

Matematika III, 2. cvičení

V tomto cvičení si procvičíme limity funkcí více proměnných, všimneme si rozdílů proti limitám funkcí jedné proměnné. Dále pak parciální a směrové derivace funkcí více proměnných také jejich diferenciál a jeho použití v Taylorově rozvoji. Zamysleme se nad souvislostmi s tečnou rovinou ke grafu funkce. Tyto pojmy také využijeme při aproximacích funkce.

Limity funkcí více proměnných

Pro počítání limit $\frac{0}{0}$ a $\frac{\infty}{\infty}$ nemáme k dispozici žádnou analogii L'Hospitalova pravidla, musíme tedy používat různé úpravy. Rozdíl mezi limitou funkce jedné proměnné a limitou funkce dvou proměnných spočívá v odlišnosti okolí limitního bodu: u funkce jedné proměnné se k tomuto bodu můžeme blížit jen po přímce, tj. ze dvou stran (pak má funkce limitu v bodě, pokud existují obě jednostranné limity, které se rovnají), ale u funkce dvou a více proměnných se k limitnímu bodu můžeme blížit nekonečně mnoha způsoby (po přímkách, parabolách, ...). Existence limity v daném bodě znamená, že nezáleží na cestě, po které se k danému bodu blížíme. Pokud tedy dostaneme různé hodnoty limity pro různé cesty, limita v daném bodě neexistuje. V následujících příkladech vypočítejte limity, případně dokažte, že neexistují.

Nápověda. Pokud po dosažení limitních bodů nevyjde neurčitý výraz, můžeme tyto limitní body dosadit. Pokud vyjde neurčitý výraz, můžeme zkoušet různé postupy:

- (1) rozložit čítecil nebo jmenovatel na součin podle nějakého známého vzorce a pak by se něco mohlo vykrátit;
- (2) rozšířit čítecil i jmenovatel něčím vhodným podle nějakého známého vzorce a pak by se něco mohlo vykrátit;
- (3) $\frac{\text{ohraničený výraz}}{\infty} = 0, 0 \cdot (\text{ohraničený výraz}) = 0$;
- (4) použít vhodnou substituci, po které bychom dostali limitu jedné proměnné;
- (5) převést limitu dvou proměnných do polárních souřadnic

$$x = r \cos \varphi,$$

$$y = r \sin \varphi$$

(je-li v limitě výraz $x^2 + y^2$, polární souřadnice většinou fungují, protože pak dostaneme jednodušší výraz $x^2 + y^2 = r^2 \cos^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi = r^2(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = r^2$, který nezávisí na φ);

- (6) zvolit $y = kx$ (k limitnímu bodu $[0, 0]$ se blížíme po přímkách, v případě jiného limitního bodu je potřeba drobná úprava, aby přímky limitním bodem procházely), $y = kx^2$ (k limitnímu bodu $[0, 0]$ se blížíme po parabolách, v případě jiného limitního bodu je opět potřeba drobná úprava), případně jinak vhodně parametricky nahradit $x = f(k)$ a $y = g(k)$, a pokud bude hodnota limity záviset na parametru k , limita neexistuje; tento postup lze použít pouze k důkazu neexistence limity, nikoliv k výpočtu její hodnoty za předpokladu, že existuje!

Příklad 1. $\lim_{(x,y) \rightarrow (e^2, 1)} \frac{\ln x}{y}$

Příklad 2. $\lim_{(x,y) \rightarrow (4,4)} \frac{\sqrt{x} - \sqrt{y}}{x - y}$

Nápověda. Rozložte jmenovatel na součin podle vzorce pro rozdíl druhých mocnin.

Příklad 3. Dokažte, že $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{-y}{x^2 - y}$ neexistuje.

Nápověda. Zvolte $y = kx^2$, tedy k bodu $[0, 0]$ se budeme blížit po parabolách.

Spojitosť funkcí více proměnných

Funkce je spojitá v bodech, ve kterých má vlastní limitu (tj. limita existuje a je různá od $\pm\infty$), která je rovna funkční hodnotě.

Příklad 4. Určete body, v nichž není spojitá funkce $f(x, y) = \frac{2x-5y}{x^2+y^2-1}$.

Příklad 5. Určete body, v nichž není spojitá funkce

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^3+y^3}{x^2+y^2} & \text{pro } [x, y] \neq [0, 0], \\ 0 & \text{pro } [x, y] = [0, 0]. \end{cases}$$

Směrové derivace

Je-li $u = (u_1, u_2)$ nenulový vektor, pak směrová derivace funkce $f(x, y)$ v bodě $[x_0, y_0]$ ve směru vektoru u je

$$f'_u(x_0, y_0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + u_1t, y_0 + u_2t) - f(x_0, y_0)}{t}.$$

Zřejmě $f'_x = f'_{(1,0)}$ a $f'_y = f'_{(0,1)}$.

Jiný způsob výpočtu směrové derivace (pouze v případě, že funkce je diferencovatelná!): Nejdříve spočítáme obě parciální derivace $f'_x(x_0, y_0)$ a $f'_y(x_0, y_0)$. Pak

$$f'_u(x_0, y_0) = f'_x(x_0, y_0) \cdot u_1 + f'_y(x_0, y_0) \cdot u_2.$$

Pro funkce tří a více proměnných je to analogické.

Příklad 6. Vypočtete směrovou derivaci funkce $f(x, y) = x^3 + 4xy$ v bodě $[2, -1]$ ve směru vektoru $(1, 3)$.

Příklad 7. Vypočtete $f'_u(1, -1)$, kde $f(x, y) = \arctg(x^2 + y^2)$ a $u = (1, 2)$.

Parciální a směrové derivace

Je-li $u = (u_1, u_2)$ nenulový vektor, pak směrová derivace funkce $f(x, y)$ v bodě $[x_0, y_0]$ ve směru vektoru u je

$$f'_u(x_0, y_0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + u_1t, y_0 + u_2t) - f(x_0, y_0)}{t}.$$

Zřejmě $f'_x = f'_{(1,0)}$ a $f'_y = f'_{(0,1)}$.

Jiný způsob výpočtu směrové derivace (pouze v případě, že funkce je diferencovatelná!): Nejdříve spočítáme obě parciální derivace $f'_x(x_0, y_0)$ a $f'_y(x_0, y_0)$. Pak

$$f'_u(x_0, y_0) = f'_x(x_0, y_0) \cdot u_1 + f'_y(x_0, y_0) \cdot u_2.$$

Pro funkce tří a více proměnných je to analogické.

Příklad 8. Dvěma způsoby vypočtete směrovou derivaci funkce $f(x, y) = x^3 + 4xy$ v bodě $[2, -1]$ ve směru vektoru $(1, 3)$.

Příklad 9. S využitím parciálních derivací vypočtete $f'_u(1, -1)$, kde $f(x, y) = \arctg(x^2 + y^2)$ a $u = (1, 2)$.

Diferenciál, aproximace, tečná rovina

Pro funkci jedné proměnné $y = f(x)$ je diferenciál v bodě x_0 dán vztahem $df(x) = f'(x_0)dx$. Pro funkci dvou proměnných $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ platí $df(x, y) = f'_x(x, y)dx + f'_y(x, y)dy$, diferenciál v pevném bodě $[x_0, y_0]$ je

$$df(x_0, y_0) = f'_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f'_y(x_0, y_0)(y - y_0) = f'_x(x_0, y_0)dx + f'_y(x_0, y_0)dy.$$

Pomocí diferenciálu se určí rovnice tečné roviny ke grafu funkce $f(x, y)$ v bodě $[x_0, y_0, f(x_0, y_0)]$:

$$z = f(x_0, y_0) + f'_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f'_y(x_0, y_0)(y - y_0) \quad (= f(x_0, y_0) + df(x_0, y_0)).$$

V okolí bodu dotyku tečné roviny můžeme tedy přibližně vypočítat funkční hodnoty (místo přesné funkční hodnoty vezmeme hodnotu z tečné roviny):

$$f(x, y) \doteq f(x_0, y_0) + df(x_0, y_0) = f(x_0, y_0) + f'_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f'_y(x_0, y_0)(y - y_0).$$

Analogicky se pomocí parciálních derivací prvního řádu určí vztahy pro diferenciál a tečnou nadrovinu funkce více proměnných.

Příklad 10. Pomocí diferenciálu přibližně vypočtete $\sqrt{2,98^2 + 4,05^2}$.

Příklad 11. Pomocí diferenciálu přibližně vypočtete $\operatorname{arctg} \frac{1,02}{0,95}$.

Nápověda. Zvolte funkci $\operatorname{arctg} \frac{x}{y}$, $x_0 = y_0 = 1$.

Příklad 12. Určete rovnici tečné roviny ke grafu funkce $f(x, y) = x^2 + xy + 2y^2$ v bodě $[x_0, y_0, z_0] = [1, 1, ?]$.

Taylorův polynom

Příklad 13. Určete Taylorův polynom druhého stupně funkce $f(x, y) = x^4y + xy^2 + x + 2$ v bodě $[1, 1]$.

Příklad 14. Pomocí Taylorova polynomu 2. stupně přibližně vypočtete $\sqrt{2,98^2 + 4,05^2}$.