

# Математический анализ

5 сентября 2022

# Повторение

## Линейные и нормированные пространства

$L$  – линейное пространство

$\|\cdot\|$  – норма

$$\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|, \forall \alpha \in \mathbb{R}(\mathbb{C}), x \in L$$

Нормированное пространство

$$\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$$

$$\|x\| = 0 \Rightarrow x = 0$$

**Замечание.** Норма всегда порождает метрику (нормированное  $\Rightarrow$  метрическое).

**Замечание.**  $\forall$  конечномерное пространство полное.

**Определение.** Полное нормированное пространство  $\Leftrightarrow$  банахово.

**Пример 1.** Неполное нормированное пространство:

$$C([0; 1]), \quad \|f\|_L = \int_0^1 |f(x)| dx$$

$$\int_0^{\frac{1}{2}} f_n(x) dx \rightarrow 0 \quad \exists N : n > N < \frac{\varepsilon}{2}$$

$$\int_{\frac{1}{2}}^1 (1 - f_n(x)) dx \rightarrow 0 \quad \exists N : n > N < \frac{\varepsilon}{2}$$

$$\forall \varepsilon \exists N \forall n, m > N \int_0^1 |f_n(x) - f_m(x)| dx < \varepsilon$$

Можно дополнить его до полного, получится:

$$L_1(0, 1) = \{f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R} : \int_0^1 |f_n(x)| dx < \infty\}$$

$C([0, 1])$  будет полным по другой норме:  $\|f\| = \max_{x \in [0, 1]} |f(x)|$

## Линейные операторы

**Определение.** Линейный оператор

$$A(\alpha x + \beta y) = \alpha Ax + \beta Ay \quad A : L \rightarrow M, \quad \text{где } M = \mathbb{R}/\mathbb{C}, \quad A - \text{функционал(?)}$$

**Замечание.** Операторы из  $\mathbb{R}^m$  в  $\mathbb{R}^n \leftrightarrow$  матрицы  $\text{Mat}^{m,n}$

## Норма оператора

$$\|A\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_M}{\|x\|_L}, \quad M, L - \text{нормированные пространства}$$

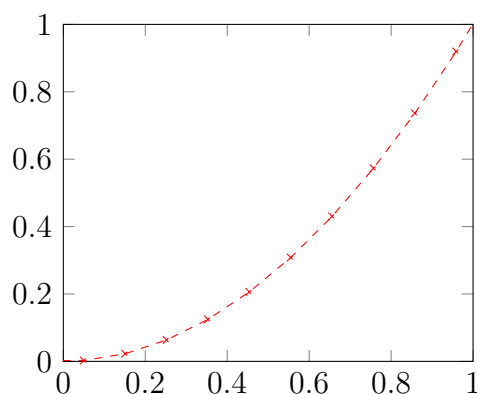
**Пример 2.** Неограниченный оператор:

$$L = C^1([0, 1]), \quad M = C([0, 1]) \quad \|f\| = \sup_{[0,1]} |f|$$

$$\|f\| = \max_{[0,1]} |f|$$

$$(Af)(x) = f'(x)$$

$$f_n(x) = x^n \quad \|f_n\| = 1 \quad \forall n \quad Af_n = f'_n = nx^{n-1} \quad \|Af_n\| = n$$



$$\frac{\|Af_n\|}{\|f_n\|} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$$

**Предложение.**

$$\|A\| = \sup_{x \in B_1(x) \setminus \{0\}} \|Ax\| = \sup_{a \in S_1(0)} \|Ax\| = \sup_{x \in B_1(0) \setminus \{x\}} \frac{\|Ax\|}{\|x\|} = \inf \{c : \|Ax\| \leq c\|x\|\} \quad \forall x \in L$$

$$B_r(x) = \{y \in L : \|y - x\| < r\} - \text{открытый шар радиуса } r$$

$$B_r[x] = \{y \in L : \|y - x\| \leq r\} - \text{замкнутый шар радиуса } r$$

$$\bar{B}_r(x) \neq B_r[x], \text{ где } \bar{B}_r(x) - \text{замыкание}$$

$$S_r(x) = \{y \in L : \|y - x\| = r\} - \text{сфера}$$

**Предложение.**  $A \in B(L)$  (– множество ограниченных линейных операторов)  $\Leftrightarrow$   $A$  непр. в точке 0  $\Leftrightarrow A$  непр. в  $\forall x \in L \Leftrightarrow A$  равн. непр. на  $L$ .

**Замечание.**

$$\|A_1 \cdot A_2\| \leq \|A_1\| \cdot \|A_2\|$$

$$A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad A \in \text{Mat}^{n,n} \quad \|A\| \leq \sqrt{\sum_{i,k=1}^n |a_{i,k}^2|}$$

**Определение.** Матрицы  $\|\cdot\|$  и  $|\cdot|$  эквивалентны, если  $\exists c_1, c_2 > 0$  т. ч.

$$\forall x \in L \quad c_1 \|x\| \leq |x| \leq c_2 \|x\|$$

$$\text{Тогда } \|A\| \sim \sum_{i,k=1}^n |a_{ik}| \sim \max_{i,k \in \{1, \dots, n\}} |a_{ik}| \sim \sqrt{\sum_{i,k=1}^n |a_{ik}|^2}$$

**Замечание.**

$$A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad \exists a \in \mathbb{R}^n \quad \forall x \in \mathbb{R}^n : Ax = (a, x) \quad \|A\|_{B(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})} = \|a\|_{\mathbb{R}^n}$$

$$A : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n \quad \exists a \in \mathbb{R}^n \quad \exists x \in \mathbb{R} : Ax = a \cdot x \quad \|A\|_{B(\mathbb{R}, \mathbb{R}^n)} = \|a\|_{\mathbb{R}^n}$$

## Обратный оператор

$A : L \rightarrow M$  – линейный оператор

1.  $\exists B : M \rightarrow L : AB = I_M$  – ед. оператор в пространстве  $M$

$B \Leftarrow$  правый обратный

2.  $\exists C : M \rightarrow L : CA = I_L$  – ед. оператор в пространстве  $L$

$C \Leftarrow$  левый обратный

3.  $\exists$  оба и равны,  $A^{-1} \Leftarrow$  обратный оператор

$$A \in \text{Mat}^n : \exists A^{-1} \Leftrightarrow \det A \neq 0 \Leftrightarrow \text{Ker } A = \{0\} \Leftrightarrow \dots \Leftrightarrow \text{rank } A = n$$

**Теорема 1.**  $A \in B(\mathbb{R}^n), \exists A^{-1}, B \in B(\mathbb{R}^n), \|B - A\| < \frac{1}{\|A^{-1}\|}$

Тогда  $B$  обратим,

$$\|B^{-1}\| \leq \frac{1}{\frac{1}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\|}, \|B^{-1} - A^{-1}\| \leq \frac{\|A^{-1}\| \cdot \|B - A\|}{\frac{1}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\|}$$

*Доказательство.*  $x \in \mathbb{R}^n$

$$\|Bx\| = \|Ax - (A - B)x\| \geq \|Ax\| - \|(A - B)x\| \geq \frac{\|x\|}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\| \cdot \|x\| = \left( \frac{1}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\| \right) \|x\|$$

Так как:

$$\|Ax\| \geq \frac{\|x\|}{\|A^{-1}\|} \quad x = (A^{-1})(Ax) \quad \|x\| \leq \|A^{-1}\| \cdot \|Ax\|$$

$$Bx = 0 \Rightarrow \|x\| = 0, \text{ так как } (\|Bx\| \geq \|x\| \cdot \underbrace{(\dots)}_{>0}) \Rightarrow x = 0 \quad \text{Ker } B = \{0\} \Rightarrow \exists B^{-1}$$

$$\begin{aligned} y &= Bx \\ x &= B^{-1}y \end{aligned} \quad \|y\| \geq \left( \frac{1}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\| \right) \|B^{-1}y\|, \quad \forall y \in \mathbb{R}^n$$

$$\Rightarrow \|B^{-1}\| \leq \frac{1}{\frac{1}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\|}$$

$$B^{-1} - A^{-1} = B^{-1}(I - BA^{-1}) = B^{-1}(A - B)A^{-1}$$

$$\|B^{-1} - A^{-1}\| \leq \|B^{-1}\| \cdot \|A - B\| \cdot \|A^{-1}\| \leq \frac{\|A^{-1}\| \cdot \|B - A\|}{\frac{1}{\|A^{-1}\|} - \|B - A\|}$$

□

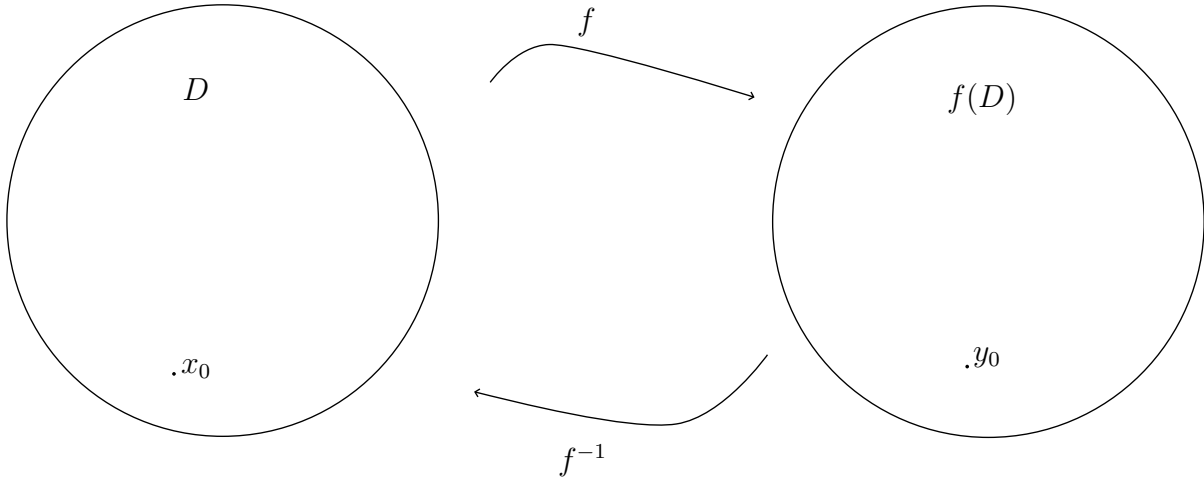
**Замечание.**

1. Множество обратимых операторов открыто
2. Отображение  $A \mapsto A^{-1}$  непрерывно

## Дифференцирование обратной функции

$$D \subset \mathbb{R}^n \quad f : D \rightarrow \mathbb{R}^n \quad x \in \text{Int } D \quad \exists A \in B(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$$

**Определение.** Если  $f(x + h) = f(x) + Ah + o(\|h\|)$ ,  $h \rightarrow 0$ , тогда говорят  $A$  – производная  $f$  в точке  $x$ .



Рассмотрим  $f^{-1} \circ f = \text{id}_D$

Продифференцируем :  $(f^{-1})'(\underbrace{f(x_0)}_{=y_0}) \cdot f'(x_0) = I$

Пусть теперь есть функция на открытом множестве:

$D$  открыто  $f \in C'(D, \mathbb{R}^n)$   $x_0 \in D$   $f'(x_0)$  обратима

**Пример 3.**

1.  $f(x, y) = \begin{pmatrix} e^x \cos y \\ e^x \sin y \end{pmatrix}$

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

$$f'(x, y) = \begin{pmatrix} e^x \cos y & -e^x \sin y \\ e^x \sin y & e^x \cos y \end{pmatrix}$$

2.  $n = 1 \quad f \in C^1(D, \mathbb{R})$

$$f'(x_0) \neq 0$$

$$f|_U - \text{биекция между } U \text{ и } V$$

$$\exists (f^{-1})'(y) = \frac{1}{f'(f^{-1}(y))} \quad \begin{matrix} f \in C^1(U, V) \\ f^{-1} \in C^1(V, U) \end{matrix}$$

**Теорема 2.**  $D \subset \mathbb{R}^n$  открыто,  $f \in C^1(D, \mathbb{R}^n)$

$x_0 \in D$ ,  $f'(x_0)$  – обратимая матрица

Тогда  $\exists$  окрестность  $x_0$ ,  $U \subset D$

$V := f(U)$  открыто и  $f|_U$  – биекция между  $U$  и  $V$ ,  $f^{-1} \in C^1(V, U)$

$$(f^{-1})'(f(x_0)) = (f'(x_0))^{-1}, \quad \forall x \in U \quad f'(x_0) \in I$$

*Доказательство.*

1. Пусть  $f'(x_0) = I$ . При  $x$ , близких к  $x_0$ ,  $f(x) \neq f(x_0)$

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0) + o(\|x - x_0\|)$$

$$\frac{\|f(x) - f(x_0)\|}{\|x - x_0\|} = \frac{\|x - x_0\|}{\|x - x_0\|} + o(1), \quad x \rightarrow x_0$$

$\exists$  окрестность, в которой  $\|o(1)\| < \frac{1}{2} \Rightarrow f(x) - f(x_0) \neq 0$

2.  $f \in C^1(D, \mathbb{R}^n) \Rightarrow f'(x) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} I$

$$\exists r > 0, \quad x_0 : \|f'(x) - I\| < \frac{1}{2} \text{ для } \forall x \in B_r(x_0)$$

$$K = B_{\frac{r}{2}}[x_0] \subset B_r(x_0)$$

3.  $g(x) = f(x) - x$

$$g'(x) = f'(x) - I \quad \|g'(x)\| < \frac{1}{2}, \quad x \in K$$

$$\|g(x_1) - g(x_2)\| \leq \frac{1}{2} \|x_1 - x_2\| \quad (\text{т. Лагранжа})$$

$$\|f(x_1) - f(x_2) - (x_1 - x_2)\| \leq \frac{1}{2}\|x_1 - x_2\| \Rightarrow$$

$$\frac{1}{2}\|x_1 - x_2\| \leq \|f(x_1) - f(x_2)\| \leq \frac{3}{2}\|x_1 - x_2\| \quad (\text{нер-во треуг., из этого следует инъективность})$$

$$0 \leq \|f(x_1) - f(x_2)\| \leq C \cdot \|x_1 - x_2\| - \text{из этого следует непрерывность}$$

$f$  – биекция из  $K$  в  $f(K)$

$f^{-1}$  – из  $f(K)$  в  $K$  непр.

4.  $\delta(K)$  компактно, поскольку это сфера, сфера замкнута, сферу можно вписать в куб, куб – компакт, сфера – его замкнутое подмножество, значит тоже компакт.

$$\|f(\cdot) - f(x_0)\|_{\geq 0} \in C(\delta(K), \mathbb{R}), \quad x_0 \notin \delta(K) \quad (\text{вместо точки подставляем } x)$$

Если  $\inf_{x \in \delta(K)} \|f(x) - f(x_0)\| = 0$ , то  $\exists x' \in \delta(K) : f(x') = f(x_0)$ .

Это означало бы, что  $x' = x_0 \in \delta(K)$  (т. к.  $f|_K$  биекция)

Значит,  $\inf_{x \in \delta(K)} \|f(x) - f(x_0)\| > 0$ .  $\exists d > 0 \quad B_d(f(x_0)) \cap f(\delta(K)) = \emptyset$

5.  $V = B_{\frac{d}{2}}(f(x_0))$

$$x \in \delta(K), \quad y \in V$$

$$\|f(x) - y\| = \underbrace{\|f(x) - f(x_0)\|}_{\|\cdot\| > d} - \underbrace{\|y - f(x_0)\|}_{\|\cdot\| < \frac{d}{2}} > d - \frac{d}{2} = \frac{d}{2}$$

$h_y(x) = \|f(x) - y\|^2 \in C^1(K, \mathbb{R}_+)$  – производная скалярного произведения

$$x \in \delta(K) \quad h_y(x) > \frac{d^2}{4}$$

$$x = x_0 \quad h_y(x_0) = \|f(x_0) - y\|^2 < \frac{d^2}{4}$$

$$\Rightarrow x_y \notin \delta(K), \quad x_y \in \text{Int } K$$

$$h'_y(x_y) = (f(x) - y, f(x) - y)' \Big|_{x=x_y} = 2(f(x) - y)^T \cdot f'(x) \Big|_{x=x_y} = 0$$

$$V \subset f(K) \Rightarrow f(x_y) = y \Rightarrow y \in f(K)$$

6.  $x \in U$

$$\underbrace{\underbrace{f(x+h) - f(h)}_{y+k}}_k = f'(x)h + \varphi(x, h) \quad \frac{\|\varphi(x, h)\|}{\|h\|} \xrightarrow{\|h\| \rightarrow 0} 0$$

$$\text{В силу биекции} \begin{cases} y = f(x) \\ x = f^{-1}(y) \\ x + h = f^{-1}(y + k) \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
k &= f^{-1}(x) \cdot (f^{-1}(y+k) - f^{-1}(y)) + \varphi(f^{-1}(y), h) \\
&\left( \text{требовали в п. 2: } \|f'(x) - I\| < \frac{1}{2} \Rightarrow \exists (f'(x))^{-1} \right) \\
f^{-1}(y+k) &= f^{-1}(y) + (f'(x))^{-1} \cdot k - \underbrace{(f'(x))^{-1} \cdot \varphi(f^{-1}(y), h)}_{=o(\|k\|), \|k\| \rightarrow 0} \\
(*) \left( \frac{\|(f(x))^{-1} \cdot \varphi(f^{-1}(y), h)\|}{\|k\|} \right) &\leq \frac{\|(f(x))^{-1}\| \cdot \|\varphi(f^{-1}(y), f^{-1}(y+k) - f^{-1}(y))\|}{\|k\|} \\
\frac{1}{2} \underbrace{\|x_1 - x_2\|}_h &\leq \underbrace{\|f(x_1) - f(x_2)\|}_k \leq \frac{3}{2} \underbrace{\|x_1 - x_2\|}_h \\
(*) &\leq \|(f'(x))^{-1}\| \cdot \underbrace{\frac{\|\varphi(f^{-1}(y), f^{-1}(y+k) - f^{-1}(y))\|}{\|f^{-1}(y+k) - f^{-1}(y)\|}}_{\xrightarrow[h \rightarrow 0 \ (k \rightarrow 0)]{} 0} \cdot \frac{\|f^{-1}(y+k) - f^{-1}(y)\|}{\|k\|} \\
&\Rightarrow \exists (f^{-1})'(f(x)) = (f'(x))^{-1}
\end{aligned}$$

$$7. (f^{-1})'(y) = (f'(f^{-1}(y)))^{-1}$$

$$f^{-1} : y \mapsto f^{-1}(y) \quad f^{-1} \in C(V, U)$$

$$f' : f^{-1}(y) \mapsto f'(f^{-1}(y)) \quad f' \in C(D, \mathbb{R}^n)$$

$$A \mapsto A^{-1} \quad \text{непрерывное отображение}$$

$$\Rightarrow f^{-1} \in C^1(V, U)$$

$$8. \text{Общий случай} \quad f'(x_0) = A, \det A \neq 0$$

$$\tilde{f}(x) := A^{-1}f(x)$$

$$\tilde{f}'(x) = A^{-1}f'(x)$$

$$\tilde{f}'(x_0) = A^{-1}A = I$$

$$\exists U, \tilde{V}, \tilde{f}|_U - \text{биекция}, \tilde{f}^{-1} \in C^1(\tilde{V}, U)$$

$$(\tilde{f}^{-1})'(\tilde{V}) = (\tilde{f}')^{-1}(U)$$

$$f(x) = A\tilde{f}(x) \quad f|_U \text{ биекция м. } U \text{ и } A\tilde{V} := V$$

$$y = A\tilde{f}(x) \quad x = \tilde{f}^{-1}(A^{-1}y) \Rightarrow f^{-1} \in C^1(V, U)$$

$$A^{-1}y = \tilde{f}(x) \quad f^{-1} = \tilde{f}^{-1} \cdot A^{-1}$$

$$\begin{aligned}
(f^{-1})'(f(x)) &= (\tilde{f}^{-1})'(\overbrace{A^{-1}f(x)}^{=\tilde{f}(x)})A^{-1} = (\tilde{f}'(x))^{-1}A^{-1} = \\
&= (A^{-1}f'(x))^{-1}A^{-1} = (f'(x))^{-1}AA^{-1} = (f'(x))^{-1}
\end{aligned}$$



□

**Замечание.**

$$\begin{cases} f \in C^r(D, \mathbb{R}^n) \\ \dots \\ \dots \end{cases} = \begin{cases} f^{-1} \in C^r(D, \mathbb{R}^n) \\ \dots \\ \dots \end{cases}$$

$$(f^{-1})' = (f')_{ik}^{-1} = \frac{\Delta_{ik}}{\Delta} \quad \text{выражается через } \frac{\partial f_l}{\partial x_m}, \quad l, m = 1, 2, \dots, n$$