

Математический анализ-2

Лектор: проф. Подольский Владимир Евгеньевич

11 февраля 2025 г.



Конспект: Кирилл Яковлев, Егор Соколов, 108 группа

Telegram: [@fourkenz](https://t.me/fourkenz)

GitHub: [yakovlevki](https://github.com/yakovlevki)

Содержание

1	Неопределенный интеграл	3
1.1	Первообразная и неопределенный интеграл	3
1.2	Свойства неопределённого интеграла	3
1.3	Таблица неопределенных интегралов	4
1.4	Интегрирование рациональных функций	5
1.5	Метод Остроградского	7
2	Интеграл Римана	7
2.1	Интегрируемость по Риману	7

1 Неопределенный интеграл

1.1 Первообразная и неопределенный интеграл

Определение. Пусть $f(x)$ определена на (a, b) . Если существует $F(x)$ определённая на (a, b) такая, что $F(x) \in \mathcal{D}(a, b)$ и $F'(x) = f(x)$, то $F(x)$ называется первообразной функцией для $f(x)$.

Определение. Пусть $f(x)$ определена на (a, b) . Совокупность всех первообразных функций для $f(x)$ называется неопределённым интегралом $f(x)$ и обозначается

$$\int f(x)dx$$

Теорема. Пусть $F(x)$ является первообразной для $f(x)$ на (a, b) . Тогда

$$\int f(x)dx = \{F(x) + C\}, \quad C = const, \quad C \in \mathbb{R}$$

Доказательство.

$$(F(x) + C)' = f(x) + 0 = f(x)$$

Пусть $\varphi(x)$ - первообразная $f(x)$. Тогда:

$$(\varphi(x) - F(x))' = f(x) - f(x) = 0$$

т.е. по следствию из теоремы Лагранжа $\varphi(x) - F(x) = const$, ч.т.д. □

1.2 Свойства неопределённого интеграла

1. $\forall c \in \mathbb{R}$:

$$\int c \cdot f(x)dx = c \cdot \int f(x)dx$$

(При $c = 0$ множества получаются разными: первое - произвольная константа, а второе - ноль; в рассуждениях этот случай будет опускаться)

2.

$$\int (f(x) \pm g(x))dx = \int f(x)dx \pm \int g(x)dx$$

3. (Замена переменной)

Пусть $F(x)$ - первообразная для $f(x)$ на (a, b) .

Пусть $\varphi(t) \in \mathcal{D}(\alpha, \beta)$ и $\varphi((\alpha, \beta)) \subset (a, b)$ Тогда $F(\varphi(t))$ является первообразной для $F'(\varphi(t)) \cdot \varphi'(t)$ на (α, β) .

$$\int f(x)dx = \int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt, \text{ где } x = \varphi(t)$$

4. (Интегрирование по частям) Пусть $u, v \in \mathcal{D}(a, b)$.

$$(u \cdot v)' = u \cdot v' + u' \cdot v$$

$$\int (uv)' dx = \int uv' dx + \int u' v dx$$

$$\int uv' dx = uv - \int u' v dx$$

$$\int u dv = uv - \int v du$$

Замечание. Неопределённый интеграл - операция на дифференциалах:

$$\int dF(x) = F(x) + C$$

1.3 Таблица неопределенных интегралов

$\int x^\alpha dx = \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + C, \alpha \neq -1$	$\int \frac{dx}{x} = \ln x + \begin{cases} C_1, & x > 0 \\ C_2, & x < 0 \end{cases}$
$\int \sin x dx = -\cos x + C$	$\int \cos x dx = \sin x + C$
$\int e^x dx = e^x + C$	$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$
$\int -\frac{1}{\sin^2 x} dx = \operatorname{ctg} x + C$	$\int \frac{1}{\cos^2 x} dx = \operatorname{tg} x + C$
$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$	$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C$

$$\int \frac{dx}{1-x^2} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+x}{1-x} \right| + C$$

Замечание. Все равенства верны только на промежутках.

1.4 Интегрирование рациональных функций

Хотим научиться находить интеграл

$$\int \frac{P(x)}{Q(x)} dx$$

где $P(x)$, $Q(x)$ - многочлены. Разложим $Q(x)$ на неприводимые многочлены:

$$Q(x) = (x - a_1)^{\alpha_1} \dots (x - a_n)^{\alpha_n} (x^2 + p_1x + q_1)^{\beta_1} \dots (x^2 + p_kx + q_k)^{\beta_k}$$

Теперь разложим дробь в сумму простейших:

$$\begin{aligned} \int \frac{P(x)}{Q(x)} dx = & \int \left(\tilde{P} + \sum_{i=1}^{\alpha_1} \frac{\aleph_{1i}}{(x - a_1)^{\alpha_{1i}}} + \dots + \sum_{i=1}^{\alpha_n} \frac{\aleph_{ni}}{(x - a_n)^{\alpha_{ni}}} + \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^{\beta_1} \frac{\rho_{1j}x + \omega_{1j}}{(x^2 + p_1x + q_1)^{\beta_{1j}}} + \dots + \sum_{j=1}^{\beta_k} \frac{\rho_{kj}x + \omega_{kj}}{(x^2 + p_kx + q_k)^{\beta_{kj}}} \right) dx \end{aligned}$$

Осталось понять как интегрировать слагаемые вида

$$\int \frac{dx}{(x - a)^n} \quad \text{и} \quad \int \frac{\alpha x + \beta}{(x^2 + px + q)^k} dx$$

1.

$$\int \frac{dx}{(x - a)^n} = \begin{cases} \ln |x - a|, & n = 1 \\ \frac{(x - a)^{1-n}}{1 - n}, & n > 1 \end{cases}$$

2. Сначала преобразуем знаменатель:

$$x^2 + px + q = \left(x + \frac{p}{2}\right)^2 + \left(q - \frac{p^2}{4}\right)$$

причем $q - \frac{p^2}{4} > 0$, поскольку у $x^2 + px + q$ нет вещественных корней.

Сделаем замену

$$t = x + \frac{p}{2} \Rightarrow x = t - \frac{p}{2}, \quad q_1^2 = q - \frac{p^2}{4}$$

$$\int \frac{\alpha x + \beta}{(x^2 + px + q)^k} dx = \int \frac{\alpha t - \frac{\alpha p}{2} + \beta}{(t^2 + q_1^2)^k} d(t - \frac{p}{2}) = \int \frac{\alpha_1 t + \beta_1}{(t^2 + q_1^2)^k} dt$$

где $\alpha_1 = \alpha$, $\beta_1 = \beta - \frac{\alpha p}{2}$. Далее осталось рассмотреть два интеграла:

$$\int \frac{t}{(t^2 + q_1^2)^k} dt \quad \text{и} \quad I_k = \int \frac{dt}{(t^2 + q_1^2)^k}$$

(i)

$$\begin{aligned} \int \frac{t}{(t^2 + q_1^2)^k} dt &= \frac{1}{2} \int \frac{dt^2}{(t^2 + q_1^2)^k} = \\ &= \frac{1}{2} \int \frac{d(t^2 + q_1^2)}{(t^2 + q_1^2)^k} = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln(t^2 + q_1^2), & k = 1 \\ \frac{(t^2 + q_1^2)^{1-k}}{2(1-k)}, & k > 1 \end{cases} \end{aligned}$$

(ii)

$$\begin{aligned} I_k &= \int \frac{dt}{(t^2 + q^2)^k} = \frac{t}{(t^2 + q^2)^k} - \int t d\left(\frac{1}{t^2 + q^2}\right)^k = \\ &= \frac{t}{(t^2 + q^2)^k} + 2k \int \left(\frac{t^2 + q^2 - q^2}{(t^2 + q^2)^{k+1}}\right) dt = \\ &= \frac{t}{(t^2 + q^2)^k} + 2k I_k - 2k q^2 I_{k+1} \end{aligned}$$

$$I_{k+1} = \frac{1}{2k q^2} \cdot \frac{t}{(t^2 + q^2)^k} + \frac{2k-1}{2k q^2} I_k$$

Замечание.

$$\operatorname{tg}^2 z + 1 = \frac{\sin^2 z + \cos^2 z}{\cos^2 z} = \frac{1}{\cos^2 z}$$

$$\int \frac{dt}{(t^2 + q^2)^k} = \left| \begin{array}{l} t = q \operatorname{tg} z \\ dt = \frac{q}{\cos^2 z} dz \end{array} \right| = \int \frac{q dz}{\cos^2 z (q^2 \operatorname{tg}^2 z + q^2)^k} = \int \frac{\cos^{2k-2} z}{q^{2k-1}} dz$$

1.5 Метод Остроградского

$$\begin{aligned} \int \frac{P(x)}{Q(x)} dx &= \int \frac{P(x)}{\prod_{i=1}^n (x - a_i)^{\alpha_i} \cdot \prod_{j=1}^k (x^2 + b_j x + c_j)^{\beta_j}} dx = \\ &= \frac{P_1(x)}{\prod_{i=1}^n (x - a_i)^{\alpha_i - 1} \cdot \prod_{j=1}^k (x^2 + b_j x + c_j)^{\beta_j - 1}} + \\ &\quad + \int \frac{P_2(x)}{\prod_{i=1}^n (x - a_i) \cdot \prod_{j=1}^k (x^2 + b_j x + c_j)} dx \end{aligned}$$

2 Интеграл Римана

2.1 Интегрируемость по Риману

Определение. $\{x_i\}_{i=0}^n \subset [a, b]$ называется разбиением отрезка, если $a = x_0 < \dots < x_n = b$. Обозначается $T_{[a,b]}^+$. Если $b = x_0 > \dots > x_n = a$, то обозначают $T_{[a,b]}^-$.

Отрезки $[x_{i-1}, x_i]$ или $[x_i, x_{i-1}]$ называются отрезками разбиения, их обычно обозначают Δ_i . Длина отрезка Δ_i обозначается $\Delta x_i := x_i - x_{i-1}$.

Диаметром разбиения называется $d(T) = \max |x_i - x_{i-1}| = \max \Delta x_i$.

Определение. Пусть $T_{[a,b]}$ - разбиение. Разметкой для $T_{[a,b]}$ называется множество точек $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ такое, что $\forall i \xi_i \in \Delta_i$.

Если $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ является разметкой для $\{x_i\}_{i=0}^n$, то множество $\{\{x_i\}_{i=0}^n, \{\xi_i\}_{i=1}^n\}$ называется размеченным разбиением и обозначается $T(\xi)$.

Определение. Сумма

$$\sigma_{[a,b]} = \sum_{i=1}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$$

называется интегральной суммой. Иногда ее обозначают $\sigma_T(\xi)$

Определение. Пусть $f(x)$ определена на $[a, b]$. Рассмотрим $T_{[a,b]}(\xi)$. Если

$$\exists I \in \mathbb{R} : \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0, \text{ что } \forall T(\xi) \subset \{T : d(T) < \delta\} : \left| \sum_{i=1}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) - I \right| < \varepsilon$$

то говорят, что $f(x)$ интегрируема по Риману на $[a, b]$, а число I называют интегралом Римана на размеченных разбиениях на отрезке $[a, b]$. Интеграл Римана обозначают

$$I = \int_a^b f(x)dx \quad \text{или} \quad I = \int_b^a f(x)dx$$

для T^+ и T^- соответственно.

Замечание. Можно считать определение интеграла определением предела интегральных сумм и писать

$$\lim_{d \rightarrow 0} \left(\sum_{i=1}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) \right) = I$$

где d - диаметр разбиения.

Утверждение.

$$\text{Если } \exists \int_a^b f(x)dx, \text{ то } \exists \int_b^a f(x)dx \text{ и } \int_a^b f(x)dx = - \int_b^a f(x)dx$$

Определение. Класс функций, интегрируемых на $[a, b]$ по Риману обозначается $\mathcal{R}[a, b]$.

Теорема. Если $f \in \mathcal{R}[a, b]$, то f - ограничена на $[a, b]$.

Доказательство. Предположим, что $\exists \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset [a, b]$, $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \tilde{x}$, что $|f(x_n)| > n$ и пусть

$$\exists \lim_{d \rightarrow 0} \left(\sum_{i=0}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) \right) = I$$

то есть

$$\left| \sum_{i=0}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) - I \right| < 1$$

это означает, что

$$I + \sum_{i=1, i \neq k}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) - 1 < f(\xi_k)(x_k - x_{k-1}) < I + \sum_{i=1, i \neq k}^N f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) + 1$$

\tilde{x} лежит на этом отрезке \Rightarrow с какого то номера все точки лежат в этом отрезке.

□