

# Математический анализ

12 сентября 2022

**Следствие 1.** (th. о локальном обращении)

$D \subset \mathbb{R}^n$ , открыто,  $f \in C^1(D, \mathbb{R}^n)$ ,  $f'(x)$  обратима при  $\forall x \in D$

Тогда для  $\forall$  открытого  $G \subset D$   $f(G)$  открыто

*Доказательство.* Докажем сначала для  $G = D$

$$\forall y \in f(D) \quad f^{-1}(y) := x \quad f(x) \text{ обр.},$$

$$\exists U \text{ окрестность } x : f(U) \text{ открыто}$$

$$y \in f(U) \subset f(D)$$

$$\Rightarrow f(U) - \text{окр-ть } y$$

$$\text{т. о. } f(D) \text{ открыто}$$

Пусть  $G \subset D$ , открыто. Рассмотрим  $f|_G \Rightarrow$

$\Rightarrow$  принимая доказанное  $\Rightarrow$

$f|_G(G) = f(G)$  – открыто

□

$f$  – биекция

образ  $\forall$  открытого множества открыт  $f$  – открытое отображение

прообраз  $\forall$  открытого множества открыт,  $f$  – непрерывное отображение

**Определение.** Если и то, и другое, то  $f$  – гомеоморфизм

$$f : U \rightarrow V$$

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

$$f \in C(U, V)$$

**Определение.** Если  $f : U \rightarrow V$  – биекция,  $f \in C^r(U, V)$ ,

$f^{-1} \in C^r(V, U)$ , то  $f$  – диффеоморфизм гладкости  $r \in [0, \infty]$

## Неявно заданные отображения

$$D \subset \mathbb{R}^{n+m}, \text{ открытое} \quad \Phi \in C^1(D, \mathbb{R}^m)$$

$$D \ni a = (x, y), \text{ задана} \quad \Phi(x, y) = 0$$

$$\Phi'(a) = \left( \begin{array}{ccc|ccc} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_n} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y_n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \Phi_m}{\partial x_n} & \frac{\partial \Phi_m}{\partial y_1} & \cdots & \frac{\partial \Phi_m}{\partial y_n} \end{array} \right)$$

$$\Phi'(a)(h, k) = \Phi'_x(a)h + \Phi'_y(a)k$$

Ищем такую  $y = \varphi(k)$ , что  $\Phi(x, \varphi(x)) = 0$

**Пример 1.**  $x^2 + y^2 = 1 \quad y = \sqrt{1 - x^2}$

$$\Phi(x, y) = x^2 + y^2 - 1$$

$$\Phi'(x, y) = (2x \ 2y)$$

$$\Phi'_x = 2x$$

$$\Phi'_y = 2y$$

**Пример 2.**  $\Phi(x, y) = Ax + By \quad B - \text{квадратная}$

$B$  обратима  $\Leftrightarrow$  уравнение разрешимо

$$\Phi'_x = A \quad \Phi'_y = B$$

$$\begin{aligned} \underbrace{\Phi(x, y)}_{=0} &= \underbrace{\Phi(x_0, y_0)}_{=0} + \Phi'(x_0, y_0)(x - x_0) + \\ &+ \Phi'_y(x_0, y_0)(y - y_0) + o(x - x_0, y - y_0), \quad x \rightarrow 0 \ y \rightarrow 0 \end{aligned}$$

$\Phi'_y(x_0, y_0) - \text{обратима}$

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

$\Phi(x_0, y_0) = 0 \ (x_0, y_0) \in D$ ,  $\Phi'_y(x_0, y_0) - \text{обратимо}$ . Тогда

$\exists U - \text{окр. } x_0, V - \text{окр. } y_0, U \times V = D$

1.  $\forall x \in U \ \exists! y \in V : \Phi(x, y) = 0$

(это задает отображение  $\varphi : U \rightarrow V, y = \varphi(x)$ )

2.  $\varphi \in C^1(U, V), \forall x \in U, y \in V \quad \Phi'_y(x, \varphi(x)) \text{ обратимо}$

3.  $\varphi'(x) = -(\Phi'_y(x, \varphi(x)))^{-1} \Phi'_x(x, \varphi(x)) = -(\Phi'_y(x, \varphi(x)))^{-1} \Phi_x(x, \varphi(x))$

*Доказательство.*

1.  $F(x, y) = (x, \Phi(x, y)) : D \rightarrow \mathbb{R}^{n+m}$

$$F'(x, y) = \left( \begin{array}{c|c} I & 0 \\ \hline \Phi'_x(x, y) & \Phi'_y(x, y) \end{array} \right)$$

$$F \in C^1(D, \mathbb{R}^{n+m})$$

$$\det F'(x, y) = \det \Phi'_y(x, y)$$

$$\Phi'_y(x_0, y_0) \text{ обратимо} \Rightarrow F'(x_0, y_0) \text{ обратимо}$$

Th. о локальном обращении

$\exists \hat{U}$  – окрестность  $(x_0, y_0) : F(\hat{U}) = \hat{V}$  открытое,

$F|_{\hat{U}}$  – биекция,  $F^{-1} \in C^1(\hat{V}, \hat{U})$ ,  $F(x_0, y_0) = (x_0, 0)$

$\exists \delta > 0 \ \hat{U} = B_\delta^n(x_0) \times B_\delta^m(y_0) \subset U$

$\hat{U} \subset B_{\sqrt{2}\delta}^{n+m} \subset U$ ,  $n, m$  – размерности

$(x_0, 0) \in F(\hat{U}) \subset \hat{V}$

$\exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon^{n+m}(x_0, 0) \subset F(\hat{U})$

$\underbrace{B_\varepsilon^n(x_0) \times \{0\}}_{=\hat{V}} \subset F(\hat{U})$

$\forall x \in \hat{V} \quad F^{-1}(x, 0) =: (x_1, y)$

Это означает

$$(x, \Phi(x, y)) = F(x, y) = (x, 0)$$

$\Rightarrow x_1 = x, \Phi(x, y) = 0 \quad (\text{отсюда следует } \varepsilon < \delta)$

$$\forall x \in \underbrace{B_\varepsilon^n(x_0)}_{=U} \ \exists y \in \underbrace{B_\delta^m(y_0)}_{=V} : \Phi(x, y) = 0$$

Если  $\exists x \in U, y_1, y_2 \in V : \Phi(x, y_1) = \Phi(x, y_2) = 0$

то  $F(x, y_1) = (x, 0) = F(x, y_2)$

$F$  биект. и  $\hat{U} \Rightarrow y_1 = y_2$

2.  $y = \pi_2(x, y) = \pi_2 \circ F^{-1}(x, 0)$

$\pi_2 : (x, y) \mapsto y \in C^1(\mathbb{R}^{m+n}, \mathbb{R}^m)$

$F^{-1} \in C^1(\hat{V}, \hat{U})$

$E : x \mapsto (x, 0) \in C^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n+m}) \quad EU = U \times \{0\} \subset \hat{V}$

3.  $\Phi(x, \varphi(x)) = 0$

$$0 = \Phi'(x, \varphi(x)) = \Phi'(x, \varphi(x)), \quad \begin{pmatrix} I \\ \varphi'(x) \end{pmatrix} =$$

$$= \Phi'(x, \varphi(x)) + \underbrace{\Phi'_y(x, \varphi(x)) - \varphi'(x)}_{\text{обр.}}$$

□