)) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\gamma_i(p) - \tilde{\gamma}_i(q))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\gamma'_i(\bar{p})(p - q))^2} \leq |p - q| \sqrt{\sum_{i=1}^m (M_i[p, q])^2} =$$

$$\|\vec{M}[p, q]\| |p - q| = l(\tilde{\gamma}|_{[p, q]}) = \rho(\tilde{\gamma}(p), \tilde{\gamma}(q))$$

Т.е. $l(\gamma|_{[p, q]}) \leq l(\tilde{\gamma}|_{[p, q]}) = \|\vec{M}[p, q]\| |p - q| = \|\vec{M}_{\Delta}\| |\Delta|$

Аналогично $\|\vec{m}_{\Delta}\| |\Delta| \leq l(\gamma|_{\Delta})$

$$l(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt, \text{ ч.т.д.}$$

Пример

Посчитаем длину дуги эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Пусть $a > b$ Параметризуем его: $(x, y) = (a \sin t, b \cos t)$

$$\gamma' = (a \cos t, -b \sin t)$$

$$\|\gamma'\| = a^2 \cos^2 t + b^2 \sin^2 t = a^2(1 - \varepsilon^2 \sin^2 t), t = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

Тогда $L[0, T] = a \int_0^T \sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 t} dt$ – не берется(

Формула – Эллиптический интеграл II рода

Следствие

$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, f \in C^1$

$$\text{Тогда } l(\Gamma(f, [a, b])) = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)^2} dx$$

Доказательство

$\Gamma(f, [a, b])$ – носитель пути $x \mapsto (x, f(x))$
 $\gamma(x) = (x, f(x)), \gamma' = (1, f'), \|\gamma'\| = \sqrt{1 + f'^2}$

Следствие 2

$r : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}, r \in C^1$ – функция в полярных координатах

$$\gamma(\phi) = (r(\phi) \cos \phi, r(\phi) \sin \phi)$$

Тогда
$$l(\phi) = \int_a^b \sqrt{r^2 + r'^2} d\phi$$

Определение (способ определения длины пути)

Разобьем кривую на n частей "точками" $\alpha = t_0 < t_1 < \dots < t_n = \beta$

Тогда
$$l(\gamma) = \sup_{n, (t_i)} \sum_{i=1}^n \rho(\gamma(t_i), \gamma(t_{i-1}))$$

Определение

$$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$$

Тогда *вариация* f на $[a, b]$
$$\text{Var}_a^b f = \sup_{n, (t_i)} \sum_{i=1}^n |f(t_i) - f(t_{i-1})|$$

Если $f \in C^1$, $\text{Var}_a^b f =$ длина пути
$$= \int_a^b |f'|$$

Лемма

$$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, \text{Var}_a^b f - \text{ограничена}$$

Тогда $\exists p, q : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ – монотонные такие, что $f \equiv p - q$

Доказательство

$$f(x) - f(a) = p(x) - q(x), \text{ где}$$

$$2p(x) = \text{Var}_a^x f(x) + (f(x) - f(a))$$

$$2q(x) = \text{Var}_a^x f(x) - (f(x) - f(a))$$

Докажем, что p, q – возрастают

$$|f(y) - f(x)| \leq \text{Var}_x^y f$$

Отображение $\Delta \mapsto \text{Var}_\Delta f$ – а.ф.п.

$$\text{Для } x < y \quad 2(p(y) - p(x)) = \text{Var}_x^y f + f(y) - f(x) \geq 0$$

Т.е. $p(y) \geq p(x)$, ч.т.д.

$$\text{Кстати, } p(x) + q(x) = \text{Var}_a^x f$$

1.7 Конечные ε -сети

Упражнение Пусть (X, ρ) – метрическое пространство, $K \subset X$ – компактно $\Leftrightarrow K$ – секвенциально компактно

Определение Пусть (X, ρ) – метрическое пространство, $D \subset X, \varepsilon > 0$
Множество $N \subset X$ – ε -сеть множества D , если $\forall x \in D \exists y \in N : \rho(x, y) < \varepsilon$

Если N – конечное, то N – конечная ε -сеть

Определение

D – сверхограниченное, если в X , если $\forall \varepsilon > 0 \exists$ конечная ε -сеть $N \subset X$

Лемма 1

D – сверхограниченно в $X \Leftrightarrow D$ – сверхограниченно в D (в себе)

Доказательство \Leftarrow – тривиально

Доказательство \Rightarrow

Возьмем $\varepsilon > 0$

Берем $\frac{\varepsilon}{2}$ в $X : N = \{x_1, \dots, x_n\}$

$\forall i B(x_i, \frac{\varepsilon}{2})$ выберем какую-нибудь $y_i \in D$ (если такая есть)

Тогда $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ – ε -сеть D

Лемма 2

$f : D \rightarrow Y, D$ – сверхограниченное

f – равномерно непрерывно

Тогда $f(D)$ – сверхограниченно

Доказательство

Равномерная непрерывность $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall x_1, x_2 : \rho(x_1, x_2) < \delta \Rightarrow \rho(f(x_1), f(x_2)) < \varepsilon$

Зафиксируем ε

Возьмем конечную δ -сеть в $D =: N$

$f(N)$ – конечная ε -сеть в Y

Лемма 3

D – сверхограниченно \Leftrightarrow любая последовательность в D содержит фундаментальную подпоследовательность

Доказательство \Rightarrow

Возьмем последовательность (x_n)

\exists конечная 1-сеть $\{y_1, \dots, y_k\}$

Тогда $\exists i : B(y_i, 1)$ содержит бесконечно много членов последовательности

Пусть $x_k \in B(y_i, 1)$

Тогда $n_1 := k$

\exists конечная $\frac{1}{2}$ -сеть D , а значит конечная $\frac{1}{2}$ -сеть $D \cap B(y_i, 1)$

Повторим действия

Получившаяся последовательность y_i фундаментальна

Доказательство \Leftarrow

Докажем от противного

Пусть $\exists \varepsilon > 0$: не существует конечной ε -сети

Возьмем x_1

Т.к. сети не существует, то $\exists x_2 \in D \setminus B(x_1, \varepsilon)$

$\exists x_3 \in D \setminus \bigcup_{i=1}^2 B(x_i, \varepsilon)$

И т.д.

Построена последовательность $x_n \in D : \forall k, l \rho(x_k, x_l) \geq \varepsilon$ – не фундаментальная

Отсюда противоречие

Теорема

D – метрическое пространство

Тогда эквивалентны следующие утверждения:

1. D – компактно
2. D – сверхограниченное и полное

Доказательство $1 \Rightarrow 2$ D – компактно

Если D – неполное, то $\exists (x_n) \in D$ – фундаментальная, но не имеющая предела

Тогда $\forall (n_k) x_{n_k}$ – не имеет предела

(Т.к. фундаментальная последовательность сходится, если ее подпоследовательность сходится)

Это противоречит секвенциальной компактности Если D – не сверхограниченное

Тогда $\exists (x_n)$, не содержащей фундаментальную

Но тогда нет и сходящейся, что противоречит секвенциальной компактности

Доказательство $2 \Rightarrow 1$

D – сверхограниченное и полное

Тогда любая последовательность содержит фундаментальную подпоследовательность (в силу полноты – сходящуюся)

Это секвенциальная компактность

Следствие

X – полное метрическое пространство $D \subset X$

Тогда эквивалентны следующие утверждения

1. D – компактно
2. D – сверхограниченное и замкнутое

Теорема о формулах центральных прямоугольников и трапеций

Пусть $f \in C^2[a, b]$, $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$, $\delta = \max_i (x_i - x_{i-1})$

$$t = \frac{x_i + x_{i-1}}{2}$$

Тогда выполняются две формулы

1. $|\int_a^b f(x) dx - \sum_{i=1}^n f(t_i)(x_i - x_{i-1})| < \frac{\delta^2}{8} \int_a^b |f''(x)| dx$
2. $|\int_a^b f(x) dx - \sum_{i=1}^n \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2}(x_i - x_{i-1})| < \frac{\delta^2}{8} \int_a^b |f''(x)| dx$

При равномерном дроблении $\delta = \frac{b-a}{n}$:

$$M := \max |f''(x)|, \frac{\delta^2}{8} \int_a^b |f''(x)| dx \leq \frac{M(b-a)^3}{n^2}$$

Доказательство (только 2)

Пусть $dg := g'(x) dx$

$$\begin{aligned} \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) d(x - t_i) = f(x)(x - t_i) \Big|_{x=x_{i-1}}^{x=x_i} - \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'(x)(x - t_i) dx \\ &= \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2}(x_i - x_{i-1}) + \frac{1}{2} \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'(x) d\psi, \text{ где } \psi(x) = (x - x_{i-1})(x_i - x), x \in [x_{i-1}, x_i] \end{aligned}$$

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx = \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2}(x_i - x_{i-1}) + \underbrace{\frac{1}{2} f' \psi \Big|_{x_{i-1}}^{x_i}}_0 - \frac{1}{2} \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'' \psi dx$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } |\int_a^b \dots - \sum_{i=1}^n \dots| &= |\sum_{i=1}^n (\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx - \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2}(x_i - x_{i-1}))| = \\ &= |\sum_{i=1}^n -\frac{1}{2} \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'' \psi| = \frac{1}{2} \int_a^b |f''| \underbrace{\psi}_{\leq \frac{\delta^2}{4}} dx \leq \frac{\delta^2}{8} \int_a^b |f''| \end{aligned}$$

Подсказка: для прямоугольников $\psi = \begin{cases} (x - x_{i-1})^2, & x \in [x_{i-1}, t_i] \\ (x - x_i)^2, & x \in [t_i, x_i] \end{cases}$

Формула Эйлера-Маклорена

Пусть $f \in C^2[m, n]$, $m, n \in \mathbb{Z}$

$$\text{Тогда } \int_m^n f(x) dx = \sum_{i=m}^n {}^* f(i) - \frac{1}{2} \int_m^n f''(x) \{x\} (1 - \{x\}) dx$$

* – два крайних слагаемых – с коэффициентом $\frac{1}{2}$

$$\text{Т.е. } \sum_{i=m}^n {}^* f(i) = \frac{1}{2} f(m) + \sum_{i=m+1}^{n-1} f(i) + \frac{1}{2} f(n)$$

Доказательство

Из доказательства формулы для трапеции, где $\psi = (x - k)(k + 1 - x) = \{x\}(1 - \{x\})$

Пример

$p > -1$, $f(x) = x^p$

$$\text{Тогда } 1^p + \dots + n^p = \int_1^n x^p dx + \frac{1}{2} + \frac{n^p}{2} + \frac{p(p-1)}{2} \int_1^n x^{p-2} \{x\} (1 - \{x\}) dx =$$
$$\frac{n^{p+1}}{p+1} - \frac{1}{p+1} + \frac{1}{2} + \frac{n^p}{2} + O(\max(1, n^{p-1}))$$

Пояснение:

$$0 \leq \int_1^n x^{p-2} \{x\} (1 - \{x\}) dx \leq \int_1^n x^{p-2} dx = \frac{x^{p-1}}{p-1} \Big|_1^n = \frac{n^{p-1}}{p-1} - \frac{1}{p-1}$$

$$\text{При } p < 1 \quad \frac{n^{p-1}}{p-1} - \frac{1}{p-1} = O(1)$$

При $p > 1 \quad \frac{n^{p-1}}{p-1} - \frac{1}{p-1} = O(n^{p-1})$ *Замечание: при $p < -1$ слагаемые будут ограниченными, т.е. вся сумма будет $O(1)$*

Пример 2

$$f(x) = \frac{1}{x}$$

$$1 + \dots + \frac{1}{n} = \ln n + \frac{1}{2} + \frac{1}{2n} + \underbrace{\int_1^n \frac{1}{x^3} \{x\} (1 - \{x\}) dx}_{=: y_n, \text{возрастающая последовательность}}$$

y_n – возрастает

y_n – ограниченная

$$y_n \leq \frac{1}{4} \int_1^n \frac{1}{x^3} dx = \frac{1}{8} \left(-\frac{1}{x^2} \right) \Big|_1^n = \frac{1}{8} - \frac{1}{8n^2} < \frac{1}{8}$$

Тогда $1 + \dots + \frac{1}{n} = \ln n + \underbrace{\frac{1}{2} + \frac{1}{2n} + y_n}_{\text{имеет предел } \gamma \in [\frac{1}{2}, \frac{5}{8}]}$ $= \ln n + \gamma + o(1)$

$\gamma \approx 0.57 \dots$ – постоянная Эйлера

Пример 3

$$f(x) = \ln x$$

$$\ln 1 + \dots + \ln n = \int_1^n \ln x \, dx + \frac{\ln n}{2} - \underbrace{\frac{1}{2} \int_1^n \frac{1}{x^2} \{x\} (1 - \{x\}) \, dx}_{x_n} = n \ln n -$$

$$n + \frac{\ln n}{2} + x_n$$

x_n монотонная и ограниченная

Тогда $x_n \rightarrow C$

$$\text{Отсюда } n! = n^n e^{-n} \sqrt{n} e^{C+o(1)} \rightarrow C_1 n^n e^{-n} \sqrt{n}, C_1 = e^C$$

Найдем C_1

Формула Валлиса

$$I_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 x \, dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{n-1} x \sin x \, dx = - \underbrace{\sin^{n-1} \cos x}_0 \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} + (n-1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{n-2} x (1 -$$

$$\sin^2 x) \, dx = (n-1) I_{n-2} - (n-1) I_n$$

$$I_n = \frac{n-1}{n} I_{n-2}$$

$$I_0 = \frac{\pi}{2}, I_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin x \, dx = 1$$

$$I_n = \begin{cases} \frac{(n-1)!!}{n!!} \frac{\pi}{2}, & n - \text{четное} \\ \frac{(n-1)!!}{n!!}, & n - \text{нечетное} \end{cases}$$

$$\text{Рассмотрим на } [0, \frac{\pi}{2}] : \sin^{2k+1} x \leq \sin^{2k} x \leq \sin^{2k-1} x$$

$$\text{Проинтегрируем: } \frac{(2k)!!}{(2k+1)!!} \leq \frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \leq \frac{(2k-2)!!}{(2k-1)!!}$$

$$\underbrace{\left(\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \right)^2 \frac{1}{2k+1}}_{\alpha_k} \leq \frac{\pi}{2} \leq \underbrace{\frac{1}{2k} \left(\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \right)^2}_{\beta_k}$$

$$\beta_k - \alpha_k = \left(\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \right)^2 \left(\frac{1}{2k} - \frac{1}{2k+1} \right) = \underbrace{\left(\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \right)^2 \cdot \frac{1}{2k+1} \cdot \frac{1}{2k}}_{\leq \frac{\pi}{2}} \leq \frac{\pi}{2} \frac{1}{2k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

0

Тогда $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \frac{1}{k} = \pi$

Замечание

$$2b_k := (4k+3) \left(\frac{(2k)!!}{(2k+1)!!} \right)^2$$

$$2c_k := \frac{4}{4k+1} \left(\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \right)^2$$

Тогда $\alpha_k < \frac{b_k}{2} < \frac{c_k}{2} < \beta_k$

При этом $b_k \uparrow, c_k \downarrow$

$$c_k - b_k = c_k \frac{1}{4(2k+1)^2}$$

$$\pi = \frac{\prod_{k=1}^{+\infty} \left(1 + \frac{1}{4k^2-1}\right)}{\prod_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{4k^2-1}}$$

По формуле Валлиса $\sqrt{\pi} = \lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{2 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (2k)}{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k-1)} = \lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{(2^k k!)^2}{(2k)!} =$

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{(2^k k^k e^{-k} \sqrt{k})^2 C_1^2}{(2k)^{2k} e^{-2k} \sqrt{2k} C_1} = \frac{C_1}{\sqrt{2}}$$

Отсюда $C_1 = \sqrt{2\pi}$

Тогда $n! = n^n e^{-n} \sqrt{ne^{2\pi}}$ – формула Стирлинга

2 Выпуклость

Множество $A \subset \mathbb{R}^m$ называется выпуклым, если

$\forall x, y \in A \ [x, y] \subset A$,

где $[x, y] = \{x + t(y-x), y \in [0, 1]\} = \{\alpha x + (1-\alpha)y, \alpha \in [0, 1]\}$ – отрезок прямой, содержащей x, y

Определение

$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

Если $\forall x, y \in \langle a, b \rangle \ \forall \alpha \in [0, 1] \ f(\alpha x + (1-\alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1-\alpha)f(y)$, то f – выпуклая (выпуклая вниз) на $\langle a, b \rangle$

Если $\forall x, y \in \langle a, b \rangle \ \forall \alpha \in [0, 1] \ f(\alpha x + (1-\alpha)y) \geq \alpha f(x) + (1-\alpha)f(y)$, то f – вогнутая (выпуклая вверх) на $\langle a, b \rangle$

Примеры

e^x – выпуклая

x^2 – выпуклая

Замечание

f – выпуклая \Leftrightarrow любая хорда (отрезок, соединяющий две точки графика) расположена нестрого выше графика \Leftrightarrow надграфик выпуклый

Надграфиком f на $\langle a, b \rangle$ называется $\{(x, y) : x \in \langle a, b \rangle, y \geq f(x)\}$

Определение

$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

Если $\forall x, y \in \langle a, b \rangle \forall \alpha \in (0, 1) f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y)$, то f – строго выпуклая/вогнутая на $\langle a, b \rangle$

Лемма о трех хордах

$f : \langle a, b \rangle \rightarrow \mathbb{R}$

Тогда эквивалентны:

1. f выпуклая на $\langle a, b \rangle$

$$2. \forall x_1 < x_2 < x_3 \in \langle a, b \rangle \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}$$

Доказательство \Rightarrow

Докажем первое неравенство

$$x_2 = \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1} x_1 + \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} x_3$$

$$\text{Тогда неравенство } 1 \Leftrightarrow f(x_2) \leq f(x_1) \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1} + f(x_3) \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}$$

При $\alpha = \frac{x_3 - x_2}{x_3 - x_1}, 1 - \alpha = \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}$ получаем знакомое неравенство

Второе неравенство аналогично

Доказательство \Leftarrow

Очевидно из предыдущего доказательства

Следствие

f строго выпукла \Leftrightarrow строгое неравенство в теореме

Замечание

Если f, g – выпуклые на $\langle a, b \rangle$, то $f + g$ – выпуклая

f – выпуклая, то $-f$ – вогнутая

Теорема об односторонней дифференцируемости выпуклой функции

f – выпуклая на $\langle a, b \rangle$

Тогда $\forall x \in \langle a, b \rangle \exists f'_+(x), f'_-(x)$ – конечные

$$\text{и } \forall x_1, x_2 \in (a, b), x_1 \leq x_2 \quad f'_-(x_1) \leq f'_+(x_1) < \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq f'_-(x_2) \leq$$

$$f'_+(x_2)$$

Доказательство

Сделать предельный переход в лемме о 3 хордах

$$g(\xi) := \frac{f(\xi) - f(x_1)}{\xi - x_1}, \xi \in (a, b) \setminus \{x_1\}$$

$g(\xi) \uparrow$ по лемме о 3 хордах

При $\xi \in (x_1, x_2)$

Т.к. функция монотонна, $\exists \lim_{\xi \rightarrow x_1+0} g(\xi)$

Возьмем $\xi_0 \leq \xi_1 < x_1 < \xi_2 < \xi_3 < x_2 < \xi_4 \leq \xi_5$

Из лемм о трех хордах(средние неравенства) и монотонности(крайние неравенства):

$$\frac{f(\xi_0) - f(x_1)}{\xi_0 - x_1} \leq \frac{f(\xi_1) - f(x_1)}{\xi_1 - x_1} \leq \frac{f(\xi_2) - f(x_1)}{\xi_2 - x_1} \leq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(\xi_3) - f(x_2)}{\xi_3 - x_2} \leq \frac{f(\xi_4) - f(x_2)}{\xi_4 - x_2} \leq \frac{f(\xi_5) - f(x_2)}{\xi_5 - x_2}$$

Пусть $\xi_1 \rightarrow x_1 - 0, \xi_2 \rightarrow x_1 + 0, \xi_3 \rightarrow x_2 - 0, \xi_4 \rightarrow x_2 + 0$

Отсюда $C_0 \leq f'_-(x_1) \leq f'_+(x_1) \leq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq f'_-(x_2) \leq f'_+(x_2) \leq C_5$,

где $C_0 = \frac{f(\xi_0) - f(x_1)}{\xi_0 - x_1}, C_5 = \frac{f(\xi_5) - f(x_2)}{\xi_5 - x_2}$

Отсюда производные конечные(ограничены C_0 и C_5)

Воспоминания о прошлом семестре

Если $\exists f'_+(x_0)$, то f – непрерывна справа в x_0

Следствие

f – выпуклая на $\langle a, b \rangle$

Тогда она непрерывна на (a, b)

(т.к. у нее есть левосторонние и правосторонние производные, то она непрерывна слева и справа, т.е. непрерывна)

Контр-пример для $[a, b]$

$$f(1) = 2$$

$$f(-1) = 2$$

$$f(x) = x^2, x \in (a, b)$$

Функция выпукла, но не непрерывна на $[a, b]$

Теорема

f – дифференцируема на $\langle a, b \rangle$

Тогда f – выпуклая вниз на $\langle a, b \rangle \Leftrightarrow$ график расположен не ниже любой касательной, т.е. $\forall x_0, x \in \langle a, b \rangle f(x) \geq f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$

Доказательство \Rightarrow

Требуемое неравенство есть в предыдущей теореме

Доказательство \Leftarrow

Возьмем $x_1 < x_0 < x_2$

Тогда
$$\frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \leq f'(x_0) \leq \frac{f(x_2) - f(x_0)}{x_2 - x_0}$$

По лемме о трех хордах f – выпуклая

Определение

Пусть имеется выпуклая фигура $A \subset \mathbb{R}^2$

$b \in A$ – граничная точка

Прямая $l : b \in l$ – опорная прямая, если A полностью содержится в одной из полуплоскостей, образованных прямой

Утверждение

f – выпуклая на $\langle a, b \rangle$

Тогда $\forall x \in \langle a, b \rangle$ через $(x, f(x))$ можно провести опорную прямую к над-графику f

(для $x \in (a, b)$ есть односторонняя дифференцируемость, можем провести одностороннюю касательную)

(для $x = a$ и $x = b$ можем провести вертикальные прямые или касательные, если односторонние производные есть и конечны)

Утверждение 2

Если $A \subset \mathbb{R}^2$ – замкнутая и ограниченная выпуклая фигура, то через каждую граничную точку можно провести опорную прямую

Доказательство

Возьмем точку b

Докажем, что для нее можно провести опорную прямую

Для этого выберем оси X, Y так, чтобы проекция b на X была внутренней точкой проекции фигуры на X

Теперь определим функцию $f(x) := \inf(y : (x, y) \in A)$ – нижнюю часть границы фигуры

Данная функция выпуклая, а значит в точке b к ней можно провести опорную прямую

Замечание

f – выпуклая на $\langle a, b \rangle$

Тогда f дифференцируема на $\langle a, b \rangle$ всюду, кроме не более чем счетного множества точек (возможно, пустого)

Доказательство

Пусть E – множество точек, где не существует производной

Но существуют $f'_-(x) < f'_+(x)$

Тогда $\forall x_1 < x_2 \in E \quad f'_-(x_1) < f'_+(x_1) \leq f'_-(x_2) < f'_+(x_2)$

Тогда для $x \in E$ построим отображение $q(x) \in (f'_-(x), f'_+(x)) \cap \mathbb{Q}$

$q : E \rightarrow \mathbb{Q}$ – инъекция

Отсюда E не более чем счетно

Теорема (дифференциальный критерий выпуклости)

1. f – непрерывна на $\langle a, b \rangle$, дифференцируема на (a, b)

Тогда f – выпукла (строго выпукла) $\Leftrightarrow f'$ возрастает (строго возрастает) **Доказательство** \Rightarrow

По теореме об односторонней дифференцируемости $f'_-(x_1) \leq f'_-(x_2)$ при $x_1 < x_2$

($f'_- = f'$ из дифференцируемости)

Знак строгий, если f строго выпукла (смотри доказательство теоремы)

Доказательство \Leftarrow

Проверим лемму о трех хордах

$x_1 < x_2 < x_3$

Тогда $\frac{f(x_1) - f(x_2)}{x_1 - x_2} = f'(\xi_1), x_1 < \xi_1 < x_2$ – по т. Лагранжа

$\frac{f(x_2) - f(x_3)}{x_2 - x_3} = f'(\xi_2), x_2 < \xi_2 < x_3$

Из возрастания $f'(\xi_1) \leq f'(\xi_2)$ (при строгом возрастании знак $<$)

2. f – непрерывна на $\langle a, b \rangle$, дважды дифференцируема на (a, b)

Тогда f – выпукла $\Leftrightarrow f'' \geq 0$

Доказательство

f' – возрастает $\Leftrightarrow f'' \geq 0$

Пример 1

При $x \in (0, \frac{\pi}{2})$ $\sin x \geq \frac{2}{\pi}x$

При $x = 0 \vee x = \frac{\pi}{2}$ достигается равенство

Доказательство

$(\sin x)' = \cos x$ – строго убывает на промежутке

Тогда функция строго вогнутая на промежутке

Отсюда значение функции строго выше хорды, соединяющей $(0, 0)$ и

$(\frac{\pi}{2}, 1)$ (ее уравнение $y = \frac{2}{\pi}x$)

3 Верхний и нижний предел

Определение

Частичный предел последовательности = предел вдоль подпоследовательности

Пример

$$x_n = (-1)^n$$

$-1, 1$ – частичные пределы x_n

Пример

$$\forall a \in [-1, 1] \exists n_k : \sin n_k \rightarrow a$$

Определение 2

x_n – вещественная последовательность

$y_n = \sup(x_n, x_{n+1}, \dots) \in \overline{\mathbb{R}}$ – верхняя огибающая

$z_n = \inf(x_n, x_{n+1}, \dots) \in \overline{\mathbb{R}}$ – нижняя огибающая

Верхний предел $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n$

Нижний предел $\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n = \liminf_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} z_n$

Замечание

1. $y_n \geq y_{n+1} \geq \dots, z_n \leq z_{n+1} \leq \dots$
2. $\forall n \ z_n \leq x_n \leq y_n$
3. При изменении конечного числа x_n изменяется конечное число y_n, z_n

Пример

1. $x_n = (-1)^n$
 $\overline{\lim} x_n = 1, \underline{\lim} x_n = -1$
2. $x_n = (1 + (-1)^n)n$
 $\overline{\lim} x_n = +\infty, \underline{\lim} x_n = 0$

Свойства

1. $\underline{\lim} x_n \leq \overline{\lim} x_n$
2. $x_n \leq \tilde{x}_n$
Тогда $\overline{\lim} x_n \leq \overline{\lim} \tilde{x}_n$
 $\underline{\lim} x_n \leq \underline{\lim} \tilde{x}_n$

$$3. \forall \lambda \geq 0 \ (0 \cdot \infty =: 0)$$

$$\overline{\lim} \lambda x_n = \lambda \overline{\lim} x_n$$

$$\underline{\lim} \lambda x_n = \lambda \underline{\lim} x_n$$

$$4. \forall \lambda < 0$$

$$\overline{\lim} \lambda x_n = -\lambda \underline{\lim} x_n$$

$$\underline{\lim} \lambda x_n = -\lambda \overline{\lim} x_n$$

$$5. \overline{\lim}(x_n + \tilde{x}_n) \leq \overline{\lim} x_n + \overline{\lim} \tilde{x}_n$$

$$\underline{\lim}(x_n + \tilde{x}_n) \geq \underline{\lim} x_n + \underline{\lim} \tilde{x}_n$$

(если сумма в правой части имеет смысл)

$$6. t_n \rightarrow l \in \mathbb{R}$$

$$\text{Тогда } \overline{\lim}(x_n + t_n) = \overline{\lim} x_n + l$$

Доказательство

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_0 \forall k > N_0 \ x_k + l - \varepsilon < x_k + t_k < x_k + l + \varepsilon$$

Возьмем $\sup_{k \geq N}$ для некоего $N > N_0$

$$y_N + l - \varepsilon < \sup_{k \geq N} (x_k + t_k) < y_N + l + \varepsilon \text{ Возьмем предел } N \rightarrow +\infty$$

$$\overline{\lim} x_n + l - \varepsilon \leq \overline{\lim}(x_k + t_k) \leq \overline{\lim} x_n + l + \varepsilon$$

$$7. t_n \rightarrow l > 0, l \in \mathbb{R}$$

$$\text{Тогда } \overline{\lim} t_n x_n = l \overline{\lim} x_n$$

Техническое описание верхнего предела

$$1. \overline{\lim} x_n = +\infty \Leftrightarrow x_n - \text{ не ограничено сверху}$$

$$2. \overline{\lim} x_n = -\infty \Leftrightarrow x_n \rightarrow -\infty$$

$$3. \overline{\lim} x_n = l \in \mathbb{R} \Leftrightarrow A + B$$

$$A : \forall \varepsilon > 0 \exists N : \forall n > N \ x_n < l + \varepsilon$$

$$B : \forall \varepsilon > 0 \forall N \exists n > N : l - \varepsilon < x_n$$

Доказательство 1

Очевидно в обе стороны

Доказательство 2 \Rightarrow

$$x_n \leq y_n \rightarrow -\infty \Rightarrow x_n \rightarrow -\infty$$

Доказательство 2 \Leftarrow

$$x \rightarrow -\infty \Leftrightarrow \forall A \exists N : \forall n > N \ x_n < A \text{ (а значит } y_n \leq A)$$

Отсюда $y_n \rightarrow -\infty$

Доказательство 3 \Rightarrow

$$y_n \downarrow, l = \lim y_n = \inf y_n$$

Возьмем $\varepsilon > 0$

$$\text{Тогда } \exists N : y_N < l + \varepsilon \Rightarrow \forall n > N x_n < l + \varepsilon$$

Отсюда A – доказано

$$\forall N y_n > l - \varepsilon \Rightarrow \exists n > N : l - \varepsilon < x_n \leq y_N$$

Доказательство 3 \Leftarrow

$$A \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N : \forall n \geq N y_n \leq l + \varepsilon$$

$$B \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N : \forall n \geq N l - \varepsilon \leq y_n$$

Отсюда $y_n \rightarrow l$

Теорема

$$(x_n) \in \mathbb{R}$$

$$\text{Тогда } \exists \lim x_n \in \overline{\mathbb{R}} \Leftrightarrow \overline{\lim} x_n = \underline{\lim} x_n (= \lim x_n)$$

Доказательство \Rightarrow

$$1. \lim x_n = +\infty \Rightarrow \underline{\lim} x_n = +\infty \leq \overline{\lim} x_n$$

$$2. \lim x_n = -\infty \Rightarrow \overline{\lim} x_n = -\infty \geq \underline{\lim} x_n$$

$$3. \lim x_n = l \in \mathbb{R}$$

$$\text{Тогда из А и В } \overline{\lim} x_n = \underline{\lim} x_n = l$$

Доказательство \Leftarrow

$$z_n \leq x_n \leq y_n$$

$$\text{Тогда } \underline{\lim} x_n \leq \lim x_n \leq \overline{\lim} x_n$$

Теорема о характеристизации частичных пределов

$$(x_n) \in \mathbb{R}$$

1. Если l – частичный предел x_n (существует по принципу выбора Больцано-Вейерштрасса), то $\underline{\lim} x_n \leq l \leq \overline{\lim} x_n$

Доказательство

$$z_{n_k} \leq x_{n_k} \leq y_{n_k}, k \rightarrow +\infty$$

$$\underline{\lim} x_n \leq l \leq \overline{\lim} x_n$$

2. $\exists x_{n_k} \rightarrow \overline{\lim} x_n, \exists x_{m_k} \rightarrow \underline{\lim} x_n$

Доказательство для $\overline{\lim} x_n$

Если $\overline{\lim} x_n = +\infty$, то x_n не ограничена сверху

Если $\overline{\lim} x_n = -\infty$, то $\lim x_n = -\infty$

Если $\overline{\lim} x_n = l$, то по А, В:

$$\forall k \in \mathbb{N} \exists n_k : l - \frac{1}{k} < x_{n_k} < l + \frac{1}{k}$$

Будем выбирать $n_{k+1} > n_k$

Тогда $x_{k_k} \rightarrow l$

Пример

$\overline{\lim} \sin n = 1, \underline{\lim} \sin n = -1$

$\forall l \in (-1, 1) \exists n_k : \sin n_k \rightarrow l$

Замечание

И множество $\{\sin n, n \in \mathbb{N}\}$ плотно на $[-1, 1]$

Доказательство

$\pi \notin \mathbb{Q} \Rightarrow \forall m, n \in \mathbb{N}, m \neq n \sin n \neq \sin m$

Т.е. невозможно $n = m + 2\pi k, \pi - m + 2\pi k, k \in \mathbb{Z}$

Будем двигаться по окружности с шагом $l_1 = 1$

Движение с шагом $6l_1$ равносильно движению с шагом $l_2 := |6l_1 - 2\pi|$ в противоположную сторону

Т.о. мы научились двигаться с шагом l_2

Будем по индукции уменьшать l_i

Пусть $|ml_i| < 2\pi, |(m+1)l_i| > 2\pi, m \in \mathbb{N}$

Тогда $l_{i+1} := \min(2\pi - ml_i, (m+1)l_i - 2\pi)$

Заметим, что т.к. $2\pi \in (ml_i, (m+1)l_i)$, то $l_{i+1} \leq \frac{l_i}{2}$

Рассмотрим отрезок в $[-1, 1]$

Ему соответствует отрезок $[a, b], a, b \in [0, 2\pi)$ на окружности

Пусть $l = b - a$

Подберем $l_k < l$

Тогда для некоторого $q \in \mathbb{N} ql_k \in [a, b]$

Т.о. $\sin ql_k$ будет лежать в нашем отрезке. Отсюда $\sin n$ плотно в $[-1, 1]$

Докажем, что $\forall \alpha \in [-1, 1] \exists q_i : \lim q_i \rightarrow \alpha$

Возьмем некоторую окрестность α

Будем генерировать последовательность, лежащую в этой окрестности, и сдвигать границу

4 Несобственный интеграл

Определение

1. $f : [a, b) \rightarrow \mathbb{R}, -\infty < a < b \leq +\infty$ — допустимая, если $\forall A \in (a, b) f \Big|_{[a, A]}$ — кусочно непрерывная

$$2. \Phi(A) = \int_a^A f(x) dx$$

Если $\exists \lim_{A \rightarrow b-0} \Phi(A) \in \overline{\mathbb{R}}$, то он называется несобственным интегралом f на $[a, b)$

Отображение: $\int_a^{\rightarrow b} f(x) dx$

Если $\nexists \lim \Phi(A)$ – несобственный интеграл не существует

Если $\lim_{A \rightarrow b-0} \Phi(A)$ – конечный, то интеграл сходится

Если $\lim_{A \rightarrow b-0} = \infty$ – интеграл расходится

Аналогично определяем $\int_{\rightarrow a}^b f(x) dx$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f := \int_{-\infty}^c f + \int_c^{+\infty} f$$

Пример

$$\int_1^{+\infty} \frac{1}{x} dx = \lim_{A \rightarrow +\infty} \int_1^A \frac{1}{x} dx = \lim_{A \rightarrow +\infty} \ln A = +\infty$$

Пример

$$\int_{\rightarrow 0}^1 \frac{1}{x} dx = \lim_{A \rightarrow +0} \ln A = +\infty$$

$$f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}, -\infty \leq a < b \leq +\infty$$

$$x_1 < \dots < x_n \in (a, b), n - \text{нечетное}$$

Пусть f допустимо на каждом из промежутков $(a, x_1], [x_1, x_2), (x_2, x_3], [x_3, x_4), \dots, [x_n, b)$

Тогда $\int_a^b f = \int_{\rightarrow a}^{x_1} f + \int_{x_1}^{\rightarrow x_2} f + \int_{\rightarrow x_2}^{x_3} f + \dots + \int_{x_n}^{\rightarrow b} f$

Если хотя бы один интеграл не существует или сумма некорректная (есть $+\infty$ и $-\infty$), то интеграл расходится

Пример

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx = \underbrace{\int_{-1}^{\rightarrow 0} \frac{1}{x} dx}_{-\infty} + \underbrace{\int_{\rightarrow 0}^1 f}_{+\infty}$$

Данный интеграл расходится

Свойства

1. Критерий Больцано-Коши о сходимости несобственного интеграла

$$f - \text{допустимая на } [a, b) \quad -\infty < a < b \leq +\infty$$

Тогда $\int_a^{\rightarrow b} f$ – сходится $\Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists \delta \in (a, b) : \forall A, B \in (\delta, b) \mid \left| \int_A^B f \right| < \varepsilon$

Доказательство

$\exists \lim_{R \rightarrow b-0} \Phi(R) \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists \delta \in (a, b) \forall A, B \in (\delta, b) \mid |\Phi(A) - \Phi(B)| < \varepsilon$ – критерий Больцано-Коши

$\int f$ – расходится $\Rightarrow \exists A_n, B_n \rightarrow b-0 : \int_{A_n}^{B_n} f \not\rightarrow 0$

Пример

$\int_1^{+\infty} \frac{1}{x} dx, A_n = n, B_n = 2n$

Тогда $\int_n^{2n} \frac{1}{x} dx \geq \frac{1}{2n}n = \frac{1}{2}$ – расходится

Пример

$\int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx, A_n = \frac{1}{2n}, B_n = \frac{1}{n}$

$\int_{\frac{1}{2n}}^{\frac{1}{n}} \frac{1}{x} dx \geq 2n \frac{1}{2n} = 1$

2. Аддитивность по промежутку

f – допустима $[a, b), c \in (a, b)$

Тогда $\int_a^{\rightarrow b} f, \int_c^{\rightarrow b} f$ сходятся/расходятся одновременно

И в случае сходимости $\int_a^{\rightarrow b} f = \int_a^c f + \int_c^{\rightarrow b} f$

Следствие

Если $\int_a^{\rightarrow b} f$ – сходится, то $\int_A^{\rightarrow b} f \xrightarrow{A \rightarrow b-0} 0$

3. f, g – допустимы на $[a, b), \int_a^{\rightarrow b} f, \int_a^{\rightarrow b} g$ – сходятся, $\lambda \in \mathbb{R}$

Тогда $\lambda f, f \pm g$ – допустимы $\int_a^{\rightarrow b} \lambda f = \lambda \int_a^{\rightarrow b} f, \int_a^{\rightarrow b} (f+g) = \int_a^{\rightarrow b} f +$

$\int_a^{\rightarrow b} g$

4. $\int_a^{\rightarrow b} f, \int_a^{\rightarrow b} g$ – существуют в $\overline{\mathbb{R}}, f \leq g$

Тогда $\int_a^{\rightarrow b} f \leq \int_a^{\rightarrow b} g$

5. f, g – дифференцируемые на $[a, b)$
 f', g' – допустимые на $[a, b)$

Тогда* $\int_a^{\rightarrow b} f g' = f g \Big|_a^{\rightarrow b} - \int_a^{\rightarrow b} f' g$, где $f g \Big|_a^{\rightarrow b} = (\lim_{B \rightarrow b-0} f g(b)) - f(a)$

* – если здесь существуют два предела из трех, то существует и третье и равенство выполняется