

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»**

**Исследовательская работа №1  
по дисциплине “Математический анализ и основы вычислений”  
Вариант 79**

Выполнил: студент гр. J3212

Мирасов К.В.

Проверил: Ершов А.Р.

г. Санкт - Петербург

2025 г.

## **Содержание**

1. Задача 1 .....	3
2. Задача 2 .....	6
3. Задача 3 .....	8
4. Задача 4 .....	10
5. Задача 5 .....	12
6. Задача 6 .....	14
6.1. Аналитический этап .....	14
6.2. Практический этап .....	16
7. Полезные ссылки .....	18

## 1. Задача 1

Найти повторные пределы и двойной предел в точке  $(0, 0)$  в области определения функции:

a)  $f(x, y) = \frac{4x^4 - 5x^2y^2 + 2y^4}{x^4 + 2y^4}$

б)  $f(x, y) = x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right)$

а) У нас рациональная функция, у которой одинаковая степень в числителе и знаменателе, в этом случае можно посмотреть путь  $y = kx$ . То есть буквально попробуем подставить:

$$f(x, kx) = \frac{x^4(4 - 5k^2 + 2k^4)}{x^4(1 + 2k^4)} = \frac{4 - 5k^2 + 2k^4}{1 + 2k^4}$$

Можем заметить, что функция зависит только от  $k$ , то есть по прямой  $y = kx$   $f(x, y)$  ведет себя как константа, не зависящая от  $x$

$$\varphi(k) = \frac{4 - 5k^2 + 2k^4}{1 + 2k^4}$$

Теперь если мы подставим, к примеру, 1 и 0 в  $\varphi(k)$ , сможем проверить на сходимость к одному значению

$$\varphi(0) = 4, \quad \varphi(1) = \frac{1}{3}$$

То есть по факту получается ситуация, когда разные пути мы берем, а приходим в разные точки, которые не равны друг другу, такого не должно быть, если двойной предел у функции существует. Мы получаем, что

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x, 0) = 4$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x, x) = \frac{1}{3}$$

Пределы по разным путям различны  $\Rightarrow \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y)$  не существует

Далее посмотрим на повторные пределы, мы сможем увидеть, что они существуют, но дают разные значения

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left( \lim_{y \rightarrow 0} f(x, y) \right)$$

При фиксированном  $x \neq 0$  получаем:

$$\lim_{y \rightarrow 0} f(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{4x^4 - 5x^2y^2 + 2y^4}{x^4 + 2y^4} = \frac{4x^4}{x^4} = 4$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} 4 = 4$$

Возьмем следующий повторный предел, убедимся что значения различаются

$$\lim_{y \rightarrow 0} \left( \lim_{x \rightarrow 0} f(x, y) \right)$$

При фиксированном  $y \neq 0$  получаем:

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x, y) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{4x^4 - 5x^2y^2 + 2y^4}{x^4 + 2y^4} = \frac{2y^4}{2y^4} = 1$$

$$\lim_{y \rightarrow 0} 1 = 1$$

**Вывод:**

$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y)$  не существует

$$\lim_{x \rightarrow 0} (\lim_{y \rightarrow 0} f(x, y)) = 4$$

$$\lim_{y \rightarrow 0} (\lim_{x \rightarrow 0} f(x, y)) = 1$$

б) Введём оценку  $|\sin(t)| \leq 1, \forall t \in \mathbb{R}$

Можем её применить к нашей функции  $f(x, y) = x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right), y \neq 0$

$$\left| x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right) \right| \leq x^2$$

Теперь можно попытаться доказать, что

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right) = 0$$

$$\left| x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right) \right| < \varepsilon \Rightarrow x^2 < \varepsilon \Rightarrow |x| < \sqrt{\varepsilon}$$

Введём  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$$r < \delta \Rightarrow |x| \leq r < \delta$$

$$|f(x, y)| \leq x^2 \leq r^2 < \delta^2$$

Из этого можно понять, что лучше взять за  $\delta = \sqrt{\varepsilon}$

Тогда уже из  $\sqrt{x^2 + y^2} < \delta \Rightarrow |f(x, y)| \leq r^2 < \delta^2 = \varepsilon$

Буквально неявно применили определение предела для  $\mathbb{R}^n$ , а конкретно для функций двух переменных и доказали, что

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right) = 0$$

Далее найдем повторные пределы и увидим, что один существует и равен двойному, а второй - не существует впринципе

$$\lim_{y \rightarrow 0} \left( \lim_{x \rightarrow 0} f(x, y) \right)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x, y) = \lim_{x \rightarrow 0} x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right) = 0$$

$$\lim_{y \rightarrow 0} 0 = 0$$

Следующий повторный предел интереснее, там появляется проблема поиска предела

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left( \lim_{y \rightarrow 0} f(x, y) \right)$$

$$\lim_{y \rightarrow 0} f(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0} x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right)$$

Мы знаем, что предел  $\lim_{y \rightarrow 0} \sin\left(\frac{1}{y}\right)$  не существует из-за того, что синус осциллирует. Значит получаем, что  $\lim_{x \rightarrow 0} \left( \lim_{y \rightarrow 0} f(x, y) \right)$  не существует

**Вывод:**

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} x^2 \sin\left(\frac{1}{y}\right) = 0$$

$$\lim_{y \rightarrow 0} \left( \lim_{x \rightarrow 0} f(x, y) \right) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left( \lim_{y \rightarrow 0} f(x, y) \right) \text{ не существует}$$

## 2. Задача 2

Найти частные производные данной функции  $f(x, y)$  в данной точке  $(x_0, y_0)$ . Выяснить, является ли функция дифференцируемой в этой точке. Если да, то найти её дифференциал в точке.

$$f(x, y) = xy + \sin(\sqrt[3]{x^2 y^4}), \quad (x_0, y_0) = (0, 0)$$

Важно понять как ведёт себя кубический корень. Рассмотрим

$$\varphi(t) = t^{\frac{1}{3}} \quad \varphi'(t) = \frac{1}{3}t^{-\frac{2}{3}}, \quad t \neq 0$$

В точке  $t = 0$  рассмотрим  $\varphi'(0)$  как предел

$$\varphi'(0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{h} - 0}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^{\frac{1}{3}}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\frac{2}{3}} \Rightarrow h^{-\frac{2}{3}} \rightarrow +\infty$$

Значит, производной у функции в точке 0 нет,  $t^{\frac{1}{3}}$  непрерывна в 0, но не дифференцируема в 0. Далее рассмотрим  $\psi(x, y) = \sqrt[3]{x^2 y^4} = (x^2 y^4)^{\frac{1}{3}}$ , проверим что будет при фиксации  $x$  и  $y$

$$\psi(x, 0) = \sqrt[3]{x^2 0^4} = 0 \quad \psi(0, y) = \sqrt[3]{0^2 y^4} = 0$$

Найдем частные производные в точке  $(0, 0)$ ,  $h \neq 0$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\psi(0 + h, 0) - \psi(0, 0)}{h} = \frac{0}{h} = 0$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\psi(0, 0 + h) - \psi(0, 0)}{h} = \frac{0}{h} = 0$$

Наша основная функция может быть записана так

$$f(x, y) = xy + \sin(\sqrt[3]{x^2 y^4}) = xy + \sin(\psi(x, y))$$

Найдем также частные производные уже для  $f(x, y)$  в точке  $(0, 0)$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h, 0) - f(0, 0)}{h} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0, h) - f(0, 0)}{h} = 0$$

Можем сказать уже, что дифференциал в  $(0, 0)$  очевиден

$$df(0, 0) = 0dx + 0dy = 0$$

Но наличие частных производных в точке не гарантирует дифференцируемость. Необходимо проверить, что при  $(x, y) \rightarrow (0, 0)$  получается так:

$$f(x, y) - f(0, 0) - \frac{\partial f}{\partial x}x - \frac{\partial f}{\partial y}y = o(\sqrt{x^2 + y^2})$$

$$f(x, y) = o(\sqrt{x^2 + y^2}), \quad (x, y) \rightarrow (0, 0)$$

Из этого нужно доказать, что

$$\frac{|f(x, y)|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \rightarrow 0$$

Введем оценки выражений

$$|f(x, y)| \leq |xy| + \left| \sin\left(\sqrt[3]{x^2 y^4}\right) \right|, \quad |\sin(t)| \leq |t|$$

$$\left| \sin\left(\sqrt[3]{x^2 y^4}\right) \right| \leq \left| \sqrt[3]{x^2 y^4} \right| = \left| x^{\frac{2}{3}} \right| \left| y^{\frac{4}{3}} \right|$$

$$|f(x, y)| \leq |xy| + \left| x^{\frac{2}{3}} \right| \left| y^{\frac{4}{3}} \right|$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad |x| \leq r \quad |y| \leq r$$

Далее введем на основе  $r$  более точные оценки

$$|xy| \leq |x||y| \leq rr \leq r^2$$

$$\left| x^{\frac{2}{3}} \right| \left| y^{\frac{4}{3}} \right| \leq r^{\frac{2}{3}} r^{\frac{4}{3}} = r^{\frac{2}{3} + \frac{4}{3}} = r^2$$

$$|f(x, y)| \leq r^2 + r^2 = 2r^2$$

Получаем в итоге, что и хотели

$$\frac{|f(x, y)|}{\sqrt{x^2 + y^2}} \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{|f(x, y)|}{r} \leq 2r \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad f(x, y) = o(\sqrt{x^2 + y^2})$$

Функция дифференцируема в точке  $(0, 0)$ , значит  $df(0, 0)$  реально равен 0

### 3. Задача 3

В данном дифференциальном уравнении (ДУ) перейти от функции  $z(x, y)$  к функции  $w(u, v)$ . Решить полученное ДУ. Показать, что найденное решение (в исходных переменных) удовлетворяет исходному ДУ

$$y \frac{\partial z}{\partial x} - x \frac{\partial z}{\partial y} = (y - x)z, \quad u = x^2 + y^2, \quad v = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}, \quad w = \ln(z) - x - y$$

Для решения данного ДУ будем использовать метод характеристик. Слева можем заметить, что там находится дифференциал по направлению  $(y, -x)$ . Метод подразумевает, что мы смотрим на кривые, вдоль которых уравнение упрощается до обычного ДУ, вместо того, чтобы сразу искать  $z(x, y)$ . Введем кривые:

$$x = x(s), \quad y = y(s), \quad z = z(s)$$

По правилу цепи получаем выражение и хотим чтобы оно совпадала с левой частью ДУ  $a \frac{\partial z}{\partial x} + b \frac{\partial z}{\partial y}$

$$\frac{dz}{ds} = \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{ds} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{dy}{ds}$$

$$\frac{dx}{ds} = a(x, y), \quad \frac{dy}{ds} = b(x, y)$$

Всё превращается в систему обычных ДУ

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = y \\ \frac{dy}{ds} = -x \\ \frac{dz}{ds} = (y - x)z \end{cases}$$

Поделим второе уравнение на первое и получим:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x}{y} \mid * y \Rightarrow y \frac{dy}{dx} = -x \mid * dx \Rightarrow y dy = -x dx$$

$$\int y dy = \int -x dx \Rightarrow \frac{y^2}{2} = -\frac{x^2}{2} + C \Rightarrow x^2 + y^2 = C_1$$

Рассмотрим  $w(s) = \ln z(s) - x(s) - y(s)$ , найдем производную по  $s$

$$\frac{dw}{ds} = \frac{1}{z} \frac{dz}{ds} - \frac{dx}{ds} - \frac{dy}{ds} \Rightarrow \frac{1}{z} (y - x)z - y + x = 0$$

Получаем, что по каждой характеристике, в нашем случае окружности,  $w$  не меняется, остается одним и тем же числом. Значит, что  $w$  зависит только от  $x^2 + y^2$ . Пусть  $w(x, y) = F(u)$ , где  $u = x^2 + y^2$  и  $F$  - произвольная дифференцируемая функция  $\Rightarrow F(x^2 + y^2) = \ln z(x, y) - x - y$

$$\ln z(x, y) = F(x^2 + y^2) + x + y$$

$$z(x, y) = e^{F(x^2 + y^2) + x + y}$$

Введем  $G(u) = e^{F(u)}$   $\Rightarrow z(x, y) = e^{x+y} G(x^2 + y^2)$ ,  $G$  - также произвольная дифференцируемая функция

$$\frac{\partial z}{\partial x} = e^{x+y}G(u) + e^{x+y}G'(u)2x$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = e^{x+y}G(u) + e^{x+y}G'(u)2y$$

Проверим, что наше  $z(x, y)$  удовлетворяет ДУ  $y \frac{\partial z}{\partial x} - x \frac{\partial z}{\partial y} = (y - x)z$ . Подставим наши значения

$$y \frac{\partial z}{\partial x} - x \frac{\partial z}{\partial y} = e^{x+y}G(u)(y - x)$$

$$y \frac{\partial z}{\partial x} - x \frac{\partial z}{\partial y} = (y - x)z(x, y)$$

Осталось перейти к функции  $w(u, v)$  от  $z(x, y)$

$$w = \ln z - x - y \Rightarrow \ln z = w + x + y \Rightarrow z = e^{w+x+y}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{1}{z} \frac{\partial z}{\partial x} - 1, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{z} \frac{\partial z}{\partial y} - 1$$

$$\frac{\frac{\partial z}{\partial x}}{z} = \frac{\partial w}{\partial x} + 1, \quad \frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{z} = \frac{\partial w}{\partial y} + 1$$

Подставим в исходное ДУ и получим:

$$y \left( \frac{\partial w}{\partial x} + 1 \right) - x \left( \frac{\partial w}{\partial y} + 1 \right) = y - x \Rightarrow y \frac{\partial w}{\partial x} - x \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

По правилу цепи мы можем выразить  $\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}$  через  $\frac{\partial w}{\partial u}, \frac{\partial w}{\partial v}$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 2x \frac{\partial w}{\partial u} - \frac{1}{x^2} \frac{\partial w}{\partial v}, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 2y \frac{\partial w}{\partial u} - \frac{1}{y^2} \frac{\partial w}{\partial v}$$

Из  $y \frac{\partial w}{\partial x} - x \frac{\partial w}{\partial y} = 0$  получаем:

$$\left( -\frac{y}{x^2} + \frac{x}{y^2} \right) \frac{\partial w}{\partial v} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial v}(u, v) = 0$$

Получается, что оно зависит только от  $u$ , значит  $w(u, v) = F(u)$ , где  $F$  - произвольная дифференцируемая функция. Дальше мы просто подставляем  $u = x^2 + y^2$  и можем выразить уже то, что получали до этого  $z(x, y) = e^{x+y}G(x^2 + y^2)$ , проверку решения с этим выражением мы делали, повторяться не имеет смысла

#### 4. Задача 4

Доказать, что уравнение  $F(x, y) = 0$ ,  $F = (F_1, F_2)$  задает неявно дифференцируемое отображение  $y = f(x)$ ,  $y = (y_1, y_2)$ ,  $x = (x_1, x_2)$  в окрестности точки  $M(x_1, x_2, y_1, y_2)$ . Найти производную этого отображения в точке  $M$  (матрица Якоби) и одну (любую на выбор) из производных второго порядка  $\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k}$  в точке  $M$

$$\begin{cases} F_1(x, y) = x_1 + x_2 + y_1 + 2y_2 - 5 \\ F_2(x, y) = x_1^3 + x_2^2 + y_1^4 + y_2^4 - 4 \end{cases}, \quad M(1, 1, 1, 1)$$

Проверяем, что  $M$  лежит на множестве решений  $F(1, 1, 1, 1) = 0$

$$F_1(1, 1, 1, 1) = 1 + 1 + 1 + 2 - 5 = 0$$

$$F_2(1, 1, 1, 1) = 1 + 1 + 1 + 1 - 4 = 0$$

Будем применять теорему о неявной функции, для этого посчитаем матрицу

$$\frac{\partial F}{\partial y}(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial y_1} & \frac{\partial F_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial y_1} & \frac{\partial F_2}{\partial y_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4y_1^3 & 4y_2^3 \end{pmatrix}$$

Проверяем в точке  $\frac{\partial F}{\partial y}(M) = \frac{\partial F}{\partial y}(1, 1, 1, 1)$ . Получаем матрицу  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 4 \end{pmatrix}$ , её детерминант  $= -4 \neq 0$ , значит обратима и можем применять спокойно теорему о неявной функции: в окрестности точки  $M$  есть дифференцируемое  $y = f(x)$ , можем найти  $df(M)$ . Сначала найдем  $\frac{\partial F}{\partial x}(x, y)$

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x, y) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 3x_1^2 & 2x_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial x}(M) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}$$

По теореме о неявной функции в точке  $M$  получаем выражение:

$$\frac{\partial F}{\partial x}(M) + \frac{\partial F}{\partial y}(M)df(M) = 0$$

$$df(M) = -\left(\frac{\partial F}{\partial y}(M)\right)^{-1} \frac{\partial F}{\partial x}(M)$$

$$\left(\frac{\partial F}{\partial y}(M)\right)^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{4} \end{pmatrix}$$

$$df(M) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Осталось взять одну из производных второго порядка  $\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k}(M)$ . Я выберу  $\frac{\partial^2 y_1}{\partial x_1^2}(M)$ .

Зафиксируем  $x_2 = 1$ , как в точке  $M$ , будем рассматривать всё как функцию одной переменной  $t = x_1$ . Наша система будет выглядеть так:

$$\begin{cases} F_1(t, 1, y_1(t), y_2(t)) = 0 \\ F_2(t, 1, y_1(t), y_2(t)) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_1(t) = t + 1 + y_1(t) + 2y_2(t) - 5 \\ F_2(t) = t^3 + 1 + y_1(t)^4 + y_2(t)^4 - 4 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt}F_1 = 1 + y'_1 + 2y'_2 = 0$$

$$\frac{d}{dt}F_2 = 3t^2 + 4y_1^3y'_1 + 4y_2^3y'_2$$

Если проверить, то всё будет соотноситься с нашими первыми производными, тут всё довольно тривиально. Можем продолжить дифференцировать, ищем уже вторые производные

Из  $1 + y'_1 + 2y'_2 = 0$  получаем  $y''_1 + 2y''_2$

Из  $3t^2 + 4y_1^3y'_1 + 4y_2^3y'_2$  получаем  $6t + 12y_1^2(y'_2)^2 + 4y_1^3y''_1 + 12y_2^2(y'_2)^2 + 4y_2^3y''_2$

Подставим  $t = 1$ ,  $y_1 = y_2 = 1$ ,  $y'_1 = -\frac{1}{2}$ ,  $y'_2 = -\frac{1}{4}$  и получим систему

$$\begin{cases} y''_1 + 2y''_2 = 0 \\ y''_1 + y''_2 = -\frac{39}{16} \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 y_1}{\partial x_1^2}(M) = y''_1(1) = -\frac{39}{8}$$

## 5. Задача 5

С помощью метода Лагранжа исследовать функцию на условный экстремум при данном(-ых) уравнении(-ях) связи.

$$f(x, y, z) = x + y - z, \quad y + z = 1, \quad x^2 + y^2 = 1$$

Введем условия, которые задают две поверхности ограничения для нашей функции

$$g_1(x, y, z) = y + z - 1 = 0$$

$$g_2(x, y, z) = x^2 + y^2 - 1 = 0$$

Построим лагранжиан на основе введенных условий

$$L(x, y, z, \lambda_1, \lambda_2) = f(x, y, z) + \lambda_1 g_1(x, y, z) + \lambda_2 g_2(x, y, z)$$

Далее берем частные производные по каждой переменной и множителям Лагранжа, приравниваем к нулю

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 1 + 2\lambda_2 x$$

$$\frac{\partial L}{\partial y} = 1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 y$$

$$\frac{\partial L}{\partial z} = -1 + \lambda_1$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = y + z - 1$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = x^2 + y^2 - 1$$

Получаем систему условий Лагранжа

$$\begin{cases} 1 + 2\lambda_2 x = 0 \\ 1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 y = 0 \\ -1 + \lambda_1 = 0 \\ y + z - 1 = 0 \\ x^2 + y^2 - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\lambda_1 = 1$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2x}, \quad \lambda_2 = -\frac{1}{y}$$

$$y = 2x = \pm \frac{2}{\sqrt{5}}$$

Из ограничений получаем 2 точки по  $(x, y, z)$

$$(x, y, z) = \left( \frac{1}{\sqrt{5}}, \frac{2}{\sqrt{5}}, 1 - \frac{2}{\sqrt{5}} \right)$$

$$(x, y, z) = \left( -\frac{1}{\sqrt{5}}, -\frac{2}{\sqrt{5}}, 1 + \frac{2}{\sqrt{5}} \right)$$

Считаем значения функции в данных точках

$$f_1(x, y, z) = \sqrt{5} - 1$$

$$f_2(x, y, z) = -\sqrt{5} - 1$$

Область допустимых точек - пересечение:  $x^2 + y^2 = 1$  (окружность в проекции на  $x, y$ ) и плоскости  $y + z = 1$ . Это замкнутая, ограниченная кривая в  $\mathbb{R}^3$ , а  $f$  - непрерывная

$\Rightarrow$

условный максимум и минимум существуют и достигаются в критических точках. У нас их ровно две, одна дает условный максимум, другая - условный минимум.

Получаем условный максимум в точке:

$$\sqrt{5} - 1 > -\sqrt{5} - 1 \Rightarrow (x, y, z) = \left( \frac{1}{\sqrt{5}}, \frac{2}{\sqrt{5}}, 1 - \frac{2}{\sqrt{5}} \right)$$

Значит условный минимум в точке:

$$(x, y, z) = \left( -\frac{1}{\sqrt{5}}, -\frac{2}{\sqrt{5}}, 1 + \frac{2}{\sqrt{5}} \right)$$

## 6. Задача 6

Изучить методы поиска локальных экстремумов функции с помощью градиентных методов.

$$f(x, y) = x^4 - 2x^2 + y^3 - 3y$$

### 6.1. Аналитический этап

Для начала найдем стационарные точки у нашей функции  $f(x, y)$ . Найдем частные производные:

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = 4x^3 - 4x$$

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = 3y^2 - 3$$

По необходимому условию экстремума: если  $f$  дифференцируема в окрестности  $(x_0, y_0)$  и в этой точке есть локальный экстремум, то градиент равен нулю. Из градиента можем получить систему уравнений для нахождения точек экстремума:

$$\begin{cases} 4x^3 - 4x = 0 \\ 3y^2 - 3 = 0 \end{cases}$$

С помощью этой системы уравнений найдем точки предполагаемых экстремумов.

Все возможные  $x$ :

$$4x^3 - 4x = 0$$

$$4x(x^2 - 1) = 0 \Rightarrow \begin{cases} 4x = 0 \\ x^2 - 1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ x = \pm 1 \end{cases}$$

Все возможные  $y$ :

$$3y^2 - 3 = 0$$

$$3(y^2 - 1) = 0 \Rightarrow y^2 - 1 = 0 \Rightarrow y = \pm 1$$

Все возможные точки предполагаемых экстремумов:

$$(-1, -1) \quad (-1, 1) \quad (0, -1) \quad (0, 1) \quad (1, -1) \quad (1, 1)$$

Для каждой точки теперь нужно найти матрицу Гессе и проверить выполнение условия достаточного экстремума. Благодаря этому мы сможем сделать вывод о типе экстремума. Матрица Гессе для каждой точки будет выглядеть так:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, y) = 12x^2 - 4$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x, y) = 6y$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x, y) = 0$$

$$H = \begin{pmatrix} 12x^2 - 4 & 0 \\ 0 & 6y \end{pmatrix}$$

Тип экстремума можем понять через выполнение условия достаточного экстремума, для этого нужно смотреть на определенность матрицы Гессе по критерию Сильвестра, если  $\det(H) > 0$ , то смотрим на  $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_0, y_0)$ , если он больше нуля, то точка является локальным минимумом, иначе - локальный максимум, если  $\det(H) = 0$ , то мы ничего не можем сказать о точке, если  $\det(H) < 0 \Rightarrow$  седловая точка

В общем случае расчеты выглядят так:

$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x, y) \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x, y) - \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x, y) \right)^2$$

$$\det(H) = (12x^2 - 4)6y$$

$(-1, -1) : \det(H) = -48 < 0 \Rightarrow$  седловая точка

$(-1, 1) : \det(H) = 48 > 0 \Rightarrow$  локальный минимум

$(0, -1) : \det(H) = 24 > 0 \Rightarrow$  локальный максимум

$(1, 1) : \det(H) = 48 > 0 \Rightarrow$  локальный минимум

$(0, 1) : \det(H) = -24 < 0 \Rightarrow$  седловая точка

$(1, -1) : \det(H) = -48 < 0 \Rightarrow$  седловая точка

**Итого:**

$\{(-1, -1), (0, 1), (1, -1)\}$  - множество седловых точек

$\{(-1, 1), (1, 1)\}$  - множество точек локального минимума

$\{(0, -1)\}$  - множество точек локального максимума

Во всех стационарных точках  $\det(H) \neq 0$ , поэтому условие достаточного экстремума полностью классифицирует все точки

## 6.2. Практический этап

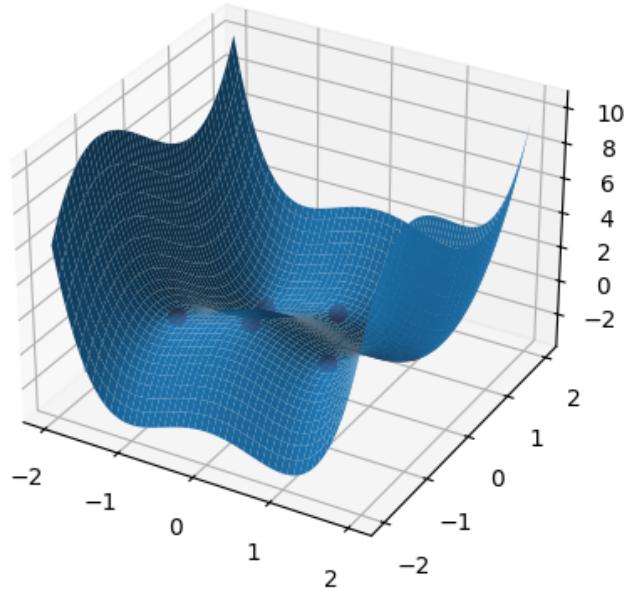


Figure 1: “График  $f(x, y)$ ”

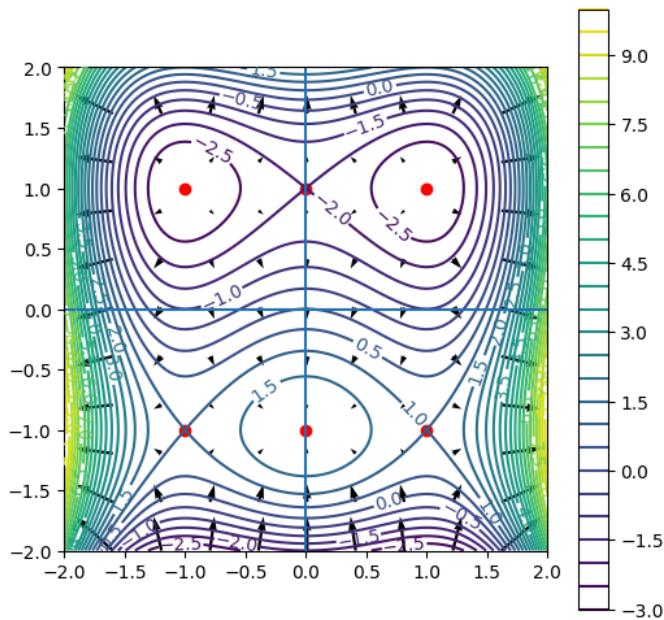


Figure 2: “Линии уровня  $f(x, y)$ ”

Построили график  $f(x, y)$  и её линии уровня, отметили все стационарные точки. Можно увидеть по графикам наглядно, что наша классификация стационарных точек правильна.

Теперь можем показать, что направление наискорейшего возрастания функции совпадает с направлением градиента функции, а убывания - с направление антиградиента. Формально докажем для функции от двух переменных:

Введем определение производной по направлению единичного вектора  $e = (e_1, e_2)$  в точке  $(x_0, y_0)$

$$d_e f(x_0, y_0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + te_1, y_0 + te_2) - f(x_0, y_0)}{t}, \quad \|e\| = 1$$

Пусть  $f(x, y)$  дифференцируема в точке  $(x_0, y_0)$ , тогда при малых  $t$  мы получаем разложение

$$f(x_0 + te_1, y_0 + te_2) \approx f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)te_1 + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)te_2$$

В пределе мы получаем:

$$d_e f(x_0, y_0) = \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)e_1 + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)e_2 \Rightarrow d_e f(x_0, y_0) = \langle \nabla f(x_0, y_0), e \rangle = \|\nabla f(x_0, y_0)\| \cos(\varphi)$$

Поскольку в точке  $(x_0, y_0)$  длина градиента  $\|\nabla f(x_0, y_0)\|$  фиксирована, величина производной по направлению зависит только от  $\cos(\varphi)$ . Очевидно из этого, что максимум достигается при  $\cos(\varphi) = 1, \varphi = 0$ , когда направление совпадает с градиентом, так как превращается всё по итогу в форму  $d_e f(x_0, y_0) = \|\nabla f(x_0, y_0)\|$ . Минимум - при  $\cos(\varphi) = -1$ , то есть движение в направлении антиградиента

Уже на самом графике линий уровня можно наглядно увидеть, что вектор градиента совпадает с направлением наискорейшего возрастания функции. Он также перпендикулярен этим линиям уровня

## **7. Полезные ссылки**

GitHub репозиторий