Математический анализ-2

Лектор: проф. Подольский Владимир Евгеньевич

14 февраля 2025 г.

Конспект: Кирилл Яковлев, Егор Соколов, 108 группа
Telegram: @fourkenz
GitHub: yakovlevki

Содержание

1 Неопределенный интеграл

1.1 Первообразная и неопреленный 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

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

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:

$$\int \frac{P(x)}{Q(x)}\, dx = \int (\tilde{P} + \sum_{i=1}^{\alpha_1} \frac{\aleph_{1i}}{(x-a_1)^{\alpha_{1i}}} + \dots + \sum_{i=1}^{\alpha_n} \frac{\aleph_{ni}}{(x-a_n)^{\alpha_{ni}}} + \\ + \sum_{j=1}^{\beta_1} \frac{\rho_{1j}x + \omega_{1j}}{(x^2+p_1x+q_1)^{\beta_{1i}}} + \dots + \sum_{j=1}^{\beta_k} \frac{\rho_{kj}x+\omega_{kj}}{(x^2+p_1x+q_1)^{\beta_{kj}}})\, dx$$

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

2. Сначала преобразуем знаменатель:

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

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

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

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

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)

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

(ii)

$$I_k = \int \frac{dt}{(t^2+q^2)^k} = \frac{t}{(t^2+q^2)^k} - \int t d(\frac{1}{t^2+q^2})^k =$$
$$= \frac{t}{(t^2+q^2)^k} + 2k\int \left(\frac{t^2+q^2-q^2}{(t^2+q^2)^{k+1}}\right) dt =$$
$$= \frac{t}{(t^2+q^2)^k} + 2kI_K - 2kq^2 I_{k+1}$$

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

Замечание.

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

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

1.5 Метод Остроградского

$$\int \frac{P(x)}{Q(x)}\,dx = \int \frac{P(x)}{\prod\limits_{i=1}^{n}(x-a_i)^{\alpha_i}\cdot\prod\limits_{j=1}^{k}(x^2+b_jx+c_j)^{\beta_j}}\,dx =$$

$$= \frac{P_1(x)}{\prod\limits_{i=1}^{n}(x-a_i)^{\alpha_i-1}\cdot\prod\limits_{j=1}^{k}(x^2+b_jx+c_j)^{\beta_j-1}} +$$

$$+ \int \frac{P_2(x)}{\prod\limits_{i=1}^{n}(x-a_i)\cdot\prod\limits_{j=1}^{k}(x^2+b_jx+c_j)}\,dx$$

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 размеченым 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 размеченых разбиениях на отрезке $[a, b]$. Интеграл Римана обозначают

$$I = \int\limits_a^b f(x)dx \quad \text{или} \quad I = \int\limits_b^a f(x)dx$$

для T^+ и T^- соответственно.

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

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

где d - диаметр разбиения.

Утверждение.

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

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 $\exists \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset [a, b]$, $\exists \lim\limits_{n \to \infty} x_n = \widetilde{x}$, что $|f(x_n)| > n$ и пусть

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

то есть

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

это означает, что

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

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

2.2 Суммы Дарбу

Далее рассматриваем разбиения T_+

Определение. Пусть T_1 и T_2 - разбиения отрезка $[a, b]$ такие, что $T_1 \subset T_2$. Тогда T_2 называется измельчением T_1.

Определение. Пусть $f(x)$ ограничена на $[a, b]$, $\{x_i\}_{i=1}^n = T$ - разбиение $[a, b]$

$$m_i = \inf_{[x_i, x_{i+1}]} f(x),\ M_i = \sup_{[x_i, x_{i+1}]} f(x)$$

$$\overline{\overline{S}}_f(T) = \sum_{i=0}^{n-1} m_i(x_{i+1} - x_i),\ \underline{\underline{S}}_f(T) = \sum_{i=0}^{n-1} M_i(x_{i+1} - x_i)$$

Тогда $\overline{\overline{S}}_f(T)$ называется верхней суммой Дарбу, а $\underline{\underline{S}}_f(T)$ нижней суммой Дарбу.

Лемма. (1) Пусть T_1 - измельчение T. Тогда $\overline{\overline{S}}(T) \leq \overline{\overline{S}}(T_1)$ и $\underline{\underline{S}}(T) \geq \underline{\underline{S}}(T_1)$

Доказательство. $T_1 = T \cup \{x'_j \in [x_j, x_{j+1}]\}$. Тогда

$$\overline{\overline{S}}(T_1) - \overline{\overline{S}}(T) = m_{1j}(x'_j - x_j) + m_{2j}(x_{j+1} - x'_j) - m_j(x'_j - x_j) - m_j(x_{j+1} - x'_j) \geq 0$$

□

Лемма. (2)

$$\forall\ T_1, T_2 : \overline{\overline{S}}(T_1) \leq \underline{\underline{S}}(T_2)$$

Доказательство. Рассмотрим $T = T_1 \cup T_2$. Тогда T является измельчением и T_1 и T_2. Тогда по предыдущей лемме:

$$\overline{\overline{S}}(T_1) \leq \overline{\overline{S}}(T) \ \text{ и } \ \underline{\underline{S}}(T) \leq \underline{\underline{S}}(T_2)$$

□

Лемма. (3) $\forall\ T_{[a,b]}$:

$$\overline{\overline{S}}(T) = \inf_{\{\xi_i\}} \sum_{i=1}^{n} f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$$

$$\underline{\underline{S}}(T) = \sup_{\{\xi_i\}} \sum_{i=1}^{n} f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$$

Доказательство. $\{X_i : X_i \subset \mathbb{R}\}_{i=1}^n$, $\forall i\ X_i$ - ограничено,
$\{a_i\}_{i=1}^n$, $\forall i : a_i \geq 0$. $\forall \varepsilon > 0, \forall i = 1, \dots, n$ и $\exists\ x_i \in X_i, x_i > \sup X_i - \varepsilon$. Тогда

$$\sum_{i=1}^{n} a_i x_i > \sum_{i=1}^{n} a_i \sup X_i - \varepsilon \cdot \sum_{i=1}^{n} a_i$$

$$\sup_{\{x_i\}} \sum_{i=1}^{n} a_i x_i \geq \sum_{i=1}^{n} a_i \sup X_i$$

но

$$\sum_{i=1}^{n} a_i x_i \leq \sum_{i=1}^{n} a_i \sup X_i$$

отсюда получаем:

$$\sup_{\{x_i\}} \sum_{i=1}^{n} a_i x_i = \sum_{i=1}^{n} a_i \sup X_i$$

□

Теорема. $f(x) \in \mathcal{R}[a,b] \Leftrightarrow f$ - ограничена и $\forall \varepsilon > 0 \ \exists \ \delta_\varepsilon > 0:$

$$\forall \ T_{[a,b]} : d(T) < \delta_\varepsilon : \underline{\underline{S_f}}(T) - \overline{\overline{S}}(T) < \varepsilon$$

Доказательство. $(\Rightarrow):$

$$\exists \ I = \int\limits_a^b f(x)dx \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \ \exists \ \delta_\varepsilon > 0, \ \forall T(\xi) : d(T) < \delta_\varepsilon$$

$$I - \frac{\varepsilon}{3} < \sigma_f(T(\xi)) < I + \frac{\varepsilon}{3}$$

$$\left| \overline{\overline{S_f}}(T) - I \right| \leq \frac{\varepsilon}{3}, \quad \left| \underline{\underline{S_f}}(T) - I \right| \leq \frac{\varepsilon}{3}$$

$\Rightarrow \underline{\underline{S}}(T) - \overline{\overline{S}}(T) < \varepsilon$
$(\Leftarrow): \forall \varepsilon > 0 \ \exists \delta_\varepsilon > 0, \ \forall T : d(T) < \delta_\varepsilon (*)$

$$\underline{\underline{S}}(T) - \overline{\overline{S}}(T) < \varepsilon$$

из леммы 2 по аксиоме полноты:

$$\exists \ I, \forall \ T_1, T_2 : \overline{\overline{S}}(T) \leq I \leq \underline{\underline{S}}(T) \quad (1)$$

из $(*)$ следует, что I - единственно, но

$$\forall T(\xi) : \overline{\overline{S}}(T) \leq \sigma_f(T(\xi)) \leq \underline{\underline{S}}(T) \quad (2)$$

из (1) и (2) получаем:

$$\left| \ \sigma_f(T(\xi)) - I \ \right| < \varepsilon$$

□

2.3 Классы интегрируемых функций

Теорема. Если $f(x) \in \mathcal{C}[a,b]$, то $f(x) \in \mathcal{R}[a,b]$

Доказательство. $f(x) \in \mathcal{C}[a,b] \Rightarrow f(x)$ - равномерно непрерывна на $[a,b]$. Значит

$$\forall \varepsilon > 0 \; \exists \; \delta_\varepsilon > 0, \forall x_1, x_2 \in [a,b] : |x_1 - x_2| < \delta_\varepsilon : |f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$$

Пусть $T : d(T) < \delta$

$$\underline{\underline{S}}(T) - \overline{\overline{S}}(T) = \sum_{i=1}^{n}(M_i - m_i)(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^{n}(f(x_{i_{max}}) - f(x_{i_{min}}))(x_i - x_{i-1}) < \varepsilon(b-a)$$

$\square$

Теорема. Пусть $f(x)$ - монотонна на $[a,b]$. Тогда $f(x) \in \mathcal{R}[a,b]$

Доказательство. Докажем для неубывающей. Если $f(x) = const$, то очевидно. Пусть $d(T) < \frac{\varepsilon}{f(b)-f(a)}$

$$\underline{\underline{S}}(T) - \overline{\overline{S}}(T) = \sum_{i=1}^{n}(f(x_i) - f(x_{i-1}))(x_i - x_{i-1}) <$$
$$< \sum_{i=1}^{n}(f(x_i) - f(x_{i-1})) \cdot \frac{\varepsilon}{f(b) - f(a)} =$$
$$= \frac{\varepsilon}{f(b)f(a)} \cdot (f(b) - f(a)) = \varepsilon$$

$\square$