

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

$$\int \leftrightarrow \sum \quad a \leftrightarrow g \quad b \leftrightarrow f \quad \sum_{i=1}^k a_i = A_k \quad f' \leftrightarrow b_{k+1} - b_k$$

$$\sum_{k=1}^n a_k b_k = A_n b_n + \sum_{k=1}^{n-1} A_k (b_k - b_{k+1})$$

Это суммирование по частям, оно же **правило Абеля суммы**.

Доказательство. $\triangleleft b_7$, посмотрим с какими коэффициентами оно входит в выражения по обе части равенства:

- Левая часть: a_7
- Правая часть: $A_7 - A_6 = a_7$

Для других случаев тоже верно. □

Теорема 1. Признак Абеля-Дирихле

Дирихле:

1. Последовательность $A_k = \sum_{i=1}^k a_i$ ограничена: $\exists C_A > 0 \quad \forall k \quad |A_k| < C_A$
2. b_k монотонна и $\rightarrow 0$

Абеля:

1. Ряд $\sum a_k$ сходится
2. b_k монотонна, ограничена: $\exists C_B > 0 \quad \forall k \quad |b_k| < C_B$

Если хотя бы один из этих признаков состоялся, $\sum_{k=1}^n a_k b_k$ сходится.

Доказательство.

$$\sum_{k=1}^n a_k b_k = \underbrace{A_n b_n}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n-1} A_k (b_k - b_{k+1})}_{\substack{\exists \text{ конечный предел,} \\ \text{т.к. ряд абсолютно сходится}}}$$

Докажем Дирихле.

$$\sum_{k=1}^{n-1} |A_k| |b_k - b_{k+1}| \leq C_A \sum_{k=1}^{n-1} |b_k - b_{k+1}| = \pm C_A \sum_{k=1}^{n-1} b_k - b_{k+1} = \pm \underbrace{C_A (b_1 - b_n)}_{\text{огр.}} \leq C_A C_B$$

Докажем Абеля.

\exists конечный $\beta = \lim_{k \rightarrow +\infty} b_k$

$$\sum_{k=1}^n a_k b_k = \beta \sum_{k=1}^n a_k + \sum_{k=1}^n a_k (b_k - \beta)$$

Второй ряд сходится по признаку Дирихле, первый сходится по условию. \square

Пример.

$$\sum \frac{\sin n}{\sqrt{n}}$$

Докажем сходимость по признаку Дирихле: $a_n = \sin n, b_n = \frac{1}{\sqrt{n}}$

b_n монот., $\rightarrow 0$

$A_k = \left(\sum_{k=1}^n \sin k \right)$ - орг.?

$$\begin{aligned} |\sin 1 + \sin 2 + \dots + \sin n| &= |\Im(e^i + e^{2i} + e^{3i} + \dots + e^{ni})| \leq |e^i + e^{2i} + \dots + e^{ni}| = \\ &= \left| e^i \frac{e^{ni} - 1}{e^i - 1} \right| = |e^i| \frac{|e^{ni} - 1|}{|e^i - 1|} \leq 1 \frac{2}{|e^i - 1|} =: C_A \end{aligned}$$

Итого A_k ограничено \Rightarrow искомая последовательность сходится по признаку Дирихле.

Свойства сходящихся рядов

1. Группировка

Теорема 2.

$$\sum_{k=1}^{+\infty} a_k = \underbrace{(a_1 + a_2 + \dots + a_{n_1})}_{b_1} + \underbrace{(a_{n_1+1} + \dots + a_{n_2})}_{b_2} + \dots$$

$$n_1 < n_2 < \dots$$

$$A = \sum a_k \quad b_l = \sum_{i=n_{l-1}+1}^{n_l} a_i \quad B = \sum b_l$$

1. Если A сходится, B сходится и имеет ту же сумму
2. Если $\forall k \ a_k \geq 0$, A и B имеют одинаковую сумму.

Доказательство.

$$\sum_{i=1}^m b_i = \sum_{i=1}^{n_m} a_i$$

1. A сходится $\Rightarrow \exists$ кон. $\lim_{i=1}^n a_i$. Тогда

$$\lim_{m \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^m b_i = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^{n_m} a_i = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n a_i$$

2. **Скипнуто**

□

Примечание. 1. B сходится $\nRightarrow A$ сходится. Контрпример: $\sum (-1)^n$

2. $a_n \rightarrow 0$, скобки “ограниченного размера”: $\exists M \forall k |n_k - n_{k-1}| < M$

Тогда B сходится $\Rightarrow A$ сходится:

$$|a_n| \rightarrow 0 \quad |a_n| + |a_{n+1}| \rightarrow 0$$

Скипнуто

Пример.

$$\frac{1}{k(k+1)} = \frac{k}{k+1} - \frac{k-1}{k}$$

$$\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k(k+1)} = \frac{1}{2} - \frac{0}{1} + \frac{2}{3} - \frac{1}{2} + \frac{3}{4} - \frac{2}{3} + \dots = 0$$

Односторонний предел в \mathbb{R} :

$$\lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} f \Big|_{[a, +\infty) \cap D}$$

$f : D \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}, D_1 \subset D, a$ — предельная точка D, D_1

$\lim_{x \rightarrow a} f \Big|_{D_1}$ — предел по подмножеству, аналог одностороннего предела

Определение. Предел по направлению $l, |l| = 1$:

$$\lim_{t \rightarrow 0+0} f(a + t\vec{l})$$

Определение. Предел вдоль пути (непрерывного) $\gamma : [-\alpha, \alpha] \rightarrow \mathbb{R}^m$ функции $f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$:

$$\lim_{t \rightarrow 0} f(\gamma(t))$$

1. Если $\exists \lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$, то \exists и пределы всем направлениям и они равны L .

2. Если пределы по направлениям \exists и не равны, то $\nexists \lim_{x \rightarrow a} f(x)$

Пример.

$$f = \frac{xy}{x^2 + y^2}$$

$$l := (\cos \varphi, \sin \varphi) \quad \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t \cos \varphi t \sin \varphi}{t^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} = \cos \varphi \sin \varphi \Rightarrow \nexists \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y)$$

Определение. Предел вдоль кривой

Скipped

Линейное отображение = линейный оператор

$$f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n - \text{лин.} \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^m \quad f(\alpha x + \beta y) = \alpha f(x) + \beta f(y)$$

Определение. Линейное отображение $f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ — линейный функционал

Скipped

Линейные отображения образуют линейное пространство, т.е. это множество замкнуто по сложению и умножению на скаляры.

Линейное отображение задается матрицей:

$$f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n \quad f \leftrightarrow A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

$$f(x) = Ax$$

Теорема 3. $\mathcal{A} : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ — лин. оператор

Эквивалентны следующие утверждения:

1. \mathcal{A} — обратим
2. $\mathcal{A}(\mathbb{R}^m) = \mathbb{R}^m$

Линейные отображения “общего вида”:

- $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad f(x) = \alpha x \quad f \leftrightarrow \alpha \in \mathbb{R}$
- $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R} \quad f(x) = \langle x, a \rangle \quad f \leftrightarrow a \in \mathbb{R}^m$
- $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m \quad f(x) = xv \quad f \leftrightarrow v \in \mathbb{R}^m$

2. Дифференцирование отображений

Определение. 1. Бесконечно малое отображение $\varphi : E \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$

x_0 — предельная точка E

φ — бесконечно малое отображение при $x \rightarrow x_0$ $\varphi(x) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} 0$

2. $o(h)$ (оно же $o(|h|)$)

$\varphi : E \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$, 0 — предельная точка E

$\varphi(h) = o(h)$ при $h \rightarrow 0$, если $\frac{\varphi(h)}{|h|} \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0$

По-другому: $\exists \alpha : E \rightarrow \mathbb{R}^l$ — бесконечно малое при $h \rightarrow 0$:

$$\varphi(h) = |h|\alpha(h)$$

Определение. $F : E \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$, $a \in \text{Int}E$

F — дифф. в точке a , если:

\exists лин. оп. $L : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$ \exists бесконечно малое $\alpha : E \rightarrow \mathbb{R}^l$:

$$F(a+h) = F(a) + Lh + |h|\alpha(h), h \rightarrow 0$$

$$F(a+h) = F(a) + Lh + o(h)$$

$$x := a + h$$

$$F(x) = F(a) + L(x-a) + |x-a|\alpha(x-a)$$

Определение. Оператор L из определения — **производный оператор** отображения F в точке a (“производная”), обозначается $F'(a)$.

Матрица $F'(a)$ — **матрица Якоби** F в точке a

Определение. Выражение $F'(a)h$ называется **дифференциалом** отображения F в точке a .

Это понимают как:

1. Производный оператор $h \mapsto F'(a)h$

2. Отображение $E \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$ $(x, h) \mapsto F'(x) \cdot h$

$$F : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \quad a \in \mathbb{C}$$

Определение. F комплексно дифференцируема в точке A , если $\exists \lambda \in \mathbb{C}$:

$$F(a+h) = F(a) + \lambda h + o(h), h \rightarrow 0$$

$$h = x + iy \leftrightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \quad \lambda = a + bi$$

$$h \mapsto \lambda h$$

$$(x + iy) \mapsto (a + bi)(x + iy) = ax - by + i(ay + bx)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} ax - by \\ ay + bx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$$

Этому соответствует вещественное отображение $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$

$$F(a + h) = F(a) + Lh + o(h)$$

Лемма 1. Производный оператор единственный.

Доказательство.

$$\exists \delta > 0 \quad \forall h : |h| < \delta \quad a + h \in E$$

Возьмём $v \in \mathbb{R}^m \quad h := tv, t < \frac{\delta}{|v|}$

По определению дифференциала:

$$F(a + tv) = F(a) + F'(a)tv + |tv|\alpha(tv) = F(a) + tF'(a)v + |t||v|\alpha(tv)$$

$$F'(a)v = \frac{F(a + tv) - F(a)}{t} - \underbrace{\frac{|t|}{t}}_{\pm 1} \overbrace{|v|\alpha(tv)}^{\xrightarrow[t \rightarrow 0]{} \pm |v|0}$$

$$F'(a)v = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{F(a + tv) - F(a)}{t}$$

Т.к. по всем направлениям производная равна, оператор единственный. □

Примечание. О дифференцировании функций нескольких переменных

$$f : E \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}, a \in \text{Int} E$$

f — дифф. $\exists \lambda_1 \dots \lambda_m \in \mathbb{R}, \exists \varphi$ бесконечно малая при $x \rightarrow a$

$$f(x_1 \dots x_m) = f(a_1 \dots a_m) + \lambda_1(x_1 - a_1) + \lambda_2(x_2 - a_2) + \dots + \lambda_m(x_m - a_m) + |x - a|\varphi(x)$$

Примечание. F дифф. в $a \Rightarrow F$ непр. в a