Математический анализ

Харитонцев-Беглов Сергей

12 января 2022 г.

Содержание

1. Интегральное исчисление функции одной переменной

1.1. Первообразная и неопределенный интеграл

***Определение* 1.1.** $f : \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$. Функция $F : \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$ — первообразная функции f, если $F'(x) = f(x) \forall x \in \langle a, b\rangle$

Теорема 1.1. Непрерывная на промежутке функция имеет первообразную.

Доказательство. Позже. □

Замечание. $\operatorname{sign} x = \begin{cases} 1 & \text{если } x > 0 \\ 0 & \text{если } x = 0 \\ -1 & \text{если } x < 0 \end{cases}$. Не имеет первообразной.

Доказательство. От противного: пусть нашлась $F \colon \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$ и $F'(x) = sign(x)$.

Тогда воспользуемся теоремой Дарбу для F на отрезке $[0; 1]$.

Пусть $k = \frac{1}{2} \in (\operatorname{sign}(0), \operatorname{sign}(1))$. Значит $\exists c \in (0, 1) \colon F'(c) = k = \frac{1}{2}$. Противоречие. □

Теорема 1.2. $f, F \colon \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$ и F — первообразная для f. Тогда:

1. $F + C$ — первообразная для f.
2. Если $\Phi \colon \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$ — первообразная для f, то $\Phi = F + C$.

Доказательство.

1. $(F(x) + C)' = F'(x) + C' = f(x)$
2. $(\Phi(x) - F(x))' = \Phi'(x) - F'(x) = f(x) - f(x) = 0 \Rightarrow (\Phi - F)' \equiv 0 \implies \Phi - F$ — константа.

□

***Определение* 1.2.** Неопределённый интеграл — множество всех первообразных.

$\int f(x)\,dx = \{F \colon F \text{ — первообразная f}\}$. Но мы будем записывать $\int f(x)\,dx = F(x) + C$

Табличка интегралов.

1. $\int 0\,dx = C$.
2. $\int x^p\,dx = \frac{x^{p+1}}{p+1} + C$, при $p \neq -1$.
3. $\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$.
4. $\int a^x\,dx = \frac{a^x}{\ln a} + c$, при $a > 0, a \neq 1$.
5. $\int \sin x\,dx = -\cos x + C$.
6. $\int \cos x\,dx = \sin x + C$.

7. $\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C$.
8. $\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C$
9. $\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$.
10. $\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C$.
11. $\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm 1}} = \ln|x + \sqrt{x^2 \pm 1}| + C$.
12. $\int \frac{dx}{1-x^2} = \frac{1}{2} \ln|\frac{1+x}{1-x}| + C$.

Доказательство. Для 3. Если $x > 0$ $\int \frac{dx}{x} = \ln x + C$. Если $x < 0$ $\int \frac{dx}{x} = \ln(-x) + C$, то есть $(\ln(-x))' = (\frac{1}{-x})(-x)' = \frac{-1}{x}$.

Для 11. $(\ln|x + \sqrt{x^2 \pm 1}|)' = \frac{1}{x+\sqrt{x^2 \pm 1}}(x + \sqrt{x^2 \pm 1})' = \frac{1+\frac{x}{\sqrt{x^2 \pm 1}}}{x+\sqrt{x^2}} = \frac{\frac{\sqrt{x^2 pm 1}+x}{\sqrt{x^2 \pm 1}}}{\sqrt{x^2 \pm 1}+x} = \frac{1}{\sqrt{x^2 \pm 1}}$

Для 13. $(\frac{1}{2}(\ln|1+x| - \ln|1-x|))' = \frac{1}{2}(\frac{1}{1+x} + \frac{1}{1-x}) = \frac{1}{1-x^2}$ □

Замечание. $A + B \coloneqq \{a + b \colon a \in A, b \in B\}$, $cA \coloneqq \{ca \colon a \in A\}$.

$\int f(x)\,dx + \int g(x)\,dx = \{F + C\} + \{G + \widetilde{C}\} = \{F + G + C\}$.

Теорема 1.3 (Арифметические действия с неопределенными интегралами)**.** Пусть $f, g \colon \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$ имеют первообразные. Тогда:

1. $f + g$ имеет первообразную и $\int (f + g)\,dx = \int f\,dx + \int g\,dx$
2. αf имеет первообразную и $\int \alpha f\,dx = \alpha \int f\,dx$

Доказательство. Пусть F и G первообразные для f и g.

1. Тогда $F + G$ — первообразная для $f + g$. Тогда $\int (f + g) = F + G + C = \int f + \int g$.
2. Тогда αF — первообразная для $\alpha f \implies \int \alpha F = \alpha F + C = \alpha(F + \frac{C}{\alpha}) = \alpha \int f$.

□

Следствие Линейность неопрделенного интеграла. $f, g \colon \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$ имеют первообразную $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, $|\alpha| + |\beta| \neq 0$. Тогда $\int (\alpha f + \beta g) = \alpha \int f + \beta \int g$.

Доказательство. Прямое следствие из теоремы выше. □

Теорема 1.4 (Теорема о замене переменной в непопределенном интеграле)**.** $f : \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}, \varphi : \langle c, d\rangle \to \langle a, b\rangle$, f имеет первообразную F. φ дифференцируемая. Тогда $\int f(\varphi(t))\varphi'(t)\,dt = F(\varphi(t)) + C$.

Доказательство. Надо проверить, что $F(\varphi(t))$ — первообразная для $f(\varphi(t))\varphi'(t)$.

$$(F(\varphi(t)))' = F'(\varphi(t)) \cdot \varphi'(t) = f(\varphi(t))\varphi(t)..$$

□

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

Доказательство. $\int \alpha f(\alpha x + \beta dx) = F(\alpha x + \beta) + C$. И делим обе части на α. □

Теорема 1.5 (Форумла интегрирования по частям). $f, g\colon \langle a, b\rangle \to \mathbb{R}$, дифференцируемые, $f'g$ имеет первообразную.

Тогда fg' имеет первообразную и $\int fg' = fg - \int f'g$

Доказательство. H — первообразная для $f'g$. Тогда $H' = f'g$.

Надо доказать, что $fg - H$ — первообразная для fg'.

$(fg - H)' = f'g + gh' - H' = f'g + fg' - f'g = fg'$. □

1.2. Определенный интеграл

Пусть $\mathcal{F}$ — совокупность (множество) ограниченных плоских фигур.

***Определение* 1.3.** $\sigma\colon \mathcal{F} \to [0; +\infty)$,

1. $\sigma([a; b] \times [c, d]) = (b - a)(d - c)$
2. (Аддитивность). $\forall E_1, E_2 \in \mathcal{F}\colon E_1 \cap E_2 = \varnothing \Rightarrow \sigma(E_1 \cup E_2) = \sigma(E_1) + \sigma(E_2)$

Свойство Монотонность площади. $\forall E, \widetilde{E}\colon E \subset \widetilde{E} \Rightarrow \sigma(E) \leqslant \sigma(\widetilde{E})$.

Доказательство. $E = \widetilde{E} \cup (\widetilde{E} \setminus E) \Rightarrow \sigma(\widetilde{E}) = \sigma(E) + \sigma(\widetilde{E} \setminus E)$. □

***Определение* 1.4.** $\sigma\colon \mathcal{F} \to [0; +\infty]$, причем

1. $\sigma([a; b] \times [c, d]) = (b - a)(d - c)$,
2. $\forall E, \widetilde{E} \in \mathcal{F}\colon E \subset \widetilde{E} \Rightarrow \sigma(E) \leqslant \sigma(\widetilde{E})$,
3. Разобьем E вертикальной или горизонтальной прямой, в том числе теми прямыми, которые правее или левее E. Тогда $E = E_- \cup E_+, E_- \cap E_+ = \varnothing$ и $\sigma(E) = \sigma(E_-) + \sigma(E_+)$.

Свойства. 1. Подмножество вертикальных или горизонтальных отрезков имеет нулевую площадь.

2. В определении E_- и E_+ не важно куда относить точки из l.

   Доказательство. Заметим, что $\sigma(E_- \cup (E \cap l)) = \sigma(E_- \setminus l) + \underbrace{\sigma(E \cap l)}_{=0} \Rightarrow$ вообще не имеет разницы куда относить точки из l. □

Пример.

1. $\sigma_1(E) = \inf\left\{\sum\limits_{k=1}^{n} |P_k|\colon P_k \text{ — прямоугольник}, \bigcup\limits_{k=1}^{n} \supset E\right\}$.
2. $\sigma_2(E) = \inf\left\{\sum\limits_{k=1}^{n} |P_k|\colon P_k \text{ — прямоугольник}, \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} \supset E\right\}$.

Упражнение.

1. Доказать, что $\forall E \quad \sigma_1(E) \geqslant \sigma_2(E)$.
2. $E = ([0, 1] \cap \mathbb{Q}) \times ([0, 1] \cap \mathbb{Q})$. Доказать, что $\sigma_1(E) = 1, \sigma_2(E) = 0$.

Теорема 1.6.

1. σ_1 — квазиплощадь.

2. Если E' — сдвиг E, то $\sigma_1(E) = \sigma_1(E')$.

Доказательство.

2. E' — сдвиг E на вектор v. Пусть P_k — покрытие $E \iff P'_k$ — покрытие E'. $\sigma_1(E) = \inf\{\sum\limits_{k=1}^{n} |P_k|\} = \inf\{\sum |P'_k|\} = \sigma_1(E')$.

1. $\Rightarrow$ монотонность. Пусть есть $E \subset \widetilde{E}$. Тогда возьмем покрытие P_k для $\widetilde{E}$. $E \subset \widetilde{E} \subset \bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k$.

   А теперь заметим, что σ_1 — inf, а значит $\sigma_1(E) \leqslant \sum |P_k| = \sigma_1(\widetilde{E})$.

1'. Докажем теперь аддитивность.

   «$\leqslant$». $\sigma_1(E) = \sigma_1(E_-) + \sigma_1(E_+)$. Пусть P_k — покрытие E_-, Q_j — покрытие E_+. $\bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k \cup \bigcup\limits_{j=1}^{m} Q_j \supset E_i \cup E_+ = E$. А значит $\sigma_1(E) \leqslant \inf\left\{\sum\limits_{k=1}^{n} |P_k| + \sum\limits_{j=1}^{n} |Q_j|\right\} = \inf\{\sum |P_k|\} + \inf\{\sum |Q_j|\} = \sigma_1(E_-) + \sigma(E_+)$. Заметим, Что переход с разделением инфинумов возможен, так как P и Q выбираются независимо.

   «$\geqslant$». Пусть P_k — покрытие E. Тогда можно разбить $|P_k| = |P_k^-| + |P_k^+|$. $\sum |P_k| = \sum |P_k^-| + \sum |P_k^+|$. Заметим, что сумму $\geqslant \sigma \Rightarrow \sum |P_k| \geqslant \sigma(E_1) + \sigma(E_2) \Rightarrow \sigma(E) \geqslant \sigma(E_1) + \sigma(E_2)$.

1". Проверим, что сама площадь прямоугольника не сломалась: $\sigma_1([a,b] \times [c,d]) = (b-a)(d-c)$. Заметим, что $\sigma_1(P) \leqslant |P|$.

   Тогда посмотрим на P_k. Проведем прямые содержащие все стороны прямоугольников из разбиения. Заметим, что получили разбиение с суммой равной $|P|$. Тогда заметим, что некоторые части разбиения встречаются в P_k несколько раз. А значит выкинув все лишнее мы как раз получим $|P|$, а значит $\sigma_1(P) \geqslant |P|$.

□

***Определение* 1.5.** Пусть $f : [a,b] \to \mathbb{R}$. Тогда $f_+, f_- : [a,b] \to [0; +\inf)$. Причем $f_+(x) = \max\{f(x), 0\}$, $f_- = \max\{-f(x), 0\}$.

Свойства.

1. $f = f_+ - f_-$.
2. $|f| = f_+ + f_-$
3. $f_+ = \frac{f+|f|}{2}$, $f_- = \frac{|f|-f}{2}$.
4. Если $f \in C([a,b])$, то $f_\pm \in C([a,b])$.

***Определение* 1.6.** Пусть $f \colon [a,b] \to [0; \inf]$.

Тогда, подграфик $P_f([a;b]) \coloneqq \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in [a,b], 0 \leqslant y \leqslant f(x)\}$.

***Определение* 1.7.** $\int\limits_a^b f = \int\limits_a^b f(x)dx = \sigma(P_{f_+}([a;b])) - \sigma(P_{f_-}([a;b]))$.

Свойства.

1. $\int\limits_a^a f = 0$.

2. $\int\limits_a^b = c(b-a)$

   Доказательство. По графику очевидно :) $\square$

3. $f \geqslant 0 \Rightarrow \int\limits_a^b = \sigma(P_f)$.

4. $\int\limits_a^b (-f) = -\int\limits_a^b f$.

   Доказательство. $(-f)_+ = \max\{-f, 0\} = f_-$. $(-f)_- = \max\{f, 0\} = f+$. Откуда все и следует. $\square$

5. $f \geqslant 0 \wedge \int\limits_a^b = 0 \wedge a < b \Rightarrow f = 0$.

   Доказательство. От противного. $\exists c \in [a, b] : f(c) > 0$. Тогда, возьмем $\varepsilon \coloneqq \frac{f(c)}{2}, \delta$ из определения непрерывности в точке c. Если $x \in (c-\delta, c+\delta)$, то $f(x) \in (f(c)-\varepsilon, f(c)+\varepsilon) = (\frac{f(c)}{2}; \frac{3f(c)}{2}) \Rightarrow f(x) \geqslant \frac{f(c)}{2}$ при $x \in (c-\delta; c+\delta) \Rightarrow P_f \supset [c - \frac{\delta}{2}; c + \frac{\delta}{2}] \times [0; \frac{f(c)}{2}] \Rightarrow \int\limits_a^b f = \sigma(P_f) \geqslant \delta \cdot \frac{f(c)}{2} > 0$ $\square$

1.3. Свойства интеграла

Теорема 1.7 (Аддиктивность интеграла)**.** Пусть $f\colon [a, b] \to \mathbb{R}$, $c \in [a, b]$.

Тогда $\int\limits_a^b f = \sum\limits_a^c f + \sum\limits_c^b f$.

Доказательство. $\int\limits_a^b f = \sigma(P_{f_+}([a, b])) - \sigma(P_{f_-}([a, b]))$. Разделим наш $[a, b]$ вертикальной прямой $x = c$. Тогда можно воспользоваться свойством 3 из определения квазиплощади. $\square$

Теорема 1.8 (Монотонность интеграла)**.** Пусть $f, g\colon [a, b] \to \mathbb{R}$ и $\forall x \in [a, b]\colon f(x) \leqslant g(x)$.

Тогда $\int\limits_a^b f \leqslant \int\limits_a^b g$.

Доказательство. $f_+ = \max\{f, 0\} \leqslant \max\{g, 0\} = g_+ \Rightarrow P_{f_+} \subset P_{g_+} \Rightarrow \sigma(P_{f_+}) \leqslant \sigma(P_{g_+})$.

$f_- = \max\{-f, 0\} \geqslant \max\{-g, 0\} = g_- \Rightarrow P_{f_-} \supset P_{g_-} \Rightarrow \sigma(P_{f_-}) \geqslant \sigma(P_{g_-})$. $\square$

Следствие.

1. $|\int\limits_a^b f| \leqslant \int\limits_a^b |f|$

2. $(b-a)\min\limits_{x\in[a,b]} f(x) \leqslant \int\limits_a^b f \leqslant (b-a)\max\limits_{x\in[a,b]} f(x)$.

Доказательство.

1. $-|f| \leqslant f \leqslant |f| \Rightarrow \int\limits_a^b -|f| \leqslant \int\limits_a^b f \leqslant \int\limits_a^b |f| \Rightarrow |\int\limits_a^b f| \leqslant \int\limits_a^b |f|$

2. $m \coloneqq \min f(x)$, $M \coloneqq \max f(x)$. $m \leqslant f(x) \leqslant M \Rightarrow \int\limits_a^b m \leqslant \int\limits_a^b f \leqslant \int\limits_a^b M$.

□

Теорема 1.9 (Интегральная теорема о среднем)**.** Пусть $f \in C([a,b])$.

Тогда $\exists c \in (a,b) \colon \int\limits_a^b f = (b-a)f(c)$.

Доказательство. $m \coloneqq \min f = f(p), M \coloneqq \max f = f(q)$ (по теореме Вейерштрасса). Тогда $f(p) \leqslant \frac{1}{b-a}\int\limits_a^b f \leqslant f(q) \xRightarrow{\text{т. Б-К}} \exists c\colon f(c) = \frac{1}{b-a}\int\limits_a^b f$. □

***Определение* 1.8.** $I_f \coloneqq \frac{1}{b-a}\int\limits_a^b f$ — среднее значения f на отрезке $[a,b]$.

***Определение* 1.9.** $f : [a,b] \to \mathbb{R}$. Интеграл с переменным верхним пределом $\Phi(x) \coloneqq \int\limits_a^x f$, где $x \in [a,b]$.

***Определение* 1.10.** $f : [a,b] \to \mathbb{R}$. Интеграл с переменным нижним пределом $\Psi(x) \coloneqq \int\limits_x^b f$, где $x \in [a,b]$.

Замечание. $\Phi(x) + \Psi(x) = \int\limits_a^b f$.

Теорема 1.10 (Теорема Барроу)**.** Пусть $f \in C[a,b]$. Тогда $\Phi'(x) = f(x) \quad \forall x \in [a,b]$. То есть Φ — первообразная функции f.

Доказательство. Надо доказать, что $\lim\limits_{y \to x} \frac{\Phi(y)-\Phi(x)}{y-x} = f(x)$. Проверим для предела справа.

Тогда $\Phi(y) - \Phi(x) = \int\limits_a^y f - \int\limits_a^x f = \int\limits_x^y f$.

Тогда $\frac{\Phi(y)-\Phi(x)}{y-x} = \frac{1}{y-x}\int\limits_x^y f = f(c)$ для некоторого $c \in (x,y)$.

Проверяем определение по Гейне. Берем $y_n > x$ и $y_n \to x$. Тогда $\frac{\Phi(y_n)-\Phi(x)}{y_n-x} = f(c_n)$, где $c_n \in (x, y_n)$, $x < c_n < y_n \to x \Rightarrow c_n \to x \Rightarrow f(c_n) \to f(x)$. □

Следствие. $\Psi'(x) = -f(x) \quad \forall x \in [a,b]$.

Доказательство. $\Psi(x) = \int\limits_a^b f - \Phi(x) = C - \Phi(x) \Rightarrow \Psi' = (C - \Phi(x))' = -Phi'(x) = -f(x)$. □

Теорема 1.11. Непрерывная на промежутке функция имеет первообразную.

Доказательство. $f \colon \langle a,b \rangle \to \mathbb{R}$.

Рассмотрим $F(x) \coloneqq \begin{cases} \int\limits_c^x f & \text{при } x \geqslant c \\ -\int\limits_x^c f & \text{при } x \leqslant c \end{cases}$.

Если $x > c$, то $F'(x) = f(x)$. □

Теорема 1.12 (Формула Ньютона-Лейбница)**.** $f : [a, b] \to \mathbb{R}$ и F – её первообразная. Тогда $\int\limits_a^b f = F(b) - F(a)$.

Доказательство. $\Phi(x) = \int\limits_a^x f$ — первообразная и $F(x) = \Phi(x) + C$.

Тогда $F(b) - F(a) = (\Phi(b) + C) - (\Phi(a) + C) = \Phi(b) - \Phi(a) = \int\limits_a^b f$ □

***Определение* 1.11.** $F \,|_a^b := F(b) - F(a)$

Теорема 1.13 (Линейность интеграла)**.** $\int\limits_a^b (\alpha f + \beta g) = \alpha \int\limits_a^b f + \beta \int\limits_a^b g$.

Доказательство. F, G — первообразные для f, g.

Тогда $\alpha F + \beta G$ — первообразная для $\alpha f + \beta g$. Тогда воспользуемся формулой Ньютона-Лейбница:

$$\int_a^b \alpha f + \beta g = \alpha F + \beta G \,|_a^b = \alpha F(b) + \beta G(b) - \alpha F(a) - \beta G(a).$$

□