

Несобственные интегралы

Определение. $f : [a, b) \rightarrow \mathbb{R} \quad -\infty < a < b \leq +\infty$

f допустима, если f — кусочно-непрерывна на $[a, A] \quad \forall A \in (a, b)$

Определение.

$$\Phi(A) := \int_a^A f$$

$$? \exists \lim_{A \rightarrow b-0} \Phi(A)$$

- Если да, то это **несобственный интеграл** $\int_a^b f dx$.
- Если этот предел конечный, то тот несобственный интеграл **сходится**.
- Если этот предел бесконечный или не существует, то несобственный интеграл **расходится**.

Пример.

$$\begin{aligned} \int_1^{+\infty} \frac{1}{x^p} dx &= \lim_{A \rightarrow \infty} \int_1^A \frac{1}{x^p} dx \\ \int_1^A \frac{1}{x^p} dx &= \begin{cases} \frac{A^{1-p} - 1^{1-p}}{1-p}, & p \neq 1 \\ \ln A - \ln 1, & p = 1 \end{cases} \\ \lim_{A \rightarrow \infty} \int_1^A \frac{1}{x^p} dx &= \begin{cases} \frac{1}{p-1}, & p > 1 \\ +\infty, & p < 1 \\ +\infty, & p = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

$p > 1$ — интеграл сходится, $p \leq 1$ — интеграл расходится.

Пример.

$$\begin{aligned} \int_{\rightarrow 0}^1 \frac{1}{x^p} dx \\ \lim_{A \rightarrow \infty} \int_A^1 \frac{1}{x^p} dx &= \begin{cases} \text{кон.}, & p < 1 \\ +\infty, & p \geq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Можно разбивать интеграл с > 1 причиной несобственности на части, где только одна причина:

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{x^p} dx = \int_0^{10} + \int_{10}^{+\infty}$$

Если все интегралы в правой части сходятся, то в левой части тоже.

Пример.

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx = \int_{-1}^0 \frac{1}{x} dx + \int_0^1 \frac{1}{x} dx$$

$$\int_{-1}^0 \frac{1}{x} dx = -\infty \quad \int_0^1 \frac{1}{x} dx = +\infty$$

Итого $\int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx$ расходится. Хочется сократить бесконечности, особенно если посмотреть на график $\frac{1}{x}$ — он симметричен. Кажется, что $\int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx = 0$. Однако мы все равно считаем этот интеграл расходящимся. Это можно обосновать так: если нагреть одну сторону стула до +200 градусов, а другую охладить до -170, то вы не захотите на нем сидеть, хотя средняя температура адекватная.

Свойства

Критерий Больцано-Коши

$$\lim_{A \rightarrow b-0} \int_a^A \text{кон.} \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \Delta \in (a, b) \quad \forall A, B \in (\Delta, b) \quad \left| \int_A^B f \right| < \varepsilon$$

Доказательство. Тривиально из определения предела. □

Следствие. Если $\exists A_n, B_n \rightarrow b-0$ $\int_{A_n}^{B_n} f \xrightarrow{\eta \rightarrow +\infty} 0$, то $\int_a^b f$ расходится.

Пример.

$$\int_1^{+\infty} \sin \sqrt{x} dx$$

Это синусоида с увеличивающимся периодом.

Чтобы доказать, что интеграл расходится, возьмём A_n, B_n такие что $\int_{A_n}^{B_n} \sin \sqrt{x} dx \xrightarrow{\eta \rightarrow +\infty} 0$.

$$A_n := \left(2\pi n + \frac{\pi}{6}\right)^2 \quad B_n := \left(2\pi(n+1) - \frac{\pi}{6}\right)^2$$

$$\int_{A_n}^{B_n} \sin \sqrt{x} dx \geq \frac{1}{2}(B_n - A_n) \rightarrow \infty$$

Аддитивность по промежутку

f — допустима. $[a, b] \quad c \in (a, b)$

Тогда $\int_a^{b-0} f$ и $\int_c^{b-0} f$ — сходятся/расходятся одновременно и, если сходятся, $\int_a^{b-0} f = \int_a^c f + \int_c^{b-0} f$

Берем $A > c$ $\int_a^A = \int_a^c + \int_c^A$

Следствие. f — допустима. $[a, +\infty)$, $\int_a^{+\infty} f$ — сходится. Тогда

$$\int_A^{+\infty} f \xrightarrow{A \rightarrow +\infty} 0$$

Это называется “хвост”.

Линейность

f, g — допустима $\int_a^{\rightarrow b} f, \int_a^{\rightarrow b} g$ — сход.

$\lambda \in \mathbb{R}$

Тогда $\lambda f, f \pm g$ — допустима и $\int_a^{\rightarrow b} \lambda f, \int_a^{\rightarrow b} f \pm g$ — сходятся.

$$\int_a^{\rightarrow b} \lambda f = \lambda \int_a^{\rightarrow b} f \quad \int_a^{\rightarrow b} f \pm g = \int_a^{\rightarrow b} f \pm \int_a^{\rightarrow b} g$$

Доказательство. Тривиально. □

Интегрирование неравенств

f, g — доп., $\int_a^{\rightarrow b} f, \int_a^{\rightarrow b} g$ — существуют в $\overline{\mathbb{R}}$

$f \leq g$ на $[a, b)$. Тогда

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

Очевидно: $\int_a^A f \leq \int_a^A g, A \rightarrow b - 0$

Интеграл произведения

f, g — дифф. $[a, b)$; f', g' — допустимы. Это эквивалентно $f, g \in C^1[a, b)$.

Тогда*

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

* значит, что если два из трех пределов существуют, то существует третий и выполняется равенство.

Интеграл композиции

$$\varphi : [\alpha, \beta) \rightarrow \langle A, B \rangle, \varphi \in C^1$$

$$f : \langle A, B \rangle \rightarrow \mathbb{R}, f - \text{непр.}, \exists \varphi(\beta - 0) \in \overline{\mathbb{R}}$$

Тогда*

$$\int_{\alpha}^{\rightarrow \beta} f(\varphi(t))\varphi'(t)dt = \int_{\varphi(\alpha)}^{\rightarrow \varphi(\beta-0)} f(x)dx$$

Примечание. f — кусочно непрерывна на $[a, b]$. f можно также рассматривать на $[a, b)$.

Тогда

$$\int_a^{\rightarrow b} f = \int_a^b f$$

Упраздняем “ \rightarrow ”.

Признаки сходимости несобственных интегралов

$$f - \text{допустима на } [a, b), f \geq 0, \Phi(A) = \int_a^A f dx$$

$$\int_a^b f - \text{сходится} \Leftrightarrow \Phi \text{ ограничена.}$$

$$\text{Доказательство. } \int_a^b f - \text{сх.} \Leftrightarrow \lim_{A \rightarrow b-0} \Phi(A) \text{ кон.} \Leftrightarrow \Phi - \text{огр.} \quad \square$$

Лемма 1. Признак сравнения:

$$f, g \geq 0, \text{ допустимы на } [a, b)$$

1. $f \leq g$ на $[a, b)$. Тогда:

$$(a) \int_a^b g - \text{сходится} \Rightarrow \int_a^b f - \text{сходится}$$

$$(b) \int_a^b f - \text{расходится} \Rightarrow \int_a^b g - \text{расходится}$$

$$2. \exists \lim_{x \rightarrow b-0} \frac{f(x)}{g(x)} = l < +\infty :$$

$$(a) \int_a^b g - \text{сходится} \Rightarrow \int_a^b f - \text{сходится}$$

$$(b) \int_a^b f - \text{расходится} \Rightarrow \int_a^b g - \text{расходится}$$

$$\text{Доказательство. } 1. \Phi(A) := \int_a^A f, \Psi(A) = \int_a^A g$$

$$0 \leq \Phi(A) \leq \Psi(A)$$

$$(a) \int_a^b g - \text{сходится} \Rightarrow \Psi \text{ огр.} \Rightarrow \Phi \text{ огр.} \Rightarrow \int_a^b f - \text{сходится}$$

$$(b) \int_a^b f - \text{расходится} \Rightarrow \Phi \text{ неогр.} \Rightarrow \Psi \text{ неогр.} \Rightarrow \int_a^b g - \text{расходится}$$

2. $l < +\infty \xRightarrow{\text{def}} \exists a_1 : \forall x > a_1 \quad 0 \leq \frac{f(x)}{g(x)} \leq l + 1 \Rightarrow f(x) \leq g(x)(l + 1)$, дальше тривиально (предположительно по пункту 1.)

□

Примечание. $l > 0$:

$$\exists a_2 : \forall x > a_2 \quad \frac{l}{2} < \frac{f(x)}{g(x)}$$

1. $\int_a^b f - \text{сходится} \Rightarrow \int_a^b g - \text{сходится}$

2. $\int_a^b g - \text{расходится} \Rightarrow \int_a^b f - \text{расходится}$

Следствие. Если $+\infty > l > 0$, то:

1. $\int_a^b f - \text{сходится} \Leftrightarrow \int_a^b g - \text{сходится}$

2. $\int_a^b f - \text{расходится} \Leftrightarrow \int_a^b g - \text{расходится}$

Пример.

$$\int_0^{+\infty} \frac{\cos^2 x}{1+x^2} dx \text{ сходится?}$$

С трюком:

$$\frac{\cos^2 x}{1+x^2} \leq \frac{1}{1+x^2} \quad \int_0^{+\infty} \frac{1}{1+x^2} = \arctan \Big|_0^{+\infty} = \frac{\pi}{2}$$

Более цинично:

$$\frac{\cos^2 x}{1+x^2} \leq \frac{1}{x^2} \text{ на } [2020, +\infty)$$

$$\int_{2020}^{+\infty} \frac{1}{x^2} \text{ сходится} \Rightarrow \int_{2020}^{+\infty} f \text{ сходится}$$

Пример. Этот пример будет на экзамене.

При каких α и β сходится:

$$\int_{10}^{+\infty} \frac{dx}{x^\alpha (\ln x)^\beta}$$

Мы знаем, что $\int_1^\infty \frac{dx}{x^p}$ сходится при $p > 1$ и расходится при $p \leq 1$.

При $\alpha > 1, \beta > 0$

$$\frac{1}{x^\alpha (\ln x)^\beta} < \frac{1}{x^\alpha}$$

Таким же образом можно еще что-то выяснить, но мы так делать не будем. Вместо этого воспользуемся методом “удавливание логарифма”

$$1. \alpha > 1 \quad \alpha = 1 + 2a, a > 0$$

$$0 \leq \frac{1}{x^{1+2a}(\ln x)^\beta} = \frac{1}{x^{1+a}} \cdot \frac{1}{x^a(\ln x)^\beta}$$

$$\beta \geq 0 \quad x^a(\ln x)^\beta \rightarrow +\infty$$

$$b := -\beta \quad \beta < 0 \quad x^a(\ln x)^\beta = \frac{x^a}{(\ln x)^b} = \left(\frac{x^{\frac{a}{b}}}{\ln x}\right)^b \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \left[\frac{\infty}{\infty}\right] \xrightarrow{\text{лопитель}} \frac{\frac{a}{b}x^{\frac{a}{b}-1}}{\frac{1}{x}} \rightarrow +\infty$$

$$x^a(\ln x)^\beta \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} +\infty \Rightarrow \frac{1}{x^{1+a}} \cdot \frac{1}{x^a(\ln x)^\beta} < \frac{1}{x^{1+a}} - \text{сходится}$$

$$2. \alpha < 1 \quad \alpha = 1 - 2a, a > 0$$

$$\frac{1}{x^{1-2a}(\ln x)^\beta} = \frac{1}{x^{1-a}} \cdot \frac{x^a}{(\ln x)^\beta} > \frac{1}{x^{1-a}}$$

$$3. \alpha = 1$$

$$\int_{10}^{+\infty} \frac{dx}{x(\ln x)^\beta} \stackrel{y=\ln x}{=} \int_{\ln 10}^{+\infty} \frac{dy}{y^\beta}$$

Сходится при $\beta > 1$, расходится при $\beta \leq 1$

Гамма-функция Эйлера

Γ — гамма-функция Эйлера

$$\Gamma(t) = \int_0^{+\infty} x^{t-1} e^{-x} dx$$

Область определения

$$1. \int_1^{+\infty} x^{t-1} e^{-x} dx - \text{сходится при всех } t \in \mathbb{R}^+:$$

$$\int_1^{+\infty} e^{-x} dx = -e^{-x} \Big|_1^{+\infty} = e$$

$$0 \leq x^{t-1} e^{-x} \leq x^{t-1} e^{-\frac{x}{2}} e^{-\frac{x}{2}}$$

$$x^{t-1} e^{-\frac{x}{2}} \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} 0 \Rightarrow \text{при больших } x \quad x^{t-1} e^{-\frac{x}{2}} e^{-\frac{x}{2}} \leq e^{-\frac{x}{2}}$$

$$2. \int_0^1 x^{t-1} e^{-x} dx$$

$$x^{t-1} e^{-x} \underset{x \rightarrow 0}{\sim} x^{t-1} \quad t > 0 \text{ сходится, } t \leq 0 \text{ расходится}$$

Выпуклость

Подынтегральное выражение как функция от t является выпуклой функцией (при $x \geq 0$)

$$\begin{aligned} t &\mapsto x^{t-1}e^{-x} = f_x(t) \\ f(\alpha t_1 + (1-\alpha)t_2) &\leq \alpha f_x(t_1) + (1-\alpha)f_x(t_2) \\ \int_0^{+\infty} f_x dx &\leq \alpha \int_0^{+\infty} f_x(t_1) dx + (1-\alpha) \int_0^{+\infty} f_x(t_2) dx \end{aligned}$$

Определение выпуклости:

$$x^{(\alpha t_1 + (1-\alpha)t_2)-1} e^{-x} \leq \alpha x^{t_1-1} e^{-x} + (1-\alpha) x^{t_2-1} e^{-x}$$

Зафиксируем α, t_1, t_2 . Проинтегрируем по x от 0 до $+\infty$:

$$\Gamma(\alpha t_1 + (1-\alpha)t_2) \leq \alpha \Gamma(t_1) + (1-\alpha)\Gamma(t_2)$$

Γ — выпуклая $\Rightarrow \Gamma$ — непрерывная

Третье свойство

$$\Gamma(t+1) = t\Gamma(t)$$

$$\Gamma(t+1) = \int_0^{+\infty} x^t e^{-x} dx = -x^t e^{-x} \Big|_0^{+\infty} + t \int_0^{+\infty} x^{t-1} e^{-x} dx = 0 + t\Gamma(t)$$

Следствие. $\Gamma(n+1) = n!$

Доказательство.

$$\Gamma(n+1) = n\Gamma(n) = n(n-1)\Gamma(n-1) = \dots = n(n-1) \cdots 1\Gamma(1) = n!$$

□

Четвертое свойство

$$\Gamma(t) = \frac{\Gamma(t+1)}{t} \underset{t \rightarrow +0}{\sim} \frac{1}{t}$$

Пятое свойство

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{x}} e^{-x} dx \stackrel{x=y^2}{=} 2 \int_0^{+\infty} e^{-y^2} dy = 2 \frac{1}{2} \sqrt{\pi} - \text{интеграл Эйлера-Пуассона}$$

Доказательство.

$$1 - x^2 \leq e^{-x^2} \leq \frac{1}{1 + x^2} \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

Оба неравенства следуют из неравенства $e^t \geq 1 + t \quad \forall t$.

Зафиксируем $n \in \mathbb{N}$

$$(1 - x^2)^n \leq e^{-nx^2} \leq \left(\frac{1}{1 + x^2}\right)^n$$

$$\int_0^1 (1 - x^2)^n dx \leq \int_0^1 e^{-nx^2} \leq \int_0^{+\infty} e^{-nx^2} \leq \int_0^{+\infty} \frac{1}{(1 + x^2)^n}$$

Казалось бы, переход от интеграла \int_0^1 к $\int_0^{+\infty}$ очень грубый, но это не так.

$$\int_0^{+\infty} e^{-nx^2} \stackrel{y=\sqrt{n}x}{=} \frac{1}{\sqrt{n}} I$$

$$\int_0^1 (1 - x^2)^n dx \stackrel{x=\cos y}{=} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n+1} y dy$$

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{(1 + x^2)^n} \stackrel{x=\tan y}{=} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos y)^{2n-2} dy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin t)^{2n-2} dt$$

$$\sqrt{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n+1} y dy \leq I \leq \sqrt{n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin t)^{2n-2} dt$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n x dx = \frac{(n-1)!!}{n!!} \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & n \text{ чет.} \\ 1, & n \text{ нечет.} \end{cases}$$

$$\sqrt{n} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} \leq I \leq \frac{(2n-3)!!}{(2n-2)!!} \frac{\pi}{2} \sqrt{n}$$

По формуле Валлиса $\frac{(2k)!!}{(2k-1)!!} \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \rightarrow \sqrt{\pi}$:

$$\sqrt{n} \frac{(2n)!!}{(2n+1)!!} = \left(\frac{1}{\sqrt{n}} \frac{(2n)!!}{(2n-1)!!} \right) \frac{n}{2n+1} \rightarrow \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$\frac{(2n-3)!!}{(2n-2)!!} \frac{\pi}{2} \sqrt{n} = \frac{\frac{\pi}{2} \sqrt{n} \frac{1}{\sqrt{n-1}}}{\frac{(2n-2)!!}{(2n-3)!!} \frac{1}{\sqrt{n-1}}} \rightarrow \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

□